

中小型发电厂和变电所 电气设备的测试

列车电业局中心试验所

车导明 汤颂光 莫润民 贾汉明

电力工业出版社



中小型发电厂和变电所电气设备的测试

列车电业局中心试验所

车导明 汤颂光 莫润民 贾汉明

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 14.5印张 319千字

1982年5月第一版 1982年5月北京第一次印刷

印数 00001—13910册 定价 1.20元

书号 15036·4313

前 言

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。这里，我们总结了实际工作的一些体会，参阅了兄弟单位的有关资料，编写了这本介绍电气设备测试技术的书籍。

本书内容偏重实际，着重介绍了35千伏及以下设备的测试方法、要点和分析判断等；适当叙述了一些测试原理；结合测试方法介绍了一些常用仪器；对较繁复的测试，还提供了一些实例，以供参考。分析判断在整个测试工作中至关重要，本书所介绍的分析判断方法，多为实际工作中的经验和体会，但应用时请读者注意它的局限性。

本书编排，将通用测试项目列入第一章“基本试验”，将备查的有关数据和资料编入“附录”，其余均按设备分章，以试验项目分节，书中的试验项目和非特别说明的试验标准，均以原水利电力部颁《电气设备交接和预防性试验标准》为依据。

本书在编写过程中，电力工业部列车电业局有关领导和同志给予了始终的热情的支持；兄弟单位王叔源、赵伯年等同志对本书编写提供了许多宝贵意见；王俊昌、赵国楨等同志曾为本书提供了有关资料；我们谨向以上同志和有关单位致以深切的谢意。

最后，我们期望读者对本书指正错误和提出批评意见。

编 者

一九八一年九月

内 容 提 要

本书系统地介绍了35千伏及以下电气设备的测试技术，内容包括：有关电气设备测试的项目和标准、方法和原理以及分析和判断等。所涉及的电气设备有：同步发电机、直流电机、交流电动机、电力变压器、电流和电压互感器、油断路器、电力电缆、电力电容器、阀型避雷器、接地装置以及电气绝缘安全用具等。

本书可供从事电气试验专业工作的人员阅读；也可供从事电气设备安装、运行和维修工作的人员参考。

目 录

前 言

第一章 电气设备基本试验	1
第一节 测量直流电阻	1
第二节 测量绝缘电阻及吸收比	7
第三节 直流泄漏电流及直流耐压试验	13
第四节 测量介质损失角正切值 $\tan \delta$	24
第五节 交流耐压试验	53
第二章 同步发电机试验	68
第一节 测量直流电阻	68
第二节 测量绝缘电阻和吸收比	74
第三节 定子绕组直流泄漏电流及直流耐压试验	79
第四节 交流耐压试验	85
第五节 检查转子绕组匝间短路故障的试验	91
第六节 定子铁芯试验	105
第七节 发电机空载特性试验	117
第八节 发电机稳定短路特性试验	122
第九节 测量轴电压	125
第十节 测量散漏电抗 X_s	127
第十一节 测量零序电抗 X_0	134
第十二节 电压恢复法测量电机的瞬态参数 (X'_d 、 X''_d 、 T'_d 、 T''_d)	140
第十三节 静测法测量次瞬间电抗 X'_d 、 X''_d	152
第十四节 测量灭磁时间常数 T_0	164
第十五节 发电机温升试验	173

第三章 直流电机试验	197
第一节 测量直流电阻	197
第二节 绝缘试验	202
第三节 炭刷中性位置的检查	203
第四节 绕组极性及连接正确性的检查	206
第五节 励磁机特性试验	213
第四章 交流电动机试验	220
第一节 测量直流电阻	221
第二节 绝缘试验	222
第三节 定子绕组极性的检查	225
第四节 空载特性试验	227
第五节 短路特性试验	230
第五章 电力变压器试验	235
第一节 测量绝缘电阻和吸收比	236
第二节 测量泄漏电流	241
第三节 测量介质损失角正切值 $\tan \delta$	243
第四节 交流耐压试验	249
第五节 变压器油中溶解气体的色谱分析	254
第六节 绝缘油试验	259
第七节 测量直流电阻	274
第八节 变压比试验	282
第九节 极性和接线组别的测定	291
第十节 空载特性试验	306
第十一节 短路特性试验	321
第六章 互感器试验	332
第一节 绝缘试验	332
第二节 测量直流电阻	335
第三节 变比检查和误差测定	335
第四节 极性和接线组别的测定	339

第五节	励磁特性试验	341
第六节	电流互感器10%误差曲线的测定	344
第七章	油断路器试验	347
第一节	绝缘试验	347
第二节	测量导电回路直流电阻	351
第三节	动作特性试验	353
第四节	操作机构试验	362
第八章	电力电缆试验	367
第一节	测量绝缘电阻	368
第二节	直流泄漏及直流耐压试验	371
第三节	检查电力电缆的相位	377
第九章	电力电容器试验	378
第一节	测量两极对外壳的绝缘电阻	378
第二节	测量电容值	379
第三节	交流耐压试验	385
第四节	冲击合闸试验	386
第十章	阀型避雷器试验	388
第一节	测量绝缘电阻	389
第二节	测量电导电流及串联元件的非线性系数	390
第三节	测量工频放电电压	399
第四节	阀型避雷器的密封检查	404
第十一章	接地装置试验	406
第一节	测量接地电阻	406
第二节	测量土壤电阻率	417
第十二章	电气绝缘安全用具试验	419
第一节	绝缘棒试验	419
第二节	绝缘夹钳试验	423
第三节	绝缘手套试验	425
第四节	绝缘靴、鞋试验	427

第五节 绝缘站台试验	428
第六节 装有绝缘柄的工具的试验	430
第七节 电压指示器试验	431
附录	435
一、直流电阻的温度换算	435
二、绝缘电阻的温度换算	437
三、直流泄漏电流的温度换算	440
四、阀型避雷器电导电流的温度换算	442
五、介质损失角正切值 $\tan \delta$ 的温度换算	443
六、35千伏及以下常用油断路器的时间、速度特性和导 电回路电阻标准(参考值)	446
七、常用高压整流管及高压硅堆技术参数	447
八、直流微安表保护装置	449
九、发电机定子检温计的温度换算	450

第一章 电气设备基本试验

第一节 测量直流电阻

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，以发现因制造质量不良或运行中的振动和机械应力等所造成的导线断裂、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，即在被测电阻上，通以直流电流，用电压表或毫伏表测量出被测电阻上的电压降，然后利用欧姆定律

$\left(R = \frac{U}{I}\right)$ 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（被测电阻大于电流表内阻200倍以上）应采用图1-1（a）接线，测量小电阻时（电压表内阻大于被测电阻200倍以上）应采用图1-1（b）接线。

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

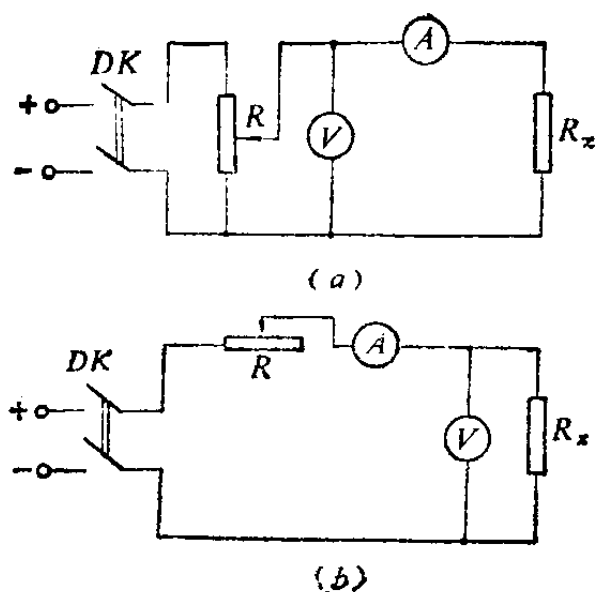


图 1-1 电压降法测量直流电阻原理图
 (a)大电阻测量接线；(b)小电阻测量接线
 DK—电源开关；R—可调电阻； R_x —被测电阻

表准确度的等级。一般应选用0.5级以上的仪表。

(2) 根据试验电流大小，选择合适量程，以尽量满足电压、电流表均能在2/3刻度以上工作的要求。

(3) 采用图1-1(a)接线时，电流表内阻应小于被测电阻的1/200以上，否则被测电阻应按下式进行计算：

$$R_x = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V - I_A r_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - r_A$$

式中 R_x ——被测电阻值（欧姆）；

r_A ——电流表内阻值（欧姆）；

U_V ——电压表读数（伏）；

I_A ——电流表读数（安）。

(4) 采用图1-1(b)接线时，电压表内阻应大于被测电阻200倍以上，否则被测电阻应按下式进行计算：

$$R_x = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{r_V}}$$

式中 R_x ——被测电阻值（欧姆）；

r_v ——电压表内阻值（欧姆）；

U_v ——电压表读数（伏）；

I_v ——流过电压表的电流；

I_A ——电流表读数（安）。

3. 测量步骤

（1）根据被测电阻值大小，选择适当接线方式。

（2）测量时，应先合电源开关，待电流稳定后，再用电压表搭测电压值。

（3）待电压、电流表指示稳定后，同时读数。

（4）测量完毕，应先切断电压表测量回路，再断开电源开关。

（5）每一被测电阻，最好用三个不同电流值测量三次，计算出每次测得的电阻值后再取其平均值做为最后结果。

（6）记录测量时的被测电阻的温度，以备进行温度换算时使用。

（二）注意事项

（1）测量仪表接线时，应注意正负极性。

（2）测量时，应使用电压稳定且容量充足的直流电源，以防由于电流波动产生的自感电势影响测量结果的准确度。

（3）如被测电阻有较大电感，则在改变测量电流时，须先将电压表测量回路断开，以防自感电势的冲击而造成电压表损坏。

（4）测量时，应保持被测电阻的温度稳定。为避免因被测电阻发热而产生较大的测量误差，试验时通电时间不宜

过长，且试验电流不得大于被试设备额定电流的20%。

二、电桥法

电桥法，即用直流电桥测量直流电阻的方法。直流电桥是测量直流电阻的专用仪器，并具有较高的灵敏度和准确度。

(一) 试验方法

1. 直流电桥工作原理

直流电桥的工作原理，如图1-2所示。

图1-2中， ac 、 cb 、 bd 、 da 四个支路为电桥的四个桥臂，其中一个桥臂接被测电阻 R_x ，其余三个桥臂接标准电阻或可调标准电阻。在电桥对角线 cd 之间接指零仪表如检流计等，另一对角线 ab 接直流电源。电桥工作时，调节标准电阻，使检流计指示为零，

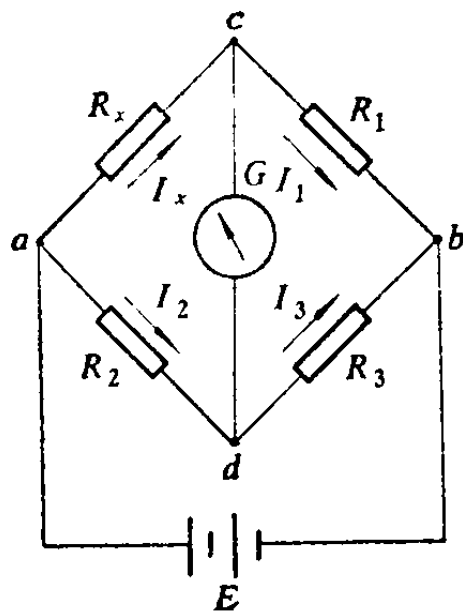


图 1-2 直流电桥原理图
 G —检流计； R_x —被测电阻；
 R_1 、 R_2 、 R_3 —标准电阻；
 E —直流电源

这就表示电桥达到了平衡。此时， cd 两点电位相等，所以有

$$U_{ac} = U_{ad}$$

$$U_{cb} = U_{db}$$

即 $I_x R_x = I_2 R_2$

$$I_1 R_1 = I_3 R_3$$

将两式相除得

$$\frac{I_x R_x}{I_1 R_1} = \frac{I_2 R_2}{I_3 R_3}$$

当电桥平衡时， $I_x = I_1$ ；

$I_2 = I_3$ ，代入上式后得：

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_2}{R_3}$$

所以

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3}$$

由上式可看出，在已知三个桥臂电阻值情况下，就可确定另一桥臂的被测电阻值。在实际电桥中， $\frac{R_1}{R_3}$ 构成了电桥的比率臂， R_2 构成了电桥的比较臂。

2. 电桥型式的选择

(1) 根据结构型式，直流电桥可分单臂电桥和双臂电桥两种型式。一般被测电阻值为10欧姆以上者用单臂电桥测量，10欧姆以下者用双臂电桥测量。

(2) 根据对测量准确度的要求，选择准确等级与其相应或更高的电桥。国产直流电桥型号用 QJ 表示，常用的单臂电桥如 QJ-23、QJ-24 等，准确等级为 0.2 级；常用的双臂电桥如 QJ-44、QJ-19 等，准确等级为 0.2 级。

3. 测量步骤

以下主要介绍电桥的一般测量步骤，具体测量步骤尚需参见有关电桥使用说明书。

(1) 使用电桥时，应先将电桥检流计的锁扣打开，若检流计指示不在零位，应调到零位。

(2) 将被测电阻接到电桥接线柱上。使用双臂电桥时，电压线与电流线不能并接在一起，电压线的连接点应比电流线的连接点更靠近被测电阻。

(3) 根据过去测量数据，换算出测量温度下的电阻值，据此选择合适的比率臂，使比较臂各挡可调电阻充分地利用，以提高读数的精度。例如使用 QJ-23 型电桥时，若被测电阻 R_x 为 6 欧姆左右，桥臂比率应选择为 0.001。这样，当电桥平衡时，比较臂可调电阻 R_1 可读出四位数。假定比较臂 R_1 的读数是 6432，则被测电阻 R_x 为 6.432 欧。若比率臂选择不当，如选择为 1，则电桥平衡时， R_1 只能读出一位

数 6，所以 R_x 也只能是一位数 6 欧。由此可知，比率选择合适与否将直接影响测量结果的准确度。

(4) 测量时，应先将“电源按钮”按下并锁住（如 QJ-23 中的按钮 B），然后再按“检流计按钮”（如 QJ-23 中的按钮 G）。此时若检流计向正方向偏转，应加大比较臂电阻；若向负方向偏转，应减小比较臂电阻，如此反复调节直至电桥平衡。调节过程中，当电桥还未接近平衡时，由于通过检流计的电流较大，因此不能将检流计按钮锁紧，每次测量时只能短时按下按钮，观察平衡情况。当检流计偏转不大后，为操作方便起见，可以将检流计按钮锁紧。

(5) 测量完毕，应先松开检流计按钮，后松开电源按钮，以防被测电阻有较大电感时，因电源突然断开产生的自感电势而损坏检流计。

(6) 测量完毕将检流计用锁扣锁住。

(7) 记录测量时的被测电阻温度，以备进行温度换算时使用。

(二) 注意事项

(1) 电桥使用时须放平稳，切忌倾斜与振动。

(2) 被测电阻接线头要拧紧，防止测量时因接线松脱造成电桥极端不平衡而损坏检流计。

(3) 被测电阻电感量较大时，应先将电源按钮按下一段时间后（时间长短由电感量大小决定），再按检流计按钮，以免因自感电势而损坏检流计。

(4) 对含有电容的设备测量时，应先放电一段时间后（时间长短由电容量大小决定）再进行测量。

三、温度换算

为对测量结果进行比较，直流电阻值均应换算至同一温

度。铜线与铝线的直流电阻换算公式如下：

$$R_2 = R_1 \frac{T + t_1}{T + t_2}$$

式中 R_1 ——温度为 t_1 时的电阻值（欧姆）；

R_2 ——换算到温度为 t_2 时的电阻值（欧姆）；

t_1 ——测量电阻 R_1 时的温度（℃）；

t_2 ——需换算到的温度（℃）；

T ——温度换算常数，对铜线 $T = 234.5$ ；对铝线 $T = 225$ 。

不同温度下的铜、铝直流电阻换算至20℃下的直流电阻时，其温度换算系数见附录一。

第二节 测量绝缘电阻及吸收比

对被试物进行绝缘电阻试验，一般以绝缘电阻值及其吸收比来计量。绝缘电阻系指用兆欧表对被试物加压一定时间下的绝缘电阻值，一般取60秒值。吸收比系指用兆欧表对被试物加压不同时间下的绝缘电阻的比值，一般取60秒与15秒的绝缘电阻比值。因选用的兆欧表电压低于被试物工作电压，故此项试验属于非破坏性试验，操作安全、简便，常用来初步检查被试物绝缘有无受潮及局部缺陷。

用兆欧表对被试物进行绝缘电阻试验时，加在被试物上的电压为直流电压，在直流电压的作用下，流过介质的电流将随时间而衰减，最后趋于一稳定值。这一电流由三部分组成，即电容电流、吸收电流和传导电流。

电容电流 i_1 是由介质极化引起的，一般极化过程很快，电流可认为是瞬间建立的，所以 i_1 只在加压瞬间出现，然后

很快衰减至零。 i_1 的大小主要决定于被试物的几何电容、外加电压及电源内阻，它随时间的变化曲线如图1-3所示。

吸收电流 i_2 也是随时间增长而减小的，但比起电容电流 i_1 要慢得多，它主要是由于不均匀介质的内层极化形成的：

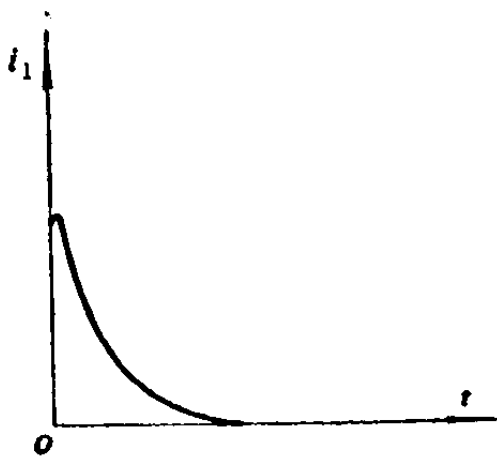


图 1-3 直流电压作用下，
介质电容电流 i_1 随时间的
变化曲线

一般电气设备绝缘常由多种绝缘介质组成，如电机绝缘中的云母和胶合剂、变压器中的油和纸等；即使是一种绝缘材料，它的成份也很复杂，如电缆中的油浸纸就是用溶有松香的矿物油浸透、填满电缆纸纤维中的空隙而成的一种复合绝缘介质；对于使用同一种或性能接近的介质制成的电气设备绝缘，在运行中还常常会由

于绝缘的局部老化而受潮，这部分绝缘电阻降低很多，造成不同部位绝缘的电气性能出现很大差别，所以也是一种不均匀介质。当直流电压作用于不均匀介质上时，由于不同介质的介电常数 ϵ 及电导系数 g 不同，电压的起始分布与稳态分布也将不同。起始分布决定于介电常数 ϵ 的比值，稳态分布决定于电导系数 g 的比值。电压从第一种分布状态过渡到第二种分布状态时，为适应电压的重新分布，在不同介质交界面上电荷必须移动，因而产生电流。我们称这一过渡过程为介质的内层极化过程，所产生的电流 i_2 为吸收电流。吸收过程通常需要较长的时间才能结束，其时间的长短及吸收电流的大小主要决定于介质的不均匀程度和介质的结构状态。吸收电流 i_2 随时间变化的曲线如图1-4所示。

传导电流 i_3 为一不随加压时间变化的恒定电流。由于通常工程上所用的介质，并非纯粹的绝缘体，里面还有极少数束缚很弱的或自由的离子。当电压作用于介质上时，正负离子就分别向两极移动，形成传导电流 i_3 ，其数值大小主要决定于介质在直流电场内的电导率。传导电流 i_3 随时间的变化曲线如图1-5所示。

介质在一定直流电压作用下，介质内所产生的各电流及总电流随时间变化的曲线如图1-6所示。因电阻与电流是成反比的，所以绝缘电阻随时间的变化曲线与电流曲线是相反的，即开始加压时绝缘电阻最小，随着时间的延长绝缘电阻很快增大，经一段时间后便趋于稳定。

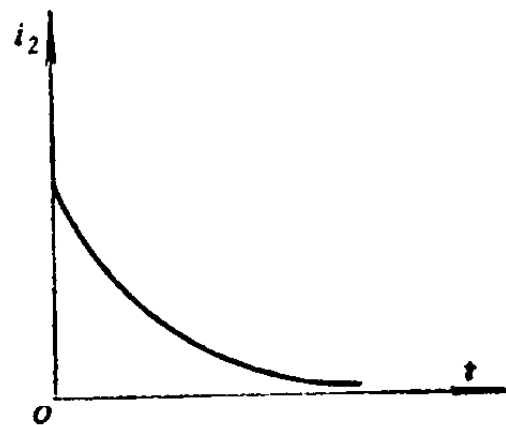


图 1-4 直流电压作用下，介质吸收电流 i_2 随时间的变化曲线

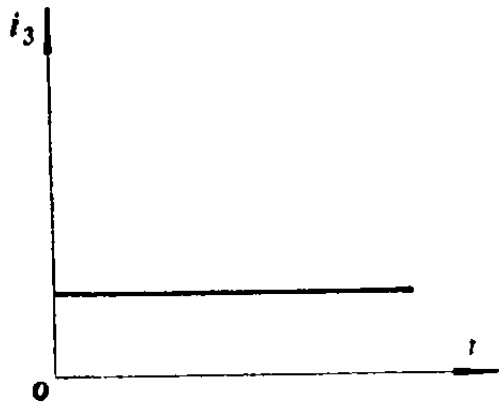


图 1-5 直流电压作用下，介质传导电流 i_3 随时间的变化曲线

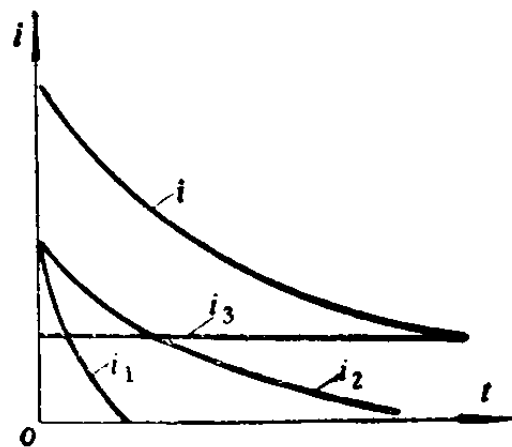


图 1-6 直流电压作用下，介质内所产生的各电流及总电流随时间变化的曲线

i_1 —电容电流； i_2 —吸收电流；
 i_3 —传导电流； i —总电流