

TM506

7479

电器试验和测量技术

陈璧光 沈能士 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍电器试验和相关的测量技术。全书共分九章,主要包括:概述,电器试验中常用测量仪表的使用,电压和电流瞬变量的测量和波形记录,测量误差和仪器仪表的准确度,电器温升试验测试技术,电器动作特性试验和测量,开关电器交流通断能力试验的测试技术,开关电器直流通断能力试验测试技术,电热稳定试验的测试技术。

本书可作为从事电器试验、检测、验收、维修等工作的技术人员和技术工人日常工作的参考书,也可供从事电器设计和现场运行的人员及大专院校电器专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

电器试验和测量技术/陈璧光,沈能士编著. -北京:
中国电力出版社, 1998
ISBN 7-80125-893-2

I. 电… I. ①陈…②沈… II. ①电器-试验②电
气测量-测量方法 N. TM506

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 31652 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
北京市地矿印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

1999 年 3 月第一版 1999 年 3 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 32 开本 14 印张 310 千字
印数 0001—3000 册 定价 15.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书主要介绍电器试验和相关的测量技术方面的知识。全书共九章。第一章概括说明电器试验对保证电器产品质量的重要性和必要性以及如何保证试验本身的质量问题。第二章主要介绍电器试验中常用的测量仪表、仪器如何正确选择和使用,介绍电参数和电路参数的正确测量方法及其原理。第三章介绍电器试验中常用的三种测量和记录电流、电压波形用的示波器的基本原理和使用方法。第四章着重介绍电器试验中有关的测量误差问题,包括测量误差的概念,仪器仪表的误差、准确度、准确等级的概念,测量误差的计算方法以及如何减少测量误差等。第二至第四章中所介绍的有关测量方面的内容是为以后各章电器性能试验中涉及的测量问题打基础的。第五至第九章介绍电器的性能试验和测量技术,是本书的主体部分。各章中除介绍有关的测试电路、各种测试方法及其原理依据、必要的计算公式及计算方法外,还详细列出电器试验中易被疏忽的但对试验结果的正确性有影响的一些因素及消除或减少其影响的办法。

本书不仅实用性强,也着重原理方面的论述,内容由浅入深,循序渐进,因此,具有广泛的适用性。它对提高从事电器试验、检测、验收、维修等工作的技术人员和技术工人在现场测试工作中解决问题的能力 and 减少工作中容易发生的失误有很大的帮助,对从事电器设计和现场运行的技术人员同样有用,也可供大专院校电器专业学生学习参考。

本书承张冠生教授,赵景惠、恽绣虎二位高工(教授

级)，尹端士，林国诚二位高工审阅，并提出许多宝贵意见，在此谨致衷心的感谢。

由于作者水平的限制，书中难免有错误和不足之处，恳请读者给予批评指正。

作 者

1998 年 3 月

目 录

前 言

第一章	概述	1
第一节	电器试验和产品质量	1
第二节	电器试验和试验质量	2
第二章	电器试验中常用测量仪表的使用	4
第一节	电器试验中常用测量仪表类别	4
第二节	电器试验中测量直流电压和电流用测量 仪表的选用	6
第三节	电器试验中测量交流电压和电流用的测量 仪表的选用	37
第四节	功率的测量	58
第五节	功率因数的测量	69
第六节	电路时间常数的测量	81
第七节	R 、 L 、 C 和 Z 、 X_L 、 X_C 的测量方法及测量 仪器的选用	82
第三章	电压和电流瞬变量的测量和波形 记录	102
第一节	光线示波器	102
第二节	电子示波器	121
第三节	数字瞬态记录仪	141
第四章	测量误差和仪器仪表的准确度	162
第一节	测量误差	162
第二节	仪器仪表的误差、准确度和准确等级	176

第三节	测量误差的合成和传递	183
第五章	电器温升试验测试技术	193
第一节	影响电器温升的一些因素	193
第二节	电器温升试验中电流、电压和功率的测量	212
第三节	温度和温升的测量	217
第四节	接触电阻和接触电压降测量	227
第六章	电器动作特性试验和测量	235
第一节	直流动作电压试验和测量	235
第二节	直流动作电流试验和测量	246
第三节	交流动作电压试验和测量	252
第四节	交流动作电流试验和测量	261
第五节	安秒特性测试	267
第七章	开关电器交流通断能力试验的 测试技术	273
第一节	概述	273
第二节	交流通断能力试验的测试电路	274
第三节	交流通断能力试验中电压的测量	280
第四节	交流通断能力试验中电流的测量	326
第五节	交流通断试验电路全电路功率因数的测量及其 对试品通断的影响	342
第六节	电源频率的测量及对通断试验的影响	351
第八章	开关电器直流通断能力试验 测试技术	355
第一节	直流通断能力试验的测试电路	355
第二节	直流通断能力试验中电压的测量	360
第三节	直流通断能力试验中电流和电路时间常数的测量	369
第九章	动热稳定试验的测试技术	383
第一节	动热稳定试验的试验要求和试验电路	383

第二节	试验电路阻抗计算	387
第三节	影响因素	406
第四节	i_{lm} 、 I 、 t 、 I^2t 和温度的测量	419
第五节	动稳定试验	426
第六节	热稳定试验	430
参考文献		438

概 述

第一节 电器试验和产品质量

电器从新产品研制、投产，直至运行、维修的整个生产和使用过程，大概可分为三个阶段：新产品研制阶段，正式投入批量生产阶段，运行和维修阶段。电器在这三个阶段中的任一阶段都要进行一系列试验，各个阶段试验的性质和内容也不完全相同。在新产品研制阶段进行的试验，包括许多研究性质的试验和新产品鉴定投产前的型式试验，前者的目的是提供必要的数据为设计出高质量的新产品服务，后者则是考核性质的试验，目的是考核和确定新产品的质量是否已达到规定的要求和是否可以投入批量生产。在电器正式投产后的阶段需要进行的试验，包括出厂试验和定期型式试验。出厂试验的目的是保证出厂的每台产品质量是可靠的；定期型式试验的目的则是保证批量生产的电器质量能保持稳定不变。在运行和维修阶段的试验，包括在正式投入运行前的交接试验和在定期维修后再投入运行前的交接试验（或称维修试验）。交接试验是在电器经运输或储存后准备正式使用前为保证安全运行而进行的试验；维修试验是在电器经一定时间运行后进行定期维修或在运行中发现电器有某些故障经维修后而进行的试验，其试验内容与交接试验相同，试验目的

是证实维修后的电器质量可靠，可以再投入运行。

综上所述可知，电器从研制新产品开始直至运行和维修为止的各个阶段都与试验密切相关，而进行各种试验的最终目的都是为了保证产品质量，保证产品在长期实际运行中使用安全，性能稳定可靠。

第二节 电器试验和试验质量

电器试验在保证产品质量上起到重要的作用，但必须指出试验本身也存在质量问题，即试验也可能有差错。如果试验质量不能保证，当然谈不上保证产品质量。因此，严格要求试验本身的质量是保证产品质量的先决条件之一。试验质量可概括为以下几个主要方面：

一、试验设备的质量符合要求

试验设备包括电源设备、调节电压和电流设备、负载阻抗设备等一些试验专用的、试验标准对它们有一定质量要求的设备。例如对交流电源设备的频率和波形方面，试验标准对之都有严格要求。因为试验设备如有质量问题，必将影响试验结果，从而也影响对产品质量作出正确的判断。

二、正确的试验电路

试验电路包括主电路、保护和控制电路等。不同试验有不同的试验电路，相同试验也可以有不完全相同的试验电路。例如通断能力试验中负载阻抗有前接和后接的不同，接地方式有一点接地和两点接地之分等。不同试验电路的试验结果一般是不相同的。

三、正确的试验方法

同一试验项目可以有多种不同的试验方法。例如电器温

升试验有恒电流、恒电压、恒功率温升试验之分；电压线圈动作试验有电压突加和电压渐加两种方式等。显然，不同试验方法，也可出现不同的试验结果。

四、符合规定的试验条件

试验条件主要指不同的环境条件，例如在不同的环境温度下进行温升试验、在不同的大气压（或不同海拔高度）下进行耐压试验，其试验结果都可能不同。

五、正确选用测量仪表和仪器

测量仪表仪器如选择不当或使用不当，测得的可能是不正确的数据，从而直接影响试验结果，对产品质量可能作出错误的判断。

六、正确的测量电路和方法

不同的测量电路和测量方法对测量结果也会有影响，从而影响试验结果。

上述第一～第四各项所指的有关试验质量的要求，在电器产品标准中和试验方法标准中都已具有具体规定。而上述第五和第六二项所指的，即涉及测量技术和测量质量方面的要求，在有关标准中就很少有具体的规定，故在实际试验时常被忽视。例如在测量交流电压或电流时，交流电源的频率如有不同，对测量结果就可能有较大影响；又如交流波形畸变也会影响测量结果（例如变压器或互感器的空载电流测量）。因此，要保证产品质量，就必须先保证试验质量，而试验质量与测量技术密切相关。本书内容包括电器试验和测量技术两个方面，目的是希望能引起读者对试验质量的重视和更好地掌握这方面的知识。

第二章

电器试验中常用测量 仪表的使用

电器试验的过程中必须直接或间接测量各种参数，包括电方面的参数如电压、电流、功率、功率因数、频率、电阻、电感、电容、阻抗等和磁方面的参数如磁场强度、磁通量、铁磁损耗等，还有非电磁参数如温度、时间、动作次数等。这些参数一般都可用常用的各种不同类型的测量仪表来直接或间接测量得到。由于每种测量仪表都有其特定的性能和用途，如果选用时选择不当，就有可能使所测得的数据或者达不到规定的精度，或者甚至是错误的数据，从而影响试验结果或试验质量。因此，如何正确选用测量仪表也是电器试验中的重要课题之一。下面介绍在电器试验中常用的一些测量仪表如何正确地选择和使用。

第一节 电器试验中常用测量 仪表类别

电器试验中常用测量仪表可分为电工仪表、电子式仪表和数字式仪表三大类。

一、电工仪表

电工仪表是根据电工学原理设计制造的用于电磁测量的仪表。这一类仪表能把输入的被测电磁量转变为一定大小的电磁转矩，此电磁转矩再推动仪表指针使之偏转一定角度而指出被测值的大小。电工仪表的特点是结构简单、携带和使用都十分方便，抗干扰能力也强，而且型式多样，可满足各种测量的需要，因此，在电器试验的领域中使用得最为普遍。电工仪表按工作原理还可细分为以下几种：磁电系、电磁系、电动系、整流系、静电系、热电系和感应系。表 2-1 列出这几系仪表的图形符号供参考。由于在这类仪表的表盘上都标有对应的图形符号，故观察仪表表盘上所标的图形符号就可知此仪表属于何系。

表 2-1 电工仪表按原理分类的图形符号

磁电系		热电系	
电磁系		静电系	
电动系		感应系	
整流系			

二、电子仪表

电子仪表是根据电子学原理设计制造而成的，包括主要用于电子测量方面的各种仪表仪器在内，统称为电子仪表。电子仪表的种类甚多，但电器试验中常用的电子仪表仅交流毫伏表、峰值电压表等属于晶体管式或电子管式的几种指示仪表。电子仪表主要由电子电路、磁电系指示仪表和交流电源等三部分组合而成。由于这一类仪表是在磁电系仪表的输入部分增加电子电路后组成的，所以它在输入阻抗、灵敏度和频率范围等方面都比原磁电系仪表高得多，这是电子仪表的

主要特点。但电子仪表使用时必须有电源(例如要有 220V 交流电源),故在使用上不及电工仪表方便。

三、数字式仪表

数字式仪表是根据半导体脉冲数字电路原理设计制造而成,能把被测值用数字直接显示出的一种仪表。数字式仪表完全摆脱了传统的以偏转角度来指示被测量的方式,而以数字形式直接显示出被测量,这不仅可使读数更正确方便,而且由于仪表减少了机械传动部分,更有利于提高仪表的精度。

为了与数字式仪表相区别,以指针偏转方式来指示被测量的仪表统称为模拟式仪表。

第二节 电器试验中测量直流电压和 电流用测量仪表的选用

一、测量直流电压和电流用仪表的类型和结构原理

有多种类型的电压表(电流表)可用于测量直流电压(电流)。常用的如磁电系电压(电流)表、电磁系电压(电流)表、电动系电压(电流)表、静电系电压表(属电工仪表大类);直流晶体管电压表(属电子仪表大类);数字式直流电压表(属数字式仪表大类)等。如果被测直流电压是一平直的直流电压[见图 2-1 (a)],则选用上述六种电压表中的任何一种,测得的结果都是相同的。但如果被测电压是脉动的直流电压,例如整流直流电压[见图 2-1 (b)],则上述不同类型电压表测得的结果就可能不相同。为了便于说明其中的原理,下面先简要介绍上述各类型仪表的结构原理。

(一) 磁电系仪表结构原理

磁电系仪表的原理结构图如图 2-2 所示。图中永久磁铁

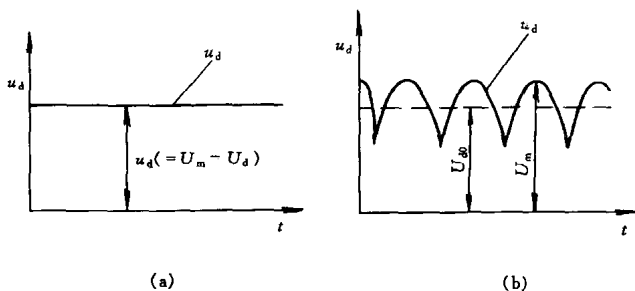


图 2-1 被测电压波形图

(a) 平直直流电压波形；(b) 脉动直流电压波形

1 和铁心 2 是固定不动的，线圈 3 是活动的，它带动指针 4 沿中心轴偏转。当被测电压 u_d 接入仪表的两输入端上时，将有直流电流 $i_d (=u_d/r_v, r_v$ 是仪表内阻) 流过线圈 3， i_d 与永久磁铁产生的磁感应强度 B 互相作用后将产生电磁力矩 M_d ，推动线圈偏转，

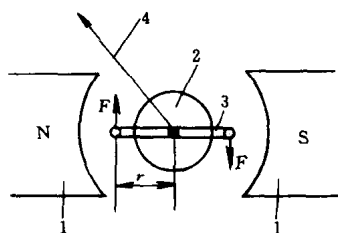


图 2-2 磁电系仪表原理结构

指针也随之偏转。由于在线圈转轴上装有游丝，当线圈和指针偏转一角度 α 时，游丝将产生反力矩 M_α 。 M_d 和 M_α 可用下式表示

$$M_d = F \cdot 2r = BNAi_d = BNAu_d/r_v \quad (2-1)$$

$$M_\alpha = D\alpha \quad (2-2)$$

当 $M_d = M_\alpha$ 时，指针停止偏转，从上两式可得

$$u_d = \frac{Dr_v}{BNA} \alpha = C_v \alpha \quad (2-3)$$

$$i_d = \frac{D}{BNA} \alpha = C_i \alpha \quad (2-4)$$

式中 N ——线圈匝数；

A ——线圈有效面积；

D ——游丝钢度（比例常数）；

C_V, C_I ——分别是仪表电压常数和电流常数。

从式 (2-3) 和式 (2-4) 可知被测值 u_d (或 i_d) 与偏转角 α 是正比关系，并且电磁力矩 M_d 的方向（即 α 偏转方向）与 u_d 或 i_d 的正负极性有关，故仪表接入被测电路时要注意被测电压（电流）的极性，不可接错。又从式 (2-3) 可看出，如果 u_d 是平直直流电压，由于 $u_d = U_d$ [见图 2-1 (a)]，可得 $U_d = C_V \alpha$ ，即指针偏转角 α 的大小能正确反映被测平直直流电压值 U_d 。因此，磁电系仪表用以测量平直直流电压（电流）是没有问题的。但如果 u_d 是一脉动直流电压 [图 2-1 (b)]，磁电系电压表是否也能测量？对此，首先必须了解，所有直读式指示仪表的转动部件（包括指针）的惯性都较大，使指针的偏转跟不上快速变化的脉动电压，但可以证明指针是随脉动电压所产生的平均转矩 M_{ar} 而偏转，即偏转角 α 与 M_{ar} [而不是 M_d ，见式 (2-1)] 成正比关系。而 M_{ar} 对磁电系电压表来说可用下式表示 [见式 (2-1)]

$$M_{ar} = \frac{BNA}{T} \int_0^T \frac{u_d}{r_V} dt = \frac{BNA}{r_V} \times \frac{1}{T} \int_0^T u_d dt \quad (2-5)$$

式中 M_{ar} ——磁电系仪表在脉动直流电压作用下产生的平均转矩；

T ——脉动周期。

现以图 2-1 (b) 所示的三相半波整流电压为例，根据式 (2-5) 来求其 M_{ar} 值。设 u_d 为图 2-1 (b) 的脉动电压的值，则根据谐波分析，可得下式

$$u_d = U_{d0} + U_{3m} \cos 3\omega t - U_{6m} \cos 6\omega t + \cdots \quad (2-6)$$

式中 U_{d0} ——此脉动电压 u_d 的平均值电压[见图2-1 (b)];
 U_{3m} , U_{6m} ……各次谐波电压的幅值。

U_{d0} 、 U_{3m} 、 U_{6m} 等值为

$$U_{d0} = \frac{3}{\pi} \int_0^{\pi/3} U_m \cos \omega t d\omega t = \frac{3}{\pi} \left(\sin \frac{\pi}{3} \right) U_m = 0.827 U_m \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} U_{3m} &= \frac{2 \times 3}{\pi} \int_0^{\pi/3} U_m \cos \omega t \cos 3\omega t d\omega t \\ &= \frac{1}{4} \left(\frac{3}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \right) U_m = \frac{1}{4} U_{d0} \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$U_{6m} = \frac{2}{35} U_{d0} \quad (2-9)$$

式中 U_m ——三相半波整流脉动电压的幅值电压, 参见图 2-1 (b)。

把上两式代入式 (2-6) 可得

$$u_d = U_{d0} \left(1 + \frac{1}{4} \cos 3\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t + \dots \right) \quad (2-10)$$

把式 (2-10) 代入式 (2-5), 可计算得到此脉动电压的 M_{ar} 为

$$M_{ar} = \frac{BNA}{r_v} \cdot U_{d0}$$

因为式 (2-10) 右边交流正弦电压在 T 周期内的平均值均为零。

则当 $M_a = M_{ar}$ 时得

$$\alpha = \frac{M_{ar}}{D} = \frac{BNA}{Dr_v} \cdot U_{d0} = \frac{1}{C_v} U_{d0} \quad (2-11)$$

式 (2-11) 证明用磁电系仪表测脉动直流电压时反映的是此脉动电压的平均值电压 U_{d0} (或电流为 I_{d0})。至于要测量脉动直流电压的幅值 U_m 和有效值 U 必须改用其它型式的仪

表，将在后面再作说明。

由于交流电压（电流）的平均值为零，故磁电系仪表不能用于测量交流。如错把此类型仪表用于测交流电压（电流），就会发现指针不偏转（不动或有些微抖动），以为被测电压（电流）为零值而疏忽大意，容易发生触电事故，或因有些抖动以为电压（电流）很小，而不断用调压器提高电压（电流），就有可能使此电压（电流）表因线圈发热而烧坏。

（二）电磁系仪表结构原理

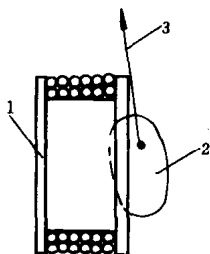


图 2-3 电磁系仪表的结构原理

电磁系仪表有吸引型、排斥型、吸引排斥综合型三种结构。图 2-3 所示为吸引型仪表的结构原理。图中线圈 1 是固定的，当电压接入时，即有电流通过此线圈而产生电磁力把铁心 2 吸入，使指针 3 偏转。根据电工学原理，线圈与铁心间的电磁力所产生转矩 M_d 可表示为

$$M_d = \frac{d}{d\alpha} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha} = \frac{1}{2} \left(\frac{u}{r_v} \right)^2 \frac{dL}{d\alpha} \quad (2-12)$$

当 M_d 与游丝反力矩 $M_s = D\alpha$ 相等时（即 $M_d = M_s$ ），指针偏转停止，可得

$$\alpha = \frac{1}{2Dr_v^2} \left(\frac{dL}{d\alpha} \right) u^2 \quad (2-13a)$$

和

$$\alpha = \frac{1}{2D} \left(\frac{dL}{d\alpha} \right) i^2 \quad (2-13b)$$

式中 L ——仪表线圈电感。

上两式是电磁系仪表可测量电压和电流的原理依据。从上两式和式 (2-12) 可知电磁系仪表的 α 和 M_d 都与 u （或 i ）的平方成正比，故 α 的偏转方向或 M_d 的作用方向均与 u 的