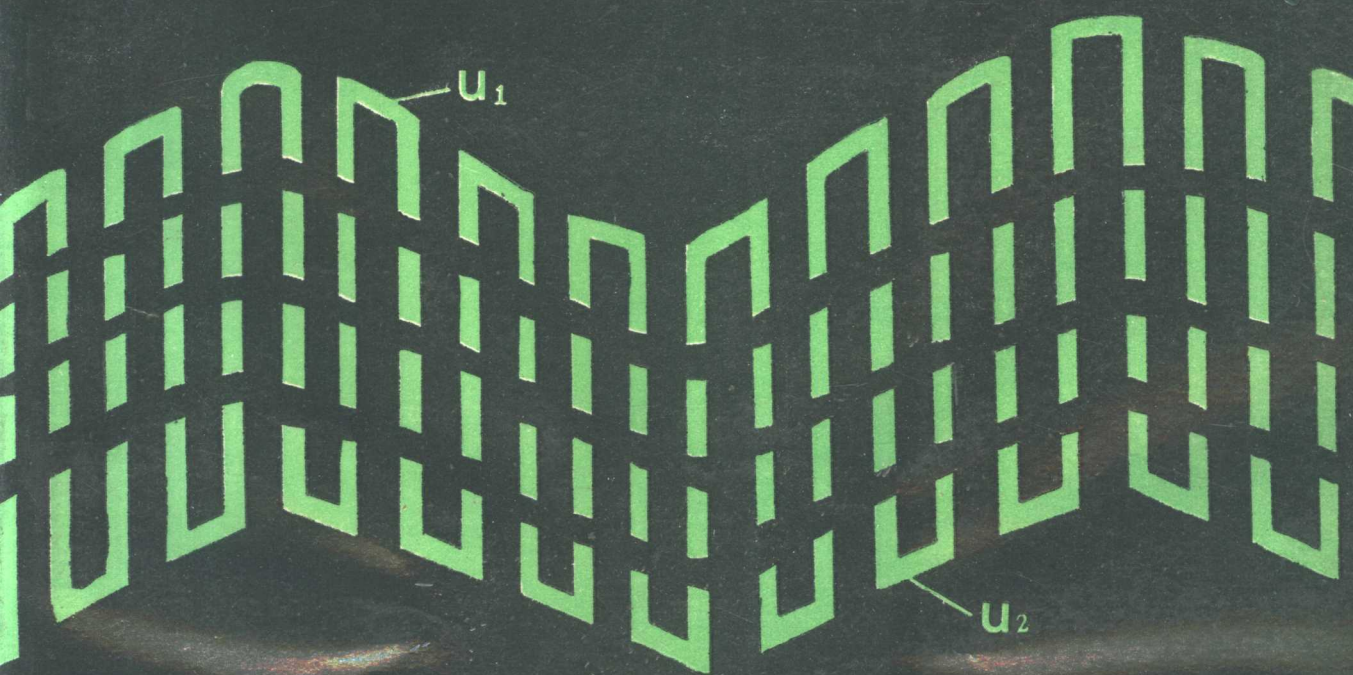


电工测量技术

刘兴兰 龙克勇 郭永德 编著



成都科技大学出版社

电工测量技术

刘兴兰 龙克勇 郭永德编著

成都科技大学出版社

(川) 新登字015号

内 容 提 要

本书系统地介绍了各种电气量的传统测量原理、方法、设备及其使用,并注意反映电工测量技术的新进展;为适应测量技术向电子化、数字化、智能化方向发展的趋势,适当介绍了电子测量方法和测量设备,以及电工测量的数字化技术和微机检测技术;另外,还突出讲述工程测量误差的估算。每章附有习题。

本书适于作电类(非测量专业)有关专业的教材,也可供有关技术人员参考。

全书12章,其中第一、二、九、十二章由龙克勇副教授编写;第三至八章由刘兴兰副教授编写;第十、十一章由郭永德讲师编写。

电工测量技术

刘兴兰 龙克勇 郭永德 编著

成都科技大学出版社出版发行

成都科技大学印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张15.125

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

字数:349千字 印数:1—2100册

ISBN7-5616-0952-3/TM·13 定价:3.43元

目 录

第一章 概述	(1)
§ 1—1 电工测量的概念.....	(1)
§ 1—2 单位制、度量器.....	(3)
§ 1—3 基本测量方式和方法.....	(5)
§ 1—4 电测仪表的一般构成原理及分类.....	(8)
§ 1—5 机电式仪表的一般原理.....	(10)
练习一.....	(13)
第二章 测量误差	(17)
§ 2—1 测量误差的基本概念.....	(17)
§ 2—2 常用误差表达式及仪表准确度.....	(20)
§ 2—3 工程测量误差的估算.....	(23)
§ 2—4 精密测量中误差的估算.....	(27)
练习二.....	(32)
第三章 直流电气量的测量	(37)
§ 3—1 直流电流、电压的直读测量.....	(37)
§ 3—2 直流电流、电压的比较测量.....	(46)
§ 3—3 直流功率的测量.....	(50)
§ 3—4 电阻的测量.....	(55)
练习三.....	(67)
第四章 交流电流、电压的测量	(71)
§ 4—1 交流电流的直读测量.....	(71)
§ 4—2 交流电压的直读测量.....	(80)
§ 4—3 交流电压、电流的比较测量.....	(89)
练习四.....	(93)
第五章 随时间变化电量的测量和记录	(95)
§ 5—1 概述.....	(95)
§ 5—2 光线示波器.....	(97)
§ 5—3 电子射线示波器.....	(99)
§ 5—4 电子示波器的应用.....	(106)
练习五.....	(108)
第六章 相位和频率的测量	(109)
§ 6—1 用示波法测相位和频率.....	(109)

§ 6—2 用直读法测频率和相位·····	(112)
练习六·····	(121)
第七章 交流功率及能量的测量 ·····	(123)
§ 7—1 单相交流功率的测量·····	(124)
§ 7—2 三相交流有功功率的测量·····	(128)
§ 7—3 三相无功功率的测量·····	(131)
§ 7—4 交流电能的测量·····	(134)
练习七·····	(138)
第八章 交流电路参数的测量 ·····	(140)
§ 8—1 电路参数的指示仪表测量法·····	(140)
§ 8—2 电路参数的比较测量法·····	(144)
§ 8—3 测量电路参数的其它方法·····	(152)
练习八·····	(154)
第九章 数字化测量仪表 ·····	(155)
§ 9—1 数字化测量概述·····	(155)
§ 9—2 频率、周期、相位的数字测量·····	(157)
§ 9—3 数字电压表 (DVM) ·····	(163)
§ 9—4 数字电压表功能的扩展·····	(174)
练习九·····	(176)
第十章 磁测量 ·····	(178)
§ 10—1 磁测量的主要任务·····	(178)
§ 10—2 磁学量的单位换算及标准量具·····	(178)
§ 10—3 磁场的测量·····	(180)
§ 10—4 磁性材料磁性能的测量·····	(186)
练习十·····	(192)
第十一章 非电量的电测方法 ·····	(194)
§ 11—1 非电量电测技术基本知识·····	(194)
§ 11—2 位移—电测法·····	(196)
§ 11—3 磁—电测法 ·····	(201)
§ 11—4 温度—电测法 ·····	(202)
§ 11—5 光—电测法 ·····	(204)
第十二章 微机检测 ·····	(207)
§ 12—1 概述·····	(207)
§ 12—2 频率、周期、相位差的测量·····	(208)
§ 12—3 数据采集·····	(215)
§ 12—4 电压 (电流)、功率的检测·····	(223)
§ 12—5 元件参数测量·····	(229)
§ 12—6 智能数字万用表 (8500A/8502A型)·····	(232)
练习十二·····	(238)

第一章 概 述

§1—1 电工测量的概念

一、测量的重要性及本课程的任务

科学技术的发展离不开材料、能源和信息三大要素。测量就是获得信息的重要手段，通过观察、测量（包括数据处理），在前人认识的基础上，结合实验所取得结果，提出新的假说和推理，从而在更深的层次上揭示自然现象的本质和规律性，推动科学技术的发展。

测量不仅在科学技术中占有重要的地位，在工农业生产、企业管理、日常生活的各个领域中都占有重要的地位。测量技术在早期主要指（长）度、量（容积）、衡（质量）。随着科学技术的发展，测量技术的内容不断扩大，对测量的水平（主要指测量准确度）的要求也越来越高。测量技术既是渗透到人类一切活动领域的最基础的科学，又是配合其它各门学科搞突破的尖端科学。

电工测量包括电测和磁测两个方面：

电测包括电压、电流、功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容、介质损耗、品质因素等的测量。

磁测包括磁场强度、磁通、磁感应强度、磁势、磁导率、磁滞损耗，涡流损耗等的测量。

电工测量具有灵敏度高、准确度高、容易实现自动及遥控测量，易于利用电子技术，计算机技术，数据处理技术，自动控制技术等优点。不仅如此，许多非电量还可以转换为电量来进行测量。

从事电气技术的工作者，掌握电工测量技术和实验技能是十分重要的。因为无论电力、电子系统或电气设备的安装、调试、运行、维修，还是电气产品的检定、测试、鉴定等工作，都会遇到电工测量方面的技术问题。因此，《电工测量技术》课程的任务是进行电工测量技术及实验技能的基本训练。具体地讲，就是学习测量各种电磁量的基本原理和测量方法；常用电工仪表的结构、原理、特性与应用；工程测量的误差分析及数据处理。理论学习与设计型实验相配合。通过对本课程的学习，能根据科研、生产中的一般需要正确选择测量仪器仪表和测量方法，学会常用电工测量仪器仪表的使用方法，并能对工程测量结果进行误差估算。

二、测量的概念

所谓测量，就是用实验的方法，把被测量（未知量）与同类的标准量（已知量）进行比较的过程。设比较的结果，被测量 A_x 为标准量 A_0 的 x 倍，则被测量可表示为：

$$A_x = x A_0 \quad (1-1)$$

其中标准量 A_0 通常又称为测量单位。

测量结果(A_x)由纯数(x)部分和单位(A_0)部分组成。测量结果的数字值与所选单位有关,即对同一被测量进行测量,所选单位不同时,其结果的数值部分是不同的。如

$$U=20\text{伏}=20\times 10^3\text{毫伏}=0.020\text{千伏}$$

依靠人的感觉器官和潜力可对距离、温度和重量等物理量进行粗略的测量,但只有借助仪器(测量工具)才能扩大测量范围和提高测量精度。

从被测量是否本身具有信号能源出发,可划分为两大类,即有源量 and 无源量。

有源量:本身具有能量的量,如速度、温度、压力、电流、电压、功率、相位、频率等,测量时,不需要为测量中的信号提供能源。测试有源量的仪器本身可以是无源器件,如普通的电流表、电压表、功率表、频率表。仪表接入被测电路后,相当于接入一个无源元件。

无源量:不具备信号能源的量,如物体的空间位置,材料性质参量、电阻、电感、电容等。测量时必须提供能源(如光源、 x 射线源、粒子加速器、电源、波形发生器等)与被测物理量相互作用,从而激发出测量信号。例如,测量电阻常用的欧姆表,在仪表内必须安装电池,根据被测量电阻接入后,通过表头电流的大小确定被测电阻之值(将在第三章中讲述)。由于测量无源量的仪器内须设置电源装置,因此这类仪器可等效视为一个有源元件。

在进行测量之前,必须首先明确被测对象的性质及量值范围;其次哪些测试设备或其组合可以测试该被测量,选择哪种测量方法可以获得符合要求的较佳测试结果;第三,对测试结果的准确度进行恰当的估价,分析影响测试准确度的主要因素,以期寻求进一步提高测量准确度的措施。因此,了解各种测试设备及测量方法,以及数据处理,误差分析是做好测试工作的关键。

对于给定的测试任务,须从兼顾测量精度,抗干扰性和经济性的原则出发,合理地组织最有效的测试方案。

三、表征测试仪器的主要性能参数

测试仪器的功能是将所测量的信息传递给观察者。测试仪器的特性对测量的结果有直接的影响。

仪器的特性分静态特性与动态特性。静态特性是指仪器对不随时间变化的待测量的响应特性,动态特性是指仪器对随时间变化的待测量的响应特性。测量仪器品质的优劣可用一系列性能参数来衡量,主要包括灵敏度、精密性、稳定性、准确度、精确度、可靠性等。

(一) 灵敏度

仪表输出信号的变化量 dy 与输入信号的变化量 dx 的比值,称为灵敏度 S ,即

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (1-2)$$

例如当某检流计在被测电流变化 10^{-8}A 时,光标在该度盘上变化 1mm ,则灵敏度为 $S=1\text{mm}/10^{-8}\text{A}=10^8\text{mm/A}$ 。

灵敏度的倒数通常称为仪表常数 C 。

$$C = \frac{1}{s} = \frac{dx}{dy} \quad (1-3)$$

灵敏度反映仪器对被测量的反应程度，是能引起仪器反应的最小极限，是仪器基本性能之一。

(二) 精密度

是衡量测量仪器在进行重复测量时质量好坏的参数，即各测量值间差异的接近程度。

(三) 准确度

是指测量仪器的测量结果，接近真实值的程度。

(四) 精确度

(又称精度)是精密度和准确度的概括，全面衡量测量结果的优劣程度。精密度、准确度、精确度与测量误差关系密切，精密度由随机误差决定，准确度由系统误差决定，而精确度则由系统误差和随机误差两者决定。详细情况将在第二章中介绍。

(五) 稳定度

是指在规定工作条件保持不变情况下，测量仪器的性能在一定时间内保持不变的能力。一般用精密度的数值和观测时间的长短来表示。如果某仪器24小时内指示值变化幅度为0.8毫伏，则其稳定度为0.8毫伏/24小时。

(六) 可靠性

受外界因数(如温度、湿度等)影响的程度。

§1—2 单位制 度量器

一、单位制

测量是一个比较的过程，为了确定测量的结果，必须有测量的单位，这就是与被测量相比较的同类标准量。

一般说来，测量单位可以是任意的，但必须考虑其通用性。每个国家可根据本国的国情和国际计量组织的推荐，由专门的立法部门制定其所采用的单位制。选择适当的单位制对科技和生产的发展有重大的意义。国际单位制系1960年国际计量大会通过，以后历次国际计量大会逐步补充完善，我国自1977年起逐步推行。1985年国务院颁布的计量法规定，我国的法定计量单位以国际单位制(SI制)为基础，根据我国的实际情况，保留了少数国内外习惯或通用的非国际单位制单位。

国际制单位是在力学中的米制和电磁学中的 MKSA 制的基础上形成的。它含有七个基本单位(见表1-1)，二个辅助单位(见表1-2)和十九个具有专门名称的导出单位(见表1-3)，以及由以上单位构成的组合形式的单位，由词头及以上单位构成的十进位数和分数单位(见表1-4)。

国际单位制具有严密、简明、合理、科学、精确等一系列优点，大部分单位都是实

用单位，可涉及几乎所有专业领域，几乎可以代替所有其它单位制。

二、度量器

测量单位的复制实体，称为度量器（或称量具）。采用天平测量物体的质量时所用的砝码，测量长度的量块都是度量器的例子。

表1-1 SI制的基本单位

量	单位名称	单位符号	复现精度
长度	米	m	10^{-9}
质量	千克	kg	10^{-8}
时间	秒	S	10^{-13}
电流	安(培)	A	10^{-6}
热力学温度	开(尔文)	K	10^{-6}
物质的量	摩(尔)	mol	10^{-5}
发光强度	坎(德拉)	Cd	10^{-4}

表1-2 SI制的辅助单位

量	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	Sr

根据准确度的高低，度量器分为基准器，标准器及工作量具三种。基准器是现代科学技术水平所能达到的最高准确度的度量器，由国际和各国的最高计量部门保存。对维持国际、国内计量标准的统一、准确起保证作用。在我国基准器由中国计量科学院保存。标准器的准确度低于基准器，供地方计量中心，科研单位、院校、工厂的计量室保存，用于对工作量具进行检定。工作量具的准确度低于标准器，广泛应用于科研、生产及工程测量中。

电工测量中的标准器包括标准电池、标准电阻、标准电感、标准电容四类。由于度量器直接影响到测量的精确度，故要求具有相当高的准确度、稳定性和可靠性。度量器应在规定的使用条件下工作，在规定的环境条件下保存。

计量标准的传递方式如图1-1所示。以基准器保存的电学单位，按检定系统逐级向标准器，工作量具进行传递。

为了适应精密测量技术的发展和国际上技术交流的需要，每三年各国所保存的单位基准，需和国际计量局的基准进行比对，以期对本国的计量基准作出评价，了解其稳定可靠程度。

1986年美国推出新型量值传递服务——计量保证方案，简称MAP方案。传递标准在国家标准局(NBS)检定后，运至参加MAP的实验室，作为未知样品检定，然后再返回NBS重作检定。通过统计分析，对参加MAP的实验室的测试水平(包括标准器、环境条件、操作人员的技术水准等)进行综合考核，给出MAP

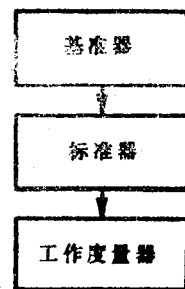


图1-1 计量标准的传递方式

表1-3 SI制具有专门名称的SI导出单位

量	单位名称	单位符号	用其它SI单位表示的关系式
频率	赫(芝)	Hz	S^{-1}
力、重力	牛(顿)	N	kgm/S^2
压力、压强、重力	帕(斯卡)	P_a	N/m^2
能、功、热量	焦(耳)	J	$N \cdot m$
功率、辐射通量	瓦(特)	W	J/S
电荷、电量	库(伦)	C	$A \cdot S$
电位、电压、电动势	伏(特)	V	W/A
电容	法(拉)	F	C/V
电阻	欧(姆)	Ω	V/A
电导	西(门子)	S	A/V
磁通(量)	韦(伯)	W_b	$V \cdot S$
磁感应(强度)、磁通密度	特(斯拉)	T	W_b/m^2
电感	亨(利)	H	W_b/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	
光通量	流明	I_m	$Cd \cdot Sr$
光照度	勒(克斯)	I_x	I_m/m^2
放射性活度	贝可(勒尔)	B_q	S^{-1}
吸收剂量	戈(瑞)	G_y	J/kg
剂量当量	望(沃特)	S_y	J/kg

表1-4 SI词头

因 数	词 头 名 称		符 号	因 数	词 头 名 称		符 号
	法 文	中 文			法 文	中 文	
10^{18}	exa	艾(可萨)	E	10^{-1}	deci	分	d
10^{15}	Peta	拍(它)	P	10^{-2}	centi	厘	c
10^{12}	tera	太(拉)	T	10^{-3}	milli	毫	m
10^9	giga	吉(加)	G	10^{-6}	micro	微	μ
10^6	mega	兆	M	10^{-9}	nano	纳	n
10^3	kilo	千	k	10^{-12}	pico	皮	p
10^2	hecto	百	h	10^{-15}	femto	飞	f
10^1	deca	十	da	10^{-18}	atto	阿	a

测定报告。这种新型的传递服务方式较传统的逐级检定方式更加合理、可靠，但是要求较高的技术保证条件。我国已于1987年开始试行MAP方案。

§1—3 基本测量方式和方法

测量过程的关键是把被测量和作为单位的同类标准量作比较，这种比较具有两方面的内容：一是如何比较，一是在什么场所进行比较。前者涉及测量方式和方法的问题，后者涉及测量仪表问题。本节介绍前一个问题，关于测量仪表将在以后讨论。

一、测量方式

根据测量结果获取方式的不同，其测量方式分为三种，

(一) 直接测量

若测量结果可直接从实验数据获得, 这种测量方式就叫直接测量。如用电流表测电流, 用电压表测电压, 用电桥测电阻等。

(二) 间接测量

若测量结果必须通过先直接测出几个与被测量有一定函数关系的中间量, 再按一定函数关系求得, 这种测量方式叫间接测量。可表述为:

$$y=f(x_1, x_2, \dots)$$

y 为测量结果, $x_1, x_2, \dots$ 为直接测量值。例如, 用伏安法测电阻时, 是通过直接测出待测电阻 R_x 上的电流, 电压。再根据公式: $R_x=U/I$ 计算获得的。

由于间接测量的最终结果是用多个直接测量值计算而得, 所以误差较大, 只有在直接测量有困难的情况下采用。

(三) 组合测量

若被测量不只一个或被测量虽与某些中间量有一定函数关系, 但由于函数式中有多个未知量, 这就必须通过改变测量条件, 得到一组方程, 然后联立求解方程来获得被测量。这种测量方式叫组合测量。

组合测量的次数应等于被测量的个数, 而每一次测量必须有两个以上的读数。

例如: 用电流表和已知标准电阻测某一电源的电动势, 其测量电路如图1-2。图中 r 为电源内阻, R_s 为已知可调标准电阻, R_A 为电流表内阻, 分别调节 $R_s=R_1$ 和 R_2 , 读得相应的电流 I_1, I_2 , 列出下面方程组:

$$\begin{cases} E_s = I_1 r + I_1 (R_A + R_1) \\ E_s = I_2 r + I_2 (R_A + R_2) \end{cases}$$

解方程组, 即可求得 E_s 及 r 。

二、测量方法

不管是直接测量测出被测量, 还是间接测量测出中间量, 都需要与作为单位的标准量相比较。但标准量参与比较可以是直接的, 也可以是间接的。根据在测量过程中有无标准量直接参与比较, 测量方法分为以下两大类:

(一) 直读法

用指针式仪表进行测量时, 只需将仪表按规定正确接入电路, 无需标准量直接参与比较, 也不需作任何操作, 就可直接从仪表刻度尺上读得被测量或中间量。这种测量方法称为直读法。用电流表测电流就属此法。

这种测量方法的特点在于标准量具是间接参与比较。因测量仪表的刻度尺在仪表制造时需标准量具参与分度。

在此种方法中, 由于标准量是间接参与比较, 故准确度较低(0.1级以下)。但却具有设备简单, 操作方便, 测量速度快等优点, 因而得到广泛应用。

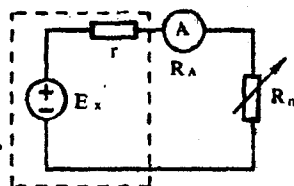


图1-2 用组合测量法测电动势

(二) 比较测量法

在测量过程中,被测量必须与标准量直接相比较,才能确定被测量大小的测量方法,称为比较测量法。

由于比较测量法中有标准量具直接参与比较,所以它的最大优点是准确度高(0.1级以上)。但对测量仪器和测试条件有较高要求,且操作麻烦。适用于精确测量。

根据被测量与标准量比较时特点的不同,比较测量法又可分为:

1. 差值法(微差法) 测量仪器测出的是被测量与标准量的差值。可表述为:

$$a = X - A_0$$

$$X = A_0 + a$$

式中: X 表示被测量; A_0 表示标准量; a 为它们的差值。

例如: 欲测某一标准电池电动势, 常用另一准确度更高, 电动势已知的标准电池与它比较, 其差值可用一高阻电位差计测出。其电路如图1-3。此时:

$$a = E_x - E_n$$

$$E_x = E_n + a$$

这种测量方法的优点是: 差值 a 越小, 测差值的仪器的误差对测量结果的影响越小。当差值很小时, 测量结果的准确度主要取决于标准量的准确度, 与测差值的仪器是否准确关系不大。若差值 a 为总量的 1%, 测差值的误差亦为 1%, 则测差值的误差反映在测量结果中的测量误差仅为 0.01%。

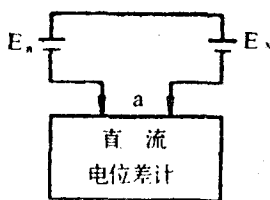


图1-3 差值法测电动势

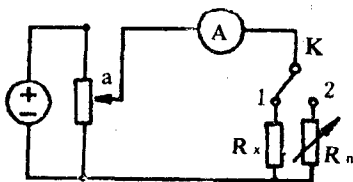


图1-4 替代法测电阻

2. 零值法 当被测量与标准量相比较时, 如标准量可调, 调节标准量使它们的差值为零, 则:

$$X = A_0$$

这种测量方法称为零值法。用平衡电桥测电阻, 电位差计测电压等, 均属此法。

这种测量方法的特点是: 测量结果的准确度主要取决于标准量的准确度和指零仪表的灵敏度。

3. 替代法 将被测量 X 与标准量 A_0 分别接于同一测量装置中, 当用标准量代替被测量时, 调节标准量, 使测量装置的工作状态保持不变, 则:

$$X = A_0$$

这种测量方法称为替代法。

如用替代法测某一电阻, 可采用图1-4电路。先将开关 K 投向“1”, 使电路与 R_x 接通, 调节分压器滑动触头 a , 使电流表(A)指示为某一合适值。然后保持 a 位置不变, 将

K 投向2,用 R_x 代替 R_s ,调节 R_s 使电流表(A)仍为原指示值,显然,此时 R_s 的值即等于 R_x 。

替代法的特点是:能消除测量装置不妥,测量仪表不准确及环境因素所引起的误差。其准确度主要取决于标准量的准确度。是一种准确度较高的测量方法。

对某一被测量,须根据其性质、量值范围,测试条件及对准确度的要求选择恰当的测试方法。

§1-4 电测仪表的一般构成原理及分类

一、电测仪表的一般构成原理

在测量过程中,被测量与标准量的比较是在仪表中进行的,且由仪表把比较结果显示出来。因而,电测仪表一般应由测量电路、测量机构(比较部分)、显示装置等三个基本部分构成。这三部分的关系可用图1-5表示。

(一) 测量电路

一般由输入电路和变换电路构成。这部分的主要作用是将被测量变换成仪表的测量机构(即比较部分)可以接受的中间量,即可比量。因被测量的量值可能较大,也可能较小,被测量可能不只一个,甚至还有不是测量机构可以测量的同类

量。这就必须采用变换电路将其转换成可比量。如电压表中的分压电路,它把高电压转换成适于测量机构测量的低电压;电流表中的分流器把大的直流电流转换成适于测量机构测量的小电流;用热电偶将温度变化转换成电压变化等等。

此外,为了不使变换电路影响被测电路,或排除与测量无关的干扰因素影响测量结果,有些仪表还在变换电路前,设置诸如隔离、屏蔽作用的输入电路。

对测量电路的要求:1.通过变换应尽量使被测量和可比量之间成线性关系,至少应是单值函数关系;2.应有较高的稳定性。

(二) 测量机构(比较部分)

这是被测量与标准量进行比较的场所,是仪表的核心部分。一般有两种结构形式:

1. 机电结构式

其原理是:当被测量或变换后的可比量进入此结构后,利用电磁作用原理,把它变成推动仪表活动部分转动的电磁力矩(与被测量成一定函数关系)。该力矩与活动部分的游丝或张丝所产生的反作用力矩(与已知标准量成一定函数关系)相比较,平衡后显示比较结果。指针式仪表属此类,下节还要进一步介绍这方面的内容。

因此,这种结构的特点是:把被测的电量模拟成仪表活动部分在空间的角位移。

2. 电路结构式

由已知标准量具和电路元件(如电阻、电容等)组成适当的比较电路。

其原理是:被测量或可比量进入比较电路后,即与已知同类标准量进行比较(人工操作或自动进行),平衡后,显示比较结果。后面要介绍的电位差计,电桥等较量仪器均属此类。



图1-5 电测仪表结构方框图

这种结构的特点是：把被测量等效成标准量的值。

(三) 显示部分

其作用是显示比较结果。主要有三种结构形式：

指针刻度盘显示，指针式仪表即是这种结构。

纸带及示波屏显示，光线示波器及电子射线示波器属此。

以上所显示的结果属于模拟显示，此外还有：

数码管显示，数字式仪表即属此类显示，比较结果以数字给出。

二、仪表的分类

仪表的分类有很多种，如按测量方法、结构、用途、显示方式…等进行分类，现只对这些常用分类介绍如下：

(一) 按度量器与被测量比较的方式不同可分为两大类

1. 直读式仪表 在此种仪表中，度量器不直接参与比较而是间接参与比较。

2. 比较式仪表 在此种仪表中，度量器直接参与了比较。

(二) 按仪表输出模拟量还是数字量可分为

1. 模拟式仪表 仪表指示值是被测量的连续函数。

2. 数字式仪表 仪表把比较结果用数字给出。

(三) 按仪表结构中是否采用电子线路可分为

1. 机电式仪表。

2. 电子式仪表。

三、电工仪表的型号和标志

(一) 电工仪表的型号

电工仪表的产品型号是按规定标准编制的，它是用数字和汉语拼音字母按规定排列的，如图1-6所示。

关于形状代号和设计序号可在有关标准中查出，对于系列代号的汉语拼音字母的含义由表1-5给出。

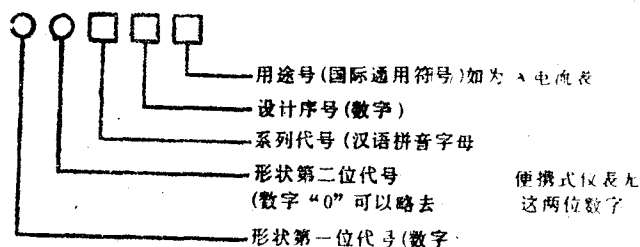


图1-6 电工仪表的型号

例如 $T19-V$ 由于没有前面的形状序号所以为便携式仪表。 T 可由表1-5查出是表示电磁式仪表，19为设计序号， V 是国际通用电压符号，因而 $T19-V$ 是便携式电磁式电压表。

(二) 电工仪表的标志

不同种类的电工仪表具有不同的技术特性，为便于选择和使用仪表，通常把这些技术特性用不同的符号标示在仪表的刻度盘和面板上，叫做仪表标志。根据国家标准每个表应

有测量对象的单位,准确度等级,电流种类和相数,工作原理的系列,使用条件组别,工作位置,绝缘强度试验电压的大小,仪表型号以及各种额定值的标志等。各种符号见表1-6。

§1-5 机电式仪表的一般原理

机电式仪表就是常用的指针式仪表,又称指示仪表或直读仪表。由于这种仪表结构简单,操作方便,测量速度快,经济耐用,便于维护。不仅能作成测电磁量的测量仪表,加上相应的变换器还能测非电量等,因此,这类仪表在工农业生产和科研领域中得到广泛的应用,是最基本的测量工具。

一、机电式仪表的工作原理

机电式仪表的工作特点是把不能为人们直接观察的电量转变成仪表活动部分在空间的角位移(也即偏转角),根据偏转角与被测量间的函数关系确定被测量的大小。为了把被测电量转变成偏转角,必须有将电磁能量转变为机械能的机构,这种机构称为机电式测量机构。在每个测量机构中包含有固定部分和可动部分。当被测电量引入测量机构后,由于固定部分和可动部分之间相互的电磁作用而产生电磁力,这个力对可动部分的转轴形成一个转动力矩 M 。在转动力矩的作用下,活动部分产生角位移 $d\alpha$,则有

$$Md\alpha = dW \quad (1-4)$$

式中 dW 为测量机构中电磁能的变化量。如果在可动部分上仅仅只有转动力矩 M ,只要此力矩足以克服可动部分的摩擦力,则可动部分将沿着转动力矩的方向,一直偏转直至尽头为止。这样仪表的偏转角大小并不能反映被测量的大小。因此在机电式测量机构的可动部分,还必须提供一个作用方向与转动力矩方向相反,而大小与偏转角 α 有关的作用力矩,这个力矩通常称为反作用力矩 M_a 。

$$M_a = D\alpha \quad (1-5)$$

式中比例系数 D 称为反作用力矩系数。

反作用力矩 M_a 的提供通常采用在可动部分上装置游丝或张丝等弹性元件来实现,因此 D 又称为游丝的弹性系数。

当转动力矩与反作用力矩相平衡时,可动部分产生一定的偏转角,此偏转角的大小反映了被测量的大小。

当
$$M = M_a = D\alpha$$

$$\alpha = \frac{M}{D} = \frac{1}{D} \frac{dW}{d\alpha} \quad (1-6)$$

还应当指出,可动部分受到上述两种作用力矩的作用,在达到平衡时虽然能产生一定偏转角 α 。但是在平衡过程中,由于运动惯性的作用,将有一个来回摆动的过程。这样会使可动部分不能快速停止,给获得测试结果带来不便。为了消除这种来回摆动的现象,通常在可动部分上装置所谓阻尼器,用以吸收运动时的动能,从而达到使可动部分快速稳定地达到平衡位置上。显然,阻尼装置也对可动部分提供一个阻尼力矩 M_d ,其方向应该与转动力矩方向相反,且大小与可动部分的运动速度 $(d\alpha/dt)$ 成正比。当可动部分运动速度高时,阻尼力矩 M_d 大,当可动部分停止转动时,阻尼力矩则消失。因此,阻尼力矩对稳定的偏转角没有影响。阻尼力矩 M_d 与转动速度的关系为:

$$M_p = P \frac{d\alpha}{dt} \quad (1-7)$$

式中, P 称为阻尼系数,

转动力矩 M , 反作用力矩 M_a , 阻尼力矩 M_p 称为可动部分作用力矩三要素。

根据产生转动力矩的方式不同, 机电式测量机构可分为磁电式、电磁式、电动式、静电式、感应式等基本系列, 它们各具有不同的技术特性和用途, 将在各类电量的测量中分别予以介绍。

二、机电式仪表的运动特性

阻尼力矩有改变可动部分运动特性的作用。阻尼系数 P 过小会出现来回摆动的现象, 过大则使可动部分非常缓慢地转向平衡位置, 同样会给测量带来不便。那么在什么情况下阻尼系数 P 最为恰当呢? 这须从建立运动方程入手来进行讨论。

由动力学理论可知, 当刚体绕轴旋转时, 其转动惯量 J 与角加速度 $d^2\alpha/dt^2$ 的乘积等于作用在转轴上各力矩之和。如果略去转轴上的摩擦力矩, 则有

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = \Sigma M = M - M_a - M_p, \quad (1-8)$$

由于反作用力矩, 阻尼力矩与转动力矩的作用方向相反, 故在式中取负号。

将式 (1-5)、式 (1-7) 代入式 (1-8), 并整理可得:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = M \quad (1-9)$$

这是一个线性常系数二阶非齐次微分方程。显然, 有特解

$$\alpha_0 = \frac{M}{D} \quad (1-10)$$

这只要将其代入式 (1-9) 中, 就能得到验证。此特解亦称为稳态解。可动部分运动停止 (平衡) 时, 偏转角的表达式 (1-6) 与式 (1-10) 完全相同。

方程 (1-9) 的全解有三种情况, 由系数 J , P , D 的关系决定。

1. 当 $P < 2\sqrt{JD}$ 时, 可动部分在最终平衡位置 α_0 左右经过多次来回摆动 (衰减振荡) 后, 方能稳定于平衡位置 α_0 上。这种运动情况通常称为振荡情况 (又称欠阻尼情况),

2. 当 $P > 2\sqrt{JD}$ 时, 可动部分平稳缓慢地偏向平衡位置 α_0 。这种运动情况通常称为非振荡情况 (又称过阻尼情况)。

3. 当 $P = 2\sqrt{JD}$ 时, 可动部分平稳快速地偏向平衡位置 α_0 。这种运动情况介于振荡情况及非振荡情况之间, 故称临界情况 (又称临界阻尼情况), 从实质上讲仍应属于非振荡情况。

可动部分偏转角随时间变化的情况示于图1-7上。图中曲线1、2、3分别表示振荡, 非振荡及临界状态。

可动部分运动特性的研究不仅对一般指针式仪表的设计制造具有重要意义，且对检流计的应用具有特别重要的意义。

对于一般指针式仪表在接入电路后要求能快速指示被测量之值，这似乎意味着在设计仪表时，应调整系数 J 、 P 、 D 使可动部分处于临界状态。但是由于摩擦力矩的存在，可动部分仅能停留在图1-7中曲线3的A点上，从而给测试结果带来误差。因此对一般机电式仪表，制成后系数 J 、 P 、 D 基本不变，且设计在略欠阻尼状态。但是对于检流计，其阻尼力矩系利用可动线圈在磁场中运动时，产生的感应电流所引起的。而感应电流的大小则与可动线圈电路的总电阻有关。为使检流计处于略欠阻尼状态，应使外电路的电阻略大于检流计面板上标出的外临界电阻值。

三、机电式仪表的共同零件

尽管机电式仪表有多种不同的类型，其工作原理和结构各有不同，但它们也有一些相同的部件。主要有：

1. 外壳 作用是保护仪表内部结构不受碰击，防止灰尘和潮气进入仪表，便于安装携带。

2. 由指针、刻度盘构成的读数装置 指针同仪表可动部分相联接，可动部分转动时带动指针一起偏转，从而与固定的刻度盘配合读出结果。图1-8中5为指针。

3. 产生反作用力矩的游丝、张丝或悬丝 图1-8中的游丝1就是通常用来产生反作用力矩的装置，它的一端与转轴相连，另一端固定在支架上。

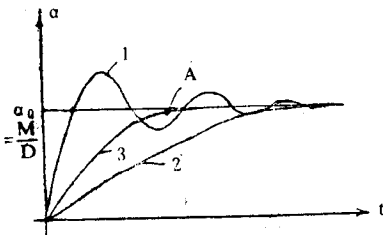
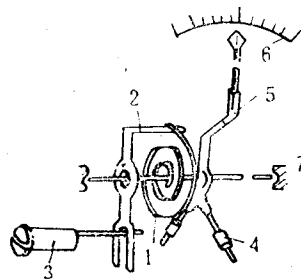


图1-7 可动部分特性



1. 游丝 2. 调节臂 3. 调零器 4. 平衡锤 5. 指针 6. 刻度盘 7. 轴承
图1-8 用游丝产生反作用力矩

用游丝、张丝或悬丝产生的反作用力矩，叫机械反作用力矩。反作用力矩也可由电气作用产生，以后介绍的比率表即是。

4. 可动部分的支撑装置 仪表活动部分有的固定在支撑轴上（用于游丝产生反作用力矩的情况），有的固定在张丝或悬丝上（适于张丝或悬丝产生反作用力矩的情况）。支撑轴由轴和轴承构成。见图1-8中7。

5. 调零器 用于调节指针在被测量为零时使其回零。如图1-8中3。

6. 阻尼器 用来改善仪表活动部分的运动情况，以便于读数。

常用的阻尼器有两种：(1)空气阻尼器。如图1-9(a)，和转轴相固接的阻尼片随可动部分转动。阻尼片在盒中转动时，便受到空气的阻尼力矩。(2)磁感应阻尼器。如图1-9(b)，