电子仪表原理与应用

萧家源　编著
聂凤仁　校

科学出版社
www.sciencep.com

电子仪表原理与应用

萧家源　编著
聂凤仁　校

科学出版社
北京

图字：01-2005-1328 号

内 容 简 介

电子仪表在电子技术高速发展的今天起着越来越重要的作用。本书由基本原理入手，结合大量实例，向读者由浅入深地介绍电子仪表的基本知识，提高读者对各种电子仪器的实际操作能力。全书共分十章，分别介绍测量的基础知识、直流与交流指示仪表、示波器、信号发生器、直流电源供应器、信号分析仪表、数字仪表、电桥式仪表及向量仪表、自动测试系统以及仪表的发展和未来趋势等方面。在每章后还附有习题，帮助读者抓住重点，温故知新。

本书不需要读者具有高深的数学知识，只要具备基本电路理论与电子学的基本知识就可以轻松学习。本书适合大专院校仪器仪表、电子、自动化等专业的学生、广大家电维修等经常用到电子仪表的行业的从业人员以及广大的电子爱好者参考学习。

图书在版编目(CIP)数据

电子仪表原理与应用/萧家源编著；聂凤仁校. —北京：科学出版社，2005

ISBN 7-03-015002-3

Ⅰ.电… Ⅱ.①萧…②聂… Ⅲ.①电工仪表-应用 Ⅳ.TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 010086 号

责任编辑：肖京涛 崔炳哲/ 责任制作：魏 谨

责任印制：刘士平 / 封面制作：萧 萧

北京东方科龙图文有限公司 制作

http://www.okbook.com.cn

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 7 月第 一 版 开本：B5(720×1000)

2005 年 7 月第一次印刷 印张：15 1/2

印数：1—5 000 字数：295 000

定 价：28.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈新欣〉)

萧家源：电子仪表
ISBN：957-21-3720-4
全华科技图书股份有限公司
原著于 2004 年 3 月出版发行

本书中文简体字版由台湾全华科技图书股份有限公司授权科学出版社独家出版，仅限于中国大陆地区出版发行，不含台湾、香港、澳门。
未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。
本书封底贴有全华科技图书股份有限公司防伪标签，无标签者不得销售。

前言

随着电子技术的迅速发展，电子仪表在近几年来有着显著的进步，它除了应用在研究机构及实验室外，还广泛地使用在工程、医学等其他领域，是科研人员、工程师及技术人员在工作中不可缺少的工具。

本书共分十章，分别对直流与交流指示仪表、示波器、信号发生器、直流电源供应器信号分析仪表、数字仪表、电桥式仪表、向量仪表、自动测试系统以及仪表的发展及未来趋势做了介绍。本书适合仪器仪表、电子、自动化等专业的高职高专学生学习，也可供广大电子爱好者学习、参考。读者只需具备基本电路理论与电子学的知识，并不需要有高深的数学知识，便能胜任愉快的研读。

本书将各种仪表依其基本工作原理、电路结构、操作及应用以循序的方式进行编写。每一种仪表结合实际的例子，说明其电路动作原理，正确的操作方法及各种应用。

本书所述仪表的构造图片及原理方块图案，大部分由台湾地区及其他地区的仪表厂商或仪表杂志所提供，特此致谢。在原理说明中，凡涉及理论公式与计算，均极详尽，并附例题加以重点说明，使读者能深切了解，进而加深对仪表的认识。

本书各章均备有习题，供学生练习，从而使所学能夠融会贯通，以期理论与实用相配合。

本书虽审慎编写，细心校订，但疏漏之处在所难免，望各位读者不吝指正。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目 录

第1章 导 论 1

1.1 测量的意义 1
1.2 单 位 1
1.3 标 准 3
1.4 测量方法 7
1.5 误差的种类及校正 8
1.6 正则统计分析 9
1.7 准确度 12
1.8 精密度与有效数字 12
1.9 灵敏度与分辨力 14
习 题 15

第2章 直流与交流指示仪表 16

2.1 直流电表基本结构 16
2.2 直流电流表 20
2.3 直流电压表 22
2.4 电压表灵敏度 23
2.5 负载效应 23
2.6 整流式交流电压表 24
2.7 欧姆表 26
2.8 万用表使用法 29
2.9 交流指示仪表 39
2.10 电子电压表 43
2.11 *RLC* 电表 53
2.12 晶体管测试仪 56
习 题 58

第 3 章 示波器 60

3.1 基本示波器方块图 60
3.2 阴极射线管 61
3.3 垂直电路 68
3.4 同步与扫描电路 73
3.5 探 棒 85
3.6 采样示波器 89
3.7 存储示波器 91
3.8 *X-Y* 示波器 93
3.9 示波器的应用 94
3.10 新型示波器及其应用 104
习 题 107

第 4 章 信号发生器 109

4.1 音频发生器 109
4.2 函数发生器 115
4.3 函数发生器的电路方块图 119
4.4 脉冲发生器 119
4.5 频率合成器 125
4.6 FM/AM 信号发生器 126
4.7 扫描标志发生器 128
4.8 图形发生器 131
习 题 135

第 5 章 直流电源供应器 136

5.1 可调双电源供应器 136
5.2 数字式及可编程直流电源供应器 141
5.3 单组及多组输出直流电源供应器 142
习 题 142

第 6 章 信号分析仪表 143

6.1 波形分析仪 144

6.2 失真表 145
6.3 频谱分析仪 147
6.4 曲线描绘仪 151
6.5 记录仪 154
习 题 159

第 7 章 数字仪表 161

7.1 概 述 161
7.2 数字量测与误差 162
7.3 通用计数器 168
7.4 数字电压表 169
7.5 数字电压表的应用 172
7.6 数字万用表 175
7.7 逻辑分析仪 177
习 题 181

第 8 章 电桥式仪表及向量仪表 183

8.1 比较测量的意义 183
8.2 电位差计 183
8.3 惠斯通电桥 186
8.4 开尔文电桥 190
8.5 交流电桥 192
8.6 各种交流电桥测量仪器的原理与应用 193
8.7 阻抗电桥 199
8.8 Q 表 200
8.9 向量阻抗电表 205
8.10 向量电压表 209
习 题 212

第 9 章 自动测试系统 214

9.1 资料搜集系统 214
9.2 界面总线 215
9.3 自动测试系统简介 219
习 题 222

第 10 章　仪表的发展及未来趋势　223

10.1　仪表的发展现况　223
10.2　仪表未来发展趋势　224
习　题　225

附　　录　226

一、物理量与 SI 单位　226
二、国际标准基本单位与导出单位　227
三、仪表相关网站　229

参考文献　235

第1章 导 论

1.1 测量的意义

自然科学的研究与测量两者间的关系是密不可分的。在科学史上，常因理论值与经由精确测量的实验值间的微小差异，导致新颖和更广泛的理论发展。由于科学的新发现而产生新的测量方法，新测量方法的发现，使科学家得以揭示更多的宇宙奥秘而导出更多的物理定律。如法拉第（Faraday)由实验建立其电磁感应定律，库仑(Coulomb)由实验建立其平方反比定律。

工程师可应用科学上的发现，来制造种种节省人力的机械，以促进我们的生产力的发展，增加我们的机动性，提高我们的生存能力，从而形成一个生活舒适与经济富裕的社会。

仪器与测量在目前这个工业社会中愈来愈重要，由于大多数的物理量都能借助转换器改变为电量，之后便可以使用电子仪表加以测量。测量的结果可直接显示出来，或是加以记录以供分析，或者把所得的资料反馈，再来控制原输入系统的功能，从而构成一个自动程序控制系统。所以电子仪表的应用非常广泛，它不仅能应用于科学研究上，而且也应用于所有的工程学或医学上。因此，是任何实验室、研究机构或各种的生产单位所不可缺少的工具。

1.2 单 位

单位是用来表示测量数值的性质与大小，对各种物理量的基本量予以明确定义的，如果没有单位，则测量数值就没有实质的意义。单位为每一种类的物理量的测量标准，常分为基本单位与导出单位。基本单位是独立的，不能以其他的物理量来定义，基本单位的数目，是对所有的物理量有一致和明确的描述时，所需的最少数目。在物理学中常把长度、时间和质量作为基本量，则其单位即为基本单位。可以用基本单位来表示的单位称为导出单位，如面积、加速度等的单位是导出单位。

到现在为止实用的各种单位系统已由国际度量衡组织加以统一而成为 SI 单位系统(国际单位系统)(system international units)，此系统依米-千克-秒(MKS)制，导出实用的单位系统，而有七个基本单位与二个辅助单位，由这些基本单位将可导出组合的单位，也称为导出单位。表 1.1 为 SI 的基本单位，表 1.2 为 SI

的辅助单位，表 1.3 为 SI 单位的 10 的整数值次方作为 SI 单位的词头，表 1.4 为实用电学单位的定义。现有物理量与其相对的 SI 导出单位或组合单位请见书末附录一的附表 1 与附表 2。

表 1.1 SI 基本单位

量	单位的名称	符 号	定 义
长度	米	m	1 米是光在真空中经过一秒所行进距离的 299 792 458 分之一
质量	千克	kg	1 千克是直径、高度均为 39mm 的白金与铱合金制成的圆柱型国际原器的质量
时间	秒	s	1 秒是由铯(cesium)133 原子频率标准器所得到的，是铯 133 原子在基态的两个超微细能级间跃迁的辐射周期的 9 192 631 770倍所持续的时间
电流	安[培]	A	1 安[培]是在真空中相距一(米)的两根截面积极小的无限长平行导线的载流导体，当其一(米)长的导线之间能产生 2×10^{-7} 牛[顿]排斥力时的电流量
热力学温度	开[尔文]	K	1 开[尔文]是水的三相点(水、冰、水蒸气共存状态)的热力学温度的 273.16 分之 1 的温度
物质的量	摩[尔](mole)	mol	1 摩[尔]是与 0.012kg 的碳 12 所拥有的原子数相等的构成元素(原子、分子、离子与电子等粒子或这类粒子的特定集合体)所含的基本单元数
发光强度	坎[德拉](candela)	cd	1 坎[德拉]是以频率为 540×10^{12} Hz 的单色光定向照射在一个球面度的辐射强度为 683 分之 1 瓦[特]时光源所辐射的发光强度

表 1.2 SI 辅助单位

量	单位名称	符 号	定 义
平面角	弧度	rad	在圆周上取与半径等长的弧长所对应的圆心角即为一个弧度，或称为弧度
立体角	球面度	sr	以球心为顶点，向球半径处的球面取边长为半径的正方形面积所对应的球面角为一个球面度

表 1.3 SI 词头

SI 词头		符 号	SI 词头		符 号
Xa(艾)	10^{18}	E	Deci	10^{-1}	d
Peta	10^{15}	P	centi	10^{-2}	c
Teta	10^{12}	T	Milli	10^{-3}	m
Giga	10^{9}	G	Micro	10^{-6}	μ
Mega	10^{6}	M	Nano	10^{-9}	n
Kilo	10^{3}	k	Pico	10^{-12}	p
Hecto	10^{2}	h	Femto	10^{-15}	f
Deca	10^{1}	da	Atto	10^{-18}	a

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

表 1.4 SI 实用电学单位的定义

量	单 位	符 号	定 义
电流	安[培]	A	1 安[培]是在真空中相距 1 米的两根无限长、无限细的平行载流导体，取其 1 米长的部分能产生 2×10^{-7} 牛[顿]的力所对应的电流；在交流时，指其瞬时值的平方在 1 周期内平均值的平方根与上述功能相当的电流，也称为均方根值
电压	伏[特]	V	1 伏[特]指以 1 安[培]的定电流流经导体的两点间消耗 1 瓦[特]功率时，此两点间的电压，交流时是指其瞬时值的均方根值与直流等效者
电阻	欧[姆]	Ω	当 1 安[培]的电流流过电阻时，在其两端产生 1 伏[特]的电压降，则此两点间的电阻值即为 1 欧[姆]
电荷	库[仑]	C	1 库[仑]是 1 安[培]电流在 1 秒钟所运送的电量
电容量	法[拉]	F	1 法[拉]是以 1 库[仑]电荷充电能产生 1 伏[特]电压的电容量
电感	亨[利]	H	1 亨[利](H)是相当于每秒 1 安[培]变化量在封闭的电感上所感应的电动势为 1 伏[特]的电感量
磁通	韦[伯]	Wb	1 韦[伯]是相当于 1 匝绕组中的交链磁路于 1 秒内均匀减少到消失时，在线圈所感应电动势为 1 伏[特]时的磁通
功率	瓦[特]	W	1 瓦[特](W)是相当于每秒产生 1 焦[耳]能量的功率

1.3 标 准

1.3.1 标准的分类

在实际测量时所采用的单位，必须有一定的标准来作为测量的参考，这样在不同的地方所作的测量才能相互比较，若没有标准时每个人所测量的值，将因基准不同而显得毫无意义。早期的标准都为物质标准，但物质标准会因时而异，且无法保证永久不变形，亦有可能遭到破坏或遗失，故目前的标准采用原子标准，因其有较高的准确度，且所有同种类的原子均相同，故其特性不变，而原子的取得亦非常容易，所以现在秒与米两种基本单位是用原子标准定出而不采用原来的物质标准。物质标准的缺点使我们不能把它们作为国际标准，但是它们仍然可以作为较次级的标准用。

标准依其功能与应用可划分为国际标准(international standard)、一级标准(primary standard)、二级标准(secondary standard)及工作标准(working standard)。国际标准属于标准原器的维持，常以绝对测量的方法来建立，存放于国际度量衡局，只与各国的国家实验室的一级标准作比较。一级标准又称为国家标准，存放于各国的国家实验室内，如美国的国家标准局(NBS)负责北美地区的标准的校正，英国的 NPL、德国 PTR、日本的 ETL 等国家实验室负责该国及地区的标准的校正，一级标准具有与国际标准的要求相同的准确度。为求国际上的单位统一，各国的一级标准与国际局的国际标准须常年施行国际比较，再由国际比

较表明各国间的差值，综合各国绝对测量的结果，施行单位修正。二级标准保存于较具规模的工业机构内的标准实验室，负责校准本身与该区域内的工作标准。二级标准须定期地送往国家实验室，接受一级标准的校正与比较。工作标准又称为三级标准，用以校正一般实验室的仪表，生产工厂的测试装备。表 1.5 所示为美国国家标准局(NBS)的各级电量标准的准确度。

表 1.5 NBS 各级电量标准的准确度

	一级标准	二级标准	三级标准
电 阻	1Ω～100kΩ 1MΩ 1～7ppm 10ppm	10Ω～12MΩ 0.02%	100Ω～12MΩ 0.1%
直流电压	0～1200V 5～10ppm	0～1200V 10～20ppm	0～1200V 0.02%
交流电压	0～1200V (10Hz～1.2MHz) 0.01%	1mV～1200V (10Hz～1.2MHz) 0.02～0.05%	1mV～1200V (10Hz～100kHz) 0.2%
直流电流	0～10A 0.02%	0～10A 0.1%	0～2A 0.3%
交流电流	2.5mA～20A (5Hz～100kHz) 0.03%	0～10A (5Hz～20kHz) 0.05%	0～2A (10Hz～100kHz) 0.5%
频 率	10Hz～1000MHz 1×10^{-11}	10Hz～1000MHz 2×10^{-9}	10Hz～1000MHz 5×10^{-7}

注：ppm 是 parts per million 的简称(1 pmm=10^{-6})。

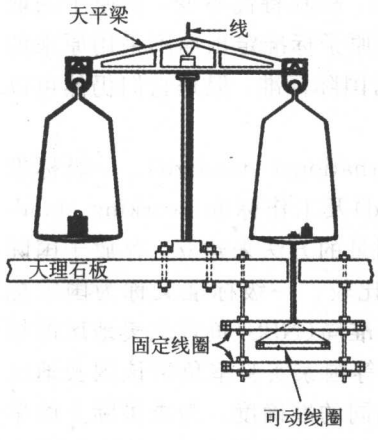

图 1.1 电流天平

1.3.2 电流的绝对测量

电量的单位是以电流的基本单位安培为起点，由此推导出各种单位，安[培]是由两根平行导线间的作用力来定义的。电流的绝对测量可用电流天平来实现，图 1.1 所示为美国国家标准局用的电流天平，有一对固定线圈固定于桌上，里面的可动线圈悬挂于天平臂的一端，并由天平的另一端放置砝码以取得平衡。将三个线圈串联而流过待测电流时，线圈间的相互作用力将破坏原有的平衡状态，则可借助加减砝码使其恢复平衡，而从砝码的变化量来求得电流的作用力。可动线圈所产生的电流作用力与线

圈的形状尺寸大小及流过的电流间的关系式，可表示为

$$f=KI^2(\mathrm{N}) \tag{1.1}$$

式中，I 为待测电流，单位为 A；K 为一比例常数，由线圈的形状尺寸大小而定。

天平在平衡状态下时可由下式表示：

$$mg=KI^2 \text{ 或 } I=\sqrt{\frac{mg}{K}} \tag{1.2}$$

式中，m 为变动的砝码质量，单位为 kg；g 为重力加速度，单位为 $9.8\mathrm{m/s^2}$。

以绝对测量法所定出的绝对安培为 SI 制中电流的基本单位，并为世界各国所接受。但是绝对测量的手续非常复杂，而且费用高昂，所以目前世界各国大都采用数只标准电池与标准电阻器，依欧姆定律 $I=E/R$，而在长时期内维持一高精密度的安培值。此种标准原器要求良好的特性与长期稳定性，故须保管于精密恒温控制的油槽内，并且须经常借助绝对测量及国际比较，以维持标准值恒定不变。

1.3.3 电阻的标准

在国际标准实验室与 NBS 等国家标准实验室皆存有一组一级标准(primary standard)电阻器(1Ω 标准电阻器)，标准电阻器截面图如图 1.2 所示，为一具有低温度系数的锰铜线以双向绕制而成的无感电阻，存放于双层的密封容器内，可避免受到湿度的影响，以及线材的氧化与腐蚀等作用而造成电阻的变化。使用标准电阻器时，为避免引线与端子间接触电阻的影响，所以须形成四端电阻的连接，如图 1.3 所示，电流通过的电流端子在外侧，取出电位差的电压端子位于内侧。若拥有一组(4～10 只)1Ω 标准电阻器，则可获得高稳定度的电阻单位，每年的变化率小于 10^{-6}。

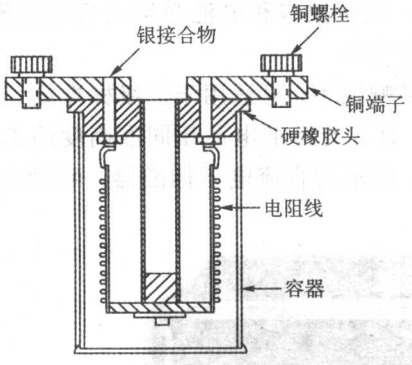

图 1.2 标准电阻器截面图

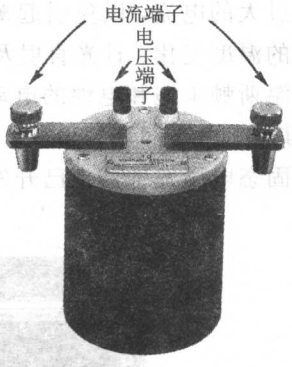

图 1.3 标准电阻器外型

1.3.4 电压的标准

电压的一级标准选定为温斯顿饱和电池，如图 1.4 所示，具有一汞制的正电

极与镉汞合金的负电极，电解液为硫酸镉溶液，是一种中性饱和型镉电池。温斯顿饱和电池在温度为 t℃时的电动势可表示为

$$E_t = E_{20℃} - 4.6\times10^{-5}(t-20) - 0.95\times10^{-6}(t-20)^2 + 1\times10^{-8}(t-20)^3 \quad (V) \tag{1.3}$$

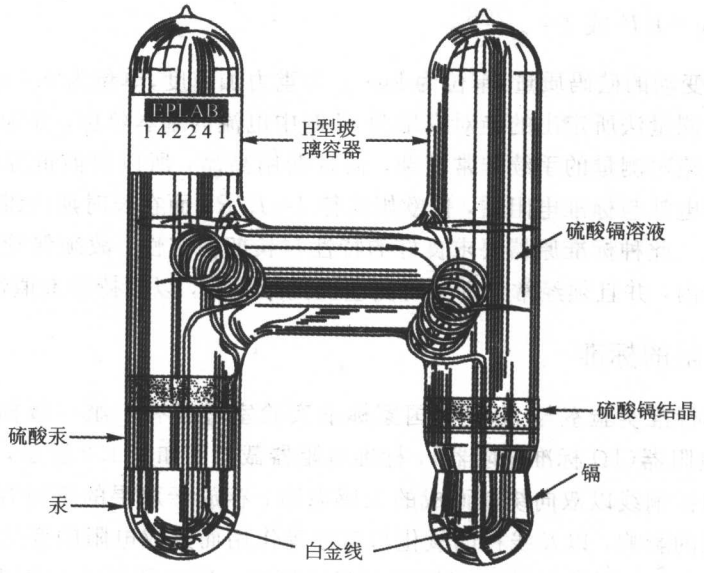

图 1.4 温斯顿饱和电池

温斯顿饱和电池的电压在 20℃时为 1.018 58V(绝对的)，须储存于油槽中以控制其温度在 0.1℃的偏差内。这种电池具有数百欧[姆]的内阻，故不能从电池取用过大的电流，以免引起测试上的误差。温斯顿饱和电池必须注意避免振动、激烈的温度变化、日光直射及 X 射线的照射等。

温斯顿未饱和电池的电动势受温度的影响较小，可适用于二级标准或工作标准，其电动势在 1.018 0～1.020 0V 之间。具有与标准电池相同准确度的工作标准的固态电压发生器也已开发出来，图 1.5 所示为直流电压标准器，可输出六位

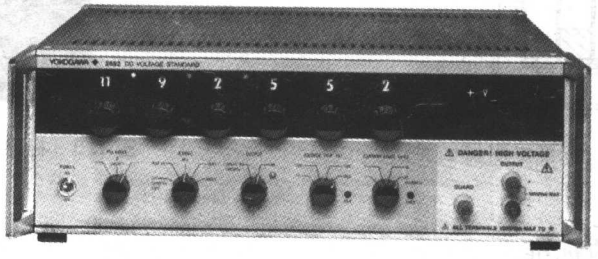

图 1.5 DC 电压标准器(YEW 2552)

有效数字的标准参考电压，准确度达±0.005%，使用上可很容易地取得大小不一的电压标准。

1.4 测量方法

使用仪表来对被测定量加以测量，有几种不同的方法，每一种方法有优点也有缺点，所以测量时须采取适合测量目的的方法，一般测量的方法可分为下列几种。

1.4.1 直接测量法(direct measurement method)

以测量仪表直接读取被测量的数值，此种方法简单，只须具有一只可读取被测数量的仪表即可，但其测量结果的准确度不高，依使用仪表的精密程度而定。

1.4.2 间接测量法(indirect measurement method)

以测量仪表量取两种以上与被测量不同性质(单位)的量，再以公式换算求得待测量的数值，如以电流表及电压表来测量电阻值。

1.4.3 比较测量法(comparison method)

将被测量与一相同性质(单位)的量相比较，由其比值来决定被测量的大小。此法可获得一甚佳的准确度，如以电桥测量电阻、电感或电容，以电位计测量电动势等。

1.4.4 代换测量法

将待测量的未知值，在相同条件下，利用标准器进行比较测量，称为代换测量法。如图 1.6(a)所示，将未知电阻 R_x 接于电源得到电流 I，再将标准电阻器取代 R_x，如图 1.6(b)所示，调整标准电阻器使电流为原来的 I，此时标准电阻值即为未知电阻的值 R_x。

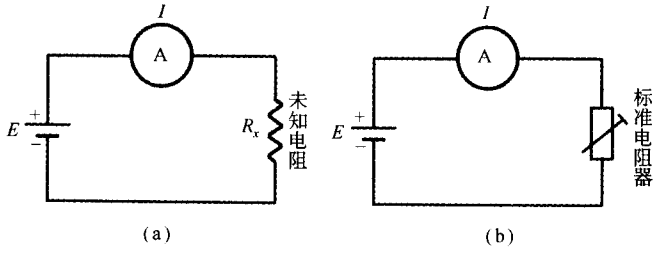

图 1.6 电阻值的代换测量法

1.4.5 绝对测量法(absolute measurement method)

依物理定义并以与待测量性质(单位)不同的量由绝对单位来测量待测量，此种测量方法须尽可能的使用标准装置，故可获得一个极为准确的数值。

测量仪表显示被测量的数值有两种方法：一为模拟式(analogue)的指示方式，将测量的数值以指针或图形(如示波器)显示出来；二为数字式(digital)的指示方式，将待测的物理量借助转换器改变为一数字的信号，再配合数字显示器(如LED，LCD)显示出被测量的数值。

1.5 误差的种类及校正

在测量中由于仪表本身所具有的误差及测量过程中也可能产生的误差，故测试值与真值(true value)间可能有些差异，此差异称为误差(error)，可表示为

$$\varepsilon = M - T \tag{1.4}$$

式中，M 为 测试值；T 为真值。

误差百分数可表示为

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon}{T} \times 100\% \tag{1.5}$$

1.5.1 误差种类

测量时可能发生的误差一般可区分为下列几种。

1. 理论误差

由理论所计算的数值，与真值有差别者，称为理论误差。例如平行电容器的理论电容量 $C=\varepsilon_0 \frac{A}{d}$，但因由于边缘效应的结果，使真正容量与理论容量有误差存在。

2. 人为误差

这类误差主要是由测量者错误读取读数或数据的错误记载等人为的疏忽所引起。此种误差可能为任何的形式及大小，故无法以数学的方式来加以分析，为避免此误差必须由测试人员细心地读取和记录读数，并对待测的量再做两三次或更多次的测量来加以消除。若以数字显示的指示方式取代以指针指示的模拟显示方式，可使错误地读取读数的可能性消除或减低到最小的程度。

3. 系统误差(systematic error)

此类误差是因某一定规则关系所产生的，如果明了误差的原因，可以预先加以消除或事后加以校正。其已知的原因大概可分为仪表及环境的影响两方面。

仪表的系统误差主要为仪表本身因机械结构而持有的误差，它包含了仪表制造厂商所保证的误差及使用年限所附加的偏差。此种误差可通过恰当的设计、测

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com