

# 高电压试验工程

肖如泉 何金良 编著



清华大学出版社  
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



# 高电压试验工程

肖如泉 何金良 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

### 内 容 摘 要

随着电力工业的发展,高电压试验已是电工技术的重要组成部分。

本书根据我国国家标准 GB311-83、电力工业行业标准 DL/T 596-1996 等有关标准,结合主要的电力设备(如电力变压器、电力电容器、电力电缆、线路绝缘子等),叙述了诸设备绝缘的试验方法,其中包括无破坏型的检查性试验、高压耐压试验、部分运行中的电力设备绝缘的在线状态监测以及接地系统的试验等。

本书可作为电类大学本科、专科生的教材及实验用书,也可供电力系统、电工制造部门的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

高电压试验工程/肖如泉,何金良编著. —北京:清华大学出版社,2000  
ISBN 7-302-04096-6

I. 高… II. ①肖… ②何… III. 高压试验(电)技术 IV. TM83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 75984 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京顺义振华印刷厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:10.75 字数:247 千字

版 次:2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-04096-6/TM·33

印 数:0001~4000

定 价:18.00 元

# 前言

高电压试验工程是高电压电工技术的重要组成部分。

多年来,随着我国电力工业的发展,输电电压已经提高到 500kV,不久还将建立许多 500kV 的输电线路,强大的电能将通过超高压、特高压输电线路传送到很远的大城市、大工业基地,所以,电工制造部门要造出各种高压的电力设备,电力运行部门要使电力设备正常运行,所有这些,都要有高电压的试验手段,方能保证电力系统的正常运行。

本书根据我国国家标准 GB311/83(高压输变电设备的绝缘配合,高电压试验技术),国家电力行业标准 DL/T 596—1996(电力设备预防性试验规程)及土壤电阻率和接地电阻测量的有关标准,叙述了高压电力设备绝缘的试验方法,其中包括无破坏型的检查性试验和高压耐压试验。为了更好地论述高电压试验方法,本书将以部分电力设备(如电力变压器、电力电容器、电力电缆、线路绝缘子等)为例,按有关标准,论述其试验原理、方法,试验所用的设备、线路、仪器、仪表,以及试验结果的判断等。

作者根据高电压试验的特点并结合对高电压试验的一些体会,认为高电压试验在电力工业中有着非常重要的作用,要进行高压试验必须掌握以下要点:

- (1) 高电压试验是高电压技术的基础与关键。
- (2) 高电压试验时,安全是最重要的。
- (3) 进行高电压试验,必须注意理论与实际相结合,还必须要有严谨踏实的工作作风。
- (4) 高电压试验还应进一步改进技术,提高水平。

本书第 1~4 章由肖如泉编写,第 5~6 章由何金良编写。在编写本书的过程中,作者参考了有关国家标准、多种教材及资料。

由于作者水平有限,书中会有许多不当之处,敬请读者、专家指正。

作者

2000 年 10 月

# 目 录

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 前 言 .....                                         | 1   |
| 第 1 章 绪论 .....                                    | 1   |
| 1.1 高电压试验的意义 .....                                | 1   |
| 1.2 高电压试验的安全 .....                                | 5   |
| 1.3 高电压试验的分类 .....                                | 7   |
| 1.4 高电压试验的设备和测量 .....                             | 8   |
| 第 2 章 无破坏型的检查性试验 .....                            | 9   |
| 2.1 电力电缆的试验 .....                                 | 10  |
| 2.2 电力变压器的部分试验 .....                              | 18  |
| 2.3 绝缘内部局部放电的测量 .....                             | 31  |
| 2.4 绝缘油的试验 .....                                  | 41  |
| 2.5 电缆波阻抗的测量 .....                                | 53  |
| 第 3 章 电气设备绝缘的耐压试验 .....                           | 58  |
| 3.1 工频交流耐压试验 .....                                | 58  |
| 3.2 沿面放电及绝缘子工频干、湿闪络电压的测定 .....                    | 64  |
| 3.3 空气间隙的放电试验 .....                               | 73  |
| 3.4 雷电冲击电压波的产生和测量 .....                           | 79  |
| 3.5 冲击电压的试验 .....                                 | 88  |
| 3.6 冲击电流试验与测量 .....                               | 96  |
| 第 4 章 电气设备绝缘的在线状态监测 .....                         | 105 |
| 4.1 绝缘各部分温度的测量 .....                              | 106 |
| 4.2 绝缘油溶解气体的色谱分析 .....                            | 108 |
| 4.3 绝缘内部局部放电的在线状态监测 .....                         | 108 |
| 4.4 绝缘介质的介质损耗因数( $\tan\delta$ )与泄漏电流的在线状态监测 ..... | 110 |
| 第 5 章 土壤电阻率的测量 .....                              | 113 |
| 5.1 概述 .....                                      | 113 |

|              |                         |            |
|--------------|-------------------------|------------|
| 5.2          | 电阻率的测量方法 .....          | 114        |
| 5.3          | 四电极法测量土壤电阻率 .....       | 119        |
| 5.4          | 深度电测法的现场应用 .....        | 126        |
| 5.5          | 电阻率测量数据的分析方法 .....      | 127        |
| <b>第 6 章</b> | <b>接地电阻的测量</b> .....    | <b>134</b> |
| 6.1          | 电力系统对接地电阻的要求 .....      | 134        |
| 6.2          | 测量小型接地装置接地电阻的简单方法 ..... | 137        |
| 6.3          | 三极法测量接地电阻的原理 .....      | 138        |
| 6.4          | 利用三极法测量接地电阻 .....       | 145        |
| 6.5          | 影响三极法测量结果的因素 .....      | 153        |
| 6.6          | 四极法测量接地电阻 .....         | 156        |

## 第 1 章

---

# 绪 论

高电压技术以其电压很高的特殊性形成了一门独特的学科,又以其应用的广泛性,在电力工程、医疗器械、高新科技、建筑、邮电、计算机、家用电器等领域得到了广泛的应用。而且高电压试验技术与各学科,尤其是与电力工程、电子工程紧密相关。

本书将以电力工程为主论述高电压的试验方法、测量手段和绝缘性能(主要以电力设备为对象)的判断方法。

高电压试验技术的著作有多种版本,各有其特点。本书将根据实际的试验方法、试验线路和有关的国家标准来论述电气设备绝缘的试验原理、绝缘优劣的判断方法。具体的电气设备有:电力变压器、电力电缆、电力电容器、高压线路绝缘子等。

电力系统变电站及输电线路杆塔接地装置是确保电力系统安全运行的保证,另外也是确保人身安全的保障,符合要求的接地装置能将危险的接触电压和跨步电压限制在安全范围。进行接地装置的设计时需要了解土壤的地质结构,即要进行土壤电阻率的测量;考察设计好的接地装置是否达到要求,运行多年的接地装置的接地电阻是否发生变化,即需要对接地装置进行接地电阻测量。因此本书包括了土壤电阻率和接地电阻测量的有关内容。

通过对本书的学习,可掌握高压电力设备绝缘的试验方法、有关标准和高压试验的安全技术等,这对电工设备制造部门的技术人员来说是必备的知识;对电力部门的科技人员来说,更是非常重要的,因为电力设备在运行中,其绝缘的状态如何,能否保证正常运行,是电力部门运行人员最关心的事。因此,必须掌握电力设备绝缘的各种试验方法,如离线测试的预防性试验方法、在线监测的方法等。所以,本书对电力部门中负责绝缘监督,发、变电站地网及输电线路杆塔接地测试与设计的人员,有着很好的参考作用。

### 1.1 高电压试验的意义

高电压试验是高电压技术的基础与关键。任何高压电力设备都要进行高压试验,否则不能投入电力线路运行。即使是经过试验已投入运行的设备,为了安全、正常的供电还要进行经常性的预防性试验,保证在各种环境条件,如晴天、下雨、下雪、打雷的天气或很

污浊的情况下,都能正常供电;而且在工作电压、大气过电压及内部(电力系统)过电压下也要正常运行。

为了进一步了解高压试验的意义,必须进一步了解高压试验的对象和有关标准。

### 1. 高电压试验的对象

高电压试验,主要是对电气设备绝缘进行试验,如对线路绝缘子的绝缘试验,是在绝缘子上、下金具间施加各种高压(工频高压、冲击高压),在规定的电压下不发生击穿、闪络或异常时,该绝缘子被视为合格的绝缘子,可以投入运行;又如电力变压器的绝缘试验,是在电力变压器的高压部位与低压部位、铁心与外壳之间施加交流或冲击电压,在规定的电压下不发生击穿、闪络或异常时,该变压器可视为合格的变压器。

从以上两例可以看出,所谓高压绝缘的试验,就是对高、低电位之间的绝缘介质(如绝缘子两金具之间的瓷介质,变压器高、低压部位的主、纵绝缘——油纸介质)的试验。从电容器的定义可知,两电极间有电介质存在时,就形成了一电容器。所以,实际上,高压绝缘的试验,就是对电容负荷的试验。

### 2. 高压试验的标准

电力设备多种多样,前面也已提到,各种设备都有它自身的试验标准。但从高压的角度来看,一般可按电压等级来规定其标准。在某一电压等级下,作用于电力设备上的最大电压有以下几种。

(1) 最高工作电压,约 $(1.10 \sim 1.15)U_N$  ( $U_N$  为额定电压)。这样,线路上出现的最高工作相电压的峰值为

$$U_m = \frac{(1.10 \sim 1.15)U_N \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

(2) 雷电过电压。大气中的雷电现象将会给电力设备造成很大危害,而这种现象又是经常发生的,且其能量很大,所以,各种电压等级的电力设备都要有一定的抗雷击的能力。经试验研究,规定雷电过电压的标准波形为 $\pm 1.2/50\mu s$ ,还有截断波形。试验的峰值可按表 1.1.1 中的规定,其中极性以负极性居多。

(3) 操作过电压。在电力系统内部,负荷的投入、切断使系统参数发生变化时,会引起电磁能量的转化而造成电压的升高。这种过电压比雷电更为频繁,对电力设备危害也很大,其试验的标准波形为 $\pm 250/2\ 500\mu s$ , $\pm 100/2\ 500\mu s$  或 $\pm 500/2\ 500\mu s$ 。

通过了解电力设备上将要承受什么样的电压、过电压,可以规定试验电压。但在进行高电压耐压试验以前,往往先要对电力设备进行检查性的试验。检查性试验相当于对电力设备的绝缘进行初步的诊断,看其绝缘有无明显的故障。检查性试验的内容很多,大致可归纳如下:

(1) 外观检查。零配件是否齐全,有无碰伤等现象,有无漏油现象等。

(2) 无破坏型试验。即对电力设备施加不太高的电压(无破坏型电压),测量一组数据,若不超过规定,可认为该设备可进行高电压的耐压试验;否则就不能进行高电压的试验。其试验内容有:绝缘电阻的测量、吸收比计算、泄漏电流、介质损耗因数( $\tan\delta$ )、局部

放电、变压器油性能的测试等。具体测试方法和有关标准将在以后的章节中予以叙述。

对于高电压的耐压试验标准,我国国家标准 GB311/83(高压输变电设备的绝缘配合和高电压试验技术),我国电力行业标准 DL/T 596—1996(电力设备预防性试验规程),对电力设备的试验有明确的规定。在不同的场合,对试验电压的数值上还有一些特殊的规定,如验收试验标准等。这可以根据具体情况在有关规定中查得,如试验与其规定不符,则易造成电力设备的损坏,所以不同场合试验电压值是有差别的。下面将根据我国国家标准 GB311/83,对输变电设备试验标准分别列表如表 1.1.1~表 1.1.4 所示。

表 1.1.1 3kV~500kV 输变电设备的 1 分钟耐受电压(有效值)

kV

| 额定电压 | 最高工作电压 | 内、外绝缘(干试与湿试) |         |                        |            | 母线支持绝缘子 |     |
|------|--------|--------------|---------|------------------------|------------|---------|-----|
|      |        | 变压器          | 并 联电抗器  | 耦合电容器、高压电抗器、电压互感器和穿墙套管 | 高压电力电缆     | 湿试      | 干试  |
|      |        |              |         |                        |            |         |     |
| 3    | 3.5    | 18           | 18      | 18                     |            | 18      | 25  |
| 6    | 6.9    | 23/25        | 23/25   | 23                     |            | 23      | 32  |
| 10   | 11.5   | 30/35        | 30/35   | 30                     |            | 30      | 42  |
| 15   | 17.5   | 40/45        | 40/45   | 40                     | 40/45      | 40      | 57  |
| 20   | 23.0   | 50/55        | 50/55   | 50                     | 50/55      | 50      | 68  |
| 35   | 40.5   | 80/85        | 80/85   | 80                     | 80/85      | 80      | 100 |
| 63   | 69.0   | 140          | 140     | 140                    | 140        | 140     | 165 |
| 110  | 126.0  | 185/200      | 185/200 | 185/200*               | 185/200    | 200     | 265 |
| 220  | 252.0  | 360          | 395     | 360                    | 360        | 360     | 450 |
|      |        | 395          |         | 395                    | 395<br>460 | 395     | 495 |
| 330  | 363.0  | 460          | 510     | 460                    | 460        |         |     |
|      |        | 510          |         | 510                    | 510<br>570 |         |     |
| 500  | 550.0  | 630          | 680     | 630                    | 630        |         |     |
|      |        | 680          |         | 680<br>740             | 680<br>740 |         |     |

注:斜线(/)左边的数值适用于该类设备的外绝缘,斜线右边的数值适用于该类设备的内绝缘。

带“\*”的数值仅用于电磁式电压互感器的内绝缘。

表 1.1.2 3kV~500kV 输变电设备的雷电冲击耐受电压

kV

| 额定电压  | 最高工作电压 | 标准雷电冲击全波(内、外绝缘) |          |             |                |                |                | 标准雷电冲击截波   |
|-------|--------|-----------------|----------|-------------|----------------|----------------|----------------|------------|
|       |        | 变压器             | 并 联电抗器   | 耦合电容器、电压互感器 | 高压电力电缆         | 高压电缆           | 母线支柱绝缘子、穿墙套管   | 变压器类设备的内绝缘 |
| (有效值) |        | (峰值)            |          |             |                |                |                |            |
| 3     | 3.3    | 40              | 40       | 40          |                | 40             | 40             | 45         |
| 6     | 6.9    | 60              | 60       | 60          |                | 60             | 60             | 65         |
| 10    | 11.5   | 75              | 75       | 75          |                | 75             | 75             | 85         |
| 15    | 17.5   | 105             | 105      | 105         | 105            | 105            | 105            | 115        |
| 20    | 23.0   | 125             | 125      | 125         | 125            | 125            | 125            | 140        |
| 35    | 40.5   | 185/200*        | 185/200* | 185/200*    | 200            | 185            | 185            | 220        |
| 63    | 69.0   | 325             | 325      | 325         | 325            | 325            | 325            | 360        |
| 110   | 126.0  | 450/480*        | 450/480* | 450/480*    | 450<br>550     | 450            | 450            | 530        |
| 220   | 252.0  | 850             |          | 850         | 850<br>950     | 850            | 850            | 935        |
|       |        | 950             | 950      | 950         | 1 050          | 950            | 950            | 1 050      |
| 330   | 363.0  | 1 050           |          | 1 175       | 1 050<br>1 175 | 1 050          | 1 050          | 1 175      |
|       |        | 1 175           | 1 175    | 1 300       | 1 300          | 1 175          | 1 175          | 1 300      |
| 500   | 550.6  | 1 425           | 1 550    | 1 550       | 1 425<br>1 550 | 1 425<br>1 550 | 1 425<br>1 550 | 1 550      |
|       |        | 1 550           | 1 675    | 1 675       | 1 675          | 1 675          | 1 675          | 1 675      |

注：带“\*”的数值仅用于变压器类设备的内绝缘。

对高压电力电缆，表中所列耐受电压值是指在热状态下的耐受电压值。其雷电冲击耐受电压值应不超过相应电压等级中所列最高值。如需要更高的绝缘水平，可用更高电压等级的电缆。

表 1.1.3 330kV~500kV 输变电设备操作冲击耐受电压

kV

| 额定电压  | 最高工作电压 | 内、外绝缘(干试与湿试)(峰值) |                      |
|-------|--------|------------------|----------------------|
| (有效值) |        | 母线支柱绝缘子          | 本标准中除母线支柱绝缘子外,其他所有设备 |
| 330   | 363    | 850              | 850                  |
|       |        | 950              | 950                  |
| 500   | 550    | 1 175            | 1 050                |
|       |        | 1 240            | 1 175                |

注：电缆的操作冲击试验在热状态下进行。500kV 并联电抗器要采用保护水平能够配合的避雷器。

表 1.1.4 电力变压器中性点绝缘水平

kV

| 额定电压  | 最高工作电压 | 中性点接地方式 | 标准雷电冲击<br>全波和截波 | 1 分钟工频耐受电压(内、<br>外绝缘,干试与湿试) |
|-------|--------|---------|-----------------|-----------------------------|
| (有效值) |        |         | (峰值)            | (有效值)                       |
| 110   | 126    |         | 250             | 95                          |
| 220   | 252    | 死接地     | 185             | 85                          |
|       |        | 不死接地    | 400             | 200                         |
| 330   | 363    | 死接地     | 180             | 85                          |
|       |        | 不死接地    | 550             | 230                         |
| 500   | 550    | 死接地     | 180             | 85                          |
|       |        | 经小阻抗接地  | 325             | 140                         |

注:特殊中性点的绝缘水平,由用户和制造厂协商确定。

## 1.2 高电压试验的安全

高压试验的安全是非常重要的。

对人来说,流过人体的电流达数十毫安时,人就会死亡。所以,凡有高压设备的场所都要有足够的安全距离。在实际工作中,要有严格的管理制度、操作规程。进行高压试验时,因为电力设备的试验电压比正常工作电压还要高许多倍,所以安全问题更为突出。另外,做高压试验时,不仅对人身安全要特别重视,也要重视试验设备的安全,因为试验仪器设备都比较昂贵。

为保证安全,应该在思想上对安全工作高度重视,各单位要经常进行安全教育,开展安全知识的学习,树立安全第一的观点。除思想重视以外,试验人员必须掌握必要的安全技术。下面介绍高压试验的安全技术。

### 1. 高压试验的基本安全技术

(1) 做高压试验,必须要有一定的安全措施,包括遮栏、联锁、接地和安全距离等。在加高压以前,一定要进行细致的检查。

(2) 按高压试验规则,要呼叫口令,并按试验操作规程进行。

(3) 试验者必须熟练地使用安全工具,如接地杆(放电杆)。

### 2. 高压试验中的安全操作规程

试验的操作规程包括四个部分,即试验前的工作、试验程序、试验后的整理以及其他注意事项。

#### (1) 试验前的工作

① 组织。高压试验必须要有严密的组织,要设试验组长及安全监护人,各项操作要

有专人负责。

② 认真准备。参加试验的人员必须做好试验前的准备工作,包括了解被试品、试验设备、试验标准、试验方法、测量方法等。

③ 试验前的检查。具体有

- 检查设备、仪器、仪表是否正常,如有损坏,应及时更换。
- 检查接线是否正确。
- 安全距离是否符合规定,带高压的部分与周围物体的距离必须符合表 1.2.1 的规定。

表 1.2.1 试验电压—安全距离表

| 电压/kV   | 距离/cm |     |
|---------|-------|-----|
|         | 交流或直流 | 冲击  |
| 100 以下  | 30    | 30  |
| 100~200 | 60    | 60  |
| 500     | 180   | 180 |
| 1 000   | 350   | 300 |

- 接地和接地杆。

接地必须可靠,固定设备的地线可用扁钢、铜条或铝条做成。

接地杆上的接地线需用多股裸线牢固地接在地线带上。加高压前,应将接地杆从高压端取下。凡不参与试验的设备,外壳均需接地,尤其是电容器,应将电容器短路接地。

• 遮栏与联锁。做高压试验,必须有遮栏。对于专用试验室,应设置固定接地的金属网或板(铁板、铁网最好)作为永久性的遮栏。对于临时性的现场试验,也应有临时设置的明显的“高压危险”、“不可靠近”标志的围栏。任何人必须在遮栏外,并不得向试区内探头、伸手。

固定的高压试验室,还应装有必要的联锁装置,如门联锁、零位联锁等。调压设备应处于零位。

• 防止反击的保护应完好。当高压试验中有放电或进行冲击电压、冲击电流试验时,应装设防止反击的保护装置。一般可用电容、非线性电阻等保护,也可用过电压保护器(浪涌抑制器)来保护。

## (2) 试验程序

① 做高压试验必须严肃、认真、精力集中。高压操作者的手不要离开跳闸按钮,注意监视电表及现场,不得擅自离岗。试验时,不得谈笑或进行其他的工作,假若要讨论问题,应先跳闸,暂停试验后进行。

② 呼叫口令。在进行几项重要操作时,操作者要分别呼叫“高压合闸”、“放电”、“去掉接地杆”等口令,当监护人员同意并重复上述口令后,方能进行具体操作。

③ 升压时,必须从零均匀缓慢地升压;做完试验,应使调压器退回零位。当试品放电、击穿或加压过程中出现异常现象时,应立即跳闸,随即将调压器退回零位。当对电气

设备进行耐压试验时,若试验正常,试验完毕应先将调压器退回零位后再跳闸。

④ 故障处理。当试验中发生故障时,应立即跳闸,随即将调压器退回零位。若为人身事故,应立即全力抢救,即进行人工呼吸;若酿成火灾,应用灭火器扑灭或报火警。

⑤ 放电。试验完毕或更换试件时,应切断电源,将调压器退回零位,并用接地杆对高压部位放电。当对电容器放电时,应先经电阻对电容器放电,然后再短路放电。

#### (3) 试验后

① 试验完毕,应对电容器、高压部位充分放电,并将接地杆挂在高压设备上。

② 清理场地,保持试验场地整洁。

#### (4) 其他注意事项

① 试验时,不得吸烟、点火。

② 发烧、头晕、精神不佳、精神失常者,不得进行试验。

③ 高压试验不得少于两人。

### 3. 高压试验其他安全问题

当试验电压很高且持续时间较长时,还应注意一些安全问题,如电磁场对人体的作用、高压放电时的辐射、高压试验时产生的臭氧。

## 1.3 高电压试验的分类

电气设备在不同的场合要进行各种不同的试验,一般可归纳为电气设备制造部门的试验和电气设备运行中的试验。

#### 1. 按电气设备制造厂生产的角度来分类

(1) 检查性试验:在生产过程中,对成品、半成品的无破坏型的试验。

(2) 耐压试验:制造厂生产出的产品,必须要进行耐压试验。其试验方法和试验标准必须符合国家标准的规定。

(3) 型式试验:制造厂新设计、新研制、定型或改型的产品,必须要进行的全部性能的试验。

(4) 研究性试验:制造厂为设计新产品改用新工艺而进行的研究性试验。

#### 2. 按电力部门运行的角度来分类

(1) 验收试验:电气设备从制造厂运输到运行部门后,运行前进行的检查性和耐受试验。

(2) 预防性试验:电气设备在运行中对其绝缘质量进行定期的检查试验。

① 离线测试:定期将电气设备退出运行,对其绝缘质量进行测试。其标准可参见 DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程。

② 在线监测:为提高供电的可靠性,随时监测电力设备绝缘情况,可在设备运行的情况下对其绝缘进行监测。

(3) 研究性试验:从运行角度出发,开展一些对绝缘监督、改进产品运行所进行的研究性的试验。

### 3. 按试验方法分类

从高压试验的对象可知,主要是对绝缘介质进行试验。绝缘介质包括气体、液体、固体或几种介质组合的绝缘。对绝缘介质,可看成一等值的电容性的试品。因此,其试验方法可归纳为:

- (1) 无破坏型的检查试验:前面已论述。
- (2) 耐压试验:由于电压高,容易造成电气设备的破坏,耐压试验一般都在检查性试验以后进行。
- (3) 在运行电压下的在线监测:随时可以监测电气设备的绝缘状态。
- (4) 研究性试验:无论制造单位、运行单位都要进行的新产品、新工艺的研究。为研究而进行的试验。

## 1.4 高电压试验的设备和测量

为进行高压试验,必须要有一系列的试验设备和测量方法。根据电力系统经常出现的电压和国家标准所作出的规定,电力设备一般要进行交流耐压试验、直流耐压试验和冲击试验,所以要有相应的测量设备:

- (1) 交流试验及测量装置,一般频率为 50Hz。
- (2) 直流试验及测量装置。
- (3) 冲击试验及测量装置,又分为冲击电压发生器及测量系统和冲击电流发生器及测量系统。
- (4) 无破坏型试验的测量仪器。

## 第 2 章

# 无破坏型的检查性试验

无破坏型试验一般不会使绝缘损坏,但能测试到绝缘的情况,如变压器受潮情况、绝缘子有无破裂等。这些试验方法在生产制造部门和运行部门都是适用的,在电力部门被视为预防性试验方法,试验项目如表 2.0.1 所示。

表 2.0.1 无破坏型检查试验项目

| 序号 | 试验名称                        | 能发现的缺陷                                       | 不能发现的缺陷              |
|----|-----------------------------|----------------------------------------------|----------------------|
| 1  | 绝缘电阻的测量                     | 贯通的集中性缺陷<br>整体受潮或有贯通的受潮部分                    | 未贯通的集中性缺陷<br>绝缘整体老化  |
| 2  | 泄漏电流的测量                     | 贯通的集中性缺陷<br>整体受潮或有贯通的受潮部分以及<br>一些未完全贯通的集中性缺陷 | 未贯通的集中性缺陷<br>绝缘整体的老化 |
| 3  | 吸收比试验                       | 受潮贯通的集中性缺陷                                   | 未贯通的集中性缺陷<br>绝缘整体的老化 |
| 4  | 测介质损耗因数<br>( $\tan\delta$ ) | 整体受潮、老化、被试绝缘体体积<br>小时的贯通及未贯通缺陷               | 被试绝缘体体积大时的集中性<br>缺陷  |
| 5  | 测量绝缘内部的<br>局部放电             | 局部或多处的局部放电缺陷                                 | 虽有缺陷但不产生局部放电、<br>受潮  |
| 6  | 绝缘油的试验                      | 气相色谱分析可测出持续性的局<br>部过热、局部放电缺陷                 | 导致突然发生匝间短路的缺陷        |

预防性试验是运行部门保证设备安全运行的重要措施。通过试验,掌握电气设备绝缘的情况,及早发现缺陷,从而进行相应的维护与检修,防止运行中设备在工作电压或过电压作用下突然击穿造成的停电甚至发生严重损坏设备的事故。

电气设备的绝缘缺陷通常有两种情况:一种是制造时潜伏下来的;另一种是运行中在各种外界因素作用下发展起来的。外界作用有工作电压、过电压、大气条件的影响(如潮湿)、机械力、热、化学作用等。当然这些外界影响程度也和制造质量有关。电气设备在外界作用下,绝缘逐渐劣化也是不可避免的。绝缘监督人员经常对电气设备进行预防性试验,可发现许多缺陷,以减少突发事故的发生,保证安全供电。

绝缘的缺陷可分为两大类:第一类是集中性缺陷,例如悬式绝缘子瓷质开裂、发电机

绝缘局部磨损、破裂,电力电缆由于局部气隙在工作电压下发生局部放电逐步损坏绝缘及其他的机械损伤、局部受潮等;第二类是分布性缺陷,指电气设备整体绝缘性能下降,例如电机、变压器、套管等绝缘中有机材料的受潮、老化、变质等。绝缘内部有了上述缺陷后,其特性要发生一定的变化,可通过一些电压不高的试验把隐藏的缺陷检查出来。预防性试验就是这些检查试验。生产制造部门也同样使用这些对绝缘的试验方法。

为了更好地说明这些试验,本书将通过对几种类型的电力设备(电力变压器、电力电缆、电力电容器、线路绝缘子等)的试验来介绍其试验方法。

## 2.1 电力电缆的试验

电力电缆的试验包括绝缘电阻、泄漏电流的测量及直流耐压的试验。电力电缆是电力设备中传送和分配电能的重要设备之一,它一般埋设于土壤中或敷于室内、沟道、隧道中,不用杆塔,占地少,传输性能稳定,气候条件和周围环境影响小,且较少维护,安全性较高。对于电力的传输,电缆还可向高电压、大容量及低温、超导方向发展。

### 2.1.1 电力电缆的品种及型号

电力电缆的品种和型号如表 2.1.1 中所示。

表 2.1.1 电力电缆的品种及型号

| 绝缘类型    | 电缆名称                   | 电压等级<br>/kV | 允许最高工作温度<br>/℃                              | 代表产品型号                         |
|---------|------------------------|-------------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| 油浸纸绝缘电缆 | 1. 普通粘性浸渍电缆统包型分相铅(铝)包型 | 1~35        | 1~3kV 80<br>6kV 65<br>10kV 60<br>20~35kV 50 | ZLL,ZL,ZLQ,ZQ<br>ZLLF,ZLQF,ZQF |
|         | 2. 不滴流电缆统包型分相铅(铝)包型    | 1~35        | 65~80                                       |                                |
|         | 3. 自容式充油电缆             | 110~750     | 80~85                                       | ZLQD,ZQD                       |
|         | 4. 钢管充油电缆              | 110~750     | 80~85                                       | ZLLDF,ZQDF                     |
|         | 5. 钢管压气电缆              | 110~220     | 80                                          | ZQCY                           |
|         | 6. 充气电缆                | 35~110      | 75                                          |                                |
| 塑料绝缘电缆  | 7. 聚氯乙烯电缆              | 1~10        | 65                                          | VLV,VV                         |
|         | 8. 聚乙烯电缆               | 6~220       | 70                                          | YLV,YV                         |
|         | 9. 交联聚乙烯电缆             | 6~220       | 10kV 及以下 90<br>20kV 及以上 80                  | YJLV,YJV                       |
| 橡皮绝缘电缆  | 10. 天然丁苯橡皮电缆           | 0.5~6       | 65                                          | XLQ,XQ,XLV                     |
|         | 11. 乙内橡皮电缆             | 1~35        | 80~85                                       | XV,XLBF,XLF                    |
|         | 12. 丁基橡皮电缆             | 1~35        | 80                                          |                                |
| 气体绝缘电缆  | 13. 压缩气体绝缘电缆           | 220~500     | 90                                          |                                |
| 新型电缆    | 14. 低温电缆               |             |                                             |                                |
|         | 15. 超导电缆               |             |                                             |                                |

### 2.1.2 部分电力电缆的电气性能和结构

电力电缆种类很多,限于篇幅,本节仅介绍普通粘性浸渍电缆和滴流电缆的性能,如表 2.1.2 所示。

表 2.1.2 普通粘性浸渍电缆和滴流电缆的电气性能的要求

| 项目                                                                |                         | 普通粘性浸渍电缆                   |                              |       |         |       |         |       | 滴流电缆 |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|------|-------|-------|-------|
| 导线直流电阻系数<br>( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )<br>(20℃时,不大于) |                         | 0.018 4(铜)<br>0.031 0(铝)   |                              |       |         |       |         |       | 同左   |       |       |       |
| 每公里绝缘电阻<br>M $\Omega$<br>(20℃时,不小于)                               |                         | 50(1kV~3kV)<br>100(6kV及以上) |                              |       |         |       |         |       | 同左   |       |       |       |
| 工频耐压                                                              | 出厂试验                    | 额定电压/kV                    | 1                            | 3     | 6       | 10    | 20      | 35    | 6    | 10    | 35    |       |
|                                                                   |                         | 试验电压/kV                    | 3.5                          | 10    | 16      | 25    | 50      | 88    | 12   | 20    | 68    |       |
|                                                                   |                         | 试验时间/min                   | 10kV及以下电缆单芯 20,2芯 15,3~4芯 10 |       |         |       |         |       | 15   | 15    | 15    |       |
|                                                                   |                         |                            | 20kV~35kV 电缆                 |       |         |       |         |       |      |       |       |       |
|                                                                   | 型式试验                    | 额定电压/kV                    | 6                            | 10    |         | 20    |         | 35    | 6    | 10    | 35    |       |
|                                                                   |                         | 试验电压/kV                    | 24                           | 40    |         | 60    |         | 100   | 15   | 24    | 81    |       |
|                                                                   |                         | 试验时间/h                     | 4                            | 4     |         | 4     |         | 4     | 4    | 4     | 4     |       |
|                                                                   | $\tan\delta^{\text{①}}$ | 额定电压/kV                    | 6                            | 10    |         | 20    |         | 35    | 35   |       |       |       |
|                                                                   |                         | 测量电压/kV                    | 12                           | 5     | 20      | 10    | 40      | 17.5  | 65   | 14    | 14~34 | 34~54 |
|                                                                   |                         | $\tan\delta$ (不大于)         | 0.015                        | 0.008 | 0.014   | 0.008 | 0.01    | 0.008 | 0.01 | 0.008 |       |       |
| $\Delta\tan\delta^{\text{②}}$ (不大于)                               |                         | 0.008<br>(4kV~12kV)        | 0.006                        |       | 0.002 5 |       | 0.002 5 |       |      | 0.004 | 0.003 |       |

①  $\tan\delta$  为电缆的介质损耗角正切值,下同。

②  $\Delta\tan\delta$  为  $\tan\delta$  随试验电压增加后的增值,下同。

电力电缆在运行中,情况比较复杂,如存在过电流、过电压的作用、机械力的影响等,故运行中的电缆经过一段时间后,要进行一些检查性试验,即预防性试验。这样可以及早发现电缆的缺陷,采取补救措施。我国对电力电缆的预防性试验有明确的确定,在电力行业 DL/T 596—1996 电力设备预防性试验规程中对各种电缆的预防性试验都有规定。本书以纸绝缘电力电缆线路为例,说明电力电缆的预防性试验方法。纸绝缘电力电缆包括粘性油纸绝缘电力电缆和滴流油纸绝缘电力电缆线路。其试验项目、周期和要求如表 2.1.3,表 2.1.4 所示。

表 2.1.3 纸绝缘电力电缆线路的试验项目、周期和要求

| 序号 | 项 目    | 周 期                     | 要 求                                                                                                   | 说 明                                                                                   |
|----|--------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 绝缘电阻   | 在直流耐压试验之前进行             | 自行规定                                                                                                  | 额定电压 0.6/1kV、电缆用 1 000V 兆欧表, 0.6/1kV 以上电缆用 2 500V 兆欧表(6/6kV 及以上电缆也可用 5 000V 兆欧表)      |
| 2  | 直流耐压试验 | ① 1~3 年<br>② 新作终端或接头后进行 | ① 试验电压值按表 2.1.3 规定<br>加压时间 5min, 不击穿<br>② 耐压 5min 时的泄漏电流值不应大于耐压 1min 时泄漏电流值<br>③ 三相之间的泄漏电流不平衡系数不应大于 2 | 6/6kV 及以下电缆的泄漏电流小于 $10\mu\text{A}$ , 8.7/10kV 电缆的泄漏电流小于 $20\mu\text{A}$ 时, 对不平衡系数不作规定 |

表 2.1.4 纸绝缘电力电缆的直流耐压试验电压

kV

| 电缆额定电压 $U_N/U$ | 直流试验电压 |
|----------------|--------|
| 1.0/3          | 12     |
| 3.6/6          | 17     |
| 3.6/6          | 24     |
| 6/6            | 30     |
| 6/10           | 40     |
| 8.7/10         | 47     |
| 21/35          | 105    |
| 26/35          | 130    |

对电缆的主绝缘作直流耐压试验或测量绝缘电阻时,应分别在每一相上进行。对一相进行试验或测量时,其他两相导体、金属屏蔽或金属套和铠装层一起接地。

对额定电压为 0.6/1kV 的电缆线路,可用 1 000V 或 2 500V 兆欧表测量导体对地绝缘电阻,代替直流耐压试验。

进行直流耐压试验时,应在试验电压升至规定值后 1min 以及加压时间达到规定时测量泄漏电流。泄漏电流值和不平衡系数(最大值与最小值之比)只作为判断绝缘状况的参考,不作为是否能投入运行的判据。但如发现泄漏电流与上次试验值相比有很大变化,或泄漏电流不稳定、随试验电压的升高或加压时间的增加而急剧上升时,应查明原因。如系终端头表面泄漏电流或对地杂散电流等因素的影响,则应加以消除;如怀疑电缆线路绝缘不良,则可提高试验电压(以不超过产品标准规定的出厂试验直流电压为宜)或延长试验时间,确定能否继续运行。

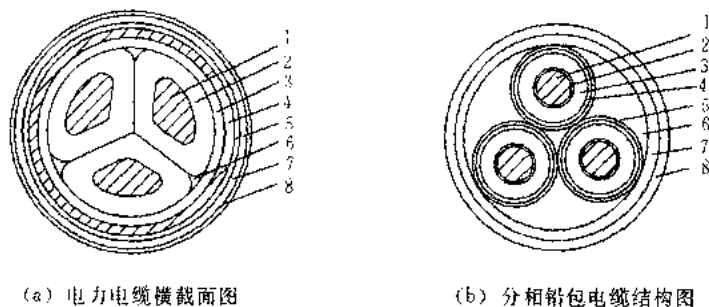
耐压试验后,使导体放电时,必须通过每千伏约  $80\text{k}\Omega$  的限流电阻反复几次放电直至无火花后,才允许直接接地放电。

以上是对电力电缆线路的要求,在测量电缆的泄漏电流时,可参考油浸纸绝缘电力电缆长度为 250m 及以下时的泄漏电流参考值(1985 年规程),如表 2.1.5 所示。

表 2.1.5 油浸纸绝缘电力电缆长度为 250m 及以下时的泄漏电流参考值

| 电缆类型             | 工作电压/kV | 试验电压/kV | 泄漏电流/ $\mu\text{A}$ | 说 明                                                                                                                                                          |
|------------------|---------|---------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 三<br>芯<br>电<br>缆 | 35      | 140     | 85                  | ① 微安表接在高压侧或采用消除杂散电流影响的其他接线方式<br>② 测量泄漏电流时,一般应在直流耐压过程中于 0.25,0.5,0.75,1.0 倍试验电压下各停留 1min,读取泄漏电流值(在试验电压下应读取 1min 及 5min 泄漏电流值)<br>③ 电缆长度超过 250m 时,泄漏电流可按长度适当增加 |
|                  | 20      | 80      | 80                  |                                                                                                                                                              |
|                  | 10      | 50      | 50                  |                                                                                                                                                              |
|                  | 6       | 30      | 30                  |                                                                                                                                                              |
|                  | 3       | 15      | 15                  |                                                                                                                                                              |
| 单<br>芯<br>电<br>缆 | 10      | 50      | 70                  |                                                                                                                                                              |
|                  | 6       | 30      | 45                  |                                                                                                                                                              |
|                  | 3       | 15      | 30                  |                                                                                                                                                              |

电力电缆的结构(油纸电缆)如图 2.1.1 所示。



- 1—导线; 2—铅绝缘; 3—带绝缘; 1—导线; 2—导线屏蔽; 3—绝缘层;  
 4—金属护套; 5—内衬垫; 6—填料; 4—绝缘屏蔽; 5—铅护套; 6—内衬垫及填料;  
 7—铠装层; 8—外被层; 7—铠装层; 8—外被层

图 2.1.1 油纸电力电缆横截面图

### 2.1.3 电力电缆的试验

在电力电缆的试验中大都进行绝缘电阻、泄漏电流的测量、直流耐压试验及交流耐压试验。由于电力电缆相当于一同轴圆柱形电容器,当电缆长度越长时,其电容量越大。因此,做交流耐压试验时电流会很大。所以,除特殊情况外,电力电缆不进行交流耐压试验。

#### 1. 绝缘电阻的测量

绝缘电阻一般可用兆欧表进行测量。兆欧表俗称摇表,因为摇表内部的直流电源是靠手摇发电机发出的。我国的兆欧表有几种电压等级,用于低压线路的摇表有 500V、1 000V 的;用于高压线路的摇表有 2 500V 或 5 000V 的兆欧表,兆欧表的接线原理如图 2.1.2 所示。

兆欧表由手摇直流发电机、N、S磁极和可动线圈1、2组成,其接线具有L、G、E三个端子,L和E端子接被试品,G接屏蔽。当手摇发电机M摇动以后,电压线圈1将通过 $R_1$ 流过 $I_1$ 的电流,电流线圈2将通过由E点到被测电阻(接于L和E之间) $R_x$ 、L点、 $R_2$ 流过 $I_2$ 的电流,由于线圈1、2均放置在永久磁铁的磁场中,所以, $I_1$ 将产生 $M_1 = K_1 B_1 I_1$ 的转矩, $I_2$ 将产生 $M_2 = K_2 B_2 I_2$ 的转矩,这两转矩的方向正好相反。当 $I_2 = 0$ ,即E和L之间开路时,指针将指向 $\infty$ 位置,当 $M_2 \neq 0$ ,由于 $I_1$ 和 $I_2$ 产生的转矩相等,即 $M_1 = M_2 (K_1 B_1 I_1 = K_2 B_2 I_2)$ 。又由于永久磁铁形成的磁场为非均匀磁场,线圈有效边所处位置的磁通密度将随线圈上指针的偏转角而变化, $B_1 = f_1(\alpha_1)$ , $B_2 = f_2(\alpha_2)$ ,因此, $K_1 B_1 I_1 = K_2 B_2 I_2$ 可写成

$$K_1 f_1(\alpha_1) I_1 = K_2 f_2(\alpha_2) I_2, \frac{I_1}{I_2} = \frac{K_2 f_2(\alpha_2)}{K_1 f_1(\alpha_1)} = kf(\alpha)$$

当 $M_1 = M_2$ 时, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ 可改写成 $\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F'\left(\frac{R_1}{R_2 + R_x}\right)$ ,式中 $R_1$ 为电压线圈的电阻, $R_2$ 为电流线圈电阻,因此偏转角可指示被试品 $R_x$ 的值。

由于偏转角与电流 $I_1$ 和 $I_2$ 的比值成函数关系,故称兆欧表为流比计,从图2.1.2可看出当E、L开路时,指针指向 $\infty$ ,当E、L短路时,指针应指向零。

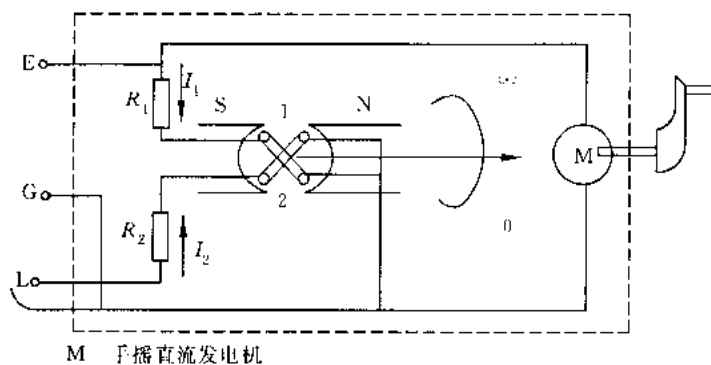


图 2.1.2 兆欧表原理接线图

兆欧表除有E、L两个接线端子外,还有G接线端子,该端子是为了避免杂散因素而设置的,称屏蔽接线柱。

从理论上讲,摇表的手摇速度与读数无关,而实际上手摇速度太快或太慢时,将使读数误差增大,因此,要求摇表转速为120rad/min,允许 $\pm 20\%$ 的偏差。许多摇表装有自动限速装置,当手摇转速超过额定转速时,电机的转速会自动限制在额定值。

使用摇表时应注意:

(1) 选择合适电压的摇表。6kV以上的试品一般都用2500V摇表,接线为:E接地,G接屏蔽,L接线路。

(2) 摇表的检查。先不接L,摇动手柄,指针应指向“ $\infty$ ”,再将L与E短接,缓慢旋转手柄,指针应指向零。

(3) 按图2.1.2接好线后,摇动手柄,在15和60秒时分别读取 $R_{15''}$ 和 $R_{60''}$ 的电阻值,可得出吸收比 $K = R_{60''}/R_{15''}$ 。

(4) 对电容较大的试品,在试验快结束时,应设法在摇表仍处于额定转速时断开 L 或 E 引线,以免摇表停止转动时,试品向摇表放电而冲击指针,造成摇表指针的损坏。

(5) 试验完毕,应先充分放电,把接地杆一直放在高压线路上,对电容较大的试品,放电时间应在 2 分钟以上,人才能触及。

测量电力电缆绝缘电阻的具体接线如图 2.1.3 所示。对于三芯电缆,将被测相接兆欧表 L 端子,其余两相与电缆外皮相连,接兆欧表的 E 点,在被试相的绝缘外层可缠绕一屏蔽表面电流的短路圈,接兆欧表的 G 点。

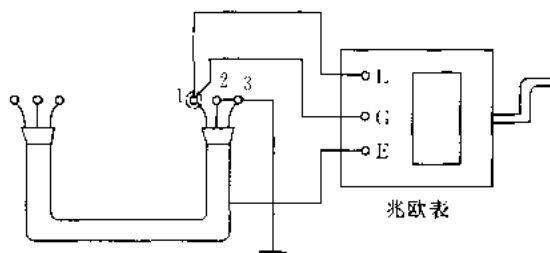


图 2.1.3 测量三芯电缆绝缘电阻的接线图

## 2. 泄漏电流的测量

### (1) 试验装置

测量电力电缆的泄漏电流,需用直流高压电源,从 DL/T596-1996 电力设备预防性试验规程可看到,对于电压在 35kV 以下的电缆,需施加 130kV 左右的直流电压,对于长度 250m 以下的电缆,泄漏电流的参考值约  $85\mu\text{A}$ ,因此,使用能提供足够电压的输出电流为 2mA 的电源就可以对电力电缆进行试验了。

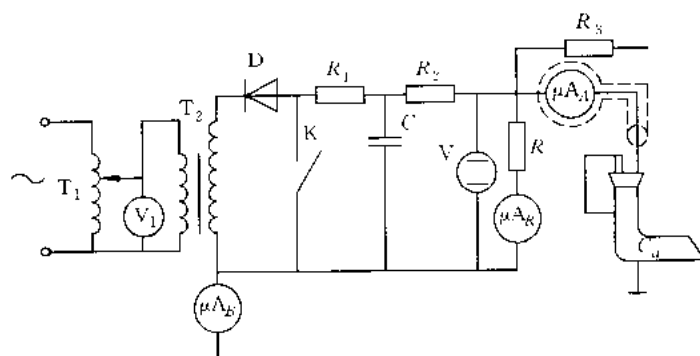
直流电源可采用:① 半波整流电路;② 串级直流整流电路(50Hz 交流电源);③ 采用电力电子技术,用高频交流电源以获得直流高压的电路。

① 半波整流电源的试验线路,如图 2.1.4 所示。当试品电容足够大时,稳压电容 C 可以省去,高压测量可用静电电压表或直流分压器。

② 串级直流(50Hz 交流电源)发生器的试验线路,如图 2.1.5 所示的此种电路可用参数较低的元件而获得较高的电压,由于元件参数较低,所以体积较小,重量较轻,使用起来比较方便。

③ 小型高频化直流电源。为了使高压电源便于携带,人们利用电力电子技术,将交流 50Hz 的电源经整流、滤波、逆变后,变成高频化的交流电源,再经串级整流而获得直流高压,此种电源技术水平高、体积小、重量轻、便于携带,目前在我国已有产品生产,其原理如图 2.1.6 所示。其试验接线如图 2.1.7 所示,控制箱面板如图 2.1.8 所示。

④ 泄漏电流测量仪。图 2.1.4,图 2.1.5 中都有  $\mu\text{A}_A, \mu\text{A}_B$  的微安表或  $\text{IB}_1, \text{IB}_2$  电流变换器,这些都是测量电力电缆泄漏电流的仪器,但图中只是绘出了微安表的位置,未绘出其具体接线,图 2.1.7 给出了微安表具体接线图,其原理为,当需要观测泄漏电流时,可打开 K 开关,若被测电流超过微安表量程时,霓虹管 P 将放电,使微安表短路,保护了微安表。当在观测电缆泄漏电流,被试品突然击穿时,保护间隙 J 将放电,使微安表和霓虹



$T_1$ —调压器, 0V~250V;

D—高压整流硅堆, 2DL;

V—静电电压表;

$C_a$ —被试电缆等值电容;

$\mu A_R$ —接在低压侧的微安表;

$V_1$ —交流电压表;

$R_3$ —放电电阻;

$T_2$ —高压试验变压器;

C—滤波电容;

R—电阻分压器;

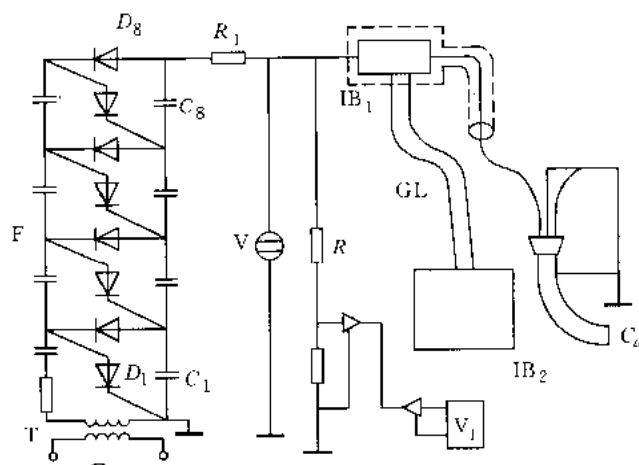
$\mu A_A$ —接在高压侧的微安表;

$\mu A_R$ —分压器的微安表;

$R_1, R_2$ —保护电阻;

K—接地开关

图 2.1.4 电力电缆半波整流电源试验线路图



F—串级直流发生器;

$R_1$ —保护电阻;

R—直流分压器;

$C_a$ —被试电缆等值电容;  $IB_1$ —高压侧电流变换器; V—静电电压表;  $V_1$ —静电电压表;

$IB_2$ —低压侧电流变换器;

GL—测量用光缆;

T—变压器

图 2.1.5 串级直流试验装置的试验线路图

管都被短路,从而得到了保护。

具体使用时,有些情况可以不使用短路开关 K,另外,为防止电晕等杂散电流的干扰,整个微安表系统需置屏蔽的金属盒中。

测量电缆泄漏电流最好采用微安表置于高压侧的测量方法,如图 2.1.4 中的  $\mu A_A$  表,高压侧测量泄漏电流时,测量的准确度要高些。也可以采用消除杂散电流影响的其他接线方式,如图 2.1.4 中的  $\mu A_B$ ,它置于被试品的低压侧,此种方法,操作方便、安全,但准

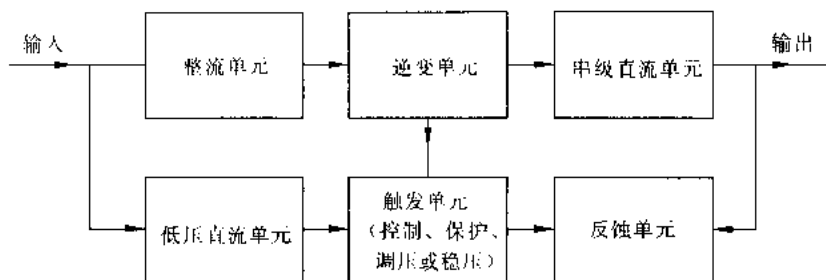


图 2.1.6 小型高频化直流电源原理框图

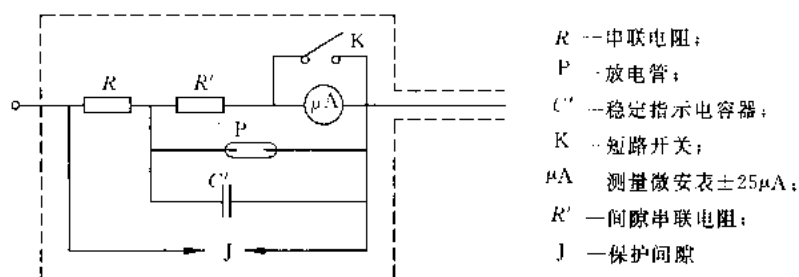


图 2.1.7 微安表具体接线图

准确度略差。

当电压较高,需采用高压侧测量时,给观察电流带来许多困难,为此可采用光纤传输测量方式,尤其被测泄漏电流较小时,此法更显其优越性。其原理如图 2.1.8 所示。在高压侧,泄漏电流通过采样电阻  $R$ ,取得电压  $V$  信号,经  $V/f$ ,  $f/\text{光}$  变换以后(即高压侧电流变换器),由光纤 GL 将光信号传到低压侧电流变换器,再经  $\text{光}/f$ ,  $f/V$  解调,从而在数码管上显示出泄漏电流值。由于光纤有着良好的绝缘和抗干扰能力,给高压的测量提供了一种新型的安全测量方法。

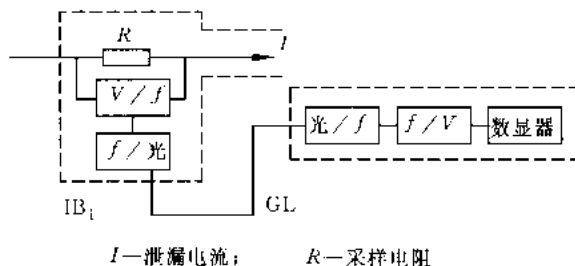


图 2.1.8 用光纤传输测量泄漏电流方框图

### 3. 电力电缆具体试验方法

以上介绍了各种电力电缆的试验方法,下面介绍实际进行 10kV 电力电缆试验时的步骤。

(1) 用 2 500V 摇表测量额定电压为 10kV 的电力电缆的绝缘电阻, 就像  $R_{10}$ ,  $R_{30}$  的绝缘电阻值, 并计算三相不平衡系数。

(2) 用直流高压电源测量电力电缆的泄漏电流, 具体用何种试验电源, 可视情况而定, 并计算三相不平衡系数。

测量泄漏电流的同时, 进行直流耐压试验, 电力电缆在出厂时可能进行交流耐压试验, 而运行中的电缆进行预防性试验时, 由于电缆为容性试品, 大都采用直流耐压试验, 试验电压值和试验时间如表 2.1.3、表 2.1.5 所示。

对于教学用的试品, 因试验次数多, 可适当降低试验电压。

(3) 试验结果应与表 2.1.3、表 2.1.4 和表 2.1.5 比较, 判断电缆的绝缘情况, 主要判断泄漏电流值与电压、时间的关系, 并与历史状态进行比较。

(4) 直流耐压试验后, 应对电缆进行充分放电, 然后用兆欧表再对电缆复测其绝缘电阻, 检查电缆有无贯穿性缺陷。

(5) 对电力电缆进行泄漏电流测量及耐压试验时, 宜采用负极性直流进行试验, 原因是: 潮气和水分是影响电缆质量的关键, 由于水分有电渗析现象, 即水分在电场中具有正离子的性质, 当电缆缆芯加负极性高压时, 水分易吸附在高压极周围, 因而易检测出电缆的故障, 否则水分将渗析到电缆的外皮, 这样不易发现电缆的故障, 所以, 一般都采用负极性高压。

## 2.2 电力变压器的部分试验

电力变压器的试验方法有多种, 本节介绍绝缘电阻的测量及吸收比试验情况, 重点介绍介质损耗因数( $\tan\delta$ )的测量。

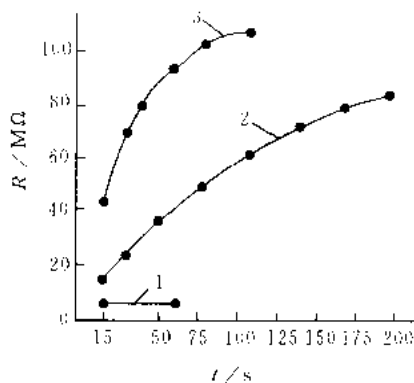
### 2.2.1 绝缘电阻和吸收比的测量

根据《DL/T596-1996 预防性试验规程》规定, 有关电力变压器绝缘电阻的规定如表 2.2.1 所示。

表 2.2.1 电力变压器及电抗器绝缘电阻等的规定

| 项 目                           | 周 期                                | 要 求                                                                     | 说 明                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 绕组绝缘电阻<br>吸收比<br>或(和)<br>极化指数 | ① 1~3 年<br>或自行规定<br>② 大修后<br>③ 必要时 | ① 绝缘电阻换算至同一温度下, 与前次测试结果相比应无明显变化<br>② 吸收比(10℃~30℃范围)不低于 1.3 或极化指数不低于 1.5 | ① 采用 2 500V 或 5 000V 兆欧表<br>② 测量前被试绕组应充分放电<br>③ 测量温度以顶层油温为准, 尽量使每次测量温度相近<br>④ 尽量在油温低于 50℃ 时测量, 不同温度下的绝缘电阻值一般可按下式换算<br>$R_2 = R_1 \times 1.5^{(t_1 - t_2)/10}$ 式中 $R_1$ , $R_2$ 分别为温度 $t_1$ , $t_2$ 的绝缘电阻<br>⑤ 吸收比和极化指数不进行温度换算 |

所谓吸收比,就是在同一次试验中,1min时的绝缘电阻值与15s时的绝缘电阻值之比。对未受潮的变压器,吸收比应在1.3~2范围内,电气设备受潮时,此比值近于1。对电容特大的试品,可用极化指数,即在同一次试验中,10min时的绝缘电阻值与1min时的绝缘电阻值之比表示。测量吸收比和极化指数,可容易判断绝缘受潮的情况,因为,当绝缘干燥时,其充电时间常数大,施加直流电压后,电荷将慢慢充满,而绝缘受潮时,其绝缘电阻值小,所以充电时间少。图2.2.1所示,有一同步发电机,因为受潮,其绝缘电阻值很小,吸收电流衰减很快,故吸收比 $K \approx 1$ (见图2.2.1的曲线1),而经干燥后,潮气基本去掉了,绝缘电阻加大,时间常数增加,其吸收比 $K > 2$ ,如图2.2.1中曲线2,当同步发电机运行了72h,使绝缘充分干燥,经冷却至27℃时,绝缘电阻更大了,如图2.2.1中曲线3所示。



1 干燥前15℃; 2—干燥后73.35℃;  
3 运行72h后冷却至27℃

图 2.2.1 某同步发电机干燥前后绝缘电阻的变化

直流试验只能测量出绝缘电导的情况,对于运行在交流电路中的绝缘,由于极化等因素的影响,还需进行交流试验。

### 2.2.2 介质损耗因数的测量( $\tan\delta$ 的测量)

介质损耗因数( $\tan\delta$ )的测量在电气设备制造、绝缘材料电气性能的鉴定、绝缘的试验等都是不可缺少的。因为测量绝缘介质的  $\tan\delta$  值是判断绝缘情况的一个较灵敏的试验方法。在交流电压作用下,绝缘介质不仅有电导的损耗,还有极化损耗,这在直流电压作用下是测不出来的。

测量介质损耗因数在预防性试验中也是一不可缺少的项目,因为电气设备介质损耗因数太大,会使设备绝缘在交流电压作用下,许多能量将以热的形式损耗掉,此种热量将增加电气设备绝缘的温度,使绝缘老化,甚至造成绝缘热击穿。所以,制造厂在出厂试验时要进行介质损耗的试验,运行中的电气设备亦要进行此种试验。若达不到一定的指标,将被视为不合格产品,不能出厂或运行。

电气设备的绝缘,可看成一有损耗的电容器,在对其电气性能进行分析时,可用两种简化等值电路来等效,一种是串联等值电路,一种是并联等值电路,如图2.2.2所示。

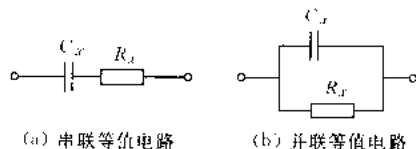


图 2.2.2 有损耗的电容器等值电路图

当用串联等值电路等效时,其向量图如图 2.2.3 所示。若求其损耗功率,可得出

$$P = I^2 R_x$$

$$I = U / \sqrt{R_x^2 + \left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2}$$

所以 
$$P = U^2 R_x / \left[ R_x^2 + \left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2 \right] = U^2 \omega^2 C_x^2 R_x / 1 + \omega^2 R_x^2 C_x^2$$

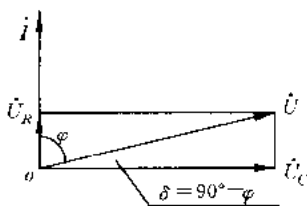


图 2.2.3 串联等值电路相量图

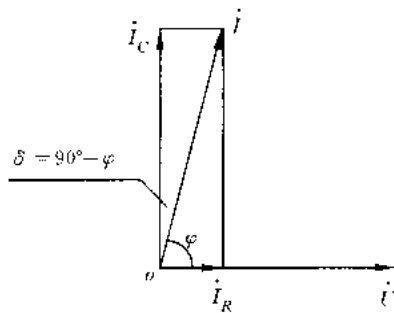


图 2.2.4 并联等值电路相量图

从图 2.2.3 可看出,损耗角的正切可用下式表示

$$\tan \delta = \frac{U_R}{U_C} = \frac{I R_x}{I \frac{1}{\omega C_x}} = \omega C_x R_x$$

将  $\tan \delta$  值代入  $P$ , 得

$$\begin{aligned} P &= U^2 \omega^2 C_x^2 R_x / 1 + \omega^2 R_x^2 C_x^2 \\ &= U^2 \omega C_x \tan \delta / 1 + \tan^2 \delta \end{aligned}$$

由于绝缘介质损耗因数  $\tan \delta$  的值一般只有千分之几,再大也不过百分之几,故  $\tan^2 \delta$  是很小的数值,  $\tan^2 \delta \rightarrow 0$ , 所以,损耗功率的公式可写成

$$P = U^2 \omega C_x \tan \delta$$

对于并联等值电路,其损耗功率的公式可写成

$$P = U I_R$$

从图 2.2.4 中可看出

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U}{R_x} / U / \frac{1}{\omega C_x}$$

化简得

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_x R_x}$$

由于

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C}$$

所以

$$I_R = I_C \tan \delta$$

又

$$I_C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C_x}} = U \omega C_x$$

代入  $P$  式,得

$$P = U I_C \tan \delta$$

$$= U U \omega C_x \tan \delta = U^2 \omega C_x \tan \delta$$

从以上两种等值电路分析,不管用串联或并联等值电路来等效一电容器时,当交流电源施加于电容时,其电压、电流、损耗功率等性质都应是一样的,否则就不能等效了。另外,从有损电容器的损耗功率的公式可看出,损耗功率的大小与损耗角 $\delta$ 的正切 $\tan \delta$ 、介质损耗因数成正比。

因此,准确测量介质损耗因数很重要,测量介质损耗因数的方法很多,一般有

#### (1) 阻抗电桥法

此法用得较多,如西林电桥,这是一种平衡电桥。也有用不平衡电桥来测量介质损耗因数,如M型电桥,只是此法用得较少了。

#### (2) 变压器比例臂电桥法

此法是利用通过被试品的电流和通过标准电容器(几乎无损耗的电容器)的电流所建立的电势平衡的原理而制成的电桥,此种电桥准确度高,也较灵敏,目前在国内外正得到广泛应用。

#### (3) 利用数字计数法

当电压施加于被试品,可从取样电阻上得到被试品电流信号,又可从标准电容的取样元件上获得标准电容的电流信号。这两者信号相位的差值就是相位差介质损耗角 $\delta$ 。用脉冲计数的方法,可以得到较准确的介质损耗角的值,从而可以得到 $\tan \delta$ ,其波形如图2.2.5所示。

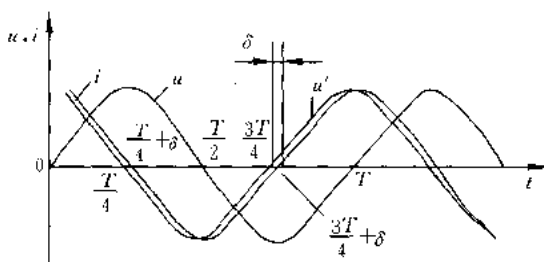


图 2.2.5 介质损耗角( $\delta$ )波形图

下面主要介绍阻抗电桥的变压器比例臂电桥的测试方法。

### 1. 西林电桥的原理

阻抗型电桥中用得较多的就是平衡式的西林电桥,其原理线路如图2.2.6所示,当交流电压施加在A、O两端时,若电桥处于平衡状态,则B、C两点的电位差为零,此时电桥将有如下的数学关系:

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_{AC} & U_{BO} &= U_{CO} \\ \text{且} \quad U_{AB} &= I_1 Z_x & U_{AC} &= I_2 Z_0 \\ U_{BO} &= I_1 Z_3 & U_{CO} &= I_2 Z_4 \end{aligned}$$

$$\text{代入得} \quad I_1 Z_x = I_2 Z_0 \quad (2-1)$$

$$I_1 Z_3 = I_2 Z_4 \quad (2-2)$$

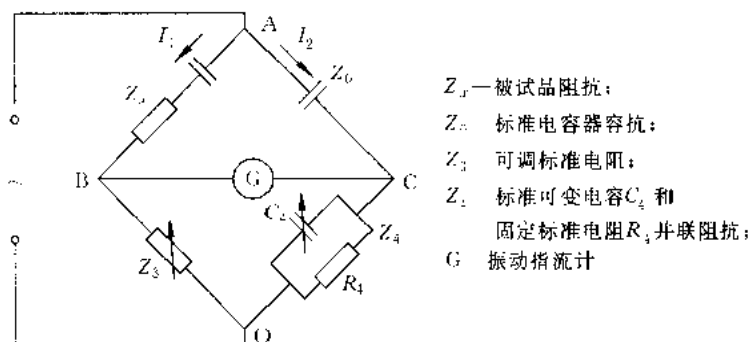


图 2.2.6 西林电桥原理线路图

式(2-1)除以式(2-2),得

$$\frac{Z_x}{Z_3} = \frac{Z_0}{Z_4}$$

即

$$Z_x Z_4 = Z_0 Z_3 \quad (2-3)$$

电桥在制作时,  $Z_0$ —标准电容器的容抗;

$Z_3$ —标准电阻;

$Z_4$ —标准可变电容  $C_4$  和固定标准电阻  $R_4$  并联阻抗。

因此可得

$$Z_3 = R_3 \quad Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0}$$

$$Z_4 = \frac{R_4 \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}} = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

被试品阻抗  $Z_x$  可以等值为电阻与电容串联,也可以等值为电阻与电容的并联,下面分别叙述。

(1) 当  $R_x$  与  $C_x$  串联时,

$$Z_x = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} = \frac{1 + j\omega C_x R_x}{j\omega C_x}$$

将以上各阻抗值代入式(2-3)中

$$\left( \frac{1 + j\omega C_x R_x}{j\omega C_x} \right) \left( \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \right) = R_3 \frac{1}{j\omega C_0}$$

经整理,根据复数运算规律,实部=实部,虚部=虚部,得

$$\left. \begin{aligned} C_x &= C_0 \frac{R_4}{R_3} \\ R_x &= R_3 \frac{C_4}{C_0} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

从串联等值电路可知,其介质损耗因数( $\tan\delta$ )的公式为

$$\tan\delta = \omega C_x R_x \quad (2-5)$$

将式(2-4)代入式(2-5),得

$$\tan\delta = \omega C_4 R_4 \quad (2-6)$$

(2) 当  $R_x$  与  $C_x$  为并联等值电路时,其公式计算方法与上述同,亦可得出公式

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \quad (2-7)$$

$$\tan \delta = \omega C_4 R_4 \quad (2-8)$$

## 2. 西林电桥的实例——QS—1 型西林电桥

### (1) QS—1 型西林电桥原理线路图

图 2.2.7 为 QS—1 型西林电桥正接法的原理线路图。电桥本体由  $R_x, R_N, R_V, C_1, K_2, K_3, K_4, P$  以及检流计  $G$  组成,  $R_N, C_4$  为可调电阻和电容,  $R_1$  的电阻值为  $10\,000/\pi$ , 即  $3\,184\Omega$ ,  $R_N$  为分流电阻,  $K_2$  为检流计极性开关(接通 1, 2),  $K_3$  为  $+\tan \delta$  和  $-\tan \delta$  的转换开关,  $K_4$  为分流器电流档选择开关,  $P$  是防止在电桥两顶点与屏蔽层之间出现高电压时的保护放电管。电桥本体具有对地  $15\text{kV}$  的耐压水平(工作电压  $10\text{kV}$ )。

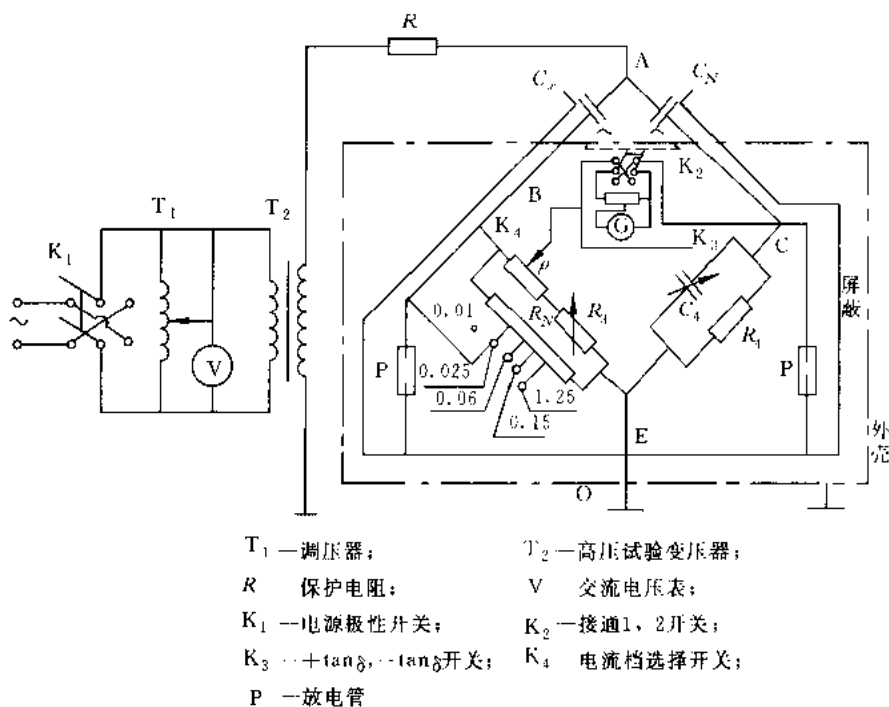


图 2.2.7 QS—1 型西林电桥正接法原理线路图

图中,  $C_N$  是标准电容, 电容量为  $50\text{pF} \pm 1\text{pF}$ , 工作电压为  $10\text{kV}$ 。

$C_x$  为被试品电容, 被试品的种类很多, 假设被试品为电力变压器或电磁式电压互感器的绝缘,  $C_x$  则应该为高压绕组对低压绕组及铁芯、外壳并连同套管的绝缘的电容。对于高压电力设备绝缘的电容值可参考表 2.2.3 和表 2.2.4。

### (2) $K_4$ 分流器电流档选择开关位置确定

当流过被试品  $C_x$  的电流在  $0.01\text{A}$  以下时, 开关  $K_4$  应扳向  $0.01$  档, 当流过  $C_x$  的电流较大时,  $K_4$  应扳向  $0.025 \sim 1.25$  档, 若不扳在合适的位置, 将会烧坏电阻  $R_N$ , 另外电桥

也无法平衡。为此,  $K_1$  的位置也可根据被试品的电容量来选择, 如表 2.2.2 所示。表中还给出了计算公式中  $n$  的数值。

表 2.2.2 被试电容、 $n$  电阻与  $K_1$  电流档对照表

| $K_1$ 位置                | 0.01       | 0.025   | 0.06      | 0.15                        | 1.25                       |
|-------------------------|------------|---------|-----------|-----------------------------|----------------------------|
| 被试品电容量<br>(当电压为 10kV 时) | 3 000pF    | 8 000pF | 19 400 pF | 48 000pF<br>(0.048 $\mu$ F) | 400 000pF<br>(0.4 $\mu$ F) |
| 分流电阻 $n$ 的数值            | 100— $R_3$ | 60      | 25        | 10                          | 4                          |

对变压器来说, 其高压绕组对低压绕组及铁芯、外壳绝缘的电容量随变压器的电压等级及容量的增大而增大, 其值可参考表 2.2.3 所列数值。对纠结式绕组来说, 其值约增大 2~4 倍。对另外一些电力设备, 可参见表 2.2.4。

表 2.2.3 电力变压器电容与电压等级对照表

| 电压等 | 35kV          | 110kV           | 220kV           | 330kV           | 500kV           |
|-----|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 级电容 | 500pF~1 000pF | 1 000pF~2 000pF | 1 500pF~3 000pF | 2 000pF~5 000pF | 4 000pF~6 000pF |

表 2.2.4 不同种试品的电容值

| 试品名称                     | 电容值(pF)      |
|--------------------------|--------------|
| 线路绝缘子                    | <50          |
| 高压套管                     | 50~600       |
| 电容式电压互感器                 | 3 300~5 000  |
| 电力变压器                    | 1 000~15 000 |
| 电力电缆                     | 150~400      |
| 高压断路器、电流互感器、<br>电磁式电压互感器 | 100~1 000    |

### (3) 介质损耗因数( $\tan\delta$ )与电容 $C$ 的计算

电桥平衡后, 被试电容  $C_x$  与介质损耗因数  $\tan\delta_x$  的计算方法为

① 当  $K_1$  的位置置于 0.01A 档时,

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3 + \rho} \quad (2-9)$$

(因  $n=100+R_3$ )

$$\tan\delta_x = \omega C_4 R_4 \quad (2-10)$$

② 当  $K_1$  置于 0.025A~1.25A 档时, 其公式有一些变化

$$C_x = C_0 \frac{R_4(100+R_3)}{R_N(R_3+\rho)} \quad (2-11)$$

式中  $R_N$  的值可见表 2.2.2 中的  $n$  值

$$\tan\delta_x = \omega C_4 R_4 + \omega C_n R_4 \frac{(100+R_N-\rho)}{R_3+\rho} \quad (2-12)$$

由于通过被试品  $C_x$  的电流较大,必须要加一分流电阻分流,在设计 QS—1 型电桥时,对分流电阻作了如下的考虑,图 2.2.8 给出了西林电桥带分流电阻的电路图,从图 2.2.8 可看出,当电流  $I_1$  较大时, $I_1$  在 D 点分流,设通过  $r, s$  和  $R_3$  的电流为  $I'_1$ 。当调节  $R_3$  和  $C_4$  使电桥平衡后, B, C 两点的电位相等,此时电流  $I'_1$  与  $I_1$  的关系为

$$I'_1 = I_1 \frac{R_N}{100 + R_3} \quad (2-13)$$

(因为在 DBOD 的方框回路内,除  $R_3$  以外的电阻之和为  $100\Omega$ )。

这样,可列出西林电桥的平衡方程式

$$I_1 Z_x + I'_1 (100 - R_N - \rho) = I_2 Z_0 \quad (2-14)$$

$$I'_1 (R_3 + \rho) = I_2 Z_4 \quad (2-15)$$

由于  $I'_1 = I_1 \frac{R_N}{100 + R_3}$

代入式(2-14)式(2-15),经整理,可以得出

$$C_x = C_0 \frac{R_4 (100 + R_3)}{R_N (R_3 + \rho)}$$

$$\tan \delta_x = \omega C_4 R_4 - \omega C_0 R_4 \frac{(100 - R_N - \rho)}{R_3 + \rho}$$

#### (4) 减少外界电磁场干扰的方法

QS—1 型电桥的指零仪是一谐振式检流计,为避免干扰,检流计装在金属箱内,并带有调节灵敏度的分流器,为消除电磁场干扰,检流计带有改换极性的开关  $K_2$ ,还可用  $K_1$  以改变电源的极性,并采取下列计算方法确定被试品的  $C_x$  和  $\tan \delta_x$ 。

① 为消除磁场引起的干扰误差,用  $K_2$  改变检流计的极性,电桥平衡时,可分别得到  $R_3 + \Delta R_3, C_4 + \Delta C_4$  和  $R_3 - \Delta R_3, C_4 - \Delta C_4$ 。

当检流计接通 1 时,

$$\tan \delta_{x1} = \omega (C_4 + \Delta C_4) R_4$$

$$C_{x1} = C_0 \frac{R_4}{(R_3 + \Delta R_3)}$$

当检流计接通 2 时,

$$\tan \delta_{x2} = \omega (C_4 - \Delta C_4) R_4$$

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{(R_3 - \Delta R_3)}$$

当无磁场干扰时,

$$\tan \delta = \omega C_4 R_4$$

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3}$$

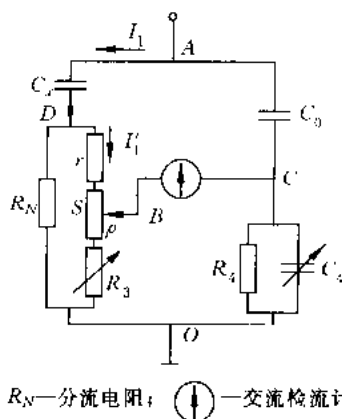


图 2.2.8 西林电桥带分流电阻时的电路图

所以

$$\tan\delta_x = \frac{\tan\delta_{x1} - \tan\delta_{x2}}{2} \quad (2-16)$$

$$C_x = 2C_{x1}C_{x2}/(C_{x1} + C_{x2}) \quad (2-17)$$

② 为消除电场干扰,用  $K_1$  改换电源的极性,从而可得到  $\tan\delta_1$  和  $C'_x$  与  $\tan\delta_2$  和  $C''_x$ , 两组数据电源极性相差  $180^\circ$ 。将两组数据代入下式可得出真实的  $\tan\delta$  和  $C_x$ 。

$$\tan\delta = \frac{C'_x \tan\delta_1 + C''_x \tan\delta_2}{C'_x + C''_x} \quad (2-18)$$

$$C_x = \frac{1}{2}(C'_x + C''_x) \quad (2-19)$$

当外界电场很强烈时,电桥很难平衡,可能会出现当开关  $K_1$  倒向某一  $\tan\delta$  位置,电桥方可平衡,这样,可得到  $C'_x, \tan\delta_1$  和  $C''_x, \tan\delta_2$ 。

$$\tan\delta_1 = \omega C_x R_1, \quad \tan\delta_2 = -\omega C_x R_3$$

而  $C'_x$  和  $C''_x$  的公式,不受  $K_1$  位置的影响。

#### (5) QS-1 电桥实际测量步骤

① 按图 2.2.6 接线,选择合适的  $K_1$  分流器开关位置,检查检流计灵敏度开关是否在零位。

② 将  $R_3, \tan\delta$  各档调至中间位置,切勿放在零位置,  $K_2$  置于断位置。

③ 先略加高压电源(电压  $1\text{kV} \sim 2\text{kV}$ ),  $K_2$  转至接通 1,逐级调节检流计灵敏度,检流计光带变宽,当宽度约  $1/4$  全屏时,调节谐振旋钮,使光带最宽,说明检流计对基波最灵敏(对于初学者,最好不进行此项操作),然后升高电压至测量电压。

④ 从大到小交叉调节  $R_3$  和  $\tan\delta$ ,并逐级增加检流计的灵敏度,直至最大值,使检流计光带成一窄条,此时电桥就平衡了。平衡后,立即将检流计的灵敏度调到最小,即零的位置,并关掉电源,记录下  $R_N, R_3, \tan\delta$  及  $\rho$  的数值。

⑤ 将  $K_2$  转至接通 2,重复测量。再倒换  $K_1$  方向,  $K_2$  再接通 1 和 2 位置,重复测量。

#### (6) 西林电桥的正接与反接

图 2.2.7 给出了西林电桥正接法的线路图。从图 2.2.7 可看出,高压虽加在  $AO$  之间,但绝大部分电压是加在被试品  $C_x$  和标准电容  $C_N$  两端的,而桥体  $R_3, C_1, R_4$  上的电压是很低的,当操作者调节  $R_3, C_1(\tan\delta)$  时,不会有什么危险,但一旦被试品击穿或  $B, C$  两点对  $O$  点的电位差超过  $250\text{V}$  时,可能会影响操作者的安全,此时,西林电桥的放电管将会放电。使  $B, O$  或  $C, O$  短路,从而保护了人身的安全。这也是为什么西林电桥能作为高压测量的一个重要原因。

图 2.2.7 所示的接法,人们称为正接法。所谓正接法就是:当被试品  $C_x$  可以与地绝缘时,高压电源可以先接到  $C_x$ ,然后接到桥体再将  $O$  点接地。这种接法整个桥体处于低电位,所以操作人员也处于低电位,很安全。

当被试品  $C_x$  有一点与地连在一起而很难解开时(如重量较重的大型变压器的外壳),一般采用反接法,即将高压电源先接至桥体的  $E$  点,然后经桥体接至被试品  $C_x$  再接地,接线图如图 2.2.9 所示。采用反接法时,电桥的桥体部分处于高电位,电桥的  $R_3, C_1$

亦处于高电位,这对于站在地上的操作者来说,若不采取安全措施是很危险的。为此,可采用等电位屏蔽的方式,即操作者处在电桥的电位上,这样操作者在调节  $R_3$ 、 $C_1$  时,与电桥的桥体电位一致,如可将试验者用屏蔽网屏蔽起来,屏蔽网与桥体电位一致,这样,试验人员就更加安全了。另外,也可采用将  $C_1$ 、 $R_4$ 、 $R_3$  与地绝缘起来,并采取屏蔽等安全措施,同样是安全的。如 QS-1 型电桥,就是采取将桥体与地绝缘的方法,并有 15kV 的耐压水平,所以,只要电桥的外壳可靠接地,不管电桥采用正接法或反接法,均能正常地安全工作。

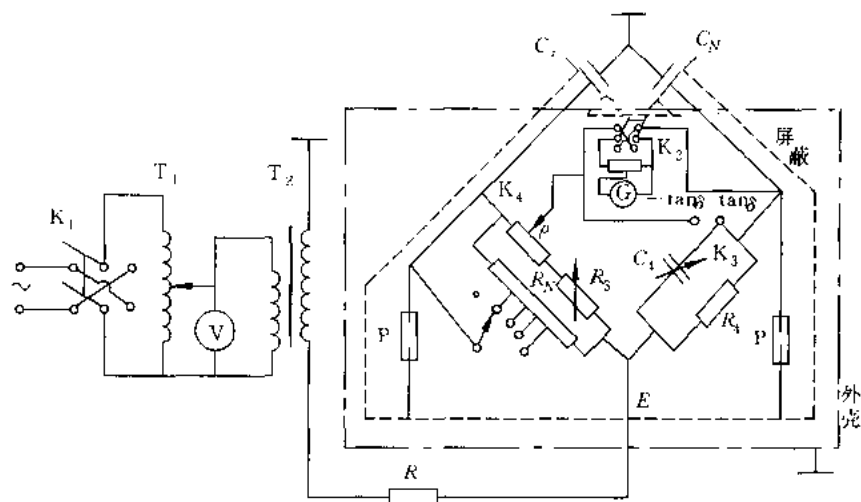


图 2.2.9 QS-1 型西林电桥反接法线路图

### 3. QS-19 变压器比例臂电桥测量方法

#### (1) QS-19 型电桥原理

QS-19 型电桥的工作原理是在一个环形铁芯上绕两个绕组,匝数为  $W_1$  和  $W_2$ ,再绕一个指示绕组  $W_D$ ,如图 2.2.10 所示。假定在  $W_1$  和  $W_2$  内通过交流电流分别为  $i_1$  和  $i_2$ ,运用电工学中磁路上的欧姆定律,得知铁芯线圈内通过电流时必将在铁芯内产生相应的磁通量,而这个交变磁通量在铁芯磁化特性线性范围内,且  $\phi = \frac{WI}{R_m}$ 。其中  $WI$ ——磁动势(安匝); $R_m$ ——磁阻。

很显然,铁芯中合成磁通为

$$\phi_D = \phi_1 + \phi_2$$

指示绕组  $W_D$  中产生的感应电动势为

$$e_D = -W_D \frac{d\phi_D}{dt}$$

当平衡指示器指向零时,  $e_D = 0$ , 且  $W_1$  和  $W_2$  在同一铁芯中耦合,故  $R_{m1} = R_{m2}$ , 所以可得

$$W_1 I_1 = W_2 I_2$$

即两个线圈的安匝数相等时,电流比较器处于平衡状态。QS-19 型电桥就是基于这个

原理设计的。

QS—19 型电桥原理接线如图 2.2.11 所示。当在 A、C 两端施加一交流电压时,被试品  $C_x$  将流过电流  $I_1$ ,并通过变压器的绕组  $W_1$ ,标准电容器  $C_0$  中将流过电流  $I_0$ ,过 B 点后,流过可调电阻  $R$  的电流  $I_2$  流到变压器另一绕组  $W_2$ ,因而在变压器中将产生两个磁势,即  $I_1 W_1$  和  $I_2 W_2$ ,当  $I_1 W_1 = I_2 W_2$  时,指示绕组  $W_3$  中将不含有感应电势产生,因而电桥平衡。

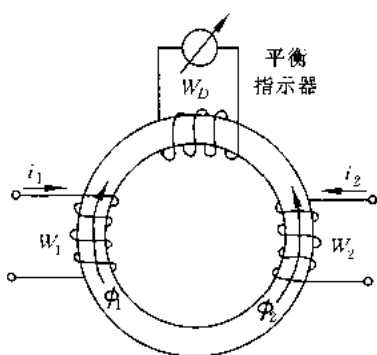


图 2.2.10 电桥基本原理图

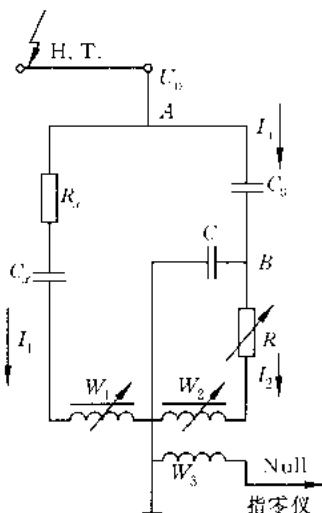


图 2.2.11 QS—19 型电桥原理图

从已知的参数(电桥平衡时) $C_0, W_1, W_2, C, R$ , 可以计算出被试品的  $C_x$  和  $\tan \delta_x$ , 其表达式为

$$C_x = C_0 \frac{W_2}{W_1}$$

$$\tan \delta_x = \omega R (C_0 + C)$$

具体推导如下:由于  $C_x$  和  $C_0$  的阻抗很大,  $W_1$  和  $W_2$  的内阻抗可忽略不计, 所以

$$I_1 = \frac{U}{Z_x} = \frac{U}{R_x + \frac{1}{j\omega C_x}} = U \frac{j\omega C_x}{1 + j\omega C_x R_x}$$

$$I_0 = \frac{U}{Z_0 + Z_{B0}} = \frac{U}{\frac{1}{j\omega C_0} + \frac{R}{1 + j\omega CR}} = \frac{U j\omega C_0 (1 + j\omega CR)}{1 - j\omega R (C_0 + C)}$$

$$I_2 = I_0 Z_{B0} / R = \frac{U j\omega C_0}{1 + j\omega R (C_0 + C)}$$

当  $I_1 W_1 = I_2 W_2$  时,

$$U \frac{j\omega C_x}{1 + j\omega C_x R_x} W_1 = \frac{U j\omega C_0}{1 + j\omega R (C_0 + C)} W_2$$

化简得

$$\frac{C_x W_1}{1 - j\omega C_x R_x} = \frac{C_0 W_2}{1 + j\omega R(C_0 + C)}$$

令实部=实部,得

$$C_x W_1 = C_0 W_2 \quad C_x = C_0 \frac{W_2}{W_1}$$

令虚部=虚部,得

$$\omega R(C_0 + C) = \omega C_x R_x$$

由于  $\tan\delta_x = \omega C_x R_x$ , 所以

$$\tan\delta_x = \omega R(C_0 + C)$$

## (2) 电桥测量范围和准确度

电桥的三个基本量程均和标准电容  $C_0$  有关。表 2.2.5 所示为电容与倍率的关系。

表 2.2.5 倍率和电容量程的关系

|     | 倍率 $W_1$ 档 | 满量程值                   | 准确度                       |
|-----|------------|------------------------|---------------------------|
| 第一档 | 100        | $11.111\ 0 \times C_0$ | $\pm(0.1\% + 1\text{pF})$ |
| 第二档 | 10         | $111.110 \times C_0$   | $\pm(0.1\% + 1\text{pF})$ |
| 第三档 | 1          | $1\ 111.10 \times C_0$ | $\pm(0.1\% + 1\text{pF})$ |

电桥测量被试电容损耗因数可分两个量程,如表 2.2.6 所示。

表 2.2.6 倍率 M 与介质损耗因数量程的关系

|      | 倍率 M 档       | 满量程值     | 准确度                           |
|------|--------------|----------|-------------------------------|
| 第一量程 | $\times 0.1$ | 0.111 10 | $\pm(1\% + 1 \times 10^{-4})$ |
| 第二量程 | $\times 1$   | 1.111 0  | $\pm(1\% + 1 \times 10^{-4})$ |

## (3) 测量步骤

### ① 第一种接法

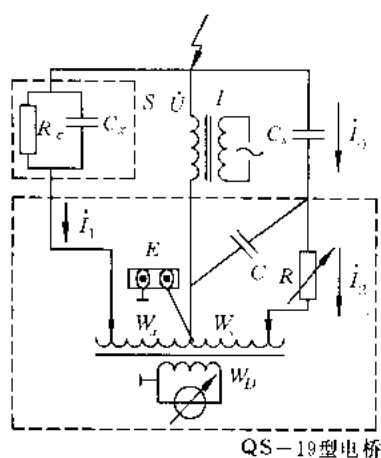
接图 2.2.12 正确接线,开启内附晶体管放大器,灵敏度调节先置较低处,估计被测电容量,选择量程开关  $W_x$  的位置,由大到小交叉调节  $W_s$  和  $\tan\delta$  各旋钮,使指示器指零(最小位置),最后读取  $W_s$  和  $\tan\delta$  值。

### ② 第二种接法

接图 2.2.13 正确接线,由于样品一端接地,测量之前首先应扣除试验电压回路对地分布电容  $C_E$  的数值,故电桥平衡可分两步进行。第一步不接试品,调节电桥平衡,读取电桥盘面的数值,算出  $C_E$  和  $\tan\delta_E$ ;第二步接上试品,调节电桥平衡,读取盘面的数值,并算出  $C_2$  和  $\tan\delta_2$ 。则被试品的电容和介质损耗因数可用下式算出

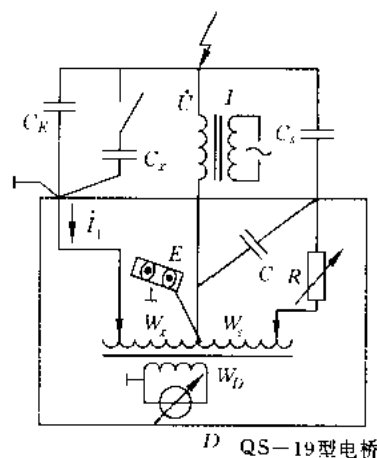
$$C_x = C_2 - C_E$$

$$\tan\delta_x = \frac{C_2 \tan\delta_2 - C_E \tan\delta_E}{C_2 - C_E}$$



$C_x$ —被测电容；  $C_s$ —标准电容

图 2.2.12 电桥原理及样品不接地电路图



$C_E$ — $C_x$ 开路时的杂散电容；

$\delta E$ — $C_x$ 开路，电桥平衡时的损耗角

图 2.2.13 样品接地电路图

#### (4) 注意事项

- ① 使用 QS-19 型电桥时，每次加高压前必须严格检查桥体是否可靠接地。
- ② 在升压过程中和调整完毕后，要将灵敏度开关关闭。

#### 4. 所加电压和介质损耗因数的标准

根据电力设备预防性试验规程 DL/T596—1996 的规定，对电力变压器、电磁式电流、电压互感器的试验作了具体的规定，现摘录于表 2.2.7、表 2.2.8 和表 2.2.9。

表 2.2.7 电力变压器及电抗器介质损耗因数试验周期和要求

| 项 目              | 周 期                            | 要 求                                                                                                                                                                                                                 | 说 明                                                                                                                                                                                                                                                            |
|------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 绕组的 $\tan\delta$ | ① 1~3 年或自行规定<br>② 大修后<br>③ 必要时 | ① 20℃ 时 $\tan\delta$ 不大于下列数值<br>330kV~500kV 0.6%<br>66kV~220kV 0.8%<br>35kV 及以下 1.5%<br>② $\tan\delta$ 值与历年的数值比较不能有显著变化（一般不大于 30%）<br>③ 试验电压如下：<br>绕组电压 10kV 以上 10kV<br>绕组电压 10kV 以下 $U_N$ 。<br>④ 用 M 型试验器时试验电压自行规定 | ① 非被试绕组应接地或屏蔽<br>② 同一变压器各绕组 $\tan\delta$ 的要求值相同<br>③ 测量温度以顶层油温为准，尽量使每次测量的温度相近<br>④ 尽量在油温低于 50℃ 时测量，不同温度下的 $\tan\delta$ 值一般可按下式换算<br>$\tan\delta_2 = \tan\delta_1 \times 1.3^{(t_2 - t_1)/10}$ 式中 $\tan\delta_1, \tan\delta_2$ 分别是 $t_1, t_2$ 时的 $\tan\delta$ 值 |

表 2.2.8 电磁式电压互感器介质损耗因数的试验周期和要求

| 项 目              | 周 期                                                                                                    | 要 求                      |     |     |     |     |     |     | 说 明                                                       |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------------------------------|
| tanδ(20kV<br>及以上 | ① 绕组绝缘<br>• 1年~3年<br>• 大修后<br>• 必要时<br>② 66kV ~<br>220kV 串级<br>式电压互感<br>器支架<br>• 投运前<br>• 大修后<br>• 必要时 | ① 绕组绝缘 tanδ(%) 不应大于下表中数值 |     |     |     |     |     |     | 串级式电压互感器的<br>tanδ 试验方法建议采<br>用末端屏蔽法,其他<br>试验方法与要求自行<br>规定 |
|                  |                                                                                                        | 温度℃                      |     | 5   | 10  | 20  | 30  | 40  |                                                           |
|                  |                                                                                                        | 35kV<br>及以下              | 大修后 | 1.5 | 2.5 | 3.0 | 5.0 | 7.0 |                                                           |
|                  |                                                                                                        |                          | 运行中 | 2.0 | 2.5 | 3.5 | 5.5 | 7.0 |                                                           |
|                  |                                                                                                        | 35kV<br>以上               | 大修后 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.5 | 5.0 |                                                           |
|                  |                                                                                                        |                          | 运行中 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 4.0 | 5.5 |                                                           |
| ② 支架绝缘一般不大于 6%   |                                                                                                        |                          |     |     |     |     |     |     |                                                           |

表 2.2.9 电流互感器介质损耗因数试验周期和要求

| 项 目           | 周 期            | 要 求                                                                                                             |              |            |            |     |             | 说 明                                                                                                                                                                                                                                                        |
|---------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|------------|-----|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| tanδ 及<br>电容量 | ① 投运前          | ① 主绝缘 tanδ(%) 不应大于下表中的数值,且与<br>历年数据比较不应有显著变化                                                                    |              |            |            |     |             | ① 主绝缘 tanδ 试验电压为<br>10kV,末屏对地 tanδ 试验<br>电压为 2kV<br>② 油纸电容型 tanδ 一般不<br>进行温度换算,当 tanδ 值与<br>出厂值或上一次试验值比<br>较有明显增长时,应综合分<br>析 tanδ 与温度、电压的关<br>系,当 tanδ 随温度明显变化<br>或试验电压由 10kV 升到<br>$U_m/\sqrt{3}$ 时, tanδ 增量超过<br>±0.3% 不应继续运行<br>③ 固体绝缘互感器不进行<br>tanδ 测量 |
|               | ② 1 年 ~<br>3 年 | 电压等级/kV                                                                                                         |              | 20~<br>35  | 66~<br>110 | 220 | 330~<br>500 |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|               | ③ 大修后          | 大修<br>后                                                                                                         | 油纸电容型        |            | 1.0        | 0.7 | 0.6         |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|               |                |                                                                                                                 | 充油型          | 3.0        | 2.0        |     |             |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|               |                |                                                                                                                 | 胶纸电容型        | 2.5        | 2.0        |     |             |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|               | ④ 必要时          | 运行<br>中                                                                                                         | 油纸电容型        |            | 1.0        | 0.8 | 0.7         |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|               |                |                                                                                                                 | 充油型胶纸<br>电容型 | 3.5<br>3.0 | 2.5<br>2.5 |     |             |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|               |                | ② 电容型电流互感器主绝缘电容量与初始值或<br>出厂值差值超出 ±5% 范围时应查明原因<br>③ 当电容型电流互感器末屏对地绝缘电阻小于<br>1 000 MΩ 时,应测量末屏对地 tanδ,其值不大于<br>2.0% |              |            |            |     |             |                                                                                                                                                                                                                                                            |

## 2.3 绝缘内部局部放电的测量

局部放电试验是检验绝缘内部局部放电的极好的方法。

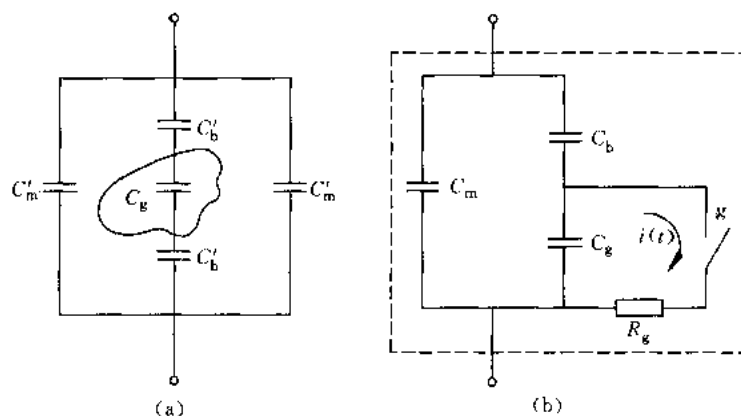
高压电气设备的绝缘,在工厂的制造中很难做到十分纯净和致密。绝缘内部容易含有小的气泡和气隙,在运输和运行中,也将受到机械的、冷、热或化学的作用,使绝缘中产生气泡和裂缝,由于气泡(空气)的介电常数比固体、液体小,这样,气泡中的电场强度相对较大,且气泡的耐电强度又较低,所以,气泡和气隙的放电是产生绝缘内部局部放电的主要原因。

由于局部放电发生在分散的,占空间极小的液体、固体绝缘包围的空间,且能量也很

小,故局部放电基本不影响电气设备的短时绝缘强度。但是在长期工作电压的作用下,由于局部放电时要产生臭氧、氧化氮等活性物质,使固体绝缘腐蚀、老化。这些日积月累的不良效应,最后将导致电气设备绝缘的击穿,这就是人们常说的电化击穿。对于电气设备,在正常情况下,寿命一般应在 20 年以上。所以,电气设备应该进行局部放电试验。

### 2.3.1 局部放电产生的原因

如前所述,绝缘内部的局部放电乃由气泡和气隙所产生,其等值电路如图 2.3.1 所示,图中  $C_g$  为绝缘内部气泡电容,  $C_b$  为与  $C_g$  串联的绝缘的电容,  $C_m$  为无气泡部分绝缘的电容。在外加电压的作用下,当气泡放电时,从图 2.3.1(b)中,可认为  $C_g$  电容向两端并联的间隙  $g$ ,  $R_g$  放电,其电压波形如图 2.3.2 所示。



$C_g$ —气隙电容;  $C_b$ —与气隙串联的正常绝缘的电容;  $C_m$ —正常绝缘的电容

图 2.3.1 局部放电等值电路图

$U$  为外施电压,  $U_g$  为加在  $C_g$  上的电压,当外施电压较高时,气隙  $C_g$  将通过  $g$  产生放电,其电流波形如图 2.3.2(b)所示,当外施电压升至  $U_T$  时,气隙  $C_g$  的电压达到  $U_g$ ,此时  $g$  放电,  $U_g$  将降至  $U_s$  或为零。由于  $C_g$  对  $g$  的放电将会在外施电压上形成一微小电压的变动,所以在外施电压上亦会出现  $\Delta U$  的变化,下面结合图 2.3.2 作一分析。

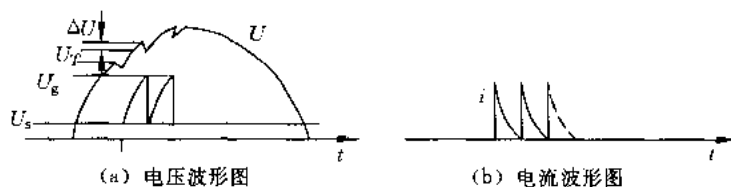


图 2.3.2 局部放电波形图

当  $g$  不放电时,绝缘的总电容为

$$C_x = C_m + \frac{C_g C_b}{C_g + C_b}$$

当外施电压达  $U_T$ ,  $C_g$  上的电压为  $U_g$  时,  $g$  放电,  $U_g$  将降至  $U_i$  或为零, 此时  $C_m$  将通过间隙  $g$  向  $C_b$  充电, 此时绝缘的总电容应为

$$C'_x = C_m + C_b$$

且  $C'_x > C_x$ 。由于  $g$  的放电,  $C_m$  要向  $C_b$  补充电荷, 所以绝缘的电压将要下降  $\Delta U_m$ 。

当  $g$  放电时, 电容  $C_g$  放出电荷应为

$$\Delta q_g = (U_g - U_s) \left( C_g + \frac{C_m C_b}{C_m + C_b} \right)$$

由于  $C_m \gg C_b$ ,  $U_s \rightarrow 0$

所以

$$\Delta q_g = U_g (C_g + C_b)$$

由于  $U_g$  的变化, 会引起  $C_m$ ,  $C_b$  变化, 但此时电源回路有电阻、电感的影响, 来不及补充电荷, 故  $U_g$  的变化将引起  $C_m$  上电压的变化

$$\Delta U C_m = U_g \frac{C_m C_b}{C_m + C_b}$$

由此得

$$\Delta U = \frac{C_b}{C_b + C_m} U_g$$

又由于  $U_g$  放电后, 绝缘的总电容为

$$C'_x = C_m + C_b$$

因此可得绝缘上的视在放电量

$$q = C'_x \Delta U$$

将  $C'_x$  和  $\Delta U$  代入上式, 得

$$q = (C_m + C_b) \frac{C_b}{C_b + C_m} U_g = C_b U_g$$

从式  $\Delta q_g = U_g (C_g + C_b)$  和  $q = C_b U_g$  两式比较可看出, 间隙  $g$  实际放电电量  $\Delta q_g$  与绝缘的视在放电量  $q$  相差是比较大的, 这是因为气隙的间隙厚度很小, 所以  $C_g \gg C_b$ , 说明实际放电量比视在放电量大多得多。

局部放电的视在放电量可用试验的方法测量出来, 除测量视在放电量外, 还可测量单次放电能量、放电频度、平均放电电流等。对实际局部放电, 大都测量局部放电的起始放电电压、熄灭电压和视在放电量。

## 2.3.2 电力变压器、互感器内部局部放电的测量

### 1. 试验线路图

为测量试品内部的局部放电, 一般测量三个量, 一为测量起始放电电压, 二为熄灭电压, 三为局部放电的视在放电量, 试验电路如图 2.3.3, 图 2.3.4, 图 2.3.5 所示。图 2.3.3 为并联测量电路,  $C_x$  为被试品,  $C_k$  为耦合电容,  $Z_m$  为检测阻抗,  $T$  为试验变压器,  $R$  为保护、隔离电阻。由于耦合电容  $C_k$ , 检测阻抗  $Z_m$  电路与被试品  $C_x$  并联连接, 故称并联测量电路。

当试验变压器电压升至一定电压时, 被试品  $C_x$  内若产生局部放电, 其视在放电量将

在  $C_x, C_k, Z_m$  组成的闭合回路内产生脉冲电流。

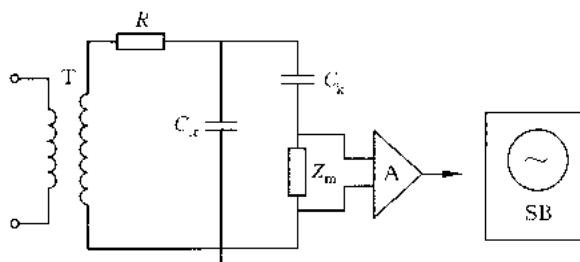
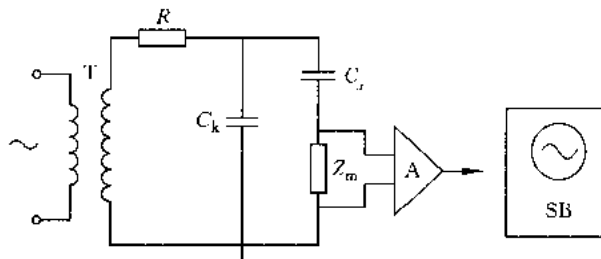


图 2.3.3 并联测量电路

由于电源变压器有很大感抗、保护、隔离电阻的作用，脉冲电流只通过  $C_k$  和  $Z_m$ ，因此在  $Z_m$  检测阻抗上有一与视在放电量  $q$  成比例的电压，此电压经选频放大器  $A$  后，再用示波器可观察到局部放电量的大小。

图 2.3.4 为串联测量电路，即检测阻抗  $Z_m$  与被试品  $C_x$  串联连接。此种电路与并联测量电路有些相似，只是检测阻抗  $Z_m$  直接与被试品  $C_x$  串接。同样，当试验变压器的电压升至被试品  $C_x$  内部产生局部放电时，由于试验变压器的感抗和保护电阻的隔离作用， $C_x$  产生的局部放电的脉冲电流将通过  $C_k$  和  $Z_m$ ，在检测阻抗  $Z_m$  上产生压降，经选频放大器放大后，在示波器的显示屏上可观察到局部放电的波形。



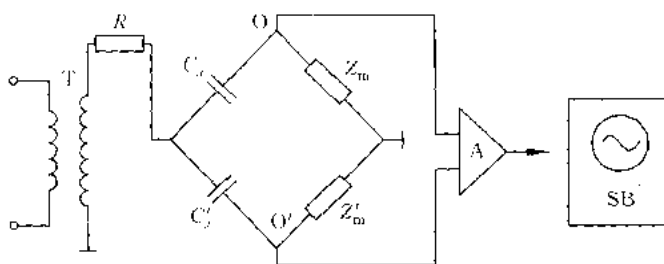
T—电源变压器；R—阻抗； $C_x$ —被试品；  
 $C_k$ —耦合电容器； $Z_m$ —检测阻抗；  
A—放大器；SB—示波器

图 2.3.4 串联测量电路

由于串联测量电路的检测阻抗  $Z_m$  与被试品  $C_x$  串联，所以试验电压下通过  $C_x$  的工频电流亦通过  $Z_m$ ，当被试品电容  $C_x$  较大时，通过检测阻抗  $Z_m$  的电流也较大，这对制造检测阻抗  $Z_m$  来说，将增大体积，又要屏蔽等，增加了难度。另外，串联测量电路中，被试品  $C_x$  还不能直接接地，有时也给试验带来麻烦。因此，一般做局部放电试验时，常用并联测量电路进行更为简便。

图 2.3.5 为桥式测量电路，所谓桥式电路，就是与被试品  $Z_x$  (电容为  $C_x$ ) 相串联的  $Z_m$  检测阻抗电路两端，并接一  $Z'_x$  (电容为  $C'_x$ ) 和  $Z'_m$  相串联的电路，且  $Z_x = Z'_x$ ， $Z_m = Z'_m$ ，在局部放电的试验电压下，辅助的  $Z'_x$ ， $Z'_m$  和  $Z_m$  (检测阻抗) 均不能产生局部放电，当在桥式电路上加上试验电压时，若被试品  $Z_x$  产生局部放电时，此局部放电信号将通过桥式电路中点  $O, O'$  输给放大器  $A$ ，然后接至示波器  $SB$  的端子，从而可从示波器的屏幕上看到被

试品  $Z_x$  的局部放电的情况。

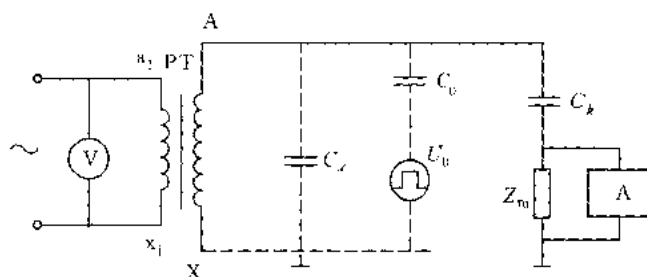


T 电源变压器；R 阻抗； $C_g$  被试品；  
 $C_g$ —耦合电容器； $Z_m$ —检测阻抗；  
 A 放大器；SB 示波器

图 2.3.5 桥式测量电路

桥式测量电路又称为平衡测量法。因为干扰信号同样干扰  $Z_x, Z'_x, Z_m, Z'_m$ ，在中点 O、O' 输出时，干扰信号抵消了，所以，此种电路抗干扰能力强，可将干扰信号降低几十到几百倍。以上所述为外施电压的测量方法，对于电力变压器和电磁式电压互感器，也可采用自激式的测量法。

自激式测量局部放电的试验线路如图 2.3.6 所示，在变压器或互感器的低压侧施加一电压，在高压侧可感应出高电压，当变压器或互感器内部绝缘产生局部放电时，脉冲电流将通过  $C_k, Z_m$  在检测阻抗上产生压降，从而可通过放大器、示波器上测出局部放电的波形和幅值。



PT—被试品兼电源（即  $C_g$ ）； $Z_m$ —测量阻抗；  
 $C_k$ —耦合电容，100kV 静电电压表的高压电极；  
 A—放大器、示波器（检测仪器）；  
 $U_0, C_g$ —方波发生器输出电压及电容（其值  $U_0 = 2V \sim 5V$ ，  
 $C_g = 10pF$  或  $100pF, 1000pF$ ）；  
 (V)—与互感器原边并接的电压表

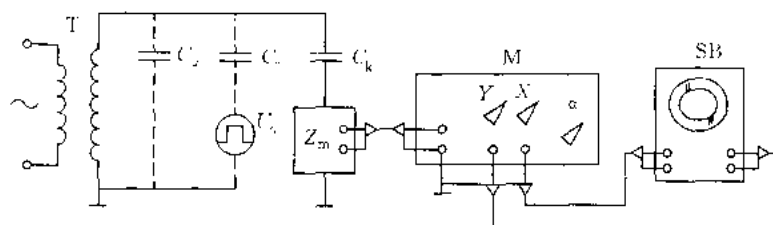
图 2.3.6 电磁式电压互感器自激式局部放电试验线路图

## 2. 试验仪器介绍

测量局部放电的仪器有多种，本书介绍几种国产常用的仪器。

## (1) XJD-1 型局部放电仪

图 2.3.7 为 XJD-1 型局部放电仪试验时的接线图。XJD-1 型局放仪由三部分组成：一为放大器及椭圆扫描发生器，二为方波发生器，三为检测阻抗，下面分别予以简述。



T 被试变压器；  $C_k$  耦合电容器；  $Z_m$  检测阻抗；  
M 放大器及椭圆扫描发生器； SB 示波器；  $C_k, U_0$  方波发生器输出电压及电容

图 2.3.7 局部放电具体接线图(XJD-1 型局放仪)

① 放大器及椭圆扫描发生器。这是 XJD-1 型局放仪的主要组成部分，其放大器为选频放大器，其频率范围为  $120\text{kHz} \pm 5\text{kHz}$ ，椭圆扫描发生器是一个电压移相电路，由于送至示波器的  $x$  轴和  $y$  轴的电压频率相同，相角和幅度可以调节，所以，在示波屏上可显示出一个椭圆的轨迹(李沙育图形)，椭圆的  $x$  轴和  $y$  轴的相角可由面板上设置的电位器调节，其范围为  $0^\circ \sim 30^\circ$ ，幅值范围为  $0\text{V} \sim 30\text{V}$ 。

② 方波发生器。当未施加高压时，方波发生器主要是用来给测量回路注入一定电量的方波，以校验测量回路的灵敏度。方波发生器由多谐振荡器，倒相兼整形电路，放大器及射极输出电路组成，其重复频率小于 200 周/秒，输出电压为  $2\text{V} \sim 5\text{V}$ ，输出电容可分为  $10\text{pF}$ 、 $100\text{pF}$  及  $1000\text{pF}$  三档，可根据不同的试品来选取电容值。由于方波发生器是用来确定测量系统局部放电和灵敏度的，所以在未施加高压前，应进行灵敏度的校正，一般测量局部放电时，其灵敏度为每毫米  $3\text{pC}$ 。具体校正方法是，将方波发生器置于与  $C_k$  并联处(如图 2.3.7 所示)，打开方波发生器、放大器及椭圆扫描发生器、示波器等，在示波屏上观测方波发生器注入电量产生的波形高度，当注入电路的电量  $q = U_0 C_0$  为定值时， $q/H$  即为测量系统的灵敏度， $H$  为示波屏上注入电量时波形的高度，若不为  $3\text{pC}/\text{mm}$  时，可调节放大器、示波器上衰减器旋钮，以达到  $3\text{pC}/\text{mm}$  的值。

③ 检测阻抗  $Z_m$ 。

检测阻抗  $Z_m$  系用脉冲变压器进行匹配并传输信号用的。两极上除有输入输出端子外，还有一电位器(阻尼电阻)可以调节，以使振荡波得到一定的衰减。

## ④ 示波器 SB，示波器可采用通用的电子示波器。

## ⑤ 局部放电的波形图和干扰波形。

在局部放电试验时，除绝缘内部可能产生局部放电外，引线的联接，电接触以及日光灯，高压电极的电晕等，也可能会影响局部放电的波形，为此，要区别绝缘内部的局部放电与其他干扰的波形，下面将几种典型的波形列于图 2.3.8，以供试验人员区别。

## (2) Model-5 型局部放电仪

Model-5 型局放仪除有显示单元，可在示波屏上显示放电信号的波形和相位，还装

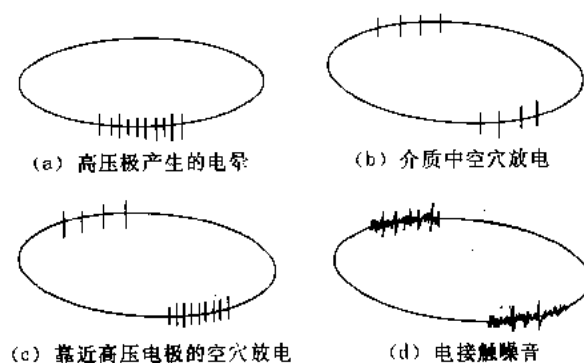


图 2.3.8 典型放电的示波图

有放电量表,可以测出经放大器放大后的脉冲信号的峰值。

Model—5 型局放仪还备有一套检测阻抗和方波的发生器,以调节试验系统的灵敏度,该仪器集多种功能于一体,所以使用方便,性能也比较好,Model—5 型局放仪的外形图如图 2.3.9 所示。

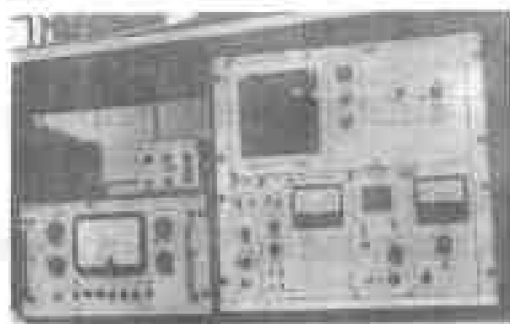


图 2.3.9 Model—5 型局放测试仪外形图

### (3) 超声波检测仪

超声波检测仪的原理是:当电气设备内部发生局部放电时,放电处将产生超声波向四周传播,直达电气设备容器的表面,在设备的外壁(如套管、互感器瓷套的外表面)放上压电元件,在超声波的作用下,压电元件的两个端面上会产生交变的束缚电荷,引起压电元件两个端部电极上电荷的变化,或在外回路中引起交变电流。因此,可检测此信号,判断设备内部的局部放电,其方框图如图 2.3.10 所示。

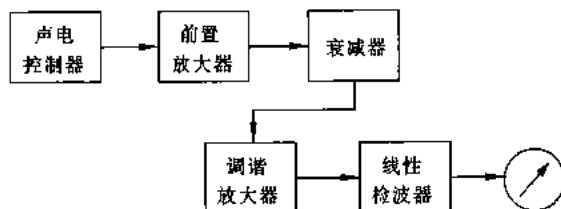


图 2.3.10 用超声波检测绝缘内部局部放电方框图

超声波检测绝缘内部局部放电的优点为:抗干扰能力强、使用方便,可以在运行中和耐压试验时检测绝缘内部的局部放电,也适合绝缘预防性试验使用。

(4) 泰迪斯(TETTEX)9100 局部放电系统(如图 2.3.11 所示)。

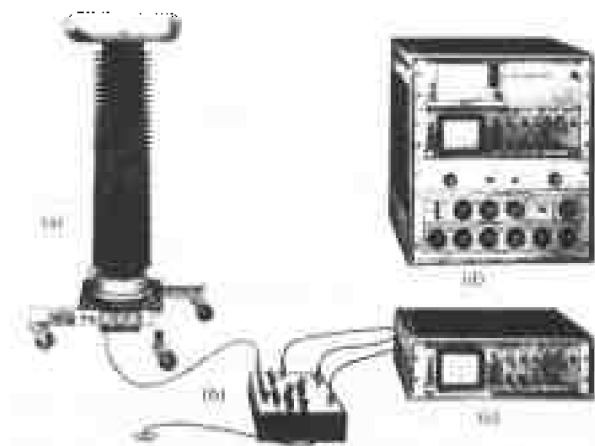


图 2.3.11 TETTEX 9100 局部放电测量系统

### 3. 局部放电的测量

测量绝缘内部的局部放电,先要对测量系统进行校订,主要是校订其灵敏度,而后进行测量。

(1) 用方波发生器校订测量系统的灵敏度

先不加高压,用方波发生器对试验线路注入一定电量,具体接线如图 2.3.12 所示。

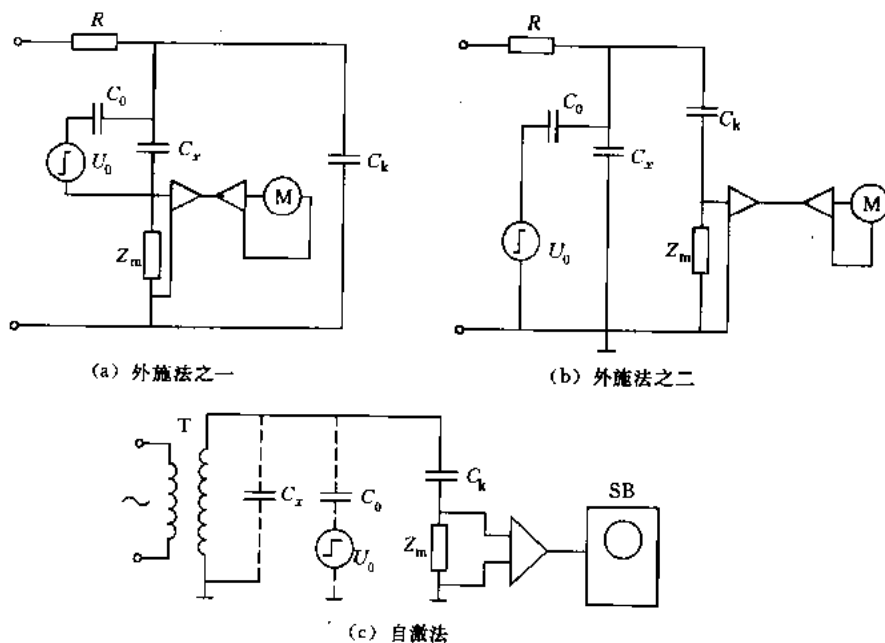


图 2.3.12 外施自激法方波校订试验线路图

下面以图 2.3.12(c)为例,说明校订的情况。检测阻抗  $Z_m$  可用图 2.3.13 的等值电路表示。

当图 2.3.13 中的试品  $C_x$  绝缘内部产生局部放电时,  $C_x$  两端将有  $\Delta q_x$  及  $\Delta U$  的变化,其计算式为

$$\Delta U = \frac{\Delta q_x}{C_x + \frac{C_k C_n}{C_k + C_n}}$$

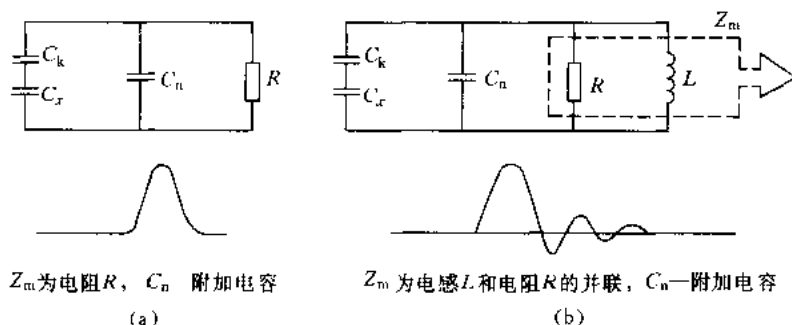


图 2.3.13 检测阻抗等值电路及波形

在检测阻抗  $Z_m$  上会产生  $\Delta U_m$  的变化,其等值电路如图 2.3.12(c)所示。

$$\begin{aligned} \Delta U_m C_n &= \Delta U \frac{C_k C_n}{C_k + C_n} \\ \Delta U_m &= \frac{C_k}{C_k + C_n} \Delta U \\ &= \frac{C_k}{C_k + C_n} \frac{\Delta q_x}{C_x + \frac{C_k C_n}{C_k + C_n}} \end{aligned}$$

式中  $C_k$ ——耦合电容;

$C_n$ —— $Z_m$  的附加电容;

$\Delta U$ ——被试品  $C_x$  电压的变化量;

$\Delta q_x$ ——被试品  $C_x$  电荷的变化量。

从图 2.3.14 的等值电路中可看出,当方波电压为  $U_0$ ,其电容为  $C_0$ ,注入测量系统的电荷量为  $\Delta q = U_0 C_0$ ,则在  $Z_m$  检测阻抗上的电压变化量应为

$$\Delta U_m' = \frac{C_k}{C_k + C_n} \frac{U_0 C_0}{C_0 + \left( C_x + \frac{C_k C_n}{C_k + C_n} \right)}$$

当  $C_0 \leq \left( C_x + \frac{C_k C_n}{C_k + C_n} \right)$  时

$$\Delta U_m \approx \frac{C_k}{C_k + C_n} \frac{U_0 C_0}{C_x + \frac{C_k C_n}{C_k + C_n}}$$

此时若示波器上信号的高度为  $H/\text{mm}$ ,则测量回路的灵敏度应为  $U_0 C_0 / H$ ,单位为

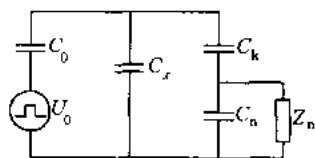


图 2.3.14 自激法方波校正等值电路图

pC/mm,在做局部放电试验时,可调至 3pC/mm,灵敏度调好后,随即撤去方波发生器。

### (2) 测量绝缘的起始放电电压

在试品上施加一个比预计起始放电电压值低的电压,然后逐渐升高电压,直至放电量达到一个预先规定的较低数值(预先规定较低数值暂定为最小允许放电量),这时施加于试品  $C_x$  的电压即为局部放电的起始电压。

### (3) 局部放电熄灭电压的测量

当试品电压达到起始放电电压以后,继续升高试验电压的 10%,随即电压降到放电量小于同一规定值,这时的局部放电电压即为局部放电的熄灭电压。

### (4) 视在放电量的测量

按表 2.3.1 的规定,预加一定的电压,试验电压在不同电压下持续一定的时间,在规定的状态下在测量系统的示波器上读取放电量的显示高度  $H$ ,从而可得出视在放电量的值,其值为

$$q_x = Hq_0/H_0 \quad q_0/H_0 = \frac{U_0 C_0}{H_0} - 3\text{pC/mm}$$

其中  $q_x$  视在放电量;

$q_0/H_0$  灵敏度 3pC/mm。

表 2.3.1 电力变压器、电抗器、电流互感器、电压互感器局放标准

| 产 品       | 周 期                                                    | 要 求                                                                                                                                                                                       | 说 明                                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 电力变压器及电抗器 | ① 大修后(220kV及以上)<br>② 更换绕组后(220kV及以上120MVA及以上)<br>③ 必要时 | ① 在线端电压为 $1.5U_n/\sqrt{3}$ 时,放电量一般不大于 500pC。在线端电压为 $1.3U_n/\sqrt{3}$ 时,放电量一般不大于 300pC<br>② 干式变压器按 GB6450 规定执行                                                                             | ① 试验方法符合 GB1094.3 的规定<br>② 周期中“大修后”系指消缺性大修后,一般性大修后的试验可行规定<br>③ 电抗器可进行运行电压下局部放电监测 |
| 电流互感器     | ① 1~3 年(20kV~35kV 固体绝缘互感器)<br>② 大修后<br>③ 必要时           | ① 固体绝缘互感器在电压为 $1.1U_n/\sqrt{3}$ 时,放电量不大于 100pC,在电压为 $1.1U_n$ 时(必要时),放电量不大于 500pC<br>② 110kV 及以上油浸式互感器在电压为 $1.1U_n/\sqrt{3}$ 时,放电量不大于 20pC                                                 | 试验按 GB5583 进行                                                                    |
| 电压互感器     | ① 投运前<br>② 1~3 年(20kV~35kV 固体绝缘互感器)<br>③ 大修后<br>④ 必要时  | ① 固体绝缘相对地电压互感器在电压为 $1.1U_n/\sqrt{3}$ 时,放电量不大于 100pC,在电压为 $1.1U_n$ 时(必要时)放电量不大于 500pC。固体绝缘相对相电压互感器,在电压为 $1.1U_n$ 时,放电量不大于 100pC<br>② 110kV 及以上油浸式电压互感器在电压为 $1.1U_n/\sqrt{3}$ 时,放电量不大于 20pC | ① 试验按 GB5583 进行<br>② 出厂有试验报告者,投运前可不进行试验或只进行抽查试验                                  |

#### (5) 放电脉冲重复率的测量

在测量视在放电量的同时,可对脉冲次数进行计数,脉冲重复率为  $N = \text{脉冲次数} / \text{测量的时间}(s)$ ,测量时应记录预置的“门槛”数值。

#### (6) 线路的局部放电水平

在对试品进行局部放电时,试验线路在试验电压下不应产生局部放电现象,即外施电源不应有局部放电;试验线路不应有尖端放电等电晕现象。另外,对外界来的干扰信号也应采取措施,使干扰减少到尽可能小的程度,如屏蔽以减少外来干扰、滤波以减小窜入电源的干扰信号或以对干扰信号的识别方法等以确定绝缘的局部放电信号。

## 2.4 绝缘油的试验

在高压电气设备中,绝缘油得到了广泛的应用,如电力变压器、电力电容器、电流、电压互感器(油浸)等。在这些设备中,电气设备的主要部件均浸在绝缘油中,绝缘油还将填充到容器的各个部分,将设备中的空气排除。绝缘油可起到绝缘和散热的作用。

目前,我国使用较多的绝缘油就是变压器油。变压器油是从石油中分馏后经精制而成的碳氢化合物的混合物,其中主要是烷属烃和环烷属烃,烷属烃和环烷属烃都是饱和的,其分子结构中没有双键,它不易与氧或其他物质起化学作用,性能很稳定,这就保证了变压器油能在电气设备中稳定地运行。

除变压器油外,还有多种绝缘油(液体绝缘材料),如电容器油、硅油、十二烷基苯、电缆油、蓖麻油、二芳基乙烷(S油)等。虽然不同种的绝缘油各有特点,如有的绝缘油的介电常数大,有的绝缘强度高,有的介质损耗因数小等,但各种绝缘油的试验方法大都是相同的,现以变压器油为例,来说明绝缘油的试验方法。

变压器油的试验内容很多,除电气性能外,还有许多物理、化学性能的试验,其主要试验内容有:

### 1. 电气性能试验

- ① 电阻率的测量;
- ② 介质损耗因数( $\tan\delta$ )的测量;
- ③ 介电常数( $\epsilon$ )的测量;
- ④ 电气强度的试验。

### 2. 物理、化学性能的试验

- ① 酸值试验;
- ② 凝固点的试验;
- ③ 闪火点的试验;
- ④ 粘度试验;
- ⑤ 变压器油中气体的气相色谱分析试验。

本书涉及高电压试验较多,主要对绝缘油的电气性能试验予以详细介绍。

### 2.4.1 变压器油的电气性能试验

#### 1. 介电常数 $\epsilon$ 、介质损耗因数( $\tan\delta$ )的测量

##### (1) 介电常数 $\epsilon$

又称为电容率,指在一个电容器两极板间和电极周围全部只由被试绝缘材料(如变压器油)充满时的电容与同样电极形状的真空中电容之比,记作 $\epsilon$ 。

##### (2) 介质损耗因数( $\tan\delta$ )

介质损耗因数在前几节已有论述。介质损耗因数 $\tan\delta$ 实际是绝缘介质损耗角的正切, $\delta$ 角为损耗角,损耗角为外施交流电压与通过介质电流之间的相角的余角。

##### (3) 测量仪器

前面已经介绍了几种测量介质损耗因数的仪器,如 QS-1 型西林电桥、QS-19 型变压器比例臂电桥、数字电桥等。本节再介绍一种常用的精密的西林电桥,即 QS-3 型西林电桥。

对于测量绝缘材料的介质损耗因数,应使用具有介质损耗因数分辨率为  $10^{-4}$  的交流(工频)桥,最好采用当试样电容为 100pF 时具有  $10^{-5}$  分辨率的电桥。QS-3 型电桥具有  $\tan\delta$  的量程为 0.000 1~1, QS-3 型电桥仍是一阻抗电桥,其基本原理与 QS-1 型相似,但在减小误差上有其特点,下面予以叙述。

当测量电介质的损耗因数时,会有一些杂散电容造成测量误差,具体接线如图 2.4.1 所示。 $C_1$  为高压线对地的杂散电容, $C_2$  为高压臂对低压臂的杂散电容, $C_3$  为低压臂对地的杂散电容,为了减小杂散电容带来的误差,可采用屏蔽措施。其方法为:把电桥本体置于金属屏蔽箱中,如图 2.4.2 所示,这样, $C_2$  就不起作用了。从图 2.4.2 中也可以看出, $C_1$  并不参加测量。因此,引起测量误差的杂散电容只有  $C_3$ ,即低压臂对地的杂散电容。为了减小  $C_3$  对测量误差的影响,可采用华纳(Wagner)屏蔽的方式。所谓华纳屏蔽作如

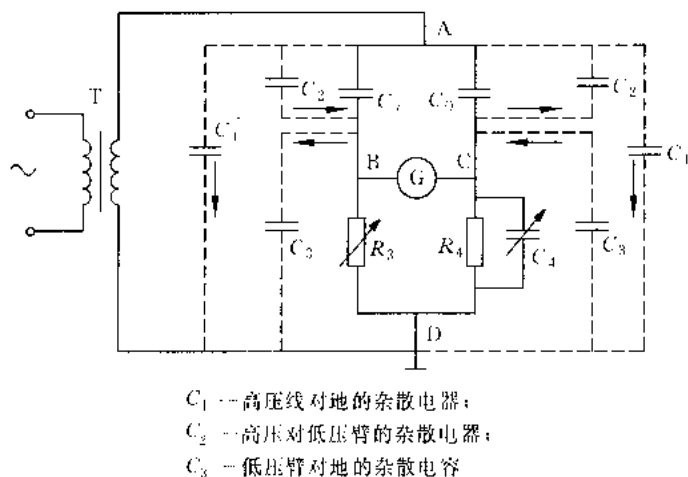


图 2.4.1 杂散电容与电桥的关系图

下说明:如图 2.4.3 所示, $Z_1$  为西林电桥低压臂中的阻抗,它是由  $R_1$  和  $C_1$  并联而成的,在  $Z_1$  的外面,有一层金属屏蔽,这样, $Z_1$  对屏蔽有杂散电容存在,很显然,这些杂散电容会给测量带来一些误差,为减小误差可对  $Z_1$  作其等值电路,如图 2.4.3(a) 所示,由于  $Z_1$  中的点 1,2 对地有电流流过,才给测量带来误差,假若 1-0 或 2-0 之间没有电流流过的话,则可认为  $C_1$  或  $C_2$  的阻抗对电桥的平衡就不起作用了。因此,想办法将点 1 的电位与屏蔽层的电位变成相等的电位,这样,1-0 之间的电位差为零,也就没有电流流过。杂散电容  $C_z$  对电桥的平衡就没有影响了。这就是所谓的华纳屏蔽的作用。

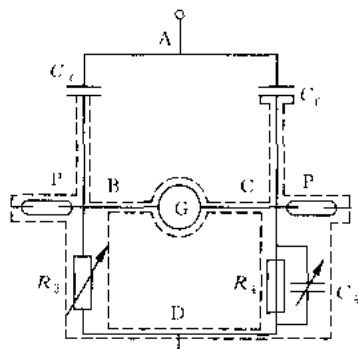
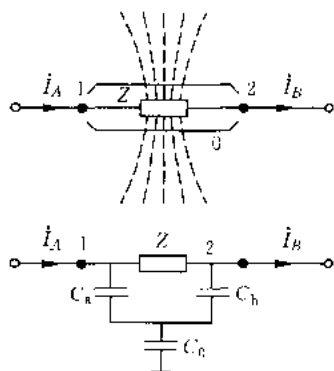
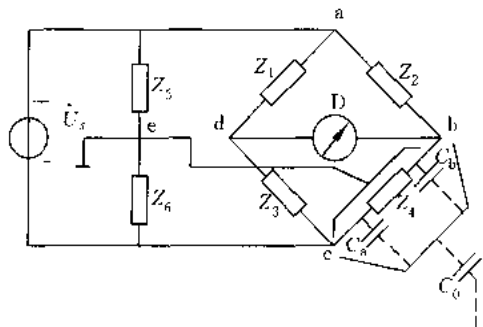


图 2.4.2 电桥屏蔽措施



(a) 接线图和等值电路



(b) 具体接线

图 2.4.3 华纳屏蔽示意图

QS-3 型电桥就采用了华纳屏蔽的技术,具体实现的方法如图 2.4.4 所示,电桥的 D 点不直接接地,而经过“1”再接,“1”为一可调节幅值和相位的交流电源。将“1”调节器调节至检流计两顶点与屏蔽层电位相等,这样,检流计两顶点对屏蔽层的电流亦为零,因而消除了检流计顶点对屏蔽层由于杂散电容对电桥平衡的影响。

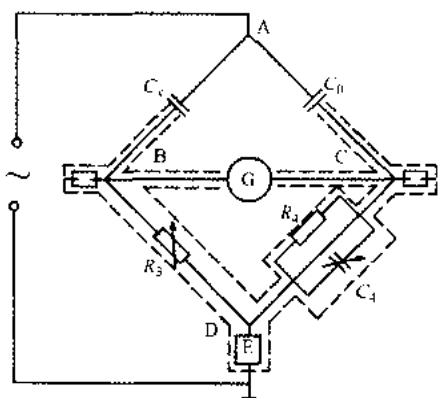


图 2.4.4 QS-3 电桥屏蔽接线图

为使检流计顶点与屏蔽层电位相等,“1”调节器电路如图 2.4.5 所示,图 2.4.5(a) 为接线图,图 2.4.5(b) 为相量图,电压  $U_{EF}$  为交流电源, $R, C$  为一串联电路,当调节电阻  $R$  时, $U_{10}$  的相位可随  $R$  的变化而变化,其幅值可由调压器调节  $U_{EF}$ ,因此,可使检流计两顶点对屏蔽层的电位差为零。

为使检流计顶点与屏蔽层电位相等,“1”调节器电路如图 2.4.5 所示,图 2.4.5(a) 为接线图,图 2.4.5(b) 为相量图,电压  $U_{EF}$  为交流电源, $R, C$  为一串联电路,当调节电阻  $R$  时, $U_{10}$  的相位可随  $R$  的变化而变化,其幅值可由调压器调节  $U_{EF}$ ,因此,可使检流计两顶点对屏蔽层的电位差为零。

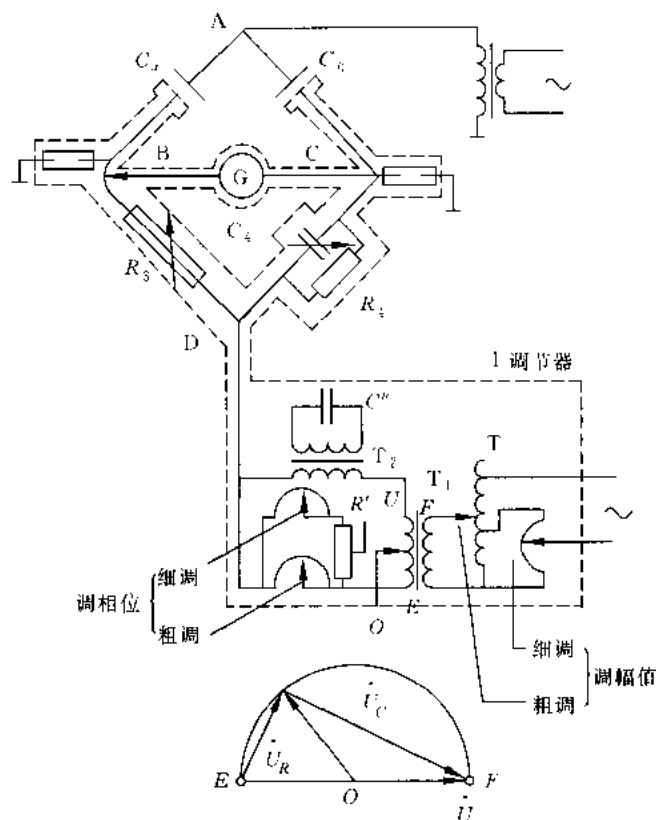


图 2.4.5 “I”调节器电路图

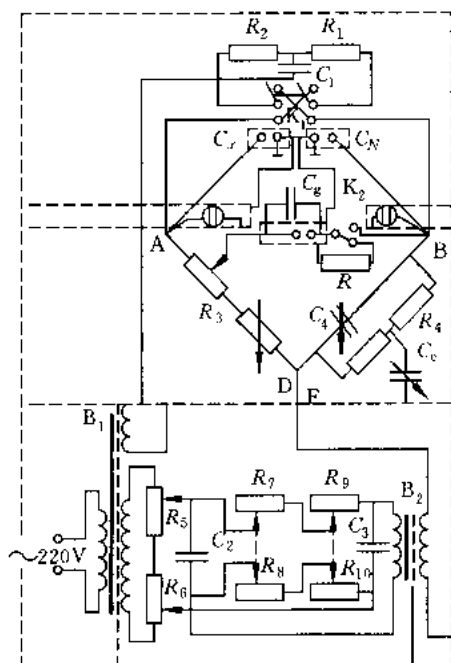


图 2.4.6 QS-3 型精密西林电桥线路图

QS-3 精密型西林电桥的接线如图 2.4.6 所示。由于采用了一些减小误差的措施, QS-3 型电桥的准确度较高, 但测量范围较小, 其电容测量范围为  $30\text{pF} \sim 0.4\mu\text{F}$ ,  $\tan\delta$  的测量范围为  $0.0001 \sim 1$ 。具体计算方法为:

$$C_x = C_0 \frac{R_1}{R_3}$$

$$\tan\delta_x = \omega C_4 R_4$$

$$C_0 \text{ 为 } 100\text{pF}$$

为确定变压器油等电介质的特性, 并不需要太大的测量范围, 所以, QS-3 型电桥完全能满足测量电介质  $C_x$ ,  $\tan\delta_x$  和  $\epsilon_x$  的要求。

另外, QS-19 型变压器比例臂电桥, 以及  $\tan\delta$  能达到  $0.0001$  的电桥均可以测量变压器油的  $\epsilon$  和  $\tan\delta$ 。

#### (4) 测量电极

测量变压器油的电容、介质损耗因数的电

极有两种,一种是圆柱形电极杯(三端电极),另一种为平板型电极(平板型三端电极)。电极的图形如图 2.4.7,图 2.4.8 所示。

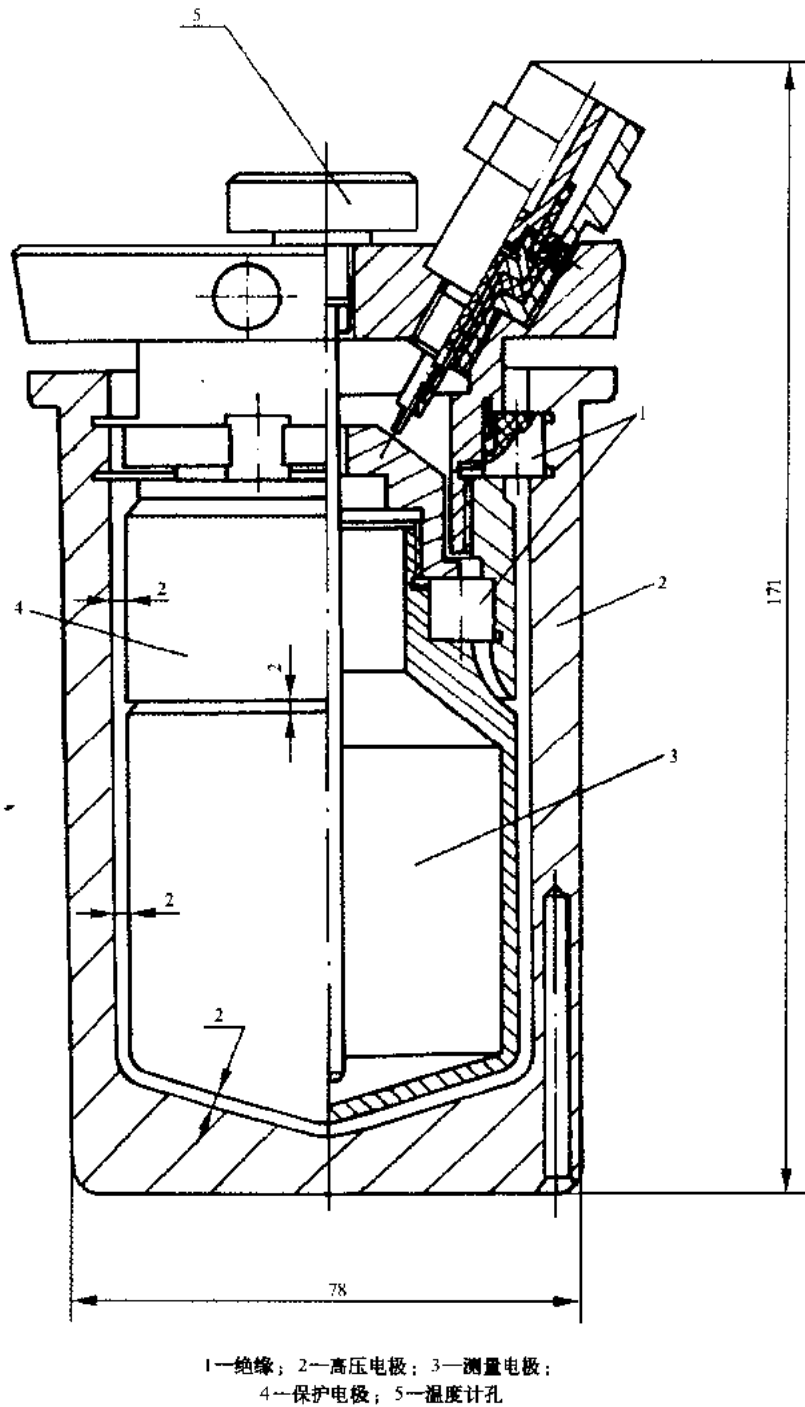


图 2.4.7 圆柱型三端电极

在用电极测量变压器油的  $\epsilon$  和  $\tan\delta$  时,应仔细清洗电极。将电极折开后,先用丙酮然后用软性擦皂或洗净剂洗涤。擦洗电极时,不应损伤金属电极表面粗糙度。具体清洗

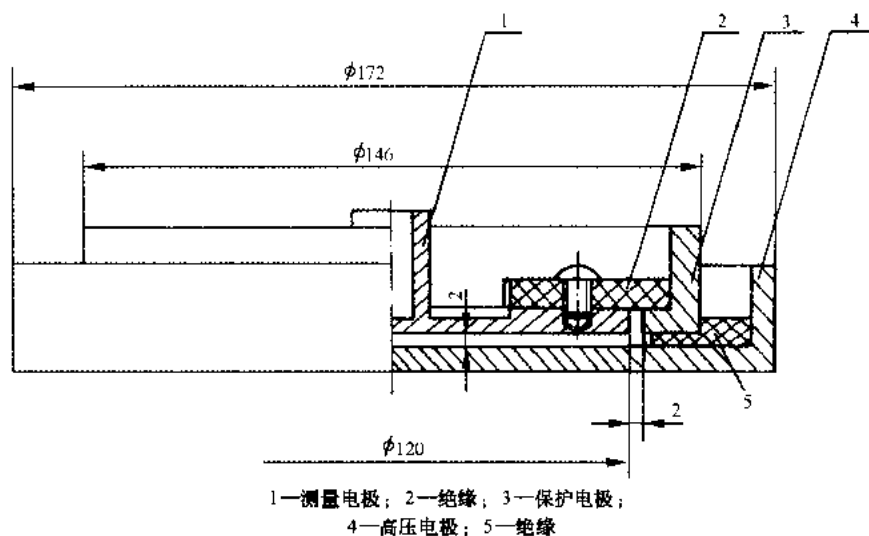


图 2.4.8 平板型三端电极

方法可按国家标准 GB5654—85 的有关规定进行,电极洗净后,不要用手直接接触其表面,不得受潮气或灰尘的污染。

## 2. 电气强度的试验

电气强度试验是变压器油的一项常规试验。它是用来阐明变压器油被水分和其他悬浮物质物理污染的程度。

电气强度试验方法是:将变压器油倒进专用设备油杯中,以一定速率上升的交流电压加在油杯上,直至变压器油击穿,变压器油击穿时的电压,即为该次变压器油的击穿电压。根据国家标准 GB507—86 的规定,对变压器油电气强度试验简述如下:

### (1) 试验装置

试验变压器产生的波形应为正弦波,其峰值因数应在 $\sqrt{2} \pm 5\%$ 的范围。装置应有良好接地,试验线路应有保护电阻,以减小由于变压器油击穿时的电流并防止产生振荡和变压器油由于电流而分解。另外变压器原边应有自动跳闸的过流保护装置,以防止变压器油击穿时,引起变压器长时间短路。

电压的调节方法很多,多为接触式调压器调压,最好采用自动升压系统,因为手动调压不易使电压匀速增长。

测量击穿电压的单位为 kV(有效值),也可用峰值电压除以 $\sqrt{2}$ 。

### (2) 试验电极——油杯

试验油杯由杯体和电极两部分组成,按国家标准 GB507—86 的规定,有两种类型的油杯,一种是球形电极的油杯,另一种是球盖形电极的油杯,如图 2.4.9 所示。

油杯的杯体是由玻璃、塑料制成的透明容器或由电工陶瓷制成的容器,有效容积为 300mL~500mL,杯体以密闭为宜。

电极由磨光的铜、黄铜、青铜或不锈钢材料制成。呈球形的,其直径为 12.5mm~13mm,如图 2.4.9(a)所示。呈球盖形的,其具体尺寸如图 2.4.9(b)所示。电极的表面应

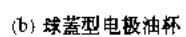
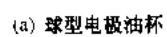


图 2.4.9 油杯图

光滑。一旦电极表面上有由于放电引起的凹坑时,就应更换或打磨电极。电极应安装在水平轴上,电极间的距离为 2.5mm,其间隙可用块规校准。要求间距的准确度为 0.1mm,电极浸入油的深度为 40mm 左右。

### (3) 试验步骤

① 取油样,应用洁净的容器从桶装或听装油的容器的低部抽取油样。

② 将油样慢慢倒入洁净的油杯中,在将油倒入油杯时,要尽量避免形成气泡。

③ 在油杯的两个电极上,施加 50Hz 交流电压,按 2kV/s 的速度上升,直至变压器油发生击穿,变压器油的击穿电压就是当电极之间发生第一个火花时达到的电压。当油中发生恒定的电弧时,高压变压器的初级应能自动断开电路,一般断开的时间内应不大于 0.2s,如果发生电极间瞬时的火花,则采用人工断开电路。

④ 试验次数。每个试样应进行六次击穿试验,以六次击穿电压的算术平均值作为试验的电气强度。

试样倒入油杯后,应保证变压器油中无气泡后方能进行试验,装油后最迟 10min 内必须进行试验。变压器油击穿后,应用清洁、干燥的玻璃棒轻轻搅烂变压器油,无气泡后再进行试验,或间隔 5min 进行下一次试验。

⑤ 环境条件。试验时的油温应与室温相同,作为判断油的质量的试验应在 15℃~20℃ 之间进行,试验时大气的相对湿度应不高于 75% 的条件下进行。

### 3. 电阻率的测量

绝缘油的电阻率即体积电阻率,可看成在一个单位立方体积里的体积电阻,用其直流电场强度与稳态密度之商来度量。

测量体积电阻率时的电极与测量介质损耗因数的电极是一样的。由于测量电阻率时,与电场强度、充电时间、含杂质的情况、温度等有着密切的关系,因此有如下的规定。

① 温度。因体积电阻率与绝对温度的倒数呈指数式关系,因此要求当油中温度达到与空气温度平衡时就可测量电阻率。

② 电场强度选为 200V/mm~300V/mm。

③ 充电时间一般规定为 60s。

④ 测量仪器应使用具有  $10^{15}\Omega$  以上分辨率的高阻计或其他仪器测量,测量仪器引起的误差应保证在 20% 以下。

⑤ 具体测量方法。当独立测量绝缘油的电阻率时,电极被注入绝缘油后 15min,就开始测量电阻率。对测量完介质损耗因数后的试样,只要将被测电极短路 1min 后,即可开始测量电阻率,当加上直流电压 60s 以后,应立即记录电阻值。记录好电阻值后,可用以下公式计算电阻率

$$\rho = KR \quad (\Omega\text{m})$$

式中  $\rho$ ——绝缘油的电阻率;

$R$ ——被测试样的电阻值;

$K$ ——空电极常数, m。

空电极常数可根据以空气为介质时电极杯的电容来计算,计算按下式进行

$$K = 0.113C_0$$

其中  $C_0$ ——空电极杯时的电容。

在测量绝缘油的电阻率时,两次测量的差值不应超过两值中较高一个的 35%。

## 2.4.2 物理化学性能的试验

变压器油的试验项目很多,而本书仅对两个物理化学试验方法作较详细的叙述。

### 1. 酸值的测定

所谓酸值,就是中和 1g 试油酸性组分所需的氢氧化钾的毫克数,称为酸值。

试验方法为:取油重  $G=10\text{g}$ ,用 50ml 的无水乙醇(酒精)倒入锥形烧瓶,加热使之沸腾 5min,此时应装回流冷凝器(否则酒精将会挥发掉)。在试油与酒精的混合液中加入 BTB 指示剂,当油呈酸性时,指示剂呈黄色,当油为碱性时,指示剂将呈蓝或蓝绿色。一般变压器油为酸性,所以,加入 BTB 指示剂后,油呈黄色,可用浓度为  $0.02\text{mol/L} \sim 0.05\text{mol/L}$  的氢氧化钾溶液滴定,直至油和酒精的颜色呈蓝色为止,记下所用氢氧化钾溶液的毫克数。此时,酸值可用下式计算

$$X = \frac{(V_1 - V_0)56.1 \times C}{G}$$

其中  $X$ ——试油的酸值,  $\text{mgKOH/g}$ ;

$V_1$ ——滴定试油所消耗  $0.02\text{mol/L} \sim 0.05\text{mol/L}$  氢氧化钾溶液的体积,  $\text{mL}$ ;

$V_0$ ——滴定空白酒精所消耗  $0.02\text{mol/L} \sim 0.05\text{mol/L}$  氢氧化钾溶液的体积,  $\text{mL}$ ;

$C$ ——氢氧化钾乙醇溶液的浓度,  $\text{mol/L}$ ;

56.1 ——氢氧化钾的分子量;

$G$ ——试油的重量,  $\text{g}$ 。

### 2. 变压器的气相色谱分析

对于变压器油,尤其是运行中的变压器油,可用气相色谱分析的方法来了解变压器油或变压器运行的情况。所谓气相色谱分析,就是将变压器油溶解的气体(或称流动相)注入气相色谱仪的色谱柱,由于色谱柱中的吸附剂(或称固定相)对混合气体中各气体组分的吸附作用大小不一样,吸附作用小的组分以较高的速度向前移动,而吸附作用较大的组分则移动较慢。因此,各种气体组分按其速度的不同而得到分离,分离后的气体,再用鉴定器进行检测,鉴定器可分为热导池鉴定器和氢焰鉴定器。鉴定器可将气体的组分用色谱图表示出来,从而可清楚地看出变压器油中溶解气体的情况。

当运行中的变压器内部出现故障时,如过热、局部放电等,由于热分解、电弧的作用,将使固体绝缘产生多种气体,这些气体就溶解在变压器油中,只要测出溶解在变压器油中气体的种类和含量,即可判断出变压器内部绝缘的状况(或故障的情况)。

试验分析表明:未经运行的变压器油(新油),油中溶解的气体的成分包括氧( $\text{O}_2$ )约

30%, 氮( $N_2$ )约70%, 二氧化碳( $CO_2$ )约0.3%。对于运行正常的变压器中的油, 由于有电场和热的作用, 油中将溶解少量的二氧化碳( $CO_2$ ), 一氧化碳(CO)以及微量的碳氢化合物(烃类)。

当变压器内部发生故障时, 将产生多种气体, 不同的故障所产生的气体是不一样的, 例如:

(1) 当变压器油在  $300^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  时, 将分解出大量的甲烷( $CH_4$ ), 乙烯( $C_2H_4$ )等烃类气体。

(2) 油中发生电晕放电时, 将产生氢( $H_2$ )和少量的乙炔( $C_2H_2$ )。

(3) 油在电弧作用下, 将产生氢( $H_2$ )、乙炔( $C_2H_2$ ), 也有少量的甲烷和乙烯。

(4) 绝缘纸等固体绝缘在  $120^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$  长期加热下, 也将产生大量的二氧化碳( $CO_2$ )和一氧化碳(CO)。

(5) 绝缘纸等固体绝缘在高温  $300^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  时, 除二氧化碳和一氧化碳外, 还会产生氮( $N_2$ )和烃类气体, 且高温使一氧化碳比例增多。

因此, 可通过测量溶解在变压器油中气体的含量来了解变压器内部绝缘的情况, 若有故障, 可采取必要的措施, 以达到电力线路安全运行的目的。表 2.4.1, 表 2.4.2, 表 2.4.3 给出了电力变压器、电流互感器、电压互感器等中变压器油色谱分析的数据。

表 2.4.1 电力变压器及电抗器的油中溶解气体色谱分析的周期和要求

| 周 期                                                                                                                                                                                                                                                            | 要 求                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 说 明                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ① 220kV 及以上的所有变压器, 容量 120MVA 及以上的发电厂主变压器和 330kV 及以上的电抗器在投运后的 4, 10, 30 天(500kV 设备还应增加 1 次在投运后 1 天)<br>② 运行中<br>• 330kV 及以上变压器和电抗器为 3 个月<br>• 220kV 变压器为 6 个月<br>• 120MVA 及以上的发电厂主变压器为 6 个月<br>• 其余 8MVA 及以上的变压器为 1 年<br>• 8MVA 以下的油浸式变压器自行规定<br>③ 大修后<br>④ 必要时 | ① 运行设备的油中 $H_2$ 与烃类气体含量(体积百分数)超过下列任何一项值时, 应引起注意<br>总烃含量大于 $150 \times 10^{-6}$<br>$H_2$ 含量大于 $150 \times 10^{-6}$<br>$C_2H_2$ 含量大于 $5 \times 10^{-6}$<br>(500kV 变压器为 $1 \times 10^{-6}$ )<br>② 烃类气体总和的产气速率大于 0.25ml/h(开放式)和 0.5ml/h(密封式), 或相对产气速率大于 10%/月, 则认为设备有异常<br>③ 对 330kV 及以上的电抗器, 当出现病量(小于 $5 \times 10^{-6}$ )乙炔时也应引起注意, 如气体分析虽已出现异常, 但判断不至于危及绕组和铁芯安全时, 可在超过注意值较大的情况下运行 | ① 总烃包括: $CH_4$ , $C_2H_6$ , $C_2H_4$ 和 $C_2H_2$ 四种气体<br>② 溶解气体组分含量有增长趋势时, 可结合产气速率判断, 必要时缩短周期进行追踪分析<br>③ 总烃含量低的设备不宜采用相对产气速率进行判断<br>④ 新投运的变压器应有投运前的测试数据<br>⑤ 测试周期中①项的规定适用于大修后的变压器 |

表 2.4.2 电流互感器、电磁式电压互感器中变压器油中溶解气体色谱分析的周期和要求

| 试品       | 周 期                                              | 要 求                                                                                                                                                                     | 说 明                                               |
|----------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 电流互感器    | ① 投运前<br>② 1~3 年<br>(66kV 及以上)<br>③ 大修后<br>④ 必要时 | 油中溶解气体组分含量(体积百分数)超过下列任一值时应引起注意:<br>总烃 $100 \times 10^{-6}$<br>$H_2$ $150 \times 10^{-6}$<br>$C_2H_2$ $2 \times 10^{-6}$ (110kV 及以下)<br>$1 \times 10^{-6}$ (220kV~500kV) | ① 新投运的互感器油中不应含有 $C_2H_2$<br>② 全密封互感器按制造厂要求(如果有)进行 |
| 电磁式电压互感器 | ① 投运前<br>② 1~3 年<br>(66kV 及以上)<br>③ 大修后<br>④ 必要时 | 油中溶解气体组分(体积百分数)超过下列任一值时应引起注意:<br>总烃 $100 \times 10^{-6}$<br>$H_2$ $150 \times 10^{-6}$<br>$C_2H_2$ $2 \times 10^{-6}$                                                   | ① 新投运互感器油中不应含有 $C_2H_2$<br>② 全密封互感器按制造厂要求(如果有)进行  |

表 2.4.3 用特征气体来判断故障

| 故障性质    | 特征气体情况                                                               |
|---------|----------------------------------------------------------------------|
| 一般过热性故障 | 总烃较高, $C_2H_2 < 5 \times 10^{-6}$                                    |
| 严重过热性故障 | 总烃高, $C_2H_2 > 5 \times 10^{-6}$ , 但 $C_2H_2$ 未构成总烃的主要成分, $H_2$ 含量较高 |
| 局部放电    | 总烃不高, $H_2 > 100 \times 10^{-6}$ , $CH_4$ 占总烃中的主要成分                  |
| 火花放电    | 总烃不高, $C_2H_2 > 10 \times 10^{-6}$ , $H_2$ 较高                        |
| 电弧放电    | 总烃高, $C_2H_2$ 高, 并构成总烃中的主要成分, $H_2$ 含量高                              |

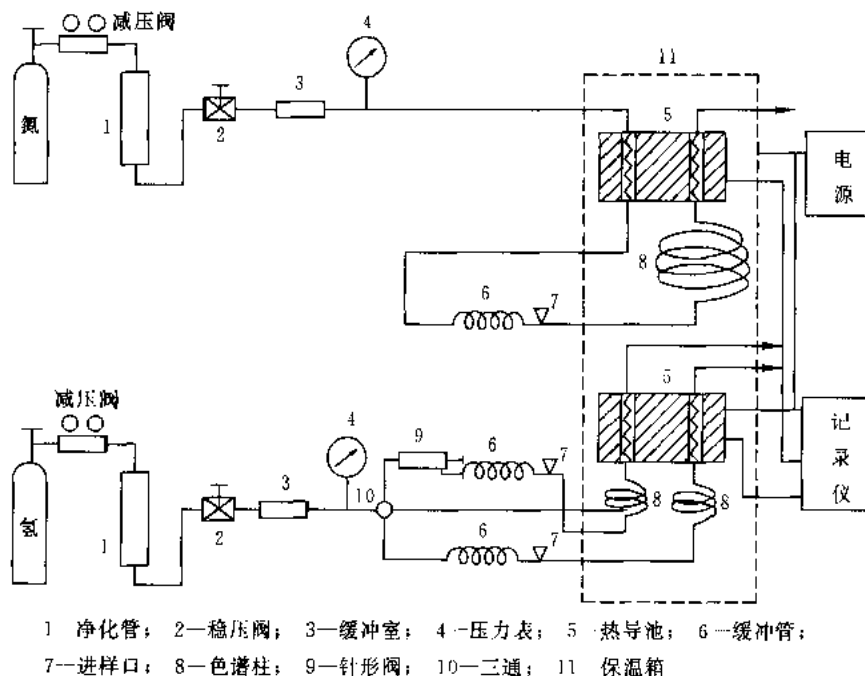


图 2.4.10 色谱柱结构图

前面介绍了气相色谱分析的原理,下面就 SP—5A 型气相色谱仪的原理简述如下。

气相色谱仪由两部分组成,一部分为色谱柱,另一部分为鉴定器。

色谱柱的结构如图 2.4.10 所示,色谱柱由一金属管式玻璃管内装有吸附剂(固定相)组成,固定相的材料有硅胶,分子筛等,这些材料对不同气体有它独特的吸附作用。在色谱柱中流动的气体(流动相),不仅由被试气体(变压器油中抽出来的气体),还有与被试气体混合在一起的载气组成。

当气体(流动相)通过鉴定器时,会在电桥电路中产生不平衡信号,从而可得出被试气体的成分和含量,即色谱图,图 2.4.11 表示了热导池鉴定器的原理电路;图 2.4.12 表示了氢焰鉴定器的原理电路;图 2.4.13 表示了由鉴定器测出的色谱图。

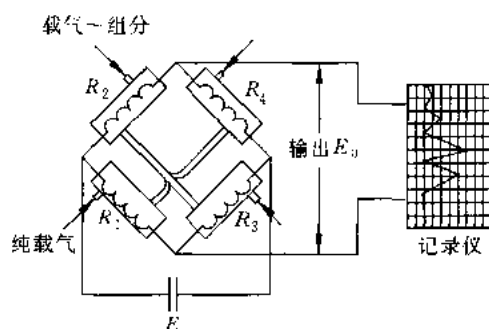


图 2.4.11 热导池鉴定器原理图

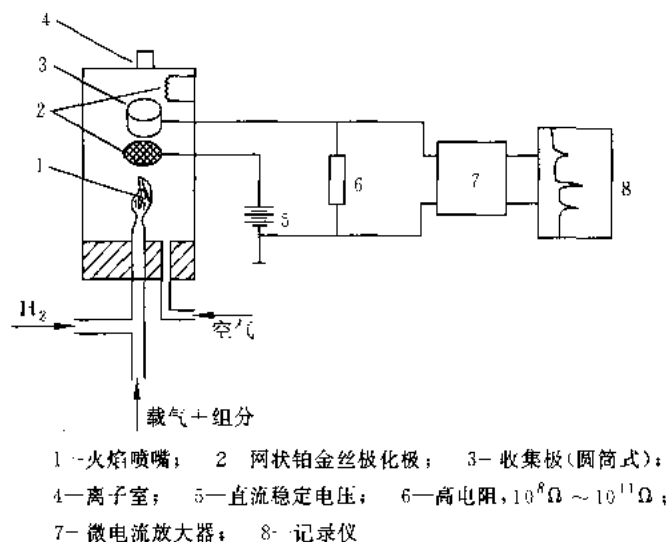


图 2.4.12 氢焰鉴定器原理图

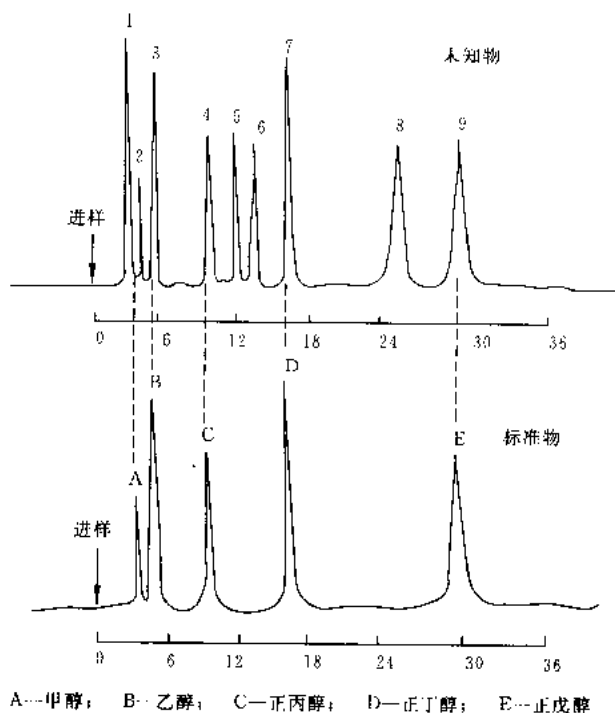


图 2.4.13 变压器油的气相色谱图

## 2.5 电缆波阻抗的测量

### 2.5.1 概述

电力电缆、通信电缆以及传输线都有一个重要的参数,即波阻抗。在一般工频电压(50Hz)作用下,输电线路、电缆等可看成一集中参数的元件,这是因为电磁波在空气介质中的传播速度为光速, $C=3\times 10^8\text{ cm/s}$ ,其电磁波的波长为 $\lambda=c/f=6\,000\text{ km}$ ,若有一条长50km的输电线路,与工频50Hz的波长相比小多了,所以可把输电线看成一集中参数,即电压波加到输电线上时,输电线各点的电压基本一致。当输电线上施加一频率很高的电压时,如 $f=200\text{ kHz}$ 的电压波,情况就不同了。因为 $f=200\text{ kHz}$ 的电压波的波长为1.5km,若仍施加在50km的线路,线路上的电感和对地电容不可忽略,电容电流,泄漏电流相当可观,当电压施加在输电线的首端时,输电线上各点的电压将沿线按一定的速度逐渐上升至一定电压值。这时在输电线上有电压波和电流波在线路上流动,流动波的方程式可写成

$$U(x,t) = U_q(x,t) + U_f(x,t)$$

$$i(x,t) = i_q(x,t) + i_f(x,t)$$

输电线上流动波的速度为

$$v = \pm \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

流动的电压波和电流波的关系为:  $U/i = \pm z$ , 当电压波与电流波的方向一致时,  $U/i = z$ , 当电压波与电流波的方向不一致时,  $U/i = -z$ 。其中  $z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ 。  $L_0$  为单位长度的电感,  $C_0$  为单位长度的电容。

当流动波从波阻为  $Z_1$  流动到波阻为  $Z_2$  时, 将会产生折射与反射的现象。当  $Z_2 = Z_1$  时, 将无反射波产生。当  $Z_2 \neq Z_1$  时, 其前行电压波为

$$U_{2q} = \alpha_u \times U_1 \quad \alpha_u = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

反行电压波为

$$U_f = \beta_u \times U_1 \quad \beta_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

所以, 高频或直角波在输电线上流动时, 就不能看成一集中参数, 而应看成一分部参数。

从波速  $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$  和波阻抗  $Z = \pm \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$  的公式可知,  $v$  和  $Z$  仅与传输线的  $L_0$ 、 $C_0$  值 (即单位长度的电感和电容值) 有关, 因此, 架空线的波速  $V_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  (光速)、波阻抗  $Z_0 = 300 \Omega \sim 500 \Omega$ , 而电缆的波速  $v = 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ , 波阻抗  $Z = 30 \Omega \sim 80 \Omega$ 。由于波阻抗在输电线 (包括电缆) 中是一个重要的参数, 所以, 经常要对其进行测试, 这是因为输电线上经常有雷电波, 过电压波通过, 在高压试验中, 通常都用同轴电缆来测量人工雷电波。假若对波阻抗的问题考虑不周的话, 将会得出不正确的结果, 甚至造成错误。

## 2.5.2 输电线、电缆波阻抗的测量方法

测量输电线、电缆的波阻抗方法很多, 尤其对单芯电缆、三芯电缆的测试就更多了, 这是因为在高压试验中, 大都用同轴电缆来测量雷电波的电压。所以, 本节着重介绍同轴电缆的波阻抗的测试方法。

### 1. 用低压方波法测量同轴电缆的波阻抗

具体接线如图 2.5.1 所示。

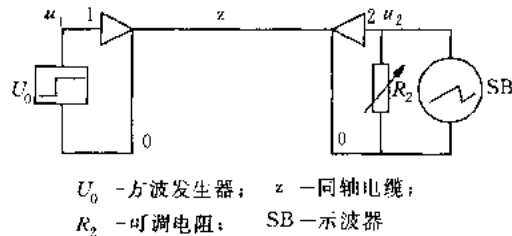


图 2.5.1 用低压方波测量电缆波阻抗线路图

方波发生器产生的电压  $U_0$  加在测量电缆的芯线 1 与外皮 0 之间, 在电缆的末端接一可调电阻  $R_2$ , 同时用示波器 SB 观察缆芯点 2 与外皮 0 之间的电压波形。由于方波是一

种变化很快的波形,当方波电压到达点2时,在点2将有折射与反射发生,其折射、反射系数可由下两式计算:

$$\alpha_u = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \beta_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

当  $R_2$  电阻与电缆波阻抗匹配情况不一样时,示波器上的波形将会呈现如图 2.5.2 所示的情况。为了求得同轴电缆的波阻抗,可以调节  $R_2$  的电阻值,当示波器上的波形呈图 2.5.2(c) 所示的波形时,  $R_2$  的阻值即为同轴电缆的波阻抗,即  $Z = R_2$ 。

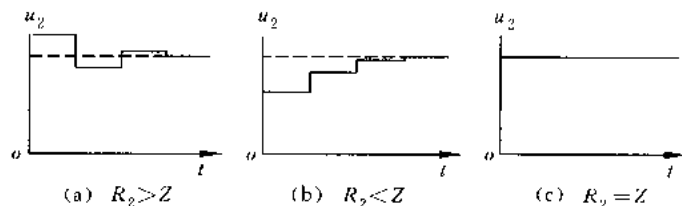


图 2.5.2 调节  $R_2$  时,终端  $Z=0$  之间的波形图

这是利用流动波的折射原理进行测量的,当流动波传到点2时,若末端电阻  $R_2 > Z$  时,将有折、反射波产生,其折射系数  $\alpha_u > 1$ ,所以,  $U_2$  将高于入射波电压,如图 2.5.2(a) 所示。若  $R_2 < Z$  时,  $\alpha_u < 1$ ,波形如图 2.5.2(b) 所示。只有当  $R_2 = Z$  时,  $\alpha_u = 1$ ,示波器上的波形如图 2.5.2(c) 所示。因此,  $\alpha_u = 1$  时的  $R_2$  电阻值即为电缆  $Z$  的波阻抗。

## 2. 电感电容法

为测量同轴电缆的波阻抗,也可以用测量电缆的电感和电容的方法。电感、电容法可分两步进行。

第一步,将电缆终端短路,在电缆的首端用精密电桥测量电缆的电感  $L_c$ 。

第二步,将电缆末端开路,用精密电桥在电缆的首端测量其电容值  $C_c$ 。

具体接线如图 2.5.3 所示,图 2.5.3(a) 为末端短路时,测量电感的线路图,图 2.5.3(b) 为末端开路时,在首端测量电容的线路图。

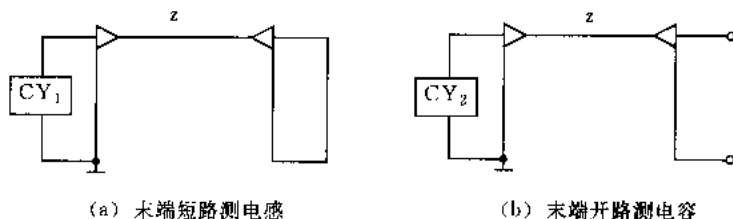


图 2.5.3 电感电容法测量电缆波阻抗线路图

电缆的波阻抗为

$$Z = \sqrt{\frac{L_c}{C_c}}$$

这是因为

$$L_c = L_0 l \quad C_c = C_0 l$$

其中,  $L_0$ ——电缆单位长度的电感;

$C_0$ ——单位长度的电容。

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{L_0 l}{C_0 l}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

### 3. 高压法测量电缆的波阻抗

前面介绍了单芯同轴电缆波阻抗的测量方法。在电缆中,还有多芯电缆,如三芯电缆的情况。在多芯电缆中,电缆的波阻抗有自波阻抗和互波阻抗之分。因为当一根电缆中通过电流时,不仅在流过电流的导线中有波阻抗,形成自电位,而且也会给别的芯线上产生电位,这种相互作用的关系,称为互波阻抗。它们之间的关系,可用计算式表示出来,如行波沿无损多导线系统运动时,其电磁方程式为

$$U_1 = Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2 + Z_{13} i_3 \cdots$$

$$U_2 = Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2 + Z_{23} i_3 \cdots$$

$$U_3 = Z_{31} i_1 + Z_{32} i_2 + Z_{33} i_3 \cdots$$

...

式中  $Z_{11}, Z_{22}, Z_{33}$ ——导线的自波阻抗;

$Z_{12}, Z_{13}, Z_{23}$ ——导线的互波阻抗。

$$\text{自波阻抗} \quad Z_{ii} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \ln \frac{2h_p}{r}$$

$$\text{互波阻抗} \quad Z_{mn} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \ln \frac{d_{kn}}{d_{kn}}$$

式中  $\mu_0, \mu_r$ ——导磁率;

$\epsilon_0, \epsilon_r$ ——介电系数;

$r$ ——导线半径;

$h_p$ ——导线高度;

$d_{mn}$ ——两导线之间的距离;

$d_{kn}$ ——两条线之间的镜像距离。

在测量多导线的自波阻抗和互波阻抗时,仍沿用行波运动时的折、反射原理,即当流动波运动到不同  $Z_2$  时,其折射系数、反射系数的公式为

$$\alpha_u = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \beta_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

另外,不同线间的交链系数可用下式确定

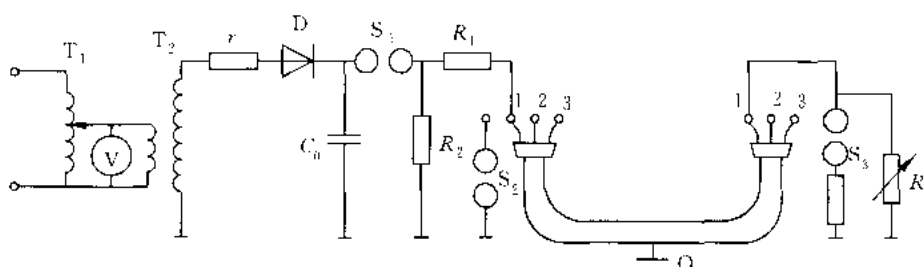
$$K_{12} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{Z_{21}}{Z_{11}}$$

$$K_{13} = \frac{u_3}{u_1} = \frac{Z_{31}}{Z_{11}}$$

下面以高压测量法求多导线电缆的自波阻抗和互波阻抗。

具体接线如图 2.5.4 所示。图中变压器  $T_2, r, D, C_0, R_1, R_2$  和被试电缆 1-0 的电容构成一冲击电压发生器电路,用  $S_1$  作为合闸开关,当  $S_1$  接通时,在电缆 1-0 之间施加一

脉冲电压。为测得电缆的自波阻抗和互波阻抗,具体测试可按以下步骤进行。



$T_1$ —调压器;  $T_2$ —高压变压器;  $r$ —保护电阻;  $D$ —整流硅堆;  
 $C_0$ —主电容;  $R_1$ —波头电阻;  $R_2$ —波尾电阻;  $R$ —可调电阻;  
 $S_1$ —合闸开关;  $S_2, S_3$ —测量球;

图 2.5.4 高压法测量三芯电缆波阻抗线路图

#### (1) 交链系数测量

在电缆的首端 1-0 之间,施加一标准冲击电压波形(1.2/50 $\mu$ s),保持其幅值不变,用球隙  $S_3$  在电缆末端测量  $U_{1-0}, U_{2-0}, U_{3-0}$  电压(50%放电电压),即可得出交链系数  $K_{12}$  和  $K_{13}$ 。测量时,电缆末端均在开路的情况下进行。

#### (2) 自波阻抗的测量

与上法相似,在电缆的首端 1-0 之间施加脉冲电压波,在电缆的末端 1-0 之间接上球隙  $S_3$ ,球隙  $S_3$  的放电电压调至测交链系数时放电电压的一半,同时并接一可调电阻  $R$ 。当脉冲电压加在电缆首端 1-0 之间时,调节电阻  $R$ ,使球隙  $S_3$  的放电概率为 50%,这时电阻  $R$  的值即为电缆  $Z_{11}$  的波阻抗,即  $Z_{11} = R$ 。

#### (3) 互波阻抗的测量

从前面所测结果可知

① 自波阻抗为  $Z_{11} = R$

② 已知交链系数可得到

$$K_{12} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{Z_{12}}{Z_{11}}$$

所以

$$Z_{12} = K_{12} Z_{11}$$

同理可得

$$Z_{13} = K_{13} Z_{11}$$

#### (4) 衰减系数的确定

同样按以上的试验方法,只是将测量球隙移至首端  $S_2$  的位置,当充电电压不变的情况下,测量电缆  $L_{1-0}$  首端的电压(同样按 50%放电电压),从而可得出电压的衰减系数,因为当电缆末端开路时,  $U_{20} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_1 = 2U_1$ ,即  $U_{1-0末} = 2U_{1-0首}$ ,但实际测试时,  $U_{1-0末}$  的电压不一定等于  $2U_{1-0首}$ ,因此,用  $\eta$  表示其衰减系数,即

$$\eta = \frac{U_{1-0末}}{2U_{1-0首}}$$

## 第 3 章

# 电气设备绝缘的耐压试验

电气设备在出厂或投入运行以前,必须要进行耐压试验。因为电气设备在运行时,要受到最高工作电压、雷电过电压、内过电压频繁的作用,假若投入运行的设备都经过国家标准的试验,电气设备就能保证正常的运行。

电气设备的试验包括工频耐压试验、雷电冲击耐压试验和操作冲击耐压试验。因为耐压试验所用的设备体积大、重量重、价格较昂贵,且对试验设备有一定的要求,所以试验设备的控制,试验电压的产生、测量和电气设备绝缘试验方法等形成了高电压试验工程的重要组成部分。

### 3.1 工频交流耐压试验

工频交流耐压试验是高压试验中一种基本的试验方法,大多数电气设备都要进行工频交流耐压试验。要进行此项试验,必须做到

- (1) 正确选择试验设备;
- (2) 正确选择交流测量设备;
- (3) 试验中的保护。

#### 3.1.1 试验设备的选取

根据国家标准 GB311/83《高压输电设备的绝缘配合、高电压试验技术》的规定,进行交流耐压试验时,试验电压一般应是频率为 45Hz~55Hz 的交流电压,试验电压的波形应接近正弦,两个半波应完全一样,且峰值和方均根(有效)值之比等于 $\sqrt{2} \pm 0.07$ 。试验回路的电压应足够稳定。不致受泄漏电流变动的影响等。当在试验电压下试品短路时,变压器输送的短路电流和供电频率下的泄漏电流相比应足够大。对固体、液体或两者组合的绝缘小样品上的干闪试验,短路电流为 0.1A(有效值);对自恢复绝缘(绝缘子、隔离开关)的干闪试验,短路电流不小于 0.1A(有效值),对湿闪试验,不小于 0.5A(有效值),对外形尺寸较大的试品的试验,短路电流为 1A(有效值)。

除考虑短路电流外,根据对试验设备的要求,还应考虑流过被试品电流的大小。对电气设备绝缘来说,一般都是电容电流,被试品电容量的大小可根据其电压等级,被试品的

种类来估算,在2.2节的表2.2.3和表2.2.4中列出了多种试品和电容值,因此,可以计算出流过试品的电流

$$I = \omega CU \times 10^{-6} (\text{A})$$

其中  $I$ ——流过试品的电流, A;  $U$ ——被试品的试验电压, kV;

$C$ ——被试品的电容量,  $\mu\text{F}$ ;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ ——50 Hz。

对于试品的试验电压,可根据国家标准 GB311/83 的规定,在表1.1.1中已经列出了。因此,试验设备的电压可根据表1.1.1中来确定。对于工频交流试验设备,一般是指试验变压器,且为单相的,在500kV~750kV以下多用单台试验变压器,若需更高试验电压时,可选用串级变压器作为试验电源。试验变压器的规格如表3.1.1所示。

表 3.1.1 试验变压器的规格

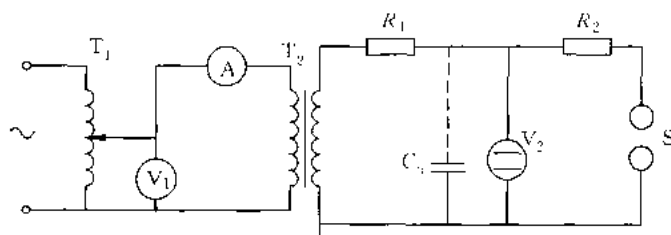
| 型 号             | 额定容量/kVA | 额定电压   |             | 阻抗压降% |
|-----------------|----------|--------|-------------|-------|
|                 |          | 高压侧/kV | 低压侧/V       |       |
| YDJ 5/50        | 5        | 50     | 220         | 4.6   |
| YDJ 10/100      | 10       | 100    | 220/380     | 7.52  |
| YDJ 25/100      | 25       | 100    | 380         | 6.5   |
| YDJ 50/100      | 50       | 100    | 220         | 6.63  |
| YDJ—100/100     | 100      | 100    | 380         | 8.25  |
| YDJ—25/150      | 25       | 150    | 380         | 6.6   |
| YDJ—100/150     | 100      | 150    | 380         | 6.45  |
| YDJ—200/35      | 200      | 35     | 400         | 5.5   |
| YDJ 250/100     | 250      | 100    | 380         | 8.95  |
| YDJ 250/250     | 250      | 250    | 380         | 8.5   |
| YDJ 500/500     | 500      | 500    | 6 000       | 4.9   |
| YDJ—750/750     | 750      | 750    | 6 000/3 000 | 4.97  |
| YDJ 1 500/1 500 | 1 500    | 1 500  | 6 000/3 000 |       |
| YDJ 2 250/2 250 | 2 250    | 2 250  | 6 000/3 000 | 40.7  |

### 3.1.2 试验线路和元件选择

为进行工频耐压试验,可采用图3.1.1所示的线路图。

从图3.3.1可以看出,除需合理选用试验变压器  $T_2$  外,还要正确选择调压器  $T_1$ ,调压器有自耦式接触调压器,这种调压器的调压是利用可动的碳刷来调节电压的,因此,这种调压器的容量比较小。对于容量较大且又要无级调压时,可采用移圈式的调压器调压。另外还有感应式调压器和电动机发电机组调压,本书就不作详细介绍了。

变压器保护电阻  $R_1$ ,在电路中起着很重要的作用,当进行耐压试验时,假若试品被击穿,则全部试验电压就加在保护电阻  $R_1$  上了。所以,保护电阻的长度应保证在试验电压作用下不会发生沿面放电现象,否则就起不到保护变压器的作用了。其长度可按150kV/m~200kV/m来选取,另外,保护电阻还可以起到减缓当被试品击穿时所产生的很陡的截断波的陡度的作用,以保护试验变压器。保护电阻  $R_1$  的值可按试验变压器瞬间短路电流不超过其额定电流的8~10倍为宜,如500kV,500kVA的试验变压器,其变



$T_1$ —调压器, 0V~250V;  $T_2$ —高压试验变压器;  
 $V_1$ —交流电压表75V/150V/300V 0.5级;  $V_2$ — $Q_1$ 型静电电压表;  
 $R_1$ —变压器保护电阻, 10k $\Omega$ ~20k $\Omega$ ;  $S$ —测量球隙;  
 $R_2$ —球隙保护电阻, 100k $\Omega$ ~1 000k $\Omega$ ;  $C_0$ —被试电容器;  
 $A$ —交流电流表, 若不用, 可以短接

图 3.1.1 工频高压试验线路图

压器保护电阻  $R_1$  取 50k $\Omega$ , 一般可按 0.1 $\Omega$ /V 来选取。

### 3.1.3 交流耐压试验中的容升现象

在进行交流耐压试验时, 一定要注意试品上的容升现象。所谓容升现象, 即电气设备的绝缘, 实际是一电容性的负载, 当交流电压加在电气设备的绝缘上时, 电容性绝缘上的电压将比变压器变比的电压高。其等值电路和向量图如图 3.1.2 所示,  $U_{CX}$  为试品的电压,  $I_C R_1$  为保护电阻的电压,  $I_C X_S$  为试验变压器的漏电抗的电压,  $U$  乃是试验变压器的电压,  $U$  为  $U_{CX}$ ,  $U_R$ ,  $U_L$  的向量和, 从图 3.1.3 可以看出,  $U_{CX}$  的电压大于  $U$  的电压。所以, 高压试验时, 不能用变比法来确定试品上的电压, 而要用高压电压表来测量试品两端的电压。这在试品电容较大时更是如此。当直读仪表量程有限时, 可作负载校正曲线来测量试品上的电压, 具体做法在电压测量中叙述。

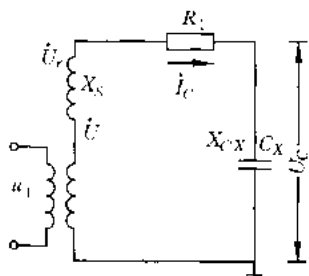


图 3.1.2 工频耐压试验电路图

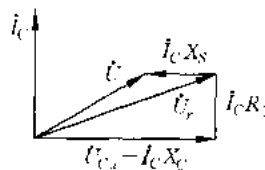


图 3.1.3 向量图

### 3.1.4 交流电压的测量

为正确测量试品上的电压, 可选择以下几种测量装置。

#### 1. 静电电压表

从静电电压表的原理可知, 静电电压表测量的电压为有效值电压(方均根值), 但是影

响试品绝缘击穿的是试验电压的峰值。当试验电压为正弦波时,有效值和正弦波峰值的关系为  $U_m = \sqrt{2}U$ ,当试验电压含有高次谐波时,如三次谐波,有效值与峰值的关系与  $\sqrt{2}$  相比会有一些误差。

## 2. 球隙测量法

根据国家标准 GB311/83 的规定,球隙可用作测量交流电压峰值的仪器。当用球隙测量电压时,球隙必须放电,方能测出电压,故用球隙测量电压有时不大方便。

球隙测量电压是利用空气击穿场强为常数的原理,在球隙距离不大于球径的一半时,球间隙为一稍不均匀电场,当电压达到球间隙空气的击穿场强时,球隙就击穿了。若间隙距离大于球的半径时,由于间隙的均匀程度降低了,放电的分散性增加,故此时间隙放电电压不能作为测量依据。

球的直径随被测电压的增高而加大,GB311—83 规定了多种标准球径,大致有:2.5, 6.25, 10, 12.5, 15, 25, 50, 75, 100, 150, 200cm。对测量球也有一定的要求,其直径误差应小于 12%,球表面应光滑,材料为铜或黄铜(空心亦可)。若用铝质材料时,其放电点部分最好镶嵌紫铜或黄铜。在用球隙测量电压时,其周围不应有高压或接地的金属物或其他物品,以免造成邻近效应,影响测量准确度。球隙测量电压的准确度可达  $\pm 3.0\%$ 。

用球隙测量电压时,应串联电阻以保护球隙,如图 3.1.1 中的球隙保护电阻  $R_2$ 。一方面可以防止球隙放电时电流过大而烧坏球的表面,另外也可阻尼,当球隙放电时,由被试品  $C$  和球隙的引线电感构成谐振。球隙保护电阻的阻值应取  $100\text{k}\Omega \sim 1\,000\text{k}\Omega$ 。

当直读仪表量限不够大,而用球隙测量电压时,由于球隙测量必须放电,但试品在试验电压下又不能放电。所以,试验人员应制作试验变压器的负载校正曲线,方能进行试验。所谓负载校正曲线,就是当试验变压器接上负载(被试品)时,试品电压  $U_c$  与原边电压的关系曲线,即  $U_c = f(U_1)$ 。由于在试验电压下球隙不能放电,所以在制定校正曲线时,只能做到被试品试验电压的 80%。然后,根据负载校正曲线自然延伸到试验电压,从而可以得到试品试验电压下的  $U_1$ 。这样,在试验时,可以读取原边电压  $U_1$  的值,即为试品的试验电压了。另外,为了保护被试品不致因为试验人员的误操作和偶然发生的电压升高而损坏,可将球隙放电电压调至 1.1~1.2 倍试验电压,以保护被试品。具体的校正曲线如图 3.1.4 所示。

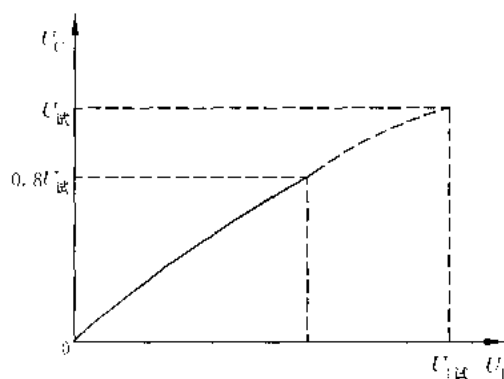


图 3.1.4 负载校正曲线图

负载校正曲线的制作方法是:接线按图 3.1.1 接线,将球隙调至一定的距离,然后将调压器升压,直至球隙击穿。记下试验变压器的原边电压;再调节一次球隙的距离,调压器升压,直至球隙击穿,再读取试验变压器原边的电压。这样,在试验电压的 80% 以下,做 5 个点,可连成一条  $U_c = f(U_1)$  的有载校正曲线。 $U_c$  即为试品上电压的峰值。由于

大气条件对球隙放电电压有一定的影响,应进行大气校正。

大气校正的方法为:先记下球隙的距离,在球隙放电标准表上查得放电电压值  $U_0$ 。该值为标准状态下的电压值,即大气压力为 0.101 3MPa(即 760mmHg 或 1 013mbar),温度为 20℃(绝对温度为 273K-20K),绝对湿度为 11g/m<sup>3</sup> 时的值。由于试验时的大气状态不一定是标准状态,所以,球隙放电电压值应进行校正,实际放电电压应为

$$U = KU_0$$

其中  $U$ ——球间隙实际放电电压值,kV;

$U_0$ ——球间隙标准状态下放电电压值,kV;

$K$ ——校正系数。

校正系统  $K$  直接由空气相对密度  $\delta$  决定,它们间的对应关系如表 3.1.2 所列。

表 3.1.2 空气相对密度  $\delta$  与校正系统  $K$  的关系

|                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 空气相对密度 $\delta$ | 0.70 | 0.75 | 0.80 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.15 |
| 校正系数 $K$        | 0.72 | 2.77 | 0.82 | 0.86 | 0.91 | 0.95 | 1.00 | 1.05 | 1.09 | 1.13 |

$\delta$  的计算如下式所示:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

其中  $\delta$ ——空气相对密度;

$p$ ——试验条件下大气压力,Pa;

$t$ ——试验条件下室温,℃;

$p_0$ ——标准大气条件下大气压力;

$t_0$ ——标准大气条件下室温。

当大气压力用 Pa 计算时,

$$\delta = 0.0029 \frac{p}{273 + t}$$

当大气压力用 mmHg 计算时,

$$\delta = 0.386 \frac{p}{273 + t}$$

当大气压力用 mbar 计算时,

$$\delta = 0.289 \frac{p}{273 + t}$$

当  $\delta$  值在 0.95~1.05 之间时,校正系数  $K$  等于空气相对密度  $\delta$ (即  $K=\delta$ )。

空气相对湿度增加时,会使间隙放电电压有所升高,但对球隙放电电压影响很小,且目前还不能给出影响的确切数值,暂不校正湿度的影响。当空气相对湿度大于 90% 时,球极表面可能凝聚水珠,会使放电电压显著降低,分散性增大,因此当空气相对湿度在 90% 附近时,不要用球隙测量电压。

### 3. 分压器测量交流高压

用分压器测量交流高压,大部分用电容分压器测量,但在电压不很高时,也可用电阻

分压器、阻容并联式分压器。用分压器测量电压时,没有间隙放电的问题,也不会受环境条件的影响。具体原理接线如图 3.1.5 所示。

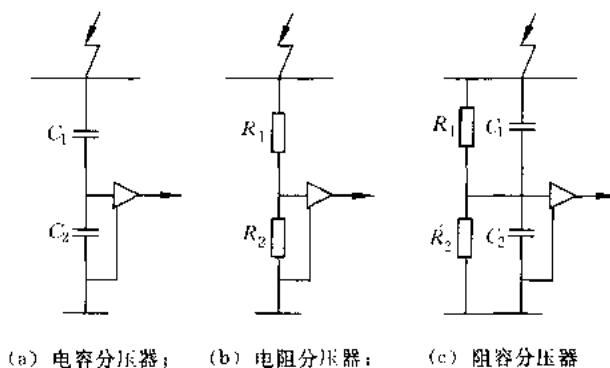


图 3.1.5 交流分压器原理接线图

为使测量仪器小型化、数字化,我国出现了一些两体式的分压器,如图 3.1.6。另外,由清华大学研制的 GJZ 型高压数显电压表,除实现小型化、数字化外,还做成一体化,并且不用人扶持,准确度达 1.0 级,不但可以测量交流电压的有效值,还可测量交流电压的峰值。是一种使用方便、准确度较高的测量仪器,其外形如图 3.1.7 所示。目前此种仪表有 10kV, 30kV, 50kV, 100kV 几种电压等级可供选择。

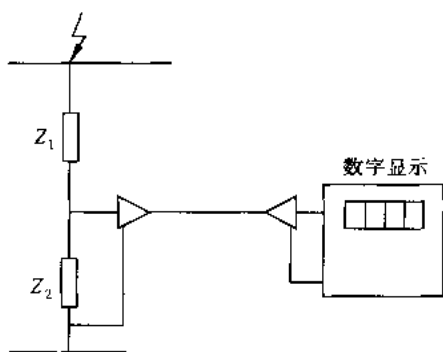


图 3.1.6 两体式分压器

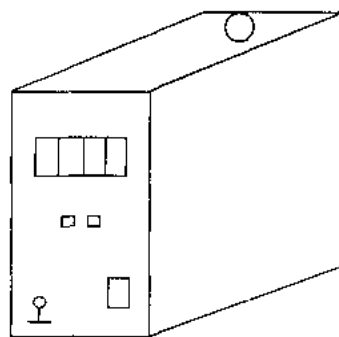


图 3.1.7 GJZ 型交直流数显电压表外形图

在对交流电压进行测量时,要特别注意被测电压的波形。当电压波形为标准正弦波时,正弦波的峰值电压与有效值电压的关系为  $U_m = \sqrt{2}U_{\text{有效}}$ ,当电压波形有三次、五次谐波分量时,其峰值电压和有效值电压就不会成  $\sqrt{2}$  的关系了,因为非正弦交流电压波的有效值为

$$U_{\text{有效}} = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots}$$

所以在测量交流电压时,表上会给出有效值电压,有时也给出  $U_m/\sqrt{2}$  的值。当电压波为正弦波时,  $U_m/\sqrt{2}$  与有效值相等。当电压波含有高次谐波时,  $U_m/\sqrt{2}$  就不等于  $U_{\text{有效}}$  值了。但  $U_m/\sqrt{2}$  确实反映了被测波电压的峰值。

### 3.1.5 交流耐压试验的步骤

前面几条说明了电气设备交流耐压试验的电压、设备、元件及测量方法等,到底交流耐压试验如何进行?本条将通过一被试品——电力电容器的耐压试验叙述其试验方法。

被试电容器的额定电压  $U_N=20\text{kV}$ ;电容量为  $C=1\,600\text{pF}$ 。试验步骤为

(1) 按图 3.1.1 的试验线路图接线,同时正确选择试验变压器和各个元件。

(2) 确定试验电压,因电容器的额定电压  $U_N=20\text{kV}$ ,其试验电压应为  $U_{\text{试验}}=2.15U_N$ (若不具备交流试验条件时,也可用直流电压进行耐压试验,其试验电压为  $U_{\text{试}}=4.30U_N$ )。

(3) 当用球隙来测量电压时,应对被试品作出负载校正曲线,即  $U_c=f(U_1)$  的曲线。在作曲线时应牢记,球隙测得的电压值为工频电压的峰值,因此,试验电压下球隙的电压应为:  $U_{\text{球试验}}=2.15U_N\times\sqrt{2}$ ,在做负载校正曲线时,只做到试验电压的 80%。因此在  $2.15U_N\times\sqrt{2}\times 0.8$  电压及以下取 5 个电压点。

在做负载特性的每次试验中,用调压器升高电压直至球隙击穿,记下试验变压器的原边电压  $U_1$ ,但为了克服分散性,每个点要进行三次放电,取其平均值,每两次放电的时间间隔为 1min,且每次放电电压与平均值的偏差不得大于 3%。连续做 5 个点,这样可连成一条曲线,即在一定负载(1600pF)下的负载特性曲线。另外,球隙放电电压应进行大气校正,否则会有误差。

当做好校正曲线后,将曲线自然延伸到 100% 试验电压(外推法),从而可得出高压试验电压下的原边电压  $U_1$  值。然后,将球隙距离调至 1.1~1.2 倍试品的试验电压值,以作为被试品的保护间隙。

(4) 当用静电电压表或用分压器测量电压时,并不需要制作校正曲线,可直接读取测量装置的电压。校正曲线如在量限不够高的场合(如现场试验),可用球隙来制作校正曲线。

(5) 工频交流耐压试验的持续时间一般为 1min。

## 3.2 沿面放电及绝缘子工频干、湿闪络电压的测定

### 3.2.1 沿固体介质表面的放电

空气是人们应用最广的气体绝缘材料,如高压架空线,就是利用空气作为绝缘介质的。架空线上的电位很高,而相与相之间、相对地之间的电位差也很高,为了保证架空线在空气中安全可靠的运行,人们对空气的绝缘强度作了许多研究工作,本节对在空气中沿固体介质表面的放电介绍如下。

沿固体介质表面的放电,一般可归纳为三种典型的情况:一为均匀电场中的沿面放电;二为弱垂直分量的沿面放电,所谓弱垂直分量就是电场垂直于介质表面的分量较弱;三为强垂直分量的沿面放电。

由于固体介质表面的不均匀性、吸湿、电极与固体介质接触不良等因素的影响,在电

极距离相同的情况下,沿面放电电压比纯空气间隙的放电电压低。尤其在强垂直分量的情况下,因其电场分布极不均匀,沿面放电电压最低,如图 3.2.1 所示。

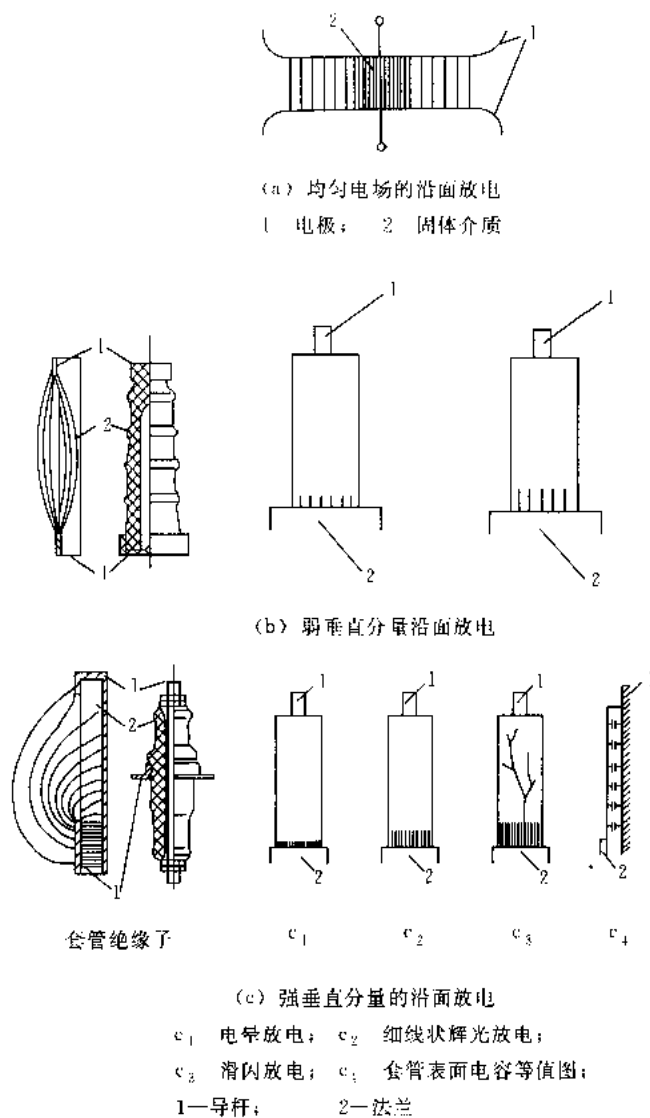


图 3.2.1 沿面放电的形式

在电力系统的高压输、变电设备中,弱垂直分量和强垂直分量的情况较多,如支持绝缘子、线路悬式、棒形绝缘子等都属于弱垂直分量的情况,而电气设备,如电力变压器、电力电容器等的套管均属于强垂直分量的沿面放电情况。

沿面放电的现象在我国北京中国科学技术馆中的高压放电项目中进行了表演,其电极布置如图 3.2.2 所示,1 为玻璃板(固体介质),2 为电极,当两电极间施加高电压时,由于固体介质的耐电强度比空气耐电强度高,所以沿固体介质表面的空气将先发生放电现象。当电压不很高时,会在电极附近产生电晕放电,随着电压的升高,会产生辉光放电、滑闪放电现象;若电压继续升高,将会沿玻璃板表面产生闪络现象(电弧放电)。由于玻璃板

的耐电强度高而不会击穿。

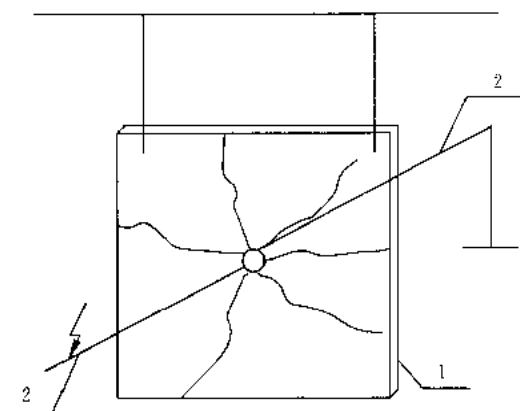


图 3.2.2 沿玻璃板表面的放电

### 3.2.2 绝缘子工频干、湿闪络电压的测定

绝缘子的种类很多,目前我国电力线路上用得最多的还是瓷质绝缘子,如线路盘形悬式绝缘子、棒型绝缘子、支持绝缘子等,目前也有用硅橡胶制成的合成绝缘子。这些绝缘子在线路运行时,将要承受工作电压、大气过电压、内部过电压的作用,并且还要在不同的气象条件下,都能承受各种电压。所谓不同气象条件,包括天气晴朗干燥情况、下雨、下雪、下雾等。另外还有不同环境条件,如清洁地区(如农村)、脏污地区(如化工厂区、沿海多盐雾区)等等。为了了解绝缘子沿面放电的性能,本节将介绍线路悬式绝缘子(X—4.5型)在工频电压作用下的干状态和湿状态(淋雨)下的沿面放电(闪络)电压值。

#### 1. 试验装置

根据国家标准 GB311/83 中交流试验的要求,对干、湿闪络试验,试验装置的短路电流不得小于 0.1A 和 0.5A(有效值)。根据试品(1~3 片 X—4.5 型线路悬式绝缘子)的电压,可选 0kV~150kV,100kVA 的试验变压器作为试验电源,对试验变压器的要求,在 3.1 节中已作了详细介绍,本节就不重复了。

150kV,100kVA 试验变压器的电源及 X—4.5 悬式绝缘子试验的线路图如图 3.2.3 所示,若需对别的试品进行试验,可参考本试验线路来设计。

工频高压的测量,可仍用 3.1 节中介绍的静电电压表、球隙及分压器法测量。

#### 2. 试品的安装

根据我国国家标准 GB775/87《绝缘子试验方法》的规定,试品必须洁净干燥,并按其类别规定的安装方式安装(包括线路针式、悬式、支柱绝缘子,以及穿插套管和瓷横担等)。如线路悬式绝缘子,试品应悬挂在接地的 50mm 等边角钢横梁的中部,横梁的长度应不小于试品高度或试品串长度的两倍,而且不小于 2m。试验钢帽上沿至横梁的距离为 1m,

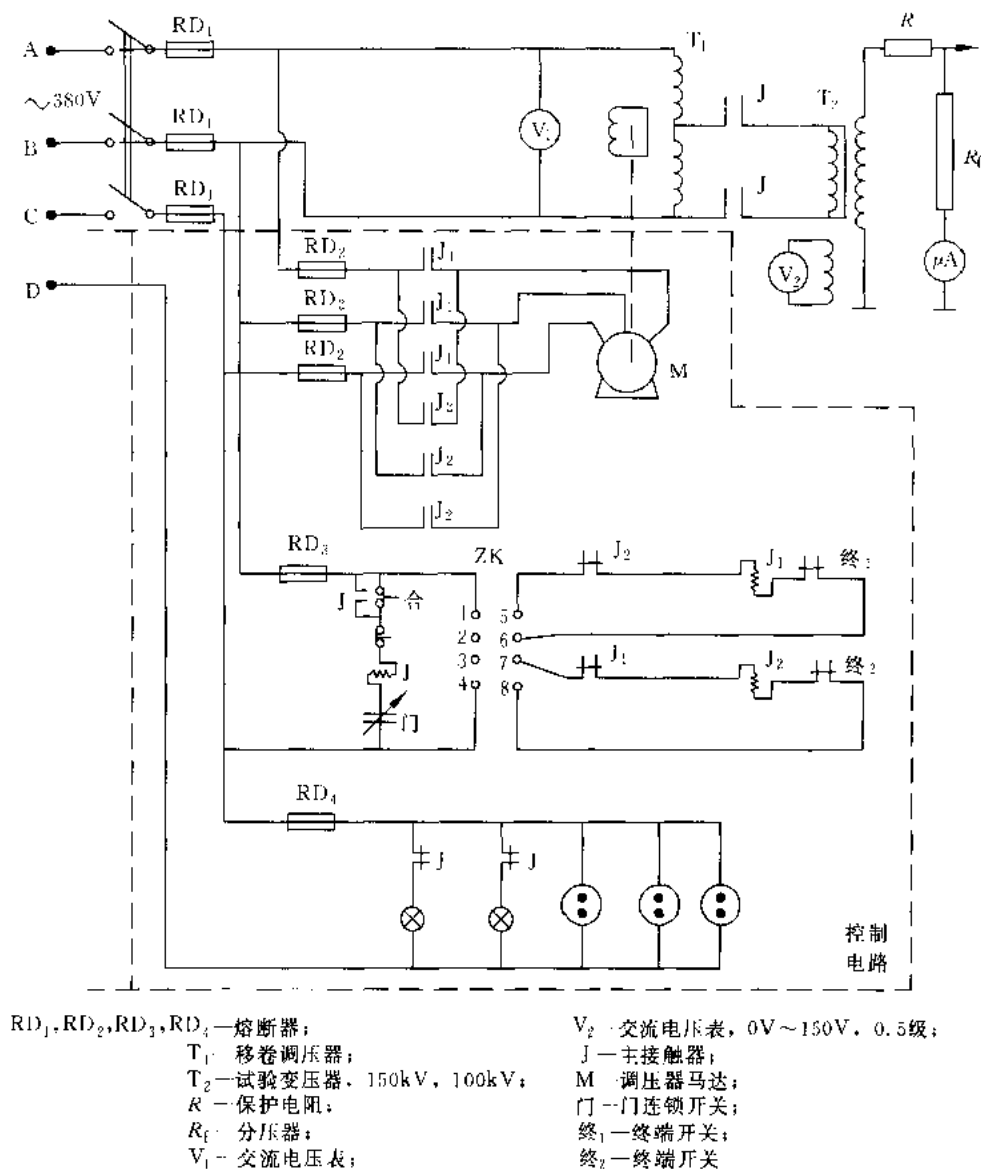


图 3.2.3 150kV, 100kVA 试验变压器试验线路图

但 110kV 以上试品中应模拟实际运行情况(采用标准连接金具)进行安装, 试品下端钢脚与标准线夹相连接, 以固定一根导杆作为高压电极, 导杆直径为试品串长的 1.5%, 但不小于  $\Phi 12\text{mm}$ , 长度不小于试品串长的两倍, 而且不小于 2m。导杆应水平放置, 且与挂梁成  $90^\circ$  角。试品和高压电极及外物的距离不小于试品干闪络距离的 1.5 倍, 且不小于 1m。

其他试品的安装方法可接近似正常使用情况安装。

### 3. 湿试验的人造雨和淋雨装置

根据国家标准 GB311—83 的规定, 人造雨的淋雨条件列于表 3.2.1。

表 3.2.1 在试品上的淋雨条件

| 分 类                        |      | 单 位                     | 数 值                             |
|----------------------------|------|-------------------------|---------------------------------|
| 所有测量点的平均淋雨率                | 垂直分量 | mm/min                  | 1.0~1.5                         |
|                            | 水平分量 | mm/min                  | 1.0~1.5                         |
| 单独每次测量和每个分量的极限值            |      | mm/min                  | 0.5~2.0                         |
| 收集到的雨水温度                   |      | ℃                       | 周围环境温度 $\pm 15^{\circ}\text{C}$ |
| 收集的雨水校准到 20℃ 的电阻率,见图 3.2.5 |      | $\Omega \cdot \text{m}$ | 100 $\pm 15$                    |

图 3.2.4 给出了淋雨装置的示意图,人造雨装置由贮水罐、压缩空气机及淋雨架组成,淋雨架上的喷嘴有流线型和发散型。进行湿放电试验时,除试品按工作条件安装外,试品上应降下均匀的滴状雨,雨滴淋到的区域应超出试品的外形尺寸范围。喷嘴与试品、高压电极之间的距离应至少为试品干闪络距离的 1.5 倍,但不能小于 1m。

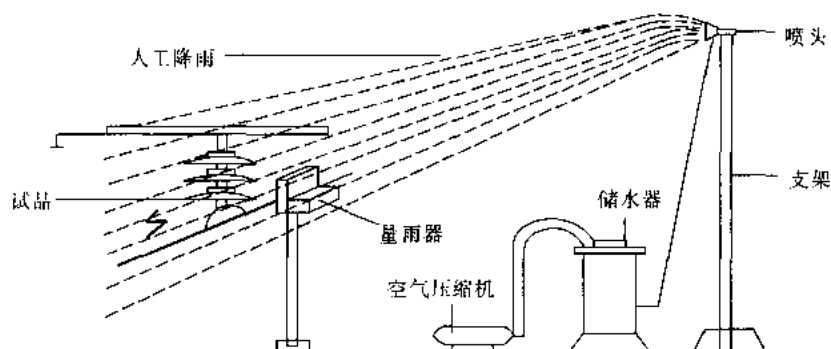


图 3.2.4 人造雨装置示意图

图 3.2.4 中淋雨率的测量是用量雨器测量的,量雨器具有两个相互隔开的开口为  $100\text{cm}^2 \sim 750\text{cm}^2$  的容器,其深度均不小于直径的  $1/2$ ,一个开口测水平分量,一个开口测垂直分量,测定时间应不少于 1min,量雨器在一足够大的范围内缓慢移动,以消除单个喷嘴喷射不均匀的影响。其淋雨率的计算法为

$$a = \frac{10V}{St} \text{ mm/min}$$

式中  $t$  ——量雨器量雨的时间, min;

$V$  —— $t$  时间内落入量雨器人造雨的体积,  $\text{cm}^3$ ;

$S$  ——量雨器开口的面积,  $\text{cm}^2$ ;

$a$  ——淋雨率, mm/min。

人造雨电阻率的测量可用电导仪进行,按国家标准 GB311/83 的规定,电阻率应校准到温度  $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻率,为  $100\Omega \cdot \text{m}$ ,其校正关系为

$$\rho_{20} = \rho_t \alpha$$

其中  $\rho_{20}$  —— $20^{\circ}\text{C}$  时的电阻率;

$\rho_t$  —— $t^{\circ}\text{C}$  时的电阻率;

$\alpha$ ——温度校正因数。

校正系数  $\alpha$  可按图 3.2.5 进行校正。

具体测量可用电导仪测量,如 DDS—11 型电导仪,其原理线路如图 3.2.6 所示,将一定几何尺寸的铂-黑电极放入待测的水中,构成电导池,施加一定值的高频电压,然后测量串联电路中电阻  $R_m$  上的压降,从而可得出水的电导率,其计算公式如下所示

$$\rho = \frac{1}{Q} \frac{1}{\Omega^{-1}} (\Omega \cdot \text{cm})$$

式中  $\rho$ ——雨水电阻率,  $\Omega \cdot \text{cm}$ ;

$Q$ ——电极常数(由电极说明书提供),  $\text{cm}^{-1}$ ;

$\Omega^{-1}$ ——电导仪测出的电导。

电导仪的电源采用高频电源,其目的主要是为了减小液体的极化现象。测量水的电阻率时,可先测出电阻率较高的去离子水(或蒸馏水)的电阻率,然后倒入适量的自来水,使贮水罐中的水达到试验条件规定的电阻率。

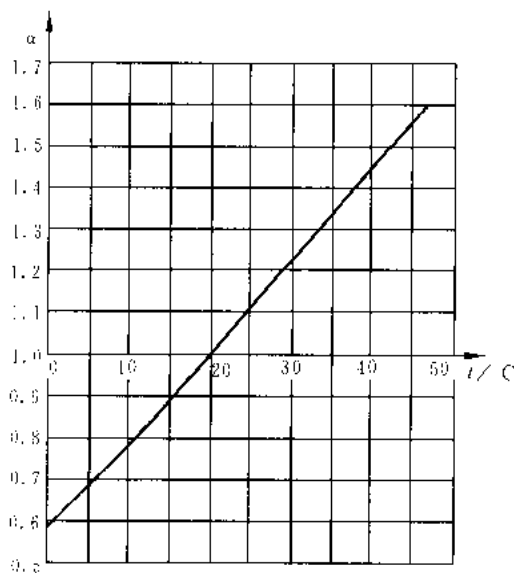


图 3.2.5 雨水电阻率温度校正因数  
 $\alpha$  与温度的关系

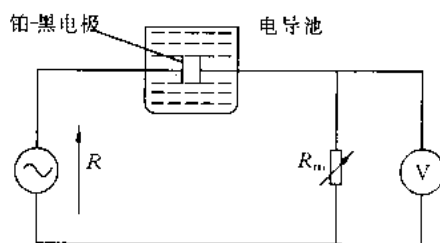


图 3.2.6 DDS—11 型电导仪原理线路图

#### 4. 绝缘子(X 4.5)干、湿闪络试验方法及干、湿闪络电压的确定

##### (1) X 4.5 型绝缘子(或串)工频干闪络电压的测定

① 试品必须洁净、干燥、并按前述规定的方式安装。

② 试验时,对试品施加工频电压,其升压速度在预期试验电压的 75% 以前不作规定,但不允许突加,且应保证从仪表上准确读数;其后以每 3% 预期电压的速度均匀上升到绝缘子闪络,即形成沿表面的电弧放电。

③ 干闪络电压应以连续五次测定的闪络电压的算术平均值来计算,连续五次测定的每个电压值与平均值之差不应超过平均值的 5%。试验时,相邻两次闪络试验的时间间

隙不少于 1min。

④ 试验时的大气状况与标准大气状况不同时,工频干闪络电压值应按以下的公式进行校正:

$$U_b = U \frac{K_b}{K_d}$$

式中  $U_b$ ——校正到标准状态下的干闪络电压,kV;

$U$ ——试验条件下的干闪络电压,kV;

$K_b$ ——湿度校正因数;

$K_d$ ——空气密度校正因数。

校正因数的计算:按 GB311/83 的规定, $K_d$  的计算方法如下

$$K_d = \left(\frac{b}{b_0}\right)^m \left(\frac{273+t_0}{273+t}\right)^n$$

式中  $b$ ——试验时的大气压力,MPa 或 mbar,mmHg;

$b_0$ ——标准状态下的大气压力,0.101 3MPa 或 1 013mbar,760mmHg;

$t$ ——试验时的气温,℃;

$t_0$ ——标准状态下的气温,20℃;

$m, n$ ——与电极形状、间隙距离、电压形式和极性有关的指数,可由图 3.2.7 确定。

$K_b$  的计算亦根据国家标准 GB311/83 的规定,按以下公式计算

$$K_b = (K)^\omega$$

式中  $K$ ——湿度校正系数,与绝对湿度有关的系数,也与电压的形式有关,由图 3.2.8 确定。

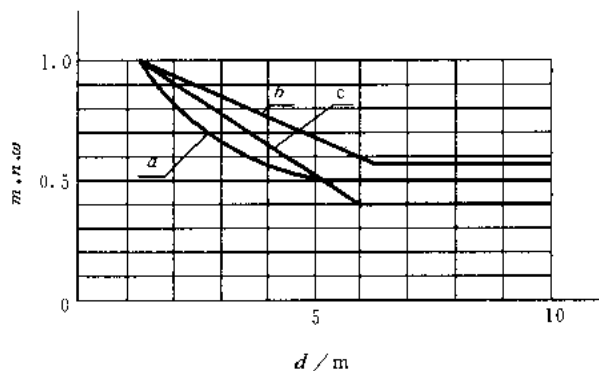


图 3.2.7 空气密度校正用指数  $m$  和  $n$  值以及湿度校正用的  $\omega$  值与放电距离的关系曲线

绝对湿度的测量可用通风式精刻干、湿球温度计测量,绝对湿度是干、湿球温度的函数,可由图 3.2.9 查出,同时也可从该图查到相对湿度的值。测量时应在温度达到稳定后仔细读数,以免在确定湿度时造成误差。

对于确定湿度的方法,只要有足够的准确度,其他方法也可采用。

$\omega$  指数的确定可由图 3.2.7 中的曲线和表 3.2.2 来确定。

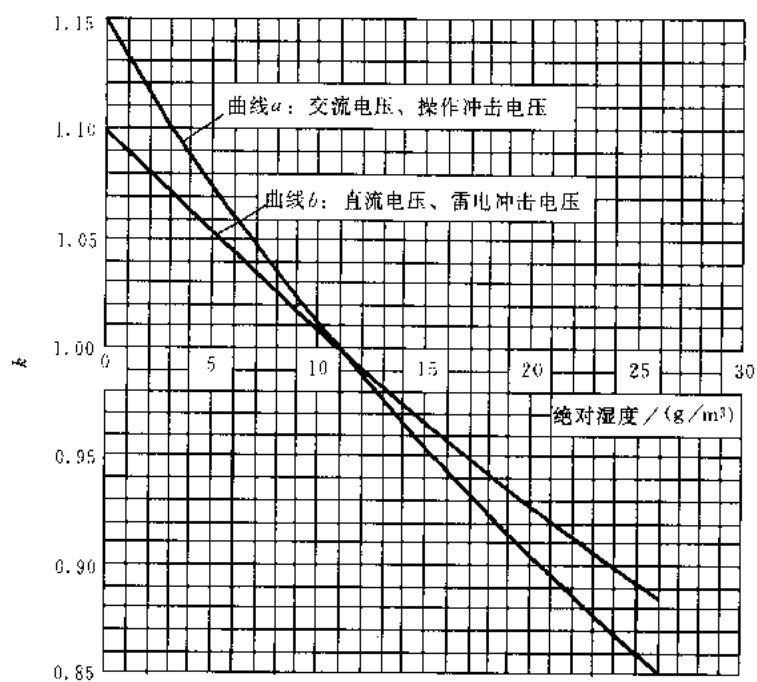


图 3.2.8 湿度校正系数  $K$  与绝对湿度的关系曲线

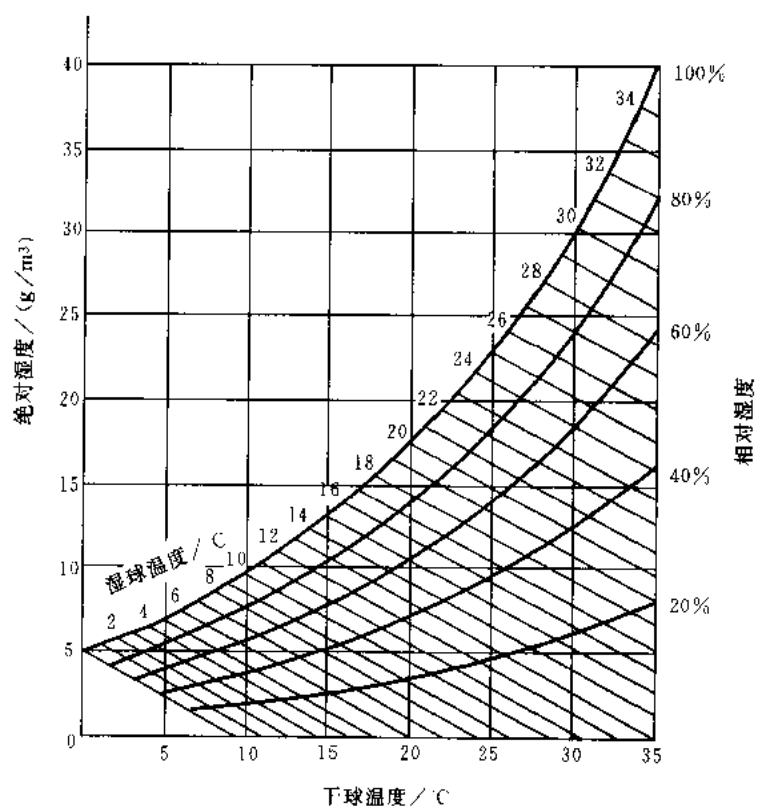


图 3.2.9 绝对湿度、相对湿度与干、湿球温度的关系曲线

表 3.2.2 大气校正因数的应用

| 试验电压形式 | 电极形状                            | 极性 | 空气密度校正<br>指数 $m$ 和 $n$ | 湿度校正               |                                                          |
|--------|---------------------------------|----|------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------|
|        |                                 |    |                        | 因数 $K$             | 指数 $\omega$                                              |
| 直流电压   | 球对球间隙                           | —  | 1.0                    | 见图 3.2.8<br>曲线 $b$ | 0<br>0                                                   |
|        | 棒对棒间隙,<br>悬式绝缘子                 | —  |                        |                    | 1.0<br>1.0                                               |
|        | 棒对板间隙,<br>支柱绝缘子                 | —  |                        |                    | 1.0<br>0                                                 |
| 交流电压   | 球对球间隙                           | —  | 1.0                    | 见图 3.2.8<br>曲线 $a$ | 0                                                        |
|        | 支柱绝缘子、悬式<br>绝缘子、棒对棒间隙           | —  | 见图 3.2.7<br>曲线 $c$     |                    | 见图 3.2.7 曲线 $a$                                          |
|        | 棒对板间隙                           | —  |                        |                    | 见图 3.2.7 曲线 $a$ 当<br>$h > 11\text{g/m}^3$ 取 $\omega = 0$ |
| 雷电冲击电压 | 球对球间隙                           | +  | 1.0                    | 见图 3.2.8<br>曲线 $b$ | 0<br>0                                                   |
|        | 棒对板间隙                           | +  |                        |                    | 1.25                                                     |
|        |                                 | —  |                        |                    | 0                                                        |
|        | 支柱绝缘子、悬式<br>绝缘子、棒对棒间隙           | +  |                        |                    | 1.25                                                     |
| 操作冲击电压 | 球对球间隙                           | —  | 1.0                    | 见图 3.2.8<br>曲线 $a$ | 0                                                        |
|        |                                 | —  | 1.0                    |                    | 0                                                        |
|        | 支柱绝缘子、悬式<br>绝缘子、棒对板间隙、<br>棒对棒间隙 | +  | 见图 3.2.7<br>曲线 $c$     |                    | 见图 3.2.7 曲线 $b$                                          |
|        |                                 | —  |                        |                    | 0                                                        |

## (2) X—4.5 型绝缘子(或串)工频湿闪络电压的测定

① 量淋雨率。为节约去离子水(或蒸馏水),可用自来水喷淋,测量试品处的淋雨率,待达到标准要求的淋雨率后,记下压缩空气机的压力。

② 测量人工雨水的电阻率,具体方法如前所述。

③ 试验程序。

试品按前述规定条件至少预淋 15min 再施加电压。预淋时间内可以包括调整喷头所需的时间。加电压时,升压速度可按每秒 3% 的预期闪络电压进行,直至沿面闪络为止,记下闪络时的电压值。

湿闪络电压应以连续五次测定的闪络电压的算术平均值计算,连续五次测定的每个电压值与平均值之差不超过平均值的 8%,相邻两次闪络试验的时间间隔不得少于 1min。

试验时,大气状况与标准大气状况不同时,工频湿闪络电压值应按下式进行校正(GB311/83 的规定)

$$U_0 = U/K_d$$

式中  $U_0$ ——校正到标准状态下的湿闪络电压有效值, kV;

$U$ ——试验时,大气状态下所测得的湿闪络电压有效值, kV;

$K_d$ ——空气密度校正因数。

### 3.3 空气间隙的放电试验

空气是应用很广泛的气体绝缘材料,其击穿场强、击穿电压是多少?空气间隙的击穿与电极形状(如均匀电场、稍不均匀电场、极不均匀电场)、电压形式(如交流、直流、冲击电压等)有什么关系?在一般的有关高电压的教科书中,对气体放电的理论有许多的论述,但由于影响空气放电的因素很多,到底如何确定空气间隙的放电电压,必须对空气间隙进行放电试验方能确定。

#### 3.3.1 均匀、稍不均匀电场的放电

均匀电场和稍不均匀电场的电极布置如图 3.3.1 所示。均匀电场中,由于各点电场强度都是一样的,所以,当施加稳态电压(直流、工频交流电压),电场强度达到空气的击穿场强时,间隙就击穿了。但在日常见到的电场中,很难见到均匀电场。

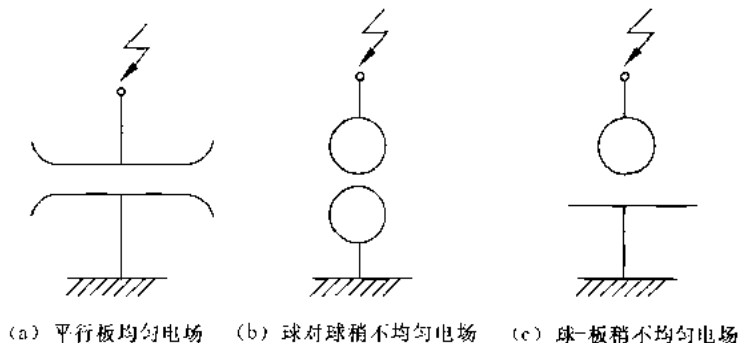


图 3.3.1 均匀电场、稍不均匀电场电极布置图

对于稍不均匀电场,以球-球间隙为例,当间隙距离  $S < 1/4D$  时,其电场基本为均匀电场;当  $D/4 \leq S \leq D/2$  时,其电场为稍不均匀电场。人们利用其电场的基本均匀和空气击穿场强为一常数的特点,将球-球间隙作为测量高电压的一种主要的方法,其测量误差可达  $\pm 3.0\%$ ,国际电工委员会和我国国家标准 GB311/83 都利用此法测量高电压,本书在最后的附录中亦录用了球隙放电电压标准表。

但球间隙测量电压时,球隙必须放电方能测量。另外,球隙测量的电压为电压的峰值,对不同极性的电压来说,基本没有极性效应。

当球间隙大于球的半径时,即  $S > D/2$  时,其间的电场就接近不均匀电场了,放电的分散性增加,就不能作为测压器了。球隙放电的接线如图 3.3.2 所示。

均匀电场的放电电压也可用公式来计算,其计算式为

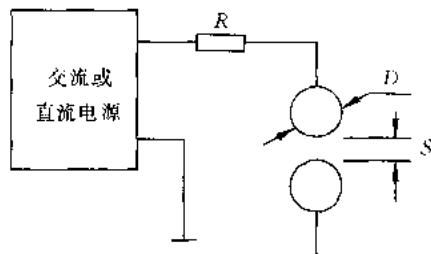


图 3.3.2 球间隙试验线路图

$$U = 24.4\delta S + 6.53\sqrt{\delta S}(\text{kV})$$

式中  $\delta$ ——空气相对密度；

$S$ ——球隙距离, cm。

从均匀电场的放电可以看出, 空气间隙的击穿场强可用  $30\text{kV/cm}$  来估算。

### 3.3.2 不均匀电场的放电

不均匀电场与均匀电场的差别就是在空气间隙内, 各点的电场强度不一样, 在电力线集中的电极附近, 电场强度最大; 而电力线疏的地方, 电场强度很小, 如图 3.3.3 所示。其中图(a)为棒-棒间隙, 该间隙为对称型的不均匀电场, 在电极的尖端处电力线集中, 电场强度最大, 当加上高压后, 会在电极附近首先产生空气的局部放电(电晕放电), 电压继续升高时, 电晕放电将更加强烈, 间隙中将产生刷状放电, 最后间隙将产生电弧放电, 也就是击穿了。

图 3.3.3(b)表示为棒-板间隙, 在棒电极附近电场强度最大, 当电压升高时, 亦会有电晕放电、刷状放电、火花放电, 直至电弧放电的过程。这就是不均匀电场放电与均匀电场放电之间的差别。均匀电场放电没有这些过程。

不均匀电场放电与电压形式(如直流电压、交流、雷电冲击、操作冲击等)有密切关系。下面将分别进行直流电压(包括正棒-负板、负棒-正板)、交流电压及雷电冲击电压的试验, 从而可看出在不均匀电场中, 不同种电压空气放电的特点。

#### 1. 直流电压的试验

试验线路如图 3.3.4 所示, 当直流电压加在棒-板间隙时, 其放电过程如前所述。但不同极性的直流电压, 其放电电压是截然不同的, 人们称之为极性效应。本试验可将棒-板距离调至  $8\text{cm}$ , 当不同极性时, 从电压表的读数上可看出负棒-正板的击穿电压比正棒-负板的击穿电压高很多, 其原因是由于空间电荷对间隙的放电起着很重要的作用。空间电荷形成的电场与外电场同方向时, 将加强间隙的放电, 因而击穿电压就低了, 若空间电荷形成的电场与外界电场方向相反时, 则间隙的击穿电压就提高了。

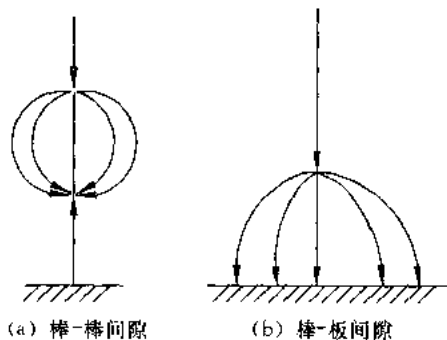


图 3.3.3 不均匀电场电极布置图

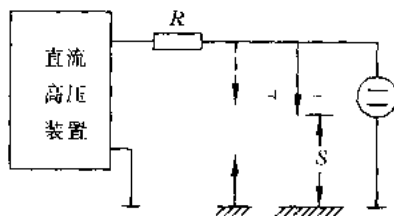


图 3.3.4 直流电压试验接线图

从典型的棒-棒、棒-板间隙试验的情况来看,不同间隙距离时平均击穿场强如表 3.3.1 所示。

表 3.3.1 空气平均击穿场强与电极形状、电压极性的关系表

| 极间距离 /cm       | 电极情况 |              |              |
|----------------|------|--------------|--------------|
|                | 棒-棒  | “-”棒<br>“+”板 | “+”棒<br>“-”板 |
| $S < 10$       | 9    | 20           | 7.5          |
| $50 < S < 300$ | 5.4  | 10           | 4.5          |

在对空气间隙进行击穿试验时,为了克服击穿的分散性,每个点要进行三次试验,取其平均值。

## 2. 工频交流电压的试验

试验线路如图 3.3.5 所示。在工频电压作用下,由于交流电压是交变的,所以有时为正极性,有时为负极性。很显然,间隙的击穿总是在电压最低时先击穿,所以,对典型的棒-棒、棒-板间隙的击穿场强,如表 3.3.2 所示。

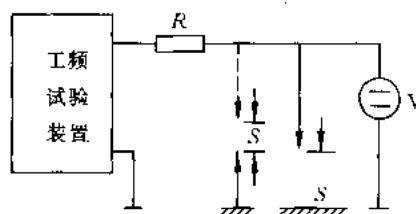


图 3.3.5 工频交流击穿试验线路图

表 3.3.2 在工频交流电压下平均击穿场强与电极形状与极间距离的关系表

| 极间距离 /m  | 电极情况 |      |
|----------|------|------|
|          | 棒-棒  | 棒-板  |
| $S < 1$  | 6    | 5    |
| $S > 2$  | 3.8  | 3.35 |
| $S = 10$ |      | 2    |

## 3. 提高不均匀电场间隙放电电压的措施

由于不均匀电场中电场极不均匀,空间电荷形成的电场与外电场共同作用,另外,碰撞电离、光电离以及光电子等引起的二次电子崩等的影响,使不均匀电场的平均击穿场强大大小于均匀电场的击穿场强。所以在同一电压下,为保证间隙不放电,不均匀电场所需的间隙距离远大于均匀电场的间隙距离。

为了提高不均匀电场间隙的击穿电压,可采取如下的措施。

### (1) 改善电场分布

不均匀电场平均击穿场强很低,如“+”棒“-”板的击穿场强约  $5\text{kV/cm}$ 。为了提高击穿电压,可以改善电场分布,使电场均匀一些,从而提高间隙的击穿电压。因为均匀电场的平均击穿场强可达  $30\text{kV/cm}$ ,为不均匀电场的击穿场强的 6 倍。

### (2) 在间隙间放置屏障可以提高击穿电压

这可以从试验方法得到证明。如“+”棒“-”板间隙击穿场强很小,当间隙距离为

8cm 时,其击穿电压约 40kV,当在间隙中放置一层 0.12mm 厚的绝缘纸时,可以大大提高间隙的击穿电压,如图 3.3.6 所示。从该图可看出,当屏障在间隙距离的 10% 左右时,间隙击穿电压可提高到 150kV~160kV。原因是在没有屏障时,电场处于极不均匀状态,所以击穿电压很低;当有屏障时,在“+”棒附近的“+”电荷将附着在屏障上,使极间电场趋于均匀,所以提高了击穿电压。

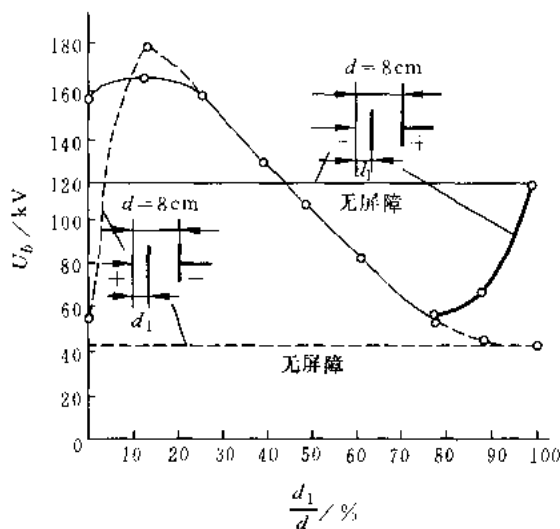


图 3.3.6 “+”棒“-”板间隙击穿电压与屏障位置的关系

(3) 为提高间隙击穿电压还可采用压缩空气或高绝缘强度气体。

从图 3.3.7 和图 3.3.8 可以看出在纯空气大气压下的击穿电压与压缩空气和绝缘气体下的击穿电压的情况。

### 3.3.3 雷电冲击电压作用下空气间隙的放电

通过对雷电的大量观测可以知道,雷电现象实际是带电雷云之间、雷云与大地之间空气的放电现象,其放电的波形为单次单极性的脉冲波形。波头和波长的时间为带统计性的随机数据。我国国家标准 GB311/83 规定:标准雷电全波为  $\pm 1.2/50\mu\text{s}$ ,操作过电压波为  $\pm 250/2\ 500\mu\text{s}$ 。本节将介绍标准雷电全波作用下空气间隙的放电。

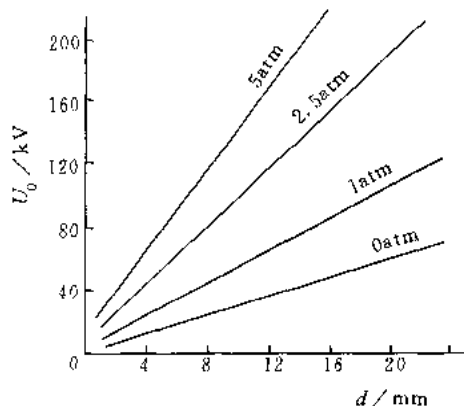
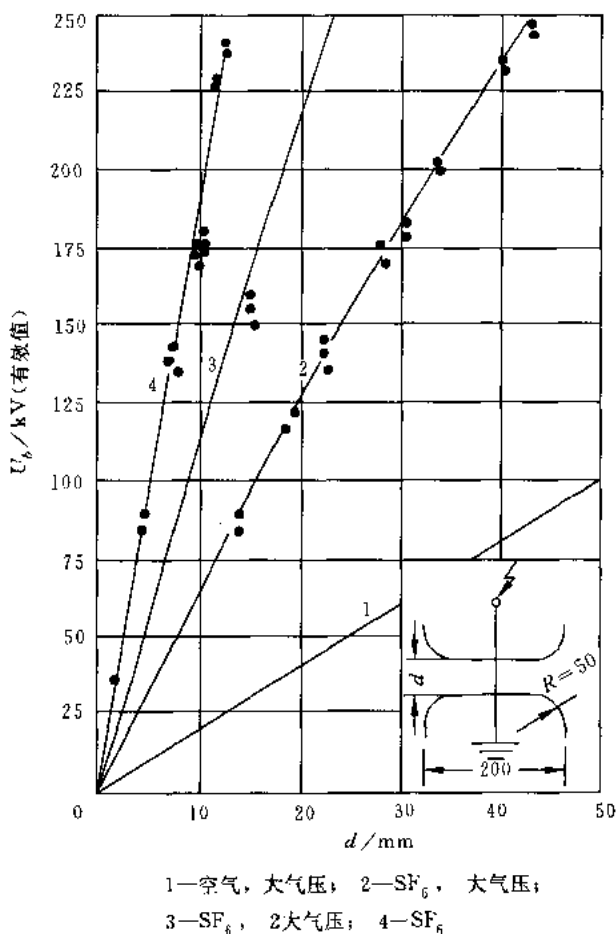


图 3.3.7 压缩空气的工频击穿电压与间隙距离、气压的关系

由于空气间隙的放电不仅需要一定的电压(确切地说应有足够的电场强度),而且还需要有一定的时间。在直流电压和工频(低频)电压的作用下,由于电压作用时间长,所以只要电压升到一定值时,间隙就击穿了。但对于雷电波来说,零到最大值的时

图 3.3.8 均匀电场中各种气压下 SF<sub>6</sub> 工频击穿电压与间隙距离的关系

间比工频电压短多了,只有  $1.2\mu\text{s}$ ,对于不同的电极布置(如稍不均匀电场、极不均匀电场),由于间隙的电场分布不一样,放电电压会有显著的差别。下面分别进行试验。

### 1. 在均匀和稍不均匀电场中

由于间隙中各处电场强度基本相等,当外施电压上升到间隙内空气的击穿场强时,间隙就立即放电了。所以,在均匀、稍不均匀电场中,冲击放电电压与直流、工频交流的放电电压是一致的,这在附录中的球隙放电标准表中可以看到,也可以通过试验求得。

由于球隙冲击电压的伏-秒特性在短波时有些上翘,所以在上升前沿小于  $1\mu\text{s}$  时,间隙击穿电压有所升高,并且分散性也会增大。

### 2. 不均匀电场的情况

在雷电冲击电压波的作用下,不均匀电场间隙中各部分电场强度差别很大,间隙的放电只能由强场强区向弱场强区发展,且产生击穿间隙的有效电子还需一段时间,所以,要使间隙击穿就需要一定的时延或提高外施电压,也就是说,雷电波或短波对空气间隙的放

电与直流电压、低频交流电压有明显的差别,放电电压与放电时间有一定的关系,即伏-秒特性。

所谓伏-秒特性,就是间隙的击穿电压与放电时延的关系曲线。对于不同的空气间隙,如均匀、稍不均匀电场、极不均匀电场,它们的伏-秒特性都是不一样的。图 3.3.9 绘出了雷电冲击电压全波的波形图,图 3.3.10 绘出了不同间隙的伏-秒特性。伏-秒特性是通过雷电冲击试验得出的。在一个间隙上,施加同一种标准波形的电压,改变施加电压的幅值,发现击穿该间隙的时间是不一致的,因而可得到间隙击穿电压与击穿时间的关系曲线。大量试验表明:对于均匀或稍不均匀电场,其伏-秒特性比较平坦,而对于极不均匀电场(如棒-棒、棒-板间隙),其伏-秒特性是一较陡的曲线带。假若用空气间隙来保护电气设备时,一定要慎重考虑空气间隙的伏-秒特性,这与被保护设备的重要性、投资金额等都有很大的关系。

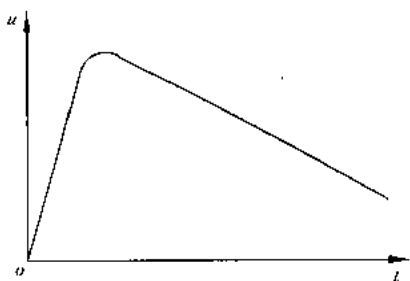


图 3.3.9 雷电冲击电压全波波形图

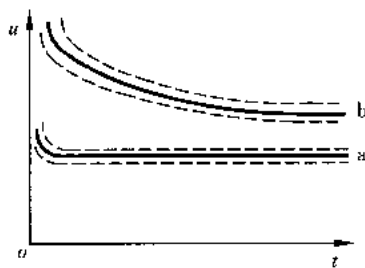


图 3.3.10 不同间隙的伏-秒特性

### 3. 雷电冲击电压作用下,不同间隙放电特性的试验

由于均匀电场和不均匀电场的伏-秒特性有很大差异,在选择间隙作为保护设备时,一定要认真考虑伏-秒特性。

本项试验是将稍不均匀电场球-球间隙与棒-板间隙并联联接,如图 3.3.11 所示,将

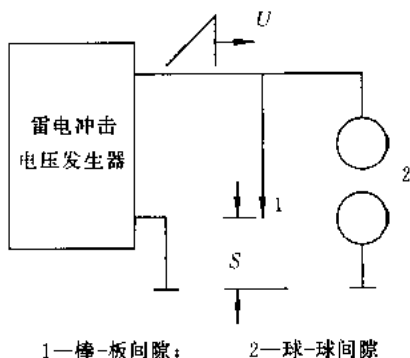


图 3.3.11 冲击电压放电试验线路图

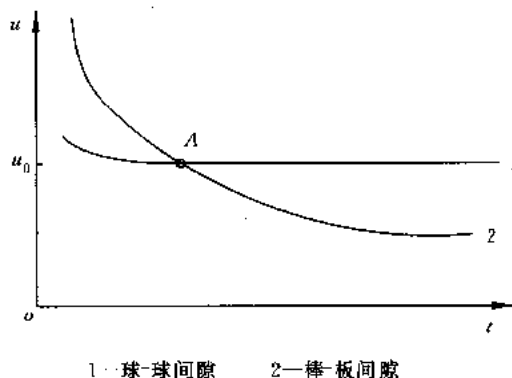


图 3.3.12 棒-板间隙与球-球间隙伏秒特性曲线图

两并联间隙联接到雷电冲击电压发生器上。由于两间隙的伏-秒特性不一样,可调节它们的伏-秒特性曲线使之相交,在相交点的右侧,棒-板间隙的曲线低于球-球间隙;而相交点的左侧,棒-板间隙在球-球间隙之上。所以当雷电冲击的幅值改变时,间隙放电将有一定的规律,幅值较低时,放电将发生在伏-秒特性交点的右侧,棒-板间隙放电;而冲击电压幅值高时,放电将在球-球间隙产生。

由于电场均匀程度不同,伏-秒特性存在差异,在选择放电间隙作为保护装置时,最好采用电场比较均匀的电极。如在有间隙的避雷器中,一般都采用平行板的间隙,当间隙串联较多时,还要采用均压的并联电阻,这样才能很好地保护电力设备。

### 3.4 雷电冲击电压波的产生和测量

为了对试品进行冲击电压试验,必须了解雷电冲击电压波的产生和测量方法。本节将以实际试验的方法,介绍冲击电压发生器的基本原理、线路、元件、整体结构和冲击电压的测量方法。

#### 3.4.1 雷电冲击电压波的产生

为了产生雷电冲击电压波,必须先了解雷电波的波形及参数,然后再了解如何产生雷电波电压的方法。

##### 1. 雷电波形概述

为考验电气设备绝缘耐受雷电冲击电压的能力,一般都用人造雷电装置——冲击电压发生器产生单极性急速上升、幅值极高的脉冲电压波来考验电气设备的绝缘。经科学家、工程技术人员对雷电的测量,并经国家确定,我国国家标准 GB311/83 规定雷电电压波的波形为  $\pm 1.2/50\mu\text{s}$ ,即电压大约在  $1.2\mu\text{s}$  的时间上升到最大值,然后约在  $50\mu\text{s}$  的时间内降至半峰值电压,具体波形如图 3.4.1 所示。对于雷电波,还有一种截断波。所谓截

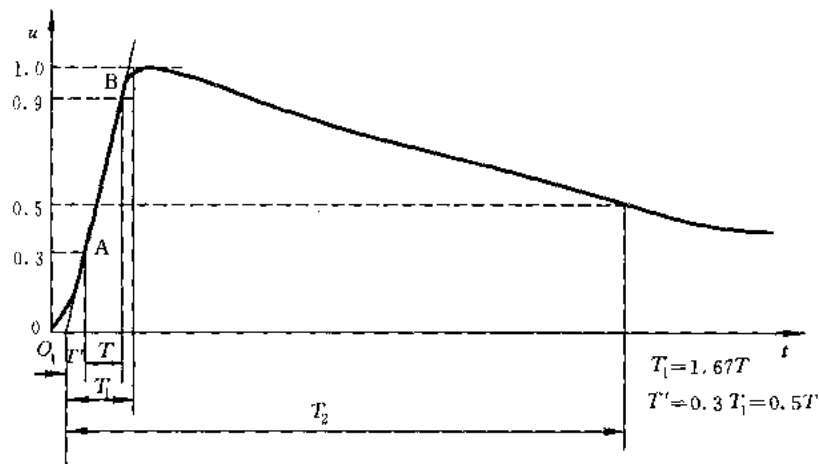


图 3.4.1 雷电全波电压波形图

断波,就是当冲击电压经一段时间上升到一定幅值时,突然截断,将产生陡度更大的波形,对电气设备绝缘进行更严格的考验。

## 2. 产生人工雷电波的等值电路

要产生 $\pm 1.2/50\mu\text{s}$ 单极性脉冲电压波,一般是利用电阻、电容充放电的原理来达到的。可利用对多个电容器并联充以直流电压,然后利用同步元件(如球隙)使电容器串联放电来获得高电压。人工雷电波发生装置的等值电路如图 3.4.2 所示。当开关 K 合闸以后,充满了直流电压  $U_1$  的电容器  $C_1$  将向  $R_d, R_2$  放电,同时  $C_1$  将经  $R_d, R_1$  向  $C_2$  充电,当  $C_2$  按  $C_1, C_2$  充到一定电压时,可向  $R_2$  放电。这样,可在  $C_2$  上有一充、放电的过程,即  $C_2$  上的电压波形  $U_2(t)$ 。调节波头电阻  $R_1$  和波尾电阻  $R_2$  的值,可将其调至 $\pm 1.2/50\mu\text{s}$ 的波形。

为了得到标准雷电波,可按以下简化公式计算波头、波尾电阻值。具体计算公式为波头

$$T_{\text{头}} = K \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} (R_d + R_1)$$

式中  $C_1$ ——主电容,  $\mu\text{F}$ ;

$C_2$ ——负荷电容,  $\mu\text{F}$ ;

$R_1$ ——波头电阻,  $\Omega$ ;

$R_d$ ——阻尼电阻,  $\Omega$ , 一般为  $(0.1 \sim 0.2)R_2$ ;

$K$ ——系数,当回路电感很小时,可忽略电感的影响,系数  $K$  取 3.24;当电感不可忽略时,系数  $K$  可取 2.2;

$T_{\text{头}}$ ——波头时间,  $1.2\mu\text{s}$ 。

波尾

$$T_{\text{尾}} = 0.7(C_1 + C_2)(R_2 + R_d)$$

式中  $C_1, C_2, R_d$  同前;

$R_2$ ——波尾电阻,  $\Omega$ ;

$T_{\text{尾}}$ ——波尾时间(波长时间),  $50\mu\text{s}$ 。

此外,冲击电压发生器效率的计算公式为

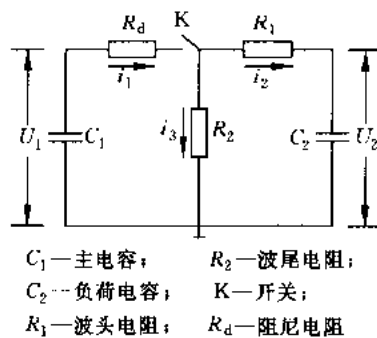
(1) 在等值电路中,当  $C_1$  向  $C_2$  充电时,  $C_2$  上的电压将会按  $C_1, C_2$  电容分配,故其效率为

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

(2) 由于阻尼电阻  $R_d$  的存在,其上将有一部分压降,故  $U_2$  上的电压亦有一效率  $\eta_2$  的问题,即

$$\eta_2 = \frac{R_2}{R_d + R_2}$$

所以,冲击电压发生器总的效率为



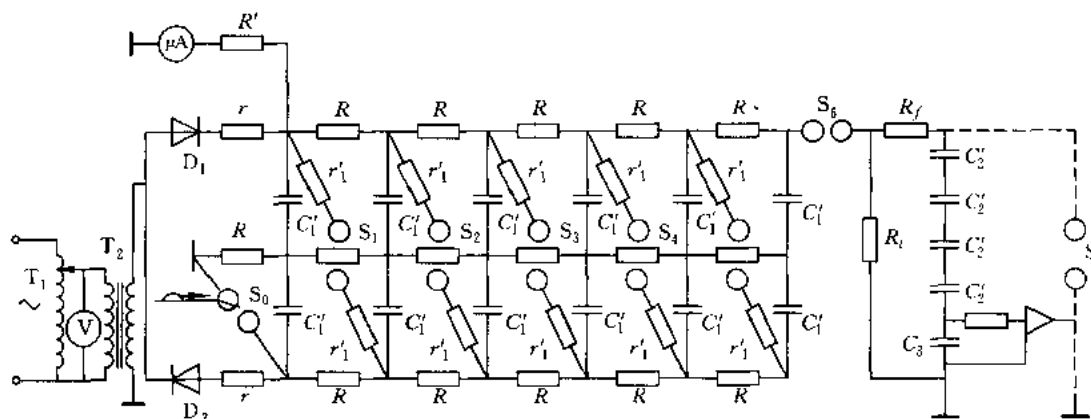
$C_1$ ——主电容;  $R_2$ ——波尾电阻;  
 $C_2$ ——负荷电容;  $K$ ——开关;  
 $R_1$ ——波头电阻;  $R_d$ ——阻尼电阻

$$\eta = \eta_1 \eta_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{R_2}{R_d + R_2}$$

对于冲击电压发生器的实际效率,还应考虑充电回路的效率及波形本身的波形系数。一般波形系数可取 0.945。

### 3. 产生人工雷电全波的具体电路

前面介绍了冲击电压发生器的等值电路。为了使电容器  $C_1$  能获得很高的电压,可用多个电压较低的电容器并联充电,然后用多个开关将充好电压的电容器串联起来,可获得  $nU_0$  倍的高压( $U_0$  为每个电容器充电的电压,  $n$  为电容器的台数)。具体电路可见图 3.4.3 所示,图中  $C'_1$  为主电容,由  $T_1, T_2, D_1, D_2$  向  $C'_1$  充以  $U_0$  的电压,这样每个电容器上都充上了  $U_0$  的电压,此时,各个球隙( $S_0 \sim S_4$ )都不能放电。从图中也可以看出,在球隙  $S_0$  两端的电位差为  $U_0$ ,在  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$  球隙两端的电位差为  $2U_0$ 。为使并联充电的电容器能在较短的时间内串联起来,可利用  $S_0$  (又称点火球隙)首先放电,即在点火球隙的接地球内部点火电极上施加一脉冲电压,使点火电极与接地球放电,从而使点火球隙  $S_0$  放电。 $S_0$  放电以后,点“1”与地接通,点“2”的电位将变成  $+2U_0$  的电位,这是因为当  $S_0$  接通以后,  $C'_1$  将通过  $S_0$  向充电电阻  $R$  放电,由于  $C'_1 R$  放电时间常数较大。所以点“2”的电位将变成  $+2U_0$ 。假若点“3”的电位仍保持  $-U_0$  电位的话,中间球隙  $S_1$  两端的电位差将达  $3U_0$ ,  $S_1$  将被击穿,点“3”的电位将变成  $+2U_0$ ,点“4”的电位也由于  $C'_1$  与充电电阻  $R$  的乘积(时间常数)较大,升至  $+4U_0$ 。同时,所有的  $C'_1$  将由  $S_0 \sim S_5$  串联起来,点 2 的电位将达  $+12U_0$ ,最后将  $S_5$  间隙击穿,在负荷电容器  $C_2$  上形成  $U_2(t)$  的雷电全波电压。



$T_1$ —调压器, 0V~250V, 2kVA;

$T_2$ —高压互感器, 100V/35kV;

$D_1, D_2$ —高压硅堆, 2DL, 60kV/0.1;

$C'_1$ —主电容, 30kV, 0.3μF(原为10kV电力电容器);

$C'_2$ —80kV, 0.003~3μF脉冲电容器, 共4台;

$r$ —保护电阻, 约300kΩ;

$R$ —充电电阻, 30kΩ;

$R'$ —直流分压器电阻, 100MΩ;

$R_f$ —波头电阻, 0kΩ~0.91kΩ;

$R_r$ —波尾电阻, 0kΩ~2.63kΩ;

$r_1$ —阻尼电阻,  $\sum r_1 = 16\Omega = R_d$ ;

$S_0$ —点火球隙, φ5cm;

$S_1 \sim S_5$ —中间球隙, φ5cm;

$S_6$ —隔离球隙, φ10cm;

$S$ —测量球隙, φ15cm;

$\mu A$ —直流微安表, 0μA~300μA

图 3.4.3 360kV1890WS 冲击电压发生器线路图

前面所述主电容与充电电阻的乘积即  $C_1 R$  时间常数较大,比  $S_0 \sim S_6$  铜球动作时间及雷电波的  $1.2/50\mu s$  的时间大得多,故可忽略  $C_1 R$  时间常数的影响。因此,各个球隙  $S_0 \sim S_6$  要很好同步方能得到合格的标准雷电波,即要正确调节球隙的放电电压值。如图 3.4.3 所示,  $S_0$  点火球的放电电压应略大于  $U_0$ ,  $S_1$  中间球隙的放电电压应为  $2U_0 < U_{S_1} < 3U_0$ ,  $S_2$  中间球隙的放电电压为  $2U_0 < U_{S_2} < [3U_0 + (2 \sim 3)kV]$ ,  $S_3$  中间球隙的放电电压为  $2U_0 < U_{S_3} < [3U_0 + 2(2 \sim 3)kV] \dots$ 。对于各个球隙的调节,可用手动,也可用电动,有的冲击电压发生器还可采用带触发电极的球隙,多级间隙的方法,以使冲击电压发生器可靠同步。而如图 3.4.3 的冲击电压发生器是采用两球间隙作为同步元件的,可按如下方式调节,设充电电压为  $10kV$ ,则  $S_0$  的间隙距离应为  $3mm$ ;  $S_1$  中间球隙的放电电压为大于  $20kV$ ,可将  $\Phi 50mm$  球距调至  $6mm$ ,  $S_2$  略大于  $6mm$ ,  $S_3, S_4$  亦调至  $6mm \sim 7mm \dots$ ,  $S_6$  可调至  $8mm \sim 10mm$ 。电容器的充电电压可用电阻分压器测量,可用与  $R'$  串联的微安表去读取,其分压系数为  $10kV/100\mu A$ 。

#### 4. 点火脉冲电路

冲击电压的试验大都是在一定间隔时间产生一次冲击电压施加于试品,为此,要有一点火脉冲装置来启动冲击电压发生器,如图 3.4.4 所示。点火脉冲装置可以产生电压达  $10kV$ ,该电压施加于点火间隙的接地球中的触发电极时,触发电极与接地球之间将产生放电,将导致点火球  $S_0$  的放电。

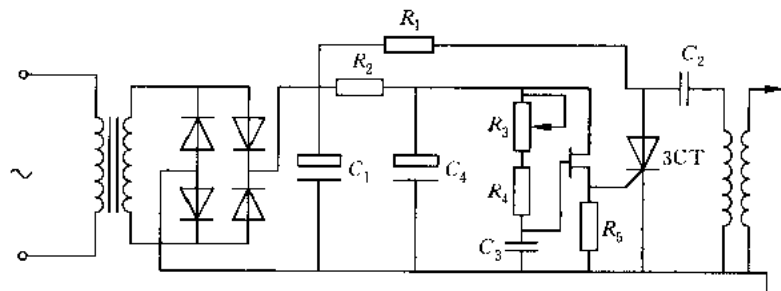


图 3.4.4 点火脉冲装置线路图

另外,点火装置给出的脉冲电压,是根据冲击试验的要求按一定时间间隔给出的,一般时间间隔为  $1min$ 。为了使用方便,可适当调节触发电压的间隔时间。其具体电路如图 3.4.5 所示。

#### 3.4.2 冲击电压的测量

冲击电压的测量不同于  $50Hz$  的工频交流电压,也不同于直流高压的测量。工频和直流高压为连续的波形,且工频交流电压变化速度较慢,而冲击电压变化速度很快,且为单次过程的电压,因此冲击电压的测量有其独特性。

冲击电压的测量方法可分为

##### 1. 球隙法

由于球间隙为稍不均匀电场,有着较平坦的伏-秒特性,所以球隙法可作为  $1.2/50\mu s$

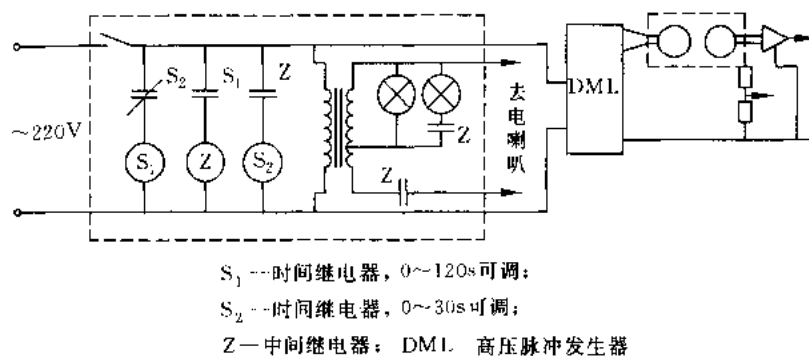


图 3.4.5 定时控制器线路图

雷电波电压幅值的测量法,其电压值可根据球的直径和球隙大小而定,可参考球隙放电电压表来读取。但对于短波,如波头时间小于  $1\mu\text{s}$  或更短,用球隙测量就不准确了。

用球隙测量冲击电压,只能测量冲击电压的峰值,且球隙必须放电,另外,由于球隙放电也有分散性,所以,用球隙法测量电压时,须用 50% 放电法来确定球隙放电电压值。具体测量可按以下方法进行,一般常采用多级法来确定 50% 放电电压值。根据情况可施加固定冲击电压,逐级调节球隙距离;也可以固定球隙距离,逐级调节所施加的电压幅值。具体可由小往大进行,相邻二级间级差不大于预计值的 2%,每级施加电压 6 次,各次放电间的时间间隙不小于 5 秒钟,共做 4~5 级,由每级的放电概率及相应的电压值或球隙距离,在正态概率纸上求得 50% 放电电压值。如果仅从两级数值,用内插法求得 50% 放电电压值,则希望在一级加压时,可能有二次或更少次放电(放电概率 20%~30%),在另一级加压时,可能有 4 次或更多次放电(放电概率 70%~80%)。现在常用的一种简易而稍不准确的方法是 10 次加压法。它只要求调节到在连续 10 次加压中,能有 4 次或 6 次放电即可,此时的电压或间隙距离即代表 50% 放电值。用球隙法测量冲击电压时,亦要进行大气校正,即

$$U = K_d U_0$$

其中  $U_0$ ——标准大气状态下的放电电压值, kV;

$U$ ——试验大气状态下的放电电压值, kV;

$K_d$ ——校正系数。

具体校正法可见 3.1.4 球隙测量交流电压法所述。

## 2. 分压器-峰值电压表法

测量冲击电压的分压器有多种,一般有电阻型分压器、电容型分压器、阻容并联型分压器和阻尼型电容分压器等。

本节将介绍电容型分压器测量冲击电压的方法。具体接线如图 3.4.6 所示。利用分压器

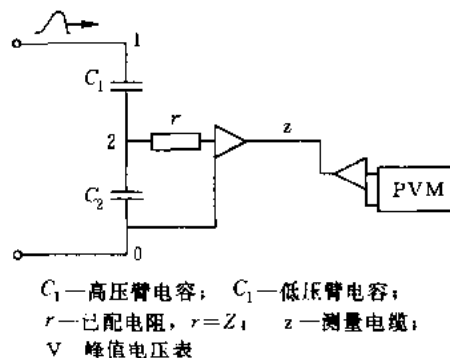


图 3.4.6 电容分压器与峰值电压表

与峰值电压表连接,可以测量冲击电压的峰值,与球隙法相比,分压器法可以不用放电,分压比的计算如下式所示

$$U_{1-0} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_{2-0} \quad K = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

其中  $U_{1-0}$ ——高压对地的电压,kV;

$U_{2-0}$ ——低压臂电压,V,64M型峰值电压表读数;

$C_1, C_2$ ——分压器高压臂、低压臂电容;

$K$ ——分压比。

峰值电压表可用64M型峰值电压表,峰值电压表的面板图如图3.4.7所示。使用64M型峰值电压表时,应注意以下几点。

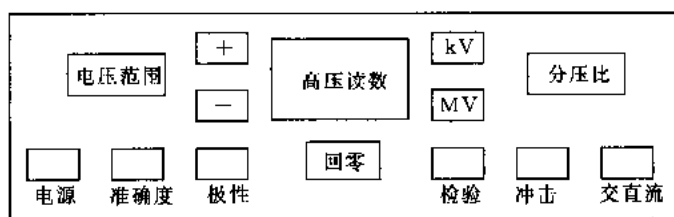


图 3.4.7 64M 型峰值电压表面板图

① 输入峰值电压表的电压要小于该表的测量范围,但不要小于电压测量范围的 1/2,这样峰值电压表的测量误差小于  $\pm 1.0\%$ 。

② 测量峰值电压前,应将分压比值置于分压比的刻度盘中,这样,电压读数的数码管将自动显示实际冲击电压的峰值,电压的单位“kV”或“MV”将会自动显示。

③ 测冲击电压前,应将电压极性按钮与输入电压极性一致,否则峰值电压表无读数。

④ 64M 峰值电压表面板上的准确度指示灯能显示出输出电压是否超过测量范围的 1/2,若输入电压小于测量范围的 1/2 时,准确度指示灯亮,当输入电压大于测量范围的 1/2 时,准确度指示灯灭,且峰值测量误差在  $\pm 1.0\%$  以内。

分压器与峰值电压表结合测量冲击电压只能测量电压的峰值,不能测量冲击电压的波形。

### 3. 电容分压器与高压示波器测量法

图 3.4.8 是电容分压器与高压示波器测量冲击电压的接线图,用示波器测量,不仅可以测量冲击电压的峰值,还可以测量其波形。

在电容分压器与示波器的测量中,要按图 3.4.8 的方式接线,图中  $r=Z$ ,  $Z$  为测量电缆的波阻抗,这是为了防止电缆中冲击波的反射现象。除以上接线以外,还可以用另一种接线,本节从略。

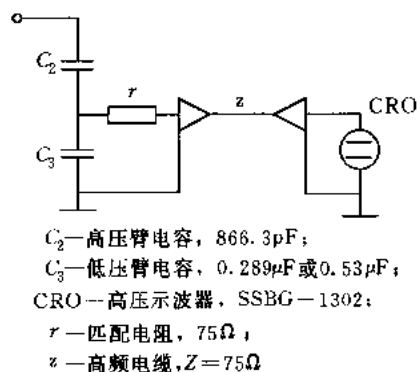


图 3.4.8 电容分压器与高压示波器的接线图

图 3.4.9 所用的高压示波器为 SSBG—1302 型高压示波器,其面板图如图 3.4.9 所示。它有两个通道,示波管的直径为  $\phi 100\text{mm}$ ,加速高压为  $20\text{kV}$ ,扫描时间最快为全屏  $1\mu\text{s}$ ,最慢为  $500\mu\text{s}$ ,适用于雷电波和操作波的测量。触发方式可用外接  $25\text{V}\sim 250\text{V}$  正、负脉冲触发,也可用由天线接收信号触发,还可内触发,即单次手动触发或重复触发。在调节示波器时,可用手动触发方式,当测量冲击波时,就只能用自动触发方式了,如天线触发。若要获得冲击波形,可用照相机拍摄波形图,拍摄波形时,一定要拍摄:① 波形图,② 零线,③ 时标和④ 幅度标线。

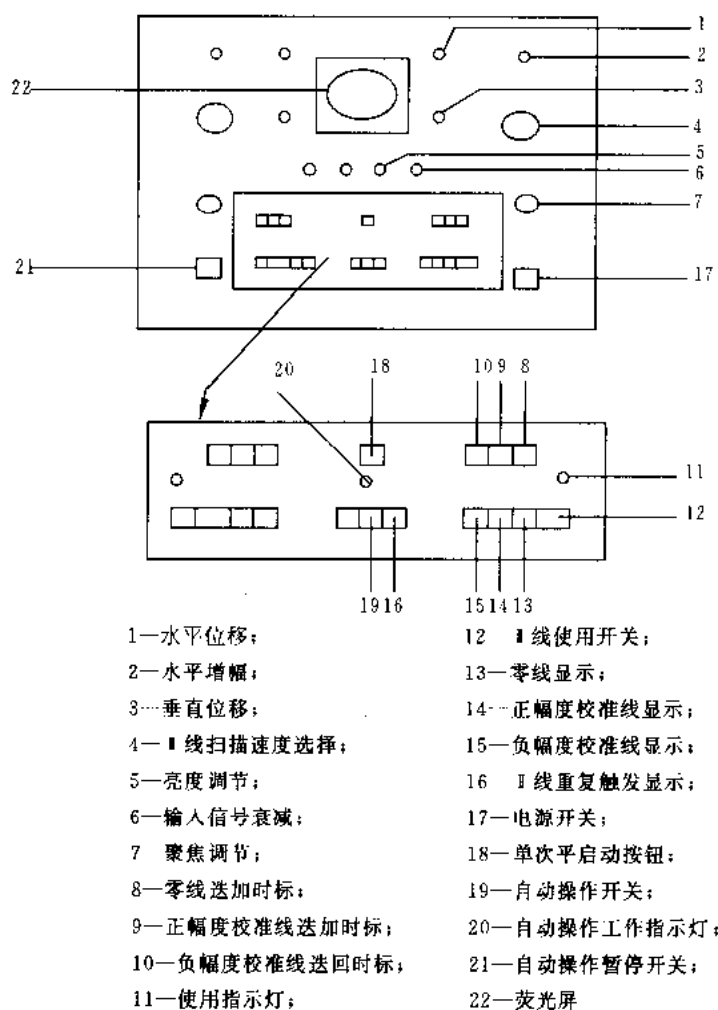
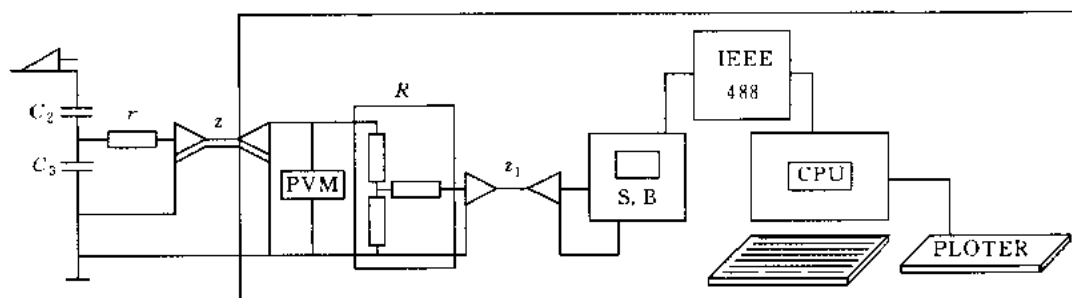


图 3.4.9 SSBG—1302 高压示波器面板图

#### 4. 数字存储示波器的应用

由于冲击波是单次脉冲的电压波,它一瞬即过,稍不慎,波形很难抓住。当用数字存储示波器时,可靠性可大大提高,因为数字存储示波器能将波形图存储起来,一方面可在屏幕上存储起来,用拍摄的方法照相。另外,还可以与计算机连接起来,将示波器存起来的冲击波用数字传给计算机,然后用绘图仪将波形打印出来,具体接线如图 3.4.10 所示。

对数字存储示波器 Gould—4035 的面板图如图 3.4.11 所示。从图中可以看出,其功能有:非存储(Non Storage)、存储、预触发、锁住及模拟绘图、数字输出等,可作为冲击测量较好的仪器。目前,在我国市场上,还有多种数字存储式示波器,而且扫描速度更快,对冲击电压的测量更加适用。



PVM—64M型峰值电压表; IEEE—488—S.B和CPU的连接部件;  
S.B—GOULD—4035数字存储示波器; PLOTTER—绘图仪;  
CPU—NEC PC—8001计算机; R—衰减器, 23/1

图 3.4.10 数字测量线路图

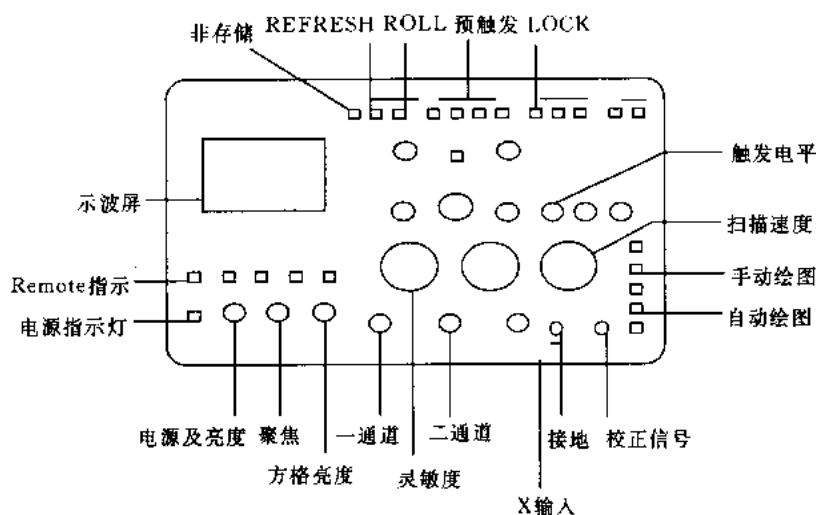


图 3.4.11 Gould—4035 示波器前面板图

Gould—4035 示波器还有模拟绘图功能,当把被测电压波形存储并锁住(Lock)以后,可用绘图仪与 4035 示波器后面板的模拟输出 $Y_1$ 、 $Y_2$ 连接,其接线如图 3.4.12 所示。

将 Gould—4035 示波器与计算机连接时,可把后面板上的旋钮拧至数字输出接口,具体接法参考图 3.4.10。操作程序如下:

① 按图 3.4.10 接线,将 Gould—4035 示波器调至 Roll 方式,预触发置于 25%,扫描速度调至  $10\mu\text{s}/\text{div}$ ,衰减调至  $5\text{V}/\text{div}$ 。

② 记录下冲击波后(示波器是由现象触发而记录的),按下 Lock(锁住)按钮。

③ 按以下顺序处理数据。

起动显示器、磁盘驱动器、主机键盘、绘图仪、并装好软件磁盘。

装配 MOUNT ✓

Load "XXX" ✓

RUN ✓

Choose; measuring by gould 4035.....1  
manipulating the saved data .....2  
end .....3

the divider coefficient=? ✓

T/div=? ( $\mu$ s) 10 ✓

volt/div=? (v) 5 ✓

Now 4 035 Waiting for input

If the input is available press c for  
data transmission

? C ✓

3(Creen Plat) ✓

1(full wave) ✓

2(front wave) ✓

4 (Calculate front time

tail) ✓

Peak value) ✓

5(PP40 Plat) 1(full wave) ✓

2(front wave) ✓

### 5. 冲击电压试验总体方框图

前面分别介绍了冲击电压的产生、测量方法和电路,本段将介绍冲击试验的总体方框图,如图 3.4.13 所示,图中标明了电源、控制单元、定时器、脉冲发生器、冲击电压发生器以及测量设备之间的关系。

当用模拟示波器,如 SSBG—1302 高压示波器时,需用外触发方式去启动示波器,也可用天线触发。由于 SSBG—1302 高压示波器无记忆功能,为获得波形,还必须用照相机

拍照。若用可存储的示波器时,如 Gould—4035 型数字存储示波器,由于示波器有存储的功能,并且可用现象去触发示波器,所以,比较容易获得被测电压的波形。尤其当与计算机联合使用时,还可将测量的波形存于计算机的软盘或硬盘中并进行数据处理,目前这是测量冲击电压的一种很好的方法。

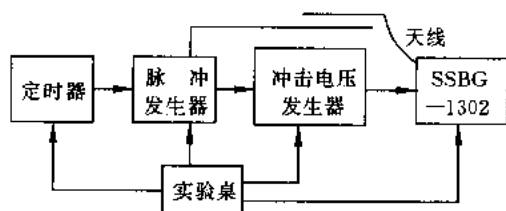


图 3.4.13 冲击电压试验总体方框图

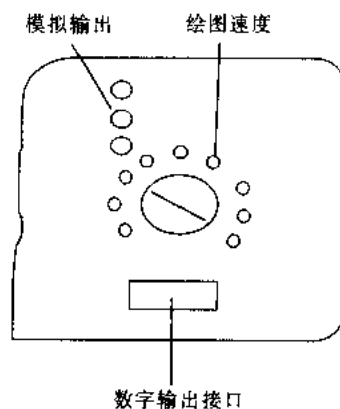


图 3.4.12 Gould—4035 后面板图

### 3.5 冲击电压的试验

冲击电压的试验是电气设备型式试验的一项重要内容。为了更好地了解冲击电压的试验方法,本节将介绍线路绝缘子  $x-4.5$  冲击耐受试验的方法和电力变压器冲击试验方法。

#### 3.5.1 $x-4.5$ 线路绝缘子冲击耐受试验

##### 1. 试验线路图

试验线路如图 3.5.1 所示。对于冲击电压发生器的操作、测量等以及绝缘子的安装方法可详见 3.4 中的介绍。

##### 2. 试验电压的确定

从我国绝缘子的试验方法,即国家标准 GB775—87 中可以查到有关绝缘子的试验方法,从  $x-4.5$  线路绝缘子有关产品标准中,可查到 50% 的放电电压为 120kV。在进行冲击电压耐受试验时,其耐受电压的放电概率为 10%,为此,应找到放电概率为 10% 的电压值,由于绝缘子的放电概率与冲击电压值的关系为正态概率的关系,因此可从正态概率曲线上(此曲线从略)找到 10% 放电概率的冲击电压值与 50% 放电电压值相差 4%。

由于绝缘子有关标准中的 50% 放电电压为标准状态下的值,而实际试验时,不一定是标准大气状态,为此,要进行大气校正,其正确方法为

$$U = \frac{K_d}{K_h} U_0$$

式中  $U_0$ ——标准状态下的耐受电压值;

$K_d$ ——空气相对密度,计算方法见 3.3 节中所述;

$K_h$ ——大气湿度校正系数,其计算方法见 3.3 节中所述;

$U$ ——试验条件下的耐受电压值。

##### 3. 绝缘子冲击试验方法

按国家标准 GB775—87 的规定,当有证据说明正极性或负极性冲击波的试验电压较低时,则以该极性的冲击波进行试验,否则应进行两种极性和冲击波试验。

试验时,冲击电压发生器的电压调至绝缘子耐受电压值的 60%~80%,在此电压下调整试验电压的波形,使之符合国家标准的要求,即 1.2/50 $\mu$ s,然后升高电压至  $x-4.5$  型绝缘子的耐受电压,即放电概率为 10% 的电压。共施加 15 次,如果绝缘子闪络次数不超过 2 次时,则试品通过冲击试验。

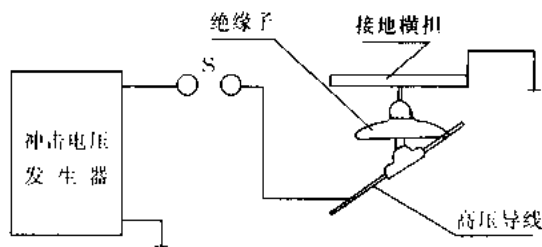


图 3.5.1  $x-4.5$  绝缘子冲击耐受试验线路图

#### 4. 具体试验步骤

(1) 当试品  $x-4.5$  绝缘子按国家标准安装、接线以后(如图 3.5.1 所示),在试品上施加 60%~80% 的负极性冲击电压,调节电阻  $R_1, R_2$ ,使冲击电压波符合国家标准的规定,对于波形的测量,可用分压器和高压示波器或数字存储示波器测量。当波形调好以后,就可升高电压试验了。

(2) 将电压提高到绝缘子的试验电压,由于波形已调好,电压的峰值可用峰值电压表测量。

对绝缘子施加 15 次试验电压,同时记录绝缘子放电的次数和不放电的次数,当 15 次试验中放电次数小于或等于 2 次时,试品被认为通过。当试品闪络放电次数超过二三次以上时,该产品认为不合格。冲击试验时,两次试验的时间间隔为 1min。

(3) 当试品无特殊要求,应进行正和负两种极性的冲击试验。

### 3.5.2 电力变压器的冲击试验

电力变压器是电力系统中非常重要的设备。由于电力变压器在运行中将受到雷电过电压的侵袭,且雷害造成变压器绝缘损坏的情况时有发生。因此冲击电压的试验是很重要的。在试验电压  $U_m > 300\text{kV}$  时,该产品的冲击试验为出厂试验,即每台产品必须做冲击试验;在  $U_m < 300\text{kV}$  时,应作为型式试验的内容,即产品定型、改型时一定要进行的试验。

为了了解变压器冲击试验的目的性,下面简单介绍电力变压器的绝缘情况。

#### 1. 电力变压器的绝缘

电力变压器的绝缘可分两大部分,一部分为外绝缘,一部分为内绝缘。外绝缘包括套管上部空气中的绝缘和套管之间或套管对地(包括储油箱等)的空气绝缘;内绝缘包括绕组绝缘、套管内部及套管下部沿面的绝缘,以及引线及分接开关的绝缘。对于套管的绝缘,应在套管生产厂出厂时进行标准规定的绝缘试验。

本节着重介绍电力变压器绕组的绝缘。绕组绝缘可分为主绝缘和纵绝缘两部分,所谓主绝缘就是高压绕组或引线对低压绕组、相间及对地(铁心、外壳)的绝缘,而纵绝缘为同一绕组中不同匝间、层间、段间的绝缘。

对于绕组的主绝缘,一般采用油纸绝缘、油间隙、油屏障等结构,如图 3.5.2 所示。

纵绝缘结构比较复杂,因为变压器绕组在过电压作用下,尤其在频率不同的电压波作用下,纵绝缘的电压分布会很不均匀,可能造成纵绝缘的损坏。为使纵绝缘电压分布均匀,可采用特殊结构的纵绝缘。

在低频电压作用下(如工频 50Hz),绕组间、绕组对地之间电容效应不大明显,所以电压分布比较均匀,如图 3.5.3(b)所示。该图绕组为连续式(并式),其结构如图 3.5.3(a)所示。

在雷电波电压作用下,连续式绕组的电容效应显著增加,其等值电路如同一电容式链形电路,如图 3.5.4 所示,当雷电波侵入变压器绕组时(可视为一直角波电压  $U_m$  侵入绕组)。很显然,绕组各部电压的初始分布是不均匀的,因为绕组各部流过的电流差异很大,在绕组的头部压降最大,其纵绝缘也最容易损坏,其电压分布如图 3.5.5 所示。尤其当绕

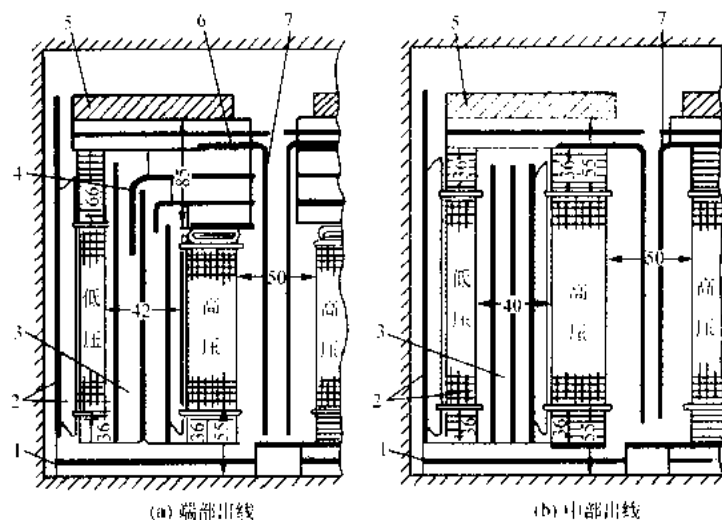


图 3.5.2 100kV C 半绝缘变压器主绝缘结构图

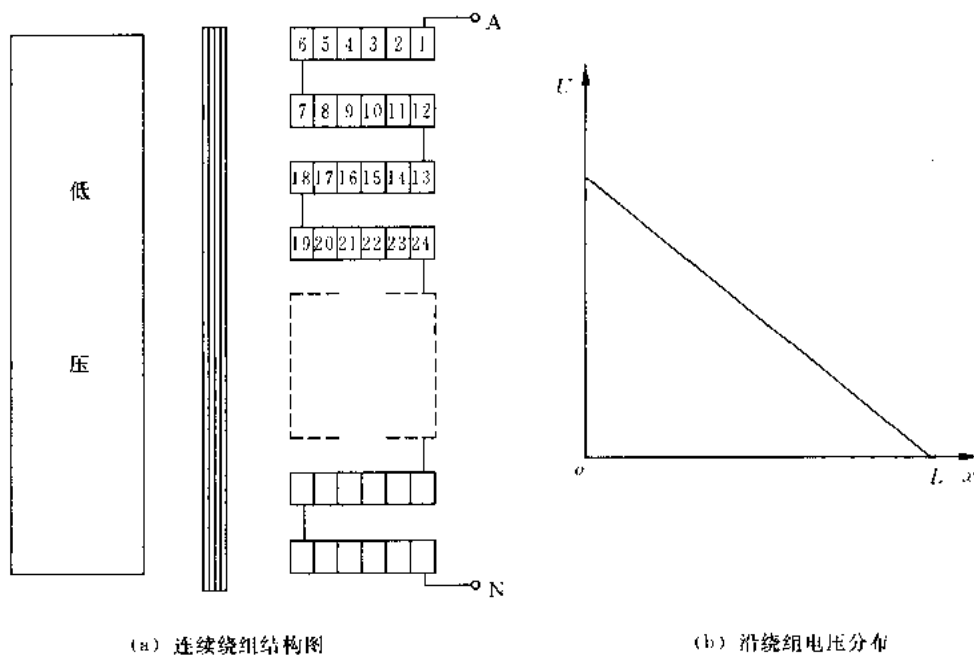


图 3.5.3 连续式绕组在低频电压作用下的沿绕组电压分布

组对地电容与绕组匝间电容的比值越大时,其电压初始分布越不均匀。

所以,冲击电压试验对变压器的考验最严格。

## 2. 变压器冲击试验的波形

按国家标准 GB311/83 的规定,变压器雷电冲击全波试验电压的波形应为  $\pm 1.2/50\mu s$ ,其误差为  $1.2 \pm 30\% \mu s$ ,  $50 \pm 20\% \mu s$ ,由于大容量的变压器绕组电阻小,对

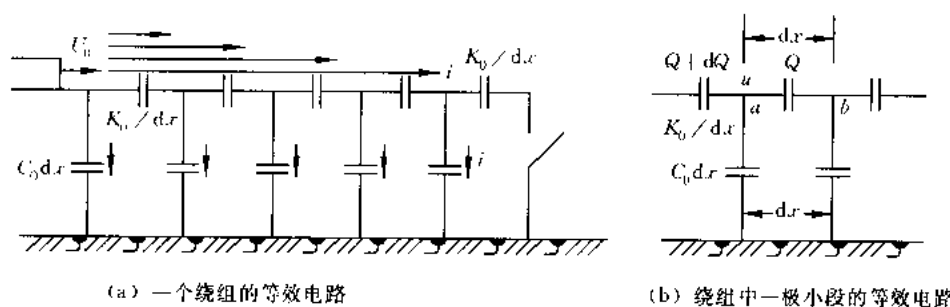


图 3.5.4 电容链形电路

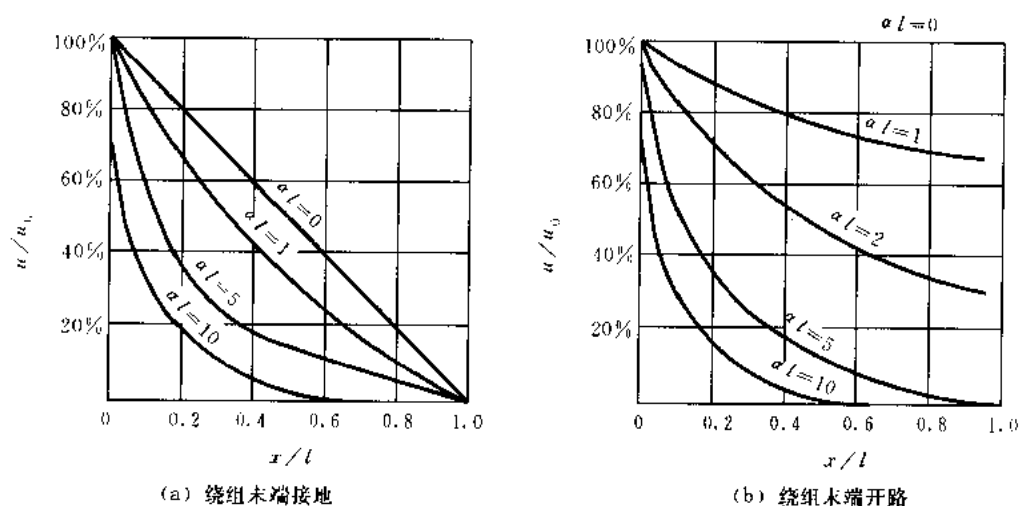


图 3.5.5 直角波侵入变压器绕组时和初始电压分布图

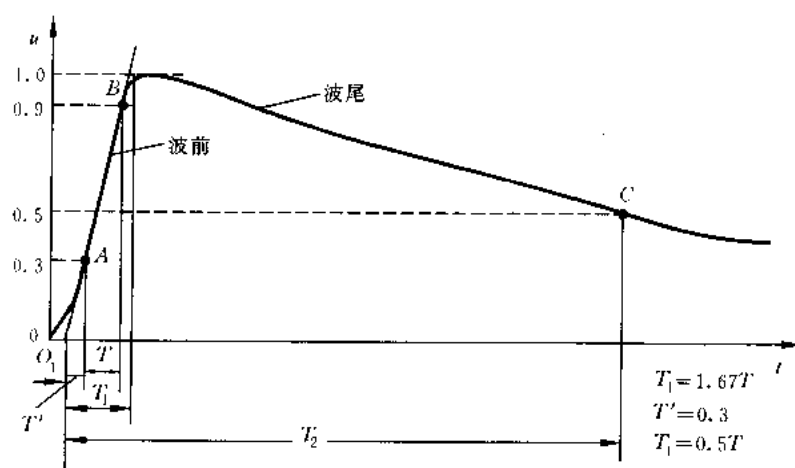


图 3.5.6 冲击全波波形图

地电容比较大,很难获得标准雷电波形,而得到波形往往是振荡的波形。因此,经制造厂与使用部门协商,允许雷电试验波形存较大的偏差,振荡波的反极性峰值不应超过第一个冲击波峰值的5%,有的制造厂允许冲击电压波的波头时间拉长为 $3\mu\text{s}$ ,波尾时间允许减小到 $20\mu\text{s}$ 。其波形如图3.5.6所示。

对于截断波,其预放电时间为 $2\mu\text{s}\sim 6\mu\text{s}$ ,冲击波截断后的过零系数接近于0.3(其允许范围为 $0.25\sim 0.35$ ),其波形如图3.5.7所示。

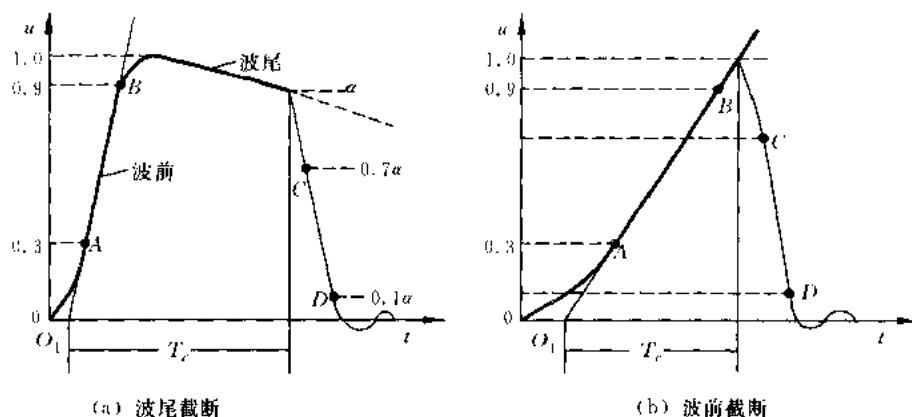


图 3.5.7 冲击截波波形

### 3. 电力变压器冲击电压试验时的接线

- ① 关于冲击电压发生器的电路,前面已经作了详细的介绍,本节就不叙述了。
- ② 电力变压器冲击试验时,变压器的接线有多种,如图3.5.8所示。

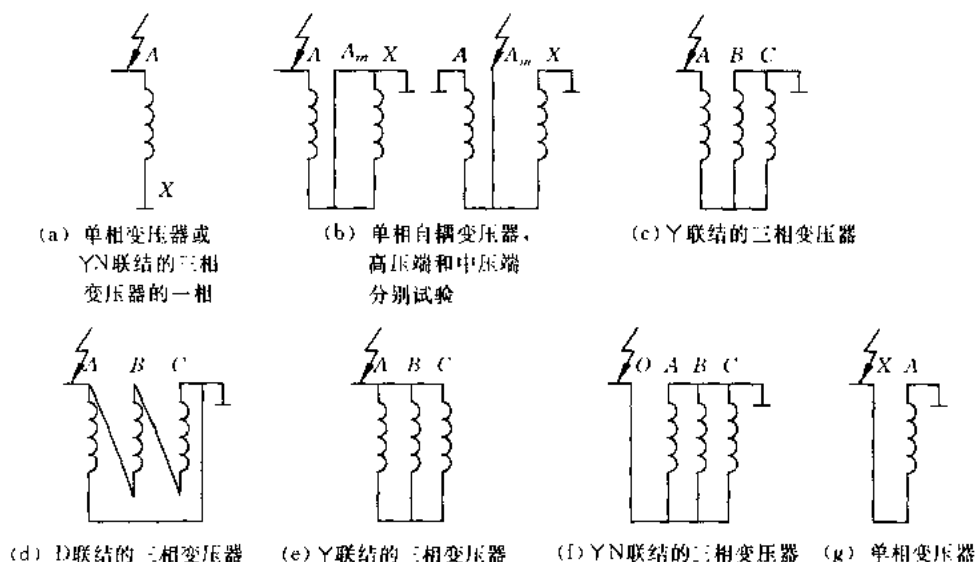


图 3.5.8 变压器冲击试验时线圈接线图

- ③ 为了了解变压器绝缘在冲击试验时的绝缘状况,可采用如图3.5.9所示的冲击试

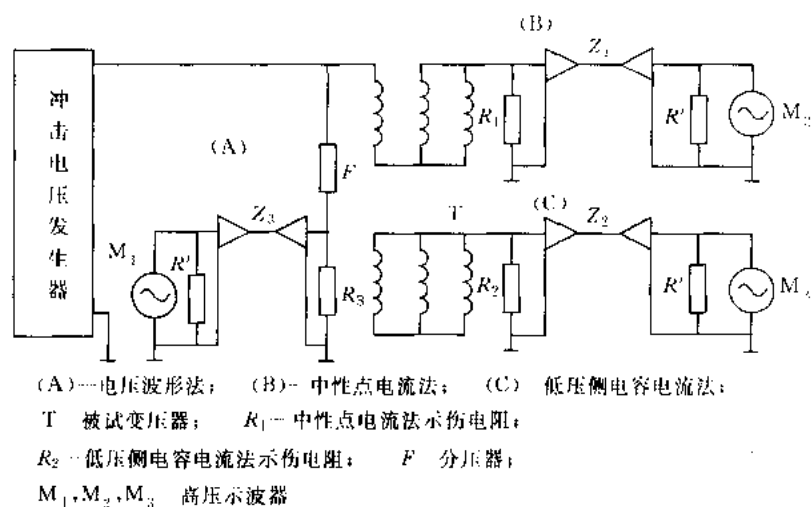


图 3.5.9 变压器冲击试验示伤电路接线图

验示伤线路图。

$F$  为测量冲击电压的分压器,  $M_1$  为测量电压波形的高压示波器,  $R_1$  为中性点电流法的示伤电阻,  $M_2$  为测量中性点电流的示波器,  $R_2$  为测量低压侧电容电流的示伤电阻,  $M_3$  为测量低压侧电容电流的示波器。三种不同的测量方法, 可以从示波器  $M_1, M_2, M_3$  的示波图上反映出变压器绝缘受伤的情况。所以示波器所显示的波形图又称为示伤波形。试验方法也被称为示伤法。

用分压器  $F$  和示波器  $M_1$  测量冲击电压的方法称为电压波形法。当变压器主绝缘在试验电压作用下被击穿时, 电压波形将被截断。电压波形法能反映出变压器主绝缘的情况, 但对纵绝缘的部分损坏很难反映出来。

中性点电流法, 即用示波器  $M_2$  测量  $R_1$  中性点示伤电阻上电压的波形的方法。可以反映中性点电流的波形。中性点电流是多种电流的总和, 经对变压器绕组等值电路进行分析, 其等值电路和中性点电流的波形图如图 3.5.10 所示, 中性点电流  $i_0$  由电容电流  $i_C$ 、激磁电流分量  $i_L$ 、有功电流分量  $i_R$  及振荡电流分量  $i_S$  组成。测量中性点电流  $i_0$  的示伤法基本上可以判断变压器绝缘的性质, 比如当匝间、段间及层间绝缘发生故障时, 中性点电流的波形将发生变化, 如中性点电流加大, 波形将上翘, 当发生对地故障时, 则波形会下截, 所以分析中性点电流的波形, 可以判断变压器绝缘的状况。

用低压侧电容电流法, 即用示波器  $M_3$  测量低压侧电容示伤电阻  $R_2$  上的电压波形, 可以反映电容电流的波形。当在变压器高压绕组上施加冲击电压时, 通过高、低压绕组间的电容会有一电容电流流过低压绕组。假若高压绕组的纵绝缘发生了故障, 通过电容耦合, 就会引起低压绕组电流的变化, 根据波形的变化, 就可以判断变压器绕组纵绝缘的故障, 若高压绕组对低压绕组的主绝缘发生放电时, 更能从电容电流的波形反映出来。

低压侧电容电流的波形是一种衰减的振荡波形, 波的起始部分叠加有较多的高频分量, 波的持续时间一般有几十微秒。低压侧电容电流法可判断的故障有匝间、段间故障、对地故障、高、低压绕组之间以及局部放电等。

变压器冲击试验时, 用不同的示伤法判断绝缘的故障的典型波形如表 3.5.1, 表

3.5.2, 表 3.5.3 所示。

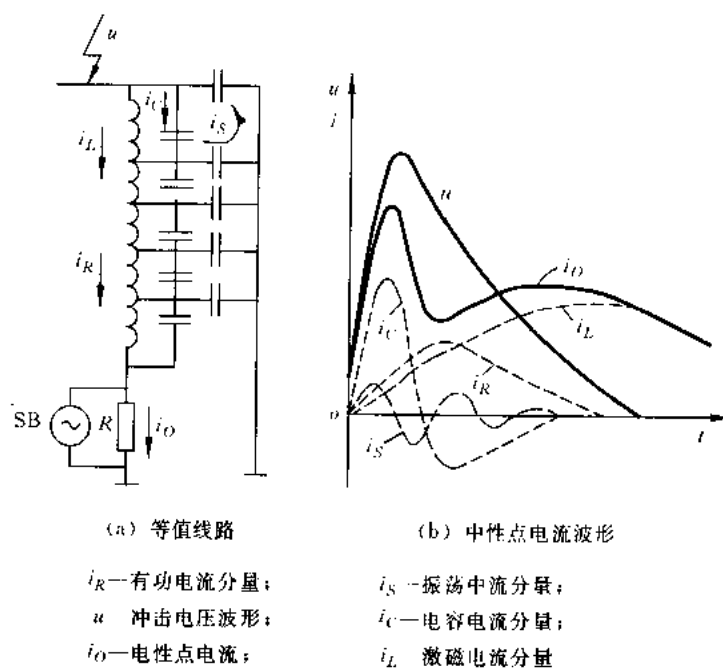


图 3.5.10 变压器绕组的等值电路和中性点电流的波形

表 3.5.1 正常产品的示伤波形(以 SJ<sub>1</sub>-30/10 为例)

| 波 形 | 被试相  | 电压<br>/kV | 示 伤 波 形 |         | 说 明 |
|-----|------|-----------|---------|---------|-----|
|     |      |           | 中性点电流法  | 电容传递电流法 |     |
| 全波  | A    | 50        |         |         | 正常  |
|     |      | 80        |         |         |     |
| 截波  | A    | 50        |         |         | 正常  |
|     |      | 90        |         |         |     |
| 全波  | 三相入波 | 50        |         |         | 正常  |
|     |      | 75        |         |         |     |

表 3.5.2 全波下有故障产品的示伤波形

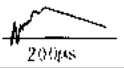
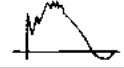
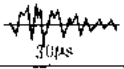
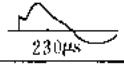
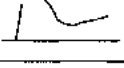
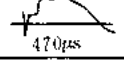
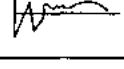
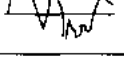
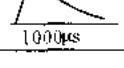
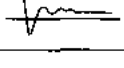
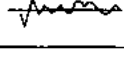
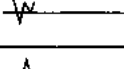
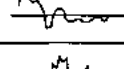
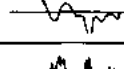
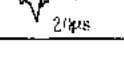
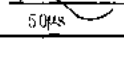
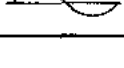
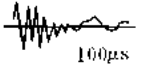
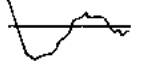
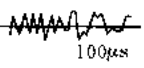
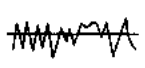
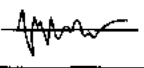
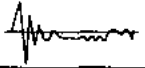
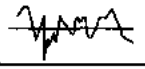
| 产 品                        | 示 伤 方 法      | 示 伤 波 形                                                                             |                                                                                      | 故 障 说 明                |
|----------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
|                            |              | 低电压下<br>(正常)                                                                        | 试验电压下<br>(有故障)                                                                       |                        |
| SFSZ 20000/110             | 中性点电流法       |    |    | 调压绕组击穿(波形幅值显著增大, 周期变小) |
|                            | 电容传递电流法      |    |    |                        |
| SJ-320/10                  | 中性点电流法       |    |    | 多层击穿                   |
| SJ-320/35                  | 中性点电流法       |    |    | 高压绕组对低压、铁心放电           |
| SJ-1000/35                 | 电容传递电流法      |    |    | 分接开关对地放电               |
| DJ-25/13.2                 | 中性点电流法       |    |    | 高压引线对低压引线击穿            |
|                            | 电容传递电流法      |   |   |                        |
| SJ-30/10                   | 中性点电流法(三相入波) |  |  | 高压引线对铁心螺钉放电            |
| 330kV自耦变<br>压器中压绕组<br>(模型) | 电容传递电流法      |  |  | 主绝缘放电, 但尚未完全<br>对地击穿   |
|                            | 电压波形法        |  |  |                        |

表 3.5.3 截波下有故障产品的示伤波形

| 产 品          | 示 伤 方 法 | 示 伤 波 形                                                                             |                                                                                      | 故 障 说 明   |
|--------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|              |         | 低电压下<br>(正常)                                                                        | 试验电压下<br>(有故障)                                                                       |           |
| SJ-320/35    | 中性点电流法  |  |  | 多层纵绝缘击穿   |
| SJ-1000/35   | 中性点电流法  |  |  | 多段纵绝缘击穿   |
| SJ-320/35    | 电容传递电流法 |  |  | 层绝缘击穿     |
| SLJ-5600/110 | 电容传递电流法 |  |  | 高压引线对油箱放电 |

### 3.6 冲击电流试验与测量

随着高新技术的发展,冲击电流技术在电工、核物理、加速器、激光等部门得到了越来越广泛的应用,如电力系统中的阀型避雷器、氧化锌避雷器等,都要进行冲击电流的试验。大量实测天然雷电表明,雷电波是一波头时间为  $0.5\mu\text{s}\sim 10\mu\text{s}$ ,波长时间为  $20\mu\text{s}\sim 90\mu\text{s}$  的具有统计性的单极性的脉冲电流波,由于冲击电流的作用,将导致建筑物损坏,人、牲畜死亡,也能使输电线路、接地杆塔等产生很高的过电压,使电力线路、通讯系统的绝缘造成很大的危害,因此,除对一些电力设备绝缘要进行冲击电压试验以外,还应进行冲击电流的试验,以考验电力设备通过冲击电流时造成的力和热的承受能力。根据雷电波的情况,我国国家标准 GB311/83 规定了冲击电流的试验波形为  $\pm 4/10\mu\text{s}$ ,  $\pm 8/20\mu\text{s}$ ,方波波形的持续时间为  $500\mu\text{s}$ ,  $1\,000\mu\text{s}$ ,  $2\,000\mu\text{s}$  或在  $2\,000\mu\text{s}\sim 3\,200\mu\text{s}$  之间,其幅值可达几千安培,几百千安培,甚至几百万安培以上。

#### 3.6.1 冲击电流的产生

冲击电流是靠脉冲电容器放电来产生的,其原理线路如图 3.6.1 所示。当主电容器  $C$  充满了电压  $U$  以后,从触发系统来的脉冲波将使开关  $G$  接通,因此,主电容器  $C$  将通过试品  $F$  放电,实质上是一  $R, L, C$  的放电回路(放电回路中,还有  $R, L$ )。所以,波形的调节是靠改变放电回路参数(改变  $R, L$  或  $C$ ),冲击电流的幅值是靠改变充电电压来调整的。

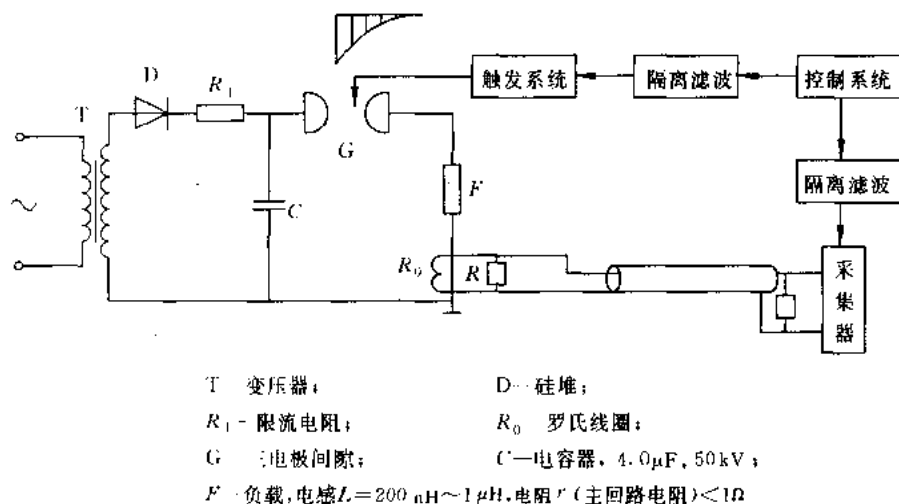


图 3.6.1 冲击电流试验原理线路图

当回路中的电阻  $r$  大于、小于或等于回路中的  $\sqrt{\frac{L}{C}}$  时,冲击电流的波形可能会出现振荡、非振荡的衰减波形,冲击电流的幅值可用下式表示

$$I_m = U\sqrt{\frac{C}{L}}f(\alpha) \quad \alpha = \frac{r}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$$

式中  $U$ ——主电容  $C$  的充电电压;

$C$ ——主电容量;

$L$ ——回路电感。

$f(\alpha)$ 可由以下情况确定

- ① 当回路电阻  $r=0$  时,  $f(\alpha)=1$ ,  $I_m=U\sqrt{\frac{C}{L}}$ ;
- ② 当不外加阻尼电阻, 但  $r>0$ ,  $\alpha<1$  时,  $f(\alpha)=0.85\sim 0.95$ ;
- ③ 当  $\alpha=1$ ,  $f(\alpha)=0.368$ ;
- ④ 当  $\alpha<1$ , 则  $f(\alpha)$ 将更小。

从公式  $I_m=U\sqrt{\frac{C}{L}}f(\alpha)$ 可知, 冲击电流的幅值  $I_m$  与电容  $C$  的充电电压  $U$ 、主电容  $C$

及回路电阻  $r$ 、电感  $L$  有关。当  $U, C$  为定值时, 回路电感越小, 冲击电流幅值越大, 所以, 为了获得大的冲击电流, 应尽可能减少回路电感。减少电感可通过尽量缩短线路的连线, 另外还应选择内电感小的脉冲电容器作为主电容。

图 3.6.1 中触发系统的具体线路如图 3.6.2 所示, 它是由 ZQM—400/16 型闸流管为主要元件组成的触发电路, 当控制系统输入—250V 低压触发脉冲给 ZQM—400/16 型闸流管的栅极时, 闸流管导通, 充电电压 10kV, 电容为  $0.047\mu\text{F}$  的电容器将向  $1\text{k}\Omega$  电阻放电, 从而将通过电缆输出一负 10kV, 脉冲前沿达 60ns, 脉宽可达几十  $\mu\text{s}$  的负脉冲电压去启动开关 G (图 3.6.1 中所示), 从而使主电容  $C$  放电, 而获得冲击电流。触发装置在实际运行中应注意, ZQM—400/16 型高压闸流管应先预热 5 分钟, 方可给予高压, 断电源时, 应先断开高压电路后, 方可去掉灯丝。

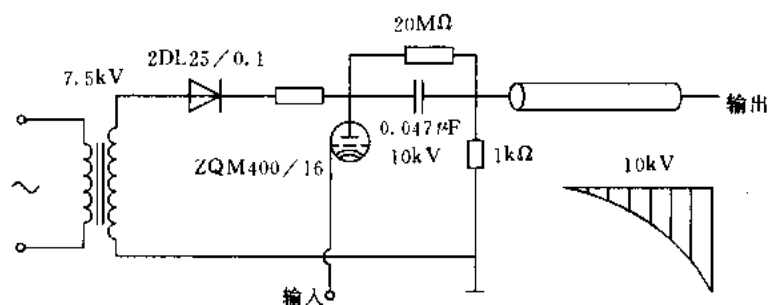
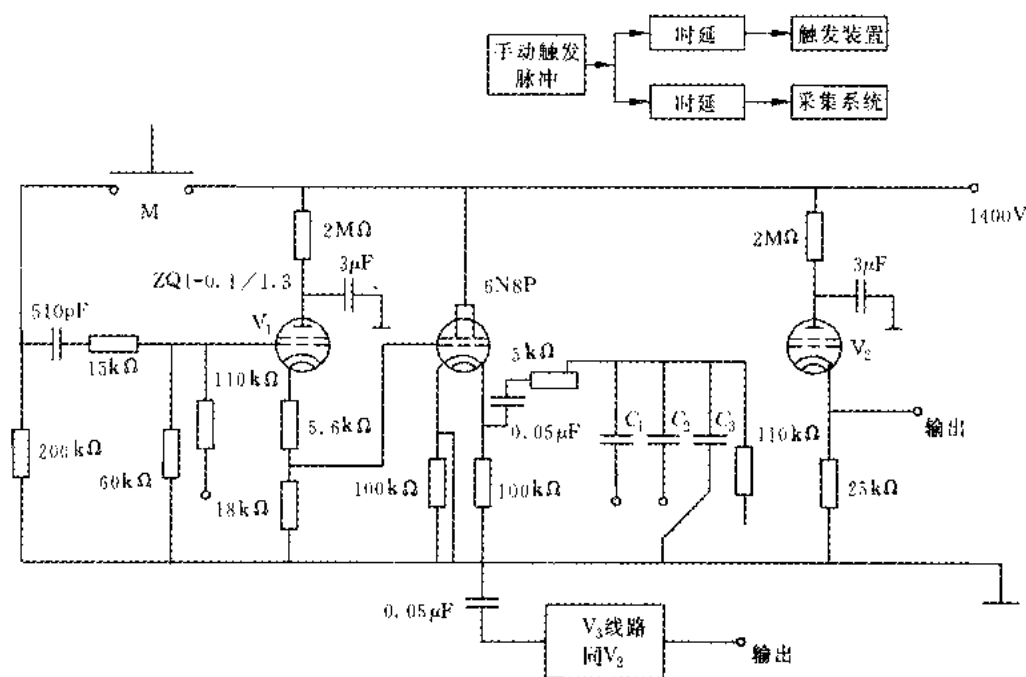


图 3.6.2 触发装置电路图

图 3.6.1 中的控制系统图如图 3.6.3 所示, 控制系统是由几个电子管的电路组成的, 该电路可实现手动和他控的目的。当用手动时, 可将按钮  $M$  按下, 闸流管  $V_1$  的栅极将输入一信号,  $V_1$  导通,  $18\text{k}\Omega$  的电阻上将输出信号 5N8P 双二极管动作, 可在两个  $100\text{k}\Omega$  电阻上输出两路信号, 去启动  $V_2$  和  $V_3$  两闸流管, 可得到输出 I 和输出 II 两个信号, 一路去触发图 3.6.2 的触发装置的闸流管, 另一路去触发数据采集系统, 以记录冲击电流的波形。为了使主电路的启动和测量系统的同步, 控制系统还设有延时调节电路, 延时的调节是靠  $V_2$  闸流管栅极的 RC 电路实现的。其参数为:  $R=5\text{k}\Omega$ ,  $C_1=5\ 100\text{pF}$ ,  $C_3=0.02\mu\text{F}$ 。

控制系统也可采用他控的方式, 当  $V_1$  闸流管的栅极接收到触发信号时, 亦可达到如



3.6.3 控制系统原理图

前所述的人控的效果。控制系统所用的电子管  $V_1, V_2, V_3$  为 ZQ1—0.1/0.3 型氢闸流管,6N8P 为双三极管。

### 3.6.2 冲击电流的测量

冲击电流的测量方法有分流器法和变流器(罗哥夫斯基线圈)法。根据国家标准 GB311/83 的规定,对冲击电流的测量应满足波形和幅值准确度的要求,具体要求为

- ① 标准冲击电流峰值的测量误差不大于 3%。
- ② 冲击电流波形时间参数的测量误差不大于 10%
- ③ 能够检测叠加于冲击电流波形上的振荡。

所谓分流器法,即采用分流器接示波器或峰值电压表法。变流器法即用变流线圈(罗哥夫斯基线圈)经积分器接示波器或峰值电压表的方法。

对测量系统的要求,分流器的电阻值或电流互感器的变比应稳定,其误差不大于 1%,系统的响应时间应满足表 3.6.1 的要求,响应的半峰值时间远比被测冲击电流波的波前时间和半峰值时间长得多。

表 3.6.1 对测量系统方波响应的要求

| 被测冲击电流 | 要 求                   |
|--------|-----------------------|
| 8/20μs | $[T]^* \leq 1.6\mu s$ |
| 4/10μs | $[T]^* \leq 0.8\mu s$ |

\*  $T$ ——方波响应时间

### 1. 分流器测量系统

分流器测量系统可由分流器接示波器或峰值电压表进行,具体接线如图 3.6.4 所示。

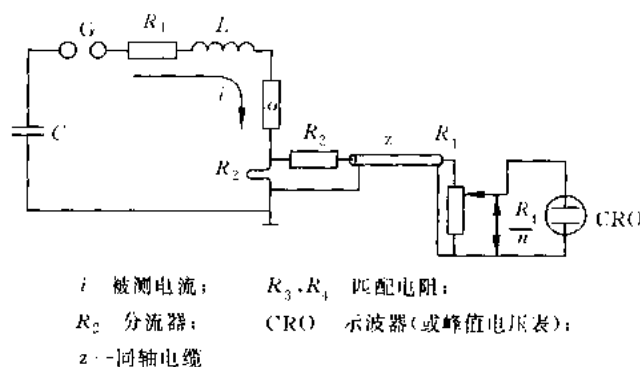


图 3.6.4 分流器测量系统

### 2. 变流线圈(罗哥夫斯基线圈)经积分器接示波器或峰值电压表

具体接线如图 3.6.5 所示,这是一种 RC 积分器的测量电路,为 RL 自积分式的测量电路。变流线圈的具体结构可见图 3.6.6 所示。

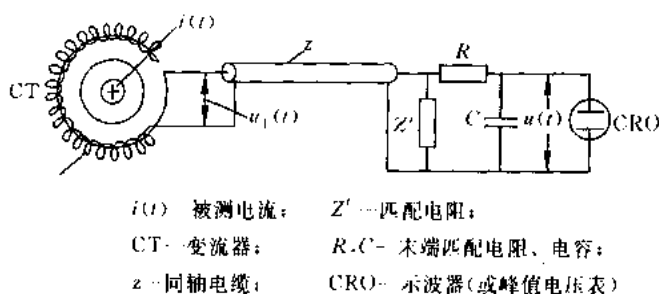


图 3.6.5 变流线圈 - 示波器测量系统

按图 3.6.1 所示的测量电路,变流线圈的输出电压和主放电回路的放电电流有如下的关系

$$V = RI/N$$

其中  $I$  ——主电路放电电流;

$V$  ——变流线圈输出电压;

$R$  ——变流线圈积分电阻;

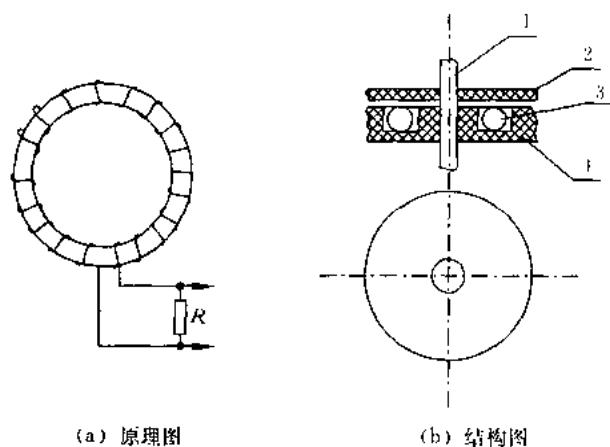
$N$  ——变流线圈匝数。

实际使用时可采用以下参数的变流线圈,即

$$N=325 \text{ 匝}, R=0.042 \Omega.$$

### 3. 高速数据采集系统

从分流器或变流线圈得到的冲击电流信号,可采用高速数据采集系统进行模数转换。



1 导线; 2 绝缘板; 3 低压线圈; 4 屏蔽盒

图 3.6.6 变流线圈(罗氏线圈)原理图

然后用计算机对数据进行处理、计算、存储显示、打印等。

数据采集系统的框图如图 3.6.7 所示。

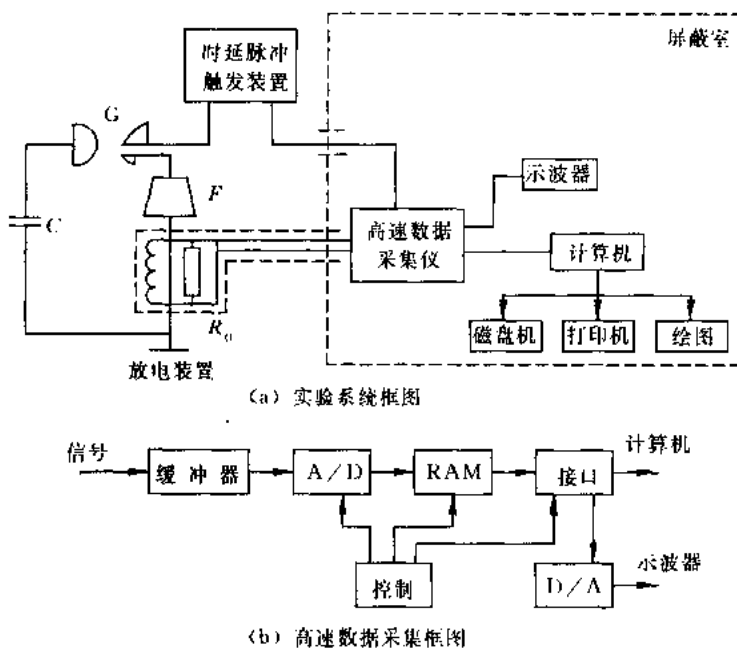


图 3.6.7 数据采集系统框图

### 3.6.3 冲击电流的试验

冲击电流的试验方法有多种,下面仅以交流无间隙金属氧化物避雷器的试验作一简单叙述。

表 3.6.2 电站和配电避雷器最大残压值

[illegible]

根据我国国家标准 GB11032—89 的规定,交流无间隙金属氧化物避雷器的冲击电流部分试验方法包括避雷器的残压试验和电流冲击耐受试验。

### 1. 避雷器的残压试验

残压是金属氧化物避雷器的一种非线性的保护特性,其伏安特性曲线如图 3.6.8 所示,当大的冲击电流流过避雷器时,电压是一较平的曲线,当电压较高时,通过避雷器的电流将很大。用数学式表示为

$$U = KI^\alpha$$

式中  $U$ ——避雷器残压;

$K$ ——常数;

$I$ ——电流;

$\alpha$ ——非线性系数,0.015~0.05。

金属氧化物避雷器的残压试验有四种试验

方法

① 陡波冲击电流下的残压。所谓陡波冲击电流,就是具有视在波前时间为  $1\mu\text{s}$  的冲击电流。

② 雷电冲击电流下的残压。所谓雷电冲击电流,就是一种  $8/20\mu\text{s}$  波形冲击电流,因设备调整的限制,视在波前时间的实测值为  $7\mu\text{s}\sim 9\mu\text{s}$ ,波尾视在半峰值时间为  $18\mu\text{s}\sim 22\mu\text{s}$ 。

③ 操作冲击电流下的残压。所谓操作冲击电流,就是视在波前时间大于  $30\mu\text{s}$  而小于  $100\mu\text{s}$ ,视在半峰值时间约为视在波前时间两倍的冲击电流。

④ 直流 1mA 参数电压。在直流参数电流为 1mA 时避雷器上的电压。

对于电站用的金属氧化物避雷器的残压试验标准见表 3.6.2 所示。

### 2. 避雷器电流冲击耐受试验

避雷器应分别承受表 3.6.3 规定的长持续时间电流(方波或线路放电电流)冲击 18 次而不击穿、不闪络、不损坏,且试验前后标称放电电流下的残压变化应不超过 5%。

### 3. 具体试验方法

根据 GB11032—89 的要求,具体试验方法如下。

#### (1) 直流参数电压试验(非冲击电流试验)

对避雷器(或避雷器元件)施加一直流电压。当通过试品的电流值等于 1mA 时,测得试品上的直流电压值。如参考电压与极性有关时,取低值。

直流电压脉动部分应不超过  $\pm 1.5\%$ 。

试验环境度为  $25^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ 。

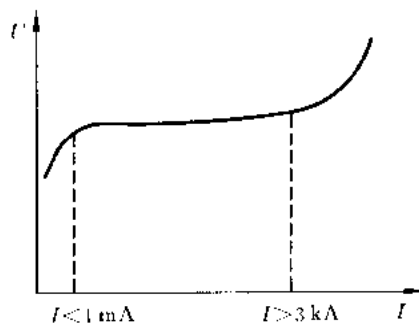


图 3.6.8 金属氧化物避雷器  
伏安特性曲线

表 3.6.3 避雷器的电流冲击耐受试验要求

| 避雷器类别    |                | 避雷器额定电压<br>有效值/kV        | 长持续时间              | 电流冲击                         |
|----------|----------------|--------------------------|--------------------|------------------------------|
|          |                |                          | 线路放电试验             | 2 000 $\mu$ s 方波<br>电流, A 峰值 |
| 20kA 等级  | 电站避雷器          | 396~468                  | 6.6.3 条            |                              |
| 10kA 等级  | 电站避雷器          | 100,200<br>288~468       | 6.6.3 条<br>6.6.3 条 |                              |
| 5kA 等级   | 电站避雷器          | 100,200<br>3.8~69<br>126 | 6.6.3 条            | 150<br>600                   |
|          | 并联补偿电<br>容器避雷器 | 3.8~69                   |                    | 400 <sup>1)</sup>            |
|          | 电气化铁道避雷器       | 42~84                    |                    | 400                          |
|          | 配电避雷器          | 3.8~12.7                 |                    | 75                           |
| 2.5kA 等级 | 电动机避雷器         | 3.8~12.7                 |                    | 200                          |
|          | 发电机避雷器         | 3.8~19                   |                    | 200                          |
| 1.5kA 等级 | 低压避雷器          | 0.280~0.500              |                    | 50                           |
| 1kA 等级   | 中性点避雷器         | 2.3~7.6<br>60~210        |                    | 200<br>400                   |

注:如有更高要求时,由供需双方协商。

## (2) 残压试验

以雷电冲击残压试验为例。

① 按图 3.6.1 接线。将信号电缆接入高速数据采集系统,将触发电缆经衰减器后接入采集器 A/D 的触发信号插座,并选择合适的通道和采样速度。

② 打开稳压器,并做好试验和测量的准备工作,如打开计算机显示器、打印机、示波器、数据采集系统开关及装好软件等。

③ 将延时信号输入示波器,观察各部同步状况。

④ 给冲击电流装置负充电,记下充电电压,给数据采集系统清零。准备结束,向冲击电流装置发出脉冲信号,对试品进行冲击电流调波试验。此时,高速数据采集器记录冲击电流波形,示波器亦能观测到冲击电流波形。

具体操作可见图 3.6.9 程序流程图。

⑤ 根据波形情况,调节调波电感和电阻使波形符合 GB110302—89 的规定。

⑥ 继续发出触发脉冲,对试品进行冲击试验。按 GB110302—89 的规定,形式试验应在 3 只避雷器或其比例单元上进行。试品应符合有关规定。两次测量之间的时间间隔,应足以使试品恢复到接近环境温度。试验环境温度为  $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 。如果避雷器额定电压高于 3kV 时,比例单元的额定电压可取 3kV~6kV。

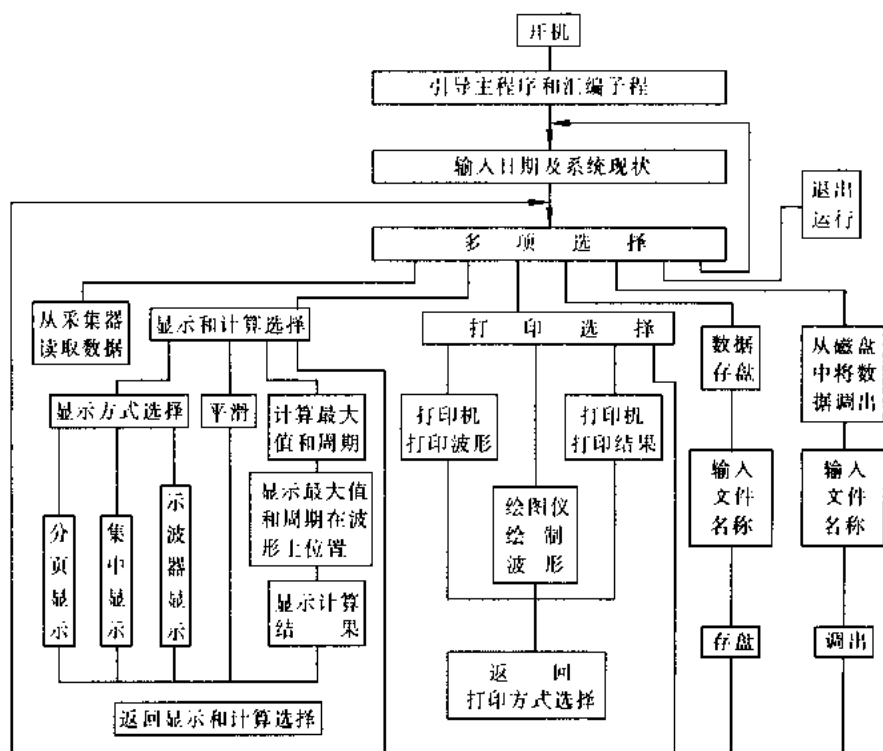


图 3.6.9 程序流程图

出厂试验允许对每片电阻片进行标称放电电流(偏差 $\pm 5\%$ )下残压试验,避雷器的残压为每片电阻片残压的算术和。

分压器、分流器的要求应符合 GB311.4 的要求。

⑦ 根据测量的残压值,与表 3.6.1 中的数据比较,残压值不得超过该表的规定。

⑧ 当进行避雷器电流冲击耐受试验时,避雷器应能承受表 3.6.2 中规定的方波电流冲击 18 次而不击穿、不闪络、不损坏,且试验前后标称放电电流下的残压变化应不超过 5%。

## 第 4 章

# 电气设备绝缘的在线状态监测

随着电力工业的发展,对电气设备绝缘在线状态的监测显得越来越重要了。

多年来,我国对电气设备的损坏作了一些统计,发现电气设备的损坏,大部分是由于绝缘的损坏而造成的。如 110kV 以上的电力变压器 93 次事故分析,绝缘事故占 80% 以上,其绝缘损坏情况如表 4.0.1 所示。由于这些设备绝缘的损坏大都是突发损坏的,因此,及时了解电力设备的绝缘状态非常重要。多年来,电力设备绝缘监督的工作者不仅对电力设备进行定期的离线测试,如前面所介绍的绝缘电阻、泄漏电流、介质损耗因数 ( $\tan\delta$ ) 的测量,绝缘油的试验等,也对电力设备的绝缘进行了实时检测,即在线状态监测。

表 4.0.1 变压器事故部位分析表

| 事故部位   | 事故数量 |        |
|--------|------|--------|
|        | 占次   | 占百分率/% |
| 匝绝缘    | 40   | 43.0   |
| 主绝缘及引线 | 21   | 22.6   |
| 套 管    | 14   | 15.0   |
| 交接开关   | 13   | 14.0   |
| 铁 心    | 5    | 5.4    |
| 总 共    | 93   | 100.0  |

离线测量法对电工设备制造部门,电力系统的电力设备的计划性试验来说,是必不可少的,对研究性的试验更是非常重要的。

对电力系统中运行的设备来说,为了及时了解电力设备绝缘的状态,在线状态监测有着它独特的优点,其特点有以下几点。

### 1. 及时反映电力设备的绝缘状态

所谓在线状态监测,就是电力设备在运行中能随时反映其绝缘状态的监督方法,所以能及时了解电力设备的绝缘状态。这对离线测试来说是无法做到的,因为离线测试是每年或 2~3 年定期对电力设备进行测试。但这对在运行中的故障前兆无法测到。如有一

台 220kV 的电力变压器,1982 年进行了大修,大修后一直正常,在 1991 年底,突然爆炸起火而烧毁,这就是没有进行在线状态监测的结果。假若实现在线状态监测的话,就能及时了解绝缘的状态,发现故障,以杜绝突发事件的发生,减少损失。

## 2. 无需停电,减少了损失

由于计划性试验周期为每年或每 2~3 年,在试验时间内,要将电力设备从系统中解列,所有的用户要停止供电或用另外的电源供电,将会造成不少的损失。

另外,有时电力设备的绝缘完全正常,离线试验意义不大。有时,还会由于试验人员素质不高或试验仪器的设备的故障而造成电力设备出现问题。

而在线状态监测完全可以避免上述问题,因为它无需停电,它是在电力设备运行中观测电力设备的绝缘状态。假若设备绝缘正常,则无需解列进行常规试验,故减少了损失,而人为的错误更不可能发生。

## 3. 在线状态监测更加切合运行条件

对离线测试来说,必须脱离运行条件,因此,脱离了负载对电力设备的影响,如热、电动力、机械力等,也无电力线路中的过电压的作用,所以与运行条件有些差别。另外,离线测试中,有些试验的试验电压也低,如介质损耗因数( $\tan\delta$ )的测量,一般试验电压为 10kV,有时也很难发现绝缘的故障。

对在线状态监测来说,情况就不一样了,由于电力设备完全处在运行的情况,所以,各种因素都能反映出来,更加切合运行条件。

下面介绍几种在线状态监测的方法,目前在电力系统中用得较多的方法有:对电气设备绝缘的温度测量(如热像仪),对绝缘油进行溶解气体的色谱分析,局部放电量及放电部位的测试和介质损耗因数( $\tan\delta$ )及泄漏电流的测试等。

# 4.1 绝缘各部分温度的测量

电气设备绝缘的损坏有多种因素,温度也是因素之一。温度升高,将会引起绝缘老化,直至绝缘损坏。在研究固体电解质的击穿理论中,就有电击穿、热击穿和电化学击穿的理论。所以,准确测量绝缘在运行中的温度是非常重要的。

测量绝缘温度可用温度计测量、热电偶测量,现在也有用热像仪测量法的。温度计测量法在电力变压器中也常采用,但使用不很方便。热电偶法也是方法之一,但优点也不突出。热像仪测量温度是在线状态监测的一种好方法,本节将作一简单介绍。

热像仪是利用红外线的原理进行测试的。在自然界,任何高于绝对零度的物体,不管其形状、色泽和温度如何,都会辐射出热能,即热辐射。红外技术就是利用红外线的原理的一门新兴技术,它在工业、农业、科技及国防方面得到广泛应用,20 世纪 60 年代以来,对运行中的设备进行测温、探伤、检漏和气体分析等监测技术得到很大的发展,已成为诊断设备内部缺陷和异常的重要手段。

所谓红外技术,就是研究一种波长为  $0.75\mu\text{m}\sim 1\,000\mu\text{m}$  的光波的技术。一般自然光

(太阳发出的光)为白色,实际上它是由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种光带组成的,各种光带各有自己的频率和波长,光波最长的是红光,最短的是紫光。另外,在紫光以外的光人们称为紫外线,其波长更短;而比红光光波更长的光称为红外线,红外线还可分为近红外、中红外和远红外。与我们通常见到的光一样,红外线亦会产生直射、折射和反射。

由于各种物体能产生热辐射,人们可将辐射的红外线接收,就可测量温度了。由于空气中有些物质能吸收红外辐射波,如水蒸气、二氧化碳等。为此,人们选用水蒸气等吸收率小的波段来接收红外线,一般为 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 或 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ ,称红外窗口。

热像仪的原理图如图 4.1.1 所示。其原理是通过光学系统把被测目标的红外辐射图像聚集和调制到一个热释电靶面上成像,靶面上吸收强弱不同的红外辐射能产生温差,热释电产生不同的表面电荷,在扫描电子枪的作用下产生视频信号输出,再经放大处理即可在显像管上显示出目标热像。

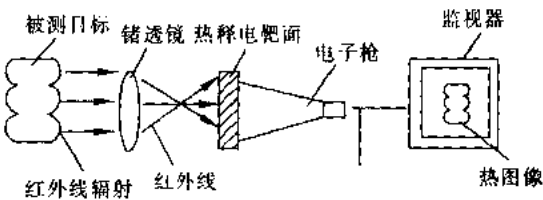


图 4.1.1 红外热像仪原理器

热像仪用来作状态监测是一种很好的方法,目前使用的热像仪也有多种,上面介绍的热像仪是其中的一种——热电视。用热电视可以测到各部分绝缘的温度,当发现某部分温度超过绝缘允许温度时,可采取适当措施对电气设备进行检修。

对于不同的绝缘,其工作温度是有一定的限度的,下面将不同的材料属于何种等级以及工作温度的情况列于表 4.1.1。

表 4.1.1 电工绝缘材料的耐热等级

| 级别 | 最高持续工作温度/℃ | 材 料 举 例                                                           |
|----|------------|-------------------------------------------------------------------|
| Y  | 90         | 未浸渍过的木材、棉纱、天然丝和纸等材料或其组合物、聚乙烯、聚氯乙烯、天然橡胶                            |
| A  | 105        | 矿物油及浸入其中的 Y 级材料,如油性漆、油性树脂漆及其漆包线                                   |
| E  | 120        | 由酚醛树脂、糠醛树脂、三聚氰胺甲醛树脂制成的塑料、胶纸板、胶布板、聚酯薄膜及聚酯纤维、环氧树脂聚胺脂及其漆包线、油改性三聚氰胺漆  |
| B  | 130        | 以合适的树脂或沥青浸渍、粘合或涂覆过的或用有机补强材料加工过的云母、玻璃纤维、石棉等的制品、聚酯漆及其漆包线、使用无机填充料的塑料 |
| F  | 155        | 用耐热有机树脂或漆所粘合或浸渍的无机物(云母、石棉、玻璃纤维及其制品)                               |

续表

| 级别 | 最高持续工作温度/℃ | 材料举例                                                          |
|----|------------|---------------------------------------------------------------|
| H  | 180        | 硅有机树脂、硅有机漆及其粘合或浸渍过的无机材料、硅有机橡胶                                 |
| C  | >180       | 不采用任何有机粘合剂式浸渍剂的无机物,如云母、石英、石板、陶瓷、玻璃纤维、石棉水泥制品、玻璃、云母模压品及聚四氟乙烯塑料等 |

## 4.2 绝缘油溶解气体的色谱分析

在 2.4 节中曾对变压器油的气相色谱分析的试验进行了介绍,气相色谱分析能很好地反映变压器内部绝缘的状态。目前,我国用溶解于变压器油中气体的气相色谱法来检测大型变压器的绝缘状态,其效果良好。

气相色谱用于状态监测的方法很多,如直接注入法、渗透膜脱气法等。本节仅对渗透膜脱气法作一简单介绍。

渗透膜脱气法的简图如图 4.2.1 所示。其原理是利用高分子膜透气的性能,使气体直接从油中分离出来,然后用仪器在一定的时间内,测量气体的浓度。

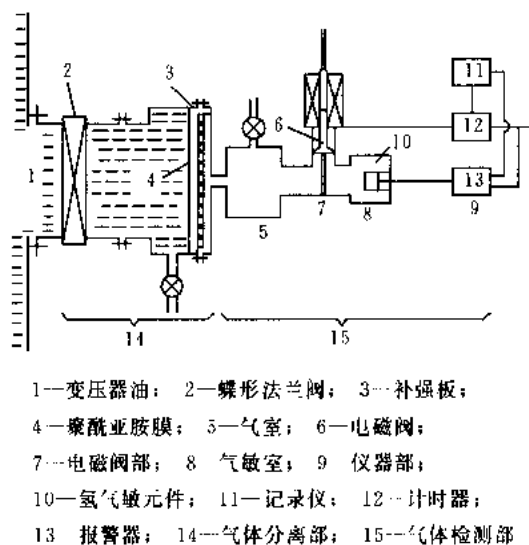


图 4.2.1 变压器油中氢气在线监测装置简图

我国目前用气相色谱法测量变压器油内的氢气和总烃,当这两种气体超标时,就应对变压器进行检修。

## 4.3 绝缘内部局部放电的在线状态监测

电气设备运行时,由于高电压、热、力的作用,设备内部的绝缘将会分解出一部分气

体,加上原来存在于绝缘内部的气体而引起局部放电,虽然局部放电量不大,但随着时间的延长,可能会引起设备绝缘的损坏,人们将此种引起绝缘损坏的形式称为电化学击穿。因此,实时检测设备内部绝缘的局部放电量的大小是非常重要的。

由于绝缘内部产生局部放电时,伴随有脉冲放电、光、声、温升等现象,所以,测量局部放电的方法也有多种,一般说来,要测得绝缘内部的局部放电可参考图 4.3.1 来进行。

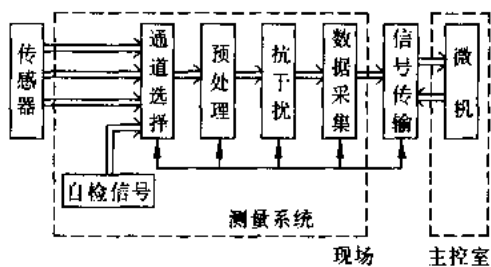


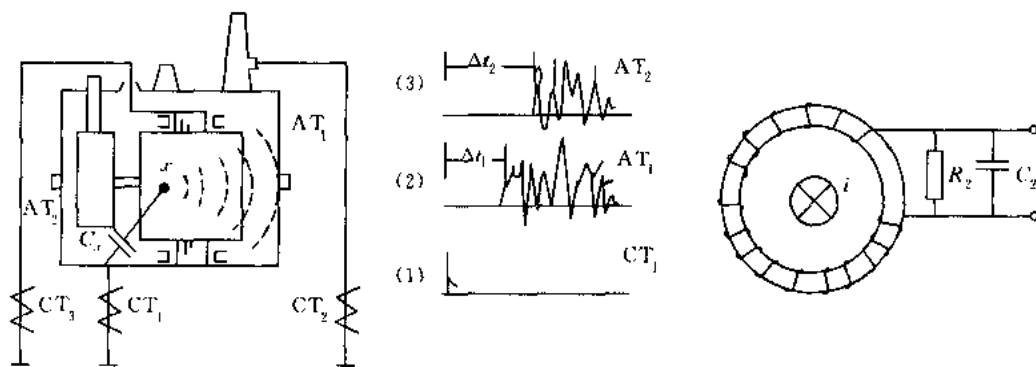
图 4.3.1 变压器局部放电在线检测方框图

对于局部放电所用的传感器,一般可根据传感器的性质来分,用得较多的有两种。

### 1. 脉冲电流传感器

大量试验研究表明,局部放电是一种不同于工频脉冲频率的放电波,其最高频率在 500kHz 以下,带宽约在几十 kHz。

脉冲电流法一般用脉冲电流互感器取得信号,具体接线如图 4.3.2(a)所示。 $CT_1$  为外壳对地的电流互感器, $CT_2$  为电容式套管末屏对地的电流互感器, $CT_3$  为铁芯对地的电流互感器。电流互感器的具体结构如图 4.3.2(b)所示。



(a) 电流传感器和声发射传感器安装示意图

(b) CT 电流互感器原理图

$x$  局部放电位置;  $CT_1, CT_2, CT_3$  分别为外壳、

套管末屏、铁心接地线的电流传感器;

$AT_1, AT_2$  声发射传感器;

(1) 局部放电的电信号; (2)(3) 局部放电的声信号;

$\Delta t$  一声信号的时延

$i$ —电流;  $R_2$ —阻尼电阻;

$C_2$ —谐振电容

图 4.3.2 脉冲电流测量局部放电法

对电流互感器有些特殊的要求,主要是要求互感器有较强的抗磁饱和的能力,且又能检测出局部放电的信号,互感器的导磁体可用铁氧体,也可用非磁性的塑料。经脉冲鉴别系统测得的局部放电波形如图 4.3.3 所示。

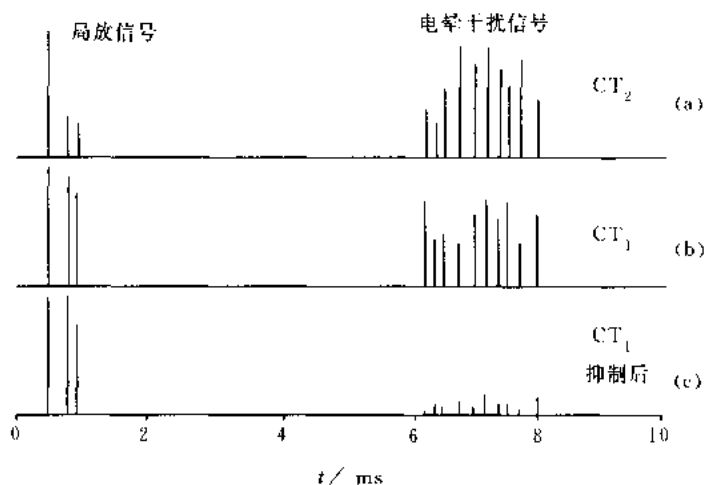


图 4.3.3 脉冲鉴别系统在线监测中测得的信号

## 2. 声测法传感器

图 4.3.2(a)中除表示了脉冲电流传感器外,还标明了声测法的  $AT_1$ 、 $AT_2$  的探头,当变压器内部产生局部放电时,将会产生放电的声效应,其声波可用钛酸钡、钛酸脂、锆酸铝制成的压电晶体的传感器,将声压信号变成电信号,再经信号处理可得到局部放电的信号。

据有关资料介绍,声波的峰值频率在  $30\text{kHz}\sim 160\text{kHz}$  之间,而一般变压器铁心的振动噪声频率在  $15\text{kHz}$  以下,因此,可从频谱上分辨出局部放电的信号。

在用声测法测量绝缘内部局部放电时,由于电气设备内部的液体、固体介质、金属外壳的声反射,传感器接收到的信号较微弱,给信号处理工作带来很大的困难。假若能将压电晶体的探头置于电气设备(如电力变压器)的外壳内,则可以大大减小金属外壳的反射,从而可得到较大的局部放电的声信号,使局部放电的测量更准确一些。

## 4.4 绝缘介质的介质损耗因数( $\tan\delta$ )与泄漏电流的在线状态监测

在绝缘试验中,介质损耗因数( $\tan\delta$ )的试验是一项很重要的试验方法。为了了解绝缘在运行状态时的情况,也可对其介质损耗因数进行在线状态监测。介质损耗因数可用电桥法、数字法进行检测。

### 1. 电桥法

与前面离线测量介质损耗因数的情况相似,在线状态监测亦是用西林电桥进行测试。只是在线状态监测时,电气设备运行电压高,如 110kV,220kV,330kV,500kV 等,所以比离线测试时的电压(10kV)高多了。为了对电气设备在运行电压下测量其绝缘的介质损耗因数( $\tan\delta$ ),可采用图 4.4.1 所示的原理线路。从图中可看出如何计算绝缘介质的损耗因数。当电桥平衡时,即有

$$\tan\delta = \omega C_4 R_4$$

$$C_x = k C_0 \frac{R_4}{R_3}$$

式中  $C_0, C_4, R_4, R_3$  为电桥平衡各部件的数值;

$k$  为与互感器 PT 的变比有关的系数。

测试时,当电气设备绝缘正常时,先调节电桥平衡,然后将  $R_3$  固定,仅调节  $C_4$  即可观测到绝缘介质  $\tan\delta$  的变化。当  $\tan\delta$  超过规定值时,应对电气设备进行检修。

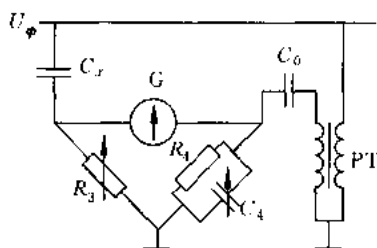


图 4.4.1 电桥法监测介质损耗因数( $\tan\delta$ )原理电路图

### 2. 数字测量法

为测量绝缘介质的介质损耗因数( $\tan\delta$ ),也可用数字测量法,当工作电压施于电气设备绝缘时,用电阻取样可得到  $U_x$ ,另外电压也施加于标准电容  $C_0$  上,从电容  $C_0$  串联电路的电阻上取样,亦可得到  $\dot{U}_0$  的信号,  $u'_x$  和  $u'_0$  两个信号的相位差即为绝缘介质的损耗角。

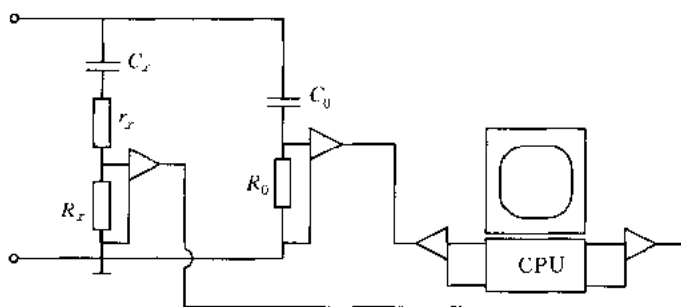


图 4.4.2 数字测量法原理图

具体接线图如图 4.4.2 所示,  $u'_x$  和  $u'_0$  的波形图如图 4.4.3 所示 ( $U_x$  和  $U_0$  可从示波器上观察到)。

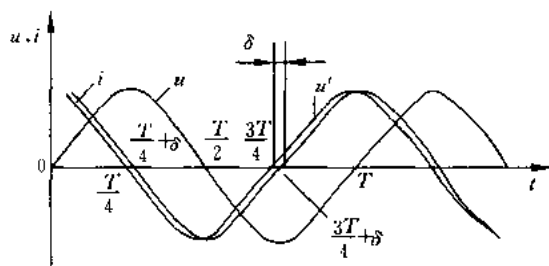


图 4.4.3 电压电流波形图

为了得出  $u'_x$  与  $u'_0$  两波形的相位差, 可将信号经波形电路得出的方波信号输入计数装置来控制计数间隔。计数脉冲由时钟电路发出, 计数脉冲产生的误差可控制在 0.075s 以内, 对  $\tan\delta$  的影响可控制在 0.2‰ 以下, 直接从图形中量出两个波形相位角的差值, 即可换算成  $\tan\delta$ 。

## 第 5 章

# 土壤电阻率的测量

### 5.1 概述

电阻率是物质的基本属性。任何一种物质的电阻率可以定义为该物质单位体积相对两面间以欧姆为单位的电阻。电阻率与电阻和横截面面积成正比,与长度成反比。作为物质基本特性的电阻率与体积无关,电阻率的单位为  $\Omega \cdot \text{m}$ 。因此测量自然状态下土壤及岩石的电阻率,有可能区分一种地下物质与其他地下物质,而不必进行钻探和开掘。

电阻率测量在电力系统、基础设计、建筑工地选址、地质勘测、地下水研究、采矿、石油、热能及考古等方面得到了广泛的应用。人们利用电阻率探测地下几米的浅层至几千米的深层的地下物质及地质结构。电阻率能够区分地下物质的种类,确定覆盖层的构成及基岩深度,确定砂、砾石、金属沉积物及地下水层的厚度与深度,探测断层带,确定不同大地地质间的陡斜接触,扩充和完善钻井程序和地震测量。

我们在进行发变电站地网或输电线路杆塔接地装置的设计之前,必须了解地网或杆塔接地装置所处的土壤的电阻率及大地的结构,这样我们才能根据电阻率及土壤结构的情况以及对发变电站地网及杆塔接地装置接地电阻的要求正确进行接地装置的设计。另外我们也可以根据电阻率及地质结构来计算接地装置的接地电阻、跨步电压和接触电压,进行接地装置的安全设计。因此,为了让设计的接地装置更符合实际要求,必须进行土壤电阻率的测量。

在实际中很少有均匀的土壤,我们一般测量得到的是土壤的等值电阻率或土壤的视在电阻率。如果我们能根据测量结果得到土壤的地质结构,这对接地装置的设计将更加有利。一般来说,土壤的结构可以分为近似的均匀土壤、水平分层和垂直分层土壤三种。

在电力系统中测量电阻率的目的一般是为了进行接地装置的设计。接地装置设计一般要达到两个要求,一是接地电阻满足要求以保证设备的安全运行,二是接地装置之上的地表面的接触电压和跨步电压满足人身安全的要求。在接地极或邻近接地极附近的大地表面,电位梯度主要是上层土壤电阻率的函数,而接地极的电阻却主要是深层土壤电阻率的函数,在接地装置的尺寸非常大时更是如此,只有接地极埋在电阻率极高的上层土壤的极端情况下除外。

送电线路的工频参数受不同电阻率的各层土壤的影响,而载波频率、无线电频率或冲击波的大地回路阻抗实际上仅仅受上层几米土壤层的影响,这主要是由于高频时大地的趋肤效应引起的。

上述情况说明需要对表层和深层土壤同时进行电阻率测量。分析表明,大地对接地装置的有效影响范围,垂直方向的深度  $H$  为  $2r \sim 4r$ ,  $r$  为接地装置的等效半径,水平方向距地网的距离  $L$  为  $1r \sim 3r$ 。

探测地质结构的电阻率测量技术一般以地下物质对电流的传导为基础,而电流传导取决于这些物质的含水量、密度和化学成分。在电阻率测量中,电流通过两个电流极被引入被测区域的地中,然后测量两个或两个以上的电位极之间的电位差,以确定深度为极间距离的土壤层的视在电阻率。然后根据电极之间的距离和被测电位差来分析和确定地下的地质情况。

测量时施加的电流通过含金属的土壤粒子及孔隙、裂缝和断口中的电解质等在大地中传导。在外部电流的作用下,松散地附着在含金属的土壤粒子和岩石粒子上的电子,由一个原子移向另一原子,这种电流传导的方式称为电子传导;而电流通过孔隙、裂缝和断口中电解质的离子传导时,则称为电解质传导。

电阻率测量涉及到两种电阻率,即通过土壤离子和岩石的电子电阻率和通过地下水的电解质电阻率。岩石和地下水含矿物质越多,即金属和离子的含量越高,则其电导率越高。电导率为电阻率的倒数,所以地下地质中自由离子越少,土壤越干燥,则其电阻率越高。

## 5.2 电阻率的测量方法

### 5.2.1 土壤试样分析法

通常在要安装接地网的地方,总要进行大规模的土建工程,特别是发电站施工时,土建工程十分巨大,为此要进行地质勘探,以获取与土壤特性和结构有关的大量资料。这些资料对接地装置的正确设计起着很重要的作用。

土壤试样分析的原理是通过钻探得到地下不同深度的土壤试样,在实验室中进行试样分析,得到随深度变化的电阻率分布情况。一般是用已知尺寸的土壤试样相对两面间所测得的电阻值来推算试样的电阻率,这种测试方法会带来一定的误差,因为该值包含了电极与土壤试样的接触电阻和电极电阻,这些都是未知的。

如果对土壤试样进行四端电阻测量,则可得到较精确的测量结果。电位端子的尺寸与试样截面相比应较小,且应与电流端子相距较远,以保持试样的电流分布近于均匀。

对试样进行电阻率测量来得到土壤电阻率的分布情况是困难的,并且在很多情况下是不可能的。这主要是基于如下几方面的原因:一是通过地质钻探采取土壤试样的费用比较高;二是即使采用钻探方法也难以得到有代表性的、均匀的土壤试样;三是在实验室中模拟原有土壤的紧密性和水分含量比较困难。

### 5.2.2 电测深法

电测深法的基本原理是在被测量区域和电流极间施加电流,根据电流在电位极上产生的电位来确定电阻率。电测深法根据插入地中的电极数可分为两极法、三极法和四极法。

#### 1. 两极法

两极法的原理如图 5.2.1 所示,在被测区域插入电流极  $A$  和  $B$ ,在  $A$  和  $B$  之间施加电流,电源一般采用电池。将电流表串入电流回路测量流过的电流  $I$ ,将电极  $B$  的电位看作零电位,电压则为电池电压的额定值  $E$ 。可以粗略地估计测量得到的接地电阻  $R = E/I$ 。如果电流极采用标准的半球电极,电极的半径为  $r$ ,则由半球接地极的接地电阻计算公式可以得到被测区域的电阻率  $\rho_a$  为

$$\rho_a = 2\pi r R \quad (5.2.1)$$

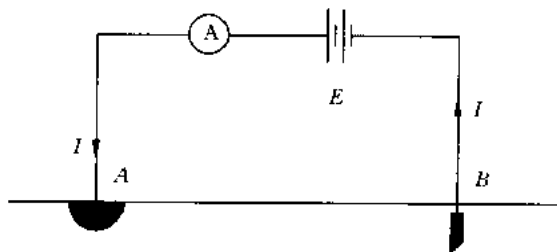


图 5.2.1 两极法测电阻率的原理图

现场测量可以采用 Shepard 土壤电阻仪进行粗略测量。该测量装置包括两个铁电极,一个尺寸较大而另一个的尺寸较小,二者都附在绝缘杆上。电池的正极通过一只毫安表连接到较大的电极上,而电池的负极则连接到另一电极。该仪器可以在额定电池电压的基准上将电流刻度标定为电阻率刻度。这种仪器易于携带,通过将电极打入地中或挖掘区土壤的侧壁或底部,可在短时间内对小型土壤区域进行大量测量。

#### 2. 三极法

如图 5.2.2 所示为三极法测量示意图,三极法的原理是测量埋入地中的标准接地极的接地电阻,然后利用接地电阻的计算公式反推出土壤电阻率。三极法得到的土壤电阻率与接地极的形状及尺寸、埋设情况等因素有关,采用不同类型和几何尺寸的接地极得到的视在电阻率有一定的差别,会带来一定的误差。

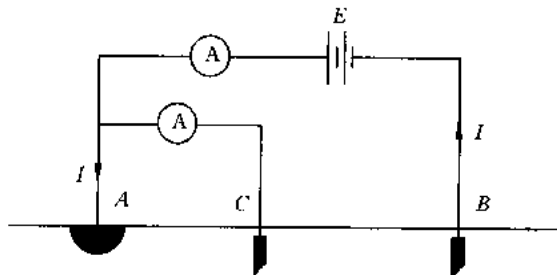


图 5.2.2 三极法测量土壤电阻率原理图

三极法测量时需要多次测量接地电阻,每次测量时,被试电极的埋地深度需加深一给定量,其目的是迫使更多的试验电流流过深层土壤,所测的电阻值将反映深度增加时电阻率的变化。通常被试电极是一根细长的垂直接地极,用细长的垂直接地极而不用其他结构的电极作被测试电极,主要是因为细长的垂直接地极有两个重要优点:

- (1) 精确计算垂直接地极的理论电阻值比较简单,因而分析试验结果比较容易;
- (2) 比较容易将垂直接地极打入土壤。

由测量得到的接地电阻  $R$  为电压的测量值  $U$  与电流测量值  $I$  的比值,即垂直接地极的接地电阻为  $R=U/I$ 。因此,根据垂直接地极接地电阻的计算公式可以得到被测区域的视在土壤电阻率为

$$\rho_a = \frac{2\pi l R}{\ln \frac{8l}{d} - 1} \quad (5.2.2)$$

式中  $l$  为垂直接地极打入地中的长度; $d$  为垂直接地极的直径, $d \ll l$ 。

从接地极埋深的每一个  $l$  值所测得的电阻值  $R$ ,可得出对应的视在电阻率  $\rho_a$ ,将  $\rho_a$  与对应的  $l$  绘成曲线,可了解到土壤电阻率随深度变化的情况。为便于分析,现在来观察从现场测量得到的如图 5.2.3 所示的曲线。

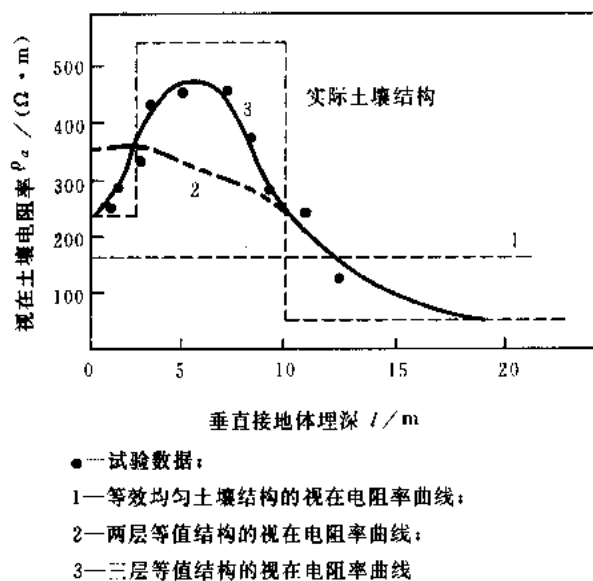


图 5.2.3 视在电阻率随测量时埋入地中的垂直接地极深度的变化曲线

从图 5.2.3 中的曲线可以看出,土壤结构可分为三层,浅层土壤(2m~5m)的电阻率为  $200\Omega \cdot \text{m} \sim 300\Omega \cdot \text{m}$ ,中层土壤的电阻率为浅层土壤的 2~2.5 倍,通过曲线不易确定中层土壤的厚度,第三层土壤导电良好,其电阻率肯定低于  $100\Omega \cdot \text{m}$ 。然而,通过观察不可能得到确定值,可有两种办法取得确切值:

- (1) 将接地极进一步打入土壤,继续测量;
- (2) 从所测的数据,用分析技术计算等值大地结构。

继续增加测量次数肯定会有助于取得第三层的土壤电阻率,然而上两层的厚度仍不

易于确定。而且将接地极打得太深,工程上比较难于实现,并且费用太大。

其他采用的办法一般假设土壤为均匀结构。当土壤为两层(或以上)的构造时,则假设土壤电阻率随深度按简单的数学规律,如线性或指数规律变化。这时可以采用简单的计算机程序或用试探法,就可得到与试验结果吻合得很好的土壤模型数据。

三极法能测量到相当于测试用的垂直接地极埋入地中长度的5~10倍的邻近地区的土壤特性。如要测量大体积的土壤,则应用四点法测量,因为将更长的被试电极打入土壤中是不现实的。

### 3. 四极法

测试大范围土壤的电阻率的比较理想方法是四极法。如图5.2.4所示为测量土壤电阻率的四电极法原理图,它是欧姆定律的现场应用。测量时在地面上插入四个电极A、B、C、D,埋入深度均为 $b$ 。用稳压电源 $E$ (如蓄电池)向外侧电极A和B施加电流 $I$ ,电流由电极A流入,由电极B返回电源。这时外电极产生的电流场将在内电极上产生电势,可以用电位差计或高阻电压表测量内电极C和D间的电位差, $U/I$ 即为电阻 $R$ 。

测量得到不同电极间距所对应的视在土壤电阻率,将测量得到的视在电阻率数据与间距的关系绘成曲线,即可判断该地区的地质结构,还可判断出各层的电阻率和深度。关于四极法测量土壤电阻率的原理将在5.3节详细讨论。

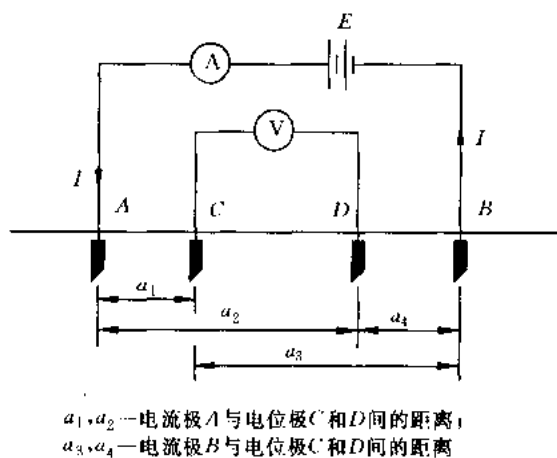


图 5.2.4 四电极法测量大地电阻率的原理图

### 5.2.3 电磁测深法

电力系统中测量土壤电阻率的电磁测深法是从地质测量中引申而来的。电磁测深法可以分为大地电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)、可控源音频大地电磁测深法(CSAMT),现在常用的为CSAMT。

如图5.2.5所示,CSAMT的基本原理是在距离接地装置施工场地2m~4m的地方,在地中打入发送机的两个电极,电极间距为1m~3m,从发送机进入地中的电流为交变电流,频率在 $2^{-3} \sim 2^{13}$ 范围内变化。在被测范围内划出一些水平的测线,测量测线不同位置

CSAMT 的主要特点是:

(2) 高阻层屏蔽作用小。采用一般的方法进行测量时,如果在土壤的结构中有一层电阻率很高的土壤层,则很难将高阻层下面的低电阻率层测量出来,即高电阻率层屏蔽了其下面的低电阻率层;

(4) 勘测范围广,能勘测从几十米到2~3公里的范围。

CSAMT 适合大型接地网和工程地质复杂的情况,但这种方法的费用较高。工程中比较常用的仍是电测深法,因此本章主要介绍电测深法。



#### 5.2.4 电阻率测量数据与大地地质结构的相互关系

几乎所有的地中物质,其电阻率均随含水量或水中含盐量(或随二者)的增加而降低。因此可以得出,非多孔物质含水量小,故具有相对高的电阻率。非多孔物质几乎包括所有的诸如花岗岩、玄武岩之类的火成岩和变质岩,以及如致密的石灰岩或砂岩之类的沉积岩。其电阻率值在几千  $\Omega \cdot m$  至几万  $\Omega \cdot m$  的范围变化。其他高电阻率物质还包括多孔但很少或没有水分的物质,如干砂以及包括多孔而又饱含水分但盐分极少的物质,清洁的砾石和砂即属于此类,正是这种特性使电阻率成为探测砾石沉积物的有效工具。

在地下水位以上所进行的电阻率测量结果表明,能够吸收和保持水分的物质比不能吸收和保持水分的物质的电阻率低。因此,粘土和粉砂的电阻率比砂和砾石的电阻率低。在地下水位以下所进行的电阻率测量表明,能够保持自由离子和悬浮电解质的物质比没有这种特性的物质的电阻率低。可见能够在地下水位以上吸收和保持水分的粘土和粉砂同样能够在地下水位以下保持比砂和砾石更多的自由电子和电解质。因此在地下水位上、下进行测试的粘土和粉砂比同样条件下进行测试的砂和砾石的电阻率要低一些。

测量表明在冰蚀区和非冰蚀区的土壤、地下水和基岩沉积具有特殊的电阻率,非冰蚀区的土壤及地下水更是如此。这些类型地质的电阻率比冰蚀区的同类土壤的电阻率要低得多,这种情况应归因于非冰蚀区的高耐蚀粘土矿物质逐渐分解为低耐蚀粘土矿物质。

对地下水位以上物质的电阻率有所影响的还有地面地形。河谷下的土壤层或其他能够保存水分的地区,较之山丘下或其他排水良好地区的同类土壤的电阻率要低。因此在跨越山丘和谷地进行断面测量时,用电阻率读数相同的等值线来表示类似的物质是不正确的。另外延续的降雨期也能造成影响。

虽然地面地形使得对地下状态的解释更为复杂,但各类物质的电阻率在于或湿的情况下,仍趋于保持相同的高低层次却是一个不变的事实。因此对给定的地形来说,粘土比粉砂的电阻率低,粉砂比砂的低,砂则比砂与砾石的混合物低。

基岩电阻率随基岩的种类、断裂程度及天气情况而变化明显。块状的分层石灰岩、砂岩和火成岩较之薄的层状岩系具有较高的电阻率,这种岩系包含低电阻率的水分和土壤沉积。沉积基岩的页岩层也会降低岩石的电阻率。页岩基岩电阻率一般比其他沉积基岩的低。基岩老化后,其表面趋向于破裂和断塌,由此形成的孔隙中填充着低电阻率物质并吸收无法渗入较低的坚固岩石中去的水分,可见风化的基岩层上部的电阻率比坚固岩石的低。一般说来,基岩的电阻率高,但某些页岩和风化的玄武岩则例外,它们的电阻率读数比较低。

## 5.3 四电极法测量土壤电阻率

### 5.3.1 四电极法测量土壤电阻率的原理

如图 5.2.4 所示为测量土壤电阻率的四电极法原理图,将电流极  $A$  近似看成半球形电极,则其在距  $A$  点距离为  $x$  的任一点产生的电位  $V_A$  可以表示为

$$V_A = \frac{I\rho}{2\pi x} \quad (5.3.1)$$

电流极  $B$  在与其距离为  $y$  的任一点产生的电位  $V_B$  为

$$V_B = -\frac{I\rho}{2\pi y} \quad (5.3.2)$$

因此电位极  $C, D$  的电位  $V_C, V_D$  分别为

$$V_C = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_3} \right) \quad (5.3.3)$$

$$V_D = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_4} \right) \quad (5.3.4)$$

电压表从电位极  $C, D$  之间测量得到的电压  $U_{CD}$  为  $C, D$  的电位差,即有

$$U_{CD} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_3} + \frac{1}{a_4} \right) \quad (5.3.5)$$

从式(5.3.5)可以得出视在电阻率

$$\rho = \frac{2\pi R}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_3} + \frac{1}{a_4}} \quad (5.3.6)$$

式中  $R = U_{CB}/I$ , 上式表明被测区域的土壤电阻率可由测量得到的电流、电压及极间距离计算得到。对于各向同性的均匀土壤, 由式(5.3.6)计算得到的电阻率  $\rho$  为真电阻率  $\rho_0$ 。如果土壤的内部结构复杂, 各向非同性, 各处的电阻率不同, 这时由式(5.3.6)计算得到的电阻率不能表征地下某种特定地质的真电阻率, 只能反映电流或电场作用范围内各种介质的综合效应, 一般将此时的电阻率称为视在电阻率  $\rho_s$ 。

图 5.3.1 所示为四极法测量电阻率时两电流极产生的等位面和电流线分布图。当电极间距加大时, 电流沿垂直和水平两个方向流入地中的范围也就更大, 较深的地质将对视在电阻率产生影响。因此, 若较深的地层具有较高的电阻(较低的电导), 电流方向则会向上偏斜, 而且靠近表面层的电流密度将增加, 如图 5.3.2(a) 所示。若较深的地层具有较低的电阻, 电流方向则会向下偏斜, 靠近地面层的电流密度将下降, 如图 5.3.2(b) 所示。

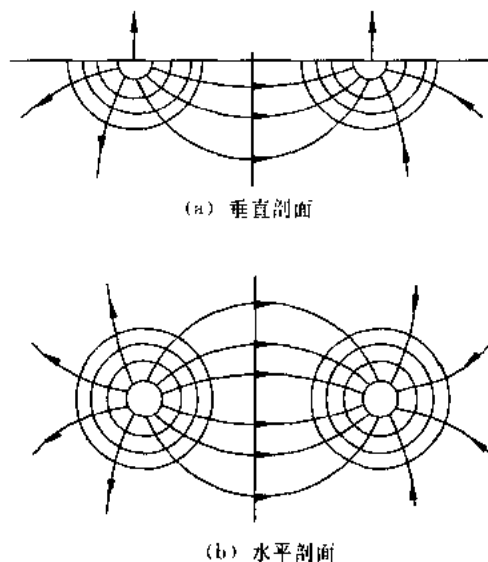


图 5.3.1 四极法测量电阻率时电流极的电流线与等位面分布

图中带箭头的实线为电流线, 箭头为电流线方向, 无箭头的实线为等位面

采用四电极法测量土壤电阻率时, 电流的穿透深度为外侧两电极(电流极)之间距离的函数。大量的测试和研究结果已经表明, 电流的穿透深度大致与相邻电极间的距离相等。马络特通过对 34 000 次电阻率测量和 4 000 多次相应钻孔的结果进行分析, 在 1965 年指出电极间距等于测量深度。

四极法按电极排列方式的不同可分为两种: 断面电测法和深度电测法。

断面电测法的基本原理是在测量过程中电极间距始终保持不变。采用这种方法探测地下地质的横向变化比较有效, 特别适用于勘测地下的砂和砾石沉积层, 测定地质断层、孔隙、断裂带的位置。

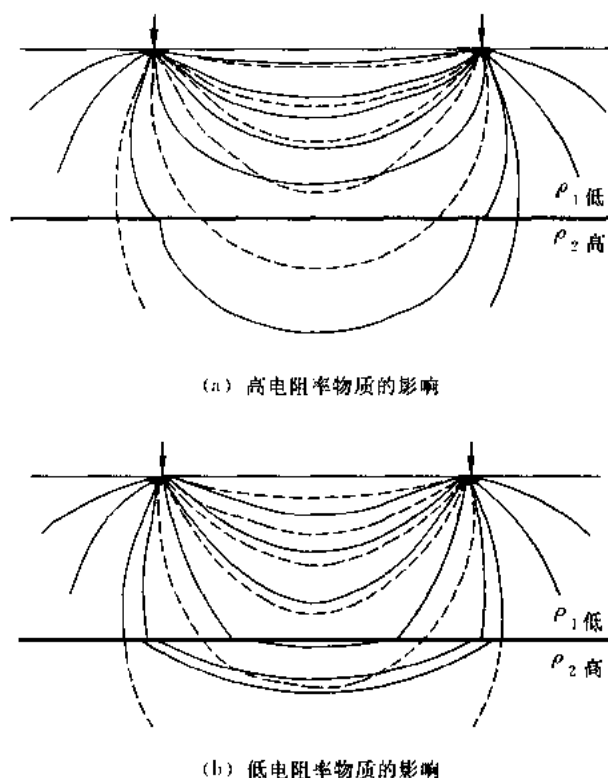


图 5.3.2 地下物质对电流线分布的影响图中虚线为土壤均匀时的电流线分布

### 5.3.2 深度电测法

深度电测法的原理是布置电极的中心位置保持不变,加大电极间的距离,测量电阻率随深度变化的规律,根据测量结果判断地下地质的垂直分层情况,包括砂、砾石、基岩、含水层的情况,以及不同层次的电阻率和高度。这种方法在现场测量中广泛采用。

采用深度电测法测量土壤电阻率时,对于某一极间距离,测量结果基本上反映与测量极间距离相同深度的土壤的视在电阻率。电流由电流极  $A$  流入地下,由电流极  $B$  流回电源,则两电流极在地中某一点  $P$  产生的电流密度如图 5.3.3 所示。假设土壤的电阻率均匀,则在电流极的轴线上任一点  $P$  的电流密度为

$$J_H = \frac{2I \cos \alpha}{\pi \left( \frac{D}{2 \cos \alpha} \right)^3} = \frac{8I}{\pi D^2} \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{2H}{D} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (5.3.7)$$

式中  $H$  为  $P$  点距地面的距离,  $D$  为电流极间的距离,  $\alpha$  为  $P$  点与电流极  $A$  或  $B$  的连线与地面的夹角。地表面  $O$  点处的电流密度  $J_O$  为

$$J_O = \frac{8I}{\pi D^2} \quad (5.3.8)$$

则式(5.3.7)可以表示为

$$\frac{J_H}{J_0} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2H}{D}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (5.3.9)$$

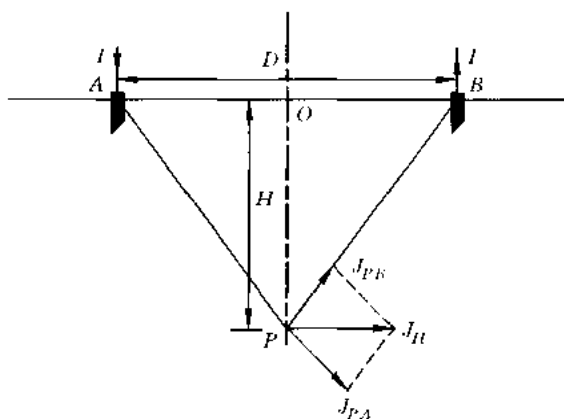


图 5.3.3 地中电流密度示意图

可将式(5.3.9)绘成如图 5.3.4 所示的曲线。从图中可以看出,越靠近地表面处的电流密度越大,随深度的增加,电流密度减小。当  $H=D$  时,即在轴线上距地面距离为  $D$  处的地中的电流密度为轴线与地面交点  $O$  的电流密度的 9%,当  $H=3D$  时,即在轴线上距地面距离为  $3D$  处的地中的电流密度为轴线与地面交点  $O$  的电流密度的 0.46%。因此在地面上进行测量时得到的数据很难反映地中深度等于 3 倍电流极极间距离的电阻率的影响。

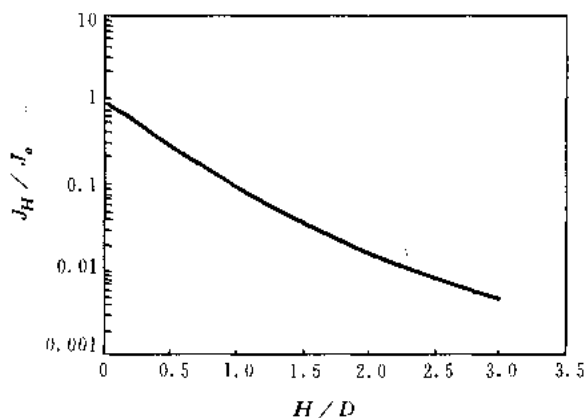


图 5.3.4 电流密度随深度的变化曲线

从式(5.3.9)还可以看出,在地中深度为  $H$  的地点的电流密度随电流极极间距离增加而增加。加大极间距离相对增加了地中深处的电流密度,测量结果更能反映深层地质的电阻率的影响。这就是深度电测法为什么加大极间距离能够测量得到相应深度电阻率的原因。

前面的讨论是基于电阻率完全均匀的情况,但事实上地下物质的电阻率存在纵向和横向变化,因此电流在地中的分布也将受到影响。电阻率的不均匀性将影响地中的电流密度,从而改变电位极间的测量数据。但从不同极间距离的测量结果中,我们通过视在电阻率随极间距离的变化规律,可作出地质变化的定性判断。

在进行定性判断时必须考虑两条原则,一是地中电流总向良导体集聚;二是电位极间的电位差是沿测量路线流动的电流产生的。因此我们可以认为视在电阻率  $\rho_a$  与电流密度  $J$  及真电阻率  $\rho_0$  成正比例关系

$$\rho_a \propto \frac{J}{I} \rho_0 \quad (5.3.10)$$

根据上式,我们可以根据测量结果的变化定性地判断地下的地质情况。

### 5.3.3 四极法的电极布置

采用四极法测量电阻率时有多种形式的电流极和电位极的布置方案。无论哪一种布置方案,都必须满足一个基本条件,即保持四个电极在一条线上排列。工程上应用较多的有四种电极布置方案,如图 5.3.5 所示。

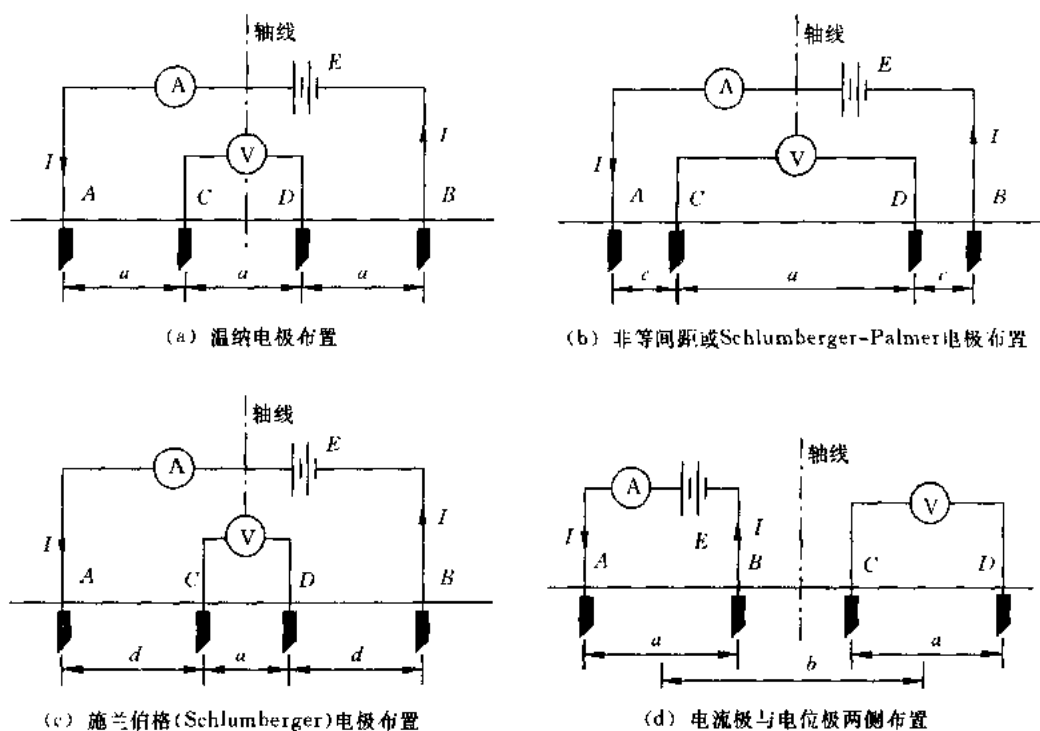


图 5.3.5 四极法的电极布置

#### 1. 等间距或温纳(Wenner)电极布置

深度电测法在现场中应用较多的电极布置方案是沿直线保持四个电极间的距离相

同,即如图 5.3.5(a)所示的温纳电极布置。设  $a$  为两邻近电极间距,则以  $a$  表示的土壤视在电阻率为

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (5.3.11)$$

式中  $R = U_{CD}/I$ 。上式不适用于打入深度为  $b$  的垂直接地极,该式仅适用于埋在深度  $b$  的带绝缘连接线的小电极。然而实际上,四个电极通常置于间距为  $a$  的直线上,入地深度不超过  $0.1a$ ,因而可假定  $b=0$ ,则公式简化为

$$\rho_a = 2\pi a R \quad (5.3.12)$$

从而近似得出深度为  $a$  的平均土壤电阻率。将不同极间距离测量得到的土壤电阻率数据与极间距  $a$  的关系绘成曲线,即可判断该地区是否有各种土壤层或是否有岩石层,还可判断出各层的电阻率和深度,如图 5.3.6 所示。

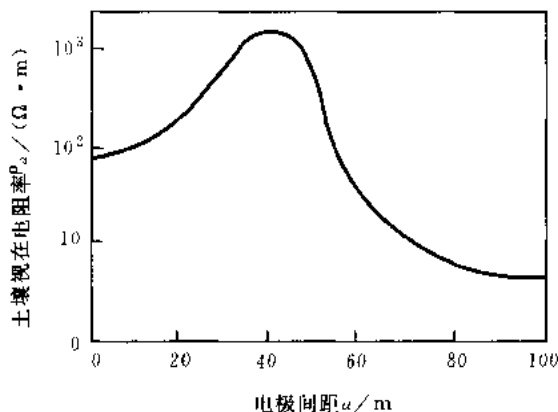


图 5.3.6 典型土壤电阻率曲线

当保持电极间距离不变时,根据互换原理,将内侧的电位极与外侧的电流极互换,不会影响电阻率的测量结果。

在北美,电阻率测量一般采用温纳电极布置。这种方法的缺点是地下地质的横向变化可能会被错误地解释为深度的变化。如果能沿两条垂直线进行测量,相互进行比较,则可以消除这种情况。

相对于中心轴线,每个电位极距离轴线  $a/2$ ,电流极距离轴线  $3a/2$ 。如果将极间距离增加 10m,则电位极相对于轴线只移动 5m,而电流极相对于轴线需要移动 15m。

## 2. 非等间距或 Schlumberger-Palmer 电极布置

Wenner 法的一个缺点是当电极间距增到相当大时,内侧两个电极的电位差迅速下降,常用仪器测量不出如此低的电位差。为了能测量到大间距电流极的土壤电阻率,可用图 5.3.5(b)的非等间距或 Schlumberger-Palmer 电极布置方式,电位极布置在相应的电

流极附近,这样就增大了需要测量的电位差值,采用常用仪表就可以进行测量。

如果电极的埋入深度  $b$  与其极间距离  $a$  和  $c$  相比较小时,则根据测量结果得到的电阻率可用如下公式计算:

$$\rho_a = \pi b(b+c)R/c \quad (5.3.13)$$

### 3. 施兰伯格电极布置

施兰伯格电极布置如图 5.3.5(c)所示,四电极沿直线对称布置。两个布置在电流极中间的电位极的距离  $D$  很小,而电流极距离中心轴线的距离  $d$  很大,这样测量得到的电压差可以近似地看成测量电流分布中点的电位梯度。

采用施兰伯格电极布置时,式(5.3.6)可以变换为

$$\rho_a = \frac{\pi U_{CD}(d-D/2)^2}{DI} \approx \frac{\pi d^2}{D} R \quad (5.3.14)$$

采用施兰伯格电极布置的主要优点是测量时只需移动电流极,电压极仍保持在原来的位置不动。 $d/D$  的比值一般限制在 3~30 的范围内,只有当  $d/D$  比值超过了这个范围时,电位极才需移动。

由此可见,施兰伯格电极布置的优点是测量数据准确,排除了地质横向变化带来的影响,且测量迅速,比较经济。欧洲一般采用这种电极布置。在测量深度很深的地质层的电阻率时,施兰伯格电极布置明显优于温纳电极布置。采用温纳电极布置和非等间距电极布置时,地面附近的地质变化以及地中电流将造成视在电阻率与极间距离的关系曲线出现不规则的变化,这可在采用施兰伯格电极布置时得到解决。

另外,采用施兰伯格布置能够比较容易地辨别地质的横向变化和深度变化,每改变一次极间距离只需移动 2 个电极,因此能迅速地进行现场测量。但施兰伯格电极布置比温纳电极布置需要灵敏度更高的测量仪器。这两种方案都要求尽可能将电极插在湿地上,因此在测量时最好是在将电极插入地中之后,在电极周围洒一些水。

### 4. 电流极与电位极两侧布置

当测量装置的精度比较高时,可以采用如图 5.3.5(d)所示的电流极和电位极两侧布置的电极布置方案,即将电流极布置在一侧,而将电位极布置在轴线的另一侧的布置方式。测量时保持电流极间的距离与电位极间的距离相等,并保持不变。

在测量电阻率随深度变化时,保持电流极的位置不变,而两电位极则沿测量线移动,移动时必须保证电位极之间的距离不变。采用这种电极布置时,由测量结果得出的视在电阻率为

$$\rho_a = \frac{\pi U_{CD}}{I} \left( \frac{a^3}{b^2} - a \right) \approx \frac{a^3 R}{b^2} \quad (5.3.15)$$

式中  $a$  为两电流极和两电位极极间距离,  $b$  为两电流极和两电位极中心线间的距离。

## 5.4 深度电测法的现场应用

### 5.4.1 深度电测法的现场测量技术

在进行现场测量时,根据现场的具体情况选用合适的测量技术,可以达到事半功倍的效果,而如果盲目地进行测量,则只能是事倍功半。下面介绍的是从现场测量中总结出来的经验。

#### 1. 选择正确的测量路线

选择正确的测量路线可以达到进行最少的试验次数,得到比较合理的试验数据的目的。正确的测量路径的选择主要靠实践经验的积累,正确的测量路径应保证整个测量路线上的测点基本上没有断面地质条件发生变化的情况。

#### 2. 在垂直方向路径上重复测量,相互校核

在一个测量路径的方向测量完成以后,最后应在与该测量路径垂直的路线上重复进行测量,对两垂直测量路径的测量结果相互比较。如果相同电极间距的测量结果大致相同,则可认为被测区域的地质层状结构接近水平,在该区域没有发生地质层状的横向变化。如果两垂直路径相同极距的测量结果相差较大,则该测距的测量结果存在的问题。

#### 3. 采用李氏电极布置检验测量数据

如图 5.4.1 所示,将附加电极  $P$  插入测量路线的轴线中心的位置。从电位极  $C, D$  和附加电极  $P$  三个电极读取 3 个测量数据,即一个是从电极  $C$  和  $D$  测量得到的,一个是从电极  $C$  和  $P$  测量得到的,另一个是从电极  $P$  和  $D$  测量得到的。如果从电极  $C, P$  和电极  $P, D$  测到的数据基本上相互重叠,则说明地下地质的电阻率的横向变化不明显;如果两读数相差较大,则表明地下地质的横向变化比较严重,此时的测量数据不可靠。

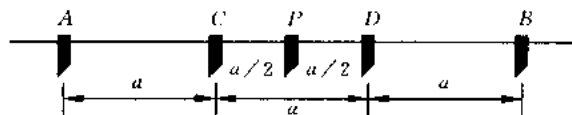


图 5.4.1 检验测量数据的李氏电极布置

#### 4. 电极长度

用四极法测量土壤电阻率时,可采用直径为 20mm,长度为 0.5m~1.0m 的圆钢作为电极,电极插入地中的深度应不大于极间距离的 1/20。

### 5.4.2 电极间距的选择

为了便于了解地下的地质状况,一般来说,最短的电极间距不应小于最小深度的一半。我国接地规程中规定,水平接地极的埋设深度为 $0.6\text{m}\sim 0.8\text{m}$ ,因此在进行现场测量时,建议最小的测量间距为 $0.6\text{m}\sim 1.0\text{m}$ ,而最大的极间距离至少应为最大被测深度的3倍,能达到 $5\sim 10$ 倍则更好。

选择极间距离的原则是:如果所选择的极间距离在对数坐标纸上基本相等,则所选择的极间距离为最佳,即电极间距较小时,选择相隔较小的极间距离测量一组试验数据,而极间距离较大时,则用相隔较大的极间距离测量一组试验数据。

在采用温纳电极布置时,为了快速进行测量,采用以下特殊方法能够将测量时电极的移动次数减至最少。先将电极安排的需要测量的最大电极距离 $a$ 进行测量,然后将电极距离变为 $a/3$ 进行测量,接着在极间距离为 $a/9$ 时进行测量,依此类推(如图5.4.2所示),一般将这种方法称为“蛙跃”序列极间距离变化。可以看出,第1次测量时的电位极的位置成为第2次测量时电流极的位置。在通常情况下只需要测量 $4\sim 5$ 个读数就能覆盖所需要的极间距离的范围。

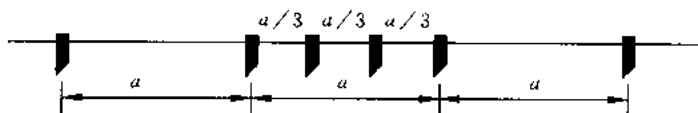


图 5.4.2 温纳电极布置测量时的现场快速测量电极布置示意图

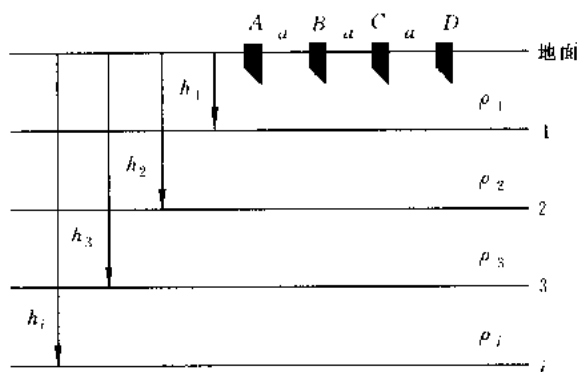
## 5.5 电阻率测量数据的分析方法

在设计变电站地网时,我们希望通过现场测量得到土壤的视在电阻率、土壤的分层结构(包括各层的电阻率及厚度),以便更好地进行设计、分析和计算。在测量得到不同极间距离的电阻率后,应通过计算得到一个反映地质情况的综合的视在电阻率。视在电阻率也被称为等值电阻率。

在地球的重力的作用下,地壳的地质情况一般是由各种水平层状的岩层组成。如沉积岩在沉积过程中受重力的作用,则在最下面形成砂砾岩层,其上是细砂和粘土层。根据地质情况,如果每层不同地点的电阻率变化不大,则可以认为地下物质在同一层内是均匀各向同性的,如图5.5.1所示为构成地下地质的 $n$ 层水平层状介质剖面图。假设各层的厚度分别为 $H_1, H_2, H_3, \dots$ ,我们可以根据电磁场理论对图5.5.1所示的区域进行数值计算,计算过程比较复杂。下面介绍电力系统中计算等值电阻率时比较常用的方法。

### 5.5.1 两层水平介质构成的大地的电测深曲线法

在实际计算土壤的等值电阻率时,一般将地下地质看成由两层或三层的水平层状结构的模型。如图5.5.2所示为两层介质构成的地质剖面图,其主要地质参数包括上层土



1, 2, 3, ... 一层状介质的界面;  
 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$  各层介质的电阻率;  
 $h_1, h_2, h_3, \dots$  地面至界面 1, 2, 3, ... 的距离;  
 A, B 电流极; C, D—电位极; a 电极间距

图 5.5.1 构成地下地质的  $n$  层水平层状介质剖面图

壤电阻率  $\rho_1$ , 下层土壤电阻率  $\rho_2$  和上层土壤厚度  $h$ 。

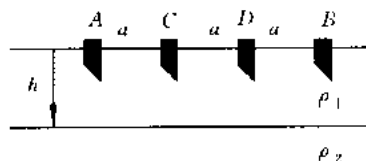


图 5.5.2 两层水平介质构成的地质剖面图

### 1. 采用理论量板确定土壤参数

由两层介质构成的大地的视在电阻率为

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n \left( \frac{a}{h} \right)^3}{\left[ \left( \frac{a}{h} \right)^2 + (2n)^2 \right]^{3/2}} \right\} \quad (5.5.1)$$

式中  $K = (\rho_2 - \rho_1) / (5.5.1) \rho_2 + \rho_1$  为反射系数, 其数值在  $-1$  至  $1$  之间。在采用温纳电极布置进行电阻率测量时, 由两层介质组成的大地的视在电阻率是各层的真电阻率  $\rho_1$  和  $\rho_2$ , 上层介质的厚度  $h$  及极间距离  $a$  等变量的函数。我们可以对上式进行简化, 假设  $\mu_1 = \rho_2 / \rho_1$ ,  $\lambda = a/h$ , 则上式可以简化为

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = f(\mu_1, \lambda) \quad (5.5.2)$$

从上式可以看出, 给出一个  $\mu_1$  值, 就可以得到一条与之对应的  $\rho_a / \rho_1$  的曲线, 对应不同的  $\mu_1$  值, 就可以得到与不同  $\mu_1$  值对应的曲线族, 将这些曲线族画在双对数坐标纸上, 如图 5.5.3 所示。一般将画在双对数坐标纸上的这些曲线族称为理论量板, 该图为 Sundberg 的两层标准曲线。由于  $\lg(\rho_a / \rho_1) = \lg \rho_a - \lg \rho_1$ ,  $\lg(a/h) = \lg a - \lg h$ , 只要  $K$  值相同, 绘在

双对数坐标纸上的  $\rho_a = f(a)$  和  $\rho_a/\rho_1 = f(\mu_1, \lambda)$  具有相同的形状。分析图 5.5.3 所示的曲线族有如下一些特点:

- (1) 曲线族的左端的渐近线都是横轴,即对应  $\mu_1$  值;
  - (2) 当  $a$  趋近于 0 时,  $\rho_a$  趋近于  $\rho_1$ , 这是深度电测法的一个非常重要的特点;
  - (3) 曲线右端的渐近线是不同的水平线,它们对应  $\rho_a$  趋近于  $\rho_2$ ;
  - (4) 最上面的一条 ( $\rho_2/\rho_1 = \mu_1 = \infty$ ) 的渐近线很快就变成一条斜率约为  $45^\circ$  的直线。
- 因此,如果在实际测量中发现斜率大于  $45^\circ$  的直线,则一定是错误的,应立即查明原因;
- (5) 从曲线族还可以看出电极间距对深度的影响,即间距越大,反映的土壤深度也就越深。

图中的坐标原点为 (1, 1), 分析时都以此原点作为坐标的基准点, 因为该点的  $\rho_a = \rho_1, a = h$ 。如果要将由温纳法测量得到的  $\rho_a$  曲线表示为两层地质结构, 则应先将测量数据绘在透明的双对数坐标纸上, 将绘有测量曲线的透明坐标纸与图 5.5.3 的两层标准量板重叠, 得到与该测量曲线重合得最好的量板曲线, 则可确定两层地质结构的  $\rho_1/\rho_2$ ; 第二步从量板上确定测量曲线的原点, 即基准点, 可由基准点的位置确定第一层土壤的电阻率和厚度。量板  $a/h=1$  与  $\rho_a$ - $a$  曲线的  $a$  轴的交点为上层土壤厚度, 与  $\rho_a$ - $a$  曲线的  $\rho_a$  轴的交点为上层土壤的电阻率  $\rho_1$ , 通过从量板上确定的  $\rho_1/\rho_2$  值可计算得到  $\rho_2$ 。

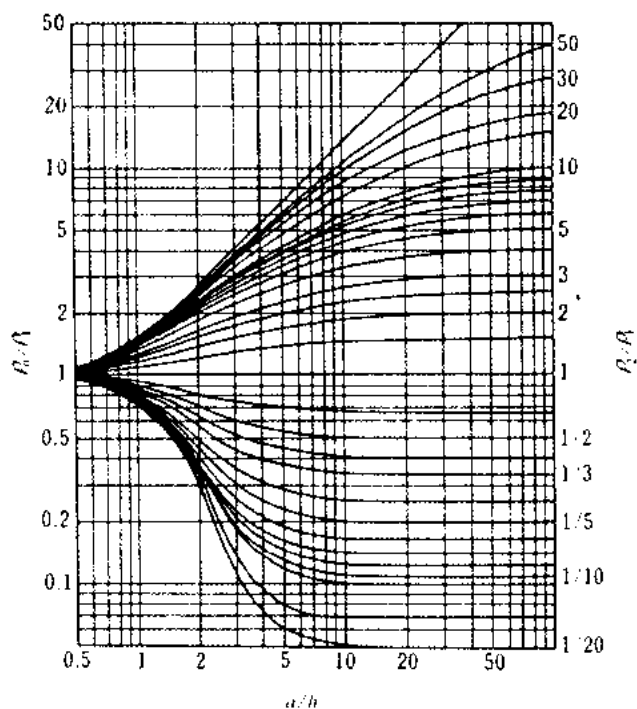


图 5.5.3 Sundberg 的两层标准量板图

## 2. 采用理论公式确定土壤参数

泰格(Tagge)和格罗斯(Gross)等人在大量的理论分析与试验研究的基础上,提出了

由两层水平介质构成的大地的视在电阻率计算公式

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{nh}{a}\right)^2}} \quad (5.5.3)$$

下面介绍根据图 5.5.3, 采用公式(5.5.1)和(5.5.3)确定土壤电阻率的方法。

根据前面的假设  $\mu_1 = \rho_2/\rho_1$ ,  $K = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_2 + \rho_1)$ , 则可以得到  $K$  与  $\mu_1$  的关系式

$$K = \frac{\mu_1 - 1}{\mu_1 + 1} \quad (5.5.4)$$

因此对于每一个  $\mu_1$  就有一个对应的  $K$  值。

由图 5.5.3 所示的曲线族可以看出, 对纵坐标  $\rho_a/\rho_1$  的任一个值, 在曲线族上有一系列的  $a/h$  值; 而对任一个  $a/h$  值又有一系列的  $K$  值相对应,  $K$  值在图中没有列出, 但可以通过式(5.5.4)计算得到。图 5.5.3 中各  $\mu_1$  对应的  $K$  值列在表 5.5.1 中。

表 5.5.1 两层介质模型理论曲线中的  $K$  值

| $\mu_1$ | 39   | 9    | 4    | 2    | 1 | 0.5   | 0.25  | 0.05  | 0.025 |
|---------|------|------|------|------|---|-------|-------|-------|-------|
| $K$     | 0.95 | 0.80 | 0.60 | 0.30 | 0 | -0.31 | -0.60 | -0.90 | -0.95 |

在如图 5.5.4 所示的实测的  $\rho_a$ - $a$  曲线上, 选定一个  $\rho_a$  和  $a$  值就可以画出一条  $K = f_1(h)$  的曲线, 改变  $\rho_a$  和  $a$  值就可以得到另一条  $K = f_2(h)$  的曲线, 如图 5.5.5 所示两曲线的交点为  $A$ 。由于对应于固定的地下地质结构, 只能有一个  $K$  和  $h$  值, 则由  $A$  点的坐标就能定出上层介质的深度  $h$ 。由  $K$  值可以计算出下层介质的真电阻率

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{1+K}{1-K} \quad (5.5.5)$$

上层土壤电阻率为  $\rho_a$ - $a$  曲线外延与  $\rho_a$  轴的交点对应的电阻率值。最后按下式计算得到这个地质区域的等值电阻率

$$\rho_{EX} = b(\rho_2 - \rho_1) + \rho_1 \quad (5.5.6)$$

式中  $b$  为与所考虑的地网结构、几何尺寸及导体的等值半径有关的常数。

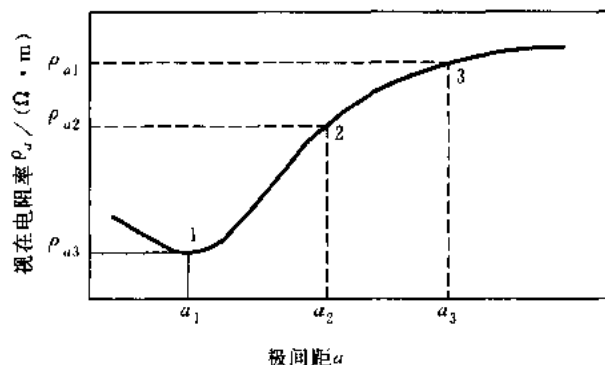
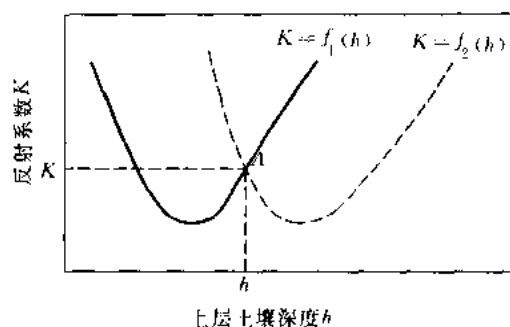


图 5.5.4 实测的一种视在电阻率曲线

图 5.5.5 反射系数  $K$  与第一层介质的深度的关系曲线

### 3. 采用近似公式计算土壤参数

在工程应用范围内,可以采用下面的方法来近似地表示视在电阻率  $\rho_a$  与其他各量的关系,即假定视在电阻率随土壤参数按指数函数变化。用 Wenner 法测量土壤电阻率,可得到如下所述的作为电极间距  $a$  的函数的视在电阻率:

$$\rho_a = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)(2 - e^{-\beta a})e^{-\beta a} \quad (5.5.7)$$

$$e^{-\beta a} = 1 + \sqrt{1 - \frac{\rho_2 - \rho_a}{\rho_2 - \rho_1}} \quad (5.5.8)$$

$\beta$  为视在电阻率曲线系数,一般可以采用下式近似计算:

$$\beta = \delta h \quad (5.5.9)$$

式中常数  $\delta$  为上下两层地质结构的土壤电阻率的函数,对应不同的电阻率比值的常数  $\delta$  可由表 5.5.2 查出。

表 5.5.2 计算视在电阻率曲线系数用的  $\delta$  值

| $\rho_1/\rho_2$ | 100   | 10    | 1    | 0.2  | 0.1  |
|-----------------|-------|-------|------|------|------|
| $K$             | -0.98 | -0.82 | 0    | 0.67 | 0.82 |
| $\delta$        | 0.50  | 1.09  | 1.72 | 1.77 | 5.00 |

我们可以先从实测的电阻率随极间距离变化的曲线  $\rho = f(a)$  确定  $\rho_1, \rho_2$ , 即取  $\rho = f(a)$  曲线上  $a$  值很小和很大时的两个比较平坦段的  $\rho_a$  值作为上下两层的土壤电阻率值。根据测试的  $(\rho_a, a)$  数据对由式(5.5.8)求得  $\beta$ , 则可从式(5.5.9)求得上层土壤的深度  $h$ 。

### 4. 采用视在电阻率累加曲线确定上层土壤厚度

将采用等间距  $a$  测量得到的  $\rho_a = f(a)$  曲线的各点  $\rho_a$  累加得到  $\sum \rho_a = f(a)$  曲线, 在曲线上最大曲率点的两边的切线的交点对应的  $a$  轴的数值即为上层土壤的厚度。

### 5.5.2 采用三极法测量时土壤参数的计算

采用三极法测量土壤电阻率时,假设垂直接地极埋两层土壤结构的上层土壤内,长

度为  $l$ , 半径为  $r$ , 其接地电阻为

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{2nh + l}{2nh - l} \quad (5.5.10)$$

$h$  为上层土壤的厚度,  $0 \leq K \leq 1$ ,  $h \geq 1$ , 因此只有无限级数的前几项的值比较大, 其余项的值很小, 可以忽略。

如果在某一现场测量垂直接地极各种埋深  $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$  (至少应有三种长度) 的接地电阻  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ , 可通过求解由不同的  $R$  和  $l$  带入式 (5.5.10) 组成的方程组, 得出未知数  $\rho_1, K$  和  $h$ 。

当进行三次以上的测量时, 可能会得到不合理或矛盾的数据。这表明不是测量精度不够就是所假定的均质土壤或两层土壤与实际不符。此时应采用四点法或 Wenner 法, 取多个电极间距, 通过查视在电阻率曲线解释试验结果。

### 5.5.3 垂直分层地质结构的土壤电阻率

当测量范围很大, 特别是从测试记录上发现视在电阻率横向变化较严重时, 为了减小测量误差, 可把测区划分为若干块, 尽量保持各分块内的测点数相同, 分别求出各分块的平均电阻率后, 再用下式依次计算相邻分块的电阻率  $\rho_p$ :

$$\rho_p = \frac{S_1 \rho_2}{S_1 \rho_2 + S_2 \rho_1} \quad (5.5.11)$$

最后得到整个测区的等值电阻率。上式中  $S_1$  和  $S_2$  分别为分块的面积,  $S = S_1 + S_2$ ,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为各块的平均电阻率, 如图 5.5.6 所示。

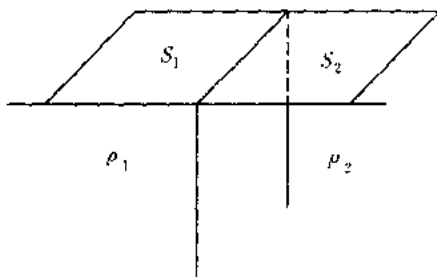


图 5.5.6 地质的垂直分层

### 5.5.4 分析测量数据的经验方法

在 Wenner 电极布置时, 所测得的视在电阻率与电极间距  $a$  的关系曲线表示了该土壤的结构, 但是从曲线不易确定各层土壤的深度。一些研究者从实践经验中积累了许多确定土壤厚度的经验方法。

#### 1. Gish-Rooneg 法

该法通过电阻率曲线形状的变化判断, 在曲线曲率转折或变化时, 与电极间距相等的深度处, 开始出现另一层土壤。

## 2. Lancaster-Jones 法

该法认为在出现曲率转折点时,电极间距的  $2/3$  处为下层土壤。

## 3. 采用一些假定的地质结构模型

在分析土壤参数时比较理想的方法是采用一些比较理想的地质结构模型,如:

- (1) 土壤有均匀的土壤电阻率;
- (2) 土壤有均匀电阻率的几个水平土壤层;
- (3) 土壤有按指数变化的土壤电阻率。

对于以上每一种模型,其视在电阻率和各种地质参数间的数学关系应是已知的或是易于计算的,采用这三种模型时的大地参数的分析已经在前面进行了介绍,给出了指数型及两层土壤模型的解法,使用合适的分析方法可得到与试验数据一致的曲线,从中得到所需要的大地参数,图 5.2.3 表示用上述模型(2)和(3)得到的曲线。

要根据测量目的选取最佳模型,通常用两层大地模型能得到较好的结果。通过测量求得测区各点的不同方向和深度的电阻率后,计算出平均值即为测区的等效电阻率。

## 第 6 章

# 接地电阻的测量

### 6.1 电力系统对接地电阻的要求

#### 1. 电力系统接地装置的重要性

随着现代大电网向超高压、大容量和远距离方向发展,对于电力系统安全、稳定及经济运行的要求越来越高,为了确保电网的安全稳定运行,提高供电的可靠性,必须配备一套与一次系统相适应的安全保护系统,因此需要有一个良好的发变电站接地装置和输电线路杆塔接地装置。

发电站的接地是工作接地、防雷接地和保护接地三者的统一。

交流电力系统根据中性点是否接地而分为中性点接地系统和中性点绝缘系统,另外还有中性点通过电阻或电感接地的中性点非有效接地系统。我国在 110 kV 及以上的电力系统中多采用中性点接地的运行方式,其目的是为了降低电力设备的绝缘水平,这种接地方式称为工作接地。采用中性点接地方式后,作用在电气设备(如电力变压器)绝缘上的电压为相电压,而如果不采用中性点接地的工作方式,则作用在设备绝缘上的电压为线电压,二者相差 $\sqrt{3}$ 倍,采用中性点接地方式后,作用在设备绝缘上的电压明显降低,因此设备的绝缘水平也可以降低,即达到缩小设备绝缘尺寸、降低设备造价的目的。在正常情况下,流过接地装置的电流为系统的不平衡电流,而在系统发生短路故障时,将有数十千安的短路电流流过接地装置,一般短路电流持续时间为 0.5s 左右。

在两线一地的双极直流输电系统中,有时也将中性点接地。中性点接地后,可以利用大地作为回路,采用单极运行方式。采用单极运行方式时,数千安的电流将长期流过接地装置,这时接地装置的电化学腐蚀是一个特别应当注意的问题。

在电气设备发生故障时,电气设备的外壳将带电,如果这时人接触设备外壳,将产生危险。因此为了保证人身安全,所有电气设备的外壳必须接地,这种接地称为保护接地。当电气设备的绝缘损坏而使外壳带电时,流过保护接地装置的故障电流应使相应的继电保护装置动作,切除故障设备,另外也可以通过降低接地电阻保证外壳的电位在人体安全电压值之下,从而避免因电气设备外壳带电而造成的触电事故。

为了防止雷电对电力系统及人身安全的危害,一般采用避雷针、避雷线及避雷器等雷

电防护设备。这些雷电防护设备都必须与合适的接地装置相连,以将雷电流导入大地,这种接地称为防雷接地。流过防雷接地装置的雷电流幅值很大,可以达到数百千安,但持续的时间很短,一般只有数十微秒。

因此发变电站接地的主要目的是为了保障系统能够安全可靠地运行和保障人身和设备的安全。发变电站接地装置对于保证电力系统的安全运行起着至关重要的作用。发变电站良好的接地是电力系统安全的根本保证。

输电线路杆塔接地装置通过杆塔或引线与避雷线相连,其主要作用是将直击于杆塔或避雷线的雷电流引入大地,以减小雷电等引起的停电和人身事故,此外还应保证继电保护装置能可靠地动作。随着国民经济的发展,输电线路走廊已开发为多种用途,此外高压或超高压架空输电线路引入到市区或郊区,以及现代大电网具有单相接地短路电流很大的特点,所以作好杆塔接地装置变得相当重要。

## 2. 测量接地电阻的目的

接地装置的接地电阻是指电流流经接地装置流散到大地时,接地装置所呈现的电阻。即电流  $I$  经接地装置入地时,接地装置相当于无穷远处零电位点呈现的电位为  $U$ ,则电位  $U$  与电流  $I$  的比值为接地电阻  $R$ 。

接地电阻分为冲击接地电阻和工频接地电阻。对于发变电站接地装置的接地电阻一般是指其工频接地电阻。工频接地电阻是指工频电流流过接地装置时接地装置的电阻,它是一个恒定值。而对于输电线路杆塔接地装置的接地电阻,一般是指其冲击接地电阻。冲击接地电阻是冲击电流流过接地装置时,接地装置所呈现的电阻,它是时变的暂态电阻,一般将冲击接地电阻定义为冲击电流流经接地装置时在接地装置上所产生的冲击电压的幅值与冲击电流的幅值之比。一般很难对冲击接地电阻进行现场测量。但冲击接地电阻可由工频接地电阻乘以与土壤电阻率以及接地装置几何形状和尺寸有关的冲击系数得到。因此本章只讨论工频接地电阻的测量。

对于大型发变电站的接地装置,其接地电阻实际上为接地阻抗,应考虑电抗分量。

测量接地装置的接地电阻一般基于如下几个方面的目的:

- (1) 测量接地装置的真实接地电阻,检查新地网的接地电阻是否达到设计要求,检查老地网的接地电阻是否发生了变化;
- (2) 对计算值进行校核,以检验计算方法的正确性,为新的计算方法或软件的推广应用提供依据;
- (3) 确定由于电力系统接地故障引起的地电位升降及在整个地段内的电位变化;
- (4) 确定防雷保护接地装置的合适性;
- (5) 确定无线电发射机发射电路接地装置的合适性;
- (6) 取得建筑物防雷保护,建筑物内设备防雷保护及有关人身安全所必须的设计数据。

电力系统接地电阻的变化范围很大,从输电线路杆塔接地装置的  $10$  至几十欧姆,到发变电站接地系统的  $0.5\Omega$  左右。发变电站接地电阻存在电抗分量,对于接地电阻高于  $1\Omega$  的接地极,电抗分量可以不用考虑。而对于大型接地网,当接地极的接地电阻小于

0.5Ω时,应将电抗分量考虑进去。

用于现场测量接地电阻的方法主要有电流-电压表法,比率计法和电桥法等。这几种方法除了所采用的电源形式、仪表类型不同外,就其测量回路和电极布置而言,归纳起来,都是以“导线-大地”为回路,用补偿法作为电极布置的要求进行测量的。各种方法都有其优点,也存在着不足及局限性,应根据实际的测量目的及测量对象选择适当的测量方法和仪器。

### 3. 对接地系统接地电阻的要求

一般情况下变电站的接地装置是外缘闭合,中间敷设若干均压导体为主的水平接地网,埋深一般为0.6m~0.8m,有时加些垂直接地极。对于防雷接地只需在避雷针、避雷线及避雷器的附近埋设一组垂直接地体,并将它们与水平接地网相连。

为了达到电力系统安全稳定运行的目的,就必须使接地装置的接地电阻达到较低的值,确保短路电流及雷电流等的安全散流。对于变电站接地装置,在工频对地短路时,要保证流过接地网的电流 $I$ 在地网上造成的电位升高不致太大,还应保证电站人员的跨步电位差 $U_s$ (取跨距0.8m)和接触电位差 $U_T$ (取人手摸设备的1.8m高处,而人脚离设备的水平距离0.8m)不超过 $250/\sqrt{t}$ ( $t$ 为作用时间,单位为s)。从保证安全出发,在中性点直接接地的系统中,要求接地装置的工频接地电阻 $R$ 值应满足

$$IR \leq 2000V \quad (6.1.1)$$

$I$ 为短路电流。由于接地体的电抗相对于电阻来说通常可忽略不计,因此其阻抗通常用电阻来表示,对于阻抗低于0.5Ω的大型接地网,以及用于冲击或脉冲电流的接地装置,则应用阻抗表示。

如按上式有困难时,在 $I > 4000A$ 时,可取

$$R \leq 0.5\Omega \quad (6.1.2)$$

在土壤电阻率太高,按 $R \leq 0.5\Omega$ 在技术经济上极不合理时,允许将 $R$ 值提高到

$$R \leq 5\Omega \quad (6.1.3)$$

在这种情况下必须验证人身和设备的安全。

不接地、消弧线圈接地和高电阻接地系统中发电厂、变电所电气装置保护接地的接地电阻应符合下面的要求:

(1) 高压与发电厂、变电所电力生产用低压电气装置共用的接地装置

$$R \leq 120/I \quad (6.1.4)$$

但不应超过4Ω。

(2) 仅用于高压电气装置的接地电阻

$$R \leq 250/I \quad (6.1.5)$$

接地电阻应考虑到季节的变化,取按季节变化的最大值,不宜超过10Ω, $I$ 为计算用的接地故障电流(A)。

(3) 采用消弧线圈的接地系统的接地装置的接地电阻按式(6.1.4)和(6.1.5)计算,如果为装有消弧线圈的发电厂和变电所电气装置的接地装置,计算用的故障电流等于接在同一接地装置中同一系统各消弧线圈额定电流总和的1.25倍;如果为不装消弧线圈的

发电厂和变电所的电气装置的接地装置,计算用的故障电流则取系统中断开最大一台消弧线圈或系统中最长线路被切除时的最大可能残余电流值。

(4) 在高土壤电阻率地区,如果所要求的接地电阻在技术经济上极不合理时,接地电阻允许达到  $30\Omega$ ,但应确保接触电位差、跨步电位差满足要求。

发电厂和变电所的独立避雷针(含悬挂避雷线的构架)的接地电阻在土壤电阻率小于  $500\Omega\cdot\text{m}$  的地区不超过  $10\Omega$ ,在高土壤电阻率地区接地电阻不作规定,但应满足 GB50064 中相应的规定。

发电厂的易燃油和天然气设施防静电接地的接地电阻不应超过  $30\Omega$ 。

在我国 SDJ—79 接地技术规程中规定,对于不同土壤电阻率地区,要求杆塔接地电阻值达到相应的标准。对有避雷线的架空电力线路杆塔的工频接地电阻要求如表 6.1.1 所示。输电线路杆塔接地装置的接地电阻指在工频电流作用时,拆开避雷线所测量得到的电阻值,一般指夏季测量得到的数值。应当说明的是,表 6.1.1 中所列数值也能满足继电保护可靠动作的需要。然而,按照线路继电保护灵敏度的要求,当短路发生在杆塔上或有避雷线参与作用时,与避雷线连在一起的接地电阻不应大于  $50\Omega\sim 70\Omega$ 。如果按照单相自动重合闸有效性的要求,当单相接地发生在杆塔上或有避雷线参与作用时,其接地装置的电阻不应大于  $20\Omega\sim 80\Omega$ 。

此外接地装置的接地电阻还应按杆塔高度来规定。如果高度超过  $35\text{m}$  时,其接地电阻应取表 6.1.1 所列数值的一半。

表 6.1.1 SDJ—79 有避雷线的架空电力线路杆塔的工频接地电阻要求

| 土壤电阻率/ $(\Omega\cdot\text{m})$ | 工频接地电阻 $R/\Omega$                                       |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 100 及以下                        | 10                                                      |
| 100~500                        | 15                                                      |
| 500~1 000                      | 20                                                      |
| 1 000~2 000                    | 25                                                      |
| 2 000 以上                       | $30\Omega$ ,或敷设 6~8 根射线(总长度不超过 500m),<br>或连续伸长接地,阻值不作规定 |

## 6.2 测量小型接地装置接地电阻的简单方法

### 1. 两点法

两点法指在接地极  $G$  和电流极  $C$  间施加测量电源,串入电流表测量电流  $I$ ,直接用电源的电压  $E$  作为  $G, C$  两点间的电压,则接地电阻  $R=E/I$ ,如图 6.2.1 所示。显然其测量结果为待测接地极和测量电流极的接地电阻之和。两点法一般用在与待测接地极的接地电阻相比,电流极的接地电阻被认为可以忽略的情况。因此可以根据电源的电压  $E$ ,对电流表进行标定,这时直接从电流表上读出的用欧姆表示的电阻值即称为待测接地极的接地电阻值。

两点法通常应用于有金属自来水管系统,且管道接头未经绝缘的建筑物的单根垂直接地极接地电阻的测定。该水管即可作为辅助接地极,其接地电阻值假定为  $1\Omega$  数量级,与垂直接地极的最大允许接地电阻(通常为  $25\Omega$  数量级)相比应较低。显然对于接地电阻较低的垂直接地极,采用两点法的误差较大,但如果只需对接地电阻进行大致的估测,两点法则是可行的。

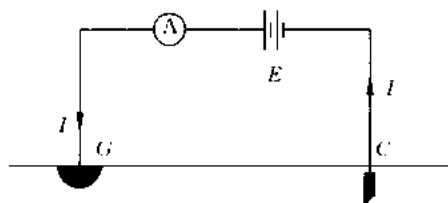


图 6.2.1 两点法测接地电阻原理图

## 2. 三点法

三点法测量时,采用两个试验电极  $P$  和  $C$ 。设两试验电极的接地电阻分别为  $R_2$  和  $R_3$ ,待测接地装置  $G$  的接地电阻为  $R_1$ 。采用前面的两点法分别测量两试验电极和接地装置三者中每一对的串联接地电阻,即分别测量  $GP$ ,  $PC$  和  $GC$  电极间的接地电阻。测量得到的每对接地极间的接地电阻为  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  和  $R_{23}$

$$\begin{cases} R_{12} = R_1 + R_2 \\ R_{13} = R_1 + R_3 \\ R_{23} = R_2 + R_3 \end{cases} \quad (6.2.1)$$

解上面的方程组可以求得

$$R_1 = (R_{12} + R_{13} + R_{23})/2 \quad (6.2.2)$$

因此借助测量每对电极的串联接地电阻值,可求得所测接地极的接地电阻值。如果两个试验电极的电阻较待测接地极的电阻大许多,则每项测量的误差将在最后的结果中放大许多。测量时,电极间必须相距一定距离,否则计算结果可能变得荒谬,如出现零电阻或负电阻。在测量单根接地极的接地电阻时,三个电极相互间的距离应至少为  $5\text{m}$ ,最好在  $10\text{m}$  或以上。这种方法也只能用于小型接地装置的接地电阻的粗略测量。对于具有较低电阻的较大面积的接地系统来说,如果需要高的精确度,则最好采用精度较高的测量方法。

## 6.3 三极法测量接地电阻的原理

### 1. 三极法测量接地电阻的基本原理

三极法是一种经常采用的测量接地电阻的方法。三极法测量接地电阻的原理如图 6.3.1 所示,测量时设置一个电流极  $C$  和一个电位极  $P$ ,二者与接地装置  $G$  成三角形排列。将电流注入接地装置,测量该电流和接地极与电位极间的电压。三极法由于一般采用电流表和电压表进行测量,所以又被称为电流—电压表法,在 ANSI-IEEE81-1983 中被称为电位降法。

合理地设置测量电极的位置是进行接地电阻测量的关键。当三电极在一条直线上时,我们以半径为  $r$  的半球接地极来说明测量电极的正确位置。如图 6.3.2 所示,在接地

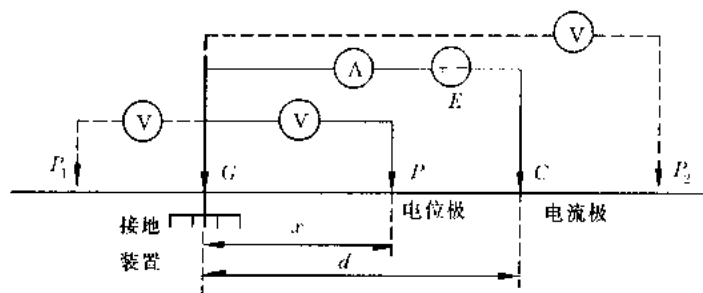


图 6.3.1 三极法测量接地电阻原理图

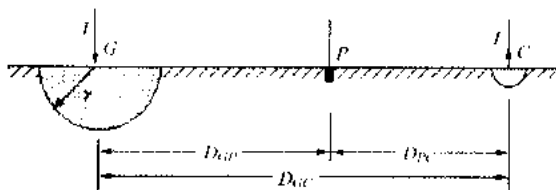


图 6.3.2 测量电极呈直线布置时测量半球接地极的接地电阻

极和电流极间施加电流  $I$  时, 电位极的电位为

$$V_P = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{CP}} \right) \quad (6.3.1)$$

显然, 当  $D_{GP} = D_{CP}$  时,  $V_P = 0$ , 即接地装置和电流极连线的中部的电位为零。如图 6.3.3 所示为电流极和电位极在地面产生的电位分布。由于电流极的引入, 将无穷远处的零电位面移到了电极连线的中部。因此我们可以将电位极设置在接地装置和电流极的连线的中部, 直接测量接地装置和电压极间的电位差, 即为接地装置对无穷远处的零电位点的电位。我们知道当向接地电阻为  $R$ 、半径为  $r$  的半球接地极施加电流  $I$  时, 半球的电位  $V_G$  为

$$V_G = \frac{\rho I}{2\pi r} = IR \quad (6.3.2)$$

但引入电流极时, 从接地极和电位极间实际测量到的电位  $V'_G$  为

$$V'_G = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{D_{GC}} - \frac{1}{D_{GP}} + \frac{1}{D_{PC}} \right) = V_G - \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{GC}} + \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{PC}} \right) \quad (6.3.3)$$

实际测量得到的半球接地极的接地电阻  $R_M$  为

$$R_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{D_{GC}} - \frac{1}{D_{GP}} + \frac{1}{D_{PC}} \right) = R - \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{GC}} + \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{PC}} \right) \quad (6.3.4)$$

因此有电流极存在时, 由于零电位面的移近, 导致实际测量得到的结果偏小。为了保证测量结果的精确性, 必须使上式右边的第二项为零, 即

$$\frac{1}{D_{GC}} + \frac{1}{D_{GP}} - \frac{1}{D_{PC}} = 0 \quad (6.3.5)$$

导致接地电阻减小的实质是电流极存在时改变了接地极的电位分布, 如图 6.3.3 所示为加入电流极前后半球接地极电位分布的对比图。

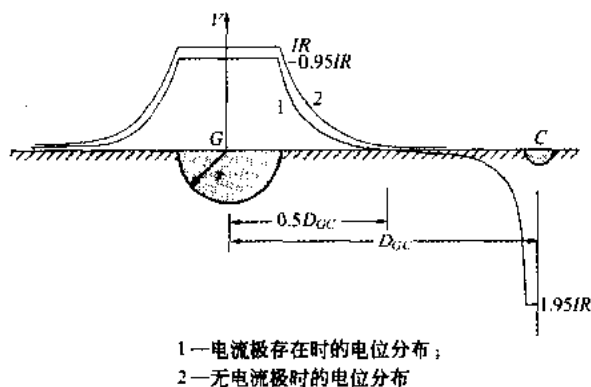


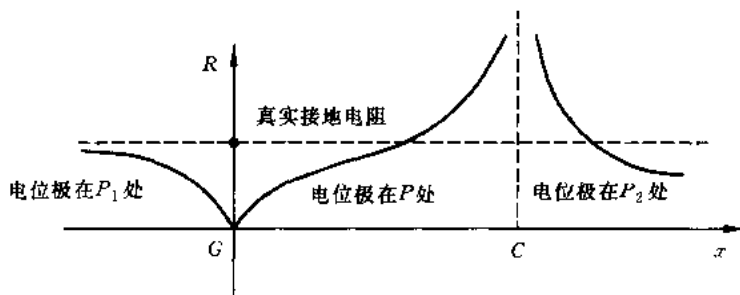
图 6.3.3 半球接地极和电流极在地面产生的电位分布

## 2. 远离法

为了确保测量结果精确,可以通过增大接地装置和电流极间的距离来满足式(6.3.5)的要求。当  $D_{GC} = 10r$ ,  $D_{GP} = 5r$  时,测量结果比实际值小 10%;当  $D_{GC} = 20r$ ,  $D_{GP} = 10r$  时,测量结果比实际值小 5%。 $D_{GC} = 10r$  时的测量结果在工程上是可接受的,即将电流极布置在离开接地装置  $10r$  的位置,电位极布置在接地装置和电流极之间的零电位面上。如果土壤不均匀,则零电位面就不一定在中间位置,这时需要移动电位极来寻找零电位面的位置,从图 6.3.3 可以看出,在零电位面附近的电位变化很小,因此移动电位极时,如果发现某区域的电位变化最小,即为零电位位置。

由于低电阻率区域的电场强度很小,在这个区域的电位变化也很小,测量时有可能将该区域作为零电位区域,因此远离法在土壤电阻率不均匀时可能导致很大的误差。

在图 6.3.1 中,当电流  $I$  从接地装置  $G$  流入大地,从电流极  $C$  流回电源时,沿电极  $G$ ,  $P$ ,  $C$  方向电位曲线如图 6.3.4 所示。以待测接地极  $G$  为参考点测量地电位,为了便于分析,假定该  $G$  点电位为零电位。我们可以得出比值  $U/I = R$  随电位极与被测接地装置的间距  $x$  变化的曲线。电位极从待测接地极处开始,逐点向外移动,每一点测出一个阻抗值。画出接地电阻随间距变化的曲线,该曲线转入水平阶段的电阻值,即当作待测接地极的阻抗值。由于这种经验方法仅在水平段非常分明时,其结果才比较正确。因此在应用时要特别仔细。

图 6.3.4 视在电阻  $R$  随电位极和接地极间的距离  $x$  的变化曲线

为了取得曲线的水平部分,应将电流极置于被测接地极作用范围以外。该作用范围有时被称为变电站接地范围,在该范围外,电流所引起的地电位升高可忽略不计。理论上,接地极的作用范围可延伸到无穷远,实际上由于该作用范围与待测接地极距离的多次幂成反比,其作用范围是有限的。在测试接地电阻在  $1\Omega$  及以下的接地网或多根深埋垂直接地极时,方考虑并测定其作用范围,如前所述,一般可取  $10r$  的范围。对于单根垂直接地极、杆塔基础(未与架空地线或地线相连)这样的小面积接地极,可按  $50\text{m}$  数量级的间距设置电流极,这在现场容易办到,此时接地极的作用可忽略。

对电位极与被测接地装置的电位降进行理论分析表明,将电位极  $P$  置于电流极  $C$  的另一侧时( $P_1$  处),常常导致所测的视在电阻值小于实际电阻值。而当电位极置于电流极  $C$  同一侧,但远离该电流极时( $P_2$  处),则在某一具体位置处可测得真实的接地电阻值。

然而应当强调,将电位极置于  $P_1$  位置可以将试验引线间的耦合效应大大减小。如果  $P_1$  和  $C$  间的距离相当大(相对于待测接地极),则有可能用此法得到待测接地装置  $G$  的真实接地电阻的下限值。

发变电站地网面积很大,采用远离法进行测量时,需要很长的电流极和电位极引线。如果将电流极布置在离发变电站地网中心  $10r$  的位置,则能将测量误差控制在  $\pm 10\%$  以内。图 6.3.5 所示为远离法测量地网接地电阻时,工程中常用的测量电极布置图。

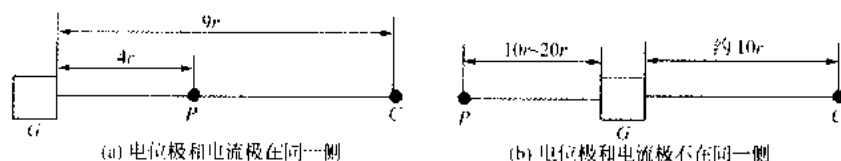


图 6.3.5 远离法测量地网接地电阻时常用的测量电极布置图

### 3. 补偿法

对于大的接地网,满足上面要求的电流极到变电站之间的距离将很大,所要求的间距很难在实际测量中达到。因此曲线的水平部分很难得到,就要采用其他的分析办法,即将电位极放置在合适的位置,这时测量得到的接地电阻即为接地装置的真实接地电阻。下面的分析表明,存在一个可得出待测接地极真实接地阻抗的电位极位置。

三电极法测量接地电阻时在地网  $G$  和电流极之间施加电流,电流  $I_G$  流入地网,电流  $I_C$  流出电流极,可写出  $G, C$  和  $P$  上的电位  $V_G, V_C$  和  $V_P$

$$\begin{cases} V_G = R_G I_G + R_{GC} I_C + R_{GP} I_P \\ V_C = R_{CG} I_G + R_C I_C + R_{CP} I_P \\ V_P = R_{PG} I_G + R_{PC} I_C + R_P I_P \end{cases} \quad (6.3.6)$$

式中  $R_G, R_C$  和  $R_P$  为各电极的自电阻,  $R_{GC}, R_{GP}, R_{CP}, R_{PG}, R_{PC}$  和  $R_{CG}$  为各电极间的互电阻,流入地网和流出电流极的电流方向相反,即  $I_G = -I_C$ ,流过电位极的电流很小,可以认为  $I_P = 0$ 。另外由互换原理有  $R_{GC} = R_{CG}, R_{GP} = R_{PG}, R_{CP} = R_{PC}$ ,因此式(6.3.6)可简化为

$$\begin{cases} V_G = R_G I_G + R_{GC} I_C \\ V_C = R_{CG} I_G + R_C I_C \\ V_P = R_{PG} I_G + R_{PC} I_C \end{cases} \quad (6.3.7)$$

电位极  $P$  和地网  $G$  之间的电位差  $U$  为

$$U = V_G - V_P = I_G (R_G + R_{CP} - R_{GP} - R_{GC}) \quad (6.3.8)$$

则测量得到的接地网的接地电阻  $R$  为

$$R = \frac{U}{I_G} = R_G + R_{CP} - R_{GP} - R_{GC} \quad (6.3.9)$$

从式(6.3.9)可以看出,在测量得到的接地电阻  $R$  与接地网的真实接地电阻  $R_G$  之间存在误差

$$\Delta R = R - R_G = R_{CP} - R_{GP} - R_{GC} \quad (6.3.10)$$

式(6.3.10)表明,测量得到的接地网的接地电阻值将测量引线间的互电阻也包括在内,从而引入了测量误差。所谓接地电阻是指电流流经接地网向无穷远处自由流散时,接地点的电位(以无穷远处为参考点)与流过接地极的电流之比,但在测量接地电阻时不可能将电流极和电位极布置在无穷远处,这时电流就不能向周围土壤自由流动,而是受到电流极位置的影响,这将导致地下电场分布发生畸变,从而造成测量误差。为了得到接地网的真实接地电阻,必须使测量误差  $\Delta R$  等于 0,因此要寻找合适的电流极和电位极的布置方式。

当采用图 6.3.1 所示的直线法时,如果接地装置  $G$  和电流极  $C$  是半球形,且其半径与  $x$  和  $d$  相比甚小,土壤又是均质的,且坐标轴的原点位于半球  $G$  的中心,则各电极间的互电阻为

$$\begin{cases} R_{AB} = \frac{\rho}{2\pi D_{AB}} = \frac{\rho}{2\pi d} \\ R_{AC} = \frac{\rho}{2\pi D_{AC}} = \frac{\rho}{2\pi x} \\ R_{BC} = \frac{\rho}{2\pi D_{BC}} = \frac{\rho}{2\pi(d-x)} \end{cases} \quad (6.3.11)$$

要使测量误差为 0,则必须使式(6.3.10)的  $\Delta R=0$ ,即

$$R_{BC} - R_{AC} - R_{AB} = 0 \quad (6.3.12)$$

将式(6.3.11)代入式(6.3.12),有

$$\frac{1}{d-x} - \frac{1}{d} - \frac{1}{x} = 0 \quad (6.3.13)$$

则电位极的位置  $x=0.618d$ ,说明当三个测量电极呈直线布置时,只需将电位极布置在距离接地网中心  $0.618D_{GC}$  处,就可以使测量误差  $\Delta R=0$ 。这就是通常所说的 0.618 法则。如果电位极  $P$  位于图 6.3.1 中  $P_1$  处,则式(6.3.13)中的  $d-x$  应该为  $d+x$ ,此时方程仅有复数根。如果电位极  $P$  位于电流极外侧的  $P_2$  处,则式(6.3.13)中的  $d-x$  应该为  $x-d$ ,这时的  $x=1.618d$ ,即电位极位于距离接地装置  $1.618d$  的位置。

三极法适用于各种接地电阻的测量。大地网的接地电阻小于  $0.5\Omega$  时,其电抗分量可能较大,因此所测得的值是阻抗,虽然在术语上仍称为电阻。

前面的分析表明,采用 0.618 法则进行接地电阻测量时,应满足以下条件:

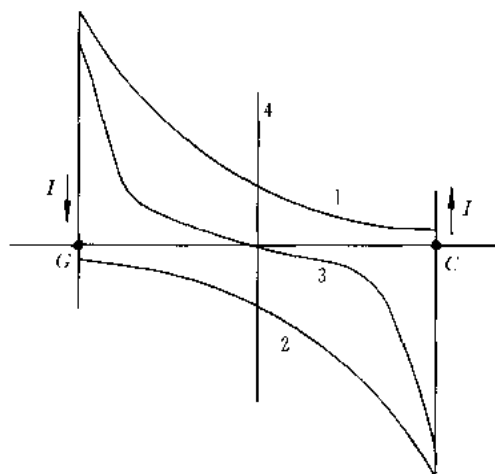
(1) 有十分均匀的土壤;

(2) 有足够大的电极间距,以便电极可以看成半圆型的结构。

另外还要确定测量间距的参考原点。对于半圆形的接地极,原点是接地极中心。对于大接地系统,有些专家提出了“电气中心”的概念,Tagg 根据电气中心的概念还提出了均质土壤大接地系统阻抗测量方法。然而要说明的是,还没有证据表明该电气中心是一个象重心那样受电流极位置和特性影响的物理常数。

通常取得满意测量结果的最好保证是得到可使互阻足够小、并使电位降曲线变平的间距。三极法的主要优点是电位极和电流极的电阻可比待测接地极电阻大,而实质上又不影响测量精度。

前面我们已经说过,测量误差是由于电流极不能布置在无穷远处引起的电场的畸变造成的。当在电流回路的两个电极之间布置电位极之后,电流在地中引起的电位分布如图 6.3.6 所示,从图中可以看出在接地装置和电流极之间存在一个零电位面,因此如果将电位极布置在零电位面上,则可消除电流极不能布置在无穷远处引起的电场畸变的影响。



1 电极G的电位分布曲线; 2 电流极C的电位分布曲线;  
3 合成电位分布曲线; 4 零电位面

图 6.3.6 三电极直线布置时地中的电位分布曲线

从图 6.3.6 中我们可以看出,由于电流极 C 处于有限距离,一般  $D_{GC} = 10r$ ,  $r$  为接地网的半径。当电位极 P 处于零电位面时,即  $D_{GP} = 0.5D_{GC}$  时,测量得到的电阻为

$$R = R_A \left( 1 - \frac{r}{D_{AB}} \right) \quad (6.3.14)$$

可见,由于电流极处于有限距离的位置,使测量得到的接地电阻  $R$  比接地网的真实接地电阻  $R_G$  小,并且与  $r/D_{GC}$  的大小有关。为了补偿测量误差,电位极不能处在零电位面上,而应靠近电流一些,使 G 和 P 的电位差增大,当  $D_{GP} = 0.618D_{GC}$  时,电位差的增量恰好补偿了电流极 C 的存在使地网电位下降的数值,从而测得接地网的真实接地电阻。因此电流电位极呈直线布置的 0.618 法则也被称为补偿法。

现场通常采用的三极法的布线方式有两种;图 6.3.1 所示的三电极布置在一条直线

上的直线法,图 6.3.7 所示的电流极和电位极呈夹角布置的夹角法。

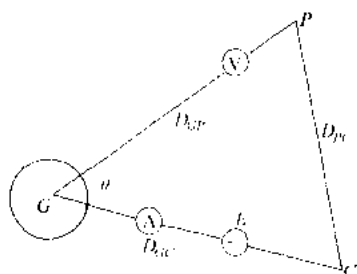


图 6.3.7 现场测量接地电阻的三角形布置原理图

当采用图 6.3.7 所示的等腰三角形布置电极时,接地装置  $G$  的电位  $V_G$  与电位极的电位  $V_P$  的电位差  $U$  为

$$U = V_A - V_C = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{D_{AB}} \right) - \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{AC}} - \frac{1}{D_{BC}} \right) \quad (6.3.15)$$

则测量得到接地电阻  $R=U/I$  为

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{r} - \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{AC}} - \frac{1}{D_{BC}} + \frac{1}{D_{AB}} \right) \quad (6.3.16)$$

第 1 项为半球接地装置的真实接地电阻,第 2 项为接地电阻的测量误差  $\Delta R$ ,要使测量得到的接地电阻为接地装置的真实接地电阻,则要使  $\Delta R=0$ ,采取等腰三角形布置电极时,  $D_{GP}=D_{GC}$ ,由图 6.2.7 可以得到  $\Delta R=0$  的关系式

$$\frac{1}{\sqrt{D_{AC}^2 + D_{AB}^2 - 2D_{AC}^2 \cos \theta}} - \frac{1}{D_{AB}} - \frac{1}{D_{AC}} = 0 \quad (6.3.17)$$

解上面的方程可得  $\theta=29^\circ$ ,即采用三角形电极布置时,使电流极和电位极的夹角为  $29^\circ$  时能消除测量误差。

从直观上看,采用等腰三角形电极布置时,零位面在夹角等于  $60^\circ$  的地方,但此时会造成测量误差。如果将电位极移至夹角为  $29^\circ$  处,补偿一些电压值,则使测量准确。这种测量方法称为夹角补偿法。

值得注意的是,上述理论分析都是以接地极为点电极,即其半径趋于 0 时的条件下进行的。实际上接地网的半径  $r$  较大,即使采用 0.618 法也会带来误差。根据试验和理论分析,推荐采用 0.64 法或  $25^\circ$  角法。

另外补偿法虽然能大大缩短测量引线的长度,但测量结果往往受土壤不均匀性的影响,因此在条件允许时应尽量采用远离法。图 6.3.8 所示为补偿法测量变电站接地电阻时的电极布置图。

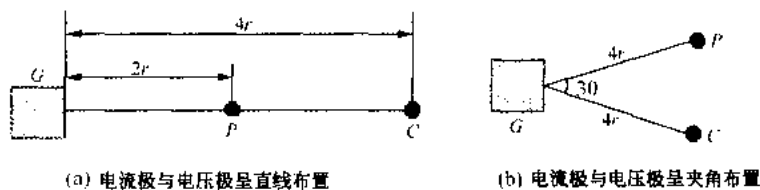


图 6.3.8 补偿法测量变电站接地电阻时的电极布置

#### 4. 地网中心位置不确定时接地电阻的测量

用补偿法测量地网接地电阻时,有时很难找到地网的中心位置,导致测量结果的误差。一般可采用三点法来消除这种误差。假设测量时误将离实际地网中心  $x$  处的一定点作为中心位置,这时测量得到的接地电阻为

$$R_M = R + \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{D_{GC} - D_{GP}} - \frac{1}{D_{GC} + x} - \frac{1}{D_{GP} + x} \right) \quad (6.3.18)$$

式中  $R$  为实际接地电阻。上式中的土壤电阻率  $\rho$ 、实际接地电阻  $R$  及测量时的中心位置偏离实际中心位置的距离  $x$  为三个未知量,因此可以通过测量三次而求解得到实际接地电阻。令  $\alpha = D_{GP}/D_{GC}$ ,  $\beta = x/D_{GC}$ , 上式可改写为

$$R_M = R + \frac{\rho}{2\pi D_{GC}} \left( \frac{1}{1-\alpha} - \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{\alpha+\beta} \right) \quad (6.3.19)$$

在一般情况下,  $\beta$  及  $\beta/\alpha$  都比 1 小得多,因此上式可化简为

$$\begin{aligned} R_M &= R + \frac{\rho}{2\pi D_{GC}} \left[ \frac{1}{1-\alpha} - (1-\beta) - \frac{1}{\alpha} \left( 1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \right] \\ &= R + \frac{\rho}{2\pi D_{GC}} \left[ \frac{1}{1-\alpha} - \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) + \left( 1 + \frac{1}{\alpha^2} \right) \beta \right] \end{aligned} \quad (6.3.20)$$

令  $K = \frac{\rho}{2\pi D_{GC}}$ ,  $m = \frac{1}{1-\alpha} - \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right)$ ,  $n = 1 + \frac{1}{\alpha^2}$ , 则有

$$R_M = R + K(m + n\beta) \quad (6.3.21)$$

上式中,当测量时确定了电流极及地网电流注入点后,  $K$  及  $\beta$  为常数,可以通过三次改变电位极的位置来得到三个方程。当  $\alpha$  分别为  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_3$  时测量得到接地电阻  $R_{M1}, R_{M2}$  和  $R_{M3}$ , 代入上式可得到三个方程

$$\begin{cases} R_{M1} = R + K(m_1 + n_1\beta) \\ R_{M2} = R + K(m_2 + n_2\beta) \\ R_{M3} = R + K(m_3 + n_3\beta) \end{cases} \quad (6.3.22)$$

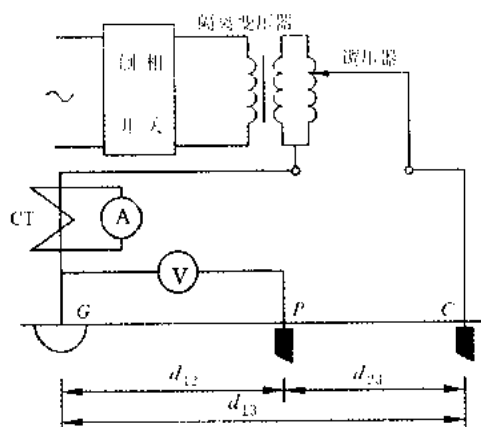
求解上面的方程组可得到实际的接地电阻  $R$ 。

### 6.4 利用三极法测量接地电阻

采用三极法测量接地电阻的方法按采用电源的性质分为直流和交流两种;按采用测量仪表的类型可分为电压-电流表法、电流-功率表法、比例计法和电桥法等。

#### 1. 电压-电流表法

采用电压-电流表法测量接地电阻的试验接线如图 6.4.1 所示。这是一种常用的方法,施加电源后,同时读取电压值  $U$  和电流值  $I$ ,则可计算出接地电阻  $R = U/I$ 。测量采用的电压表要求具有高内阻。



G—接地网; P—电位极; C—电流极; CT—电流互感器

图 6.4.1 电流-电压表法测量接地电阻的测试接线

采用电压-电流表法测量发电厂和变电站的接地电阻的接线布置如图 6.4.2(a)和 6.4.2(b)所示,电极直线布置时,一般取电流极 C 距离地网边缘之间的距离  $d_{13}$  为  $4D \sim 5D$ ,以便有一个电位分布较为平缓的区段,布置电位极 P 时,应能减小测量误差。 $d_{12} = 0.6d_{13}$ ,测量时将电位极沿接地网与电流极连线方向移动三次,每次移动的距离为  $d_{13}$  的 5% 左右,三次测得的接地电阻的差值小于 5% 时即可。然后取此三个测量值的平均值作为接地网的接地电阻。

如果  $d_{13}$  取  $4D \sim 5D$  有困难时,在土壤电阻率较均匀的地区可取  $d_{13} = 2D$ ,  $d_{12} = 1.2D$ ;土壤电阻率不均匀的地区可取  $d_{13} = 3D$ ,  $d_{12} = 1.7D$ 。电极三角形布置时,一般取  $d_{12} = d_{13} \geq 2D$ ,夹角约为  $30^\circ$ 。

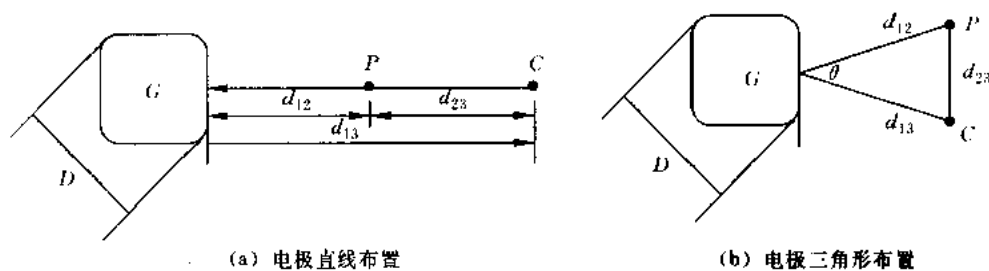


图 6.4.2 测量发电厂和变电站的接地电阻的接线图

D 为接地网的最大对角线长度

## 2. 电流表-功率表法

当缺乏量程较小的电压表时,测量发电厂和变电站的接地电阻可采用图 6.4.3 所示的电流表-功率表法,图中 W 为功率表。此时被测接地极的接地电阻 R 可由下式计算得到

$$R = \frac{P}{I^2} \left( 1 + \frac{R_p}{R_w} \right) \quad (6.4.1)$$

式中  $P$  为功率表的读数,单位为  $W$ ;  $I$  为电流表的读数,单位为  $A$ ,当接有电流互感器时,应考虑互感器的变流比;  $R_p$  为电位极的接地电阻,  $R_w$  为功率表电压线圈的内阻,单位为  $\Omega$ 。

如果  $R_w/R_p$  远远大于 50,接地网的接地电阻可以简单地估算为  $R=P/I^2$ 。

### 3. 比率计法

比率计法又称流比计法,其试验接线如图 6.4.4 所示,用流比计(或比率计)法测接地电阻的仪器有 MC-07, MC-08 和 L-8。另外多档欧姆表的工作原理也基本相同。

手摇直流发电机送出的电流被电流换向开关周期性反向,在待测接地装置  $G$  和电流极  $C$  间的大地中流过。在  $G$  和电位极  $P$  之间的电位降被电压换向开关换向。电位换向开关与电流换向开关同轴,因此二者同步动作。表计的线圈在永久磁铁磁场中转动,电流线圈产生的力矩使指针转向零电位,而电压线圈产生的力矩使指针转向高位读数。通过这两个线圈的电流分别对应流过待测接地极的电流和电压降,因此该仪表的刻度可按欧姆为单位进行分档。

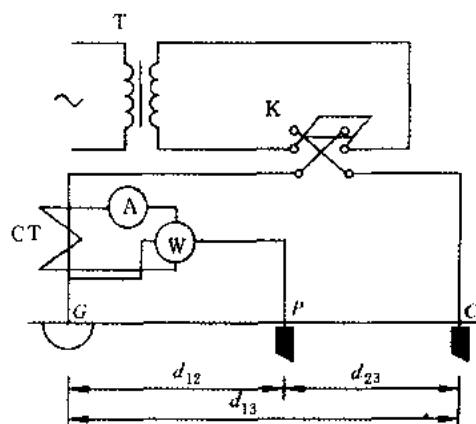


图 6.4.3 电流表-功率表法测接地电阻的接线示意图

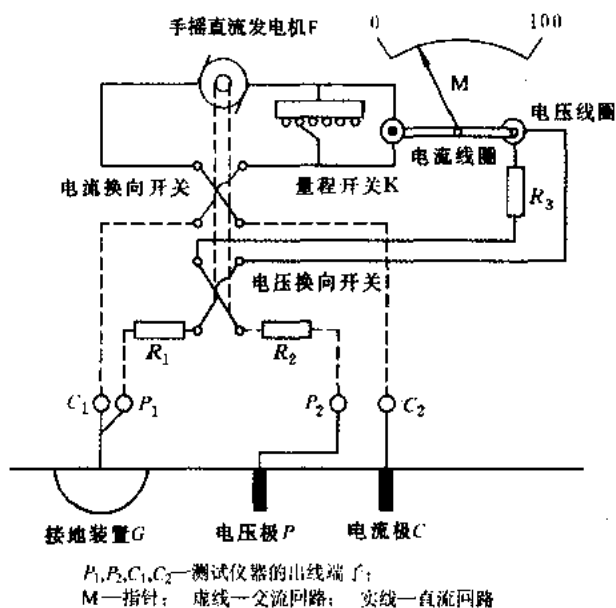


图 6.4.4 比率计法测接地电阻接线图

将端子  $P_1$  和  $C_1$  (以及  $P_2$  和  $C_2$ ) 连在一起,该仪表即成为两端子欧姆表,可用于各种电阻测量。对于接地电阻大于  $1\Omega$  的情况,可将  $P_1$  和  $C_1$  端子连在一起,通过一条共同的引线接到待测接地装置。

测量时,比率计的指针  $M$  的偏转角度  $\alpha$  与流过电流线圈的电流  $I_1$  和电压线圈的电

流  $I_2$  的比值有关,即

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{K}{R}\right) \quad (6.4.2)$$

式中  $R$  为被测接地装置的接地电阻,  $K$  为常数,其值由电压回路电阻  $R_0$  以及该回路的其他所有串联电阻、电位极的接地电阻以及改变量程的可变电阻决定。

从式(6.4.2)可以看出,指针  $M$  的偏转角度为被测接地电阻  $R$  的函数。仪器的刻度盘用标准电阻进行标定后,能直接从表盘上读出被测接地电阻值。

比率计型接地电阻测试仪的电源由手摇发电机  $F$  供给 175V 的直流电压,经机械换流计变换为 350V 的交流电压。

仪表中的同步换向开关(电流和电压同时换向)使电压回路对杂散电压变得不灵敏。在大多数情况下,手摇转速能消除较大的杂散电压效应。但在接地电阻小于  $0.5\Omega$  而杂散电压大于 10V 的极端情况下,通过手摇转速取得正确的读数可能会有困难。

#### 4. 电桥法测工频接地电阻

采用电桥法测量接地电阻的桥式电路如图 6.4.5 所示。在桥式电路中从交流电源输出的电流通过两条并联回路。下层回路由固定电阻  $r_2$ 、待测接地极  $G$  和电流极  $C$  组成。上层回路由固定电阻  $r_1$  和可调滑线变阻器组成,在变阻器上有两个滑触头  $S_a$  和  $S_b$  与其接触。因此电源电流通过两个并联支路,  $I_1$  经  $r_1$  和  $r$  返回,  $I_2$  经被测接地极、大地和电位极及部分  $r$  返回。

采用电桥法测量接地电阻时需进行两次平衡。第一次平衡时,检流计  $G$  的开关向左闭合时,调整触头  $S_a$ ,使检流计指示为 0,这时电桥达到平衡。平衡时两条回路的电流反比于电阻  $r_2$  和电阻  $r_1$ ,即

$$I_1 r_1 = I_2 r_2 \text{ 或 } \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (6.4.3)$$

第二次平衡时,将检流计开关向右闭合,调整触头  $S_b$ ,使检流计指示为 0。此时接地装置  $G$  和电位极  $P$  之间的电位降等于滑线变阻器  $R_b$  部分的电位降,电桥第二次平衡后,电桥 1 和 2 之间的电压降为

$$I_1(r_1 + r_2) = I_2(r_2 + R) \quad (6.4.4)$$

将式(6.4.3)代入式(6.4.4)中,平衡时有下式成立:

$$R = r_b \frac{r_2}{r_1} \quad (6.4.5)$$

将  $S_b$  所滑的刻度按  $R$  标定,从而可直接读出被测接地极的接地电阻。

在测试高阻土壤时,交流电源可以由干电池驱动的振子电源,而检流计可以是电话听筒或固态检测器。蜂鸣器的声音即使在交流杂散电流引起较大背景噪声时也能辨别出和平衡掉。电位极  $P$  的接地电阻的作用仅仅是降低检流计的灵敏度。电流极  $C$  的接地电阻过大可能限制所测电阻的量程。电位极  $P$  和电流极  $C$  的位置应按三极法测量接地电阻时的电极布置原则来确定。

#### 5. 电位计法测量工频接地电阻

如图 6.4.6 所示为电位计型接地电阻测试仪测量接地电阻时的接线原理图。调节滑

线电阻  $r$ , 使检流计  $G$  的指针指到 0 (或接近 0), 此时

$$I_1 R = I_2 r \quad (6.4.6)$$

平衡时有

$$R = \frac{I_2}{I_1} r \quad (6.4.7)$$

在实际的电阻仪中, 取  $kI_2/I_1 = n$ ,  $k$  为倍率电阻并联系数,  $n$  为电桥倍率, 则有

$$R = nr \quad (6.4.8)$$

测量时, 调节滑线电阻  $r$ , 使检流计中的电流为零 (或接近零), 从刻度盘上读取电阻值, 乘以所选择的倍率  $n$ , 即为被测接地电阻  $R$ , 倍率  $n$  由切换开关  $K$  决定。

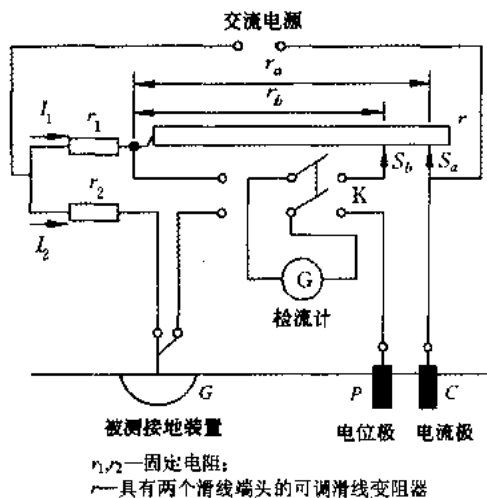


图 6.4.5 电桥型接地电阻测试仪测量接地电阻时的接线原理图

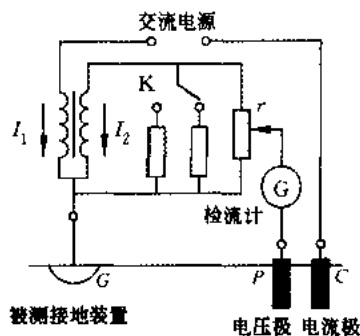


图 6.4.6 电位计型接地电阻测试仪测量接地电阻时的接线原理图

## 6. 单平衡变压器测接地电阻

单平衡变压器是利用单平衡原理进行工作的, 采用单平衡变压器进行桥式测量的原理如图 6.4.7 所示。仪器内有一驱动振子的干电池, 该振子有两对接点。第一对接点用于翻转变压器一次电流的方向, 该变压器的输出电流流过电流极和待测接地极。第二对接点给出平衡检流计的显示方向, 以指示滑线电阻刻度盘的读数。调节滑线电阻的触头, 使触头与电位极等电位, 检流计指示为零。该滑线电阻可与扩程器配合刻成欧姆刻度, 扩程器由比率变压器  $R_1$  的一端电阻与被测接地装置的接地电阻成比例关系。在平衡时电位极回路的电流可忽略不计, 因此电位极的电阻不会影响测量精度, 但对检流计的灵敏度会有一定的影响。

该仪表对杂散电流不敏感, 但在接地电阻小于  $0.5\Omega$  而杂散电压大于  $10V$  的极端情况下, 会造成测量误差。

单平衡变压器、电桥以及采用比率计原理的多档欧姆表可以配备一种称之为防护端子的第五端子, 如果测量时测量电极的接地电阻较高, 通过仪器的泄漏电流会使灵敏检流

计产生微小的偏移,从而引起错误的读数,该防护端子可将这些泄漏电流旁路入地,以消除这种误差。

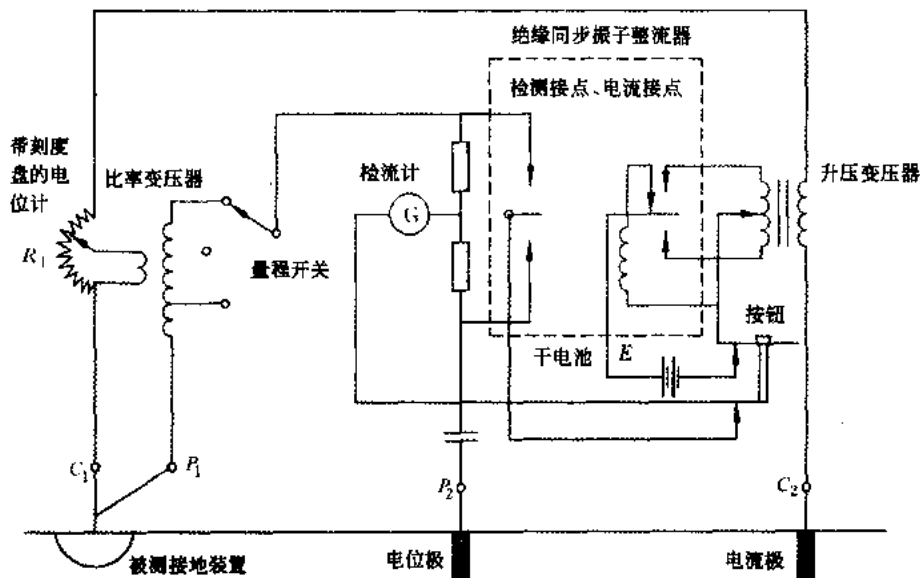


图 6.4.7 单平衡变压器

## 7. 介绍 ZC—8 接地电阻测试仪

ZC—8 接地电阻测试仪的原理接线如图 6.4.8 所示。将接线连接好之后,摇动手柄,发电机发出 110Hz~115Hz 的电流  $I_1$  经 CT-C 极-大地-E 极构成回路,CT 的二次侧感应出的电流  $I_2$  由  $R_s$  构成回路。

$I_1$  在被测接地装置的接地电阻  $R$  上产生压降  $U_1 = I_1 R$ ,  $I_2$  在  $R_s$  的  $R_{OB}$  上产生的压降为  $U_2 = I_2 R_{OB}$ 。调节  $R_s$  的可动触头 B 的位置,可改变  $U_2$  的值,如果使电流  $I_G = 0$ ,即有  $U_2 = U_1$ ,此时

$$R = \frac{I_2}{I_1} R_{OB} \quad (6.4.9)$$

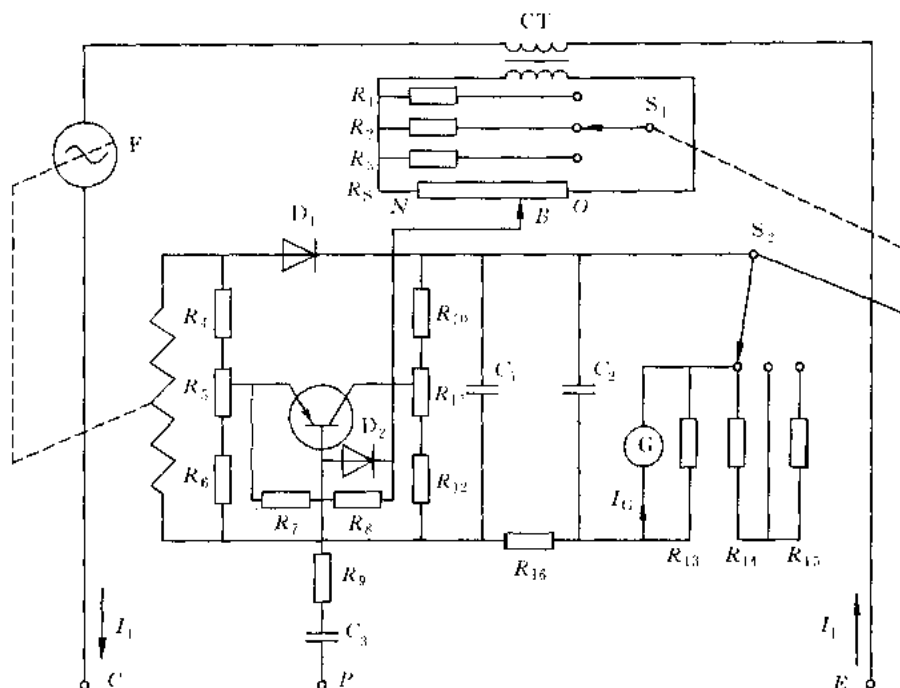
在  $R_s$  上预先刻有电阻指示值,满刻度为 10,如果实际指示值为  $m$ ,则  $R_{OB} = mR_s/10$ ,接地电阻为

$$R = R_s \frac{mI_2}{10I_1} \quad (6.4.10)$$

此外仪器还备有倍率开关 S,用以改变  $I_2/I_1$  的比值,即改变量程,同时改变检流计回路的附近电阻,使检流计具有较高的灵敏度。

接地电阻测试仪具有携带方便、适用简单等特点,在现场测量中广泛应用。但由于其电源容量小,不能提供较大的测量电流,当干扰电压较高而被测接地电阻又较小时,如小于 1 欧姆,则测量结果可能存在较大的误差。

ZC—8 接地电阻测试仪采用输电线路杆塔接地装置的接地电阻测量如图 6.4.9 所示。测量时,一般取  $d_{13} = 4l$ ,  $d_{12} = 2.5l$ 。



F 手摇发电机；CT 电流互感器； $R_8$  可调电阻；G 检流计；

C 与接地极相连的接线端子；P 与电位极相连的接线端子；

E 与电流极相连的接线端子

图 6.4.8 ZC-8 型接地电阻测试仪原理图

## 8. 接地电阻测量时对测量仪器的要求

### (1) 对电压表的要求

在接地电阻测量时经常采用电流表—电压表法测量接地电阻。测量时电压表与电位极相串联，其内阻  $R_v$  对准确度有影响。此时电压表的读数为

$$U_v = U - I_v R_2$$

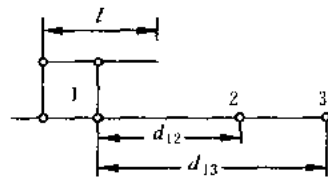
$$I_v = \frac{U}{R_v + R_2} \quad (6.4.11)$$

式中  $U$  为电压表和接地极之间的实际电压值， $R_2$  为电位极的接地电阻， $I_v$  为流过电压表的电流。由上面两方程可求得电压表的读数  $U_v$  为

$$U_v = \left(1 - \frac{R_2}{R_v + R_2}\right) U \quad (6.4.12)$$

由于  $R_v$  的存在，存在测量误差  $\Delta R$

$$\Delta R = -\frac{R_2}{R_v + R_2} \quad (6.4.13)$$



1 接地装置；2 电位极；  
3 电流极； $l$  接地极最长射线的长度

图 6.4.9 杆塔接地装置的接地电阻测量接线图

式中负号表示测量值比实际值偏低。电压表的内阻应不大于电位极的电阻,否则要打入另外的接地极,以降低电位极的电阻。

从式(6.4.13)可见,如果要求电压表内阻引起的误差小于2%,则要求电压表的内阻等于或大于电位极接地电阻的50倍。如采用静电电压表、电子管电压表、数字电压表等。

若 $R_V$ 小于 $R_x$ 的50倍,如采用电磁式或电动式电压表时,应按下式进行校正

$$U = \left(1 + \frac{R_x}{R_V}\right) \quad (6.4.14)$$

最后计算出接地电阻 $R=U/I$ , $I$ 为测量电流, $U$ 为校正后的电压值。

测量接地电阻所用的电压表、电流表、功率表、电流互感器等建议采用0.5~1.0级的表计。

#### (2) 对测量引线的要求

电位极引线的截面不应小于 $1.0\text{mm}^2 \sim 1.5\text{mm}^2$ ,电流极引线的截面由注入电流的大小决定,一般以 $5\text{A}/\text{mm}^2$ 来选择为宜。与被测接地极连接的导线的电阻应不大于被测接地电阻的2%~3%,并要求接地极的引线处需进行除锈处理,使接触良好,以减小接触电阻和测量误差。

由于测量时必须多次卷绕使用引线,因此应选择绕性引线。在确定使用引线的长度时,要考虑到现场的温度。引线的绝缘应不因低温而冻硬或断裂。使用引线的阻抗应较低,在测量较低的接地电阻时更应如此。

#### (3) 对测量电极的要求

最常用的电极是垂直接地极,应选用不易弯曲的表面光滑的钢筋作垂直接地极。不应使用螺纹钢,因为螺纹会卷起泥土,在螺纹钢的螺纹面上形成空气层,从而引起高接触电阻。被打入的接地极能挤出四周的土壤,使接触电阻变小。

为减小测量接地电阻的误差,要求电位极在地中与周围土壤接触紧密,减小接触电阻,从而使电位极本身的接地电阻 $R_x$ 减小,提高测量精度,若对其尺寸无具体要求,采用地阻仪中的接地极即可。

电流极宜采用直径为 $25\text{mm} \sim 50\text{mm}$ ,长度为 $1\text{m} \sim 3\text{m}$ 的圆钢或钢管,管的一端锯成斜面,便于打入土壤中,接地极应露出地面 $150\text{mm} \sim 200\text{mm}$ ,便于连接引线。电流极的电阻由于与电源串联,因此是影响试验电流的一个因素。如果该电流过小,则要打入另外的垂直接地极以降低电流极的电阻。电流极的根数是决定注入电流大小的关键,如果电流极的接地电阻小,在电源电压不变的情况下可望获得更大的注入电流,从而使测量准确。

在多岩石的土壤,可将接地极与垂直方向成一定角度斜向打入,倾斜的接地极可躲开石头的顶部。多根电流极时,要求电流极间的距离在 $2\text{m} \sim 5\text{m}$ 。

#### (4) 测量时应注意的问题

试验中最常出现的问题均由土壤中的杂散电流和试验引线间的耦合所引起。土壤的导电实际上是电解导电,因此在辅助电极上会产生反电压。消除电解效应的简易方法是采用交流试验电流。如果该交流电流是工频,则电解作用不会消失,交流工频杂散电流可能还会影响试验数据。在更高的频率时,电解作用可忽略不计,但试验引线的自阻抗和互阻抗增加,又会引出新的误差。此外,在进行阻抗测量时,高频的电抗分量值将与工频的

电抗分量值不同,通常采用 80 Hz 数量级频率的折中办法是可取的。

如果使用直流电流,则电感和互感抗的效应可消失,但电解作用则很强。这问题可通过周期性地反转直流电流的极性来解决。此时,电感和互阻抗的效应仅在暂态过程时比较明显,如果各个回路的时间常数足够小,这个效应可忽略不计,在电流换向时使电路完全断开的周期性换向直流电流,是进行接地电阻或土壤电阻率测量的最佳电源,但对于接地阻抗测量则并非如此。

如果待测接地装置和测量电极间的间距特别大,则用三极法可得到比较满意的试验数据。在进行大型变电站接地电阻的测量时,用几盘试验引线可能不能达到足够的间距。此时可以将一回线断电,将试验电流通过该线路注入远方的地(电流极)。如果知道电话电缆的屏蔽因数,则在某些情况下可用电话电缆作为电位引线使用。

## 6.5 影响三极法测量结果的因素

前面介绍的测量接地电阻的方法,在一定条件下其测试结果是可信的。但实际情况错综复杂,不可能完全满足精确测量所要求的条件,这就给测量带来了误差。影响测量的因素很多,如地下地质的分布可能存在横向断面变化,如出现悬崖、陡坡或陡坎空间等,进行土壤电阻率或接地电阻测量时,测量电极之一可能跨越不同电阻率的地质,使地中电流分布发生畸变。对已经投入运行的接地网进行现场测量时,可能存在零序电流的干扰、与变电站相连的架空地线对测量时注入地中电流的分流作用,以及测量引线间或它们与架空线间存在的互感等都会影响测试结果的准确度。

测量时接地极到远方大地的接地电阻的计算值或理论值与所测值可能相差较大,其原因是:

- (1) 计算接地电阻所用的方法不合适;
- (2) 测量时的土壤条件不同,即测量时的土壤电阻率与计算时所采用的土壤电阻率不同;
- (3) 土壤电阻率测量不准或测量范围较小,如试验的次数不够、数据分散、电极间距和所用仪器不合适;
- (4) 邻近的土壤中埋入金属结构和接地线,这些可能转移了一定量的试验电流。

为了减少土壤电阻率和接地电阻之间的不对应程度,建议在相似气候和湿度条件下进行土壤电阻率和接地电阻的测量。

如果所测的数值作为设计接地极的依据,则应在各种气候条件下测量。这将有助于设计人员建立最极限的条件,特别对于受季节条件影响较大的小型接地装置更有必要。

### 1. 工频干扰的影响及消除

工频干扰主要是由于电力系统的不平衡电流  $I_0$  (即零序电流分量) 在被测接地网上的工频压降造成的。有时此种干扰电压可高达 5 V~10 V, 可见干扰电压  $U_0$  的影响是不容忽视的。

可采取倒相法来消除工频干扰电压引起的测量误差,如图 6.4.1 所示,通过倒相开关

K 改变注入地网的测量电流的极性,在保持注入地网的电流  $I$  不变的情况下,在正、反极性下分别测得电压  $U_1$  和  $U_2$ ,由于干扰电压  $U_0$  与  $U_1$  或  $U_2$  不同相位,需要采用矢量法来求出被测地网的实际电压  $U=IR$ ,如图 6.5.1 所示,可计算得到地网的实际电压  $U$  为

$$U = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 - 2U_0^2}{2}} \quad (6.5.1)$$

实测接地电阻  $R$  为

$$R = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 - 2U_0^2}{2I^2}} \quad (6.5.2)$$

为了减小干扰电压  $U_0$ ,在现场测量中还可以采取如下具体措施:

(1) 采用单独的中性点不接地的变压器供给测量电源;

(2) 提高被测地网的测量电流  $I$  以提高其对电位极的压降,降低干扰电压的影响。

当试验电源的容量一定时,可采用降低电流极 C 的接地电阻的办法来增大电流;

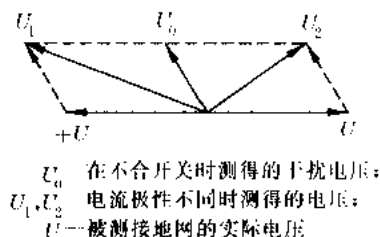


图 6.5.1 倒相法测量地网接地电阻时的被测电压的矢量图

(3) 断开用接地网及零线作用回路的单相负荷;

(4) 临时断开与地网连接的低压系统的电源中性点,以防地电位抬高后可能对低压电器设备造成反击;

(5) 在变电站或发电厂投入运行后,测量其接地网的接地电阻时,应尽可能使变电站或发电厂运行在最小方式下以降低流经中性点的电流;

(6) 使测量用的电位极和电流极的引线远离架空输电线。

## 2. 电位极和电流极引线间的互感的影响及消除

这主要指采用电位极和电流极直线布置时的接地电阻的测试方法。如采用三角形布置,在电位极与电流极的夹角为  $30^\circ$ ,  $S_{cx} = S_{cp}$  的情况下,满足  $D_{AB} \geq 10m$  就可以减小电位极与电流极引线间的互感电势的影响,但采用这种方法时,如果采用架空线作测量引线,则需要涉及到两回输电线路的停电,而且不易使其夹角为  $30^\circ$ 。

在采用直线布置测量大型地网接地电阻时,由于地网面积比较大,地网对角线  $D$  的长度可达几百米,当采用  $4D \sim 5D$  时,电流线长度需要  $9km$ ,如果采用一条停电架空线中的一相作电流线,另一相作电压线,由于二者在很长范围内平行,其互感电势造成的误差较大。

两条平行线间的互感  $M$  可采用下式估算