

电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材

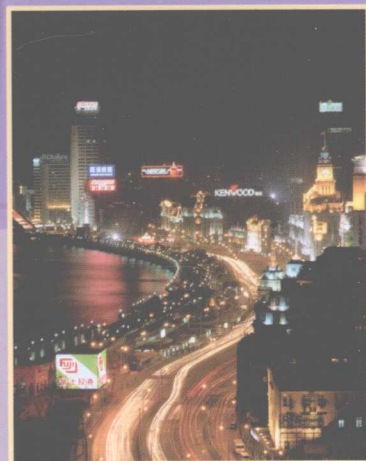
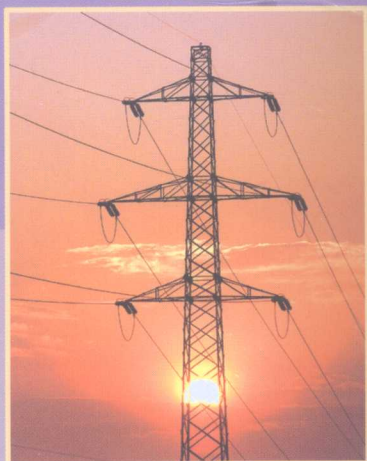
(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 徐义斌

电气试验工

主 编 王向臣

副主编 徐宏全 杜江



DIANQI SHIYANGONG

知识

技能

题库



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材
(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 徐义斌

电 气 试 验 工

主 编 王向臣
副主编 徐宏全 杜江



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据《电力工人技术等级标准》、《中华人民共和国职业技能鉴定规范》、职业技能鉴定指导书及相关国家标准、行业标准和岗位规范编写,为《电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材》之一。

本书共十章,内容包括:电气试验的意义和要求,电气设备的基本试验,电力变压器试验,断路器试验,互感器试验,防雷设备试验,电缆试验,接地装置试验,安全用具试验,微机继电保护装置运行管理及检验。为了便于学习和培训,每章后附有大量复习思考题与习题,并附有答案。

本书为岗位及职业技能鉴定培训教材,也可供相关技术人员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气试验工/丁毓山,徐义斌主编;王向臣分册主编.
北京:中国水利水电出版社,2009
电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材:初、中、
高级工及技师、高级技师适用
ISBN 978-7-5084-6774-0

I. 电… II. ①丁…②徐…③王… III. 电气设备-试验-
职业技能鉴定-教材 IV. TM64-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 150497 号

书 名	电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材 (初、中、高级工及技师、高级技师适用) 电气试验工
总 主 编	丁毓山 徐义斌
作 者	主 编 王向臣 副主编 徐宏全 杜 江
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 18.5 印张 439 千字
版 次	2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	39.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

有关电力工人技术等级及电力行业职业技能鉴定的培训教材已出版了很多,例如,由中国电力企业联合会名誉理事长张绍贤作序,原电力工业部副部长张凤祥和赵庆夫题词的《电力工人技术等级培训教材(初、中、高级工适用)》自1996年由中国水利水电出版社出版以来,已修订两次,共印刷了15次,总印数达100万册以上,深受电力系统广大读者的好评。但是,随着电力体制改革的深入,我国电力网正在向大电网、大电厂、超高压和特高压、核电站、高度自动化的方向前进,输电网和配电网正在经历着一次重大的变革,而变革最深、门类最多、面积最广的领域,还在配电网。110kV以下的配电网,在网络设备、接线方案、保护元件、运行方式、管理方法、操作工艺等方面,皆有不同程度的更新。可见,我国电力事业的发展速度是惊人的。面对电力系统这种发展的新形势,以往教材的内容已略显陈旧,特别是有些内容与当代的现实相差较远。为了配合新形势下电力系统人员培训的需要,中国水利水电出版社组织有关专家和培训一线的教师编写这套教材。其编写宗旨是:保证编写质量,反映电力新技术、新设备、新方法,以满足当前电力企业的培训要求。全书包含三方面内容:知识、技能和题库。

本培训教材总主编聘请了辽宁省电力公司、铁岭电力公司、抚顺电力公司、海城供电公司、沈阳电力公司所属法库农电公司和于洪供电公司、沈阳农业大学信息电气工程学院、华北电力大学、中国农业大学信息电气工程学院、沈阳大学有关专家和教授参与编写。编写的原则是:不要求面面俱到,力求少而精,抓住重点,深入浅出。本着这些原则,本书共分十章:电气试验的意义和要求,电气设备的基本试验,电力变压器试验,断路器试验,互感器试验,防雷设备试验,电缆试验,接地装置试验,安全用具试验,微机继电保护装置运行管理及检验。每章后面皆附有复习思考题与习题,并附有答案。为了配合教学中使用,在书中标有(*)者,适于中级工使用;标有(**)者,适于高级工、技师、高级技师使用;没有标注者适于初级工使用。

本书编写人员有:王向臣、徐宏全、于景文、杜江、周世新、吴运峰、

赵友鹏、金永柱、苗庆仁、刘武、杜琳。

参加本书部分编写工作的还有：叶常容、黄书红、张强、王卫东、石威杰、贺和平、潘利杰、张娜、石宝香、李新歌、尹建华、苏跃华、刘海龙、李小方、李爱丽、王志玲、李自雄、陈海龙、韩国民、刘力侨、任翠兰、张洋、李翱翔、孙雅欣、李景、赵振国、任芳、吴爽、李勇高、杜涛涛、李启明、郭会霞、霍胜木、李青丽、谢成康、马荣花、张贺丽、薛金梅、李荣芳、孙洋洋、余小冬、丁爱荣、王文举、徐文华、李键、孙运生、王敏州、杨国伟、刘红军、白春东、魏健良、周凤春、董小玫、吕会勤、孙金力、孙建华、孙志红、孙东生、王惊、李丽丽等。

作者虽尽了很大努力，但疏漏之处定然难免，深望广大读者多加批评指正。

作者

2009年5月于沈阳

目 录

前言

第一章 电气试验的意义和要求	1
第一节 电气设备试验的作用和分类	1
第二节 电气设备试验的技术和安全措施	2
第三节 电气试验的总体要求	3
复习思考题与习题	4
第二章 电气设备的基本试验	6
第一节 直流电桥	6
第二节 直流电阻测量	9
第三节 绝缘电阻和吸收比试验	12
第四节 泄漏电流试验	15
第五节 介质损耗的测量	18
第六节 工频交流耐压试验	23
第七节 预防性试验的要求与效果特点分析	26
复习思考题与习题	27
第三章 电力变压器试验	30
第一节 变压器的分类和工作原理	30
第二节 变压器的技术数据	35
第三节 变压器的构造	39
第四节 变压器分接开关	44
第五节 电力变压器试验内容和要求	47
第六节 变压器的基本试验项目	50
第七节 变压器接线组别和极性的测定	61
第八节 空载和短路试验	69
第九节 无载和有载分接开关接触电阻的测定	75
第十节 绝缘油试验和色谱分析的基本知识	75
第十一节 铁芯接地的测定	82
复习思考题与习题	84
第四章 断路器试验	87
第一节 真空断路器的基本结构	87

第二节	户内、户外真空断路器	92
* 第三节	真空断路器机械参数及其调整	99
* 第四节	真空断路器的在线检测	102
* 第五节	截流过电压产生和对电机产生的危害	104
第六节	六氟化硫 (SF ₆) 气体的特性安全防护	107
第七节	SF ₆ 断路器结构和灭弧原理	111
* 第八节	SF ₆ 气体的检查	117
* 第九节	SF ₆ 在寒冷地区的使用	123
* 第十节	SF ₆ 断路器的二次接线	125
第十一节	断路器的基本试验	127
第十二节	分合闸时间和速度的测定	130
第十三节	操动机构的检验	134
	复习思考题与习题	136
第五章	互感器试验	144
第一节	电压互感器的工作原理和参数	144
第二节	电流互感器	152
第三节	互感器在使用中的一些技术问题	155
第四节	互感器的试验项目与周期及标准	157
第五节	交流耐压试验	160
第六节	极性试验和分接头变比试验	161
	复习思考题与习题	163
第六章	防雷设备试验	165
第一节	大气过电压	165
第二节	避雷器与避雷针	169
第三节	金属氧化物避雷器的接线分析	175
第四节	金属氧化物避雷器损坏的原因	179
第五节	线路的防雷保护	182
第六节	配电变压器及配电设备的防雷保护	183
第七节	变电站的防雷保护	185
第八节	接地技术	189
第九节	绝缘电阻测定	192
第十节	电导电流及串联元件非线性系数的测定	193
第十一节	工频放电电压测量	196
第十二节	管型避雷器检查	198
第十三节	氧化锌避雷器试验	200
	复习思考题与习题	203

第七章 电缆试验	206
第一节 电缆的安装方式	206
第二节 电缆类型与路径的选择	210
第三节 电缆故障原因	212
第四节 绝缘电阻的测量	214
第五节 直流耐压试验和测量泄漏电流	215
第六节 相位测定	217
第七节 故障探测	217
复习思考题与习题	223
第八章 接地装置试验	226
第一节 试验的目的和要求	226
第二节 土壤电阻率的测定	228
第三节 接地电阻的测定	230
复习思考题与习题	234
第九章 安全用具试验	236
第一节 概述	236
第二节 绝缘杆试验	237
第三节 绝缘手套和绝缘靴试验	239
第四节 绝缘台和验电器试验	240
复习思考题及习题	243
第十章 微机继电保护装置运行管理及检验	244
第一节 微机继电保护装置运行管理	244
第二节 人机界面及操作	249
第三节 继电器的基本检验方法	250
第四节 外观检查	254
第五节 微机型保护装置的硬件性能检验	261
第六节 微机型保护装置的软件功能检验	263
第七节 微机保护的静态试验	266
第八节 微机保护的交流动态试验	269
复习思考题与习题	271
附录	273
附录一 直流电阻的温度换算	273
附录二 绝缘电阻的温度换算	274
附录三 直流泄漏电流的温度换算	275
附录四 断路器的时间速度特性和导电回路电阻标准	277
附录五 介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的温度换算	284
附录六 常用高压硅堆技术参数	285

第一章 电气试验的意义和要求

第一节 电气设备试验的作用和分类

一、电气试验的作用

电力系统包括众多的电气设备，有些电气设备的故障甚至会威胁到整个系统的安全供电。电力生产的实践证明，对电气设备按规定开展检测试验工作，是防患于未然，保证电力系统安全、经济运行的重要措施之一。所谓“预防性试验”由此得名。

对于新安装和大修后的电气设备进行的试验，称为交接验收试验。其目的是鉴定电气设备本身及其安装和大修的质量。交接验收试验和预防性试验的目的是一致的。

二、电气试验的分类

按试验的作用和要求不同，电气设备的试验可分为绝缘试验和特性试验两大类。

1. 绝缘试验

电气设备的绝缘缺陷，一种是制造时潜伏下来的；一种是在外界作用下发展起来的。外界作用有工作电压、过电压、潮湿、机械力、热作用、化学作用等。

上述各种原因所造成的绝缘缺陷，可分为两大类：

(1) 集中性缺陷。如绝缘子的瓷质开裂；发电机绝缘的局部磨损、挤压破裂；电缆绝缘的气隙在电压作用下发生局部放电而逐步损伤绝缘；其他的机械损伤、局部受潮等。

(2) 分布性缺陷。指电气设备的整体绝缘性能下降，如电机、套管等绝缘中的有机材料受潮、老化、变质等。

绝缘内部缺陷的存在，降低了电气设备的绝缘水平，我们可以通过一些试验的方法，把隐藏的缺陷检查出来。试验方法一般分为两大类：

(1) 非破坏性试验。是指在较低的电压下，或是用其他不会损伤绝缘的办法来测量各种特性，从而判断绝缘内部的缺陷。实践证明，这类方法是有效的，但由于试验的电压较低，有些缺陷不能充分暴露，目前还不能只靠它来可靠地判断绝缘水平，还需我们不断地改进非破坏性试验方法。

(2) 破坏性试验，或称为耐压试验。这类试验对绝缘的考验是严格的，特别是能揭露那些危险性较大的集中性缺陷。通过这类试验，能保证绝缘有一定的水平和裕度，其缺点是可能在试验中给被试设备的绝缘造成一定的损伤，但在目前仍然是绝缘试验中的一项主要方法。

为了避免破坏性试验对绝缘的无辜损伤而增加修复的难度，破坏性试验往往在非破坏性试验之后进行，如果非破坏性试验已表明绝缘存在不正常情况，则必须在查明原因并加以消除后再进行破坏性试验。

2. 特性试验

通常把绝缘以外的试验统称为特性试验。这类试验主要是对电气设备的电气或机械方面的某些特性进行测试，如变压器和互感器的变比试验、极性试验；线圈的直流电阻测量；断路器的导电回路电阻；分合闸时间和速度试验等。

上述试验有它们的共同目的，就是揭露缺陷，但又各具一定的局限性。试验人员应根据试验结果，结合出厂及历年的数据进行纵向比较，并与同类型设备的试验数据及标准进行横向比较，经过综合分析来判断设备缺陷或薄弱环节，为检修和运行提供依据。

第二节 电气设备试验的技术和安全措施

电气试验必须坚持实事求是的科学态度，要严肃认真，既不应放过隐患，更不应将隐患扩大化。

一、技术措施

(1) 周密的准备工作。包括：拟订试验程序；准备好试验设备、仪器及仪表、电源控制箱；准备好绝缘接地棒、接地线、小线、工具等。

(2) 合理、整齐地布置试验场地。试验器具应靠近试品，所有带电部分应互相隔开，面向试验人员并处于视线之内。操作者的活动范围及与带电部分的最小允许距离应按表 1-1 规定。调压、测量装置及电源控制箱应靠近放置，并由 1 人操作和读数。

表 1-1 操作人员活动范围及与带电设备的最小距离

电压等级 (kV)	6~10	25~35	60~110	220
不设防护栏时 (m)	0.7	1.0	1.5	3.0
设防护栏时 (m)	0.35	0.6	1.0	2.0

(3) 试验接线应清晰明了、无误。

(4) 操作顺序应有条不紊，试验接线应正确无误。在操作中除有特殊要求，均不得突然加压或失压，当发生异常现象时，应立即停止升压，并应立即进行降压、断电、放电、接地，而后再检查分析。

(5) 做好试验的善后工作。善后工作包括清理现场，以防在试品上遗忘物件，妥善保管试验器具，以利再次使用。

(6) 试验记录。对试验项目、测量数据、试品名称及编号、仪器仪表编号、气象条件及试验时间等应进行详细的记录，作为分析和判断设备状态的依据，然后整理成试验报告，以便抄报和存档。

二、安全措施

交接和预防性试验中的多数试品装设在发电厂、变电站现场，由于试品的对外引线、接地装置易触及附近的带电运行设备，加之人员嘈杂和堆放的杂物等情况，均增加了试验工作的复杂性。在试验项目中，有些要施加高电压，这样就必须具备完善的安全措施才能开展工作。

(1) 现场工作必须执行工作票制度、工作许可制度、工作监护制度、工作间断和转移及终结制度。

(2) 在试验现场应装设遮栏或围栏，悬挂“止步，高压危险！”标示牌，并派专人看守。试品两端不在同一地点时，另一端还应派人看守。

(3) 高压试验工作不得少于两人，试验负责人应由有经验的人员担任。开始试验前，负责人应对全体试验人员详细布置试验中的安全事项。

(4) 因试验需要断开电气设备接头时，拆前应做好标记，恢复连接后应进行检查。

(5) 试验器具的金属外壳应可靠接地，高压引线应尽量缩短，必要时用绝缘物支持牢固。为了在试验时确保高压电压回路的任何部分不对接地体放电，高电压回路与接地体（如墙壁、金属围栏、接地线等）的距离必须留有足够的裕度。

(6) 试验装置的电源开关，应使用具有明显断点的双极闸刀，并保证有两个串联断开点和可靠的过载保护设施。

(7) 加压前必须认真检查接线、表计量程，确信调压器在零位及仪表的开始状态均正确无误，并通知有关人员离开被试设备，在取得试验负责人许可后，方可加压，加压过程中应有人监护。

试验人员在加压过程中，应精力集中，不得与他人闲谈，随时警惕异常现象发生。操作人员应站在绝缘垫上。

(8) 变更接线或试验结束时，应首先降下电压，断开电源、放电，并将升压装置的高压部分短路接地。

(9) 未装接地线的大电容试品，应先放电再进行试验。进行高压直流试验时，每告一段落或试验结束后，应将试品对地放电数次并短路接地后方可接触。

(10) 试验结束时，试验人员应拆除自装的接地短路线，并对试品进行检查和清理现场。

第三节 电气试验的总体要求

电气设备的预防性试验是判断设备能否继续投入运行、预防设备损坏及保证安全运行的重要措施。凡电力系统的设备，均应根据电力部 1996 年颁布的 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》的要求进行预防性试验。

(1) DL/T 596—1996 的各项规定是检查设备的基本要求，应认真执行。在维护、检修工作中，有关人员还应执行部颁检修、运行的有关规定，不断提高质量，坚持预防为主，积极改进设备，使设备能长期、安全、经济地运行。

(2) 坚持科学的态度，对试验结果必须全面地、历史地进行综合分析，掌握设备性能变化的规律和趋势。要加强技术管理，健全资料档案，开展技术革新，不断提高试验技术水平。

(3) 额定电压为 110kV 以下的电气设备，应按 DL/T 596—1996 的规定进行交流耐压试验（有特殊规定者除外）。对于电力变压器和互感器，在局部和全部更换绕组后，应进行耐压试验。

(4) 进行绝缘试验时, 应尽量将连接在一起的各种设备分离开来单独试验(成套设备除外), 同一试验标准的设备可以连在一起试。为了便利现场试验工作, 已经有了单独试验记录的若干同一试验标准的电气设备, 在单独试验有困难时, 也可以连在一起进行试验, 此时, 试验标准应采用连接的各种设备中的最低标准。

(5) 当电气设备的额定电压与实际使用的额定工作电压不同时, 应根据下列原则确定试验电压的标准: ①当采用额定电压较高的电气设备以加强绝缘者, 应按照设备的额定电压标准进行试验; ②采用额定电压较高的电气设备, 在已满足产品通用性的要求时, 应按照设备实际使用的额定工作电压的标准进行试验; ③采用较高电压等级的电气设备, 在已满足高海拔地区或污秽地区要求时, 应在安装地点按照实际使用的额定工作电压的标准进行试验。

(6) 在进行与温度、湿度有关的各种电气试验时(如测量直流电阻、绝缘电阻、损耗因数、泄漏电流等), 应同时测量被试物和周围空气的温度、湿度。绝缘试验应在良好的天气, 且被试物温度及周围空气温度不低于 5°C , 空气相对湿度一般不高于 80% 的条件下进行。

(7) 对于绝缘电阻的测量, 规定用 60s 的绝缘电阻 (R_{60}); 吸收比的测量, 规定用 60s 与 15s 绝缘电阻的比值 (R_{60}/R_{15})。

复习思考题与习题

一、名词解释

1. 绝缘试验: 绝缘内部缺陷的存在, 降低了电气设备的绝缘水平, 我们可以通过一些试验的方法, 把隐藏的缺陷检查出来。这类试验称为绝缘试验。

2. 集中性缺陷: 如绝缘子的瓷质开裂; 发电机绝缘的局部磨损、挤压破裂; 电缆绝缘的气隙在电压作用下发生局部放电而逐步损伤绝缘; 其他的机械损伤、局部受潮等。

3. 分布性缺陷: 指电气设备的整体绝缘性能下降, 如电机、套管等绝缘中的有机材料受潮、老化、变质等。

4. 非破坏性试验: 是指在较低的电压下, 或是用其他不会损伤绝缘的办法来测量各种特性, 从而判断绝缘内部的缺陷。

5. 破坏性试验: 或称为耐压试验。这类试验对绝缘的考验是严格的, 特别是能揭露那些危险性较大的集中性缺陷。

6. 特性试验: 通常把绝缘以外的试验统称为特性试验。这类试验主要是对电气设备的电气或机械方面的某些特性进行测试。

二、问答题

1. 何谓电气试验, 其在生产中的作用如何?(答: 见本章第一节、一)

2. 试述绝缘缺陷的分类, 其各自特点是什么?(答: 见本章第一节、二)

3. 试述预防性试验的技术措施?(答: 见本章第二节、一)

4. 试述预防性试验的安全措施?(答: 见本章第二节、二)

三、填空题

1. 试验装置的电源开头，应使用具有（明显的）的双极闸刀，并保证有（两个串联）断开点和（可靠）的过载保护设备。
2. 现场工作必须执行（工作票）制度、（工作许可）制度、（工作监护）制度、（工作间断）和（转移）及（终结）制度。
3. 对未装接地线的大电容试品，应先（放电）后，再进行试验。
4. 高压试验工作不得少于（两）人，试验负责人应由（有经验人员）担任。
5. 在试验现场应装设（遮栏）或（围栏），悬挂（止步，高压危险！）标志牌，并派（专人）看守。
6. 试验器具的金属外壳应（可靠接地），高压引线应（尽量缩短）。

四、选择题

1. 对 60~110kV 的带电设备，操作人员应与其保持的小距离是（C）。
(A) 1.5m (B) 2.0m (C) 1m
2. 变压器绝缘材料老化、受潮是（B）。
(A) 集中性缺陷 (B) 分布性缺陷
3. 绝缘子瓷质开裂是（A）。
(A) 集中性缺陷 (B) 分布性缺陷
4. 变压器极性试验是（B）。
(A) 绝缘试验 (B) 特性试验

第二章 电气设备的基本试验

第一节 直流电桥

测量电桥有两种,即直流单臂电桥和双臂电桥。直流单臂电桥又称惠斯登电桥,这种电桥适用于测量 $1 \sim 10^6 \Omega$ 的中值电阻;双臂电桥又称为凯文电桥,其适用于低电阻的测量。

一、直流单臂电桥的工作原理

直流单臂电桥的原理电路如图 2-1 所示。图中连成四边形的 4 条支路 dc、cb、ba、ad,称为电桥的 4 个臂,其中 ba 接有被测电阻 R_x ,其余 3 个臂为标准电阻或可变的标准电阻。在四边形的两个顶点 a、c 之间连接直流电源 E 和按钮 S ,在另两个顶点 b、d 之间连接检流计。

当接通按钮开关 S 之后,调节桥臂电阻 R_2 、 R_3 和 R_4 ,使检流计指零(即 $I_G=0$),称为电桥平衡。平衡时,有

$$I_1 R_x = I_2 R_4$$

$$I_1 R_2 = I_2 R_3$$

可得

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

$$R_x R_3 = R_2 R_4 \quad (2-1)$$

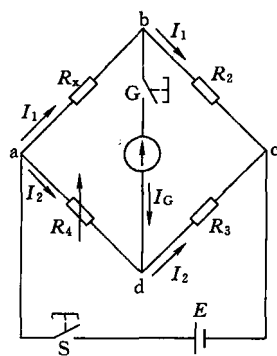


图 2-1 直流单电桥
原理电路

上两式是电桥平衡的条件,电桥平衡与所加电压无关,而仅决定于 4 个电阻的相互关系,即相邻桥臂电阻必须成比例或相对桥臂电阻的乘积必须相等。

制造时,使 R_2/R_3 的值为可调十进倍数的比率,如 0.1、1、10、100 等。这样, R_x 便为已知量 R_4 的十进倍数,便于读取被测值。电阻 R_2 、 R_3 称为电桥的比例臂,电阻 R_4 称为比较臂。

直流单臂电桥的准确度可以做得很高,这是因为标准电阻 R_2 、 R_3 和 R_4 的准确度可达 10^{-3} 以上,且检流计的灵敏度很高,可以保证电桥处于精确的平衡状态。比较臂 R_4 的读数位数即测量有效数字的位数与电桥的精度相对应,一般若精度为 10^{-n} ,则 R_4 读数应为 $n+1$ 位。

电桥的平衡条件虽不受电源电压的影响;但为了保证电桥足够灵敏,电源电压应保证有足够的数值。常见的携带式单臂电桥有 QJ23 型,其准确度等级为 0.2 级。比例臂 R_2/R_3 由 8 个电阻组成,分成 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 、1、10、 10^2 和 10^3 七挡,由转换开关换接,比例臂 R_2/R_3 的值(称为倍率)示于面板左上方的读数盘上。比较臂 R_4 用 4 个可调电阻

箱串联而成，这 4 个电阻箱分别由 9 个 1Ω 、9 个 10Ω 、9 个 100Ω 和 9 个 1000Ω 的电阻组成，可得到在 $0\sim 9999\Omega$ 范围内变动的电阻值。比较臂 R_4 的值由面板上 4 个形状相同的读数盘所示的电阻值相加而得。

面板的右下方有一对接线柱，标有“ R_x ”，用以连接被测电阻，作为一个桥臂。

电桥内附有检流计，检流计支路上装有按钮开关 G，也可外接检流计。在面板左下方有 3 个接线柱，使用内接检流计时，用接线柱上的金属片将下面 2 个接线柱短接。检流计上装有锁扣，可将可动部分锁住，以免搬动时损坏悬丝。需要外接检流计时，用金属片将上面 2 个接线柱短接，并将外接检流计接在下面两个接线柱上。

电桥内附有电源，需装入 1 号电池 3 节。如测量大电阻时，也可外接电源，面板左上方有一对接线柱，标有“+”、“-”符号，供外接电源用。

面板中下方有 2 个按钮开关，其中“G”为检流计支路的开关，“B”为电源支路的开关。其使用方法是：

(1) 先打开检流计锁扣，再调节调零器，使指针位于零点。

(2) 将被测电阻 R_x 接到标有“ R_x ”的两个接线柱之间，根据被测电阻 R_x 的近似值（可先用万用表来测量），选择合适的比率臂倍率，以便让比较臂的 4 个电阻全部用上，以提高读数的精度。例如 R_x 约等于 5Ω ，则可选择倍率为 0.001。

若电桥平衡时比较臂读数为 5123Ω ，则被测电阻为

$$R_x = \text{倍率} \times \text{比较臂的读数} = 0.001 \times 5123 = 5.123 (\Omega)$$

可读得 4 位有效数字。如选择倍率为 1，则比较臂的前三个电阻都无法用上，只能测量 $R_x = 1 \times 5 = 5(\Omega)$ ，只有一位有效数字。

(3) 测量时，应先按电源按钮“B”，再按检流计按钮“G”。若检流计指针向“+”偏转，表示应加大比较臂电阻；若指针向“-”偏转，则应减小比较臂电阻。反复调节比较臂电阻，使指针趋于零位，电桥即达到平衡。调节开始时，电桥离平衡状态较远，流过检流计的电流可能很大，使指针剧烈偏转，故先不要将“G”按钮按下，只能调节一次比较臂电阻，然后按一下“G”，至指针偏转较小时，才开锁住“G”按钮。

(4) 测量结束，应先松开“G”按钮，再松开“B”按钮。否则，在测量具有较大电感的电阻时，会因断开电源而产生自感电动势，此电动势作用到检流计回路，会使检流计损坏。

(5) 电桥不用时，应将检流计用锁扣锁住，以免搬动时震坏悬丝。

二、直流双臂电桥

直流双臂电桥又称凯文电桥，适用于测量低值电阻（ 1Ω 以下），如用于测定分流电阻和电机、变压器绕组的电阻和断路器的接触电阻等。

测量低值电阻，若使用单臂电桥，会因接线电阻和接触电阻（一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4}\Omega$ 的数量级）的影响，给测量结果带来不允许的误差。直流双臂电桥正是为消除这种影响而设计的。

1. 工作原理

图 2-2 是直流双臂电桥的原理电路。 R_x 是被测电阻， R_n 是比较用的可调标准电阻。

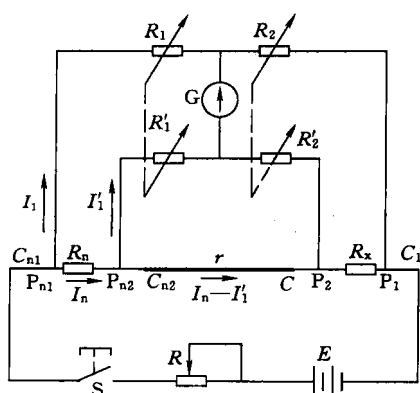


图 2-2 直流双臂电桥原理电路定律

基尔霍夫回路电压定律可写出

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_n R_n + I'_1 R'_1 \\ I_1 R_2 &= I_n R_x + I'_1 R'_2 \\ (I_n - I'_1) r &= I'_1 (R'_1 + R'_2) \end{aligned}$$

解上列方程组，可得平衡方程为

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_n + \frac{r R_2}{r + R'_1 + R'_2} \left(\frac{R'_1}{R_1} + \frac{R'_2}{R_2} \right) \quad (2-2)$$

上面说过，调节时始终保持 $\frac{R'_1}{R_1} + \frac{R'_2}{R_2}$ ，因此，上式右边第二项等于零，故

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_n \quad (2-3)$$

可见，被测电阻 R_x 仅决定于桥臂电阻 R_2 和 R_1 的比值以及标准电阻 R_n ，而与粗导线电阻 r 无关。比值 R_2/R_1 称为直流双臂电桥的倍率。所以，电桥平衡时

被测电阻值 = 倍率读数 × 标准电阻读数

连接 C_{n2} 和 C_2 的导线应选用导电性能良好且短而粗的，以便使其电阻 r 尽量的小。这样，即使 $\frac{R'_1}{R_1} - \frac{R'_2}{R_2} \neq 0$ ，它与 r 的乘积也很小，从而平衡方程的第二项仍可不予计及。

2. 消除接线电阻和接触电阻的原因

(1) 被测电阻 R_x 和标准电阻 R_n 之间的接线电阻以及接头 C_2 和 C_{n2} 的接触电阻与粗导线相串联，故可视为 r 的一部分。而从平衡方程式可知，只要保持 $\frac{R'_1}{R_1} = \frac{R'_2}{R_2}$ ，不论 r 为多大，右边第二项总为零，因而被测电阻值 R_x 不受这部分接线电阻和接触电阻的影响。

(2) R_x 和 R_n 的另两端的接线电阻以及接头 C_1 和 C_{n1} 的接触电阻都包括在电源电路中，它们只影响工作电流 I 的大小，对测量结果不产生影响。

(3) 电位接头 P_1 、 P_2 、 P_{n1} 和 P_{n2} 的接触电阻以及接线电阻都包含在相应的桥臂支路中，而桥臂电阻值 R_2 、 R'_2 、 R_1 和 R'_1 均大于 10Ω ，相比之下这部分接触电阻和接线电阻显得很小，故对测量结果产生的影响可以忽略不计。

由上述可知,只要能保证 $\frac{R'_1}{R_1} = \frac{R'_2}{R_2}$, R_1 、 R'_1 、 R_2 和 R'_2 均大于 10Ω , r 又很小,且被测电阻 R_x 按电流接头和电位接头正确连接,就可较好地消除或减少接线电阻和接触电阻对测量结果的影响。所以,直流双臂电桥测量小电阻可以得到精确的结果。

第二节 直流电阻测量

测量直流电阻的目的是检查电气设备绕组或线圈的质量及回路的完整性,以发现因制造不良或运行中因振动而产生的机械应力等原因所造成的导线断裂、接头开焊、接触不良、匝间短路等缺陷。另外,对发电机和变压器进行温升试验时,也需根据不同负荷下的直流电阻值换算出相应负荷下的温度值。

测量直流电阻一般可采用电压降法或电桥法。

一、电压降法

电压降法是在被测电阻上,通以直流电流,用电压表及电流表测量出被测电阻上的电压降和电流,然后利用欧姆定律 $R = U/I$ 计算出被测电阻的直流电阻。

(一) 试验方法

1. 测量接线

电压降法的测量准确度与测量接线方式有直接关系。为减小接线方式所造成的误差,测量大电阻时(指被测电阻大于电流表内阻 200 倍以上),应采用图 2-3 (a) 接线;测量小电阻时(指电压表内阻大于被测电阻 200 倍以上),应采用图 2-3 (b) 接线。

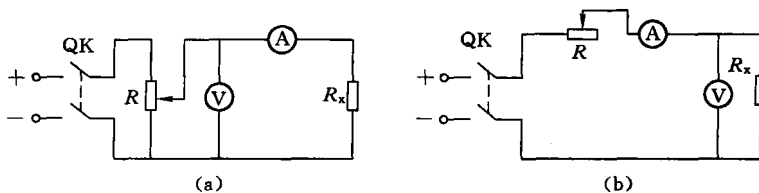


图 2-3 电压降法测量直流电阻原理图

(a) 大电阻测量接线; (b) 小电阻测量接线

QK—电源开关; R—可调电阻; R_x —被测电阻

2. 仪表选择

(1) 根据对电气设备测量准确度的要求,选择使用仪表准确度的等级,一般应选 0.5 级以上的仪表。

(2) 根据试验电流的大小,选择合适的量程,以尽量满足电压、电流表均能在 $2/3$ 刻度以上的工作要求。

(3) 采用图 2-3 (a) 接线时,电流表内阻应小于被测电阻的 $1/200$ 以上,否则应按式 (2-3) 对被测电阻进行修正

$$R_x = \frac{U_v}{I_A} - r_A \quad (2-4)$$

式中 R_x ——被测电阻值, Ω ;