

国家电网企业技能人员职业能力培训指导书

电气试验实训指导书

主编 王 伟



东北大学出版社
Northeastern University Press

国家电网企业技能人员职业能力培训指导书

电气试验实训指导书

主编 王 伟

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 王伟 2016

图书在版编目(CIP)数据

电气试验实训指导书 / 王伟主编. —沈阳: 东北
大学出版社, 2016. 12

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1485 - 3

I. ①电… II. ①王… III. ①电气设备—试验
—技术培训—教学参考资料 IV. ①TM64 - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 302760 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024 - 83687331(市场部) 83680267(社务部)

传真: 024 - 83680180(市场部) 83680265(社务部)

E-mail: neuph@neupress.com

网址: <http://www.neupress.com>

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 13

字 数: 324 千字

出版时间: 2016 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 12 月第 1 次印刷

组稿编辑: 石玉玲

责任编辑: 郎 坤

封面设计: 刘江旸

责任校对: 叶 子

责任出版: 唐敏志

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1485 - 3

定 价: 41.50 元



《电气试验实训指导书》

编 委 会

主 任：史凤明

副主任：刘 军 刘忠信

主 编：王 伟

编 委：朱远达 张 肃 朱 毅 王清昊

葛洪光 苏海南 杨雪滨 田 野

前 言

近年来，国家电网有了长足的发展，电气试验技术及试验设备也有了较大的提高和改进。本书结合国家有关部门和国家电网公司等企业新出台的有关规定和一些新的规章制度，对内容进行了精细的安排及编写。本书由国网辽宁省电力有限公司技能培训中心王伟、朱远达、张肃，国网辽宁省抚顺供电公司王清昊，国网辽宁省锦州供电公司朱毅，国网辽宁省辽阳供电公司葛洪光，国网辽宁省电力有限公司检修分公司杨雪滨，国网辽宁省丹东供电公司苏海南，国网辽宁省铁岭供电公司田野编写。编者均是多年从事现场试验工作的专业技术人员，在写作上具有充分结合生产实际、现场实践丰富、针对性实用性强的特点，实用性和参考价值非常之大。

本书主要围绕电气试验专业技能培训展开介绍，主要包括线圈类设备、避雷器设备、地网测量、电容器的试验方法及评判标准，在现场准备工作及试验数据的分析方面做了详细的讲解。本书重点讲解电气试验的实操步骤和数据的分析判断方法，力求内容精简，注重实效，突出重点。在编写过程中整理了大量试验案例，更有利于对理论知识的理解和运用，配合各单位电气设备预防性试验及状态检修工作的开展，通过理论、实操两个方面的结合，提高技能水平。

本书可作为电气试验专业人员的培训教学用书，对高电压试验专业的现场操作人员也有一定的指导和借鉴意义，亦可作为工程技术人员的参考用书。

由于编者水平有限，书中难免存在不足和错误之处，恳请广大读者给予批评指正。

编 者

2016 年 10 月

目 录

第一章 变压器试验	1
第一节 电力变压器概述	1
第二节 变压器绕组绝缘电阻、吸收比及极化指数测量	4
第三节 变压器直流电阻测量	12
第四节 变压器变化、极性和接线组别试验	18
第五节 变压器连同套管介质损耗因数及电容量测量	26
第六节 变压器泄漏电流及直流耐压试验	40
第七节 变压器空载试验	47
第八节 变压器短路试验	53
第九节 变压器绕组变形试验	57
第二章 互感器试验	66
第一节 互感器概述	66
第二节 电流互感器绝缘电阻测量	72
第三节 电流互感器电容量 C 及 $\tan\delta$ 测量	76
第四节 电流互感器交流耐压试验	82
第五节 电流互感器局部放电试验	85
第六节 电压互感器绝缘电阻测量	87
第七节 电压互感器电容量 C 及 $\tan\delta$ 测量	89
第八节 电压互感器励磁特性试验	95
第九节 电压互感器交流耐压试验	97
第十节 互感器常见故障与综合判断实例	101
第三章 电力电缆试验	104
第一节 绝缘电阻测量	105

第二节	直流耐压和泄漏电流测量	108
第三节	电缆故障的分类及探测	111
第四节	交联聚乙烯电力电缆的特性	123
第五节	橡塑电缆耐压试验	129
第四章	金属氧化物避雷器	131
第一节	金属氧化物避雷器概述	131
第二节	流过避雷器的电流分析	137
第三节	金属氧化物避雷器试验	143
第四节	MOA 爆炸分析	148
第五节	MOA 事故案例	152
第五章	电容器试验	156
第一节	高压并联电容器极间电容量测试	156
第二节	电容器绝缘电阻测量	162
第六章	断路器试验	166
第一节	断路器导电回路电阻的测量	166
第二节	断路器交流耐压试验	171
第七章	地网测量	177
第一节	接触电压、跨步电压及电位分布的测量	177
第二节	接地引下线导通试验	184
第三节	架空线路杆塔的接地电阻测量	188
第四节	土壤电阻率测量	193

第一章 变压器试验

第一节 电力变压器概述

变压器是传输电能而不改变其频率的静止的电能量转换器，是电力系统中数量极多且地位十分重要的电气设备，其总容量大约是发电机总容量的9倍以上。其功能是将电力系统中的电压升高或降低，以利于电能的合理输送、分配和使用。在电力系统中，输送同样功率的电能，电压越高，电流就越小，输电线路上的功率损耗也越小；减小输电线的截面积，可以减少导线的金属用量。

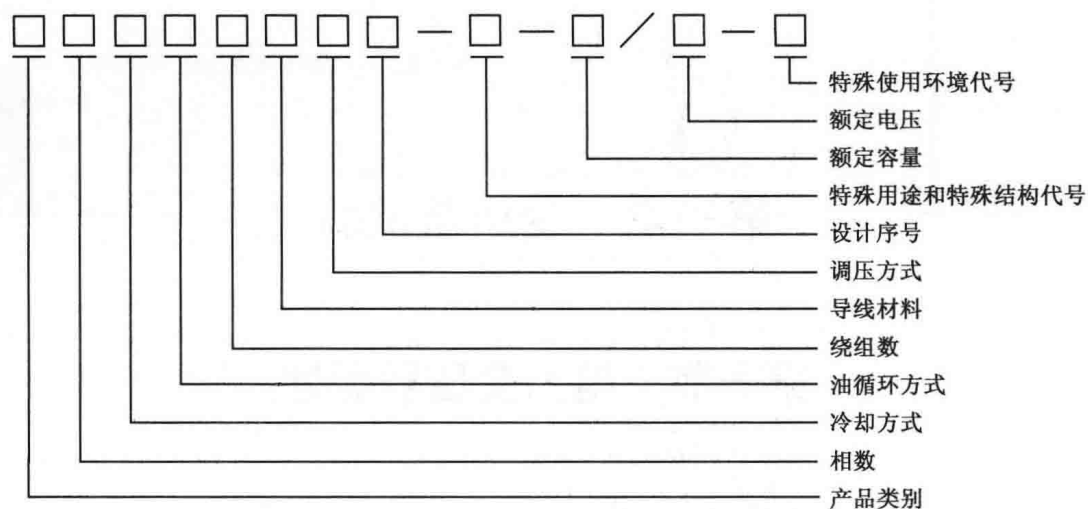
由于制造上的困难，发电机电压不可能很高（目前在20kV以下），所以在发电厂中要用升压变压器将发电机电压升到很高，才能将大量的电能送往远处的用电地区，如35，66，110，220，330，500kV等。而在用电负荷处，用降压变压器将电压降低到适当的数值供用户电气设备使用。电力变压器在传输电能的时候，本身也有一些有功损耗，但不大，因而传输效率很高。中小型变压器的效率不低于95%，大型变压器效率可达到98%以上。

电力变压器按用途分为：升压变压器、降压变压器、联络变压器。按结构分为：双绕组变压器、三绕组变压器、分裂绕组变压器、自耦变压器。按相数分为：单相变压器、三相变压器。按冷却方式分为：干式空冷变压器、油浸自冷变压器、油浸风冷变压器、强迫油循环风冷变压器和强迫油导向循环风冷或水冷变压器等。按容量系列分，有R8容量系列和R10容量系列两大类。R8容量系列指容量等级是按1.33倍数递增，我国老的变压器容量等级采用此系列，如：100，135，180，240，320，420，560，750，1000kVA等。R10容量系列指容量等级按1.26倍数递增。R10系列的容量等级较密，便于合理选用，是IEC（国际电工委员会）推荐采用的。我国新的变压器容量等级采用此系列，如：100，125，160，200，250，315，400，500，630，800，1000kVA。工厂变电所大多采用双绕组变压器。

一、电力变压器型号

1. 产品类别

O—自耦变压器，通用电力变压器不标；H—电弧炉变压器；C—感应电炉变压器；Z—整流变压器；K—矿用变压器；Y—试验变压器。



2. 相数

D—单相变压器；S—三相变压器。

3. 冷却方式

F—风冷式；W—水冷式。

注：油浸自冷式和空气自冷式不标注。

4. 油循环方式

N—自然循环；O—强迫导向循环；P—强迫循环。

5. 绕组数

S—三绕组。

注：双绕组不标注。

6. 导线材料

L—铝绕组。

注：铜绕组不标注。

7. 调压方式

Z—有载调压。

注：无载调压不标注。

8. 性能水平代号（设计序号）

见表 1-1-1。

表 1-1-1 性能水平代号

性能水平代号	电压等级/ kV	性能参数	
		空 载 损 耗	负 载 损 耗
7	6, 10	符合 GB/T 6451 组 II	符合 GB/T 6451
	≥35	符合 GB/T 6451	
8	6, 10	符合 GB/T 6451 组 I	
	≥35	比 GB/T 6451 平均下降 10%	
9	6, 10	配电变压器符合表 A2	比 GB/T 6451 平均下降 10%
	6, 10	电力变压器比 GB/T 6451 组 I 平均下降 10%	
	≥35	比 GB/T 6451 平均下降 20%	
10	6, 10	比 GB/T 6451 组 I 平均下降 20%	比 GB/T 6451 平均下降 15%
11	≥35	比 GB/T 6451 平均下降 30%	
	6, 10	比 GB/T 6451 组 I 平均下降 30%	
	≥35	比 GB/T 6451 平均下降 40%	

9. 特殊用途和特殊结构代号

Z—低噪声用；L—电缆引出；X—现场组装式；J—中性点为全绝缘；CY—发电厂自用变压器。

10. 额定容量

变压器的额定容量，单位为 kVA。

11. 额定电压

变压器的额定容量，单位为 kV。

二、变压器结构

表 1-1-2 油浸式电力变压器结构

部 件	内 容
器身	铁芯、绕组、绝缘结构、引线、分接开关
油箱	油箱本体（箱盖、箱壁、箱底）、附件（放油阀门、油样活门、接地螺栓、铭牌）
冷却装置	散热器、冷却器
保护装置	储油柜（油枕）、油位表、防爆管（安全气道）、吸湿器（呼吸器）、温度计、净油器、气体继电器（瓦斯继电器）
出线装置	高压套管、低压套管

铁芯在电力变压器中是重要的组成部件之一。它由高导磁的硅钢片叠积和钢夹件夹紧而成，铁芯具有两个方面的功能。在原理上，铁芯是构成变压器的磁路。它把一次电路的电能转化为磁能，又把该磁能转化为二次电路的电能，因此，铁芯是能量传递的媒介体。

在结构上，它是构成变压器的骨架。在它的铁芯柱上套上带有绝缘的线圈，并且牢固地对它们支撑和压紧。

绕组是变压器最基本的组成部分，它与铁芯合称电力变压器本体，是建立磁场和传输电能的电路部分。电力变压器绕组由高压绕组，低压绕组，对地绝缘层（主绝缘），高压绕组之间绝缘件及燕尾垫块，撑条构成的油道，高压引线，低压引线等构成。

变压器调压是在变压器的某一绕组上设置分接头，当变换分接头时就减少或增加了一部分线匝，使带有分接头的变压器绕组的匝数减少或增加，其他绕组的匝数没有改变，从而改变了变压器绕组的匝数比。绕组的匝数比改变了，电压比也相应改变，输出电压就改变了，这样就达到了调整电压的目的。

第二节 变压器绕组绝缘电阻、吸收比及极化指数测量

变压器绕组绝缘电阻、吸收比及极化指数测量能有效地检查出变压器绝缘整体受潮、部件表面受潮或脏污以及贯穿性的集中缺陷，如：绝缘子破裂、引线靠壳、器身内部有金属接地、绕组围裙严重老化、绝缘油严重受潮等缺陷，是检查设备绝缘状态最简单和最基本的方法。

一、测量原理

电力设备中的绝缘材料（电介质）是不导电的物质，但并不是绝对不导电。在直流电压的作用下，电介质中有微弱的电流流过。根据电介质材料的性质、构成及结构等的不同，这部分电流可视为由三部分电流构成。

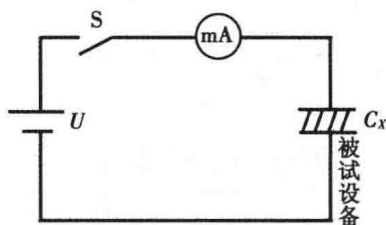


图 1-2-1 试验接线原理图

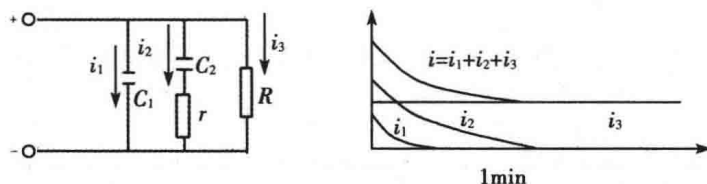


图 1-2-2 介质绝缘电阻等值电路图与吸收曲线

i_1 : 电容电流, 直流电压作用到绝缘材料上, 加压瞬间相当于给电容充电。用一个纯电容 C_1 表示。

i_2 : 吸收电流, 吸收电流由缓慢极化和夹层极化产生, 用一个电容 C_2 和电阻 r 串联表示。

i_3 : 泄漏电流, 这部分电流是由介质的电导引起的, 是理论上要测的电流, 用电阻 R 表示。

三个电流加在一起是实际电流, 这个电流曲线称为吸收曲线。从吸收曲线可以看出, 所谓绝缘电阻就是指加于设备上的直流电压与流过设备的泄漏电流之比, 即

$$R = \frac{U}{i_3} \quad (1-2-1)$$

式中: U ——加于设备两端的电压, V;

i_3 ——对应于电压 U , 设备中的泄漏电流, A;

R ——设备的绝缘电阻, Ω 。

用兆欧表测量设备的绝缘电阻, 由于受介质吸收电流的影响, 绝缘值随时间逐步增大, 通常读施加电压 60s 的数值或稳定值作为工程上的绝缘电阻值。由于 i_3 的大小取决于绝缘材料的状况, 当介质受潮、老化、表面脏污或有其他缺陷 (如有裂缝、灰化、气泡等) 时, i_3 会增大, R 降低。因此测量绝缘电阻是了解电力设备绝缘情况的最简便、常用的手段之一。

吸收比: 为 60s 绝缘电阻值 (R_{60s}) 与 15s 绝缘电阻值 (R_{15s}) 之比。中小型变压器的吸收现象要弱些, 根据吸收比的变化就可以判断绝缘的情况。

$$K = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} \quad (1-2-2)$$

极化指数: 对于大容量和吸收过程较长的设备, 如大型变压器、电缆等, 有时吸收比尚不足反映吸收的全过程, 而采用较长时间的绝缘电阻比值, 即采用 10min 的绝缘电阻 (R_{10min}) 与 1min 的绝缘电阻值 (R_{1min}) 比值 P 来描述绝缘吸收的全过程, P 称为绝缘极化指数。

$$P = \frac{R_{10min}}{R_{1min}} \quad (1-2-3)$$

二、测量方法

新安装或检修后及停运半个月以上的变压器投入运行前均应测定线圈的绝缘电阻。测量变压器绝缘电阻时, 对线圈运行电压在 500V 以上者应使用 1000 ~ 2500V 兆欧表, 500V 以下者应使用 500V 兆欧表。

1. 变压器绝缘电阻测试部位

表 1-2-1 变压器绝缘电阻测量接线部位

顺序	双绕组变压器		三绕组变压器	
	被测绕组	接地部位	被测绕组	接地部位
1	低压		低压	外壳、高压及中压
2	高压		中压	外壳、高压及低压
3	—	—	高压	外壳、中压及低压
4	高压及低压	外壳	高压及中压	外壳及低压
5	—	—	高压、中压及低压	外壳

常见的绝缘电阻表根据电压等级有：500，1000，2500，5000V 等几种。从使用形式上分手摇式、电动式。

表 1-2-2 兆欧表选择

变压器规格/ (kV/kVA)	1000 及 以下	10/4000 及 以下	35/4000 及 以上	35/4000 以上	220/120000 以上
绝缘电阻表规格/ (V/MΩ)	1000	2500/2500	2500/2500	5000/10000	5000/100000

2. 测量步骤

(1) 低压侧绝缘电阻测试接线

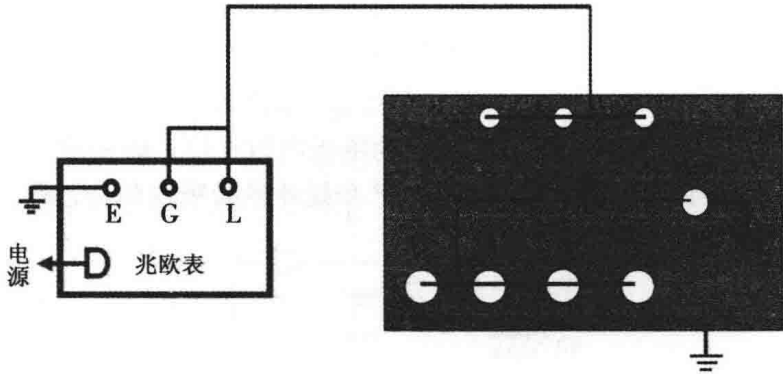


图 1-2-3 低压侧绝缘电阻测试接线

- ①试验前先检查安全措施，被试品电源及一切对外连线应拆除，被试品接地放电，大容量设备至少放电 5min，勿用手直接接触放电导线。
- ②根据表面脏污及潮湿情况决定是否采取表面屏蔽、烘干及清除干净表面脏污，以消除表面脏污对绝缘电阻的影响。
- ③放稳绝缘电阻表，检验绝缘电阻表是否指“0”或“∞”。短接 L，E 时应瞬间、低速，以免损坏绝缘电阻表。
- ④将被试品测量部分接于“L”与“E”端子之间，“L”端子接高压测量部分，“E”端子接低压或外壳接地部分，接线经检查无误后，按下“开始”按钮，仪器开始工作，1min 后记录绝缘电阻值。测试完成后，先将仪表与试品断开，再按下“停止”按钮，使

仪器恢复。

⑤测量吸收比时，先驱动绝缘电阻表达额定转速，待指示为“ ∞ ”时，将“L”端子接于被试品，同时开始计算时间，读取 15s 和 60s 时绝缘电阻值。读数后先断开“L”端子与被试品连线（用绝缘柄），再停止摇动，防止反充电损坏绝缘电阻表。

⑥试验完毕或重复试验时，必须将被试品对地或两极间充分放电，以保证人身、仪器安全和提高测量准确度。

⑦记录被试品设备铭牌、运行编号、本体温度、环境温度及使用的绝缘电阻表型号。

(2) 高压侧绝缘电阻测试接线（图 1-2-4）

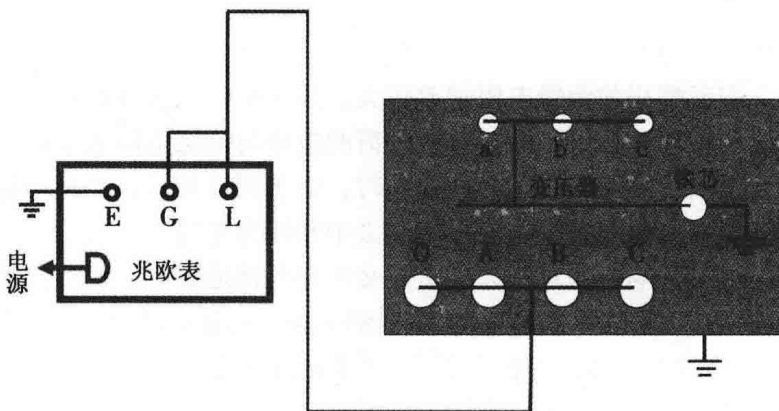


图 1-2-4 高压侧绝缘电阻测试接线

三、测量影响因素

(1) 温度对绝缘电阻测量的影响

绝缘介质温度升高后，载流子数目增加且运动频繁，绝缘电阻下降。由于电介质绝缘各自有不同的温度变化规律，当温度变化时，复合介质的吸收过程也在变化。因此，绝缘电阻和吸收比都有一定的温度系数。温度对绝缘电阻的影响很大，一般绝缘电阻是随温度上升而减小的，原因在于当温度升高时绝缘介质中的极化加剧、电导增加，致使绝缘电阻值降低，并且温度变化的程度与绝缘材料的性质和结构等有关。

为什么介质的绝缘电阻随温度升高而减小，金属材料的电阻却随温度升高而增大？

绝缘材料电阻系数很大，其导电性质是离子性的，而金属导体的导电性质是自由电子性的，在离子性导电中，作为电流流动的电荷是附在分子上的，它不能脱离分子而移动。当绝缘材料中存在一部分从结晶晶体中分离出来的离子后，则材料具有一定的导电能力，当温度升高时，材料中原子、分子的活动增加，产生离子的数目也增加，因而导电能力增加，绝缘电阻减小。而在自由电子性导电的金属中，其所具有的自由电子数目是固定不变的，而且不受温度影响，当温度升高时，材料中原子、分子的运动增加，自由电子移动时与分子碰撞的可能性增加，因此，所受的阻力增大，即金属导体随温度升高电阻也增大了。

(2) 湿度对绝缘电阻测量的影响

湿度对表面泄漏电流的影响较大，绝缘材料表面吸附潮气形成水膜，常使绝缘电阻显

著降低,此外由于某些绝缘材料有毛细管作用,在空气相对湿度较大时,会吸收较多的水分,增加了电导,也使绝缘电阻值降低。

(3) 放电时间对绝缘电阻测量的影响

每次测量绝缘电阻后,应将被试设备充分放电,放电时间应大于充电时间,以利将剩余电荷放尽,否则,在重复测试时,由于剩余电荷的影响,其充电电流和吸收电流将比上一次测量时小,因而造成吸收比减小,绝缘电阻值增大的虚假现象。

(4) 表面脏污对绝缘电阻的影响

表面脏污,带有很多杂质,形成导电通道,降低了绝缘电阻,影响绝缘电阻的测量。

(5) 残余电荷影响

大容量设备运行中遗留的残余电荷或试验中形成的残余电荷未完全放尽,会造成绝缘电阻偏大或偏小,引起测得的绝缘电阻偏差较大。残余电荷的极性与绝缘电阻表的极性相同时,测得的绝缘电阻将比真实值大;残余电荷的极性与绝缘电阻表的极性相反时,测得的绝缘电阻将比真实值小。原因在于极性相同时,由于同性相斥,绝缘电阻表输出较少电荷;极性相反时,绝缘电阻表要输出更多电荷去中和残余电荷。

为消除残余电荷的影响,测量绝缘电阻前必须充分接地放电,重复测量中也应充分放电,大容量设备应至少放电 5min。如一大容量变压器,充分放电后第一次测得其一个绕组的绝缘电阻为 4000MΩ,第二次再测同一绕组(未充分放电),绝缘电阻为 5000MΩ,充分放电 10min 后第三次测量,其绝缘电阻为 4000MΩ。

测量变压器绝缘时应注意以下问题:

- ①必须在变压器停电时进行,各线圈出线都有明显断开点。
- ②变压器周围清洁,无接地物,无作业人员。
- ③测量前应对地放电,测量后也应对地放电。
- ④测量使用的摇表应符合电压等级要求。
- ⑤中性点接地的变压器,测量前应将中性点刀闸拉开,测量后应恢复原位。

四、数据分析判断

- (1) 安装时绝缘电阻值不应低于出厂试验时绝缘电阻的 70%。
- (2) 预防性试验时绝缘电阻值不应低于安装或大修后投入运行前的测量值的 50%。
- (3) 同期同类型变压器同类绕组的绝缘电阻不应有明显异常。
- (4) 同一变压器绝缘电阻测量结果,一般高压绕组测量值应大于中压绕组测量值,中压绕组测量值大于低压绕组测量值。

温度对绝缘电阻影响很大,当温度增加时,绝缘电阻将按指数规律下降,为便于比较每次测量结果,最好能在相近的温度下进行测量。当现场无法满足上述条件时,可对测量结果按式(1-2-4)或表 1-2-3 所示温度换算系数进行换算:

$$R_2 = R_1 \times 1.5^{\frac{t_1 - t_2}{10}} \quad (1-2-4)$$

式中: R_1 , R_2 ——温度 t_1 , t_2 时的绝缘电阻值。

表 1-2-3

油浸电力变压器绝缘电阻的温度换算系数

温度差/℃	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
换算系数	1.2	1.5	1.8	2.3	2.8	3.4	4.1	5.1	6.2	7.5	9.2	11.2

若发现某一绕组绝缘电阻低于允许值或与比较值相比降低很多,可利用绝缘电阻表屏蔽法确定变压器绝缘劣化的具体部位。

测量绝缘电阻能发现与不能发现的缺陷:

可发现的缺陷:①贯穿性集中缺陷;②整体受潮或有贯穿性的受潮部分;③表面污垢(比较有无屏蔽极时的值即可)。

不能发现的缺陷:①未贯通的集中缺陷;②绝缘整体老化(仍保持高阻值)。

五、常用仪器

1. 常用仪表

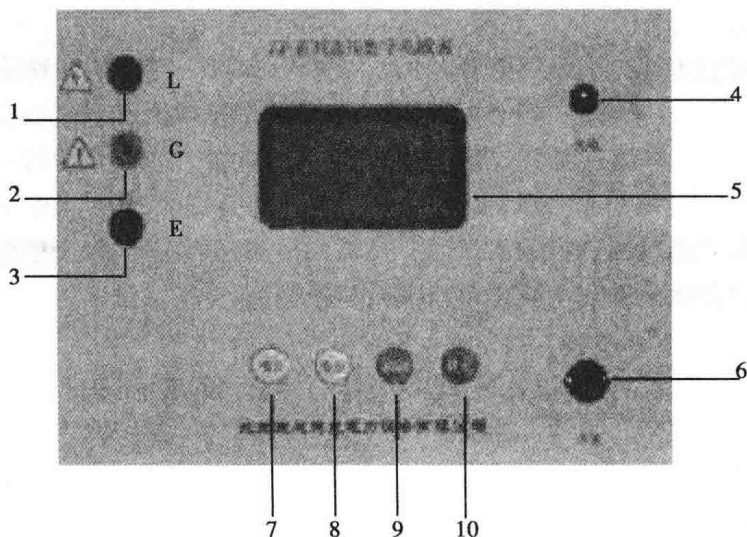


图 1-2-5 使用仪表

1—线路端钮接线柱“L”;2—屏蔽端钮接线柱“G”;3—接地端钮接线柱“E”;4—充电插孔;
5—绝缘阻值显示屏;6—电源总开关;7—项目键;8—电压键;9—启动键;10—停止键

①线路端钮接线柱“L”:由高压电缆引至被测试品处,例如接至发电机绕组、避雷器等。

②屏蔽端钮接线柱“G”:接至设备屏蔽端、保护端处。

③接地端钮接线柱“E”:接至被测物的地端,例如设备外壳、变压器铁芯、仪器安全接地端。为确保人员和设备的安全,需检查接地线的可靠性。

④充电插孔:充电器专用插孔。

⑤绝缘阻值显示屏:128×64 带背光点阵显示屏。

⑥电源总开关:仪器闲置时,需拨至“关”位置。

⑦项目键：用于常规测试、吸收比、极化指数和快速点测的选择，也是背光的开/关键。

⑧电压键：用于选择输出高压。

⑨启动键：按下则启动测试。

⑩停止键：按下则停止测试、关闭高压。

2. 使用方法及步骤

①打开电源，仪表显示设备型号、编号。如果电池电量低，仪表将以声响提示并显示提示信息：“电量不足，请充满电后再使用。”提示信息显示 15s 后自动关机。

例如：

型号：ZP5053

编号：C001

启动检测……

②之后显示中文选择菜单，可根据不同需要进行选择。

按项目键，在项目处显示并选择：常规、吸收比、极化指数、快速点测四种测试方式。

按电压键，可在电压处显示并选择：500，1000，2500，5000V 四种输出高压。

例如：

电压：500V

项目：常规

③启动高压和状态检测。启动高压后，仪器先检测是否有短路、过载等现象并使保护电路动作，显示故障信息并以声响提示。

④测试界面。

例如：

前 60s 界面

阻值：23.6GΩ

电压：2500V

<正在测试>0:00:15

后 60s 界面

阻值：42.1GΩ

电压：2500V

吸收比：1.78

<正在测试>0:02:10

测试时间到达 10min 界面

阻值：104.5GΩ

电压：2500V

极化指数：2.48

<正在测试>0:11:25

⑤测量结束。