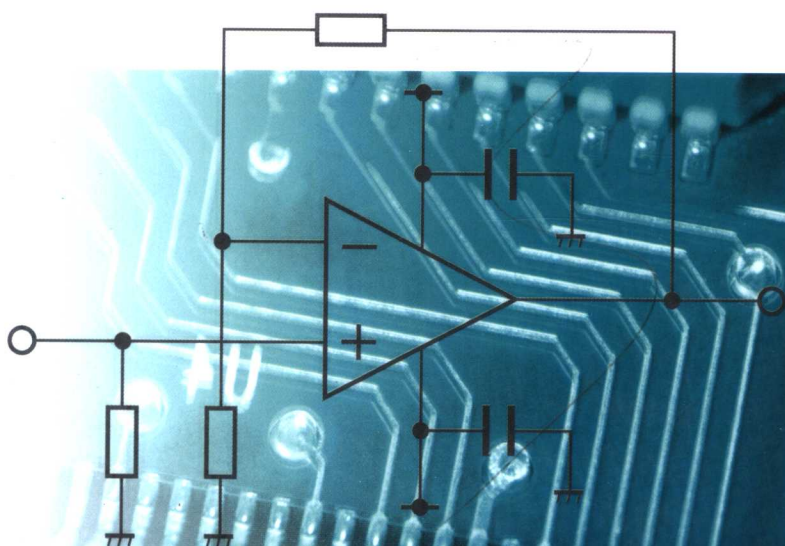


零起点电路入门丛书

Technology
实用技术

图解 电子测量技术

韦琳 编



 科学出版社
www.sciencep.com

TM93

96

2007

零起点电路入门丛书

图解

电子测量技术

韦 琳 编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“零起点电路入门丛书”之一。本书首先介绍测量的基础知识；其次介绍万用表、指示式电工仪表、示波器、波形记录仪等常用测量仪器的原理与使用方法；然后介绍电子元件特性，以及电阻、阻抗、电容与电感等各种电路元件参数的测量；接着介绍电流与电压、功率、频率、波形等的测量；最后介绍测量用信号源，以及数据域测试技术等。

本书配有大量照片和图表，并辅以简洁的介绍，有助于读者理解和掌握各种电子测量技术。

本书可供刚刚步入电子工程、通信、自动控制等领域的初级技术人员阅读，亦可作为职业学校相关专业学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

图解电子测量技术/韦琳编. 北京:科学出版社,2007

(零起点电路入门丛书)

ISBN 978-7-03-017024-8

I. 图… II. 韦… III. 电子测量-图解 IV. TM93-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 020706 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:朱东东

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

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 1—5 000 字数: 187 000

定 价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前言

我们通常所说的电子信息技术包括三个支柱：信息的获取——电子测量技术；信息的传输——电子通信技术；信息的处理——电子计算机技术。显然如果没有对原始数据准确、可靠的测量，则对任何信息的转换、处理和传输都将失去实际意义，因此电子测量技术是电子信息产业基础中的基础。

科学技术的飞速发展，特别是信息技术、精密工程的发展，催生了众多的新工艺、新材料、新产品，给人们的生产生活带来了日新月异的变化，然而所有这些新工艺、新材料、新产品都离不开测量技术，测量技术是这些产品质量的重要保证。

随着我国电子信息产业的飞速发展，电子测量技术及相关的仪器仪表已成为信息化带动工业化的重要纽带。

目前，我国的中等教育正在从应试教育向素质教育转化，这是我国教育领域的一次具有深远意义的变革。长期以来，从教师到学生，重视理论知识，轻视实践环节；重视书本知识，轻视动手能力是普遍现象。“高分低能”限制了某些有潜力的学生向深层次的发展。因此，本书从实用的角度出发，向广大读者介绍常用的电子测量方法及技巧。为了使测量器具的特征和测量方法形象化，本书还采用了大量照片，同时尽可能以我们身边的实例，用插图的形式加以说明，从而使未接触测量实践的读者避免无所适从的感觉。

在编写本书时，我们力图使本书具有如下特点：

1. 学习中实践，实践中学习，通过对实验结果的分析来验证所学理论。
2. 一改科技图书的沉闷与枯燥，辅以大量照片和图表，帮助读者理解和记忆所学知识。
3. 着眼于方法的介绍，而不是简单地阐述原理，结合实际应用，使读者能够融会贯通所学知识并学以致用。

如果本书有助于读者学习和掌握电子测量的各种技术，则吾将

幸甚。

由于编者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。
最后,谨向在编写过程中给予帮助的同仁和科学出版社的编辑表示感谢。

目 录

第 1 章 测量基础知识	1
1.1 概 述	1
1.1.1 意 义	1
1.1.2 定 义	2
1.2 单 位	2
1.2.1 电学单位制的发展史	5
1.2.2 导出量的国际单位制	6
1.2.3 标准的等级	7
1.3 标准器	8
1.3.1 标准电池	9
1.3.2 标准电阻器	10
1.3.3 标准电容器	10
1.3.4 标准电感器	11
1.3.5 标准电压/电流发生器	11
1.4 测量方法	12
1.4.1 直接测量与间接测量	13
1.4.2 比较测量与绝对测量	13
1.4.3 代换测量	14
1.5 测量值的表示方法	15
1.6 误差的产生与消除	15
1.6.1 什么是误差	15
1.6.2 误差的种类	16
1.6.3 测量装置的允许误差	18
1.6.4 有效数字	20
第 2 章 常用测量仪器原理与使用方法	23
2.1 万用表	23
2.1.1 什么是万用表	23
2.1.2 模拟式万用表与数字式万用表的比较	24

2.1.3	模拟式万用表至今仍被使用的理由	26
2.1.4	模拟式万用表的结构与使用方法	27
2.1.5	数字式万用表的结构与使用方法	32
2.2	指示式电工仪表	36
2.2.1	指示式电工仪表的分类	36
2.2.2	观察分度盘	37
2.2.3	指示式电工仪表的结构	38
2.3	示波器	41
2.3.1	示波器的原理	41
2.3.2	模拟示波器与数字示波器	42
2.3.3	示波器的应用	45
2.3.4	新型示波器	56
2.3.5	如何选购示波器	59
2.4	波形记录仪	60
2.4.1	记录仪的种类	60
2.4.2	直动式记录仪	60
2.4.3	自动平衡记录仪	62
2.4.4	X-Y 记录仪	62
2.4.5	多笔式记录仪的相位补偿机构	63
第 3 章	电路元件参数测量	65
3.1	电子元件特性	65
3.1.1	等效电路	65
3.1.2	参数的依赖性	66
3.2	电阻的测量	68
3.2.1	低阻电阻的测量	68
3.2.2	中阻电阻的测量	69
3.2.3	高阻电阻的测量	71
3.2.4	接地电阻的测量	71
3.2.5	特殊电阻的测量	72
3.3	阻抗的测量	73
3.3.1	电压表-电流表法	74
3.3.2	电桥法	74
3.3.3	谐振法	75
3.3.4	自动电桥法	76
3.3.5	阻抗测量仪器的技术指标	77
3.4	电容与电感的测量	78

3.4.1	用万用电桥测量电容与电感	78
3.4.2	用 Q 表测量电容与电感	79
3.5	半导体特性的测量	81
3.5.1	晶体三极管静特性的测试	81
3.5.2	特性曲线测试仪的结构	82
3.5.3	电流放大系数的简易测量法	83
3.5.4	半导体器件测量时的注意事项	83
第 4 章	电流与电压的测量	85
4.1	动圈式仪表	85
4.2	交流电流与电压的测量	87
4.2.1	半波整流电路	87
4.2.2	全波整流式电流表	87
4.2.3	全波整流式电压表	88
4.2.4	峰值电压表	89
4.2.5	峰-峰值电压表	89
4.2.6	不切断电路时电流的测量	89
4.3	高频电流与电压的测量	90
4.3.1	集肤效应	90
4.3.2	杂散电容	91
4.3.3	高频电流的测量	93
4.3.4	高频电压测量仪表	94
4.4	数字式电压测量方式	96
4.4.1	双重积分式 A/D 转换器	96
4.4.2	D/A 转换器	98
4.4.3	逐次比较式 A/D 转换器	100
4.5	高电压测量	101
4.5.1	交流高电压的测量	102
4.5.2	直流高电压的测量	104
4.5.3	脉冲高电压的测量	105
4.5.4	高电压时大电流的测量	107
第 5 章	功率的测量	111
5.1	基本定义	111
5.2	传输型功率测量	113
5.3	吸收型功率测量	115

5.4	热敏电阻传感器和功率计	116
5.5	热电偶式功率计	118
5.6	二极管功率传感器	120
5.7	峰值功率测量	123
5.8	多次反射的影响	123
5.9	技术指标	124
5.10	校 准	126
第 6 章	频率的测量	127
6.1	频率的各种测量方法	127
6.1.1	电容充放电法	127
6.1.2	利用示波器的测量方法	127
6.1.3	频率电桥法	128
6.1.4	频率计法	128
6.2	频率计数器	129
6.2.1	频率计数器的动作原理	129
6.2.2	高分辨率的低频测量	130
6.2.3	微波测量法	131
6.3	基于频率标准的校正	132
6.3.1	频率计数器和校正	132
6.3.2	频率的一次标准	132
6.3.3	标准的提供	133
第 7 章	波形的测量	135
7.1	概 述	135
7.2	波形的种类	135
7.2.1	正弦波	136
7.2.2	复合周期信号波形	138
7.3	如何观测波形	140
7.3.1	使用显波器观测波形	140
7.3.2	使用示波管观测波形	142
7.3.3	用频谱分析仪观测波形	144
7.3.4	用 FFT 分析仪观测波形	146
第 8 章	测量用信号源	149
8.1	正弦波振荡器	149

8.1.1	射频(RF)信号发生器	149
8.1.2	音频振荡器	150
8.1.3	性能和技术指标	151
8.2	函数发生器	153
8.2.1	阈值判决振荡器	153
8.2.2	用函数发生器产生正弦波	155
8.2.3	调 制	156
8.2.4	技术指标	157
8.3	频率合成器	157
8.3.1	直接合成	158
8.3.2	间接合成	158
8.3.3	取样正弦波合成	162
8.4	任意波形合成器	165
8.4.1	工作原理	165
8.4.2	任意波形发生器的技术指标	167
8.5	脉冲发生器	167
8.5.1	概 述	167
8.5.2	基本方块图	168
8.5.3	前面板和背面板	169
8.5.4	特殊脉冲发生器	169
第 9 章	数据域测试技术	173
9.1	数据域简介	173
9.2	逻辑分析仪的基本工作	174
9.2.1	异步工作方式	174
9.2.2	同步工作方式	175
9.2.3	方块图	176
9.2.4	仿真分析	179
9.2.5	高级语言的源相关	181
9.3	主要功能的利用	181
9.3.1	设 置	181
9.3.2	触发问题	185
9.3.3	计数器资源	188
9.3.4	定 序	189
9.3.5	多个装置之间的触发	190

第 1 章

测量基础知识

1.1 概 述

测量是使用各种仪表测量长度、质量以及其他的物理量。为此,测量技术不仅与电气有关,还涉及到机械、化学等领域,道理非常深奥。现在随着模/数转换器与传感器的研制开发,敏感地捕获周围的环境状态已经变为可能,方便利用获取的信息,可进行装置的自动化以及人们所期望的控制。

1.1.1 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。

1.1.2 定 义

在古代测量长度的单位大多利用人身体的某一部分。最原始的长度单位是用足底的长度或手指宽度等作为长度的单位,如图 1.1 所示。经过漫长的历史变迁,足底长度逐渐演变成今天仍然使用的英尺(约 30cm),而手指宽度则以大姆指宽度作为基准单位,进而演变成今天的英寸(约 2.54cm)。

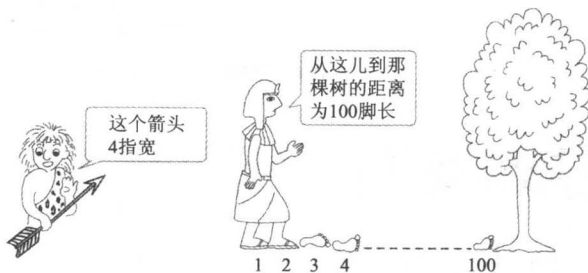


图 1.1 古人的长度测量单位

我们来考虑一下作为被测物体的基准物理量或单位。为了表示某物理量的数量,必须有与该物理量相同种类的比较基准,这个基准量称为**单位**。求取某物理量是基准单位的多少倍的操作称为**测量**,完成这种操作的装置是**测量器具**。

单位
测量
测量器具

1.2 单 位

在各种测量的量的家族中,我们描绘出与基本量相关的导出量的系属图,如图 1.2 中所示。在该示意图中,导出量局限于与电测量系统相关的量,以及若干具有普遍意义的量。目前,大约有 30 个这样的量得到认可。

各种物理量至少在理论上都可以视为测量系统中的基本量,而 SI 是建立在长度、质量、时间、电流、温度和发光强度这几个量的基础上。具有长度的量称为机械量且是常用单位。某些单位制,如用于电磁量的厘米-克-秒(cgs)制或米-千克-秒(mks)制只承认三个基本单位。这两种单位制都与米单位制相联系。在较古老的 cgs 制(实际上是两种,即静电 cgs 制和电磁 cgs 制)中,基本单位是厘米、克和秒。在 mks 制中,基本单位是米、千克和秒。后一种单位制是现今普遍采用的国际单位制的基础。美国国家标准局(目前为美国国家

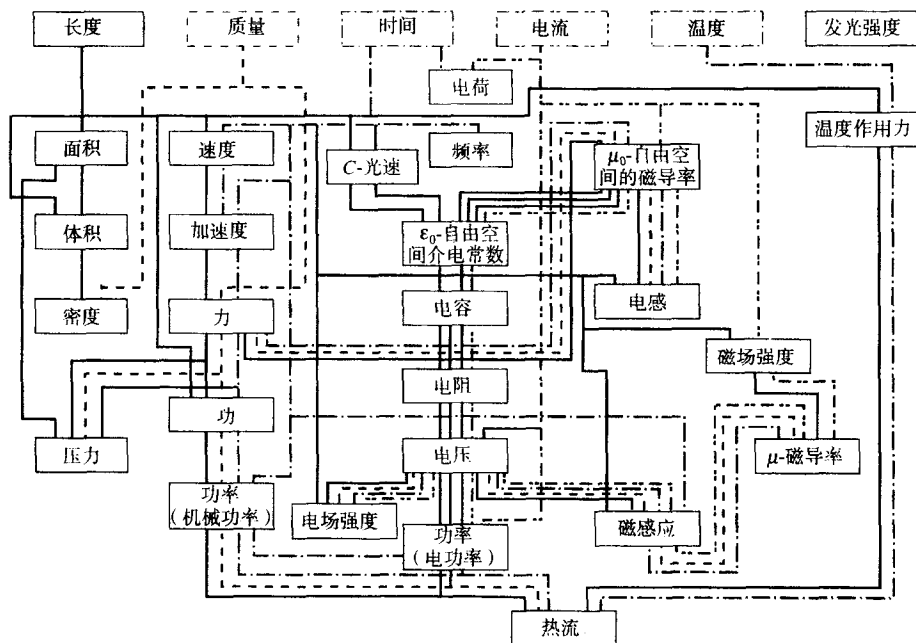


图 1.2 导出量与基本量的关系

标准技术研究院(NIST))于1964年采纳了国际单位制。

① 米(m)——长度。米是与氮-86原子(在氮的三相点(63.15K)上激发的) $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁(橘红色谱线)相对应的在真空中辐射的1 650 763.73个波长的长度。

② 千克(kg)——质量。千克是质量单位,它等于千克国际原器的质量。

③ 秒(s)——时间。秒是与铯-133原子基态两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射的9 192 631 770个周期的持续时间。

④ 安[培](A)——电流。安培是在真空中对截面可忽略的两根相距1m的无限长平行圆直导线内通以恒定电流,则恒定电流将在两根导线之间每米长度上产生 $2 \times 10^{-7} \text{ N}$ 的力,此时每根导线中的电流为1A。

⑤ 开[尔文](K)——温度。开[尔文]是热力学温度的单位,它等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ (1968年的国际实用温标(IPTS68)和国际实用摄氏温标涉及水的三相点,且至少涉及5个其他的参考点)。

⑥ 坎[德拉](cd)——发光强度。坎[德拉]是在 $101.32 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$

的压力下处于铂凝固温度的黑体的 $1/600\,000\text{m}^2$ 表面在垂直方向上的发光强度(在国际单位制中,坎[德拉]被视为发光强度的基本单位,尽管它不完全是一个物理单位,因为它涉及普通人眼对波长的灵敏度)。

除6个国际单位制的基本单位外,还增加了两个补充单位,即用于平面角的弧度和用于立体角的球面度。

⑦ 弧度(rad)——由长度等于圆半径的圆弧所对应的平面角。

⑧ 球面度(sr)——由面积等于球半径平方的那部分表面在球心处所对应的立体角。

物理学家,特别是电气工程师感兴趣的是用来表示各种电学量和磁学量大小的导出单位。大约有30个这样的导出单位被认为是SI单位,包括面积、体积和频率这几个相当简单的量的单位。导出量和相关单位是物理学中的一个广泛论题。它是一个用来表达许多理念的领域。不幸的是,在理解所涉及的各种单位制时存在着许多含糊不清的概念,这在电学领域尤为突出。在各个不同的电学单位制中,人们最初利用一些将电学量与机械量如力、功(能量)和功率相联系的基本且相当简单的方程来表示电学量,而机械量本身又可借助长度、质量和时间表示。在应用方程时,借助所谓量纲分析的数学过程可以使有关的物理步骤和数学步骤能够自圆其说。还有应用于某些电测量系统方程的所谓“有理化”(也称“局部有理化”)方法。它以各种方式对因子 4π (与球对称相联系且常出现在许多方程中)进行处理。这也在它的应用中引起显著混淆。

图1.2示出导出量与基本量的关系。更详细的图表可以用量纲术语表示这种关系。根据有关定义和物理方程,可以反映出这种关系的更多细节。导出量的家族由代表几个基本量的点画线表示。每个导出量(在方框中示出)均与一个或多个基本量相联系,在某些情况下通过导出量链与诸如电功率相联系。这些关系由物理方程表示,并可以通过用量纲术语表示该关系加以验证。两条这样的链,即力学量和电学量在功率方面是等效的,它们本身也具有通过热流反映出的共同点,即将机械功率转化为等效的热以及将电功率完全转化为热耗散。

在国际单位制家族中,较为重要的是自由空间的磁导率的作用,以及自由空间的介电常数的作用。按定义,电流被认为是一个基本量,尽管它与长度、质量和时间相关。按定义,它是通过将值 $4 \times 10^{-7} \text{H/m}$ 赋予自由空间的磁导率与力学量相联系。实验上,电流与

力学量的关系可以借助电流平衡或贝拉特(pellat)型测力计来建立。电压是通过欧姆定律的关系式由电流和电阻导出。在早期的工作中,电阻的单位是由自感器或互感器的电抗建立。最近,利用可计算的电容器已获得更高的精度。

自由空间的介电常数值 ϵ_0 由自由空间的磁导率 μ_0 的确定值和所观察光速 c 的最佳值导出,关系式为 $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$ 。目前使用的自由空间的介电常数值是 $8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 。

1.2.1 电学单位制的发展史

电学单位制的发展经历了差不多一个半世纪。在此期间,提出过至少 8 种得到认可的单位制。结果,由于术语变更、处理问题的观念和方法的多样性,所讨论问题的复杂性、缺乏标准化以及缺乏对不同观点的理解,因而存在着许多混淆。我们现今所了解的电学单位制源于 1827 年提出的欧姆定律 $E = IR$ 。1833 年,高斯(Gauss)率先用实验方法将磁学量与力学单位相联系。随后,韦伯(Weber)利用力学长度、质量和时间创建了测量电流和电阻的方法。这些将电量(或热、光等)与长度、质量和时间的所谓力学单位相联的方法称之为“绝对”法,早期从事该领域研究的人们选择这一术语并没有什么特殊原因。

英国科学促进协会下属的电气标准委员会成立于 1861 年,其影响力已有许多年的历史。这个委员会在早期的主席 C. 麦克斯韦的领导下建立了同时适用于静电单位和电磁单位的厘米-克-秒(cgs)制以及全都用米制表示的实用单位。电学单位的 cgs 制顾名思义直接与力学单位相联系,因此属于“绝对”单位制。选择实用单位的大小对于工程应用要比静电单位和电磁单位的某些更极端的值更加方便。

在建立 cgs 制之后的多年期间,基本单位伏[特]、欧[姆]和安[培]在诸如标准电池、汞电阻和银电解式电量计(也称为库仑计)这样一些标准中得到具体体现。依据这些标准的电学单位称为国际单位并一直沿用到 1948 年。包括美国在内的一些国家将这些单位称为“法定”单位。

在使用 cgs 制的漫长时期内,由英国、德国和美国的国家实验室制订出借助力学单位来确定伏[特]、欧[姆]和安[培]的高度精密的方法。最终,欧姆和伏特的单位值用托马斯(Thomas)或类似形式的标准 1Ω 电阻器和用韦斯通电池(非常接近 1V)得到体现,且一直维

持到现在。由于这些测量(利用测量电阻的电流平衡法和自感或互感法)的结果,自 1948 年 1 月 1 日开始,称为绝对伏[特]和绝对欧[姆]的一组新值被指定为电压和电阻的国家标准。在过渡期内,必须说明它们与使用了半个世纪的一些国际单位的相互关系。尽管目前这些值实际上仍保持与 1948 年的相同,但它们因采用更精确的确定方法而略有变化。这样的变化带来在 1969 年 1 月 1 日法制美国伏[特]单位的变化,因为制订出确定欧[姆]的计算电容法以及确定安[培]的更精确的电流平衡法和佩拉特型测力计法。

1954 年,第十届国际计量大会提出基于米、千克、秒、安[培]、开氏度(现为开[尔文])和坎[德拉]的国际单位制(SI)。

国际单位制的电学单位是基于国际电工委员会(IEC)采纳的 mksa 制,它是由乔治(Giorgi)于 1901 年建议的 4 量纲 mks 演变而来的。mksa 制包括安[培],因而称为米-千克-秒-安[培]制。

1.2.2 导出量的国际单位制

表 1.1 列出国际单位制的导出单位。表 1.2 列出国际单位制的十进制倍数和分数的词头。

表 1.1 国际单位制(SI)

基本单位			导出单位			
物理量	名称	符号	物理量	名称	符号	公式
长度	米	m	电荷量	库[仑]	C	$A \times s$
质量	千克	kg	电容	法[拉]	F	$a \times s/V$
时间	秒	s	电感	亨[利]	H	$V \times s/A$
电流	安[培]	A	电位	伏[特]	V	W/A
温度	开[尔文]	K	电阻	欧[姆]	Ω	V/A
发光强度	坎[德拉]	cd	能量(功/热)	焦[耳]	J	$N \times m$
物质的量	摩[尔]	mol	力	牛[顿]	N	$kg \times m/s^2$
			频率	赫[兹]	Hz	c/s
			照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
			光通量	流[明]	lm	$cd \times sr$
			磁通量	韦[伯]	Wb	$V \times s$
			磁通密度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
			功率	瓦[特]	W	J/s
			压力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
辅助单位						
平面角	弧度	rad				
立体角	球面度	sr				

表 1.2 倍数和分数的词头

符号	词头	倍率因子	符号	词头	倍率因子
T	tera	10^{12}	c	centi	10^{-2}
G	giga	10^9	m	milli	10^{-3}
M	mega	10^6	μ	micro	10^{-6}
k	kilo	10^3	n	nano	10^{-9}
h	hecto	10^2	p	pico	10^{-12}
da	deca	10^1	f	femto	10^{-15}
d	deci	10^{-1}	a	atto	10^{-18}

1.2.3 标准的等级

若某一测量系统呈现出属于同一家族或可追溯到同一来源,自然会引伸出标准的等级或结构体系。反之,这个公共源提供引向系统最终用户的起点的测量链。术语基准用来表示在测量系统源处的标准。然而,术语“原器”标准也经常使用,特别是若标准具有任意形式如国际 1 千克质量时,使用更加普遍。国家标准化实验室拥有国际千克的复制品。在美国,NIST 拥有 20 号千克原器。长度的原子标准已取代以前的米棒。在国际单位制中,时间的原子标准(不同于历史时的时间间隔)已取代根据地球沿其轴或围绕太阳旋转所确定的秒。也许,所有基本标准的最终结果具有原子属性而不是宏观属性。

图 1.3 示出测量系统的标准等级。这样的标准等级在实践中十分普遍,尽管以这种方式呈现显得有些理想化。等级的编号是依据由 IEEE 基本标准和校准方法委员会拟订的电子测量的标准化方案。这种格式的一般理念来自 1960 年三军(陆军、海军、空军)校准会议的一个委员会的工作,目的是要获得实验室标准的等级的更一致命名。

简单地说,如图 1.3 中等级 I 所示的等级结构代表了国家标准局内部存在的标准链。这个表述使用的许多术语都由麦克里希(McNish)提出。等级 I 中测量的量的单位制包含由原器标准,如长度和质量标准体现的基本单位和由与基本单位的数学关系式表示的许多导出单位。这些导出单位中,有许多单位可以在标准中体现。例如,韦斯通电池用于伏[特]的标准。无论标准是单独存在(如 20 号千克原器),还是以一组 40 个饱和标准电池形式存在,它们都归类为国家标准。国家标准用来建立和稳定适用于美国范围的测量单位。