



卓越系列·21世纪高职高专精品规划教材

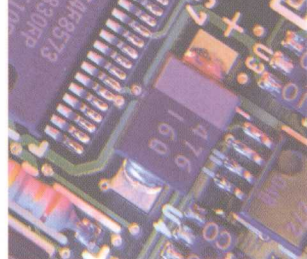
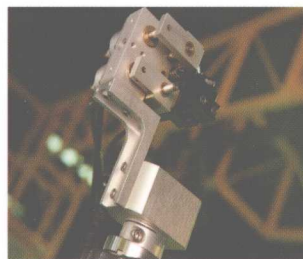
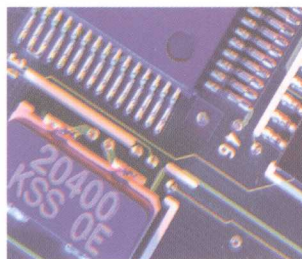
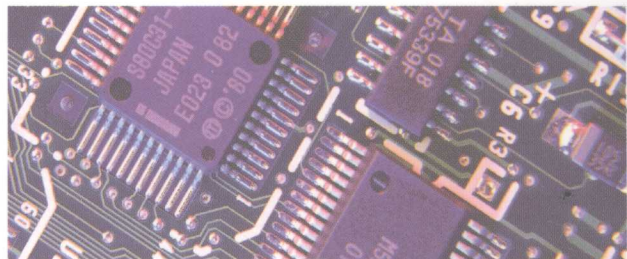
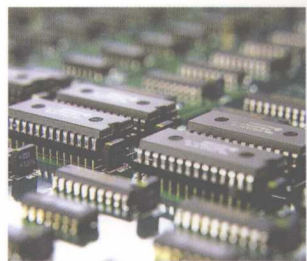
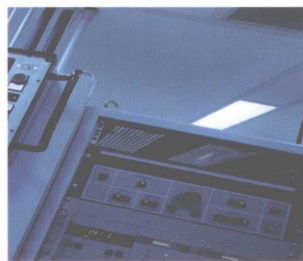
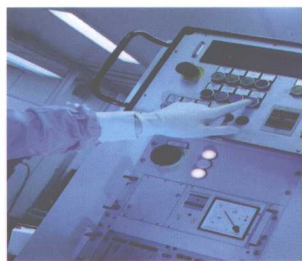
自动化技术类专业适用

# 现代电气测量技术

Modern Electric Measurement Technology

主 编 吕景泉

副主编 马法成



卓越系列·21世纪高职高专精品规划教材(自动化技术类专业适用)

# 现代电气测量技术

Modern Electric Measurement Technology

主 编 吕景泉  
副主编 马法成  
参 编 孙淑云 吴顺毅



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

## 内 容 摘 要

本书共7章。前三章分别介绍了电气测量基本知识、基本电量测量与应用以及电路参数测量等方面的内容。第4章到第6章用较多的篇幅叙述了关于数据采集技术、智能测试仪器和虚拟仪器技术等方面的基础知识。第7章介绍传感器的基本原理。

本书可作为高职高专自动化技术类专业的教学用书,也可供其他相关读者阅读与参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代电气测量技术/吕景泉主编. —天津:天津大学出版社,2008.1

21世纪高职高专精品规划教材

ISBN 978-7-5618-2576-1

I. 现… II. 吕… III. 电气测量-高等学校:技术学校-教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 162745 号

出版发行 天津大学出版社

出 版 人 杨欢

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742

印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 169mm×239mm

印 张 17.75

字 数 389 千

版 次 2008 年 1 月第 1 版

印 次 2008 年 1 月第 1 次

印 数 1-3 000

定 价 28.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

## 前 言

“电气测量技术”是高职高专自动化技术类专业的专业基础课。教学大纲要求高职高专的学生能够熟练掌握电气测量技术的基础知识和专业技能,这对于他们进一步学好本专业的其他课程和专业技能以及步入工作岗位之后专业技术能力的进一步提升都是至关重要的。

随着科学技术的发展,特别是计算机技术、仪器仪表技术和传感器技术的日新月异,电气测量技术课程的内容也在不断更新。其主要特征是计算机技术,特别是微处理器技术对仪器仪表和传感器技术的全面“浸入”,成为它们的“大脑”和“心脏”,使相关测试设备具有了数字化、智能化的功能。更为重要的是,这些“高级”设备早已不是科研、军事、航空、航天、核能等高投资部门的“专有工具”,在众多企业中的工艺流程监控、系统运行检测和故障诊断中已是“屡见不鲜”了。随着企业测试技术的现代化,具有数字化、智能化功能的通用和专用测试仪器仪表与系统会越来越多地出现在生产现场。这就要求我们的学生更新知识,适应生产一线测试技术的需求,具备现代电气测量技术的相关知识与技能。

根据上述,本书在内容上对传统的电气测量技术教材做了调整,保留了电气测量基本知识、模拟仪表测量原理、传感器技术基础等方面的内容,用较多的篇幅介绍了数据采集技术、智能测试仪器和虚拟仪器技术的相关基础知识以及它们在电气测量中的应用,故本书定名为《现代电气测量技术》。

本书以高职高专层次相关专业的学生或读者为对象,着眼于现代企业中常用的电气测量技术与设备,本着理论知识够用、应用知识适用、技能知识实用的原则选取与编排内容,使学生(读者)既能了解现代测量技术的基础知识,又能结合实验与实践教学初步掌握重点的应用技能,从而在今后的职业生涯中更易于提高和拓展。

“电气测量技术”是专业基础课,要求学生(读者)具备一定的电工学、模拟与数字电路的基础知识。

本书共7章,是作者依据多年来从事教学、科研等各方面工作的经验积累写成的。第1章是电气测量的基本知识,主要介绍测量方法、分类以及测量误差方面的内容。第2章是基本电量测量及应用,主要介绍电压、电流等基本电量的测量原理和模拟与数字仪表结构及其应用。第3章是电路参数的测量,主要介绍电阻、电容、电感、时间与频率等电路参数的测量方法。第4章是数据采集技术基础,内容涉及数据采集技术的基本概念,相关器件的原理与应用,具体数据采集芯片、板卡与模块的结构与功能介绍等等。第5章是智能电测仪器原理及应用,介绍了智能电测仪器的基本构成、特点、功能及技

术指标等方面的知识,同时比较具体地描述了智能数字复用表和智能数字存储示波器的性能及应用。第6章是虚拟仪器技术基础,介绍了虚拟仪器技术的主要概念和 LabVIEW 图形化编程环境的基础知识,还结合具体的数据采集卡描述了虚拟仪器技术在电量与非电量测试中的应用。第7章是传感器技术原理及应用,内容主要涉及传感器的基本概念,电阻、电容、电感、光纤、霍尔、压电等各种类型传感器的构成、特性及应用。

本书由教育部高职高专自动化技术专业教学指导委员会主任吕景泉教授担任主编并提出整体编写框架,马法成副教授担任副主编并具体组织编写。孙淑云副教授、吴顺毅老师参加了本书的编写工作。其中第1、2、3章由孙淑云编写,第4、5章由马法成编写,第6、7章由吴顺毅编写。马法成负责了全书的统稿工作。

本书编写过程中参考了较多的书籍和文献,未能一一列举,在此向作者一并致谢。另外,由于作者水平所限,书中会有内容、编排等方面的欠缺与不足之处,敬请专家、同人和读者予以批评指正。

作者

2007年5月

# 目 录

<b>1 电气测量的基本知识</b> .....	( 1 )
1.1 测量方法分类 .....	( 2 )
1.2 电工仪表分类 .....	( 4 )
1.3 电工仪表的组成和基本原理 .....	( 5 )
1.4 测量误差及其分析 .....	( 8 )
复习思考题 .....	( 16 )
<b>2 基本电量测量及应用</b> .....	( 17 )
2.1 电流与电压的测量 .....	( 17 )
2.2 常用测量机构的工作原理 .....	( 20 )
2.3 测量电路及仪表 .....	( 28 )
2.4 电压的数字化测量 .....	( 39 )
复习思考题 .....	( 56 )
<b>3 电路参数的测量</b> .....	( 57 )
3.1 电阻的测量 .....	( 57 )
3.2 电容的测量 .....	( 69 )
3.3 电感的测量 .....	( 73 )
3.4 频率、周期、时间和相位的测量 .....	( 74 )
复习思考题 .....	( 80 )
<b>4 数据采集技术基础</b> .....	( 81 )
4.1 数据采集技术概述 .....	( 81 )
4.2 数据采集系统的相关器件 .....	( 90 )
4.3 数据采集中应用的芯片、模块、板卡与系统构建 .....	( 104 )
复习思考题 .....	( 123 )
<b>5 智能电测仪器原理及应用</b> .....	( 125 )
5.1 智能电测仪器概述 .....	( 125 )
5.2 智能数字复用表 .....	( 142 )
5.3 智能数字示波器 .....	( 149 )
复习思考题 .....	( 166 )
<b>6 虚拟仪器技术基础</b> .....	( 167 )
6.1 虚拟仪器的基本知识 .....	( 167 )
6.2 虚拟仪器编程开发环境——LabVIEW 图形化编程语言 .....	( 170 )
6.3 LabVIEW 几种常用编程工具 .....	( 188 )
6.4 虚拟仪器技术在数据采集中的应用 .....	( 197 )

6.5	PCI-6024E 型数据采集卡的安装、检测与参数设置	(211)
6.6	虚拟仪器技术在电气测量中的应用	(214)
	复习思考题	(221)
<b>7</b>	<b>传感器技术原理及应用</b>	<b>(222)</b>
7.1	传感器技术概述	(222)
7.2	电阻式传感器	(226)
7.3	电容式传感器	(234)
7.4	电感式传感器	(238)
7.5	霍尔传感器	(248)
7.6	热电式传感器	(252)
7.7	电流型集成温度传感器 AD590	(257)
7.8	光纤传感器	(261)
7.9	压电式传感器	(267)
7.10	智能式传感器	(271)
	复习思考题	(275)
	<b>参考文献</b>	<b>(277)</b>
(22)	量测的精度	1.8
(23)	量测的容量	2.8
(24)	量测的精度	3.8
(25)	量测的分辨率和精度、精度、准确度	4.8
(26)	思考题	
(27)	基本数据采集系统	1.1
(28)	数据采集系统	2.1
(29)	数据采集系统	3.1
(30)	数据采集系统	4.1
(31)	思考题	
(32)	用分立元件的传感器	2
(33)	传感器的应用	1.2
(34)	传感器的应用	2.2
(35)	传感器的应用	3.2
(36)	思考题	
(37)	基本传感器的应用	4
(38)	传感器的应用	1.0
(39)	传感器的应用	2.0
(40)	传感器的应用	3.0
(41)	传感器的应用	4.0

本书共分五章,第一章为绪论,第二章为直流电路,第三章为交流电路,第四章为电机学,第五章为电力系统。本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材,也可供从事电气工程工作的工程技术人员参考。

本书在编写过程中,参考了国内外许多优秀的教材和有关文献,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材,也可供从事电气工程工作的工程技术人员参考。

## 1 电气测量的基本知识

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磁测量或电气测量。

电磁测量技术研究的是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根据测出的数据进行处理以求出测量结果和测量误差。

电磁量是人的感官所不能觉察的物理量,对它进行测量离不开仪表。早期电气测量使用的仪表都是机械模拟式的,以后由于电气技术、电子技术以及计算机技术的不断进步,电气测量仪表也迅速发展。它的发展过程大体可以划分成以下几个阶段。

在 20 世纪 50 年代以前,电气测量所使用的仪表基本上以机械式的模拟指示仪表为主,虽然以后测量技术日新月异,但由于仪表仪器元件质量的提高,仪表生产工艺的不断改善,加上测量理论、测量方法的进步,这种传统的机械式的模拟指示仪表已经达到了相当高的水平。例如,电流表的灵敏度就可以达到  $10 \mu\text{A}$ 。所以,这种仪表至今仍被应用。

50 年代,随着电子技术和控制技术的发展和在电气测量领域,除了机械式的模拟指示仪表外,开始发展电子式的模拟指示仪表,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,出现了晶体管和集成电路,它们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。这种仪表不但有了新的显示方式,而且为测量数据的传输开辟了一条新的途径。



到 70 年代初,微处理器和微型计算机问世,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了根本性的变化。

进入 80 年代以后,计算机和它的相关技术的发展更加迅速,仪器仪表和测量技术也随之打上了信息时代的烙印,开始发展虚拟仪器,使之成为现代测量仪器的一个杰出代表。

但在电气测量技术发展过程中,新一代仪表的出现并没有把旧一代仪表完全淘汰,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,现代电气测量技术研究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。

对于从事电气技术的工作人员来讲,掌握各种仪表的原理和使用技术是十分必要的。因为不论是电气设备的安装、调试、运行、检修,还是对电气产品进行检验、分析、鉴定,都会遇到测量方面的技术问题。电磁测量知识成了电气技术人员必备的基础知识。本章主要介绍机械式的模拟指示仪表的测量原理和测量方法。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,也没有必要,因此,本书只通过典型结构介绍相关仪表的基本概念和知识。

## 1.1 测量方法分类

测量过程实际上是比较的过程。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。电磁测量也是一样,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,例如标准电池、标准电阻、标准电感等。度量器又根据它在量值传递中所起的作用和本身的准确度,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,日常所用的度量器都属于工作量具。

测量既然是一种比较,当然可以采用不同的方式和方法。按照测量结果即所需要的被测量数值如何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。

### 1.1.1 测量方式分类

#### 1. 直接测量

直接测量指直接从电子仪器或仪表上读出测量结果。例如,用万用表电阻挡测电阻、计数器测频率、电桥测电容、电压表测电压等。直接测量的特点是不需要对被测量与其他实测的量进行函数关系辅助运算,因此测量过程简单迅速,是工程测量中广泛应用的测量方法。

## 2. 间接测量

间接测量指先对几个与被测量有确定函数关系的电参量进行测量,再将测量结果代入表示该函数关系的公式、曲线或表格,最后求出被测量。例如,直接测出电阻  $R$  的阻值及其两端的电压  $U$ ,由公式  $\frac{U}{R}$  求出被测电流  $I$  的值。当被测量不便于直接测量或间接测量结果比直接测量更为准确时,可采用间接测量方法。例如,通过测量晶体管集电极电阻上的电压,再经计算得到集电极电流,比断开电路串入电流表的方法更为简便易行。

## 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物理量。

例如,要测量电阻温度系数  $\alpha$  和  $\beta$ ,必须在不同温度条件下分别测出  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t_1$ 、 $t_2$  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

$$R_{t_1} = R_{20} [1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)] \quad (1-1)$$

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

求得  $\alpha$  和  $\beta$  的值。若式中  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $R_{20}$ 、 $R_{t_1}$ 、 $R_{t_2}$  为已知,将这些值代入上式,即可求出  $\alpha$  和  $\beta$ 。

### 1.1.2 测量方法分类

直接测量需要从测量中读出被测量,间接测量需要从测量中读出中间量。不论是被测量还是中间量,读取它们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,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,但它的准确度受仪表误差的限制。

#### 2. 比较法

比较法是将被测量与同类的标准量进行比较,根据比较的结果推算出测量读数。典型的比较测量法有差值法、零值法、替代法。该方法的特点是标准量直接参与,测量准确度高,但测量设备较贵,过程复杂。电桥、电位差计就是利用比较测量法的原理设计制作的典型比较式测量设备。在数字测量技术中,常用三步测量、自动校零和迭代等方法。它们都是以比较测量为理论基础的。

(1) 差值法 差值法是通过测量已知量与被测量的差值得得被测量的一种方法。差值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 1.1 差值法测电动势

图 1.1 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  $\delta$ ,然后根据  $E_0$  的差值  $\delta$  求得被测量,即

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

通常差值  $\delta$  仅仅是被测量的很小一部分,例如  $\delta$  为  $E_x$  的  $1/100$ 。如果差值  $\delta$  在测量中产生  $1/1\,000$  的误差,那么反映到被测量  $E_x$  中的误差仅为  $10^{-5}$ 。

(2)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  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0$  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。天平测质量就是一种零值法的实例。

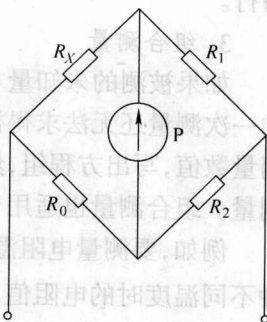


图 1.2 差值法电测电阻

(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的数值完全相等。当然,如果要做到完全替代,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使测量装置的工作状态保持不变。古代曹冲称象采用的就是这种替代法。

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,测量误差极小,准确度几乎完全取决于标准量本身的误差。

## 1.2 电工仪表分类

用电的方法测量各种电磁量的仪器仪表称为电测量仪表,按习惯将它们统称为电工仪表。电工仪表不仅可以测量电磁量,还可以通过各种变换器测量非电磁量,例如温度、压力、速度等等。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。

### 1.2.1 模拟指示仪表

模拟指示仪表是最常见的电工仪表。它的特点是把被测电磁量转换为可动部分的位移,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,所以它是直读式仪表。有的时候可能不一定用指针(包括光指针),例如用液晶显示条或其他微小步进方式(如数字转盘等)指示。但工程上用得最多的还是指针式,所以通常讲的模拟指

示仪表主要是指这种指针式的仪表,当然还应包括其他模拟指示方式的仪表。模拟指示仪表可以用以下不同方法分类:

①按被测对象可分为交直流电压表、交直流电流表、功率表、电度表、频率表、相位表以及各种参数测量仪;

②按工作原理可分为磁电系、电磁系、电动系、感应系、静电系、振簧系等;

③按外壳防护性能可分为普通、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等;

④按读数装置的结构方式可分为指针式、光指示式、振簧式、数字转盘式(电度表)等;

⑤按使用方式可分为固定安装式、可携式等;

⑥按准确度等级可分为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撑方式、耐受机械力作用的性能等进行分类。

### 1.2.2 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都超过模拟指示仪表,但它缺乏模拟指示仪表那种良好的直观性,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到指针,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。因此,近期出现一种数字与指针相结合的指示方式。这种仪表既有模拟指示,又有数字显示,可以说是模拟数字两用型。

测量各种电磁量的数字仪表通常按被测对象进行分类,例如可分为数字频率表、数字电压表、数字欧姆表、数字功率表等。

### 1.2.3 比较仪器

比较仪器用于比较法测量。它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,所以比较仪器可用于对电磁量进行较精密测量的场合。

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。

虽然仪表分类如上所述,但本书按通常习惯把模拟指示仪表和比较仪器作为传统仪表,放在第2章中介绍。

## 1.3 电工仪表的组成和基本原理

### 1.3.1 模拟指示仪表的组成和基本原理

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

1.3 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。

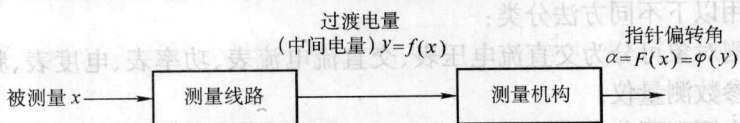


图 1.3 电测量指示仪表框图

测量线路的任务是把被测量  $x$  转换为可被测量机构接受的过渡电量  $y$ 。测量机构的任务是把过渡电量  $y$  转换为指针偏转角位移  $\alpha$ 。不论是测量线路中的  $x$  和  $y$ , 还是测量机构  $y$  和  $\alpha$  都要求保持一定的函数关系, 这样才能从角位移  $\alpha$  读出被测量  $x$ 。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; 使用静电系仪表, 要用电荷量作为过渡量。因此要根据测量机构和测量对象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, 是仪表的主要工作部件。它与测量线路不同, 任何情况都不能省略, 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。测量机构又可按作用功能分为如下三部分。

#### 1. 产生转动力矩 $M$ 的驱动装置

使指针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。一般地说, 电磁场的强弱由被测量的大小决定, 而分布状态则与可动部分所处的位置有关。所以, 指示仪表的转动力矩一般要受两个因素影响, 也就是说它是被测量  $x$  与可动部分偏转角  $\alpha$  的二元函数, 即  $M = F(x, \alpha)$ 。只有个别仪表, 例如磁电系仪表, 因为气隙中的磁场十分强, 可动线圈的位置不影响磁场的分布情况, 所以它的转动力矩是被测量  $x$  的单变量函数, 即  $M = F(x)$ 。

#### 2. 产生反作用力矩 $M_a$ 的控制装置

如果测量机构只有驱动力矩, 而没有控制装置, 那么不论被测量  $x$  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, 不论被称的重量多大, 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, 还需要设置一个能产生反作用力矩的控制装置。

图 1.4 所示的盘形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。由于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决定;

$\alpha$ ——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。偏转角度越大,反作用力矩也越大。当反作用力矩与转动力矩相等时,可动部分就停止,这时对应的偏转角 $\alpha$ 可按下式推得

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

将转动力矩 $M = F(x)$ 、式(1-4)代入式(1-5)得

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

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

产生反作用力矩,除了用游丝外,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,结构如图1.5(a)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

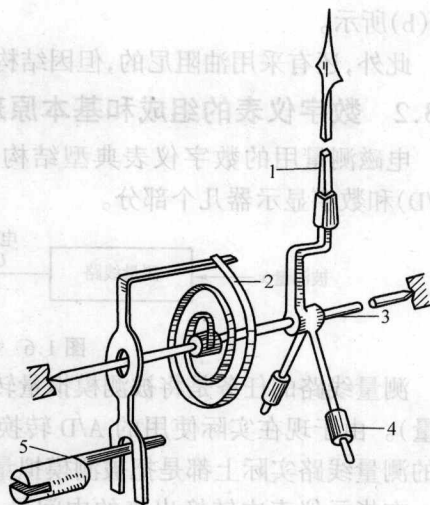


图 1.4 用弹簧游丝产生反作用力矩

1—指针;2—游丝;3—轴;4—平衡锤;5—调零器

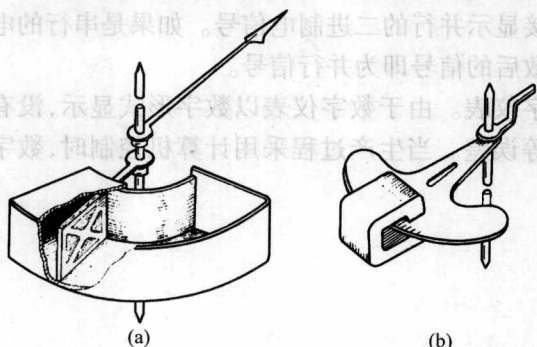


图 1.5 阻尼器

(a)空气阻尼器 (b)电磁感应阻尼器

1.5(b)所示。

此外,还有采用油阻尼的,但因结构复杂,多用于高灵敏度的张丝仪表中。

### 1.3.2 数字仪表的组成和基本原理

电磁测量用的数字仪表典型结构如图 1.6 所示,它包括测量线路、模数转换器(A/D)和数字显示器几个部分。

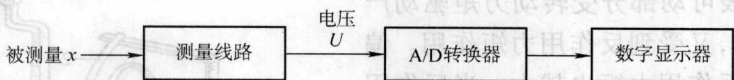


图 1.6 数字仪表组成框图

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 转换器只能将直流电压转换为相应数字量,所以现在的测量线路实际上都是把被测模拟量转换为直流电压。

在指示仪表中转换出来的中间量  $y$  只要能与被测量  $x$  保持一定的函数关系  $y = F(x)$  即可。如果  $y = F(x)$  不是线性函数,可以通过非线性的标尺刻度解决。而数字仪表则要求转换后的中间量必须与被测量保持线性,因为从中间模拟量开始,经 A/D 转换、显示电路都是线性关系,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  $y = kx$ , 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。所谓模拟量是指一种连续的量,其值随时间连续变化。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,例如开关通断、脉冲个数等。现在的 A/D 转换通常是把连续变化的直流电压转换为高电平或低电平脉冲所组成的二进制数码。A/D 转换器的工作原理将在第 2 章介绍。

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

数字显示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电信号。如果是串行的电脉冲信号,则可先用计数器进行计数,计数后的信号即为并行信号。

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。

## 1.4 测量误差及其分析

### 1.4.1 测量误差基本概念

#### 1. 测量误差的几个名词术语

(1) 真值 真值是表征物理量与给定特定量定义一致的量值。真值是客观存在的,

但是是不可测量的。随着科学技术的不断发展,测量结果的数值会不断接近真值。在实际的计量和测量工作中,经常使用“约定真值”和“相对真值”。约定真值是按照国际公认的单位定义,利用科学技术发展的最高水平所复现的单位基准。约定真值常常是以法律形式规定或指定的。就给定目的而言,约定真值的误差是可以忽略的,如国际计量局保存的国际千克原器。相对真值也叫实际值,是在满足规定准确度时用来代替真值使用的值。

(2)标称值 标称值是计量或测量器具上标注的量值,如标准电池上标出的1.018 6 V。由于制造不完备、测量不准确及环境条件的变化,标称值并不一定等于它的实际值。所以,在给出量具标称值的同时,通常应给出它的误差范围或准确度等级。

(3)示值 示值是由测量仪器给出的量值,也称测量值。

(4)准确度 准确度是测量结果中系统误差和随机误差的综合,表示测量结果与真值的一致程度。准确度涉及真值。由于真值的不可知性,所以它只是一个定性概念。

(5)重复性 在相同条件下,对同一被测量进行多次连续测量所得结果之间的一致性称为重复性。相同条件是指相同的测量程序、相同的测量条件、相同的观测人员、相同的测量设备、相同的地点。

(6)误差公理 在实际测量中,由于测量设备不准确、测量方法不完善、测量程序不规范及测量环境因素的影响,都会导致测量结果偏离被测量的真值。测量结果与被测量真值之差就是测量误差。测量误差的存在是不可避免的。也就是说,“一切测量都具有误差,误差自始至终存在于所有科学试验的过程之中”,这就是误差公理。人们研究测量误差的目的就是寻找产生误差的原因,认识误差的规律、性质,进而找出减小误差的途径与方法,以求获得尽可能接近真值的测量结果。

#### 1.4.2 测量误差的表示

测量误差的表示方法有三种。

##### 1. 绝对误差

绝对误差定义为测量值(示值) $A_x$ 与真值 $A_0$ 之差,即

$$\Delta_A = A_x - A_0$$
 (1-7)

式中: $\Delta_A$ ——绝对误差;

$A_x$ ——示值,示值可以用测量结果的测量值、标准量具的标称值、标准信号源的调定值或定值代替;

$A_0$ ——被测量的真值,由于真值的不可知性,常常用约定真值和相对真值代替。

绝对误差可正可负,且是一个有单位的物理量。

绝对误差值负值称之为修正值,也叫补值,一般用 $C$ 表示,即

$$C = -\Delta_A = A_0 - A_x$$
 (1-8)

例如:电压表测电压,读数为201 V,而用标准表测出的值则为200 V。若认为标准表的读数为真值,则绝对误差为



$$\Delta_U = 201 \text{ V} - 200 \text{ V} = +1 \text{ V}$$

$$C = -\Delta_U = -(201 \text{ V} - 200 \text{ V}) = -1 \text{ V}$$

测量仪表的修正值一般是通过计量部门检定给出。从定义不难看出,示值(测量值)加上修正值就可获得相对真值,即实际值。

## 2. 相对误差

相对误差定义为绝对误差  $\Delta_A$  与真值  $A_0$  之比,一般用百分数表示,即

$$\gamma_0 = \frac{\Delta_A}{A_0} \times 100\% \quad (1-9)$$

这里真值  $A_0$  也用约定真值或相对真值代替。但在约定真值或相对真值无法知道时,往往用测量值代替,即

$$\gamma_x = \frac{\Delta_A}{A_x} \times 100\% \quad (1-10)$$

应注意,在误差比较小时,  $\gamma_0$  和  $\gamma_x$  相差不大,无须区分,但在误差比较大时,两者相差悬殊,不能混淆。为了区分,通常把  $\gamma_0$  称之为真值相对误差或实际值相对误差,而把  $\gamma_x$  称为示值相对误差。

在实际测量中,测量结果准确度的评价常常使用相对误差。相对误差愈小,准确度愈高。

## 3. 引用误差

引用误差是为了评价测量仪表的准确度等级而引入的,因为绝对误差和相对误差均不能客观正确地反映测量仪表准确度的高低。引用误差定义为绝对误差与测量仪表量程之比,用百分数表示,即

$$\gamma_{\text{om}} = \frac{\Delta_A}{A_{\text{max}}} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中:  $\gamma_{\text{om}}$  —— 引用误差;

$A_{\text{m}}$  —— 测量仪表的最大量程。

测量仪表的各指示(刻度)值的绝对误差有正有负,有大有小。所以,确定测量仪表的准确度等级应用最大引用误差,即绝对误差的最大绝对值  $|\Delta_A|_{\text{max}}$  与量程之比。若用  $\gamma_{\text{om}}$  表示最大引用误差,则有

$$\gamma_{\text{om}} = \frac{|\Delta_A|_{\text{max}}}{A_{\text{max}}} \times 100\% \quad (1-12)$$

国家标准 GB 776—76《测量指示仪表通用技术条件》规定,电测量仪表的准确度等级指数分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共 7 级。它们的基本误差及最大引用误差不能超过仪表准确度等级指数  $\alpha$  的百分数,即

$$\gamma_{\text{m}} \leq \alpha \% \quad (1-13)$$

依照上述规定,不难得出:电测量仪表在使用时所产生的最大可能误差可由下式求