

李慎安 编著

s mol kg
m A K cd

量、单位和运用

t
n
m
l
I
T
L_v



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

量、单位和运用

李慎安 编著

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

科技书刊量、单位和运用/李慎安编著. —北京: 中国计量出版社, 2005. 11

ISBN 7—5026—2255—1

I. 科... II. 李... III. 计量单位—基本知识 IV. TB91

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 150581 号

内 容 提 要

本书根据 2005 年《国际单位制 (SI)》第八版的新修订内容以及我国现行文件和标准, 对量和单位使用中的一般规则做了较详细的介绍, 也涉及到科学技术中量和单位运算中的问题。可以满足传媒工作中以及科技工作和教学中的需要。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

850 mm×1168 mm 32 开本 印张 8.5 字数 220 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 26.00 元

前 言

量和单位都不是什么新鲜事物。如要追溯，可至远古。但随着人类历史的发展，交往的需要，近半个世纪以来，其规范化、统一化的进程加快了。虽然改变人们长期以来的传统习惯需要时间，国家之间和学科、行业之间的统一存在难度，但在人们共同的期望下，成绩斐然，令人鼓舞。为此，国内外的有关书籍已出版不少，有的还不断在补充修订，如国际计量局自1967年以来，出版的《国际单位制（SI）》至今已修订到第八版。中国计量出版社一直关注这一发展动向，出过一些专著。

我们这几个20世纪80年代的老朋友，过去也都写过这方面的专著和论文，他们是维新、大中、兰凤、寿星。这次携手合著此书，用意在于想搞个在当前来说较为完整和实用的小册子，以满足传媒和科技领域的需要，包括教学。是否做得合适，由读者来评说。这本书把运用作为主题，读者会发现它有某些特点，正是如此，本书内容上必然存在一些尚有争议和错误之处，尚祈海内外专家学者不吝指正。意见请交由本书出版社编辑部转，至为感激！

作者

2005年10月

目 录

1 有关量和单位的基本概念	(1)
1.1 量	(1)
1.1.1 量的定义与分类	(1)
1.1.2 量的特点	(2)
1.1.3 同类量	(3)
1.1.4 量制	(3)
1.1.5 国际量制	(3)
1.1.6 基本量	(4)
1.1.7 导出量	(4)
1.1.8 量纲	(5)
1.1.9 无量纲量、量纲 1 的量	(6)
1.2 单位	(7)
1.2.1 单位; 测量单位; 计量单位	(7)
1.2.2 基本单位	(7)
1.2.3 导出单位	(8)
1.2.4 单位制	(8)
1.2.5 一贯导出单位	(8)
1.2.6 一贯单位制	(9)
1.2.7 单位一	(11)
1.2.8 倍数单位	(12)
1.2.9 分数单位	(12)
1.2.10 主单位	(13)
1.3 物理方程	(13)

1.3.1	物理方程	(13)
1.3.2	量方程	(13)
1.3.3	单位方程	(15)
1.3.4	数值方程	(16)
1.4	数值	(17)
2	国际单位制与我国现行法定计量单位	(20)
2.1	国际单位制	(20)
2.1.1	SI 的定义	(20)
2.1.2	一贯 SI 单位	(21)
2.1.3	SI 单位	(28)
2.1.4	有关 SI 词头的规则	(30)
2.1.5	可与 SI 并用的非 SI 单位	(33)
2.1.6	可与 SI 并用的物理常量	(33)
2.1.7	特殊场合可用的其他非 SI 单位	(35)
2.1.8	SI 的优越性	(38)
2.2	法定计量单位	(49)
2.2.1	法定计量单位	(49)
2.2.2	有关推行法定计量单位的意见	(52)
2.2.3	非法定计量单位的使用	(55)
2.3	单位的使用规则	(56)
2.3.1	名称	(56)
2.3.2	单位符号	(57)
2.3.3	量值及其中的单位	(60)
3	量名称与量符号	(63)
3.1	量名称	(63)
3.1.1	系数、因数或因子	(63)
3.1.2	参数或参量; 数; 比或比率	(64)
3.1.3	级	(65)
3.1.4	常量或常数	(65)
3.1.5	其他常用形容词和术语	(66)

3.1.6	量名称的常见错误和问题	(69)
3.2	量符号	(73)
3.2.1	一般规则	(73)
3.2.2	量符号的组合	(75)
3.2.3	附加记号	(76)
4	量值的修约、单位换算与完整表述	(85)
4.1	量值的修约	(85)
4.1.1	近似值有效位的确定	(85)
4.1.2	数值修约的规则	(86)
4.1.3	对不确定度修约值的特殊规定	(88)
4.2	量值的单位换算	(89)
4.2.1	换算的一般原则	(89)
4.2.2	准确值的换算	(91)
4.2.3	近似值的换算	(91)
4.2.4	给出了测量不确定度的测量结果的换算	(93)
4.2.5	数值方程的单位换算与选择	(97)
4.2.6	极限值的单位换算	(110)
4.2.7	英制公差值换算	(112)
4.2.8	量值运算中的单位变化	(114)
4.2.9	一贯 SI 单位间单位的等效	(131)
5	不同单位制之间的单位换算	(137)
5.1	工程单位制与 SI	(137)
5.1.1	工程单位制的构成	(137)
5.1.2	质量的单位与计算	(138)
5.1.3	密度和比体积	(146)
5.1.4	压强与应力	(148)
5.1.5	粘度	(151)
5.1.6	能	(154)
5.1.7	流体力学和热力学中的应用	(159)
5.2	电、磁学中的不同量制和单位制	(161)

5.2.1	概述	(161)
5.2.2	电、磁学公式的合理化	(168)
5.2.3	建立电、磁单位制的基本公式	(173)
5.2.4	CGSe 制	(175)
5.2.5	CGSm 制	(178)
5.2.6	高斯制	(180)
5.2.7	乔吉制、MKSA 制和 SI	(186)
5.2.8	单位变化与方程式的转换	(188)
5.2.9	CGSB 制与 CGSF 制	(199)
5.3	原子单位制	(200)
5.4	英制单位与单位制	(202)
5.4.1	概述	(202)
5.4.2	英尺磅秒制	(207)
5.4.3	英尺磅力秒制	(207)
5.5	米吨秒制	(208)
6	一些常见单位和量的有关说明	(209)
6.1	按单位符号字母顺序排列的说明	(210)
6.2	非法定单位	(236)
6.3	非规范化的量及所对应的单位	(259)

1 有关量和单位的基本概念

1.1 量

1.1.1 量的定义与分类

量 (quantity) 的定义: 现象、物体和物质的, 能够赋值的特征。

定义中所谓“赋值”, 其含义可理解为通过测量可以给出一个测量结果, 即量值。也就是量应是可以定量描述的物理特征。通常把量作为物理量 (physical quantity) 的简称, 也曾作为可测量 (measurable quantity) 的简称。

量的概念可分为两个层次。

(1) 广义量 (general quantity) 即具有一般概念的量 (general concept)。例如: 半径 r , 波长 λ , 能 E , 动能 E_k , 热量 Q , 电阻 R , B 的物质的量浓度 c_B , 粒子 B 的数浓度 C_B 等。而例如固体表面硬度这一物理现象与量的定义不符, 不能称之为量, 但由于国际上已予以量化而可表达为一个数值 (不是量值), 亦被列入量的概念之中, 如洛氏硬度 HRC。

(2) 特定量 (particular quantity) 即具有特指概念 (individual concept) 的量。例如: 某给定圆 A 的半径 r_A 或 $r(A)$, 钠的 D 谱线波长 λ_D 或 $\lambda(D; Na)$, 给定系统中质点 i 的动能 $E_k(i)$, 某水样 i 的汽比热 Q , 基本电荷 e , 给定电路 i 的电阻 R_i , 样品 i 中的乙醇的浓度 $c_i(C_2H_5OH)$, 样品 i 中的红血球数浓度 $c_i(Erys, B_i)$, 某钢材样品 i 的洛氏硬度 $HRC(i)$ 。

1.1.2 量的特点

(1) 通过量方程相互联系

量与量之间的定量关系式称为量方程 (equation between quantities; quantity equation), 例如质量为 m 的物体, 运动速度为 v 时的动能 E_k 之间的量方程为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

使用量方程进行量的运算时, 必须代入相应的量值而不是数值。既然量方程独立于单位, 在给出量方程时, 则不应指明或规定各量的单位。

(2) 量独立于单位

在广义量的定义中, 不得涉及单位。例如, 我们不能把速度 v 定义为“每小时所经过的距离”, 也不能定义为“单位时间内所经过的距离”。

特定量的量值或其估计值也同样独立于单位。例如, 真空中的光速 c , 既可以用单位 m/s 也可以用单位 ft/s 或 km/s 等给出。

(3) 量独立于测量方法

量方程只是量之间的关系式, 虽往往可用于量的定义, 但并不意味着其测量方法。只有那些量化的物理现象, 是在特定的实验条件下得出其数值的。例如 pH, 布氏、洛氏硬度等。

(4) 可用计量单位定量描述

也就是说可以表达为数 and 单位之积。对于无量纲量来说, 例如摩擦因数 μ , 相对密度 d , 耦合因数 k , 磁化率 κ , 质量分数 w , 相对原子质量 (原子量) A_r , 看来似无单位而只用数来描述, 无论在何种单位制中它们的单位是 1 或其倍数与分数, 例如 10^3 , 10^{-3} 等。

(5) 非计数的量

可以计数的量在计量学中称为计数量 (numerical value) 以区别于物理量。例如, 产品件数, 人口数, 资产, 它们的单位是计数单位: 件、口、人民币元等。但由于物理学中有些计数的量进入量方程, 在 ISO 31 中作为量列入而且也给予了规范化的量符号。例如: 绕组的匝数 N , 原子序数 Z , 相数 n , 核子数 A , 分子或其他基本单元粒子数 N 等, 但它们的一贯 SI 单位均为 1。与其他量构成组合形式的单位时, 也都是 1 而不是计数单位。例如, 粒子数密度 n 的一贯 SI 单位为 m^{-3} , 而不是个/ m^3 。

1.1.3 同类量

同类量 (quantities of the same kind) 指彼此能按大小排列的那些量。

在给定量制中, 同类量的量纲相同。但量纲相同的量不一定是同类量。例如, 力矩 M 与功 W 的量纲相同, 但非同类量。同类量应是能相互比较的。虽然有些量的一贯 SI 单位相同, 却不能相互比较。例如: 电流 I 与磁通势 F , 其一贯 SI 单位均为 A, 但并非同类量。

1.1.4 量制

量制 (system of quantities) 是相互间存在不矛盾方程组 (non-contradictory equations) 的一组量。

与量的定义不符, 通过量化才能给出一个值的那些量。例如各种不同的固体表面硬度, 称为量化值 (ordinal quantities), 通常不认为是量制的一部分, 因为它们与量制中的其他量不构成量方程。量制往往有给定的所覆盖的学科或领域。

1.1.5 国际量制

国际量制 (International System of Quantities, ISQ) 是作为国际单位制 (SI) 基础的量制。

目前，它以 7 个量作为基本量，用于导出全部物理量的量制。这 7 个量是：长度 l , x , r 等；质量 m ；时间 t ；电流 I , i ；热力学温度 T ；物质的量 n ；发光强度 I_v 。它是在有了国际单位制后出现的。

1.1.6 基本量

基本量 (base quantity) 是按协议所选定的用于在量制中定义其他量的几个相互独立的量。

基本量之间必须是彼此独立的，它们之间不存在量方程。由于它们不可能为导出量所定义，因而在这个量制中基本量是没有定义的量。

基本量的数量必须能充分地导出其所属量制中全部的导出量，否则应予增加。

1.1.7 导出量

导出量 (derived quantity) 是量制中用基本量的函数所定义的量。包括间接地为基本量所定义。在国际量制中，除 7 个基本量之外，其余量均为导出量。下面就是一部分导出量的定义方程。

速度 $v = dl/dt$ ；力 $F = md^2l/dt^2$ ；动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ；势能

$E_p = mgh$ ；相对密度 $d = \rho/\rho_0$ 。

式中： l —— 距离 (基本量)；

t —— 时间 (基本量)；

m —— 质量 (基本量)；

g —— 重力加速度 (导出量)；

h —— 高度 (基本量)；

ρ —— 密度 (导出量)；

ρ_0 —— 参考密度 (导出量)。

但如果把电流 I 和物质的量 n 按如下式定义，则是错的。

$$I = P/U \text{ 或 } I = Q/t;$$

$$n = N/N_A$$

式中: P —— 功率 (导出量);

U —— 电压 (导出量);

Q —— 电荷 (导出量);

t —— 时间 (基本量);

N —— 分子数、粒子数、基本单元数 (计数量);

N_A —— 阿伏伽德罗常量 (导出量)。

其所以错, 在于用了导出量给基本量定义。无疑上述这类关系式是成立的, 只不过不能作为定义方程 (参见 1.1.6 节)。

1.1.8 量纲

量纲 (quantity dimension; dimension of a quantity; dimension) 是由基本量的幂积所表示的导出量与基本量间的定性关系式。

某个量 Q 的量纲, 可表示为 $\dim Q$ 。

国际量制中 7 个基本量的量纲符号按规范为一种较特别的正体大写字母, 如表 1-1。

表 1-1 ISQ 基本量量纲符号

基本量	量符号	量纲符号
长度	l	L
质量	m	M
时间	t	T
电流	I	I
热力学温度	T	Θ
物质的量	n	N
发光强度	I_v	J

在 ISQ 中, $\dim Q$ 的通式为

$$\dim Q = L^a M^b T^c I^d \Theta^e N^f J^g$$

由于只是个定性概念，表示量纲时系数只为 1。上式中的指数 $\alpha, \beta, \dots, \zeta, \eta$ 称为量纲指数 (dimension exponent)。

例如：面积 A 的量纲为 $\dim A = L^2$ ；

加速度 a 的量纲为 $\dim a = LT^{-2}$ ；

力 F 的量纲为 $\dim F = LMT^{-2}$ ；

功、热、能的量纲为 $\dim W = \dim Q = \dim E = L^2 MT^{-2}$ 。

基本量的量纲称为基本量纲 (base dimension)，而导出量的量纲称为导出量纲 (derived dimension)，导出量纲来源于其定义方程，但其量方程中的系数，例如动能 E_k 的定义方程中的 $\frac{1}{2}$ ，在量纲中一律不再出现。在量和单位中，量纲也是构成一贯单位制的基础。

1.1.9 无量纲量、量纲 1 的量

量纲 1 的量 (quantity of dimension one) 是量纲指数全部为零的量。

无量纲量的量值只是一个数。

无量纲量 (dimensionless quantity) 一词起源于量纲指数为零，而量纲 1 的量反映了 $\dim Q = 1$ 。例如：平面角 $\alpha, \beta, \gamma, \theta$ 等；立体角 Ω ；线应变 ϵ ；折射率 n ；摩尔分数 x_B 。

在 ISQ 中，所有导出量纲，其量纲指数均为整数而不像过去曾在电磁学中使用过的 3 量纲制其中出现不少分数。因此，量纲指数是可以按数学规则运算的。 $\dim Q = 1$ 就是运算的一种结果。例如相对密度 d ：

$$\begin{aligned}\dim d &= \dim \rho / \dim \rho_0 \\ &= L^{-3} M / L^{-3} M \\ &= L^{3-3} M^{1-1} \\ &= L^0 M^0 \\ &= 1\end{aligned}$$

本来, 这里的“1”并非量纲而是量纲的运算结果。经过数学运算简化了的量纲, 往往不能反映与基本量纲间的关系。例如, 运动粘度 ν 的量纲为 $\dim \nu = L^2 T^{-1}$, 看来, ν 与长度 l 的二次方成正比而与时间 t 成反比, 实际上, 它是同动力粘度 η 成正比, 与密度 ρ 成反比。在核验量方程等号两边的量纲是否相同时, 有赖于量纲的数学运算。在运算中, 无量纲量的量纲均按“1”处理。

1.2 单位

1.2.1 单位; 测量单位; 计量单位

单位 (unit; measurement unit; unit of measurement) 是为给出其他同类量大小的量值而约定采用的某一标量。

因此, 单位是在同类量中约定选出的一个参考量, 它恒为标量而非矢量。为使用上的方便, 除了约定其名称外, 往往需要一个符号。即使不是同类量, 但它们具有相同量纲时, 可以有相同的单位, 但往往为了避免混淆而约定为不同的单位名称与符号。

例如: 热容 C 与熵 S , 虽然 $\dim C = \dim S = L^2 M T^{-2} \Theta^{-1}$, 然而它们并非同类量。虽然如此, 它们的一贯 SI 单位均为 J/K。然而吸收剂量 D 、剂量当量 H 和比能 e , 虽有: $\dim D = \dim H = \dim e = L^2 T^{-2}$, 但它们的单位分别为 Gy, Sv 和 J/kg, 而不能相互代替。这类问题必须充分注意。

1.2.2 基本单位

基本单位 (base unit; base measurement unit) 是在给定量制中, 为基本量所约定采用的单位。

本书 1.1.6 节强调了基本量之间彼此的独立性。但这绝不意味着在基本单位之间也必定是彼此独立的。

基本单位也可用作某些导出量的单位, 这时, 导出量的量纲为基本量纲。例如: SI 中的基本单位 A, 既是基本量电流 I 的

单位，也同时是导出量磁通势 F 的单位；基本单位 mol 既是基本量物质的量 n 的单位，也是反应进度 ζ 的单位；基本单位 kg 既是基本量质量 m 的单位，也是惯性力抗 X_m 除以角频率所得力质量 M 的单位；降水量定义为降水的体积 V 与相应的覆盖面积 A 之比，即 V/A ，其一贯 SI 单位为 m，与基本量长度 l 的基本单位一样。

1.2.3 导出单位

导出单位 (derived unit; unit for a derived quantity) 是在给定量制中导出量的单位。

导出单位必定是这个单位制中基本单位的幂积，但有时，有非一的因数，而构成了非一贯导出单位。当因数只为一时，在运用量方程进行运算时最为方便。

为了使用上的方便，往往给一些导出单位约定了专门名称。例如在 CGS 制中，导出量力 F 的单位为 $\text{cm} \cdot \text{g}/\text{s}^2$ ，给予了一个专门名称达因，符号 dyn，定义为 $1 \text{ dyn} = 1 \text{ cm} \cdot \text{g}/\text{s}^2$ ；在 SI 中，导出量力 F 的一贯 SI 单位 $\text{m} \cdot \text{kg}/\text{s}^2$ 也有个专门名称牛顿，符号 N。这类单位在一些规范中称之为“有专门名称的导出单位”以别于那些由基本单位和导出单位按组合形式给出的导出单位。

1.2.4 单位制

单位制 (system of units) 是指在给定量制中约定选择的一组基本单位与导出单位以及它们的倍数和分数单位。并包括有关它们的应用规则。

因而，对某一量制可以形成若干单位制。例如，覆盖运动学和力学领域的，以长度、质量和时间作为基本量的量制中，由于基本单位的选择不同而有：CGS 制 (cm-g-s 制)；FPS 制 (ft-lb-s 制)；MTS 制 (m-t-s 制)；MKS 制 (m-kg-s 制)。又如以长度、力和时间作为基本量的量制中，有：ft-lbf-s 制；

m - kgf - s 制; m - kp - s 制。

1.2.5 一贯导出单位

一贯导出单位 (coherent derived unit) 为按因数为 1, 由基本单位的幂积所构成的导出单位。

例如 CGS 制中:

面积 A 的单位 $\text{cm}^2 = \text{cm} \cdot \text{cm}$

力 F 的单位 $\text{dyn} = \text{g} \cdot \text{cm}/\text{s}^2$

动力粘度 η 的单位 $\text{P} = \text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$

运动粘度 ν 的单位 $\text{St} = \text{g}/\text{cm}^2$

无量纲量的一贯导出单位在任何单位制中都是 1 (one)。

SI 中的导出单位都是一贯导出单位。

1.2.6 一贯单位制

对于给定量制中的导出量的单位都是一贯导出单位的单位制。

例如: CGS 制, SI, FPS 制, MTS 制等都是一贯单位制 (coherent system of units)。这一概念中, 不包括其中一贯导出单位的倍数和分数单位。

一贯导出单位的构成, 都通过其定义方程所给出的量纲式, 把量纲中的基本量纲代之以基本单位, 见表 1—2。采用这一方法时应注意补充必要的无量纲量的单位, 如平面角和立体角的单位。

表 1—2 ISQ 量制导出量的量纲与一贯单位

量的名称与符号	量纲	一贯导出单位
速度 v	$\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$	m/s
角速度 ω	T^{-1}	$\text{s}^{-1} = \text{rad}/\text{s}$
力 F	LMT^{-2}	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 = \text{N}$
功 W , 能 E , 热量 Q	$\text{L}^2 \text{MT}^{-2}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = \text{J}$