

电 器 检 修 与 试 验

大 连 电 力 工 业 学 校 徐 绪 椿 主 编
南 方 职 业 技 术 教 育 学 会 王 川 波 主 审

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书主要讲述各种电力电器的结构、作用、原理、检修、维护、试验等方面的基本知识和操作技术。内容包括：电器检修与试验的基本知识；电介质、电弧的基本理论和电气触头；低压开关及熔断器；高压断路器及其操动机构；隔离开关及其操动机构；绝缘子及母线；电力电缆；互感器；成套配电装置；接地装置和避雷器；消弧线圈、电抗器及阻波器；电力电容器和蓄电池等。

本书可供电力工业学校、中专、技校电气类专业作为教材，也可供其他职业技术学校电气类专业选用，还可作为有关技术工人培训或自学用书，并供从事电气类专业的技术人员和教学人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电器检修与试验/徐绪椿主编. 王川波主审. —北京：中国水利水电出版社，1996

ISBN 7-80124-186-X

I. 电… II. 徐… 王… III. ①电器-检修②电器-试验 IV. TM50

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 20062 号

书 名	电器检修与试验
作 者	大连电力工业学校 徐绪椿 主编 南方职业技术教育学会 王川波 主审
出版、发行 经 售	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号 100044） 全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 16 印张 371 千字
版 次	1997 年 5 月第一版 1998 年 3 月北京第二次印刷
印 数	4071—9900 册
定 价	25.00 元

前 言

南方职业技术教育学会在全国电力职教界选聘、组织了一批专家，依据电力工业学校电气类专业教学计划与教学大纲，编审了一套职业技术教材，包括：《电工工艺》、《电器检修与试验》、《发变电站一次系统》、《电机及其运行与检修（Ⅰ）》（基础知识）、《电机及其运行与检修（Ⅱ）》（运行技术）、《电机及其运行与检修（Ⅲ）》（检修试验）、《电工测量技术》、《高压电气绝缘及测试》等，并陆续出版发行。

《电器检修与试验》一书，是依据全国电力工业学校《电器检修与试验教学大纲》编审而成。本书针对职业技术学校（含电力工业学校、中专、技校）培养操作型、应用型技术人才的要求和电气类专业特点，内容上融理论、实习、试验于一体，并结合实际，深入浅出；文字上语言简炼，通俗易懂；全书图文并茂，便于读者自学和操作训练。此外，编审者特别留意在电器及其检修与试验领域融入当今国内外成熟的先进技术，有助于职业技术教育面向现代化。本书主要适用于发电厂及变电站电气运行与检修专业、发电厂及电力系统运行专业、发电厂及变电站电气设备安装与检修专业以及其他电气类专业，还可供电力中专、技校以及各类培训班的相关专业选用。

《电器检修与试验》由大连电力工业学校高级讲师、全国电气类专业教研会委员徐绪椿主编，大连电力工业学校于珍华、保定电力学校卢文鹏参编；由南方职业技术教育学会理事长、云南省电力技工学校高级讲师王川波主审，云南电力工业学校曾繁茂参审。

在本书的编审过程中，得到电力部职业技术教育研究中心教材建设研究室、全国电气类专业教学研究会、辽宁省电力局、云南省电力局的积极支持，在此表示衷心的感谢！

尽管各方面对本书的编审作了相当大的努力，仍然难免存在不妥以至错误，恳请读者提出宝贵意见；意见请寄：云南开远市滇南发电总厂离退休办公室曾庆澄高级工程师收，邮编 661000。

南方职业技术教育学会

1996年8月

目 录

前 言

第一章 电器检修与试验的基本知识

第一节 概述	1
第二节 检修工具和仪器	3
第三节 高电压试验设备	8

第二章 电介质、电弧的基本理论和电气触头

16

第一节 电介质的基本理论概述	16
第二节 电弧的基本理论	24
第三节 电气触头	33

第三章 低压开关及熔断器

39

第一节 闸刀开关	39
第二节 交流接触器和磁力起动器	41
第三节 自动空气开关和灭磁开关	48
第四节 熔断器	55

第四章 高压断路器及其操动机构

64

第一节 概述	64
第二节 户内少油式断路器	66
第三节 户外少油式断路器	73
第四节 压缩空气断路器	80
第五节 六氟化硫断路器	85
第六节 真空断路器	91
第七节 高压断路器的操动机构	92
第八节 断路器的试验	106

第五章 隔离开关及其操动机构

112

第一节 概述	112
第二节 户内式隔离开关	113
第三节 户外式隔离开关	116
第四节 隔离开关的操动机构	119
第五节 隔离开关的检修和试验	122

第六章 绝缘子及母线

125

第一节 绝缘子	125
第二节 母线	131
第三节 绝缘子、套管及母线的试验	139

第七章 电力电缆	146
第一节 概述	146
第二节 电缆终端头和中间接头的制作	151
第三节 电缆的试验和故障点查找	160
第八章 互感器	168
第一节 电流互感器	168
第二节 电压互感器	176
第三节 互感器的检修和试验	183
第九章 成套配电装置	186
第一节 高低压成套配电装置	186
第二节 组合电器	199
第十章 接地装置和避雷器	208
第一节 接地装置	208
第二节 避雷器	215
第十一章 消弧线圈、电抗器及阻波器	226
第一节 消弧线圈	226
第二节 电抗器及阻波器	229
第十二章 电力电容器和蓄电池	233
第一节 电力电容器	233
第二节 蓄电池	240
附录 一球接地时的球隙放电电压表	248

第一章 电器检修与试验的基本知识

第一节 概 述

一、电器检修与试验工作的目的和分类

对发电厂和变电所的电器，进行定期的检修与试验，是提高设备健康水平、预防设备损坏、确保安全、满发及经济运行的重要措施之一。通过对电器进行“以预防为主”的有计划检修，及其按规程规定的项目和周期进行的交接和预防性试验，将达到以下目的：

- (1) 通过检修，消除设备缺陷，排除隐患，使设备安全运行。
- (2) 通过检修，保持和恢复设备的铭牌出力，延长设备的使用年限。
- (3) 通过检修，提高和保持设备的最高效率，提高设备利用率。
- (4) 通过预防性试验和检修前的试验，检测设备健康状况和损坏程度，为制定检修项目提供线索和依据。

(5) 通过交接试验，检测安装和检修的质量，并判断设备能否投入运行。

电器的检修与试验工作，往往是相互配合进行。检修主要分为大修和小修两种。大修是对设备进行较全面的检查、清扫和修理，其时间间隔较长；小修是消除设备在运行中发现的缺陷，并重点检查易磨易损部件，进行必要的处理，或进行必要的清扫和试验，其间隔时间较短。所谓检修间隔时间，是指两次同类型检修所相隔时间，称为检修周期。各种电器的大、小修间隔时间，已在部颁《火力发电厂检修规程》中作了规定。此外还有事故检修，它是指当电器发生故障后，被迫进行的对其损坏部分进行的检查、修理和更换。

为了提高设备出力或改进设备工作条件而进行的改进工程，一般均和大修工作同时配合进行。

交接试验是在电器安装或检修后，按规程规定的项目进行的试验，以检测安装质量和检修的效果，并判断该设备能否投入运行。

所谓预防性试验，是指对经过一定时间运行（规程规定的试验周期）的电器，不论运行情况如何，都要进行的试验。由于机械、电场、温度的作用以及潮湿、脏污等外界因素的影响，绝缘性能将劣化并产生各种形式的缺陷，定期进行测试，可以及时发现隐藏的缺陷及其严重程度，以便及时维护及检修，防范事故于未然。

二、大修前的准备工作

根据规程规定，主要设备大修的准备工作包括：

(1) 编制大修项目表。根据年度检修计划、设备缺陷、运行情况、上次大修总结、小修查核结果以及决定采用的技术革新项目和先进经验等，在现场查对、深入分析各项技术资料的基础上，做好必要的设计、试验和鉴定工作，从而落实检修项目。

(2) 拟定大修的控制进度，安排班组的施工进度。

(3) 制定必要的技术措施和安全措施。

(4) 做好物资准备（包括材料、备品配件、工具、起重搬运设施、试验设备、安全用具

等)及场地布置。

(5) 准备好技术记录表格,确定应测绘的和校核的备品配件图纸。

(6) 组织班组讨论大修计划、项目、进度、措施和质量要求,做好劳动力安排和特种工艺培训,协调班组和工种间的配合工作,并确定检修项目的施工和验收负责人。

在大修准备工作中,应充分考虑检修工作的机械化并为此作好准备。大修内容基本相同的检修项目,如一般检修项目的准备工作(包括试验措施、技术记录等)应尽可能定型化,以提高工作效率。

重大的特殊检修项目,应指定专人进行准备。制造周期长的备品配件和特殊材料必须尽早落实。此外,还应在大修前的一次小修中,详细检查设备,核实设备的技术状况和年度计划中的特殊项目,必要时应修改技术措施。

三、大修的组织和管理工作

大修施工期间是检修和试验工作高度集中的阶段,必须做好各项组织管理工作。为了抓紧时间,集中力量,有秩序的进行检修和试验,所有检修和试验工作可分专业齐头并行。检修负责人应随时掌握施工进度,合理组织工序,及时做好劳动力、特殊工种、修配加工、施工机具和材料供应等各方面的平衡调度工作,特别是抓好关键项目的检修及设备解体后和检修结尾阶段的综合平衡工作,确保施工进度。

在检修过程中,要采取必要的安全措施,严格执行安全工作规程,加强宣传教育,不断提高职工的安全思想,确保施工中人身和设备安全。

严格执行工艺措施,树立质量第一的思想。养成规矩整齐、干净利落、严肃认真、一丝不苟的优良工艺作风;要正确使用材料、工具、仪表和仪器;贯彻岗位责任制,确保检修质量。

积极采取措施提高工效,缩短检修工期。树立安全经济的全面观点,养成勤俭节约的风气,合理更换部件,精打细算,节约器材。

在检修过程中,应及时作好技术记录,包括设备技术状况、系统或结构的改变,以及有关试验和测试的数据等,记录要做到正确完整、简明实用。

四、检修后的验收和总结

为了保证检修质量,电器检修后必须做好质量检查和验收工作。质量验收实行班组、车间、厂部三级验收制度。施工工艺比较简单的检修工序,一般由检修人员自检,然后由班组长复检验收;重要工序视其工艺的复杂性和部件的重要性不同,分别由班长、专业人员或检修负责人验收。有关各项技术监督的验收项目,应由专业人员参加验收。

在检查检修质量、检修项目、技术记录和有关资料后,还需要进行分部试运行(包括分部试验),最后根据质量检验、分部试运行以及现场检查的结果,由总工程师决定启动和整体试运行。整体试运行包括各项冷状态和热状态试验和带负荷试运行。若没有发现缺陷,运行情况正常,由总工程师批准正式交给电力系统调度管理。

主要设备大修结束后,应及时进行总结,对主要设备进行评级和对检修工作进行评价,并在30天内写出大修总结报告。同时应整理检修技术记录、试验报告等技术文件,归档保存。

第二节 检修工具和仪器

一、检修工具

(一) 常用工具

电工随身携带的工具,包括电工钢丝钳、螺丝刀、活动扳手、电工刀、验电笔等。其中钢丝钳、螺丝刀和活动扳手,均以其本身的长度为规格,一般相邻两种规格之间相差 25 mm [相当于 1 in (英寸)]。常用的钢丝钳有 150、175、200 mm 规格(相当于 6~8 in);螺丝刀有直口和十字花两种,其规格有 50、75、125 mm 和 150 mm 等几种(相当于 2~6 in);活动扳手有 100、125、150、200、250、300 mm 几种规格(相当于 4~12 in)。

使用电工工具时,应注意以下事项:

(1) 使用钢丝钳时,应检查钳柄绝缘是否良好可靠,以免带电作业时发生触电事故。剪切电线时,要一根一根的剪,以防造成短路。

(2) 螺丝刀的选用应与所旋螺钉相配合,使用时应对正螺钉垂直用力,若选用螺丝刀过小、或不垂直用力,都容易损伤豁口或使螺丝刀口卷折,选大了则插不进豁口。从事电气工作不应使用穿芯螺丝刀,并宜将金属杆上套以绝缘软管,以防带电作业时触电或引起短路。

(3) 使用电工刀时,应刀口向外用力,以免刀口滑脱时划伤自己。使用完毕应将刀身折入刀柄。

(4) 使用活动扳手时,应适当调节扳口的开距,套上后务必使扳唇夹紧螺母,以防用力扳动时打滑,损伤螺母或碰伤手指。活动扳手不宜反过来使用,以免损坏扳唇。

(5) 验电笔在接触带电体时氖光管发亮。所以使用前,应验证其本身的完好性。其方法是拿验电笔接触一下明知带电的地方,若氖光管亮,则表明验电笔是好的。验电时,要使氖光管背光朝向自己。若验电笔接触设备氖光管不亮时,需用验电笔笔尖再接触几次验电点或更换验电点再测试一次,以免判断错误。

(二) 喷灯

喷灯是一种加热工具,在电气设备安装和检修工作中经常使用。其结构如图 1-1 所示。它是将燃油加热汽化后与空气混合喷出点燃,产生高温火焰,用以对设备进行局部加热之用。

1. 喷灯的使用方法

(1) 旋下加油口螺丝注入燃油,油量只能加到油桶容量的 3/4,让桶内保留一定的空间贮存压缩空气,以维持桶内必要的压力。加完油后,拧紧加油螺丝并擦净桶外的油污。

(2) 在预热盘中注入燃油,并把撒在周围的油擦净,然后将预热盘中的油点燃,给汽化管加热,使管中的油汽化。

(3) 待预热盘中的油燃尽时,用气筒先打 3、4 下将燃油压入汽化管中汽化,然后慢慢拧开调节阀,使汽化了的燃油经喷嘴喷入喷焰管与空气混合,再经喷焰管喷出混合了的可燃气体,点燃成为火焰。如果喷出的火焰正常,可打足气并调节增大火焰,使喷出的火焰由橘红色渐渐变为纯蓝色时方可使用。如果喷出的火焰不正常,表明有漏气或堵塞现象,应

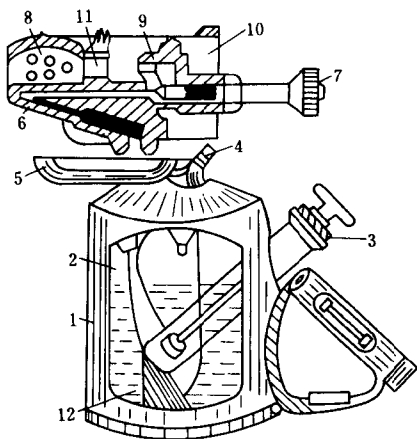


图 1-1 喷灯结构

1—油桶；2—气室；3—气筒；4—加油口螺丝；
5—预热盘；6—汽化管；7—调节阀；8—喷焰
管；9—喷嘴；10—风罩 11—混合空气管；12—
安全销

设法消除漏气或用通针疏通喷嘴。

(4) 熄灭喷灯时，先关闭调节阀，使火焰自行熄灭，待冷却几分钟后，旋松加油口螺丝，放出油桶里的空气。

2. 使用喷灯时的注意事项

(1) 喷灯常用的燃料为汽油或煤油，但两者不可混合使用。

(2) 使用喷灯时不能戴手套。

(3) 严禁在有火的地方加油。

(4) 加油或放气后应将螺丝口拧紧。

(5) 不准用点燃的喷灯的喷火口对着人身、设备、器材或其他易燃物品。

(三) 电钻

电钻是一种电动钻孔工具，小孔径电钻一般采用交直流两用单相串激电动机，大孔径电钻则用三相感应电动机。使用时应注意以下事项：

(1) 使用前应核对电源电压是否与铭牌相符，检查电源线路是否有熔断器保护和检查接地线是否完好。

(2) 使用的钻头必须锋利，钻孔时不要用力过猛以免电机过载。如发现电钻转速降低，应立即切断电源进行检查，以防烧坏电机。

(3) 应随时防止电源软线被轧坏、割破或擦伤，携带电钻时不要提着橡胶软线而要提着电钻本身。

(4) 装、拆钻头必须用钳夹钥匙夹紧或拧松，不可用其他工具敲打夹头。

(5) 电钻在使用时，外壳温度不得超过 45°C 。

(6) 禁止戴手套使用电钻。

(7) 对交、直流两用电钻的换向器，应注意清除污垢，及时更换磨损的电刷及调整其弹簧的压力。

二、常用仪器

(一) 钳形电流表

钳形电流表是根据电流互感器的原理制成的，只适用于交流电路的测量，如图 1-2 所示。它有一个可开闭的铁芯，铁芯上有一个二次线圈与电流表相接。测量时只须将被测量的导线钳入铁芯内（不必串联在电路中）形成单匝的一次线圈，即可测量出该导线电流的数值。使用钳形电流表时的注意事项为：

(1) 测量前应估计被测电流的大小，用量程调节开关，选择适当的量程。张开钳形铁芯的动臂，将被测导线钳入铁芯中间，即可读数。

(2) 钳形铁芯的橡胶绝缘应保持完好无损，钳口要清洁不能生锈。测量时钳口应对齐吻合，不能同时测量两根导线的电流。

(3) 钳形电流表的耐压水平较低，通常只适用于低电压，所以不能用钳形电流表测量高

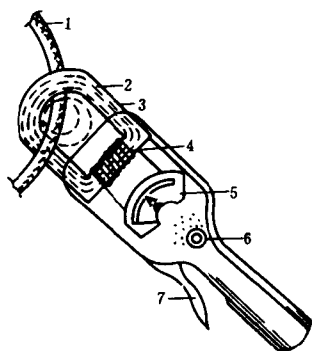


图 1-2 钳形电流表

1—被测导线；2—铁芯；3—磁通；
4—二次线圈；5—表头；6—量程
调节开关；7—使铁芯张开的手柄

压电流，以免发生触电或短路事故。

(4) 测量时应避免外界磁场的影响，尽量不要在铁磁材料和带电导体附近进行测量，以减少误差。

(二) 兆欧表 (又称为摇表)

兆欧表用来测量电器的绝缘电阻和吸收比，是电器试验和检修工作中最常用的仪器之一。兆欧表的结构，由一个手摇直流发电机（常用交流发电机通过半导体整流代替）和一个流比式测量机构组成，原理接线如图 1-3 所示。流比式测量机构是在永久磁铁内由两个固定在一起互相垂直的线圈 1 和线圈 2 构成。当测量端子接入试品 R_x 时，两个线圈就并联在直流发电机的两条并联支路上。摇动手柄至 120 r/min 并保持稳定，在电压 U 作用下，电流 i_1 、 i_2 分别流过线圈 1 和 2，在磁场中产生方向相反的两个力矩，在力矩差的作用下，线圈带动指针偏转至力矩平衡为止，指针的偏转角 α 与两支路中电流的比值有关，即

$$\alpha = f(i_1/i_2) \quad (1-1)$$

因为 i_1 与试品的绝缘电阻 R_x 成反比， i_2 保持恒定，所以偏转角 α 随试品的绝缘电阻的增加而减小。兆欧表的额定电压有 500、1000、2500 V 几种。由于手摇发电机的容量很小，测量时电压下降很厉害，所以采用流比式测量机构，以减少误差。

1. 接线方法

兆欧表上有线路 (L)、地 (E) 和屏蔽 (G) 三个接线端子，按测量对象的不同来选用。如测量电缆芯对地绝缘电阻时，将线路端子 (L) 接缆芯，地端子 (E) 接电缆铅 (铝) 包外皮 (即接地)，如图 1-4 (a) 所示；测量任意两根缆芯线间的绝缘电阻时，线路端子与地端子分别接所测的两条电缆芯线，如图 1-4 (b) 所示；为了避免由于绝缘表面通过的泄漏电流对测量结果造成的误差，应在线路端子所接缆芯周围的绝缘表面上加装保护环 (即用铜导线在绝缘表面缠绕几匝) 并接在屏蔽端子 (G) 上，使绝缘表面通过的泄漏电流不经过兆欧表的测量线圈，如图 1-4 (c) 所示。

2. 测量步骤及注意事项

(1) 根据被试设备的额定电压选择兆欧表的额定电压。兆欧表的电压选择过高，试验时可能造成绝缘的损坏。一般低压电器选用 500 V 兆欧表；高压 1000 V 以上的电器，选用 2500 V 兆欧表。

(2) 检查兆欧表。先将兆欧表开路，摇动手柄至额定转速 (120 r/min) 指针应指向“ ∞ ”，然后将线路与地端子短接，摇动手柄，指针应指向“0”，否则应更换兆欧表或修理后再使用。

(3) 将被试设备脱离电源并放电。试

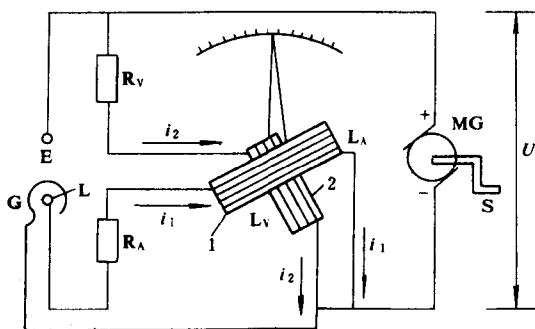


图 1-3 兆欧表原理接线图

MG—手摇直流发电机； L_A 、 L_v —电流、电压线圈； R_A 、 R_v —电流、电压支路电阻；E、L—测试接线端子；G—屏蔽接线端子

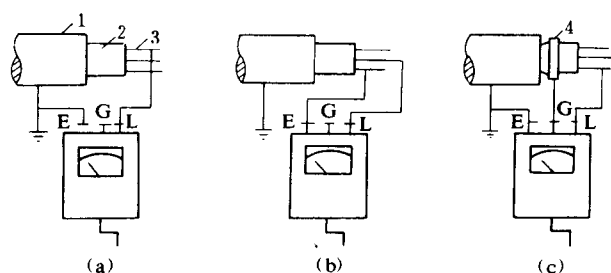


图 1-4 用兆欧表测绝缘电阻的接线

(a) 测对地绝缘；(b) 测线芯间绝缘；

(c) 加保护环对地测绝缘

1—电缆金属外皮；2—电缆绝缘；3—电缆线芯；4—保护环

验前应将运行设备的电源切除并对地进行充分的放电,对大中型变压器、电缆、电容器等大电容的被试设备,放电时间不得少于 2 min。放电后,还应该把设备表面清扫干净。

(4) 按前述方法进行接线。测量用的连接导线应是不同颜色绝缘良好的单根导线,连线不可互相绞缠或紧靠在一起,线路端子引线不可放在地上,以免因漏电而增加测量误差。

(5) 均匀摇动兆欧表手柄保持额定转速,观察兆欧表的指示并记录时

间,读取 15 s 和 60 s 时的绝缘电阻 R_{15} 和 R_{60} 。计算吸收比 $K=R_{60}/R_{15}$,并以 R_{60} 为设备的绝缘电阻。

(6) 对大中型变压器、电缆、电容器等大电容的被试设备测量读数后,应先将兆欧表从测量回路中断开后,再停止摇动手柄,以免设备向兆欧表反放电造成兆欧表损坏。测试完毕,还须将被试设备对地进行放电。

(7) 记录测量结果,同时记录测量时的温度与湿度,以便对试验结果进行校正。

(8) 双回路架空线或母线,当其中一路带电时,不得测量另一路绝缘电阻,以防感应的高电压损坏兆欧表或危及人身安全。雷电时禁止在停电的架空线路上测量绝缘电阻。

(9) 严禁在有人工作的线路和设备上测量绝缘电阻,以防危及人身安全。

(10) 在兆欧表没有停止转动或被测电器没有充分放电之前,不可用手接触被测电器及兆欧表的接线端。

(三) 接地电阻测定仪

接地电阻测定仪是用来测量各种接地装置的接地电阻和土壤电阻率的仪器,也称为接地摇表。接地电阻测定仪的型号较多,使用方法也不相同,但基本原理是一致的。国产的 ZC-8 型接地电阻测定仪,用补偿法进行测量,其接线原理和电位分布如图 1-5 所示。

接地电阻是指接地电流通过土壤的散流电阻,也就是从接地体到零电位之间的电阻。在实际测量接地电阻时,考虑到距离接地体 15~20 m 处的电位为零,所以,只要测量接地体到 20 m 范围内土壤电阻即可。

ZC—8 型接地电阻测定仪是一个本身带有电源补偿式的测量电桥,由手摇交流发电机、电流互感器、检流计、调节电位器和倍率器组成。采用交流电测量,是为了避免接地装置产生极化现象。测量前,先将两根探测针插入地中,电位探测针 P' 插在被测接地极 E' 和电流探测针 C' 之间,彼此相距 20 m,并用专用的导线分别连接在仪表的 E、P、C 端子上。测量时,以 120 r/min 的转速摇动发电机,产生 90~95 Hz 的交流电流,电流经电流互感器 TA 一次绕组、被测接地极、大地、和探测针后回到发电机。电流互感器二次产生电流使检流计偏转,调节电位器 W 使检流计指零,达到平衡。此时检流计和电位探针中无电流通过,故 $IR_x = KIR_s$ (K 为电流互感器的变化),则

$$R_x = KR_s \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 可知, 当电流互感器变比为 1 时, R_s 的大小即为被测接地电阻 R_x 。“调节标度盘”即可按 R_s 进行刻度。旋动“调节标度盘”借助调节电位器使检流计指零。

ZC—8 型接地电阻测定仪的原理接线和外形如图 1-6 所示。接线端钮, 有三个和四个两种。三端钮式测定仪的“P₂”和“C₂”已在内部短接外壳上的“E”端子, 内部的“P₁”、“C₁”端钮, 接外壳上的“P”、“C”端子。为了扩大量程, 电路中接有三组不同的分压电阻 $R_1 \sim R_3$ 及 $R_5 \sim R_8$, 用来对电流互感器和检流计支路的分流。分流切换利用联动的切换开关 S 同时进行。对应转换开关的三个档位, 可以得到三个量程: 当切换开关 S 置于“1”档时, $K=1$ (即 $I_2=I_1$), 量程为 $0 \sim 1 \Omega$; S 置于“2”档时, $K=1/10$ (即 $I_2=I_1/10$), 量程为 $0 \sim 10 \Omega$; S 置于“3”档时, $K=1/100$ (即 $I_2=I_1/100$), 量程为 $0 \sim 100 \Omega$ 。

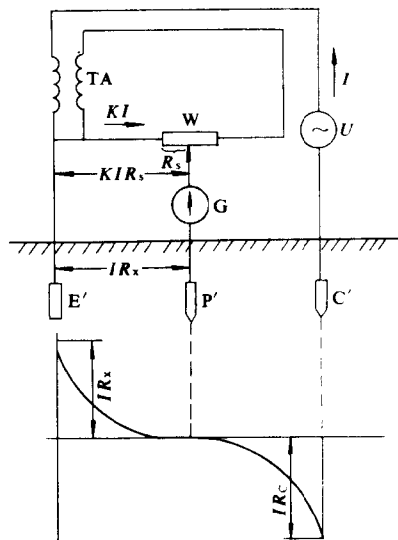


图 1-5 用补偿法测量接地电阻的原理接线及电位分布

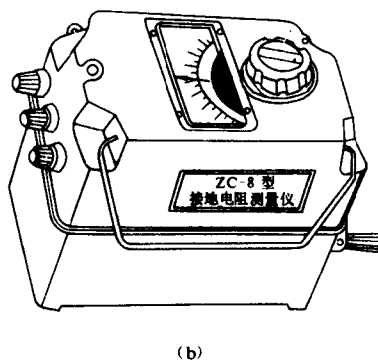
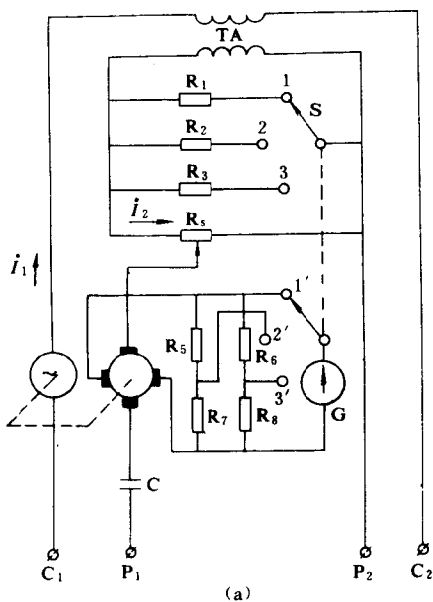


图 1-6 ZC-8 型接地电阻测量仪
(a) 原理接线图; (b) 外形图 (三端钮式)

由于采用磁电系检流计, 仪表设有机械整流器或相敏整流器, 以便将交流电流转换为直流电流后通过检流计, 并可消除地中杂散电流对测量的影响。在电位探针 P 电路中串联一个电容器 C, 隔断地中的直流杂散电流。

测量时，先将仪表放在水平位置，将检流计调零，调“倍率标度盘”至最大倍数，慢慢转动发电机把手，同时旋动“测量标度盘”，使检流计指零。当检流计指针接近指零红线时，加快速摇发电机转速至 120 r/min，同时调整“测量标度盘”，使检流计指针指在零位红线上，其“测量标度盘”上的读数乘以倍率，即为所测量的电阻值。若调节“测量标度盘”而检流计不能指零时，表明倍率选择不对，调节“倍率标度盘”选择适当的倍率。测量时，若检流计的灵敏度过高，可将电位探测针 P' 拔出一点；当检流计的灵敏度过低时，可向电位探测针 P' 和电流探测针 C' 注水，使其湿润。测量时，应将接地装置与被保护设备断开，以便得到准确的测量结果。

第三节 高电压试验设备

一、西林电桥

西林电桥是测量介质损失角正切值（即 $\tan \delta$ ，简称介损值）的高压试验设备，广泛应用于电器交接和绝缘预防性试验。

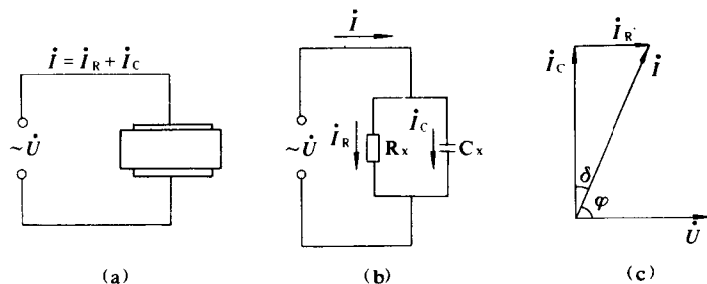


图 1-7 介质在交流电压作用下的等值电路及向量图

(a) 介质在交流电压作用时示意图；(b) 等值电路图；(c) 向量图

电介质在交流电压作用下，可以用一个理想的电容器和一个有效电阻并联所代替，其等值电路和对应的向量图，如图 1-7 所示。流过介质的电流包括有功和无功两个分量，即

$$I = I_R + jI_C \quad (1-3)$$

有功电流 I_R 反映介质的损耗；无功电容电流 I_C 反映介质的体积状况。两者之比可以反映电介质的绝缘品质，即

$$\begin{aligned} I_R &= U/R_x \\ I_C &= U\omega X_C \\ \tan \delta &= \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R_x}{U\omega X_C} = \frac{1}{\omega R_x C_x} \end{aligned} \quad (1-4)$$

(一) 西林电桥的结构原理

西林电桥也叫交流电桥，属于平衡电桥。西林电桥的种类很多，常用的有 QS₁ 型，试验电压 10 kV，由 CA、CB、AD、BD 四个桥臂组成：CA 为被试品的等值电路 (C_x 、 R_x 并联电路)；CB 为无损空气电容器 C_N ；AD 为无感可变电阻 R_3 ；BD 为无感电阻 R_4 和可变电

容 C_4 并联组成。在对角线 AB 上接有检流计 G。其原理接线如图 1-8 所示。

将试品接入电桥通电后, 调节 R_3 、 C_4 , 使检流计中电流为零, 即电桥达到平衡, 则桥臂 CA 与 CB、AD 与 BD 的电压降相等, 故桥臂间阻抗的关系为

$$\begin{aligned} Z_{CA}/Z_{CB} &= Z_{AD}/Z_{BD} \\ \text{即} \quad Z_{CA}Z_{BD} &= Z_{CB}Z_{AD} \end{aligned} \quad (1-5)$$

由图 1-8 可知

$$\begin{aligned} Z_{CA} &= \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}; Z_{BD} = \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4}; \\ Z_{CB} &= \frac{1}{j\omega C_N}; Z_{AD} = R_3 \end{aligned}$$

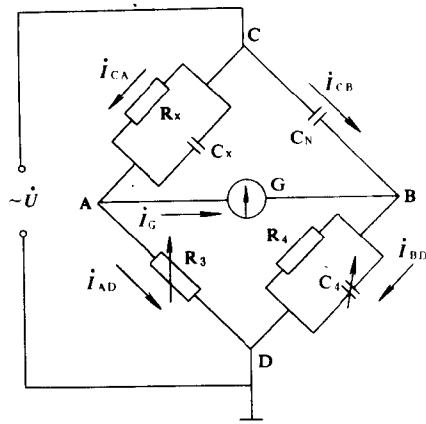


图 1-8 西林电桥原理接线图

代入平衡条件式 (1-5) 得

$$\frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x} \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4} = \frac{1}{j\omega C_N} R_3$$

简化为 $j\omega R_x R_4 C_N = R_3 - \omega^2 C_x C_4 R_3 R_4 R_x + j\omega R_3 (C_x R_x + C_4 R_4)$

交流电桥平衡必须在数量和相位上都相等, 则实数部分和虚数部分应分别相等, 即

$$R_3 - \omega^2 C_x C_4 R_3 R_4 R_x = 0; \omega C_4 R_4 = 1/\omega R_x C_x; \quad (1-6)$$

$$R_x R_4 C_N = R_3 (C_x R_x + C_4 R_4) \quad (1-7)$$

将式 (1-6) 代入式 (1-4) 得

$$\text{tg} \delta = 1/\omega R_x C_x = \omega C_4 R_4 \quad (1-8)$$

将式 (1-8) 代入式 (1-7) 得

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{1 + \text{tg}^2 \delta} \approx C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (\text{因 } \text{tg}^2 \delta \ll 1) \quad (1-9)$$

一般工频电源 $f = 50 \text{ Hz}$, $\omega = 100 \pi$ 。为了计算和读数, 在制造电桥时有意选配 $R_4 = 10000/\pi = 3184 \Omega$, 则

$$\text{tg} \delta (\%) = \omega C_4 R_4 = C_4 \times 10^6 \quad (1-10)$$

电容 C_4 的微法值, 即为 $\text{tg} \delta (\%)$ 值。为了在试验时读数取值方便, 制造电桥的分度盘时将 C_4 的微法值直接以 $\text{tg} \delta (\%)$ 来刻度。

(二) 西林电桥的接线方式

如图 1-8 所示, 西林电桥中的外接阻抗 Z_{CA} 、 Z_{CB} 比电桥本体中需要操作调节的阻抗 Z_{DA} 、 Z_{DB} 大得多, 外加高电压主要降落在 Z_{CA} 、 Z_{CB} 上。根据电桥本体 Z_{DA} 、 Z_{DB} 所处的电位高、低不同, 可分为正接线和反接线两种接线方式。

西林电桥的正接线如图 1-9 所示。被试品处于高压侧, 电桥本体 (图中虚线框内部分) 处于低压侧, 操作比较方便安全。为了确保人身安全, 在 A、B 两点应接有放电器 (图中未画出), 避免由于操作不当或其它原因在 A、B 两点出现高电位。采用正接线测量 $\text{tg} \delta$, 电桥内部不受强电场干扰, 准确度较高。但是要求被试品对地必须绝缘, 而现场的高压电器的一端通常是接地的, 所以正接线往往不适应现场的试验条件, 而多用于实验室。在现

场就地测试 $\text{tg}\delta$ ，如果能将一端接地的试品用绝缘台垫起来，应尽量使用正接线，以保证测量的准确度。

当测试一端接地的试品时，必须采用反接线方式。西林电桥的反接线，如图 1-10 所示。

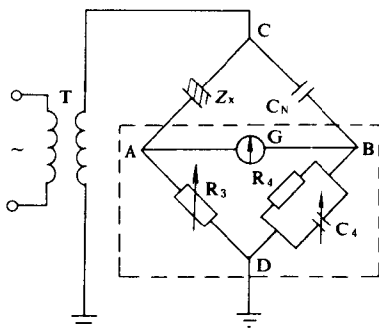


图 1-9 西林电桥的正接线

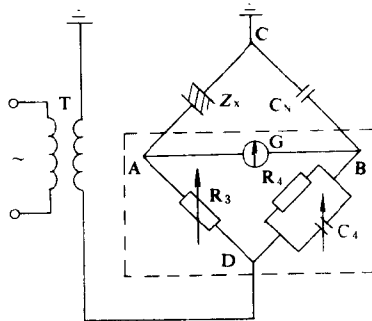


图 1-10 西林电桥的反接线

在反接线中被试品处于接地端，调节元件 R_3 、 C_4 处在高压端，因此电桥本体内的全部元件对机壳必须具有高绝缘强度。为了保证操作人员的安全，需要采取相应的安全措施，如将操作者和电桥本体都置于对地有良好绝缘的绝缘台上，使操作者与电桥本体处于等电位；或是试验人员通过绝缘连杆进行操作。

(三) $\text{tg}\delta$ 试验的注意事项

(1) 各种电器的介质损失随温度升高而增大，其换算系数随各种绝缘介质而不同。当试验温度低于 0°C 时，如果试品中含有水分就可能结冰，影响测试结果的准确性。因此一般要求试验时周围气温不宜低于 $+5^\circ\text{C}$ 。对于绝缘油，根据规定必须将油加热到 90°C （交接试验）或 70°C （定期试验）时方可进行试验，因此可不必进行温度换算。

(2) $\text{tg}\delta$ 的测试结果与试验人员操作的熟练程度有很大关系。如果试验人员操作不熟练，则很可能出现误判断。故要求试验人员精心操作。

(3) 试验时高压引线本身的绝缘稍有不良，会给试验结果造成很大的误差，因此试验时必须对试验仪器进行空载校对。

(4) $\text{tg}\delta$ 的测试结果受外界电场的影响很大。试验时应尽可能将试验仪器和被试品都远离电场。

二、试验变压器

工频高压试验变压器是高压试验室的基本设备之一，工作原理与电力变压器相同，其特点是电压高、容量不大，持续工作时间不长。试验变压器都是制成单相的，由于它在运行中不会受到很高的过电压，无需很大的绝缘裕度。试验变压器大多制成一极接地式，因而只有一个高压引出套管，如图 1-11 所示。

试验变压器的额定容量应满足试品电容电流和泄漏电流的要求，在被试品击穿或闪络时，应能短时间维持电弧。这就是说，试验变压器的容量，应保证正常试验时试品上的必须电压，和试品被击穿放电时，应保证有一定的短路电流。

较高的试验变压器，由于绝缘裕度较小，一般不允许在额定电压下持续运行，只有在电压和电流远低于额定值时才允许长期持续使用。当需要试验电压很高时，要制成单台的

试验变压器很不经济，通常采用 2~3 台单相试验变压器串接的方法获得，如图 1-12 所示。

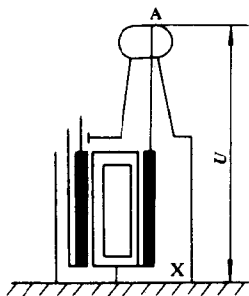


图 1-11 单套管试验变压器

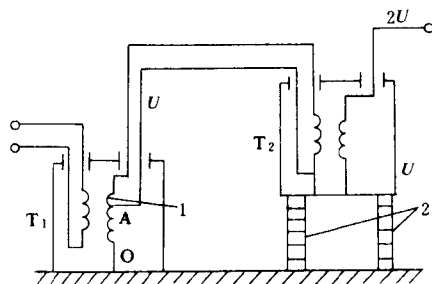


图 1-12 励磁绕组供电的串级连接变压器

1—供给第二级的励磁绕组；2—绝缘支架

工频试验变压器输出电压的调节与控制，是由给试验变压器加电压的调压器实现的。对调压器的要求是：电压由零至最大值可以均匀地调节，不引起电源波形畸变，电压和功率损耗小以及体积小、重量轻、调节方便、价格便宜等。通常有自耦调压和移圈调压两种方式。

自耦调压器调压，调压范围广、功率损耗小，输出波形较好，体积小携带方便，价格便宜。但因为使用滑动触头，容量受到限制。当试验变压器容量不大时（50 kVA 以下）是一种最好的调压方式。

移圈式调压器的工作原理如图 1-13 所示。线圈 C、D 串联，匝数相等绕向相反。线圈 K 是一个短路线圈，其匝数与 C、D 相同并套在 C、D 线圈之外，可以上、下移动，并以此调节电压。

调节电压的基本原理是：当 A—X 端加电源电压 U_1 后，假若没有动线圈 K，由于线圈 D、C 匝数的相等，D、C 上电压降落各为 $U_1/2$ 。但由于绕向相反，它们所产生的主磁通 ϕ_c 、 ϕ_d 也相反，只能分别穿过气隙形成闭合回路，见图 1-13 (b)。短路线圈 K 的存在，主磁通 ϕ_c 、 ϕ_d 在 K 中分别产生方向相反的感应电势（合成电势的大小与其所在位置有关）并形成短路电流，此电流在铁芯中

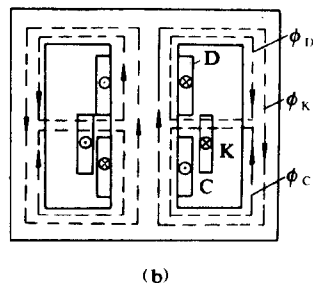
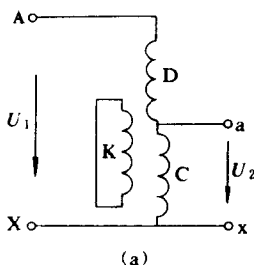


图 1-13 移圈调压器原理接线及结构

(a) 原理接线；(b) 结构示意图

产生闭合磁通 ϕ_k ， ϕ_k 又在线圈 C、D 中产生感应电动势，其大小和方向随动圈 K 所处的位置而变。当动圈 K 处于最下端时，动圈 K 只与 ϕ_c 交链，所产生的 ϕ_k 与 ϕ_c 的大小相等方向相反，则 ϕ_k 在线圈 C 中产生的电动势与 C 中原电动势的大小相等、方向相反，因此这时线圈 C 中几乎没有电压降落，电源电压几乎全部降落在线圈 D 上。这时，调压器输出端 a—x 上的输出电压 $U_2 \approx 0$ ；当动圈 K 处于最上端时，同理 ϕ_k 将在线圈 D 中产生一个与它原电势大小相等方向相反的感应电势，于是电源电压 U_1 就几乎全部降落在线圈 C 上，这时输出端 a—x 上的电压 $U_2 \approx U_1$ ；当动圈 K 处于 C、D 中间时，磁通 ϕ_c 、 ϕ_d 各交链动圈 K 匝数的

一半, 在 K 中产生的感应电动势大小相等方向相反, K 中不存在短路电流, 线圈 C、D 的电压降各为 $U_1/2$ 。这时输出端 a—x 电压为 $U_1/2$ 。由此可见, 当动圈 K 由最下端平稳移动到最上端时, 输出端的电压 U_2 , 也就由零逐渐上升到电压 U_1 , 起到调节电压的作用。

移圈式调压器因为没有滑动触头, 容量可以造得较大, 从几千伏安到几千千伏安。但它漏磁电抗和体积都较大。

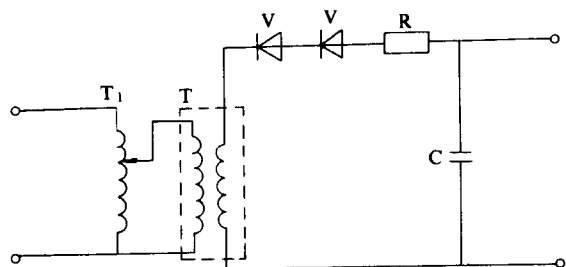


图 1-14 半波整流电路图

试验变压器 T、高压整流器 V、滤波电容器 C 和保护电阻 R 构成的正极性半波整流电路, 如图 1-14 所示。高压整流器过去使用的是高压整流管, 其平均工作电流较小 (一般为 30~50 mA), 还需要高绝缘的灯丝加热变压器, 且产生较强的放射线, 危害工作人员的健康, 现已被高压硅堆所取代。硅堆的整流电流较大, 且体积小, 使用简便, 坚固耐用。

试验变压器 T 将经过调压器 T_1 调节后的低压交流电压, 变成需要数值的高压交流电压经高压硅堆 V 整流成脉动电压, 向滤波电容器 C 充电, 在电容器的两端, 即可得到较稳定的直流高电压, 如图 1-15 所示。保护电阻 R 起限流作用, 是保护硅堆用的, 它限制起始充电电流或试品被击穿时的放电电流, 使其不超过硅堆的允许电流, 故又称为限流电阻, 它应满足 $u_m/R \leq I_0$ (I_0 为硅堆的平均工作电流, U_m 为试验变压器输出电压最大值)。

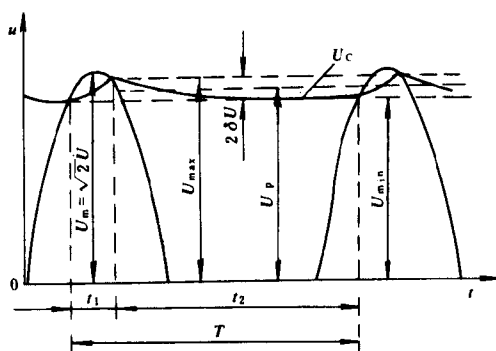


图 1-15 半波整流电路输出电压波形图

在整流电路中, 当电容 C 被充电到接近交流高压的幅值 $+U_m$ 后, 在硅堆不导通的半波中, 交流高压达 $-U_m$ 时, 硅堆 V 上将承受 $2U_m$ 的电压, 称为硅堆的最大反耐压, 它不得超过硅堆规定的反峰电压值。

滤波电容的作用是减少输出电压的脉动程度, 输出电压的脉动程度以脉动系数 S 来表征。脉动系数 S 为输出电压的脉动值 (输出电压的最大值与最小值之差) 与输出电压的平均值之比。脉动系数随负载电流的增大而增大, 随滤波电容的增大而减少, 通常要求 S 不大于 5%。

四、常用的高电压测量仪器

常用的高压测量仪器有高压静电电压表、球隙测压器和分压器等。