



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANCI CELIANG JISHU

电磁测量 技术

李宝树 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANCI CELIANG JISHU

电磁测量 技术

主 编 李宝树
编 写 贾秀芳 赵书涛
主 审 赵 伟 刘耀年



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electrical Engineering

前 言

测量是人们借助于专门的设备,通过实验的方法,对客观事物进行研究的过程,是人们了解事物从定性到定量的渠道。通过测量,可以把感性认识上升到理性认识,因此测量是人们认识自然、改造自然的重要手段,是认识量的概念不可缺少的过程,在科学实验中占有相当重要的地位。测量技术包括的范围很广,电磁测量技术是其中的一个重要分支,也是重点发展的方向之一。电磁测量技术主要包括三个方面:①仪器仪表的原理及设计;②测量方法;③信号传输。

电磁测量仪器仪表的发展可分为三个阶段。第一阶段为传统电工测量仪表。传统的电工测量仪表从1743年俄国Г·В·黎赫曼制造的第一台验电器开始,到1836年出现了可动线圈式检流计;1837年出现了磁针式检流计;1843年制成了惠斯登电桥;1861年制成了第一台直流电位差计;1895年制成第一台感应系电能表。在这一阶段,库仑定律、安培定律、法拉第电磁感应定律、毕奥-沙伐-拉普拉斯定律和麦克斯韦电磁场理论也都相继建立,为传统电工测量仪表的发展奠定了理论基础。到20世纪30年代,传统的电工测量仪表在理论上已经成熟,结构也基本定型。第二阶段为数字式仪表。由于电子技术的出现,为仪表的发展提供了新的理论和条件。1952年美国研制出第一台数字电压表,在随后的十几年中,各国都在陆续研制数字式仪表,我国于1958年研制出第一台数字电压表。数字式仪表在准确度、信号存储、信号传输等很多方面的优越性是传统仪表无法比拟的。目前,国外生产的数字式仪表中最具有代表性的是英国Datron公司、Solartron公司和美国Fluke、NI公司的产品。第三阶段为微机化仪表。20世纪60年代末,出现了由软件控制测量过程的仪表,这就是微机化仪表。计算机技术使测量仪器呈现出新的活力并取得了长足进步,相继出现了很多高性能的仪表,实现了多变量、多通道综合测量系统,并在工程实践中推广应用。

20世纪80年代末,美国国家仪器公司(NI)率先推出虚拟仪器技术,虚拟仪器改变了仪器仪表的功能和使用由生产厂家定义的传统模式,用户可以按照自己的意愿设计测量系统,以满足多种多样的需求。虚拟仪器的宗旨——软件就是仪器。进入21世纪,测量技术发展的方向是——网络化测量,网络化测量的宗旨——网络就是仪器。目前,网络化测量仍处于实验研究阶段。由于网络技术的迅速发展,不久将会进入推广应用阶段。

本书内容注重理论联系实际,侧重于实用性,并在常用仪器仪表和测量方法的基础上,结合了电气工程领域的特点,增加了一些电磁测量实用新技术和新方法。本书主要作为电气工程及其自动化专业的教材及相关各专业可以根据自己的实际情况对内容进行取舍。书中带“*”的内容为加深或加宽的内容。

本书第一至六章由李宝树教授编写,第七、八章由贾秀芳副教授编写,第九章由赵书涛副教授编写,全书由李宝树教授统稿。清华大学的赵伟教授、东北电力大学刘耀年教授担任

本书主审，赵伟教授对全书提出了很多宝贵的意见和建议，刘耀年教授审阅了本书大纲，在此一并表示感谢。

由于水平所限，书中可能存在不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

2006年10月

目 录

前言

第一章 电磁测量的基本知识	1
第一节 电磁测量的基本概念	1
第二节 仪表和测量方法的分类	8
第三节 测量误差	10
第四节 直读仪表的准确度等级	13
第五节 系统误差的合成与估计	15
第六节 系统误差的消除	16
第七节 测量结果的数据处理	17
第八节 直读仪表测量机构中的力矩	19
习题与思考题	19
第二章 直流电压和电流的测量	22
第一节 用磁电系仪表直接测量	22
第二节 用直流电位差计测量电压	28
第三节 直流电压和电流的间接测量	30
第四节 工程应用实例——直流系统泄漏电流的测量	32
习题与思考题	36
第三章 交流电压和电流的测量	38
第一节 用整流式仪表直接测量	38
第二节 用电磁系仪表直接测量	41
第三节 用电动系仪表直接测量	45
第四节 用静电系仪表测量电压	47
第五节 用交流电位差计测量电压	49
第六节 测量用互感器	51
第七节 交流电压和电流的间接测量	53
第八节 工程应用实例——配电网电容电流的测量	56
习题与思考题	56
第四章 功率和电能的测量	59
第一节 用电动系功率表直接测量单相有功功率	59
第二节 单相有功功率的间接测量	62
第三节 三相功率的测量	65
第四节 电能的测量	71
第四节 工程应用实例——电容型设备介质损耗的测量	75
习题与思考题	76

第五章 直流电阻的测量	80
第一节 中值电阻的测量	80
第二节 低值电阻的测量	92
第三节 高值电阻的测量	99
第四节 网络中电阻的测量	102
第五节 工程应用实例——变压器直流电阻的测量	105
习题与思考题	107
第六章 交流参数的测量	110
第一节 电容的测量	110
第二节 电感的测量	113
第三节 互感的测量	115
第四节 混合参数的测量	118
第五节 工程应用实例——输电线路工频参数的测量	135
习题与思考题	138
第七章 数字测量技术	142
第一节 概述	142
第二节 数字测量的基本单元电路	143
第三节 频率、周期和相位差的测量	154
第四节 电压的测量	157
第五节 功率和电能的测量	161
第六节 元件参数的测量	163
第七节 智能仪表	167
第八节 工程应用实例——电力系统谐波测量仪	174
习题与思考题	177
第八章 虚拟仪器技术	180
第一节 概述	180
第二节 LabVIEW 图形编程	183
第三节 工程应用实例——基于虚拟仪器的电力系统瞬态过电压测量	187
习题与思考题	191
第九章 磁性测量技术	192
第一节 磁性测量的基本知识	192
第二节 空间磁场的测量	195
第三节 铁磁材料静态磁性的测量	204
第四节 铁磁材料动态磁性的测量	208
第五节 工程应用实例——金属管道缺陷的无损漏磁检测	211
习题与思考题	213
参考文献	215

第一章 电磁测量的基本知识

第一节 电磁测量的基本概念

一、表示测量仪表和测量结果性能的参数

1. 灵敏度

仪表输出信号的变化量 $\Delta\alpha$ 与输入信号的变化量 Δx 之比称为仪表的灵敏度, 用 S 表示, 即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-1)$$

灵敏度反映了仪表对被测量的反应程度, 是能引起仪表反应的最小极限, 是表示仪表性能的基本参数之一。对于不同的输入信号, 有不同的灵敏度, 通常有电流灵敏度、电压灵敏度和功率灵敏度。

灵敏度的倒数称为仪表常数, 用 C 表示。

2. 准确度

准确度是指测量仪表的测量结果与被测量的真实值接近的程度。

3. 精密度

精密度是指多次测量时, 各次测量值之间接近的程度, 它是衡量测量仪表在重复测量时质量好坏的参数。显然, 精密度高不一定准确度高。

4. 精确度

精确度是准确度和精密度的综合概括, 是全面衡量测量结果优劣的程度。

5. 不确定度

评价测量结果的质量, 可以用准确度、精密度、精确度等概念表示。除此之外, 国际标准化组织提倡采用不确定度表示测量结果的可信度。

不确定度是测量结果包含的一个参数, 用来表示被测量值可能的分散程度。不确定度越小, 表明测量结果的质量越高。只有量值而没有不确定度的数据不是完整的测量结果, 也就不具备充分的实用价值。不确定度的表示有以下三种方法。

(1) 标准不确定度。用概率分布的标准偏差表示的不确定度称为标准不确定度, 用 u 表示。用统计方法得到的不确定度称为 A 类标准不确定度, 用 u_A 表示; 用非统计方法得到的不确定度称为 B 类标准不确定度, 用 u_B 表示。

(2) 合成标准不确定度。用各不确定度分量合成的标准不确定度称为合成标准不确定度, 用 u_C 表示。这种方法主要用于间接测量, 仍然是标准偏差表示测量结果的分散程度。

(3) 扩展不确定度。用合成标准不确定度的倍数表示的不确定度称为扩展不确定度, 用 U 表示。

6. 稳定度

稳定度是指在规定的条件保持不变的情况下, 测量仪表的性能在一定时间内保持不变的能力。

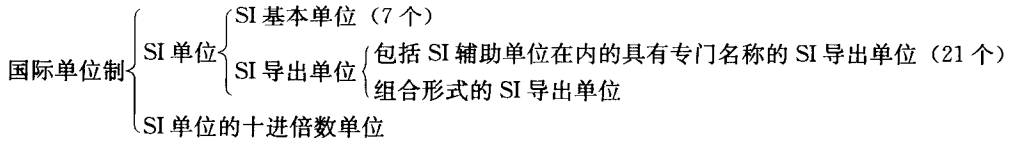
7. 可靠性

可靠性是指测量仪表受外界因素影响时, 测量结果变化的程度。

二、单位制

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、SI 单位的十进倍数单位、SI 的基本单位和导出单位。SI 导出单位由具有专门名称的 (含 SI 辅助单位) 和其他组合形式组成。其构成如下:



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。它们表示的量的名称、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部分 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

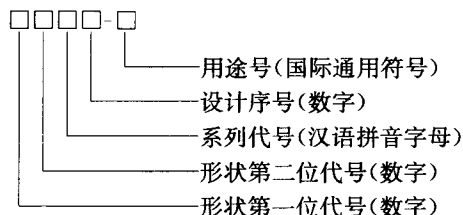
量	单位名称	符号	量	单位名称	符号
平面角	度	°	时间	天	d
	分	'		小时	h
	秒	"		分	min
旋转速度	转/分	r/min	质量	吨	t
土地面积	公顷	hm ²	能	电子伏	ev
体积	升	L	长度	海里	n mile
级差	分贝	dB	线密度	特科斯	tex

在电磁测量中，量值的单位无特殊要求一般采用国际单位制，采用非国际单位时必须按照国家标准执行。

三、仪表的型号

仪表的型号可以反映其用途和工作原理，我国对安装式仪表和便携式仪表的型号分别做了不同的规定。

1. 安装式仪表的型号组成



形状第一位代号：按仪表面板形状最大尺寸编制。

形状第二位代号：按仪表外壳形状尺寸编制。

系列代号：按仪表的工作原理编制。如：C 表示磁电系、T 表示电磁系、D 表示电动系、G 表示感应系、L 表示整流式、Q 表示静电系等。

用途号：按被测量编制。如：V 表示电压表、A 表示电流表、W 表示功率表等。

例如：42C3-A 表示设计序号为 3 的磁电系电流表，形状代号 42 可在产品目录查得其外形尺寸和安装开孔尺寸。

2. 便携式仪表的型号组成

由于便携式仪表不存在安装问题，所以去掉安装式仪表型号中的形状代号，就是便携式仪表的型号。例如：T62-V 表示设计序号为 62 的电磁系电压表。

另外，也有些其他类型的仪表在系列代号前加一个汉语拼音字母表示类别，如 Q 表示电桥、P 表示数字式等。

四、仪表中的符号

在仪表的标度盘上和端钮上有许多符号，它们分别表示了仪表的主要功能和特性，只有识别它们的意义之后，才能正确地选择和使用仪表。表 1-4 列出了常用电工仪表的图形符号及表示的意义。

表 1-4 常用电工仪表的图形符号及表示的意义

分类	符 号	意 义	分类	符 号	意 义
工 作 原 理		磁电系仪表	工 作 位 置		垂直放置
		磁电系比率表			水平放置
		整流式仪表			相对水平面倾斜 45°
		电磁系仪表	准 确 度 等 级	1.0	准确度等级为 1.0 (基准值为量程)
		电磁系比率表			准确度等级为 1.0 (基准值为标尺长度)
		电动系仪表			准确度等级为 1.0 (基准值为指示值)
		电动系比率表	外 界 条 件		防外磁场等级
		铁磁电动系仪表			防外电场等级
		感应系仪表			绝缘经 2kV 耐压试验
		感应系比率表	端 钮	+	正端钮
		静电系仪表		-	负端钮
		动磁系仪表		*	公共端钮
	动磁系比率表			通用接地端钮	
	热电系仪表			保护接地端钮	
电 量 性 质	-	直流表			与外壳相接的端钮
	~	交流表			磁屏蔽端钮
	≈	交直流两用表			电屏蔽端钮
	≈	三相交流表		调零端钮	

五、度量器

度量器是测量单位的复制实体，也称为量具。根据准确度的高低，度量器分为基准器（基准量具）、标准器（标准量具）和工作量具。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，由国际和各国最高计量部门保存；标准器的准确度低于基准器，供地方计量部门和科研单位、大专院校、工厂的计量部门保存，用于对工作量具进行检定；工作量具的准确度低于标准器，用于科研、生产、实验及工程测量。电磁测量中的标准器主要包括标准电池、标准电阻、标准电容和标准电感。

1. 标准电池

标准电池是保存和传递直流电动势单位伏特的标准量具，标准电池的电动势一般为 $1.0185 \sim 1.0195 \text{V}$ 。标准电池是一种化学电池，由硫酸镉溶液和电极构成，根据硫酸镉溶液是否饱和又分为饱和式和不饱和式两种，饱和与不饱和指的是硫酸镉溶液的状态。图 1-1 是两种标准电池的结构示意图。

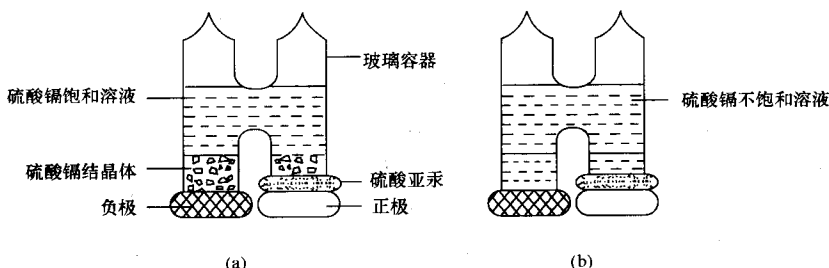


图 1-1 标准电池的结构示意图

(a) 饱和式；(b) 不饱和式

饱和式标准电池可以做成准确度等级较高的标准电池，它的电动势随时间变化引起的变化很小，但随温度变化引起的变化较大，即温度系数大，需要在恒温状态下使用。饱和式标准电池在温度 t 时的电动势为

$$E_t = E_{20} - 39.94 \times 10^{-6}(t - 20) - 0.929 \times 10^{-6}(t - 20)^2 + 0.009 \times 10^{-6}(t - 20)^3 - 0.00006 \times 10^{-6}(t - 20)^4 (\text{V}) \quad (1-2)$$

式中： E_{20} 为温度 $+20^\circ\text{C}$ 时的电动势。

不饱和式标准电池只能做成准确度等级较低的标准电池，它的电动势随时间变化引起的变化较大，但随温度变化引起的变化很小，使用时一般不需要进行随温校正。

使用和保存标准电池应注意以下几个问题：

- (1) 标准电池在 1min 内允许通过的电流很小，一般不超过 $10 \mu\text{A}$ 。
- (2) 饱和式标准电池的电动势在一年内允许的变化值很小，一般只有几十微伏，不饱和式标准电池的电动势变化值较大，一般在 $100 \mu\text{V}$ 以上。
- (3) 使用和存放标准电池地点的温度和湿度应符合标准电池技术特性的要求。
- (4) 标准电池应避开光源、热源、冷源的直接作用。
- (5) 标准电池只能允许通过微小电流，不能让人体同时接触标准电池的正极和负极，绝对不允许用电压表和万用表直接测量标准电池的电动势。
- (6) 标准电池不得倒置、摇晃和震动。

(7) 标准电池的正负极不能反接。

(8) 必须妥善保存标准电池的出厂标定证书, 定期到有关部门进行检定, 并保存历年的检定数据, 因为这是衡量标准电池技术性能的依据。

2. 标准电阻

标准电阻是保存和传递电阻单位欧姆的标准量具, 对标准电阻的要求是准确度高、稳定性好、可靠性强。

标准电阻一般由锰铜材料制成, 如用锰铜丝绕制而成。锰铜具有很高的电阻率和很低的温度系数, 它与铜成偶时的热电动势也很小。通过适当的工艺处理, 采用特殊的绕制方法, 可以制成比较理想的标准电阻。

标准电阻分为直流标准电阻和交流标准电阻, 前者可用于直流测量电路中, 后者用于交流测量电路中。

(1) 直流标准电阻。直流标准电阻又分为定值标准电阻和变值标准电阻(标准电阻箱), 定值标准电阻的阻值一般为 10^n , n 的取值一般在 $-4 \sim +8$ 之间。铭牌上的标称值是指温度在 $+20^\circ\text{C}$ 时的电阻值, 在温度 t 时的阻值为

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2] \quad (1-3)$$

式中: α 、 β 为标准电阻的一次温度系数和二次温度系数。

常见的电阻为两端形式, 如图 1-2 (a) 所示。为了消除接触电阻和引线电阻的影响, 低值标准电阻一般都制成四端形式, 如图 1-2 (b) 所示。图中 C1、C2 为电流端钮, P1、P2 为电压端钮或电位端钮。从端钮的大小上看, 两个大端钮为电流端钮, 两个小端钮为电压端钮; 从端钮的位置上看, 外侧的两个端钮为电流端钮, 内侧的两个端钮为电压端钮。测量时必须保证电流端钮和电压端钮正确接入电路, 否则, 不能消除接触电阻和引线电阻的影响。高值标准电阻一般都制成三端形式, 如图 1-2 (c) 所示。为了消除漏电阻的影响, 增加了一个屏蔽端钮 P, 测量时需要给屏蔽端钮 P 赋以适当的电位。

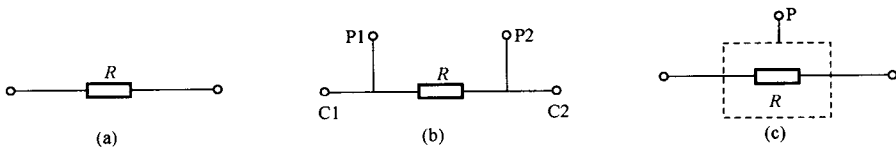


图 1-2 标准电阻

(a) 两端电阻; (b) 四端电阻; (c) 三端电阻

变值标准电阻由若干个定值标准电阻串联构成, 分成 $\times 1000$ 、 $\times 100$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 等多档结构, 各档按十进制进位, 利用转换开关实现对总电阻的调节, 由于转换开关当中存在接触电阻, 因此, 变值标准电阻的准确度低于定值标准电阻。

(2) 交流标准电阻。交流标准电阻一般也是用锰铜丝绕制而成的, 但绕法与直流标准电阻不同, 因为交流标准电阻要考虑电感和电容的效应。为了减小电感和电容的效应, 可以采用双线并绕的方法, 如图 1-3 (a) 所示。由于流入线圈的电流与流出线圈的电流所产生的磁通互相抵消, 减小了电感的效应, 但由于匝间电位差升高, 使匝间电容增大, 因此制作低值标准电阻多采用双线并绕的方法。中值和高值电阻的电感效应和电容效应都比较大, 可以

采用交叉并绕的方法,如图 1-3 (b) 所示。显然这种方法既可以减小电感效应又可以减小电容效应,缺点是材料消耗大、效率低。

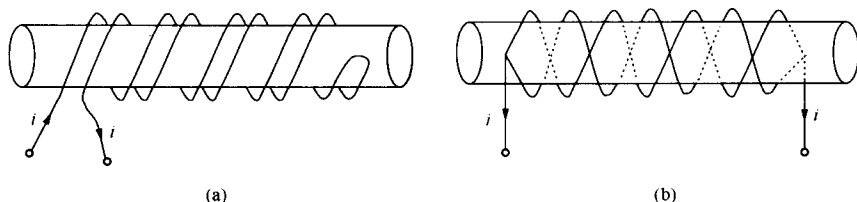


图 1-3 交流标准电阻的绕制方法

(a) 双线并绕; (b) 交叉并绕

保存和使用标准电阻应注意以下几个问题:

- (1) 标准电阻应在规定的技术条件下使用,如温度、湿度等。
- (2) 避免强烈振动,否则会导致电阻变形,引起电阻值的变化。
- (3) 不得超过额定功率。
- (4) 注意交流标准电阻的适应频率范围。

3. 标准电容

标准电容是保存和传递电容单位法拉的标准量具,对标准电容的要求是准确度高、稳定性好、线性度好、损耗因数小。

损耗因数是衡量电容性能的重要参数之一。由于介质的不理想,造成漏电阻的存在,使电流和电压的相位差小于 90° ,理想电流和实际电流的相位差为 δ ,通常用 $\text{tg}\delta$ 描述电容的介质损耗,称为损耗因数,其表达式为

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega RC} \quad (1-4)$$

式中: R 为电容的等值并联漏电阻。

在制作标准电容时,除要求介质损耗小以外,还要求介质的膨胀系数尽量小;否则,极板间距的变化会引起电容值的较大变化。

由于电容器两个极板对地存在杂散电容,而且杂散电容的大小受周围物体、环境温度、湿度等因素的影响,导致标准电容的准确度降低。因此,标准电容通常做成三端形式,给两端电容加一个屏蔽罩,从屏蔽罩引出第三端即屏蔽端,如图 1-4 所示。使用时将屏蔽端赋以适当的电位,可以消除杂散电容的影响。

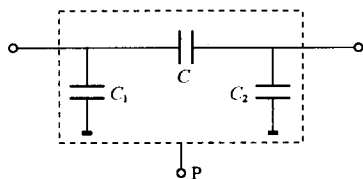


图 1-4 标准电容的等值电路

保存和使用标准电容应注意以下几个问题:

- (1) 应在规定的技术条件下使用,如温度、湿度等。
- (2) 正确赋以屏蔽端电位。
- (3) 不得超过额定电压。
- (4) 注意引线电容带来的误差。

4. 标准电感

标准电感是保存和传递电感单位亨利的标准量具,标准电感包括标准自感和标准互感。对标准电感的要求是准确度高、稳定性好、线性度好、品质因数高。

品质因数是衡量电感性能的重要参数之一。由于电感线圈中存在等值电阻，而这个电阻又不能消除，所以用品质因数 Q 表示其电感效应，它是感抗与等值电阻的比值，即

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1-5)$$

式中： R 为电感线圈的等值电阻。

在制作标准电感时，除要求等值电阻小以外，还要求骨架材料绝缘性能好、膨胀系数小。

保存和使用标准电感应注意以下几个问题：

- (1) 标准电感应规定的技术条件下使用，如温度、湿度等。
- (2) 不得超过额定电流。
- (3) 注意适应频率范围。
- (4) 远离铁磁及金属物体。

第二节 仪表和测量方法的分类

一、仪表的分类

测量过程中使用的仪表很多，为便于掌握，现将其进行分类。从不同的角度考虑，有不同的分类方法。例如，根据被测量的种类的不同进行分类，可分为电压表、电流表、功率表、电能表、频率表、相位表、电阻表等；根据被测量是否随时间的变化而变化，可分为直流表、交流表和交直流两用表；根据使用方式可分为便携式、安装式等。常用的分类方法是根据仪表的测量方式进行分类，可分为直读式仪表和比较式仪表。

1. 直读式仪表

被测量通过仪表的测量电路和测量机构，直接反映在仪表的指示机构上。这种仪表称为直读式仪表。它本身不包含标准量，而是事先与标准量比较再进行刻度，如电压表、电流表等。直读式仪表具有使用方便、造价低、测量省时等优点，缺点是准确度较低。根据工作原理不同，直读式仪表还可以分为磁电系、电磁系、电动系、静电系、感应系等。

2. 比较式仪表

用标准量与被测量直接进行比较而获得测量结果，这种仪表称为比较式仪表。显然，比较式仪表本身必须包含标准量，电桥、电位差计都属于此类仪表。比较式仪表的优点是准确度高，缺点是造价高、测量费时。

对被测量进行测量之前，必须根据工程需要对仪表进行选择，仪表的选择非常重要，如果选择的仪表不合适，测量结果的误差可能很大，甚至没有意义。即使是同一种类的仪表，它们的特性也有很大差异。比如，两只工作原理相同的仪表，它们的准确度等级、内阻、量程等可能都不同。因此，在实际测量时，要根据具体情况选择合适的仪表。

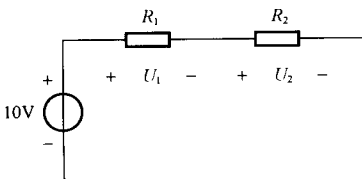


图 1-5 [例 1-1] 图

【例 1-1】 如图 1-5 所示电阻分压电路，已知 $R_1 = R_2 = 1\text{k}\Omega$ ，用某电压表分别测量 R_1 两端的电压 U_1 和 R_2 两端的电压 U_2 ，发现两电压均小于 5V，二者相加不等于电源

电压，为什么？

解：从理论上讲， U_1 和 U_2 两电压都应该等于 5V，但由于 R_1 和 R_2 两个电阻的阻值比较高，当测量 U_1 时，电压表的内阻与 R_1 并联的等效电阻小于 R_1 ，使得 U_1 小于 5V，说明电压表的内阻太低。同理，测量 U_2 时也是如此。当然，若使 U_1 和 U_2 的测量值等于 5V，除非电压表的内阻等于无穷大，但这是不可能的，一般要求电压表的内阻引起的误差在允许的误差范围之内即可。

二、测量方法的分类

对测量方法进行分类，也有不同的分类方法。例如，根据被测量是否随时间的变化而变化进行分类，可以分为静态测量和动态测量；根据使用的仪表类别不同，可分为直读测量和比较测量。常用的方法是根据测量结果得出的不同方式进行分类，可分为直接测量、间接测量和组合测量。

1. 直接测量

测量结果从仪表的指示机构一次直接获得，称为直接测量。采用这种测量方法，可以使用量具进行测量，也可以使用按相应单位刻度的仪表进行测量。例如，用电流表测量电流、用电阻表测量电阻等。

2. 间接测量

先对与被测量有关的物理量进行直接测量，然后根据它们之间的函数关系通过计算求出被测量，称为间接测量。例如，通过测量电阻两端的电压和通过电阻的电流，根据欧姆定律，可以算出被测电阻的阻值。

显然，间接测量要比直接测量复杂，一般情况下应尽量采用直接测量，只有在下列情况才选择间接测量。

- (1) 不能直接测量。
- (2) 直接测量的条件不具备。
- (3) 间接测量的结果比直接测量更准确。

3. 组合测量

在测量过程中，需要改变测量条件进行多次测量，根据直接测量和间接测量的结果，解联立方程组求出被测量，称为组合测量。例如，测量电阻 R 的温度系数 α 和 β ，根据电阻在温度 t 时的阻值与温度系数的关系式 (1-3)，通过分别测量 R 在温度 t_1 和 t_2 状态下的电阻值 R_{t1} 和 R_{t2} ，然后解方程组

$$\begin{cases} R_{t1} = R_{20}[1 + \alpha(t_1 - 20) + \beta(t_1 - 20)^2] & (1-6) \\ R_{t2} = R_{20}[1 + \alpha(t_2 - 20) + \beta(t_2 - 20)^2] & (1-7) \end{cases}$$

可以求出 α 和 β 。

测量方法的选择与仪表的选择同等重要，即使在同一种类的测量方法当中，仍有很多具体的测量方法。同样，在实际测量时，要根据具体情况选择合适的测量方法。

【例 1-2】 若用电压表和电流表间接测量某电阻 R ，有电流表前接和电流表后接两种方法可以选择，如图 1-6 所示，如何选择正确的测量方法。

解：在图 1-6 (a) 中，电压表测得的电压是电阻两端的电压，但电流表测得电流不是流过电阻 R 的电流，因此，希望流过电压表的电流在总电流中占的比例越小越好，换言之，流过电阻的电流在总电流中占的比例越大越好。在电压表的内阻不变的情况下，希望 R 尽量小。所以，

该方法适应于被测电阻较小的情况。在图 1-6 (b) 中, 电流表测得的电流是流过电阻的电流, 但电压表测得的电压不是电阻两端的电压, 因此, 希望电阻两端的电压在总电压中占的比例越大越好, 所以, 这种方法适应于被测电阻较大的情况。

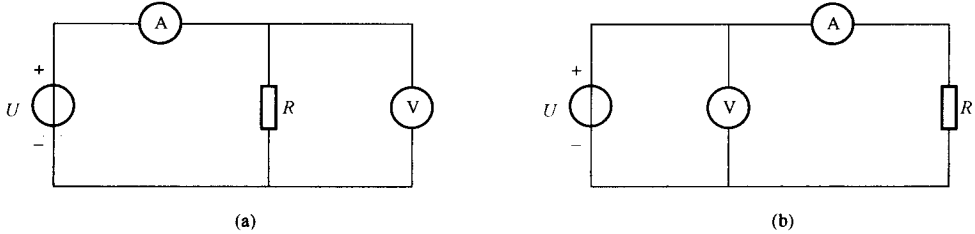


图 1-6 [例 1-2] 的电路

(a) 电流表前接, 电压表后接; (b) 电流表后接, 电压表前接

第三节 测量误差

在测量过程中, 由于仪表的不准确、工作条件的不同、测量方法的缺陷等各种因素, 都会使测量结果产生误差, 要尽量消除或减小这些误差, 使测量结果尽可能与实际值接近, 但同时也要考虑测量的经济性、可靠性、复杂性等因素, 特别是在工程应用中, 不要片面地追求测量结果的最佳值, 只要满足技术要求即可。

一、误差的分类

从不同的角度分析误差有不同的分类方法, 如按照产生误差的来源可分为工具误差和方法误差。工具误差是指测量仪表不完善引起的误差; 方法误差是指测量方法不完善引起的误差。按照测量仪表的工作条件可分为基本误差和附加误差, 基本误差是指测量仪表在规定工作条件下使用时产生的误差, 附加误差是指测量仪表在偏离规定工作条件下使用时产生的误差。通常按照误差的性质分类, 可分为系统误差、偶然误差和疏失误差。

1. 系统误差 (规律误差)

在一定的测量条件下, 误差的大小和符号保持恒定或按照某种已知的函数规律变化, 这种误差称为系统误差。产生系统误差的原因有以下几个方面。

- (1) 仪表本身不完善, 如刻度不准确、本身功耗的影响等。
- (2) 测量方法不当, 如接线不合理、理论依据不严密等。
- (3) 使用不当, 如仪表放置方向不正确、未经调零等。
- (4) 人身的影响, 如视觉缺陷、读数时人体位置不当等。
- (5) 环境条件的影响, 如温度、湿度的改变, 电场、磁场的干扰等。

系统误差是客观存在的, 但有一定规律, 可以采取必要的措施, 将其消除或减小。

2. 偶然误差 (随机误差)

在一定的测量条件下, 多次测量同一个量, 误差的大小和符号不定, 不存在已知的变化规律, 也不可预知, 这种误差称为偶然误差。产生偶然误差的原因主要是电源电压或频率不规则波动和环境条件的瞬态变化。

偶然误差只有在多次重复测量时才会发现, 它和系统误差有着本质的区别, 系统误差表示必然性, 偶然误差表示可能性。当在同一测量条件下, 对某一被测量进行多次测量时, 系

统误差的规律不变，而偶然误差不存在重复性规律，但具备以下特征。

- (1) 有界性：偶然误差的绝对值不超过一定范围。
- (2) 单峰性：偶然误差的绝对值从小到大出现的概率越来越小。
- (3) 对称性：测量次数足够多时，绝对值相等的正误差和负误差出现的概率基本相等。
- (4) 抵偿性：测量次数无限增加时，所有误差的代数和趋于零。

理论和实践证明，偶然误差与出现的概率密度呈正态分布规律，如图 1-7 所示。

偶然误差不能用实验的方法消除或减小，只能用概率统计的方法处理。从图 1-7 可以看出，当测量次数无限增加时，偶然误差的算术平均值等于零，即

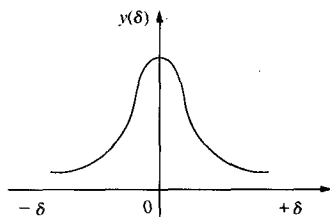


图 1-7 偶然误差的分布

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = 0 \quad (1-8)$$

因此

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \bar{X} = A \quad (1-9)$$

所以，工程上常采用对被测量进行多次重复测量取其算术平均值作为测量结果，以消除可能存在的偶然误差。

3. 疏失误差（粗大误差）

测量结果与实际值明显不符所对应的误差称为疏失误差。产生这种误差的原因主要是读错数或记错数、计算错误、仪表出现故障等。处理疏失误差时，将其对应的测量值一律删去。

为了更直观地说明以上三种误差的性质，下面以打靶为例进行分析。图 1-8 给出了可能出现的三种情况。图 1-8 (a) 中的弹着点均偏离一个方向，有一定的规律，说明存在系统误差，虽然弹着点比较集中，但没有集中于一点，说明也存在偶然误差，但偶然误差较小，即精密度较高；图 1-8 (b) 中的弹着点比较分散，没有一定的规律，说明存在偶然误差，不存在系统误差；图 1-8 (c) 中的弹着点 M 在靶外，严重偏离靶心，说明存在疏失误差。

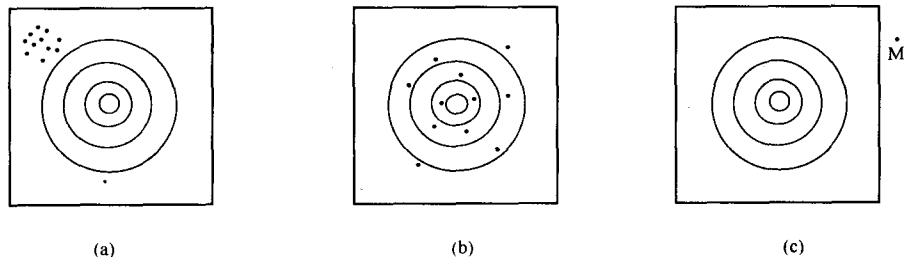


图 1-8 用弹着点分布说明三种误差的性质

(a) 存在系统误差；(b) 存在偶然误差；(c) 存在疏失误差

二、系统误差的表示

1. 绝对误差

被测量的测量值 X 与实际值 A 之差称为绝对误差，用 Δ 表示，即