

高等学校适用

电工与电子技术实验教程

许开君 主 编
李炳彦 副主编

DIANGONG YU DIANZI
JISHU SHIYAN
JIAOCHENG

机械工业出版社

TM 1-33

X 77

高等学校适用

电工与电子技术实验教程

许开君 主 编
李炳彦 副主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

D: S / 35 09

本书是为单独开设电工与电子技术实验课而编写的教材。内容包括：电路测试的基本知识、稳态电路与暂态电路的测试、变压器、异步电动机及控制电路、模拟电子电路、数字电子电路。全书以实验为中心，阐述了电工与电子技术的基本原理、基本分析方法和基本实验技能及常用电工与电子仪器的使用。书中较详细地阐述了电路及一些元件参数的测试方法、电子电路的分析与设计、可编程序控制器的原理与应用。书中安排的一些实验都是实用性很强的实验，理论密切联系实际。

本书不仅是非电专业单独开设电工与电子技术实验课的教材，而且可作为电的有关专业及成人教育有关专业的实验课教材，也可作为上述一些专业电工与电子技术课程的实验指导书。本教材适用于40~60学时。

本书也是电工与电子工程技术人员的一本好的参考书。

电工与电子技术实验教程

许开君 主编

李炳彦 副主编

责任编辑：贡克勤 责任校对：张佳

封面设计：郭景云 版式设计：霍永明

责任印制：王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张12³/₄·字数 309 千字

1992年8月北京第1版·1992年8月北京第1次印刷

印数 0,001—7,500·定价：7.40元

*

ISBN 7-111-03291-8/TN·63

前 言

科学技术的发展离不开实验。对于一个工程师,分析问题解决问题的能力是至关重要的。国家教委一直非常重视高等院校实践环节的安排。近几年来很多高等院校都单独开设了实验课。我们参照了高等工业学校电工技术(电工学 I)和电子技术(电工学 II)课程教学基本要求,在多年教学和实践经验的基础上编写了这本《电工与电子技术实验教程》教材。编写本教材时贯彻了如下想法:

1. 力求运用辩证唯物主义的观点和方法组织、安排和阐述教材内容。
2. 考虑到各个高等院校的条件不同及科学技术发展的需要,本书在内容的深度和广度方面,略超出基本要求,可供不同学时时的专业选用。
3. 作为一门独立的实验课,其教学安排等应尽量不受其他课程的约束,因此本教材是自成体系的,在书中编写了必要的基础理论内容。如第一章和其他各章每节中的原理说明部分。
4. 由于是实验教程,故其内容不能面面俱到,而是以实验为核心,突出了基本原理、基本方法和基本实验技能。
5. 尽量缩小教材与先进技术及与生产实际的差距,如模拟电子电路部分以集成运放为主;数字电子电路部分趋向中、大规模集成元件;书中编写了正在我国推广、普及的可程序控制器(PC)。
6. 培养理论联系实际的能力。书中所提出的实验项目都是经过实践的。在章或节后都有思考题,思考题的内容包括基本概念、理论计算、实验数据分析和实验技能、仪器仪表使用等方面的问题,以启发引导理论与实际的联系。其中有一部分实验要求自拟实验方案和表格。另有一部分实验要求先设计,后接线、调试,以培养学生独立工作能力。
7. 培养正确选择、正确使用各种常用电工仪表和常用电子仪器的能力,以及查阅手册的能力。教材中始终把仪器、仪表的使用作为重要的内容,如有一半以上的实验中都安排了示波器的使用。在数字电路及其他部分,给出了一些元件的引脚排列图、功能表,或技术特性表,以供读者查阅。

本书共有五章(三十节)。陕西机械学院的石磊编写了第一章及第二章的第六节,第四章的第一、二节;李炳彦编写了第二章的第一、三、四、五节,第三章的第一、二节,第四章的第五节;许开君编写了第三章的第三节,第四章的第三、四、七节,第五章的第七、八节;李德元编写了第四章的第六节,第五章的第一、二、三、四、五节;山关武编写了第二章的第二节及其附录A、附录B、附录C,第六节的附,第五章的第六节。本教材由许开君、李炳彦共同组织编写。全书由许开君统稿和定稿。本教材由第二炮兵工程学院的李克尤主审,毕克典审阅了第一章,卫可智审阅了第四章,罗正文审阅了第五章,主审和审阅的同志提出了不少宝贵意见,还有一些院校的同志对本书提出了很多好的建议,编者在此一并表示感谢。

编写实验课教材我们是首次尝试,由于编者水平和经验所限,再加成稿时间仓促,书中难免会有不妥和错误之处,肯切希望读者,特别是使用该教材的师生提出批评和改进意见。

编 者

1991年12月

目 录

前 言	
第一章 电路测试的基本知识 1	
第一节 电工仪表和测量概述..... 1	
第二节 磁电系和电磁系仪表..... 2	
第三节 电动系仪表..... 7	
第四节 测量误差..... 9	
第五节 常用电工仪表的选用..... 15	
第六节 测量中有效数字的处理..... 17	
思考题与习题..... 18	
第二章 稳态电路与暂态电路的测试 20	
第一节 直流电路的测试..... 20	
思考题..... 25	
附录A JWY-30F型直流稳压电源的使用 25	
附录B DT-830数字万用表 26	
第二节 常用电子仪器的使用..... 28	
思考题..... 32	
附录C COS5020CH通用示波器的使用..... 32	
附录D DA-16型晶体管毫伏表使用说明..... 37	
附录E XD-7型低频信号发生器 38	
第三节 正弦交流电路的测试..... 40	
思考题..... 46	
第四节 谐振现象的研究和功率因数的提高..... 46	
思考题..... 54	
第五节 三相交流电路的测试..... 55	
思考题..... 59	
附录F 两瓦法测功率的原理说明..... 59	
附录G 相序指示器..... 60	
第六节 暂态电路的测试..... 60	
思考题..... 65	
附录H XD-22型低频信号发生器 65	
第三章 变压器、异步电动机及控制电路 67	
第一节 变压器和异步电动机..... 67	
思考题..... 72	
附录A 兆欧表的使用..... 73	
第二节 异步电动机的继电器接触器控制电路..... 74	
思考题..... 78	
第三节 可程序控制器(PC) 79	
思考题..... 94	
附录B 编程器及其操作..... 94	
附录C C40P型PC的I/O点表及其技术性表..... 102	
第四章 模拟电子电路 106	
第一节 分立元件放大电路的测试..... 106	
思考题..... 118	
第二节 集成运算放大器的测试..... 118	
思考题..... 123	
第三节 负反馈放大电路的测试..... 123	
思考题..... 128	
第四节 集成运放应用电路的测试..... 128	
思考题..... 136	
第五节 直流稳压电源的测试..... 137	
思考题..... 143	
第六节 晶闸管可控整流电路及交流调压电路的测试..... 143	
思考题..... 151	
附录A 晶闸管检测..... 151	
附录B 单结晶体管检测..... 151	
第七节 温度控制系统..... 151	
思考题..... 155	
第五章 数字电子技术 156	
第一节 基本门电路测试..... 156	
思考题..... 161	
附录A 集成逻辑门电路外引线排列图(一)..... 161	
第二节 组合逻辑电路的设计与测试..... 162	
附录B 集成逻辑门电路外引线排列图(二)..... 168	
第三节 触发器功能测试..... 168	
第四节 时序电路设计与测试(一)..... 172	
思考题..... 176	
附录C 74LS102、74LS190和74LS191外引线排列图及功能表..... 176	
第五节 时序电路设计与测试(二)..... 177	
思考题..... 182	

附录D	74LS194外引线排列图 及功能表.....	182	第七节	D/A和A/D转换器	185
附录E	四人抢答器参考电路.....	182	第八节	数字频率计.....	191
第六节	555时基电路及其应用	183	附录F	实验总结报告格式要求.....	196
			参考文献	197

第一章 电路测试的基本知识

第一节 电工仪表和测量概述

在电工技术和电子技术的测试中,经常要用到电工仪表。所谓电工仪表,就是利用电工技术测量电气参数(如电压、电流、功率、电阻、相位、功率因数等)的仪表。按测量的方式不同可分为直读式仪表和比较式仪表两种类型。直读式仪表有指针式和数字式两种,本章主要介绍指针式仪表。指针式仪表又分机电式仪表和电子式仪表两大类。机电式仪表就是通常所说的电工测量仪表(如电压表、电流表、功率表等),电子式仪表一般是由磁电系仪表和电子线路所构成。机电式仪表按工作原理可分为磁电系仪表、电磁系仪表、电动系仪表、感应系仪表等等。按测量的对象来分,可分为电流表(又叫安培表)、电压表(又叫伏特表)、欧姆表、功率表等等。按电流的种类来分,可分为直流表、交流表、交直流两用表。电子式仪表一般只有直流电压表、交流电压表和欧姆表三种类型。

常用电工仪表有电压表、电流表、万用表、功率表等等。尽管它们测量的电量不同,工作原理也不一样,但在结构上都由测量机构和测量线路两部分组成,如图1-1所示。测量线路把被测量 X 转换成仪表的测量机构可以接受的过渡量 Y ,然后测量机构将过渡量 Y 转换成仪表可动部分的偏转角 α ,并以此偏转角位移的大小刻度出与之对应的被测量的值。

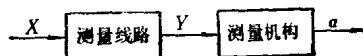


图 1-1

测量机构是电工仪表的核心。同一系列的仪表,有着共同的测量机构。不同系列的仪表,测量机构不同,工作原理也不一样。同一系列的不同仪表在于测量线路不一样。无论哪一种系列的仪表,测量机构均由两部分组成,即固定部分和活动部分。尽管它们的构成原理有所不同,但有如下共同的特点:

1. 转矩 转矩使活动部分偏转产生角位移。转矩通常与输入到测量机构的过渡量有一定的比例关系,究竟是什么关系,要视测量机构的类型而定。产生转矩的原理和方法不同,就构成了不同系列的指示仪表。

2. 反作用力矩 反作用力矩与转动力矩平衡,使指针指在某一刻度上。如果没有反作用力矩与之平衡,那么不管被测量多大,活动部分都要转到刻度盘的尽头,这就象不挂秤砣的秤一样,不管被称的量多重,秤杆都会翘起到顶端。所以没有反作用力矩的仪表,只能反映被测量的有无而不能测量被测量的大小。反作用转矩的方向总是与转矩的方向相反。电工仪表多半是用游丝的弹力来产生反作用力矩。反作用转矩与活动部分的偏转角成正比。在转矩的作用下活动部分偏转,活动部分转动的同时在游丝的作用下就产生反作用力矩,随着偏转角的增大,反作用力矩增大,当反作用力矩增大到与转矩相等时活动部分停止转动,这样就达到了用偏转角来表示被测量大小的目的。

3. 阻尼力矩 阻尼力矩使活动部分尽快在平衡位置上稳定下来。转动的物体具有惯性

力矩，当反作用力矩与转矩平衡时，活动部分在惯性力矩的作用下要继续偏转，因而活动部分不能迅速地停止在平衡位置上，往往在平衡位置附近来回摆动。为了尽快地获得测量结果，仪表中常常设置阻尼装置，用来产生阻尼力矩，吸收仪表活动部分在平衡位置附近摆动的能量，使活动部分尽快地停止在平衡位置上。阻尼力矩只在活动部分运动时才产生，它的大小与活动部分的运动速度有关，而与偏转角无关，它的方向总是和活动部分的运动方向相反。

4. 摩擦力矩 仪表中，活动部件通过轴和轴承固定在固定部件上，活动部件偏转时，轴和轴承之间的摩擦就会产生摩擦力矩。由于摩擦力矩的存在，转矩除克服反作用力矩外还要克服摩擦力矩，从而使仪表的偏转角发生改变，使读数产生误差，该误差属于仪表的基本误差。

5. 指示装置 指示装置用来指示被测量的大小，由指针和刻度盘组成，指针固定在活动部件上。

测量，就是将待测量与作为测量单位的同类量相比较的过程。在比较中确定出待测量中含有这一单位的多少倍或多少分之一，比较的结果用两部分来表示，一部分是单位名称，另一部分是数值，如2A。

不同的电量有不同的测量方法，就是同一个电量也有不同的测量方法。测量方法多种多样，但总起来有两种方法，即直接测量法和间接测量法。被测量通过测量而直接可以得到，叫做直接测量法。例如用电流表可以直接测量出某一支路的电流。若所测量的量并不是最终所要获得的量，而最终所要获得的量必须通过所测量之间的相互关系而求出，则叫做间接测量法。例如测出无源一端口网络的电压和电流，就可以利用电压和电流之间的关系，求出无源一端口网络（又称二端网络）的等效电阻。

不管采用什么方法测量，由于各种客观和主观因素的影响，测量结果和被测量的实际值都不可能完全相等，测量的目的就是要使测量结果尽可能接近实际值，否则测量结果远离实际值，那就没有意义了。本章的主要内容，一是研究常用电工仪表的工作原理和使用方法，二是研究测量误差和消除误差的方法。

第二节 磁电系和电磁系仪表

一、磁电系仪表

磁电系仪表的测量机构加上一定的测量线路，就构成磁电系仪表。所加的测量线路不同，就可以构成相应的电流表、电压表等等。

1. 磁电系测量机构 磁电系测量机构的原理图如图1-2所示。它的固定部分包括永久磁铁1、极掌2及圆柱形铁心3；活动部分包括铝框及绕在铝框上的线圈4，前后两根半轴 o 和 o' 、游丝5和5'、指针6。

当电流 I 经游丝通入线圈时，线圈在磁场中受到电磁力矩、即转矩的作用，使活动部分绕轴转动，转矩为

$$T = K_1 I$$

K_1 由磁场强度、线圈面积所决定，仪表制造好以后它是一个常量。

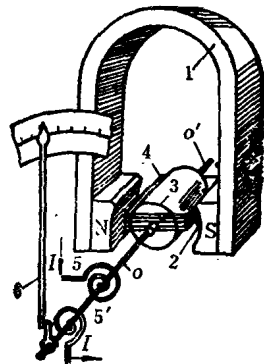


图 1-2

随着活动部分的转动，游丝发生变形而产生反作用转矩，即

$$T_f = K_2 \alpha$$

式中 α 是活动部分的偏转角， K_2 是反作用转矩系数。当 $T = T_f$ 时，活动部分停止转动，这时偏转角为

$$\alpha = \frac{K_1}{K_2} I = KI$$

可见活动部分的偏转角与通过线圈的电流成正比，如果在仪表刻度盘上直接按电流刻度，那么，当指针偏转到不同位置时，指针就能直接从刻度盘上指示出所对应的被测电流值。

铝框不仅用来绕制线圈，而且可以产生阻尼作用。当活动部分在平衡位置左右摆动时，铝框也随之摆动，因而就会切割磁力线而产生感应电流，这个电流在磁场中也要产生力矩，该力矩总是反抗线圈运动的，故叫做阻尼力矩。活动部分摆动的速度愈大，感应电流愈大，则阻尼力矩就愈大，即阻尼力矩与活动部分的摆动速度成正比，当活动部分停在平衡位置时，阻尼力矩就没有了。所以阻尼力矩不影响指针的偏转角度，而只是缩短摆动时间，改善运动特性。

从上面的分析可以看出，磁电系测量机构是反映电流的一种装置，把它串接在电路中，可以直接用来测量电流。但是由于线圈的导线很细，电流又要通过游丝，只允许通过很小的电流，一般是几十微安到几十毫安，因而不能直接用来测量较大电流。

为了便于画图，我们用图1-3的符号表示图1-2的测量机构。图中 I_g 为满偏电流， R_g 是测量机构的内阻，包括线圈和游丝的电

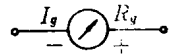


图 1-3

这种测量机构所构成的仪表，只能用来测量直流，功耗低，灵敏度高，对外电路影响小，不容易受到外磁场的影响，因而准确度高，刻度均匀，容易读数。

2. 磁电系电流表、电压表、欧姆表 磁电系测量机构加上不同的测量线路，就可以构成电流表、电压表、欧姆表等等。

(1) 电流表 磁电系测量机构并接上不同的电阻就可以构成多量程的电流表，所并联的电阻叫做分流电阻。图1-4为两个量程的电流表。可以看出，进入测量线路的电流与进入测量机构的电流有一定的比例关系，如开关 S 放在 1 位置，则被测电流为

$$I = \frac{R_1 + R_2 + R_g}{R_1 + R_2} I_g$$

从电流表的两个端钮看进去的等效电阻就是电流表的内阻。使用时电流表必须串入被测支路。可见电流表的内阻越小，对被测电路的影响就越小。

(2) 电压表 磁电系测量机构串接上不同的电阻，就可构成多量程的电压表，所串联的电阻叫做附加电阻。图1-5为两个量程的电压表。可以看出被测电压与进入测量机构的电流也有一定的比例关系，如开关 S 放在 1 位置，则

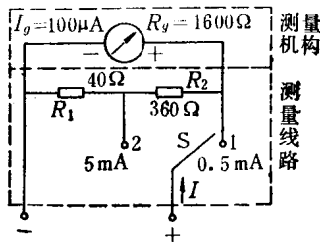


图 1-4

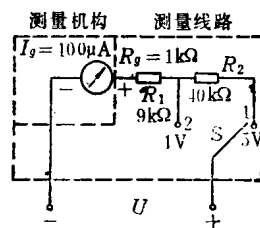


图 1-5

$$U = (R_1 + R_2 + R_0)I_s$$

用电压表测量电压时，电压表必须与被测支路并联。可见电压表的内阻越大，对被测电路的影响就越小。电压表各量程的内阻与相应的电压量程之比为—常数，单位为“ Ω/V ”。这个常数通常在表盘上标出。这个常数的数值越大，对被测电路的影响就越小。

(3) 欧姆表 磁电系测量机构配上适当的测量线路就构成测量电阻用的欧姆表，其原理如图1-6所示。根据欧姆定律，当电源给定时，电流 I 与回路中的电阻成反比，即

$$I = \frac{U_s}{R_0 + R_x}$$

式中 R_0 是 R 、 R_1 和 R_2 组合后的等效电阻，其值为

$$R_0 = \frac{R(R_1 + R_2)}{R + R_1 + R_2}$$

称为欧姆表的内阻。

可以看出，当 $R_x = 0$ 时， I 最大， $R_x \rightarrow \infty$ 时， $I = 0$ 。可见欧姆表的刻度与电流表和电压表不同，欧姆表的零刻度则为电流表和电压表的满刻度。被测电阻大时，指针偏转小，被测电阻小时，指针偏转大。从测量原理可以看出，电阻的刻度是不均匀的。

欧姆表的内阻 R_0 称为中值电阻。因为 $R_x = 0$ 时，流过电源的电流 $I = \frac{U_s}{R_0} = I_0$ ，分配到测量机构中的电流 $I_s = \frac{R}{R + R_1 + R_2} I$ (I_s 为满偏电流)；若 $R_x = R_0$ ，流过电源的电流 $I' = \frac{U_s}{2R_0} = \frac{1}{2} I_0$ ，分配到测量机构中的电流 $I'_s = \frac{1}{2} I_s$ ，指针的偏转为满偏转的一半，指针指在刻度盘的正中，刻在这里的电阻值应等于 R_0 ，所以 R_0 叫做欧姆表的中值电阻。

由以上分析可见，在刻度盘右半段上刻度的电阻范围是 $0 \sim R_0$ 的值；左半段是 $R_0 \sim \infty$ 的值；左半段靠近 ∞ 的一端电阻值分布甚密，不易读数。由欧姆表的非均匀刻度和中值电阻的概念可知，指针越靠近刻度盘中心，读数越准确。一般指针指在刻度盘的中段 ($\frac{1}{10} R_0 \sim 10 R_0$)

较好。为了达到这个目的，就必须改变欧姆表的中值电阻来改变欧姆表的量程。改变图1-6中的并联电阻 R 即可改变 R_0 。图1-7是具体电路，其中值电阻分别为 12Ω 、 120Ω 、 1200Ω 。

干电池用久了以后，内阻就要增大，因而电池两端的电压就要下降， $R_x = 0$ 时，指针就不会达到满偏转，即不会指在电阻的“0”刻度处，这就给测量带来了误差。为了消除这种误差，通常与测量机构并联或串联一个可调电阻，改变测量机构的分流，从而使 $R_x = 0$ 时指针达到满偏转，这就是欧姆表的调零。因而每次测量之前或改变量程都要进行调零。

二、磁电系整流式仪表

前面我们介绍了磁电系测量机构，它只能用来测量直流，而不能用来测量正弦交流。由于活动部分的惯性较大，指针的偏转角只取决于转矩的平均值，即与电流的平均值成正比

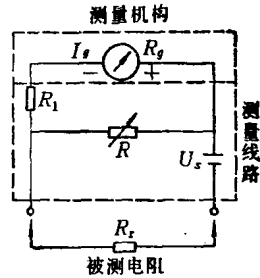


图 1-6

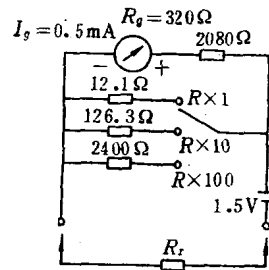


图 1-7

$$\alpha = K \frac{1}{T} \int_0^T i dt$$

T 为正弦交流电的周期。而正弦电流在一周期内的平均值等于零，活动部分不会发生偏转，所以磁电系测量机构不能用来测量正弦交流。

如果在磁电系测量机构的前面加上适当的测量线路，该测量线路经过整流把正弦交流变换成能被磁电系测量机构接受的“直流”，这样就构成了磁电系整流式仪表，可以用来测量正弦交流。如图1-8所示。

图 a 中虚线方框内是桥式全波整流电路；图 b 中虚线方框内是半波整流电路。前者叫做全波整流式仪表；后者叫做半波整流式仪表。

磁电系测量机构的活动部分的偏转角与它所通过的电流的平均值成正比

$$\alpha = K \frac{1}{T} \int_0^T i' dt = \frac{K}{\pi} 2I_m = KI'$$

全波整流式

$$\alpha = K \frac{1}{T} \int_0^T i'' dt = \frac{K}{\pi} I_m = KI''$$

半波整流式

$$\frac{I}{I'} = \frac{I_m / \sqrt{2}}{\frac{2}{\pi} I_m} = 1.11$$

$$\frac{I}{I''} = \frac{I_m / \sqrt{2}}{\frac{1}{\pi} I_m} = 2.22$$

式中 I 为正弦电流的有效值。我们所说的磁电系整流式仪表，都是按正弦量的有效值来刻度的。正因为如此，这种仪表只能用来测量正弦交流量，而不能用来测量非正弦交流量。

磁电系整流式仪表的最大优点是频率特性好，可用于测量几十赫兹到几万赫兹的正弦电流或电压。由于采用磁电系结构，故具有灵敏度高、消耗功率小等优点。万用表中的交流电压档就是磁电系整流式的。

三、电磁系仪表

1. 电磁系测量机构 电磁系测量机构可分为吸入式和排斥式两种。现以排斥式为例来说明它的原理。图1-9是它的原理图。它的固定部分包括线圈 1 和固定在线圈内壁的软铁片

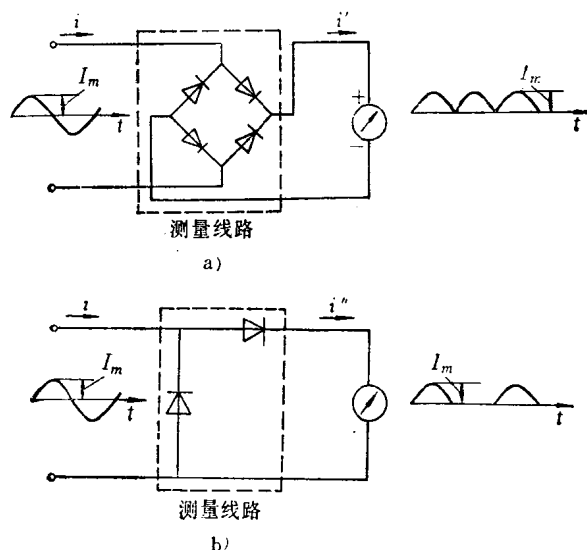


图 1-8

2: 活动部分包括固定在转轴上的动片 3 以及游丝 4、指针 5、阻尼片 6。

当被测电流通过固定线圈时, 产生磁场, 两铁片均被磁化, 同一端的极性是相同的, 因而相互排斥, 活动片因受斥力而带动指针偏转。当固定线圈中的电流方向改变时, 由于两铁片的极性同时改变, 仍然产生排斥力, 所以这种仪表不仅可以测量交流, 也可以测量直流。

通过数学分析可知, 固定线圈通入直流电流 I 时, 作用在活动片上的转矩为

$$T = K_1 I^2$$

式中 K_1 是常数。通入交流电 i 时, 转矩为

$$T(t) = K_1 i^2$$

它随时间变化, 但决定活动部分偏转的是转矩的平均值

$$T = \frac{1}{T} \int_0^T T(t) dt = K_1 \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = K_1 I^2 \quad (T \text{ 表示周期})$$

这里 I 是 i 的有效值。不管电流 i 是什么波形, 平均转矩总是与电流有效值的平方成正比。游丝的反作用力矩为

$$T_s = K_2 \alpha$$

式中 K_2 是常数。当 $T = T_s$ 时, 活动部分被平衡, 于是

$$\alpha = \frac{K_1}{K_2} I^2 = K I^2$$

可见, 这种电磁系测量机构的偏转角与直流或交流 (正弦或非正弦) 有效值的平方成正比。其刻度盘可直接按有效值刻度, 所以这种仪表的刻度是不均匀的。

这种仪表的特点是: 构造简单, 价格低廉, 交直流两用, 过载能力强。缺点是刻度不均匀, 准确度较低, 消耗功率大, 只能用于工频测量, 仪表本身磁场弱, 易受外界影响。

2. 电磁系电流表和电压表

(1) 电流表 由于这种测量机构通过电流的线圈是固定的, 而且不需要游丝引流, 线圈可以做得粗一些, 允许通过较大的电流, 因而可以把固定线圈直接串联在被测电路中, 作成电流表来测量电流。

这种电流表扩大量程不采用分流器。这是因为一方面它可以直接通过大电流, 另一方面, 采用分流器后, 将使测量机构的内部压降和仪表的功率损耗增大。因此常采用固定线圈分段串并联的方法来改变量程。图 1-10 是双量程电流表改变量程的示意图, 它的固定线圈被分为

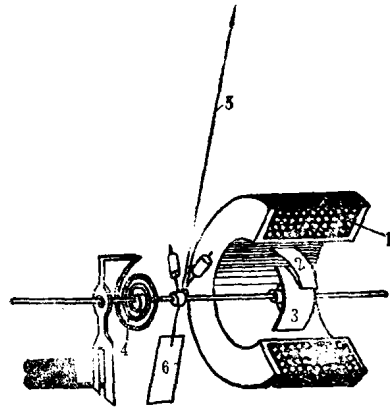


图 1-9

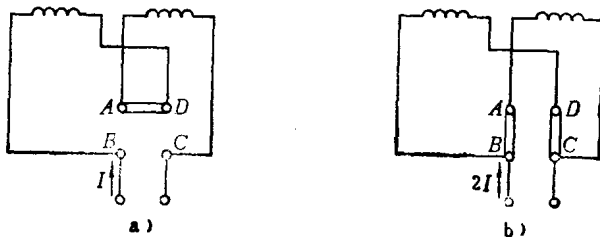


图 1-10

两个完全一样的绕组。图 a 为两个绕组串联，电流量程为 I 。图 b 为两个绕组并联，电流量程被扩大 1 倍，即 $2I$ 。

(2) 电压表 利用测量小电流的测量机构（固定线圈用细的绝缘导线绕制）串联附加电阻，就可用来测量电压，构成电压表。串联不同的附加电阻就可以得到不同的量程。

第三节 电动系仪表

一、电动系仪表的测量机构

电动系测量机构的原理图如图 1-11 所示。它的固定部分是固定线圈 1；活动部分有：活动线圈 2 及与其相连的轴 3、3'，游丝 4、4'，阻尼片 5，指针 6。

给固定线圈通入电流 I_1 ，产生磁场。再经游丝给活动线圈通入电流 I_2 。 I_2 将与 I_1 产生的磁场相互作用而产生转矩，可以证明转矩为

$$T = K_1 I_1 I_2$$

式中 K_1 为常数。在转矩作用下，活动部分将发生偏转。如果 I_1 和 I_2 同时改变方向，则转矩的方向不变，因而这种测量机构可以用来测量直流和交流（正弦和非正弦）。

当固定线圈和活动线圈分别通入交流电 $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$ 和 $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi)$ 时，转矩 $T = K_1 i_1 i_2$ ，它随时间变化。但仪表活动部分的偏转决定于平均转矩。即

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{T} \int_0^T K_1 i_1 i_2 dt = K_1 \frac{1}{T} \int_0^T I_{1m} I_{2m} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi) dt \\ &= K_1 I_1 I_2 \cos \varphi \end{aligned}$$

式中 I_1 、 I_2 分别是 i_1 和 i_2 的有效值， φ 是 i_1 和 i_2 的相位差。

游丝产生的反作用转矩 $T_r = K_2 \alpha$ ， K_2 为常数、 α 为活动部分的偏转角。当 $T = T_r$ 时，指针的偏转角为

$$\alpha = K I_1 I_2 \cos \varphi \quad (\text{交流})$$

或

$$\alpha = K I_1 I_2 \quad (\text{直流})$$

二、电动系电流表和电压表

1. 电流表 使固定线圈和活动线圈串联起来，就可以构成电流表，如图 1-12 所示。这时 $i_1 = i_2 = i$ 。指针的偏转角： $\alpha = K I_1 I_2 \cos \varphi = K I^2$ 。可见指针的偏转角与电流的有效值平方成正比，所以测量的是有效值，且刻度不均匀。

用上述方法构成的电流表一般只能测量 0.5A 以下的电流，因为被测电流要通过游丝，而且活动线圈也很细，不允许通过大的电流，故要测量大电流通常是将固定线圈与活动线圈并联或采用分流器。

2. 电压表 固定线圈与活动线圈串联，并串以不同的附加电阻就可构成电压表。

这种测量机构所构成的电流表和电压表，其特点是交直流两用，准确度较高。缺点是刻度不均匀，受外磁场影

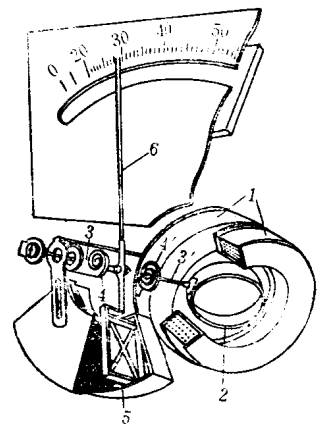


图 1-11

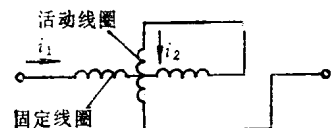


图 1-12

响大, 过载能力差, 消耗功率大。

三、电动系功率表

电动系测量机构除制作电流表和电压表外, 主要用来制作功率表(瓦特表), 用来测量交流电路的平均功率。

电动系测量机构作为功率表时, 固定线圈(又叫电流线圈)与负载串联, 活动线圈(又叫电压线圈)串联大电阻后再与负载并联, 如图1-13所示。

由于 $R \gg X_L$ (X_L 为活动线圈的感抗)

所以 $I_2 \approx \frac{U}{R}$ (I_2 与 U 同相位)

指针的偏转角为

$$\begin{aligned} \alpha &= K I_1 I_2 \cos \varphi = K I \frac{U}{R} \cos \varphi = \frac{K}{R} U I \cos \varphi \\ &= K_p U I \cos \varphi = K_p P \quad (P = U I \cos \varphi) \end{aligned}$$

式中 I 和 U 分别为负载电流 i 和电压 u 的有效值, φ 为 u 和 i 的相位差, $\cos \varphi$ 是负载的功率因数。可见指针的偏转角与负载消耗的平均功率成正比。当然功率表也可用来测量直流电路中的功率。

由公式 $\alpha = K_p U I \cos \varphi$ 可以看出, 如果其中一个线圈中的电流方向改变, 偏转角 α 将变成负值, 即仪表指针向反方向偏转, 这是不允许的。为了保证指针正向偏转, 功率表接入电路时必须遵循一定的规律。如图1-13所示, 每个线圈的一端都标有符号“*”, 接入电路时, 电流线圈的“*”端应接在电源侧, 另一端接负载; 电压线圈的“*”端与电流线圈的任一端相接, 另一端则跨接在负载的另一端。

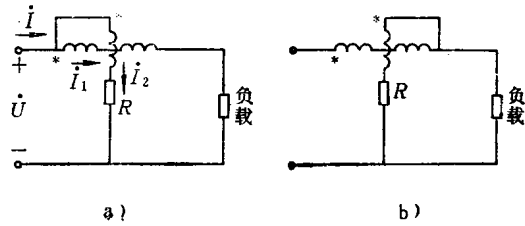


图 1-13

如果将两线圈的端钮同时反接, 虽然指针不会反向偏转, 但由于 R 很大, 电压几乎全部降落在 R 上。在这种情况下, 电压线圈和电流线圈之间的电压可能很高, 由于电场力的作用将引起附加误差, 并有可能发生绝缘被击穿的危险, 这是不允许的。

如果功率表的接线是正确的, 但发生指针反转, 则表明此时负载含有电源, 反过来向外输出功率, 这时应将电流线圈的两个端钮对调即可, 而电压线圈的两个端钮不变。

为了减小测量误差, 功率表有两种接法。当负载阻抗远大于电流线圈阻抗时, 采用图1-13a接法; 当负载阻抗与电流线圈阻抗可以比拟时, 采用图1-13b接法。

这里还需要指出的是功率表的量程。普通的功率表是按额定电压 U_N 、额定电流 I_N 及额定功率因数 $\cos \varphi_N = 1$ 的情况下进行刻度的, 也就是当被测功率 $P = U_N I_N$ 时, 功率表指针有满刻度偏转。通过电流线圈的电流不允许超过仪表规定的额定值, 加在电压线圈上的电压也不允许超过电压线圈端钮上所标的数值, 否则线圈就会被烧坏。因此选定功率表的量程, 就是要由负载电压和电流来选定功率表的电压和电流量程, 使所选量程满足上述要求。因为 $P = U I \cos \varphi$, 而 $\cos \varphi \leq 1$, 所以对应的功率量程定能满足所测功率要求。在测量功率时, 如果只注意功率表指针的偏转是否为功率量程的 $2/3$ 左右, 为减小测量的相对误差, 去减小功率表的电压量程和电流量程, 而忽视了上述要求, 便会使功率表损坏。在满足上述要求的情况

下，如果指针偏转太小，则说明负载的功率因数过低，为了减小测量误差，解决的办法是采用低功率因数表。

第四节 测量误差

在任何测量中，由于各种主观和客观因素的影响，使得测量结果不可能完全等于被测量的实际值，而只是它的近似值，我们把测量值与被测量的实际值之差叫做测量误差。

一、测量误差的分类

根据测量误差的性质和特征，测量误差可分为系统误差、偶然误差和疏忽误差。

1. 系统误差 系统误差是由于仪表的不完善，使用不恰当，或测量方法采用了近似公式以及外界因素（如温度、电场、磁场）等原因所引起的。它遵循一定的规律变化或保持不变。按照误差产生的原因又可分为

(1) 基本误差 仪表在正常使用条件下，由于结构上和制造中的缺陷而产生的误差，它为仪表所固有。其主要原因是仪表的活动部分在轴承中的摩擦，游丝的永久变形，零件位置安装不正确，刻度不准确等等。

(2) 附加误差 它是由于外界因素的变化而产生的。主要原因是仪表没有在正常条件下使用，例如温度和磁场的变化、放置方法不同都会引起误差。

(3) 方法误差 测量方法不完善，使用仪表的人在读数时因个人习惯不同而造成读数不准确，间接测量时所用的近似计算公式等等都可以造成误差，所有这些都叫做方法误差。

2. 偶然误差 这种误差是由于某些偶然因素所造成的。这些因素产生的原因或者是由于目前还不知道，或者还无法掌握。例如，利用同一电桥对同一电阻进行多次测量，其结果都可能不一样，有的偏大，有的偏小，看起来好象没有什么规律，但把多次测量结果综合起来看，仍是有规律的，由数学理论可知它符合统计规律。

3. 疏忽误差 疏忽误差是由于测量中的疏忽所引起的。由于疏忽所引起的测量结果一般都严重偏离被测量的实际值，如读数错误、记录错误、计算错误或操作方法错误等所造成的误差。

二、减小或消除误差的方法

测量的目的就是要尽可能求出被测量的实际值，为达到此目的必须设法减小或消除测量误差。

1. 减小系统误差的方法

①对仪表进行校正，在测量中引用更正值，减小基本误差。

②按照仪表所规定的条件使用，减小附加误差。

③采用特殊的方法测量，减小方法误差。例如替代法，在保持仪表读数不变的条件下，用等值的已知量去代替被测量，这样的测量结果就和测量仪表的误差、外界条件的影响无关。具体地说，比如用电桥测量电阻，先用电桥测被测电阻，调节桥臂电阻使电桥平衡。然后以标准电阻箱代替被测电阻，调节标准电阻箱使电桥平衡，这时标准电阻箱上的读数就是被测电阻的值。当然还有其他的方法，这里就不一一介绍了。

2. 减小偶然误差的方法 从统计学的规律看，把同一测量重复多次，取其算术平均值作为被测量的值，即可减小偶然误差，测量次数越多，偶然误差越小，测量次数趋于无穷大，

则偶然误差趋于零。

3. 消除疏忽误差的方法 由于它是明显的错误, 比较容易发现, 测量后要进行详细的分析, 对凡是由于疏忽所测量的数据都应抛弃, 因为它是不可信的。

三、测量误差的表示方法

1. 绝对误差 测量值 A_x 和被测量的实际值 A_0 之间的差值叫做绝对误差, 用 Δ 来表示, 即

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

在计算时, 可用标准表 (用来鉴定仪表的高准确度仪表) 的指示值作为被测量的实际值。

例1 用一只标准电压表来鉴定甲、乙两只电压表时, 读得标准表的指示值为50V, 甲表读数为51V, 乙表读数为49.5V, 求它们的绝对误差。

解 由式(1-1)得

甲表的绝对误差

$$\Delta_{\text{甲}} = A_x - A_0 = (51 - 50)V = +1V$$

乙表的绝对误差

$$\Delta_{\text{乙}} = A_x - A_0 = (49.5 - 50)V = -0.5V$$

可见绝对误差有正负之分, 正的表示测量值比实际值偏大, 负的表示测量值比实际值偏小。另外, 甲表偏离实际值较大, 乙表偏离实际值较小, 说明了乙表测量的值比甲表准确。所谓准确度, 就是与实际值接近的程度。与实际值越接近, 准确度越高。从而可以看出, 仪表的准确度越高, 测量结果越准确。

由式(1-1)还可以得到

$$A_0 = A_x + (-\Delta) = A_x + C \quad (1-2)$$

式中 $C = -\Delta$, 称为更正值。更正值与误差大小相等而符号相反。引进更正值后, 就可以对仪表指示值进行校正, 以消除其误差。

2. 相对误差 在测量不同大小的被测量时, 不能简单地用绝对误差来判断其准确度, 例如, 甲表测100V电压时, 绝对误差 $\Delta_{\text{甲}} = +1V$, 乙表测10V电压时, 绝对误差 $\Delta_{\text{乙}} = +0.5V$, 从绝对误差来看, 甲表大于乙表。但从仪表误差对测量结果的相对影响来看, 却正好相反, 因为甲表的误差只占被测量的1%, 而乙表的误差却占被测量的5%, 即乙表误差对测量结果的相对影响更大, 所以在工程上通常采用相对误差来衡量测量结果的准确度。相对误差就是绝对误差与被测量的实际值之比, 通常用百分数来表示, 即

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

例2 已知甲表测100V电压时, 其绝对误差为 $\Delta_{\text{甲}} = \pm 2V$, 乙表测20V电压时, 其绝对误差为 $\Delta_{\text{乙}} = -1V$, 试求它们的相对误差。

解 甲表的相对误差

$$\gamma_{\text{甲}} = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{+2}{100} \times 100\% = +2\%$$

乙表的相对误差

$$\gamma_{\text{乙}} = \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% = \frac{-1}{20} \times 100\% = -5\%$$

可以看出，甲表的准确度高于乙表的准确度。

四、仪表的准确度等级

仪表的基本误差是它本身所固有的，很清楚，基本误差越小，测量所引起的这一方面的误差就越小，测量就越准确。

所谓仪表的准确度就是仪表在正常工作条件下，仪表全量程范围内的最大绝对误差 ($|\Delta_m|$) 与该量程 (A_m) 之比的百分数值，即

$$\pm K = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100\% \quad (1-4)$$

按国家标准规定，仪表的准确度共分为七级，如表1-1所示。前面提到高准确度的仪表就是0.1级或0.2级的仪表。

表 1-1

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5
基本误差(%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5

这里必须说明一点，测量准确度的高低不仅与仪表准确度等级有关，而且还与量程的选择有关。下面我们通过例子来说明。

例3 用0.5级、0~10V的电压表和0.2级、0~100V的电压表测量8V的电压，问哪一块表测量的准确度高？

解 用0.5级、0~10V的电压表测量，可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K \times A_m = \pm 0.5\% \times 10V = \pm 0.05V$$

可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.05}{8} \times 100\% = \pm 0.625\%$$

用0.2级、0~100V的电压表测量，可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm K \times A_m = \pm 0.2\% \times 100V = \pm 0.2V$$

可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_m = \frac{\Delta_m}{A_0} \times 100\% = \frac{\pm 0.2}{8} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

从计算结果可以看出，用0.5级、0~10V的电压表测量的准确度高。

这个例子说明测量的准确度既取决于仪表的准确度，又取决于仪表的量程。被测量的值越接近满量程，测量准确度就越高。因而在测量时，除正确选择仪表的准确度等级外，还应正确选择仪表的量程。通常被测量为满量程的 $\frac{2}{3}$ 以上较为合适。

五、工程上对测量误差的估算

在任何测量过程中，误差总是存在的。因此在测量工作完成以后，不仅要确定测量结果的数值，而且还要确定测量结果的准确程度。在工程测量中，疏忽误差经过详细分析可以发现，由于它是一个错误的测量结果，当然应当舍去，因而在误差估算中不加以考虑。在测量中我们所取的测量结果一般都是多次测量的算术平均值，偶然误差与系统误差相比较，偶然误差对测量结果的影响很小，故可略去不计。所以在工程测量中只考虑系统误差的影响。下