

# 电气测量技术

DIANQI CELYANG JISHU

申忠如 郭福田 丁 晖 编著



科学出版社  
www.sciencep.com

# 电气测量技术

申忠如 郭福田 丁 晖 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书首先介绍了测量与测量系统所必需的基础知识, 然后对电气参数、电路参数和磁参数的测量进行了重点阐述, 并突出了数字化、微机化的测量方法。书中还对代表未来测量仪器发展方向的虚拟仪器及开发语言做了简要介绍。最后从实用的角度出发介绍了在电力系统中常见干扰的来源与相应的抑制措施。

本书可作为电气工程与自动化及相关专业本科生的教学用书, 也可供相关工程技术人员和研究生阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电气测量技术/申忠如等编著. —北京: 科学出版社, 2003

ISBN 7-03-010971-6

I. 电… II. 申 III. 电气测量 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 090617 号

责任编辑: 樊 捷 / 责任校对: 曹锐军

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 王 浩

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社出版 各地新华书店经销

\*

2003年1月第一版 开本: 787×1092 1/16

2003年1月第一次印刷 印张: 12 1/2

印数: 1—5 000 字数: 277 000

定价: 19.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

本书是按照电气工程与自动化专业电气测量技术课程的教学大纲编写的。计算机技术、数字信号处理技术和新型传感器技术的发展，给传统的电气测量技术注入了大量的新内容，生产实际的发展和教学改革的需要，也促使了原有的电气测量技术课程在体系上和内容上必须进行相应的调整。正是在这一背景下，我们编写了新的电气测量技术讲义，并在西安交通大学研究生、本科生中已使用数届，反映较好。本书正是根据作者多年的教学实践，并在吸收了国内外同类教材优点的基础上编写而成的。

本书共分10章，第1、2、3章主要讲述测量的基本概念、方法和有关单位；测量误差的分配和合成；正确选用仪器和组成合理的测量系统的方法。第4章介绍传感器的基本知识和调理电路。第5、6章介绍目前最热门的具有智能性质的虚拟仪器及开发语言和部分有关信号分析与处理的知识。第7、8、9章讲述电和磁的测试基础，即电气参数、电路参数和磁参数的测量。第10章讲述干扰的来源、传播与常用的抑制干扰的方法。

本书的特点是突出基础，力求实用。由于时间仓促，书中未收入电量的非电量测量方法，即用光、声传感器测量电量等内容，这些内容已成为当前电气测量技术研究的另一热点，读者可以参阅有关杂志。

本书在编写中参阅了不少参考书和资料，学习和吸取了不少经验。在出版过程中，得到了西安交通大学电气工程学院领导和有关教授的具体帮助与指导，也得到了科学出版社的大力支持，并提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心感谢。

限于水平和经验，本书难免有不足和错误之处，望读者批评指正。

作 者

2002年12月

### 征询意见表

1. 您认为本书和附光盘的哪些内容有特色, 对您有帮助。
  
2. 您认为本书和附光盘的内容设计有哪些不足, 并提建议。
  
3. 您对教辅教材的编写及出版建议。
  
4. 请推荐本课程编写比较好的教材和教辅教材。

作者

作者单位

书名

出版社

出版时间

### 选题申请表

作者 情况	姓名		年龄		性别		电话	
	单位		地址		邮 编			
书 名					类别	研究生 本科 专科		
适用对象								
内容 简介								
联系 方式	单位	科学出版社 信息技术出版中心	电 话	010-82672033	E-mail	zhaowj5997@sina.com		
	地 址	北京东黄城根北街16号	邮 编	100717	联系人	赵卫江		

# 目 录

<b>第 1 章 测量与测量系统的基础知识</b> .....	1
1.1 测量 .....	1
1.1.1 测量与测量方法 .....	1
1.1.2 测量过程 .....	1
1.1.3 测量方法 .....	1
1.2 测量单位及测量基准 .....	2
1.2.1 单位及单位制 .....	3
1.2.2 电学量具 .....	6
<b>第 2 章 测量误差及其分析</b> .....	13
2.1 测量误差基本概念.....	13
2.1.1 测量误差的几个名词术语.....	13
2.1.2 测量误差的表示 .....	13
2.1.3 测量误差的分类 .....	16
2.1.4 有效数字.....	17
2.2 系统误差的消除.....	18
2.2.1 从产生系统误差的来源上消除 .....	18
2.2.2 利用修正的方法消除 .....	19
2.2.3 利用特殊的测量方法消除.....	19
2.3 随机误差的处理.....	23
2.3.1 随机误差的统计特性和概率分布 .....	23
2.3.2 随机变量的特征参数 .....	26
2.4 粗大误差的剔除.....	34
2.4.1 拉依达准则 .....	34
2.4.2 格罗布斯准则 .....	35
2.5 测量结果误差的估计.....	36
2.5.1 直接测量结果的误差估计.....	36
2.5.2 间接测量结果的误差估计.....	36
2.5.3 已定系统误差的合成 .....	40
2.5.4 测量结果的表示 .....	40
2.6 数据处理举例.....	41
2.7 微小误差准则与比对标准的选取.....	43
2.7.1 微小误差准则 .....	43
2.7.2 比对标准的选取 .....	44
2.8 误差分配与最佳测量方案的确定.....	44

2.8.1	误差分配	44
2.8.2	最佳测量方案的确定	47
<b>第3章</b>	<b>测量系统的基本特性</b>	<b>49</b>
3.1	概述	49
3.2	测量系统的静态特性	50
3.2.1	静态特性的获得	50
3.2.2	静态特性的基本参数	50
3.2.3	静态特性的质量指标	51
3.3	测量系统的动态特性	55
3.3.1	测量系统的数学模型	56
3.3.2	常见测量系统的数学模型	57
3.3.3	测量系统的动态特性参数	58
3.3.4	系统特性参数、动态误差与信号频率的关系	64
3.4	测量系统的组建的基本原则	67
<b>第4章</b>	<b>信号的检测与变换</b>	<b>73</b>
4.1	传感器	73
4.1.1	传感器的定义	73
4.1.2	传感器的组成	73
4.1.3	传感器的分类	74
4.1.4	传感器的一般特性	74
4.2	变送器	75
4.2.1	电量变送器	75
4.2.2	非电量变送器	78
4.3	前置放大器	80
4.3.1	测量放大器	80
4.3.2	程控放大器	82
4.3.3	隔离运算放大器	83
4.4	量程变换	85
4.4.1	脉冲分压器	85
4.4.2	量程变换	86
4.5	自动定标电路	87
4.6	模拟信号的离散化和量子化	88
4.6.1	连续量的离散化	88
4.6.2	连续量的量子化	89
4.6.3	连续量的离散化和量子化	89
4.7	模拟数字转换器 A/D	89
4.7.1	A/D 转换器的主要技术指标	90
4.7.2	逐次比较型 A/D 转换器	91
4.7.3	双积分型 A/D 转换器	93

4.7.4 并行转换型 A/D 转换器 .....	96
4.7.5 并行接口和串行接口的 A/D 转换器 .....	96
4.8 D/A 转换及其应用 .....	97
4.8.1 D/A 转换器的分类 .....	97
4.8.2 D/A 转换器的基本表达式 .....	97
4.8.3 D/A 转换器的技术参数 .....	98
4.8.4 典型集成芯片 AD667 简介 .....	98
4.8.5 D/A 转换器的应用举例 .....	100
4.9 V/F、F/V 变换器 .....	101
4.9.1 典型变换器 5GVFC32V (F/V) .....	102
4.9.2 F/V 变换器 .....	104
4.10 采样保持电路 .....	105
4.11 微型计算机的数据采集系统 .....	106
4.11.1 设计原理 .....	106
4.11.2 A/D 通道的几种结构形式 .....	107
<b>第 5 章 虚拟仪器及开发语言</b> .....	<b>109</b>
5.1 虚拟仪器 .....	109
5.1.1 虚拟仪器的基本概念 .....	109
5.1.2 虚拟仪器的特点 .....	109
5.1.3 虚拟仪器的发展现状 .....	110
5.1.4 虚拟仪器的构成 .....	110
5.2 虚拟仪器开发语言——LabVIEW 简介 .....	111
5.2.1 LabVIEW 的特点 .....	111
5.2.2 使用 LabVIEW 开发虚拟仪器的基本方法 .....	112
5.2.3 前面板及其设计窗口 .....	112
5.2.4 流程图及其编辑窗口 .....	112
5.2.5 各种模板的功能 .....	113
5.3 虚拟仪器开发语言——LabWindows/CVI 简介 .....	114
5.3.1 LabWindows/CVI 的特点 .....	114
5.3.2 使用 LabWindows/CVI 开发虚拟仪器的基本步骤 .....	115
5.4 虚拟氧化锌避雷器泄漏电流带电检测仪的设计 .....	117
<b>第 6 章 信号分析与处理</b> .....	<b>119</b>
6.1 傅里叶级数 .....	119
6.1.1 傅里叶级数的数学基础 .....	119
6.1.2 傅里叶变换公式 .....	120
6.1.3 离散傅里叶变换公式 .....	120
6.2 频谱混叠与采样定理 .....	121
6.2.1 采样定理 .....	121
6.2.2 避免混叠的措施 .....	122



6.3	频谱泄漏及其抑制措施 .....	123
6.3.1	时域有限化与频谱泄漏 .....	123
6.3.2	泄漏的抑制措施 .....	124
6.4	栅栏效应 .....	125
6.5	DFT 参数的选择 .....	125
<b>第 7 章</b>	<b>电气参数的测量</b> .....	<b>127</b>
7.1	频率、周期和时间间隔的测量 .....	127
7.1.1	频率的计数法测量 .....	127
7.1.2	周期的计数法测量 .....	129
7.1.3	时间间隔的计数测量 .....	132
7.2	相位的测量 .....	132
7.2.1	相位-频率转换器原理 .....	132
7.2.2	相位测量的误差 .....	132
7.3	电压、功率和电能等的测量 .....	134
7.3.1	交流电压的测量 .....	134
7.3.2	功率和电能的数字化测量 .....	140
<b>第 8 章</b>	<b>电路参数的测量</b> .....	<b>145</b>
8.1	电阻的测量 .....	145
8.1.1	比例运算器法 .....	145
8.1.2	积分运算器法 .....	146
8.2	电容的测量 .....	147
8.2.1	恒流法 .....	147
8.2.2	比较法 .....	147
8.3	电感的测量 .....	148
8.3.1	时间常数法 .....	148
8.3.2	同步分离法 .....	150
<b>第 9 章</b>	<b>磁测量</b> .....	<b>152</b>
9.1	概述 .....	152
9.1.1	磁测量的任务 .....	152
9.1.2	磁量具 .....	152
9.2	基本磁规律和磁单位 .....	153
9.2.1	基本磁学量 .....	153
9.2.2	磁场的基本定律 .....	155
9.2.3	磁路定律 .....	156
9.2.4	磁单位 .....	158
9.3	物质的磁性及分类 .....	159
9.3.1	物质按磁性分类 .....	159
9.3.2	铁磁物质的磁化 .....	160
9.3.3	铁磁物质的分类 .....	163

---

9.4 磁场的基本测量方法 .....	164
9.4.1 冲击法 .....	164
9.4.2 磁通表法 .....	165
9.4.3 霍尔效应法 .....	167
9.5 静态磁特性的测量 .....	168
9.5.1 磁性材料试样的准备 .....	169
9.5.2 样品的退磁 .....	170
9.5.3 用冲击法测量基本磁化曲线和磁滞回线 .....	171
9.6 动态磁特性的测量 .....	173
9.6.1 用指示仪表测量动态磁化曲线 .....	174
9.6.2 用示波器测量动态磁滞回线 .....	175
<b>第10章 干扰与抑制 .....</b>	<b>176</b>
10.1 电磁干扰 .....	176
10.1.1 干扰与噪声的来源 .....	176
10.1.2 干扰与噪声的耦合方式 .....	176
10.2 干扰的表示方法 .....	178
10.2.1 串模干扰 .....	178
10.2.2 共模干扰 .....	178
10.3 干扰的抑制 .....	181
10.3.1 接地 .....	181
10.3.2 屏蔽 .....	183
10.3.3 隔离 .....	184
10.3.4 其他抗干扰措施 .....	184
10.3.5 灭弧 .....	185
10.4 电源干扰的抑制 .....	185
<b>参考文献 .....</b>	<b>187</b>

# 第 1 章 测量与测量系统的基础知识

## 1.1 测 量

### 1.1.1 测量与测量方法

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,对任何被研究的客观事物,若要定量地进行评价,均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”,这足以说明测量对现代科学技术的发展所起的重要作用。

所谓测量,就是被测量和同类标准量进行比较的一个实验过程。这里应注意,同类标准量的参与方式可以是直接的,也可以是间接的。例如,天平称重量、电位差计测电压,同类标准量(法码、标准电池)是直接参与;电流表测电流、压力表测压力,这里标准量是间接参与的。因为电流表、压力表在出厂时,已经和标准量(标准电流、标准压力)进行比较,以获得定标与校准。

测量结果由两部分组成,即测量单位和与此测量单位相适应的数字值,一般表达式为

$$X = \{X\} \cdot x_0 \quad (1-1)$$

式中,  $X$  为测量结果,  $\{X\}$  为数字值,  $x_0$  为测量单位。

### 1.1.2 测量过程

测量包含有三个重要因素,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经过以下三个阶段:

1)准备阶段:在对测量对象的性质、特点、测量条件认真分析的前提下,根据对测量结果的准确度要求选择恰当的测量方法和测量设备,从而拟定出测量过程及测量步骤。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:在了解测量设备的特性、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,科学而严肃地记录数据。

3)数据处理阶段:按照选定的测量方法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,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。不正确的测量方法,即使有先进的精密仪器,也不会得到正确的测量结果。

### 1.1.3 测量方法

测量方法通常有以下三种分类法。

### (1)按测量结果的获得方式分

1)直接测量:从仪表的读数直接获取测量结果的方法。例如电压表测量电压。该方法测量过程简单快速。

2)间接测量:由仪表的读数,按照一定的函数关系经计算而获取测量结果的方法。例如伏安法测量电阻。该方法测量过程复杂费时,一般应用在以下情况:直接测量不方便;间接测量比直接测量的结果更为准确;没有直接测量的仪表。

3)组合测量:在测量两个或两个以上相关的未知数时,通过改变测量条件而获得一组含有测量读数和未知数的方程组,求解进而获取测量结果的方法。例如电阻的温度系数(一次、二次)测量。

### (2)按测量读数的获得方式分

1)直读测量法:从仪器仪表的指示直接获取读数。该方法过程简单但一般来说准确度较低。

2)比较测量法:把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。

### (3)按测量性质分

1)时域测量:也叫做瞬态测量,主要是测量被测量随时间的变化规律。例如用示波器测量脉冲信号的上升沿、下降沿、过冲、平顶跌落、脉冲宽度等。

2)频域测量:也叫做稳态测量,主要是测量被测量随频率的变化的规律。例如用频谱分析仪测量信号的频谱,函数分析仪测量单元电路的幅频特性、相频特性等。

3)数据域测量:也叫做逻辑量测量。例如用逻辑分析仪测量数字电路的逻辑状态、时序等。

## 1.2 测量单位及测量基准

从测量的定义不难看出,同类标准量在测量中的地位是十分重要的,它的准确与可靠程度直接关系到测量结果的准确度与可靠性。只有根据准确可靠的测量结果来分析事物,才能科学地得出符合客观规律的结论。

要使测量结果准确、可靠和一致,需具备以下条件:

1)统一的计量单位,它应该有足够的科学性和公认的定义,并有一定的换算关系,目前实行的是国际单位制(SI)。

2)按照规定的定义,能够复现出需要的物理量单位或标准。

3)要有正确的测量方法。

4)具有把基本单位量值和同类量相比较的装置,并能把基本单位量值逐级按传递系统传递到测量现场。

研究以上内容的科学属于计量学范畴,已超出本书的范围,下面只对计量学的个别术语和基本概念进行简单介绍。

### 1.2.1 单位及单位制

**单位:**是以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,或用法令形式规定的。例如长度单位米,法国政府1790年规定,沿通过巴黎的地球子午线长度的四千万分之一为1米。1983年,第17届国际计量大会又将米的定义改为:米是光在真空中在 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔里所经过的距离。

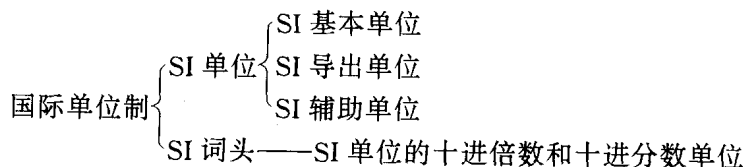
**基本单位与导出单位:**世界上的物理量很多,可以选择一些少数的相互独立的物理量,使其他物理量都能通过这些量组合而进行定义。这些少数的物理量就叫做“基本量”,而把通过物理法则组合构成的物理量作为“导出量”。基本量的单位被称为“基本单位”,这类单位是由公认的国际计量机构根据科学技术的发展水平给出的独立的定义。导出量的单位被称为“导出单位”,它是由基本单位遵循物理法则组合而成。

**单位制:**基本单位选定以后,就可按一定的关系用它们构成一系列导出单位,这样,基本单位与导出单位就形成一个完整的单位体系,这一单位体系的集合称之为单位制。目前绝大多数国家公认并使用的是国际单位制(SI)。

#### 1. 国际单位制

国际单位制是在米制基础上发展起来的科学、实用而又比较完善的单位制。它可以应用于各科学领域和各行业,能够并已经逐步代替了历史上遗留下来的各种单位制和单位。世界上大部分国家及国际组织均已宣布采用或推行国际单位制。

##### (1) 国际单位制的构成



##### (2) SI 基本单位

SI 基本单位的名称、符号、定义见表 1-1。

表 1-1 SI 基本单位的名称、符号、定义

量的名称	单位名称	单位符号	定 义	颁布时间
长度	米	m	米是光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内所经过的距离	1983 年
时间	秒	s	秒是铯-133 原子基态的二超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间	1967 年
质量	千克	kg	千克是质量单位,它等于国家千克的原器的质量	1901 年
电流	安[培]	A	在真空中,截面积可忽略的两根相距 1 米的无限长平行直导线内等量恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上为 $2 \times 10^{-7}$ N,则每根导线中的电流定义为 1A	1946 年
热力学温度	开[尔文]	K	开尔文是水三相点热力学温度的 $1/273.16$	1967 年

续表

量的名称	单位名称	单位符号	定 义	颁布时间
物质的量	摩[尔]	mol	摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含的基本单元数与 0.012 千克碳-12 的原子数目相等	1971 年
发光强度	坎[德拉]	cd	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}$ Hz 的单色辐射,而且在此方向上辐射强度为 $1/683$ W/Sr 每球面度	1979 年

## (3) SI 导出单位

具有专门名称的 SI 导出单位的名称、符号、量纲表达式见表 1-2。

表 1-2 具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	用其他 SI 单位表示的表示式	用 SI 基本单位表示的表示式
频率	赫[兹]	Hz		$s^{-1}$
力	牛[顿]	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
能,功,热量	焦[耳]	J	$N \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
功率,辐[射]通量	瓦[特]	W	$J/s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
电荷[量]	库[仑]	C		$s \cdot A$
电位(电势),电位差,电压,电动势	伏[特]	V	$W/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
电容	法[拉]	F	$C/V$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
电阻	殴[姆]	$\Omega$	$V/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
电导	西[门子]	S	$A/V$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁通[量]密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
电感	亨[利]	H	$Wb/A$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$		K
光通[量]	流[明]	lm		$cd \cdot sr$
[光]照度	勒[克斯]	lx	$lm/m^2$	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$

## (4) SI 辅助单位

SI 辅助单位的名称、符号见表 1-3。

表 1-3 SI 辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	有 SI 基本单位的表示式
平面角	弧度	rad	$m \cdot m^{-1} = 1$
立体角	球面度	sr	$m^2 \cdot m^{-2} = 1$

国家计量委员会(1980)明确指出,在国际单位制中,辅助单位弧度和球面度解释为“无量纲的导出单位”,以此来保持仅基于7个基本单位的国际单位制的一贯性。之所以称为辅助单位是因为它们既可以用“1”表示,又可以用给定的专用名称“弧度”和“球面度”表示,从实用出发,根据不同场合下的需要选择。

辅助单位可用来表示导出单位,以此对不同性质但属同量纲的量加以区别。使用辅助单位表示的导出单位示例见表1-4。

表1-4 使用辅助单位表示的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号
角速度	弧度每秒	rad/s
角加速度	弧度每二次方秒	rad/s <sup>2</sup>
辐射强度	瓦[特]每球面度	W/sr
辐射亮度	瓦[特]每平方米球面度	W/(m <sup>2</sup> ·sr)

#### (5)SI 词头

国际单位制规定一个物理量只有一个SI单位,这给使用带来不便。比如,电压的SI单位为“伏特”,符号为“V”,对于比较低的电压,小数位太多,如0.000 005V,对于比较高的电压,数字后“0”太多,如50 000V。显然,这对记录和读数是十分不便的,为此,国际单位制规定了一套“词头”,用它和SI单位组合而成SI单位的十进倍数单位和十进分数单位。有了词头上述两数字就可分别表示成5 $\mu$ V和50kV。这里的“ $\mu$ ”、“k”就是词头,分别读为“微”和“千”。

SI词头的定义、名称及符号见表1-5。

表1-5 SI词头

倍乘因子	词头名称		词头符号	倍乘因子	词头名称		词头符号
	中文	英文			中文	英文	
10 <sup>24</sup>	尧[它]	yotta	Y	10 <sup>1</sup>	十	deca	da
10 <sup>21</sup>	泽[它]	zetta	Z	10 <sup>-1</sup>	分	deci	d
10 <sup>18</sup>	艾[可萨]	exa	E	10 <sup>-2</sup>	厘	centi	c
10 <sup>15</sup>	拍[它]	peta	P	10 <sup>-3</sup>	毫	milli	m
10 <sup>12</sup>	太[拉]	tera	T	10 <sup>-6</sup>	微	micro	$\mu$
10 <sup>9</sup>	吉[咖]	giga	G	10 <sup>-9</sup>	纳[诺]	nano	n
10 <sup>6</sup>	兆	mega	M	10 <sup>-12</sup>	皮[可]	pico	p
10 <sup>3</sup>	千	kilo	k	10 <sup>-15</sup>	飞[母托]	femto	f
10 <sup>2</sup>	百	hecto	H	10 <sup>-18</sup>	阿[托]	atto	a

在使用词头时应注意以下几点:

- 1) 词头符号用罗马体(正体)印发,在词头符号和单位符号之间不留间隔。
- 2) 不允许使用重叠词头。
- 3) 词头永远不能单独使用。

4) 在国际单位制的基本单位中,由于历史原因,质量单位(kg)是惟一带有词头的单位名称,它的十进倍数与分数单位是将词头加在“g”前,而不是加在“kg”前构成的。但“kg”并不是倍数单位而是 SI 单位。

## 2. 我国法定的计量单位

计量学的特点是:准确性、一致性、可溯源性和法制性。准确性、一致性和可溯源性体现在测量单位的定义、复现、比对和传递,而法制性则体现在各个国家使用的计量单位均以立法进行规约。

《中华人民共和国计量法》(1985年9月6日通过)规定“国际单位制计量单位和国家选定的其他计量单位,为国家法定计量单位”,国务院于1984年2月27日发布命令,明确规定我国的法定计量单位包括:

- 1) 国际单位制单位。
- 2) 国家选定的非国际单位制单位(见表 1-6)。
- 3) 由以上单位构成的组合形式的单位。

表 1-6 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1min = 60s
	[小]时	h	1h = 60min = 3 600s
	天[日]	d	1d = 24h = 86 400s
平面角	[角]秒	( $''$ )	1 $''$ = ( $\pi/648 000$ )rad ( $\pi$ 为圆周率)
	[角]分	( $'$ )	1 $'$ = 60 $''$ = ( $\pi/10 800$ )rad
	度	( $^{\circ}$ )	1 $^{\circ}$ = 60 $'$ = ( $\pi/180$ )rad
旋转速度	转每秒	r/min	1r/min = (1/60) $r_s^{-1}$
长度	海里	nmile	1nmile = 1 852m (只用于航程)
速度	节	kn	1kn = 1 nmile/h = (1 852/3 600)m/s (只用于航行)
质量	吨	t	1t = 10 <sup>3</sup> kg
	原子质量单位	u	1u $\approx$ 1.660 565 5 $\times$ 10 <sup>-27</sup> kg
体积	升	L(l)	1L = 1dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
能	电子伏	eV	1eV $\approx$ 1.602 1 892 $\times$ 10 <sup>-19</sup> J
级差	分贝	dB	
线密度	特[克斯]	tex	1 tex = 1g/km

## 1.2.2 电学量具

### 1. 量具的基本概念

所谓量具是固定形式复现量值的计量器具,其主要作用是维持单位的统一,保证量值准确地传递。量具可分为单值量具(如砝码、标准电池、固定电容器)、多值量具(如毫米分



度的线纹米尺)和成套量具(如量块组、标准电阻组)。量具根据其自身准确度的高低,又可分为基准、标准和工作量具。

**基准:**用现代科学技术水平能达到的最高准确度来复现和保存计量单位的计量器具叫做基准。它由国际和各国的最高计量部门保存,在国际上,基准由设在法国巴黎的国际计量局(BIPM)保存,在我国由中国计量科学研究院保存。基准可分为国家基准、副基准和工作基准。

国家基准是具有现代科学技术水平能达到的最高准确度的计量器,经国家鉴定并批准,作为统一全国计量单位量值的最高依据。国家基准又称为主基准。

副基准是通过直接或间接与国家基准比对来确定其量值并经国家鉴定批准的计量器具,它在全国复现计量单位的地位仅次于国家基准。

工作基准是经过与国家基准或副基准比对,并经国家鉴定,用以检定计量标准的计量器具。设立工作基准的目的是不使国家基准和副基准由于使用频繁而丧失其应有的准确度。

**标准:**又称为工作标准,按国家规定的准确度等级,作为检定依据的计量器具或物质。

**工作量具:**供给日常测量使用的计量量具,按其准确度高低不同分为若干个等级。在电学计量中经常使用的工作量具有标准电池、标准电阻、标准电容和标准电感。

## 2. 基准的定值与国际比对

基准器的定值首先要将公认的国际计量局保存的实物基准与绝对测量的结果相比较,得出与理论值相接近的程度,由此定出该基准器的值,并由它定出各国主基准的值,以保证测量数据的统一。但实物基准随时间的推移是有变化的且各国主基准的变化不近相同,为此国际计量局每三年进行一次电学单位的国际比对,并公布各国电单位与国际计量局电单位间的差值,以此来保证国际上电单位的统一。

实物基准是用来复现和保存单位的。经过多年的实践证明,标准电阻与标准电池(复现和保存电压单位“伏特”)是最好的电学实物基准,也是电量计量中最主要的两项实物基准。

标准电阻是复现和保存电阻单位“欧姆”的。国际上电阻基准是由一组高稳定性的、名义值为  $1\Omega$  的锰铜电阻器组成,表 1-7 给出了国际计量局、美国和中国保存的标准电阻的主要技术指标。

表 1-7 国际计量局、美国和中国保存的标准电阻的主要技术指标

组织名称	年变化率	单个年变化率	与国际平均欧姆的差值
国际计量局	—	$1 \times 10^{-7}$	—
美国	$10^{-8}$	$1 \times 10^{-7}$	$0.2\mu\Omega$
中国	$10^{-8}$	$2 \times 10^{-7}$	$0.5\mu\Omega$

标准电池是用来保存“伏特”单位。我国于 1965 年建立起伏特基准组,它由 20 个饱和硫酸镉标准电池组成,常年保存在温度为  $20 \pm 0.005^\circ\text{C}$  的恒温油槽中。单个电池的电动势相对于基准组平均值的年变化小于  $0.5\mu\text{V}$ 。我国伏特基准组与国际计量局保存的伏