

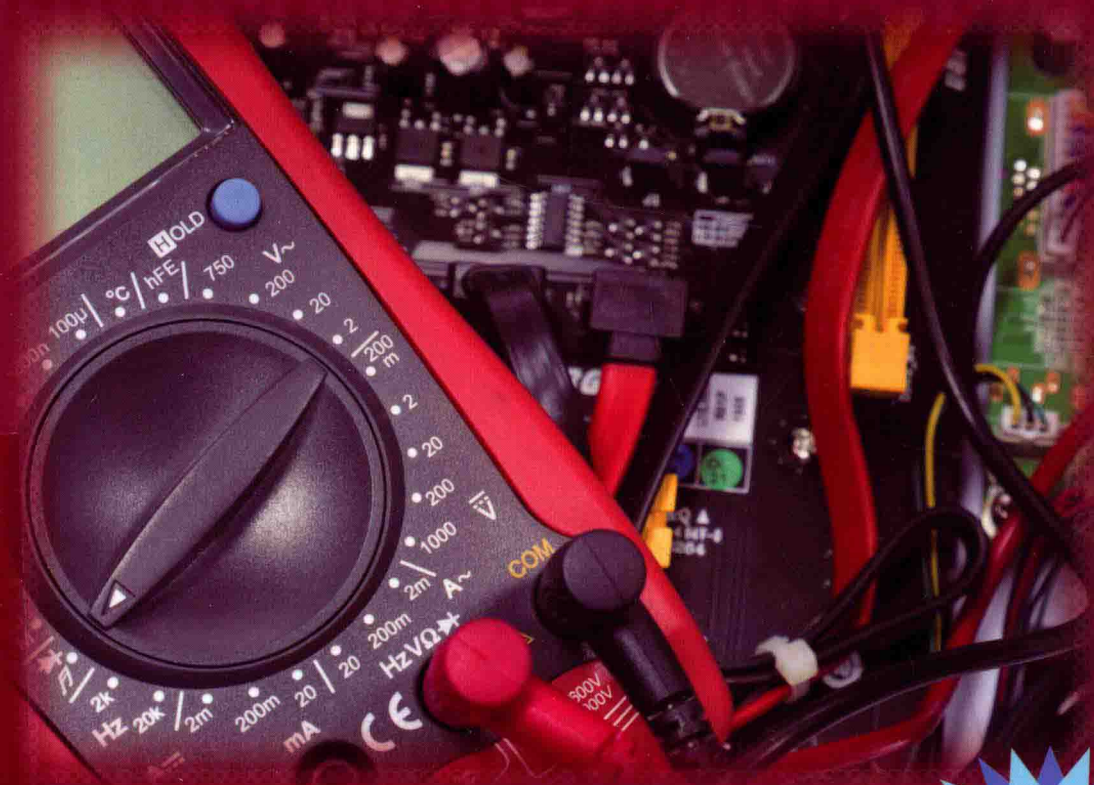


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气测量

陈立周 陈岚岚 编

第6版



免费
电子课件

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气测量

第6版

陈立周 陈岚岚 编

机械工业出版社

本书参照高等院校本科、高职高专机电类相关专业教学计划对主干课程的要求编写。

修订后的第6版,分为模拟式电工仪表与测量、数字式电工仪表与测量、智能仪器与虚拟仪器三篇。修订后除保持必要的基础理论外,也力求反映当前测量技术的最新发展和新产品的应用。为了能完整介绍仪器的构成,书中还提供一些器件和某些仪表的详细电路,作为教与学的参考,若在使用中受到教学时数的限制,这些内容也可以选择让学生自学。

本书适用于本科院校电类专业,可作为电气测量课程的教材或相关课程的参考书,同时也适用于高职高专和电大,也可供从事电气工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气测量/陈立周,陈岚岚编.—6版.—北京:机械工业出版社,2015.11
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-51731-3

I. ①电… II. ①陈…②陈… III. ①电气测量—高等学校—教材
IV. ①TM93

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第233967号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 王 荣

责任校对:纪 敬 封面设计:张 静

责任印制:乔 宇

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2016年1月第6版第1次印刷

184mm×260mm·20.5印张·504千字

标准书号:ISBN 978-7-111-51731-3

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前 言

为适应我国高等教育发展的需要，并参照高等院校本科、高职、高专机电类相关专业教学计划对主干课程的要求，编者将《电气测量》第5版重新做了修订。修订时力求反映应用型大学专业课程应具有的特色，同时也考虑到电类专业学生就业后应具备的动手能力，保留原书中多数在实际应用方面所需要的内容。

由于电子技术、计算机技术和专用集成电路的发展，电气测量技术以及所使用的测量仪器结构也都随之改变，现在传统的电测仪表大都引进电子元件，将电子测量仪表和传统的电测仪表分列两篇已不适应，因此修订后的第6版，分为模拟式电工仪表与测量、数字式电工仪表与测量、智能仪器与虚拟仪器三篇。修订后除保持必要的基础理论外，也力求反映当前测量技术的最新发展和新产品的应用。为了能完整介绍仪器的构成，书中还提供一些器件和某些仪表的详细电路作为教与学的参考，若在使用中受到学时数的限制，这些内容也可以进行选择，有的内容可以让学生自学。

本书第5版由福建工程学院陈立周副教授编写，第6版由福建工程学院电子工程实验中心陈岚岚高级工程师在第5版的基础上进行修订，并由福建工程学院信息科学与工程学院胡驰教授担任主审。本书在几次修订中，曾先后由哈尔滨电工学院袁禄明教授，福州大学林存厚教授、林永华副教授，福建工程学院信息科学与工程学院胡驰教授、林存良副教授担任过主审，他们对本书内容提出了很多宝贵意见，在此向他们表示深切的感谢。修订后书中还难免存在问题和错误，敬请使用本书的老师、同学以及广大读者给予批评指正。编者的通信地址为福建工程学院信息科学与工程学院，电子信箱分别为 chenlz@fjut.edu.cn 和 clanlan2000@163.com。

编 者

目 录

前言	
第一篇 模拟式电工仪表与测量	1
第一章 电工仪表与测量的基本知识	3
第一节 测量方法的分类	3
第二节 电工仪表的分类	5
第三节 电工仪表的组成与基本原理	7
第四节 测量误差及其表示方法	11
第五节 工程上最大测量误差的估计及系统误差的消除	13
第六节 随机误差的估计	18
第二章 电流与电压的测量	24
第一节 电流与电压的测量方法	24
第二节 磁电系仪表	26
第三节 磁电系检流计	32
第四节 电磁系仪表	38
第五节 电动系仪表	43
第六节 测量用互感器	47
第七节 万用电表	52
第八节 直流电位差计	60
第九节 电子系电压表	64
第十节 电流表与电压表的使用与选择	75
第三章 功率与电能的测量	82
第一节 功率与电能的测量方法	82
第二节 电动系功率表	85
第三节 低功率因数功率表	89
第四节 三相功率的测量	91
第五节 感应系电能表及电能的测量	93
第六节 三相有功电能表	98
第七节 三相无功电能表及无功电能的测量	100
第八节 电子式单相电能表	103
第九节 电子式三相电能表	109
第四章 频率与相位的测量	113
第一节 频率的测量方法	113
第二节 相位的测量方法	117
第三节 电动系频率表	119
第四节 电动系相位表	121
第五节 整步表	124
第五章 电路参数的测量	127
第一节 电路参数的测量方法	127
第二节 直流单电桥	133
第三节 直流双电桥	135
第四节 交流阻抗电桥	139
第五节 变压器比率臂电桥	145
第六节 绝缘电阻表	149
第七节 接地电阻测量仪	153
第六章 波形的测量	156
第一节 概述	156
第二节 示波管	157
第三节 示波器电源	162
第四节 示波器的Y通道	165
第五节 示波器的X通道	171
第六节 通用示波器实例	175
第七节 示波器的应用	189
第七章 磁的测量	196
第一节 概述	196
第二节 磁场的测量	197
第三节 磁性材料的测量	201
第二篇 数字式电工仪器与测量	207
第八章 数字电压表	209
第一节 数字电压表的性能指标	209
第二节 数字电压表的结构类型	211
第三节 数字电压表实例	214
第四节 数字万用表实例	220
第九章 数字功率表	232
第一节 数字功率表的结构类型	232
第二节 模拟乘法器构成的数字功率表	233
第三节 数字乘法器构成的数字功率表	235
第十章 数字频率表	237
第一节 数字频率表的测量原理	237
第二节 E312系列数字频率表	241
第三节 简易型数字频率表	247
第十一章 数字参数测量仪	249



第一节	数字电阻测量仪	249	第三节	智能式电子电能表	284
第二节	数字钳式接地电阻测量仪	251	第十四章	虚拟仪器	293
第三节	数字电容测量仪	252	第一节	概述	293
第十二章	数字示波器	255	第二节	虚拟仪器的组成	295
第一节	液晶显示器	255	第三节	Multisim 软件介绍	299
第二节	数字示波器的类型	262	附录		302
第三节	数字存储示波器实例	266	附录 A	习题	302
第四节	逻辑分析仪	273	附录 B	参考实验	311
第三篇	智能仪器与虚拟仪器	279	附录 C	仪表和附件用标志符号 (摘自 GB/T 7676.1—1998)	315
第十三章	智能仪器	281	参考文献		320
第一节	概述	281			
第二节	智能仪器的结构	282			

第一篇 模拟式电工仪表与测量

电测量主要是指对电流、电压、电功率、电能、相位、频率、电阻、电感、电容以及电路时间常数、介质损耗等基本电学量和电路参数的测量。磁测量则主要指对磁场强度、磁感应强度、磁通量、磁导率、介质的磁滞损耗和涡流损耗等基本磁学量和介质磁性参数的测量。电测量和磁测量统称为电气测量或电磁测量。

电气测量技术是研究各种电磁量的测量方法、测量中所配置的仪表和仪器设备、各种仪表仪器设备的结构与原理、测量时的操作技术以及如何对所测出的数据进行处理以求出测量结果和可能误差。

电磁量是无法通过人的感官进行衡量的，为此要对它进行测量离不开仪表。早期电气测量所使用的仪表都是机械模拟式的，后来由于电气技术、电子技术以及计算机技术的不断进步，使电气测量仪表也迅速发展起来。它的发展过程大体经历了以下几个阶段。

20世纪50年代以前，电气测量所使用的仪表基本都是机械式的模拟指示仪表，这种传统的指示仪表由于在元件质量、生产工艺方面的不断完善，加上有关测量理论、测量方法和测量技术的不断进步，使得它在发展中也达到了相当高的水平。以电流表为例，其灵敏度可以达到 10^{-9} A。而且价格低廉，所以这种仪表至今仍被广泛应用。

20世纪50年代以后，随着电子技术和控制技术的发展和在电气测量领域，开始发展模拟指示器件与电子电路相结合的电子式模拟指示仪表，或称电子测量仪表，其中以高频或超高频电压表、示波器和记录仪为典型代表，集中体现了电子仪表的特色。

之后，由于出现了晶体管和集成电路，促进了数字技术的进步，并成功地应用到测量仪器中，出现了电子式的数字仪表。数字仪表不但有了新的显示方式，而且为测量数据的存储、传输、运算开辟了一条新的途径。

到70年代初，微处理器和微型计算机开始问世，特别是单片机的广泛应用，诞生了许多智能仪器。所谓智能仪器就是在传统的仪表仪器基础上，内置微处理器或单片机，使之在测量功能和仪表性能方面产生一个根本性的变化。

进入80年代以后，计算机和它的相关技术包括微电子技术、集成电路、软件技术、网络技术发展得更快，因此也带动了仪器仪表和测量技术，使它紧跟着信息时代的步伐，有了革命性的变化。虚拟仪器就是现代测量仪器发展中的一个杰出代表。

但在电气测量技术发展过程中，新一代仪表出现，并没有把旧的一代仪表完全淘汰，而是各自发挥自身的特点，使用在不同的场合，以满足不同的需要。因此现代电气测量研究的范围，既包括了传统的机械式和电子式的模拟指示仪表，也包括数字显示仪表、智能仪表和虚拟仪表。传统的仪表仍然占有重要的地位。

电气测量技术不但对从事测量仪表专业的人员至关重要，就是从事一般电气技术的工作人员，掌握仪表的原理和使用技术也是十分必要的，因为不论是电气设备的安装、调试、运行、检修，还是电气产品的检验、分析、鉴定，都会遇到有关测量方面的技术问题。电气测量知识已经成了电气技术人员必备的基础知识之一。



本篇讲述使用模拟指示仪表的测量原理，电磁量与电磁参数的测量方法。由于仪器仪表的产品众多，作为一门基础课程，不可能一一介绍，也没有这种必要，只能通过典型结构，介绍相关仪表的基本概念和知识。

第一章

电工仪表与测量的基本知识

第一节 测量方法的分类

各种物理量的单位，都有国际标准。测量过程实际上就是被测物理量与国际标准相比较的过程。测量的任务就是通过实验的方法，将被测量（未知量）与标准单位量（已知量）进行比较，以求得被测量的值。电气测量同样也是通过直接或间接的方法，将被测的电磁量与同类的标准单位量进行比较，以确定被测电磁量的大小。标准单位量的实体称为度量器，度量器就是测量单位或测量单位的分数倍或整数倍的复制体，如标准电池、标准电阻、标准电感等，如图 1-1 所示。

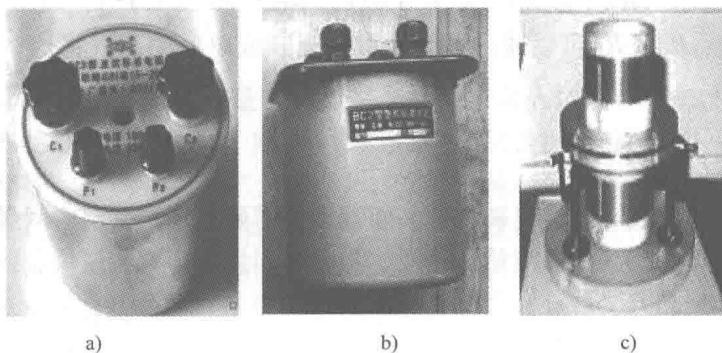


图 1-1 标准电池、标准电阻、标准电感
a) 标准电池 b) 标准电阻 c) 标准电感

根据在量值传递中起的作用和本身的准确度，度量器分为基准器、标准器和工作量具三种。其中基准器和标准器是由国家计量部门管理的，我们日常所用的度量器都属于工作量具。例如，实验室或工程上用的电流表、电压表或标准电阻等，都属于工作量具。

测量既然是一种比较，当然可以采用不同的方式和方法。根据被测量数值是直接还是间接取得形成了不同的测量方式；又根据测量数据如何读取，以及度量器是否直接参与，形成了不同的测量方法。测量的方式和方法分成以下几种。



一、测量方式分类

1. 直接测量

直接测量是指被测电磁量与度量器直接在比较仪器中进行比较,或者使用事先已刻有被测量单位的指示仪表进行测量,从而可以直接读出被测量的数值。这种方式的特点是测出的数据就是被测量本身的值,例如,用电流表测量电流,用电桥测量电阻等,都可以直接读出被测电流或电阻的值。

2. 间接测量

如果被测量不便于直接读出,或者直接测量该量的仪器不够准确,这时可以利用被测量与某种中间量之间的函数关系,先测出中间量,然后通过计算公式,算出被测量的值,这种方式称为间接测量。例如,用伏安法测电阻,就是先测出被测电阻两端的电压和通过该电阻的电流,然后再利用欧姆定律,间接计算出电阻数值。

3. 组合测量

如果被测的未知量与某个中间量的函数关系式中还有其他未知数,那么对中间量的一次测量还无法求得被测量的值,这时可以通过改变测量条件,测出不同条件下的中间量数值,写出方程组,然后通过解联立方程组求出被测量的数值,这种方式称为组合测量。组合测量也适用于同时测量一个函数式中的多个被测量。

例如要测量电阻温度系数 α 和 β ,必须在不同温度条件下,分别测出 20°C 、 t_1 、 t_2 三种不同温度时的电阻值 R_{20} 、 R_{t_1} 、 R_{t_2} ,然后通过解联立方程,求得 α 和 β 的值。

$$R_{t_1} = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20^{\circ}\text{C}) + \beta(t_1 - 20^{\circ}\text{C})^2] \quad (1-1)$$

$$R_{t_2} = R_{20} [1 + \alpha(t_2 - 20^{\circ}\text{C}) + \beta(t_2 - 20^{\circ}\text{C})^2] \quad (1-2)$$

式中, t_1 、 t_2 、 R_{20} 、 R_{t_1} 、 R_{t_2} 可以通过温度计和电阻表或电桥测出,将这些值代入上式,即可求出 α 和 β 。

二、测量方法分类

直接测量需要用仪表直接读出被测量,间接测量需要用仪表读出中间量,然后通过计算求出被测量。不论是直接测出被测量还是间接测定中间量,都要通过仪表读出被测量或中间量的数据。读取数据的方法可分为直读法和比较法两种。

1. 直读法

用电测量指示仪表直接读取测量数据的方法称为直读法。直读法不等于直接测量,因为测出的数据可能是中间量。直读法的特点是没有度量器参与。实际上,指示仪表进行刻度时仍需要度量器,也可能指示仪表刻度时并不借助度量器,而是利用标准的指示仪表进行校准,但标准仪表本身还是需要通过度量器刻度。所以直读法实际上是一种与度量器进行间接比较的方法,这种方法简便迅速,但其准确度受仪表误差的限制。

2. 比较法

比较法是将被测量与度量器置于比较仪器上进行比较,从而求得被测量数据的一种方法。这种方法多用于高准确度的场合,当然,为了保证比较结果的准确度,还要有较准确的仪器,测量时还要保持较严格的实验条件,如温度、湿度、振动、外界电磁干扰等都不能超过规定值。根据比较时的特点,比较法又可分为三类。

(1) 零值法 被测量与已知量进行比较时,两种量对仪器的作用相消为零的方法称为零值法。例如用电桥测电阻,具体电路如图 1-2 所示,当调节电阻 R_0 ,使电桥公式 $R_x = (R_1/R_2) R_0$ 保持恒等时,指零仪表 P 的读数为零。被测电阻 R_x 可由 R_1 、 R_2 、 R_0 值求得。由于比较中指示仪表只用于指零,所以仪表误差并不影响测量结果的准确度,测量准确度只与度量器及指示仪表灵敏度有关。天平测质量也是一种零值法的实例。

(2) 较差法 较差法是通过测量已知量与被测量的差值,从而求得被测量的一种方法。较差法实际上是一种不彻底的零值法。例如,用电位差计测量电池的电动势值 E_x ,如图 1-3 所示。图中, E_0 为已知量,是标准电池的电动势,在这里作为度量器。电位差计可以测出被测量 E_x 与已知量 E_0 的差值 δ ,然后根据 E_0 和差值 δ 求得被测量 E_x 。

$$E_x = E_0 + \delta \quad (1-3)$$

通常差值 δ 仅仅是被测量的很小一部分,例如 δ 为 E_x 的 $1/100$,如果差值 δ 在测量中产生 $1/1000$ 的误差,那么反映到被测量 E_x 中,产生的误差仅为 $1/10^5$ 。

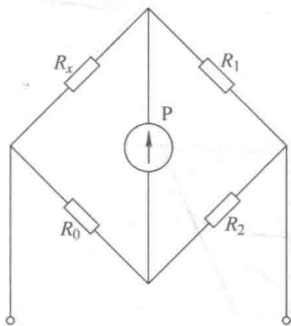


图 1-2 零值法测电阻

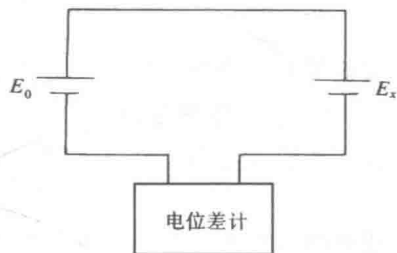


图 1-3 较差法测电动势

(3) 替代法 替代法是将被测量与已知量先后两次接入同一测量装置,如果两次测量中测量装置的工作状态能保持相同,则认为替代前接在装置上的待测量,与替代后的已知标准量其数值完全相等。当然要做到完全替代,已知标准量最好是连续可调的,这样才能在替代时通过调节取得最适当数值以便比较。古代曹冲称象就是采取这种替代法。

采用这种方法,如果前后两次测量相隔的时间很短,而且又是在同一地点进行,那么装置的内部特性和各种外界因素对测量所产生的影响可以认为完全相同或绝大部分相同,所以测量误差极小,准确度几乎完全取决于标准量本身的误差。

第二节 电工仪表的分类

用电磁原理制成的各种电磁量测量仪器仪表统称为电测量仪表,或按习惯称为电工仪表。电工仪表不仅可以测量电磁量,还可以通过各种变换器来测量非电磁量,例如温度、压力、速度等。它应用十分广泛,品种规格繁多,但归纳起来,基本上可以分为三大类。

一、模拟指示仪表

模拟指示仪表是最常见的一种电工仪表。它的特点是把被测电磁量转换为可动部分的角位移,然后根据可动部分的指针在标尺上的位置直接读出被测量的数值。如图 1-4a ~ c 所



示,它是一种直读式仪表,有的时候可能不一定用指针,也可用图1-4d所示字轮转盘方式指示(字轮的转动是连续的,不属于数字式仪表)。但多数的还是用指针,所以通常讲的模拟指示仪表主要是指指针式仪表,当然也包括其他模拟指示方式的仪表。模拟指示仪表按不同方法进行分类。

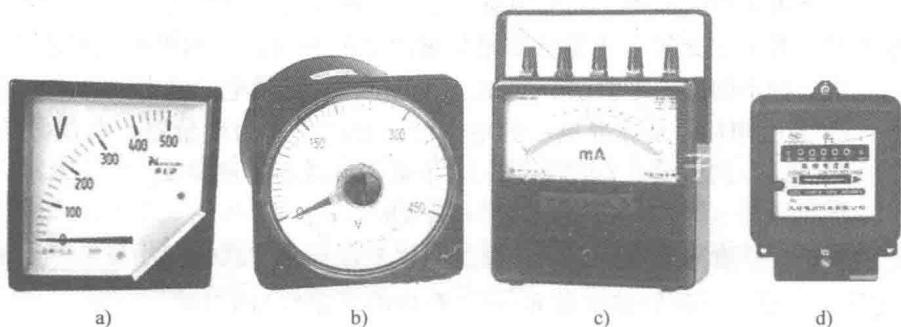


图1-4 各种外形的模拟指示仪表

a) 安装式 b) 广角式 c) 可携式 d) 字轮式

1) 按被测对象分类,可分为交直流电压表、电流表、功率表、电能表、频率表、相位表,以及各种电磁参数测量仪。

2) 按工作原理分类,可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、电子系、静电系、振簧系等。

3) 按外壳防护性能分类,可分为普通、防尘、防溅、防水、水密、气密、隔爆以及是否具备防御外界磁场或电场影响的性能等类型。

4) 按读数装置的结构方式分类,可分为指针式、光指示式、振簧式、数字转盘式(如电能表)等。

5) 按使用方式分类,可分为固定安装式、便携式等。

6) 按准确度等级分类,可分为0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0七个等级。

此外还可以按可动部分的支承方式,耐受机械力作用的性能等进行分类。

模拟指示仪表是电工仪表中生产批量最大的一种产品,其结构已相当完善,所以近年来产品形式没有什么重大突破,仍停留在20世纪60年代传统的水平上。但零件质量有很大提高,部分产品开始应用电子技术,组成电子测量仪表,有的采用电子器件组成变换器,配合磁电系仪表组成变换式仪表,用于测量交流功率、频率、相位。这种变换式仪表不论什么型号,都用统一表芯,大大简化了仪表的配套生产工艺,达到了降低成本、方便维修的目的。有的采用半导体二极管的单向导电性能,制成标尺机械零点的示值不为0的仪表,例如频率表,可将量程定在45~55Hz,与标尺量程为0~55Hz的频率表相比较,显然实际使用的标尺得到较大的扩展,更便于读数。

二、数字仪表

数字仪表也是一种直读式仪表,它的特点是把被测量转换为数字量,然后以数字方式直接显示出被测量的数值。由于这种仪表是采用数字技术,因此很容易与微处理器配合,在测量中实现自动选择量程、自动存储测量结果、自动进行数据处理及自动补偿等多种功能。数

字仪表在测量速度和精度方面可以超过模拟指示仪表，但它缺乏模拟指示仪表那种良好的直观性，所以观察者与仪表稍有距离就可能看不清所显示的数字值。而模拟指示仪表只要能看见指针，就能大体判断出被测量的数值，而且能从指针摆动观察被测量的变化趋势。为此近期出现一种数字与模拟条图（用条图打黑代替指针）相结合的双重指示方式，这种仪表既有数字显示，又有液晶条图作为仿模拟指示，使之同时具备两者的特点。

测量各种电磁量的数字仪表。通常是按被测对象进行分类，例如分为数字频率表、数字电压表、数字欧姆表、数字功率表等。外型可做成台式、配电盘嵌入安装式、携带式等，如图 1-5 所示。数字仪表将在第二篇中详细介绍。

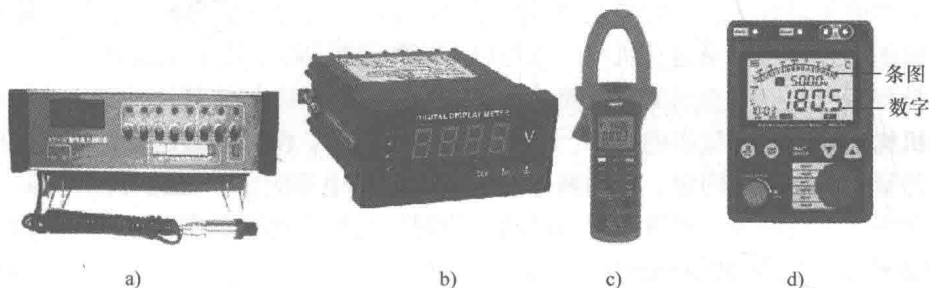


图 1-5 各种外形的数字仪表

a) 台式 b) 安装式 c) 钳式 d) 数字/条图双显式

三、比较仪器

比较仪器可以用模拟指示仪表读出，也可以用数字仪表读出。它用于比较法测量，有直流和交流两大类，包括各类交直流电桥、交直流补偿式的测量仪器，以及直流电流比较仪等。比较法测量的准确度都比较高，所以比较仪器多用于对电磁量进行较精确测量的场合。

比较仪器的结构一般包括比较仪器本体（如电桥、电位差计等）、检流设备、度量器等部分。其中的检流设备可采用模拟式指示仪表，也可以用数字仪表。

四、智能仪表和虚拟仪表

智能仪表是在指示仪表中内嵌单片机或微处理器，使它具有自动调节、自运算和多功能的能力。虚拟仪表则是仪表硬件和计算机的结合，利用计算机强大的软件组成测量系统。智能仪表和虚拟仪表将在第三篇中讲述。

第三节 电工仪表的组成与基本原理

一、模拟指示仪表的组成与基本原理

模拟指示仪表有时简称为指示仪表。电磁测量用的模拟指示仪表结构框图如图 1-6 所示，可以看出，模拟指示仪表可划分为测量线路和测量机构两大部分。

测量线路的任务是把被测量 y 转换为可被测量机构接受的过渡量 x 。测量机构的任务则是把过渡量 x 再转换为指针角位移 α 。不论是测量线路中的 y 和 x ，还是测量机构中的 x 和

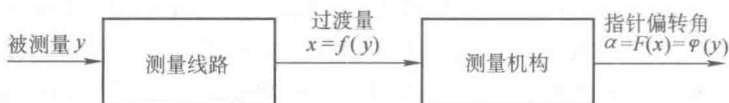


图 1-6 电磁测量指示仪表框图

α , 都要求它们之间保持一定的函数关系, 这样才能从角位移 α 读出被测量 y 。至于选用何种电磁量作为过渡量, 则要看使用什么类型的仪表, 例如使用磁电系仪表, 要用电流作为过渡量; 而使用静电系仪表, 则要用电荷量作为过渡量。因此要根据测量机构和测量对象的不同, 选用适当的测量线路, 使它能在测量对象作用下, 产生适合测量机构的过渡量。当然如果测量对象能够直接作用于测量机构, 也可以不用测量线路, 例如用磁电系仪表测量直流电流, 如果量程相当, 就不必用测量线路。

测量机构是模拟指示仪表的核心, 是仪表的必备部件, 没有测量机构就不能构成模拟指示仪表。测量机构通常由固定、可动两部分组成, 以磁电系为例, 磁路为固定部分, 动圈、指针、游丝组成可动部分。通过固定与可动机构间的相互作用, 形成以下三种力矩。

1. 产生转动力矩 M 的驱动装置

为了使指针能够偏转就需一个能产生转动力矩 M 的装置。不同类型的仪表, 产生转动力矩的原理不同, 产生力矩的构造也不同, 例如磁电系仪表是利用通电线圈与永久磁铁之间的电磁力, 而静电系仪表则是利用两块极板间的电场作用力。

各种指示仪表的转动力矩, 除了与固定部分及可动部分所形成的电磁场强弱有关外, 还跟电磁场的分布状态有关。电磁场的分布状态往往会因可动部分所处的位置不同而产生变化, 所以转动力矩一般要受两个因素影响, 它是被测量 y 与可动部分偏转角 α 的二元函数, 即 $M = F(y, \alpha)$ 。只有个别仪表, 例如, 磁电系仪表, 因为其气隙中的磁场十分强, 可动线圈的位置不会影响磁场的分布情况, 所以它的转动力矩是被测量的单变量函数, 即 $M = F(y)$ 。

2. 产生反作用力矩 M_α 的控制装置

如果测量机构只有驱动力矩, 而没有产生反作用控制装置, 那么不论被测量所产生的转动力矩是大还是小, 可动部分总要在它的作用下一直偏转到尽头; 就像一杆不挂秤砣的秤杆, 不论被称物的质量多少, 总是向上翘起。为了使可动部分的偏转角, 能反映被测量的大小, 就要设置一个能产生反作用力矩的控制装置。

图 1-7 所示的盘形弹簧游丝就是一种常用的产生反作用力矩的装置。当可动部分在转动力矩作用下产生偏转时, 就会同时扭紧游丝, 游丝是由高弹性材料制成的, 扭紧时就会产生一个与转动力矩方向相反的反作用力矩, 在弹性范围内, 其大小与游丝扭转角成正比, 即

$$M_\alpha = D\alpha \quad (1-4)$$

式中 D ——反作用力矩系数, 由游丝的材料与外形所决定;

α ——可动部分的偏转角。

这样, 仪表可动部分受转动力矩驱动产生偏转的同时, 又受到反作用力矩作用, 偏转角越大, 反作用力矩也越大, 当反作用力矩与转动力矩相等时可动部分就因平衡处于静止状态, 这时对应的偏转角 α 可按式 (1-5) 推得

$$M = M_\alpha \quad (1-5)$$

将转动力矩 $M = F(y)$ 与式 (1-4) 代入式 (1-5) 得

$$F(y) = D\alpha$$

$$\alpha = \frac{F(y)}{D} \quad (1-6)$$

如图 1-8 表示, 其中转动力矩 M 是被测量 y 的函数, 如果 M 与可动部分偏转角 α 无关的话, 它就是一组与 α 坐标轴平行的直线。 y 越大, 水平线位置越高。而 M_α 与 α 成正比, 所以反作用力矩是一条沿 α 坐标轴向上倾斜的直线。 M 与 M_α 的交点就是可动部分平衡点。对应的 α 就是可动部分停止的位置, 例如图中当转动力矩分别为 M 、 M' 、 M'' 时, 对应的偏转角为 α 、 α' 、 α'' 。从图中还可以看出, 当外界因素 (如振动) 使可动部分从平衡位置处偏移, 这时 $M \neq M_\alpha$, 从而产生差力矩 $M - M_\alpha$, 这个力矩又称为定位力矩 M_Δ , 即

$$M_\Delta = M - M_\alpha \quad (1-7)$$

定位力矩力图将仪表可动部分返回到原来的平衡位置, 但由于轴尖与轴承间总是存在摩擦力, 可动部分总是无法回到原来平衡点, 从而造成仪表的示数误差, 这种误差又称为摩擦误差。它是仪表基本误差的一部分, 通常要通过提高反作用力矩系数 D 或者减轻可动部分的重量, 也就是增加定位力矩减少摩擦力矩来消除。除了用游丝产生反作用力矩外, 还可以用张丝、重锤或电磁力矩 (如比率型仪表)。

3. 产生阻尼力矩 M_d 的阻尼装置

从转动力矩和反作用力矩的关系可知, 可动部分在转动力矩的作用下, 最终总会停在一个平衡位置上。但由于可动部分具有一定的转动惯量, 到达平衡位置时, 不可能立即停止, 往往超过平衡点, 而定位力矩又会使它返回到平衡位置, 这就造成指针在读数位置左右摆动。

为了尽快读数, 必须在测量机构中设置吸收这种振荡能量的装置, 这种装置称为阻尼装置。阻尼装置可以产生与可动部分运动方向相反的力矩, 即阻尼力矩。

应该指出, 阻尼力矩是一种动态力矩。当可动部分稳定之后, 它就不复存在, 因此阻尼力矩不改变由转动力矩和反作用力矩所确定的偏转角。

常用的阻尼装置有两种: 一种是空气阻尼器, 可动部分运动时带动阻尼翼片在一个密封的阻尼箱中运动, 利用空气对翼片的阻力产生阻尼力矩, 它的结构如图 1-9a 所示; 另一种是电磁感应阻尼器, 可动部分带动一个金属阻尼片, 使之切割阻尼磁场的磁力线而在片上感

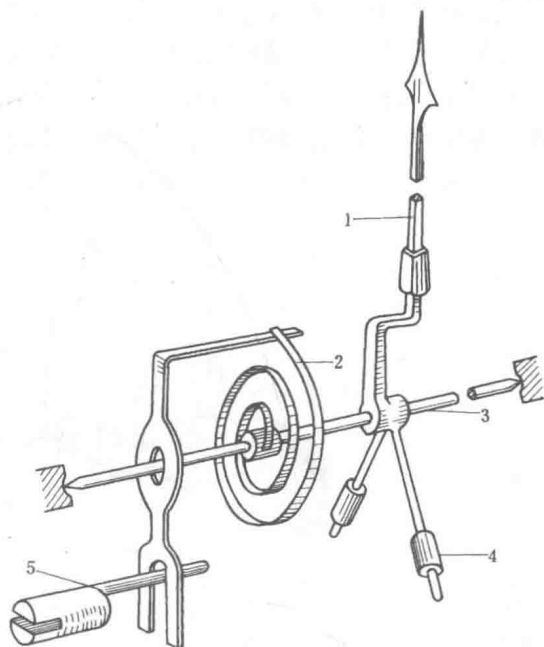


图 1-7 用盘丝弹簧游丝产生反作用力矩

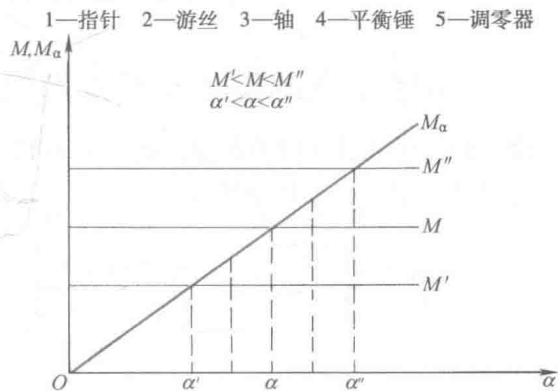


图 1-8 转动力量、反作用力矩与偏转角的关系

应涡流，这个涡流与磁场产生的电磁力矩就是阻尼力矩，它的结构如图 1-9b 所示。

此外，还有采用油阻尼的，但因其结构复杂，多用于高灵敏度的张丝仪表中。

除以上三种产生力矩的装置外，模拟指示仪表的测量机构还包括指针、度盘、光指示式的光路系统和刻度尺、调零器、平衡锤、止动器以及外壳等。

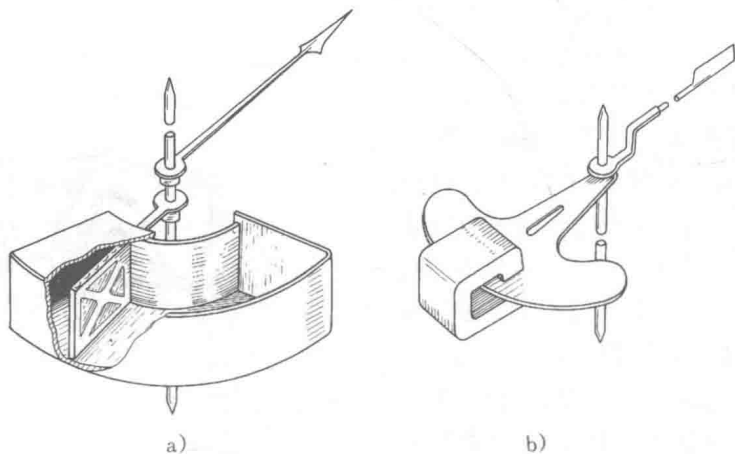


图 1-9 阻尼器
a) 空气阻尼器 b) 磁感应式阻尼器

二、数字仪表的组成与基本原理

电磁测量用的数字仪表典型结构如图 1-10 所示，它包括测量线路、模 - 数转换 (A - D 转换) 和数字显示器等几个部分。

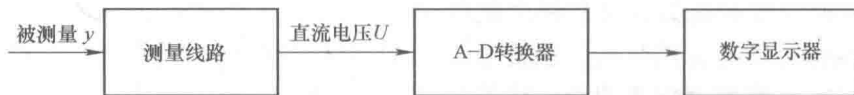


图 1-10 数字仪表组成框图

测量线路的任务是将被测模拟量转换为便于进行模 - 数转换的另一种模拟量 (即中间量)，由于现在实际使用的 A - D 转换器所用的中间量都是直流电压，所以现在的测量线路总是把被测模拟量转换为直流电压。

在模拟指示仪表中，测量线路所转换出来的中间量 U 只要能与被测量 y 保持一定的函数关系，即 $U = F(y)$ 即可。即使 $U = F(y)$ 不是线性函数，也可以通过非线性的标尺来解决。而数字仪表则不然，它要求转换后的中间量 U 必须与被测量保持线性关系，因为从中间模拟量开始，经 A - D 转换器、数字显示器都是线性关系，因此要求在测量线路中，中间过渡量必须与被测量保持线性，即 $U = ky$ ，式中 k 为常数。

A - D 转换器的任务是把模拟量转换为数字量。模拟量是连续的量，其数值连续可变，且随时间连续变化。大部分物理量都属于模拟量；数字量则是不连续的量，只能一个单位一个单位地增加或减少，而且在时间上也不连续，例如用开关通断、脉冲个数表示一个数字时，需要占用时间。A - D 转换器在本例中的任务就是把连续变化的直流电压转换为高电平

或低电平的不间断脉冲所组成的二进制数码。

如果被测量本身已经是一种数字量，例如频率本身就是数字量（即交流电压每秒变化次数），就无须经过 A-D 转换这个环节。

数字显示器是把转换后的数字量用数码形式显示出来。显示器可以是数码管、指示灯或其他显示器件。常用的数码管可直接显示并行的二进制数码。如果是串行的电脉冲信号，则可用计数器转换为数码。

原则上，所有电工仪表都可以做成数字仪表，由于数字仪表以数字形式显示，没有机械转动部分，因此可以避免摩擦、读数等误差。当生产过程采用计算机控制时，数字仪表也便于与计算机配合。

第四节 测量误差及其表示方法

一、测量误差的分类

不论采取何种测量方式，也不论是用何种仪器仪表，由于仪表本身不可能绝对准确，加上测量方法、实验者本人经验、以及人感官等条件限制，都会使测量结果产生误差。按照测量误差产生的原因以及误差的性质，可以把误差分成三类。

1. 系统误差

系统误差是指在相同条件下，多次测量同一个量时，误差大小和符号均保持恒定，或按某种规律变化（例如有规律地逐渐增大或周期性增大和减小）的一种误差。系统误差总是由某个特定的原因引起的，而且这种原因总是持续存在而不是偶发的。系统误差按其产生的原因又可分成以下两种：

(1) 基本误差 基本误差是指仪表在规定的工作条件下，例如在规定的温度、湿度、放置方式、外界电场和磁场干扰强度等条件下，由于仪表本身结构不完善而产生的一种固有误差，例如转动部分的摩擦、刻度不准、轴承与轴尖的间隙所造成可动部分的倾斜等。

(2) 附加误差 附加误差是指仪表使用时偏离规定的工作条件而造成的误差，例如温度过高、波形非正弦、外界电磁场干扰等。

2. 随机误差

随机误差又称为偶然误差，这是由偶发原因引起的一种大小、方向都不确定的误差，例如由于热起伏、空气扰动、大地微震等的综合影响所造成的测量误差。一般来说这种误差比较小，工程测量可以略而不计，只有精密测量才予以考虑。在测量过程中，即使使用同样准确的仪器，并在同样的测量条件以同样细心进行多次重复测量，其测量结果也会不同。所以它无规律可循，产生原因也难以预计，但总体来讲，其服从统计规律。因此可以用统计方法估计它的影响程度。

3. 疏忽误差

这是一种由测量人员的粗心疏忽所造成的误差，它严重歪曲测量结果，例如读数错误、记录错误等，对于这种含有疏忽误差的测量结果应该予以剔除。

二、测量误差的表示方法

测量误差的表示方法有三种。