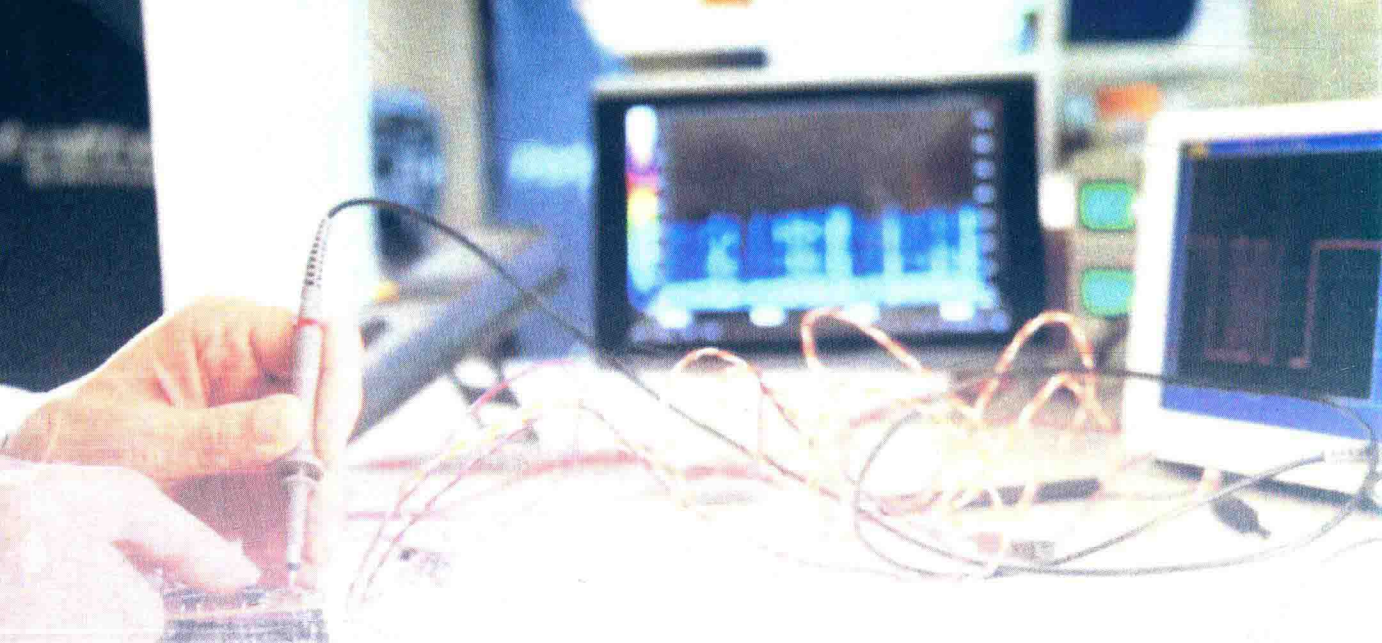




高等学校仪器科学与技术“十三五”规划教材

电气测试技术

主编 闵永智 王秀华 李红
主审 马宏锋



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校仪器科学与技术“十三五”规划教材

电气测试技术

主 编 闵永智 王秀华 李 红
主 审 马宏锋



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书详细介绍了测量及其系统的基本概念和理论、测量误差的分析及测量数据的处理,详尽阐述了常用电参数的测量方法,以及磁性测量技术、非电量的电气测试技术、数字化测量技术、虚拟化与智能化的电气测试技术及这些技术的工程应用。本书在阐述相关基础理论的同时更注重工程应用,在相应的章节给出了相关技术在电气化铁道及高速铁路等领域的实际应用案例,使读者能够将理论与实践结合起来。

本书可以作为高等学校电气工程及其自动化、自动化、测控技术等专业及相近专业的本科、专科教材,也可作为其他相近专业高年级本科生或硕士研究生的学习参考用书,同时可供从事电气测量的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电气测试技术/闵永智,王秀华,李红主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-5606-4687-9

I. ① 电… II. ① 闵… ② 王… ③ 李… III. ① 电气测量 IV. ① TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 244111 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 雷鸿俊

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限公司

版 次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14

字 数 341 千字

印 数 1~3000 册

定 价 29.00 元

ISBN 978-7-5606-4687-9/TM

XDUP 4979001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

电气测试技术可以直接测量科学研究与实际生产过程中的各种电磁参量,而且几乎所有的“非电量”也都可以通过传感器转换成电量并利用电气测试技术进行测量。随着科学技术的进步和发展,电气测试领域不断出现新的测量原理、方法,测量手段也在不断更新并日臻完善,其应用也非常广泛,使得电气测试技术在各种测试技术中占据的地位越来越重要。中国高速铁路的迅猛发展也离不开电气测试技术,其极其严格的建设和运营技术标准的各项技术指标需要电气测试技术来实现测量和控制。

全书共7章。第1章介绍测量及其系统,包括测量的概念、定义、单位、过程及手段,测量仪表的基本性能和特性,测量方法的分类和测量系统的构成及特性;第2章介绍测量误差及数据处理,包括误差来源及其分类和表示方法、随机误差的估算、系统误差及其减小方法、粗大误差的判断准则以及测量数据的处理和误差的合成与分配;第3章介绍电参量的传统测量,包括直读式电气测量仪表、电位差计、测量用互感器、电压及电流的测量和功率及电能的测量;第4章介绍磁性测量技术,包括磁性测量的基本知识、铁磁材料静态磁性的测量、铁磁材料动态磁性的测量,并对铁路中广泛应用的钢轨缺陷的无损漏磁检测技术进行了介绍;第5章介绍非电量的电气测试技术,包括常用传感器介绍、主要的一些非电量的测量,并给出了电气化铁道接触网静态参数检测的方法;第6章介绍数字化测量技术,包括数字化测量技术概述,数据采集系统,电参量的数字化测量,频率、时间和相位的测量,电压、功率和电能等的测量,并介绍了铁路中牵引变压器参数的测量;第7章介绍电气测试技术的智能化和虚拟化,包括概述、微机化仪器的典型功能、智能测试仪器、个人仪器、自动测试系统和虚拟仪器,并介绍了高速铁道综合检测系统。

本书由兰州交通大学闵永智、王秀华和李红主编。其中,第1、3、6章由李红编写,第2、4、5章由王秀华编写,第7章由闵永智编写。全书由闵永智和王秀华完成统稿,兰州工业学院马宏锋教授担任主审。本书得到国家自然科学基金

金项目(61663022、61461023)的支持以及长江学者和创新团队发展计划(IRT_16R36)的资助,同时得到兰州交通大学青年科学基金(2014039,2013039)的资助。

本书在编写过程中,力求做到取材广泛、知识结构体系科学合理,基本概念清楚、内容深入浅出、文字通俗易懂,单位、符号和图表编写规范。本书的编者都具有丰富的电气化铁路教学及现场经验,熟知各种铁路技术参数的测试方法,更全程参与了京沪高铁先导段的联调联试。

在本书的编写过程中,编者参阅了国内外许多专家有关电气测量、电子测量、数字化测量技术及仪表、虚拟仪器类的教材、著作和论文,还得到了国内外有关企业和同行的支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,殷切希望各位读者批评指正。

编者

2017年6月

目 录

第 1 章 测量及其系统	1	2.5.1 有限次测量的置信度	38
1.1 测量的概念和定义	1	2.5.2 随机不确定度与坏值剔除	41
1.1.1 测量的基本方程	1	2.6 测量数据的处理	42
1.1.2 单位及单位制	2	2.6.1 测量数据的有效位数	42
1.1.3 测量仪表的基本功能	3	2.6.2 等精密度测量结果的处理步骤	43
1.1.4 测量过程	4	2.7 误差的合成与分配	46
1.1.5 测量手段	4	2.7.1 概述	46
1.1.6 测量结果的表示	5	2.7.2 系统误差的合成	47
1.2 测量仪表的基本性能	5	2.7.3 系统误差的分配	49
1.2.1 精确度	5	习题与思考题	50
1.2.2 稳定性	5	第 3 章 电参量的传统测量	53
1.2.3 测量仪表的输入/输出特性	6	3.1 直读式电气测量仪表	53
1.3 测量方法	9	3.1.1 直读式电气测量指示仪表的 主要技术特性	54
1.3.1 概述	9	3.1.2 磁电系仪表	55
1.3.2 按测量方法分	9	3.1.3 电磁系电流表和电压表	60
1.3.3 按测量方式分	10	3.1.4 电动系仪表	60
1.4 测量系统	11	3.1.5 感应系仪表	63
1.4.1 测量系统的构成	12	3.2 电位差计	64
1.4.2 测量系统的特性	13	3.2.1 直流电位差计	64
1.4.3 测量系统的选择与优化	14	3.2.2 交流电位差计	66
1.4.4 测量系统的抗干扰技术	15	3.3 测量用互感器	66
习题与思考题	25	3.4 电压、电流的测量	68
第 2 章 测量误差及数据处理	26	3.4.1 中等值电压和电流的测量	68
2.1 误差来源及其分类	26	3.4.2 电压、电流的准确测量	68
2.1.1 误差的来源	26	3.4.3 大电流测量	68
2.1.2 误差的分类	27	3.4.4 高电压测量	69
2.2 误差的表示方法	28	3.5 功率、电能测量	70
2.2.1 测量误差的表示方法	28	3.5.1 直流功率、电能测量	70
2.2.2 仪器仪表误差的表示方法	29	3.5.2 单相交流功率和电能的测量	71
2.2.3 单次直接测量时最大误差的估计	31	3.5.3 三相交流功率和电能的测量	71
2.3 随机误差的估算	32	3.5.4 功率因数测量	72
2.3.1 测量值的算术平均值与数学期望	32	习题与思考题	73
2.3.2 随机误差的估算过程	33	第 4 章 磁性测量技术	74
2.4 系统误差及其减小方法	35	4.1 磁性测量的基本知识	74
2.4.1 系统误差的分类及判断	35	4.1.1 电磁感应	74
2.4.2 减小系统误差的方法	36	4.1.2 铁磁材料的磁特性	75
2.5 粗大误差的判断准则	38		

4.1.3 空间磁场测量的常用方法	76	6.2.1 连续量的离散化与量子化	148
4.2 铁磁材料静态磁性的测量	86	6.2.2 A/D 转换器	149
4.2.1 测量样品	86	6.2.3 采样保持电路	150
4.2.2 磁感应强度的测量	88	6.2.4 同步采样	151
4.2.3 磁场强度的测量	88	6.2.5 多通道数据采集系统的几种 结构形式	153
4.2.4 基本磁化曲线的测量	90	6.3 电参量的数字化测量	154
4.3 铁磁材料动态磁性的测量	91	6.3.1 电阻的测量	154
4.3.1 交流磁化曲线的测量	91	6.3.2 电容的测量	156
4.3.2 铁芯损耗的测量	92	6.3.3 电感的测量	158
4.3.3 复数磁导率的测量	93	6.4 频率、时间和相位的测量	160
4.4 工程应用实例——钢轨缺陷的无损 漏磁检测	94	6.4.1 电子计数频率计测频原理	161
4.4.1 钢轨缺陷的无损漏磁检测原理	94	6.4.2 脉冲累计的测量	162
4.4.2 交流漏磁检测系统	95	6.4.3 计数式频率计测量频率比	162
习题与思考题	96	6.4.4 计数式频率计测量周期	163
第 5 章 非电量的电气测试技术	97	6.4.5 直接测频和测周期中介频率的 确定	164
5.1 常用传感器介绍	97	6.4.6 脉冲沿时间及脉冲宽度的测量	165
5.1.1 电阻式传感器	97	6.4.7 时间间隔和长时间的测量	166
5.1.2 电容式传感器	100	6.4.8 脉冲计数式相位测量原理	167
5.1.3 变磁阻式传感器	101	6.5 电压、功率和电能等的测量	168
5.1.4 磁电式传感器	103	6.5.1 交流电压的测量	168
5.1.5 压电式传感器	104	6.5.2 功率和电能的数字化测量	172
5.1.6 热电式传感器	107	6.6 工程应用实例——牵引变压器参数的 测量	173
5.1.7 光电式传感器	108	6.6.1 空载试验	173
5.1.8 半导体磁效应传感器	112	6.6.2 短路试验	173
5.1.9 新型传感器简介	115	习题与思考题	174
5.2 主要非电量的测量	117	第 7 章 电气测试技术的智能化和虚拟化	175
5.2.1 概述	117	7.1 概述	175
5.2.2 转速的测量	119	7.1.1 测试仪器的智能化	175
5.2.3 温度的测试	128	7.1.2 测试系统的自动化	176
5.2.4 压力的测量	135	7.1.3 测试的虚拟化	176
5.3 工程应用实例——电气化铁道接触网 静态参数检测	141	7.2 微机化仪器的典型功能	177
5.3.1 接触网主要静态参数及其重要性	142	7.2.1 零漂的消除	177
5.3.2 传统的接触网静态参数测量方法	142	7.2.2 通过自动增益变换扩展量程	177
5.3.3 基于组合传感器的接触网静态 参数检测技术	143	7.2.3 测量结果的线性化	178
习题与思考题	144	7.2.4 动态测试	179
第 6 章 数字化测量技术	146	7.2.5 测量数据的自动分析处理	179
6.1 概述	146	7.2.6 故障诊断	180
6.2 数据采集系统	148	7.3 智能测试仪器	181
		7.3.1 智能仪器的组成	181
		7.3.2 智能仪器的应用	183

7.4 个人仪器	187	7.6.2 虚拟仪器的分类	202
7.4.1 个人仪器的组成	187	7.6.3 虚拟仪器的系统组成	203
7.4.2 个人仪器的优点	188	7.6.4 虚拟仪器的软件开发平台	204
7.4.3 个人仪器的插入式组件	189	7.6.5 虚拟仪器技术的应用	208
7.5 自动测试系统	190	7.6.6 基于虚拟仪器技术的电气化铁道 电能质量测量	209
7.5.1 自动测试系统的组成	190	7.7 工程应用实例——高速铁道综合 检测系统	211
7.5.2 GPIB 接口母线系统	191	习题与思考题	214
7.5.3 VXI 总线	197	参考文献	215
7.5.4 自动测试系统的应用	199		
7.6 虚拟仪器	200		
7.6.1 虚拟仪器的结构及特点	201		

第 1 章

测量及其系统

测量是人们认识客观事物，并用数量概念描述客观事物，进而达到逐步地掌握事物的本质和揭示自然界规律的一种手段。在自然界中，任何被研究的客观事物，若要对其定量地进行评价，都必须通过测量来实现。著名俄国科学家门捷列夫说过“没有测量，就没有科学”，英国科学家库克也认为“测量是技术生命的神经系统”，这足以说明测量对发展现代科学技术的作用是非常重要的。

1.1 测量的概念和定义

在自然界中，对于任何不同的研究对象，若要从数量方面对其进行研究和评价，都是通过测量代表其特性的物理量来实现的。

1.1.1 测量的基本方程

测量是将同性质的标准量(也称为单位量)与被测量进行比较，并确定被测量相对于标准量的倍数的过程。因此，测量结果由数值(大小及符号)和相应的单位两部分组成。若没有单位，则数值是没有物理意义的。

设被测量为 x ，单位量为 x_0 ，测量结果的数值 A_x 为

$$A_x = \frac{x}{x_0} \quad (1-1)$$

式(1-1)称为测量的基本方程。

被测量的数值 A_x 与所选定的单位量 x_0 有关， x_0 越大， A_x 越小，反之亦然。对同一被测量 x ，若先后用单位量 x_{01} 和 x_{02} 与之比较，由式(1-1)可得

$$A_{x1} = \frac{x}{x_{01}}, A_{x2} = \frac{x}{x_{02}}$$

由此可得

$$\frac{A_{x2}}{A_{x1}} = \frac{x_{01}}{x_{02}} = K$$

即

$$A_{x2} = K A_{x1} \quad (1-2)$$

式中, K 称为换算因数。

由此可见, 用一定单位量测量某一量所得的数值, 必须乘上换算因数 K 才能得出用新单位量表示的该被测量的数值。

1.1.2 单位及单位制

1. 测量单位

测量单位是为定量表示同类量而约定采用的特定量。这个特定的量值, 其数值等于 1, 其量值大小是约定的, 或是用法令形式规定的。例如, 长度的单位米(m), 是法国政府于 1790 年规定的, 其值为通过巴黎的地球子午线长度的四千万分之一。1983 年, 第 17 届国际计量大会又将米的定义改为: 米是光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔里所经过的距离。

为了在不同的时间、地点对同一被测量进行测量, 且能得到相同的结果, 必须采用公认的而且固定不变的单位。为了有利于各国之间的科学文化交流, 测量单位的确定和统一是非常重要的。

2. 单位制

单位制的种类很多, 国际单位制(代号 SI)具有严格的统一性、突出的简明性与广泛的实用性, 是生产、科研、文教、贸易和日常生活中广泛应用的统一单位。

1) 国际单位制(SI)

国际单位制是由国际计量大会(CGPM)所采用和推荐的一种一贯单位制。国际单位制包括 SI 单位和 SI 单位的十进倍数单位, SI 单位又包括 SI 的基本单位和 SI 导出单位。SI 导出单位由具有专门名称的 SI 导出单位(含 SI 辅助单位)和其他组合形式组成。其结构如图 1.1 所示。

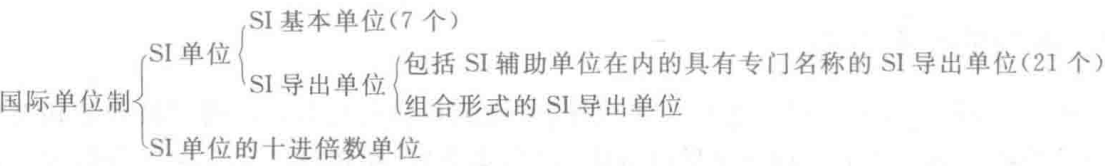


图 1.1 国际单位制的结构

国际单位制的 7 个基本单位是米、千克、秒、安培、开尔文、摩尔和坎德拉。它们表示的量、单位名称和符号如表 1.1 所示。

表 1.1 国际单位制基本单位

量	单位 名 称		符 号
长度	米	metre	m
质量	千克	kilogram	kg
时间	秒	second	s
电流	安培	ampere	A
热力学温度	开尔文	kelvin	K
物质的量	摩尔	mole	mol
发光强度	坎德拉	candela	cd

SI 导出单位是用 SI 基本单位以代数形式表示的单位。SI 导出单位由两部分组成：一部分是包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位；另一部分是组合形式的 SI 导出单位。表 1.2 列出了部分具有专门名称的 SI 导出单位。

表 1.2 具有专门名称的部分 SI 导出单位

量	单位名称	符号	量	单位名称	符号
电压、电位、电动势	伏(特)	V	磁通(量)	韦(伯)	Wb
功率	瓦(特)	W	力、重力	牛(顿)	N
电荷、电量	库(仑)	C	压力、压强、应力	帕斯卡	Pa
电阻	欧(姆)	Ω	光磁通	流明	Lm
电感	亨(利)	H	光照度	勒(克斯)	Lx
电容	法(拉)	F	摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}\text{C}$
电导	西(门子)	S	能、功、热量	焦(耳)	J
频率	赫(兹)	Hz	吸收剂量	戈(瑞)	Gy
磁感应强度	特(斯拉)	T	剂量当量	希沃特	Sv

2) 我国法定计量单位的构成

我国的法定计量单位由所有国际单位制中的单位和部分非国际单位制中的单位构成，表 1.3 列出了国家选定的部分非国际单位制单位。

表 1.3 国家选定的部分非国际单位制单位

量	单位名称	符号	量	单位名称	符号
平面角	度	$^{\circ}$	时间	天	d
	分	'		小时	h
	秒	"		分	min
旋转速度	转/分	r/min	质量	吨	t
土地面积	公顷	hm ²	能	电子伏	eV
体积	升	L	长度	海里	n mile
级差	分贝	dB	线密度	特科斯	tex

在电气测量中，量值的单位在无特殊要求时一般采用国际单位制，采用非国际单位制时必须按照国家标准执行。

1.1.3 测量仪表的基本功能

测量过程实际上是能量的变换、传递、比较和显示的过程。例如，用水银温度计测量室温时，室温被变换成玻璃管内水银柱的热膨胀位移，而温度的标准量为玻璃管上的刻度。可见，被测量和标准量都变换成线位移，两者进行比较，从而得到被测室温的数值(大小和单位)。

由此可见，测量仪表应具有变换、选择、比较和显示四种功能。

(1) 变换功能。变换是指把被测量按一定的规律转变成便于传输或处理的另一种物理量的过程。图 1.2 为变换元件的功能图，设被测量为 x ，经变换后输出量为 y ，它们之间的

函数关系为

$$y = F(x) \tag{1-3}$$

图 1.2 中实线所示的 y 与 x 之间的关系是理想情况， y 与 x 之间具有单值函数关系。

最简单、最理想的变换规律是变换前后， y 与 x 之间的关系成比例，变换元件的这种特性称为线性特性。放大可看做变换的一种特殊形式，即同类量的变换。

(2) 选择功能。在实际的物理系统中，除了被测量 x 外，还有许多其他影响量 $u_1, u_2, \dots, u_m$ 等，它们以不同的程度影响输出量 y ，如图 1.2 所示。实际上，变换元件的输出量与输入量之间的关系是多变量函数关系，即

$$y = F(x, u_1, u_2, \dots, u_m) \tag{1-4}$$

变换元件除了具有特定的输出与输入的关系外，还应抑制 $u_1, u_2, \dots, u_m$ 等影响量对 y 的作用。因此，变换元件应具有选择有用信号、抑制其他一切无用信号的功能，选频放大器就是一例。

(3) 比较功能。由式(1-1)可见，要确定被测量 x 对标准量 x_0 的倍数 A_x ，比较功能是必不可少的。

(4) 显示功能。测量的最终目的是将测量结果用便于人眼观察的形式表示出来，因此显示功能是测量仪表的基本功能之一。测量仪表有模拟显示和数字显示两种显示方式。

1.1.4 测量过程

测量包含三个重要因素，即测量对象、测量方法和测量设备。一个完整的测量过程一般须经过以下三个阶段：

(1) 准备阶段。准备阶段的任务是在对测量对象的性质、特点、测量条件(环境)认真分析并全面了解的前提下，根据测量结果的准确度要求选择恰当的测量方法(方式)和测量设备，进而拟定出测量过程及测量步骤。不难想象，测量准备阶段的工作认真与否将会直接影响整个测量过程的成败。

(2) 测量阶段。测量阶段的任务是在了解准备阶段所选定的测量设备的特性、使用方法的前提下，按照已拟定出的测量过程及测量步骤进行测量，认真而客观地记录数据。

(3) 数据处理阶段。数据处理阶段的任务是按照选定的测量方法、方式及理论，计算出被测量的测量结果的估计值；根据误差传递理论，对测量结果估计值的不确定度作出合理的评定。

一个物理量的测量结果，可通过不同的测量方法获得，测量方法的选择正确与否，直接关系到测量结果的可信赖程度，也关系到测量方案的经济性和可行性。即使有先进的精密仪器，如果使用了不正确的测量方法也不会得到正确的测量结果。

1.1.5 测量手段

常见的测量手段如下：

(1) 量具：体现计量单位的器具。量具中的一小部分可直接参与比较，如尺子、量杯

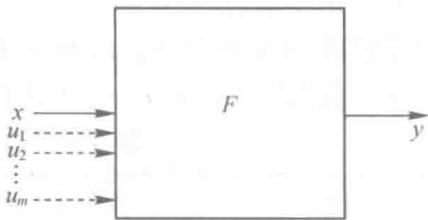


图 1.2 变换元件的功能图

等。多数量具要用专门的设备才能发挥比较的功能,如利用标准电阻测量电阻时,需要借助电桥。

(2) 仪器:泛指一切参与测量工作的设备,包括各种直读仪器、非直读仪器、量具、测试信号源、电源设备以及各种辅助设备,如电压表、频率表、示波器等。

(3) 测量装置:由几台测量仪器及有关设备所组成的整体,用以完成某种测量任务。

(4) 测量系统:由若干不同用途的测量仪器及有关辅助设备所组成,用于各种参量的综合测试。

1.1.6 测量结果的表示

测量结果的表示形式有三种:一是表示成一定的数据;二是表示成一定的曲线;三是表示成一种图形。无论以哪种形式表示测量结果,都应满足以下三点要求:

- (1) 有一定的数字,其大小反映被测量的数量;
- (2) 有量纲,反映被测对象的物理属性;
- (3) 有误差,反映被测结果的可信赖度。

1.2 测量仪表的基本性能

评价仪表的品质指标是多方面的,作为仪表的基本性能,主要是衡量仪表测量能力的指标,如精确度、稳定性、测量范围、输入/输出特性等。本节主要介绍精确度、稳定性和输入/输出特性等几个指标,其余性能指标将在后续章节中进行论述。

1.2.1 精确度

表示精确度的指标有两个:精密度和准确度。

(1) 精密度 δ 。精密度表示仪表指示值的分散程度,即对某一稳定的被测量,用同一台仪表,由同一个测量者用同样的精细程度,在相当短的时间内连续重复测量多次,所得到的测量结果(指示值)的分散程度。 δ 愈小,精密度愈高。例如,某温度仪表的精密度 $\delta = 0.5^{\circ}\text{C}$,说明该表多次测量结果的分散程度不大于 0.5°C 。

(2) 准确度 ϵ 。准确度是指仪表的指示值(简称示值)偏离被测量真正值的程度。例如,某电压表的准确度 $\epsilon = 0.5\text{ V}$,说明该表的示值偏离被测量的真正值不会大于 0.5 V 。 ϵ 愈小,准确度愈高。

(3) 精确度(简称精度) τ 。精确度是精密度和准确度的综合反映。在最简单的场合可取两者的代数和, $\tau = \delta + \epsilon$ 。精确度高说明精密度和准确度都高。在精密度和准确度两者中,若有一个指标高而另一个指标低则不能说明精确度高。精密度、准确度和精确度是三个不同的概念,不能混为一谈。

1.2.2 稳定性

表征仪表示值稳定性的指标有两个:一是时间上的稳定性,用稳定度来表示;二是仪表外部环境和条件变化引起示值的不稳定,用影响系数来表示。

(1) 稳定度 δ_s 。稳定度用于表示由于仪表内部某些随机变化的因素引起的仪表示值变化的程度,例如仪表内部某些因素的周期性变化、漂移或机械部分的摩擦力变化等引起仪表的示值变化。通常它以精密度的数值和时间长短来表示。例如电压波动在 8 h 内引起示值变化 1.3 mV,则可写成稳定度 $\delta_s=1.3 \text{ mV}/(8 \text{ h})$ 。

(2) 环境影响。使用仪表时的周围环境(如室温、湿度、大气压、震动等)的条件变化引起的仪表示值的变化,以及电源电压、波形、频率等工作条件变化引起的仪表示值的变化,统称为环境影响,用影响系数来表示。例如,温度变化引起的示值变化,用温度系数 β_T 表示;电源电压变化引起的示值变化,用电源电压系数 β_u 表示;其余以此类推。

1.2.3 测量仪表的输入/输出特性

说明仪表输入/输出特性的指标有静态特性和动态特性。

1. 静态特性

在测量过程中,当输入信号 x 不随时间变化($dx/dt=0$),或者 x 随时间变化很缓慢时,输出信号 y 与输入信号 x 之间的函数关系称为仪表的静态特性。仪表的静态特性可用高阶多项式代数方程表示:

$$y=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3+\cdots a_nx^n \tag{1-5}$$

式中: x ——输入信号;

y ——输出信号;

a_0 ——零位输出或零点迁移量;

a_1 ——仪表的灵敏度;

$a_2, a_3, \cdots, a_n$ ——非线性项的待定系数。

式(1-5)的多项式代数方程可能有下列五种情况:

(1) 理想线性:在这种情况下, $a_0=a_2=a_3=\cdots=a_n=0$ 。由式(1-5)得

$$y=a_1x$$

上式表明输入/输出特性是经过坐标原点的一条直线。该直线上任何点的斜率都相等,因此仪表的灵敏度可表示为

$$a_1=\frac{dy}{dx}=\frac{y}{x}=k=\text{常数}$$

此时仪表具有理想线性的输入/输出特性。

(2) 具有零点迁移的线性特性:在这种情况下, $a_2=a_3=\cdots=a_n=0, a_0=\pm y_0$, 则得

$$y=\pm y_0\pm a_1x$$

仪表的输入/输出特性曲线是在纵轴上的截距为 $\pm y_0$ 的直线,相当于将仪表的零点迁移到 $\pm y_0$ 处, y_0 也可视为零点漂移量。

(3) 只含奇次方非线性:式(1-5)只含奇次方项,即 $a_0=a_2=a_4=\cdots=0$ 时,则得

$$y=a_1x+a_3x^3+a_5x^5+\cdots$$

仪表的特性曲线在原点附近相当范围内是线性的。

(4) 只含偶次方非线性:在这种情况下, $a_0=a_3=a_5=\cdots=0$, 则得

$$y=a_1x+a_2x^2+a_4x^4+\cdots$$

仪表的输入/输出特性具有严重的非线性。

(5) 普遍情况：见式(1-5)，仪表的输入/输出特性具有按自然数排列的非线性。

2. 静态特性指标

表征仪表静态特性的指标有灵敏度、线性度、滞环误差和重复性四个指标。

(1) 灵敏度 k 。灵敏度是指测量仪表在稳态下，输出的变化量与输入变化量之比，即

$$k = \frac{dy}{dx} \quad (1-6)$$

它是仪表静态特性曲线上各点的斜率。测量仪表的灵敏度可分为三种情况：

① 灵敏度为常数：在整个测量范围内，灵敏度 k 不随被测量的变化而变化，而保持为常数。在这种情况下，式(1-6)可表示为

$$k = \frac{y}{x} = \text{常数}$$

若在整个测量范围内灵敏度为常数，则仪表的静态特性是线性的，指针式仪表标尺的刻度是均匀的。

② 灵敏度随被测量 x 的增大而增大：这种情况下，仪表的静态特性是非线性的，指针式仪表标尺的刻度特性是不均匀的。随着被测量 x 的增加，仪表标尺的刻度将越来越稀疏。

③ 灵敏度随被测量 x 的增大而减小：同样，仪表的静态特性也是非线性的。但是随着被测量 x 的增大，仪表标尺的刻度将越来越密集。

(2) 线性度。线性度是指仪表的实际静态特性曲线偏离其理论拟合直线的程度，通常也用仪表的非线性误差表示。仪表的非线性误差定义为：仪表的实际静态特性曲线与理论拟合直线的最大偏差 Δy_m 与仪表输出满度值 y_m 之比的百分数，如图 1.3(a)所示，即

$$E_1 = \pm \frac{\Delta y_m}{y_m} \times 100\% \quad (1-7)$$

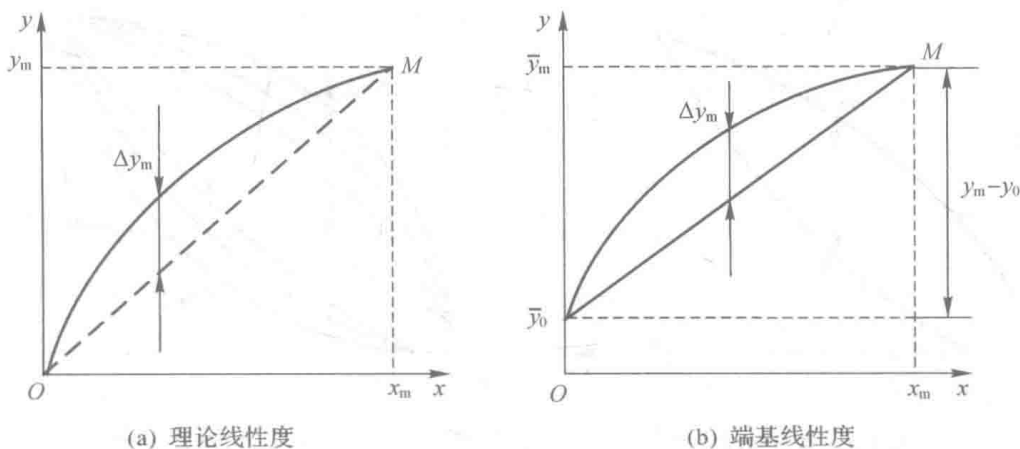


图 1.3 不同理论拟合直线所对应的线性度

由此可见，仪表非线性误差的大小与理论拟合直线有关，对同一条静态特性曲线，若理论拟合直线不同，计算所得的非线性误差会差别很大。因此，在表示线性度或非线性误差时，必须说明其所依据的理论拟合直线。根据理论拟合直线的取得方法，有理论线性度、独立线性度、端基线性度、平均选点线性度和最小二乘法线性度等。

(3) 滞环误差。滞环误差表示仪表的正向(上升)和反向(下降)特性曲线的不一致程

度。当被测量 x 连续增加时仪表的输出量 y_c 与被测量 x 连续减小时仪表的输出量 y_d 之间的偏差称为滞环误差,如图 1.4 所示。滞环误差用在测量范围内产生的最大滞环误差 $\epsilon_{hm} = |y_d - y_c|_m$ 与仪表满度值 y_m 之比的百分数表示,即

$$E_{hm} = \pm \frac{\epsilon_{hm}}{y_m} \times 100\% \tag{1-8}$$

滞环误差主要由仪表内部的弹性元件、磁性元件和机械部件的摩擦、间隙以及积尘等原因而产生。

(4) 重复性。重复性是指仪表在输入量按同一方向作全程连续多次测量时所得到的静态特性曲线的不一致程度,也用重复性误差表示,如图 1.5 所示。若特性曲线一致,则表示重复性好,重复性误差小。

重复性误差用 Δy_m 与满度值 y_m 之比的百分数来表示,即

$$E_z = \pm \frac{\Delta y_m}{y_m} \times 100\% \tag{1-9}$$

其中, Δy_m 为多次正行程测量中各个测量点输出值之间的最大偏差 Δy_{cm} 以及多次反行程测量中各个测量点输出值之间的最大偏差 Δy_{dm} 两者较大的一个。

利用图 1.5 和式(1-9)计算重复性误差的过程比较繁琐,而且精度很低。实际上,仪表的重复性是用测量数据的分散程度来表述的,因此它表征了仪表的精密度。仪表的精密度可以用标准差估计值 $\hat{\sigma}$ 来表示。对于 $\hat{\sigma}$ 的计算可参考 2.3 节。计算出全部 $\hat{\sigma}$ 后,找出其最大值 $\hat{\sigma}_m$,然后取 $(2 \sim 3)\hat{\sigma}_m$ 作为 Δy_m ,利用式(1-9)计算重复性误差,该法计算重复性误差简便、精度高。

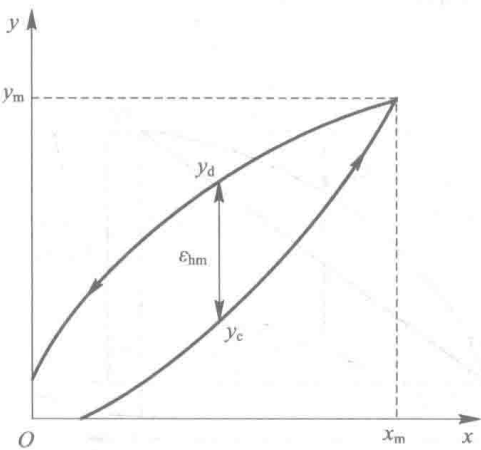


图 1.4 滞环误差

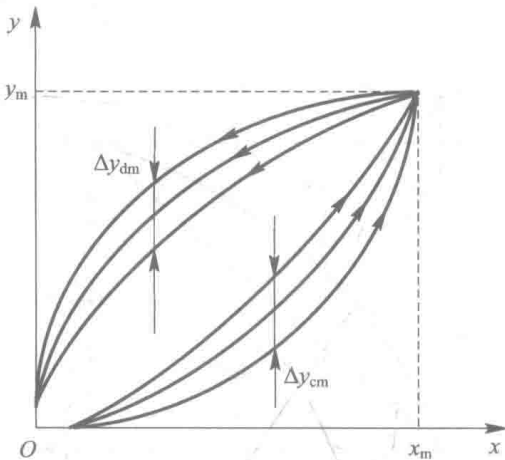


图 1.5 重复性误差

3. 测量仪表的动态特性

在生产过程中,许多被测量是保持恒定的,或者其变化是非常缓慢的。在这种条件下,研究仪表的静态特性就具有重要意义。但是,也有许多被测量随时间的变化非常快,其幅值是时间的函数。当输入量是时间的函数时,仪表的输出量与输入量之间的函数关系称为仪表的动态特性。任何仪表都有时间常数 T_m 和时延 τ_m ,可用一阶或二阶加时延环节的特性来描述仪表的动态特性。因此,当仪表的输入量随时间变化很快时,由于其输出量跟不

上输入量的变化而导致较大的偏差。仪表输出量随时间变化的曲线与输入量随同一时间变化的曲线之偏差称为仪表的动态误差。理论研究和实践表明,由 T_m 和 τ_m 引起仪表的动态误差是比较大的。为提高测量精度,减小动态误差,应根据被测信号的频率选择仪表的动态特性。

在研究仪表的动态特性时,通常使用阶跃变化和正弦变化两种“标准”输入信号,研究仪表的动态响应特性,即使用时域分析法和频率特性分析法。时域法和频率法在前置课程“自动控制原理”中有详细的论述,由于篇幅所限,本书不作介绍,读者可参考有关文献。

1.3 测量方法

1.3.1 概述

测量方法的正确与否十分重要。要根据测量任务提出的精度要求和其他技术指标,认真进行分析和研究,找出切实可行的测量方法,选择合适的测量仪表、仪器或装置,然后进行测量。

测量方法的分类是多种多样的:根据测量时被测量是否随时间变化可分为静态测量和动态测量;根据测量条件可分为等精度测量和非等精度测量;根据测量元件是否与被测介质接触可分为接触式测量和非接触式测量;根据测量性质可分为时域测量、频域测量和数据域测量;根据测量方法可分为直接测量、间接测量和组合测量;根据测量方式可分为直读式测量、零位式测量和微差式测量。下面根据后两种分类方法对测量方法进行研究。

1.3.2 按测量方法分

1. 直接测量

用预先按标准量标定好的仪表对被测量进行测量或用标准量直接与被测量进行比较,从而得出被测量之值的方法称为直接测量。例如,用电流表测量电流、用温度计测量温度等都属于这种测量方法。

直接测量的优点是测量过程简单、迅速,应用比较广泛。

2. 间接测量

用直接测量方法测量几个与被测量有确切函数关系的物理量,然后通过函数关系式求出被测量之值的方法称为间接测量。例如,测量导体的电阻率 ρ , 可以通过测量该导体的电阻 R 和它的长度 L 及其截面积 S , 然后通过下式求电阻率 ρ :

$$\rho = \frac{RS}{L}$$

间接测量法测量手续繁多,花费时间较长,满足下列情况之一者,才进行间接测量:
① 直接测量很不方便,例如直接测量晶体管集电极电流 I_C , 很不方便,可直接测量其集电极电阻 (R_C) 上的电压 U_{RC} , 然后用公式 $I_C = U_{RC}/R_C$ 算出 I_C ; ② 直接测量误差大; ③ 缺乏直接测量仪器; ④ 手头上有多参数综合测试仪,测量手续可以简化等。间接测量法多在实验室中使用,在工程测量中很少使用。