

热工流体力学 单位制 基础

钱增源 编著

科学出版社

热工流体力学单位制基础

钱增源 编著

科学出版社

1982

内 容 简 介

本书系统介绍单位制建立的一般问题、一贯制单位制的建制原则和方法等基础知识；以国际单位制为重点介绍各种力学单位制和热学单位制；深入考察热工流体力学工程计算中的单位和单位换算问题。

本书可供广大青年读者自修单位制基础知识，供从事热工流体力学有关专业的科技人员作单位制换算的工具性手册，同时也可供大专院校有关专业的师生参考。

热工流体力学单位制基础

钱增源 编著

责任编辑 陈文芳

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982 年 6 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1982 年 6 月第一次印刷 印张：4 7/8

印数：0001—7,000 字数：109,000

统一书号：15031·404

本社书号：2584·15—10

定价：0.78 元

前 言

每一门学科,甚至每一篇科技论著都要涉及到测量单位,热工流体力学所使用的单位尤其种类繁多。关于单位和单位制的论述虽很多,但都零星分散在各种专业著作中,而且专业论著往往只用少量篇幅从某一特定角度加以叙述,缺乏对单位制全面、系统的介绍。早年有过少数几本关于测量单位的译文^[1,2],都是依据五十年代的外文版本,无论从内容上,还是从发行数量上都已远不能满足要求。目前国内尚没有一本专门讨论热工流体力学单位和单位制的书籍。

六十年代初,国际单位制问世。二十年来世界各工业发达国家先后向国际单位制过渡,至今多数已接近完成,国际单位制逐渐成为国际科技交流的统一单位制,其优点正日益显露。在国内,国际单位制刚刚开始使用,还没有用计量立法的形式固定下来。当前在热工流体力学领域是几种单位制同时存在,因此在单位换算中时而发生困难,甚至出现单位混乱和计算错误。随着四个现代化建设的进程,国内外学术交流将有较大的发展,单位制的问题会更加突出,看来尽快推广统一的国际单位制已势在必行。单位制的问题涉及到教育、科研、生产、计量等国民经济各个部门,是当前科技界普遍关心的问题之一。

这本小册子比较系统地介绍了单位制建立的一般问题、一贯制单位制的建制原则和方法、各种力学单位制和热学单位制,着重介绍了国际单位制;深入讨论了热工流体力学工程计算中的单位和单位换算问题。目的是为自修专业知识的广

大青年读者提供一些系统的单位制基础知识，为从事热工流体力学有关专业的科技人员提供一个单位制换算的工具性手册；同时从热工流体力学的专业角度促进国际单位制的推广应用。这对于大专院校有关专业的师生也有一定的参考价值。

清华大学王补宣教授在百忙中对本稿作了认真的审阅和修改，在此表示衷心的感谢。

作 者

1981年2月

目 录

前言	iii
第一章 建立单位制的一般问题	1
1-1 物理量的单位选择	1
1-2 基本单位,导出单位,单位制	3
1-3 科技界现行的各种单位制	4
1-4 十进制单位和国际制词冠	5
1-5 导出单位的量纲式	7
第二章 力学单位制	11
引言	11
2-1 国际单位制	11
一、国际单位制的基本单位和辅助单位	12
二、国际单位制的导出单位	13
2-2 厘米·克·秒制	25
一、厘米·克·秒制的基本单位	25
二、厘米·克·秒制的导出单位	25
2-3 米·千克·秒制	26
一、米·千克·秒制的基本单位	26
二、米·千克·秒制的导出单位	28
2-4 米·吨·秒制	28
2-5 工程单位制	29
一、工程单位制的基本单位	29
二、工程单位制的导出单位	30
2-6 不同单位制的力学单位换算	38
一、国际单位制与厘米·克·秒制之间的单位换算	38
二、国际单位制与工程单位制之间的单位换算	41
第三章 热学单位制	47

引言	47
3-1 热学基本单位	47
3-2 热学导出单位	50
3-3 不同热学单位的换算	60
第四章 热工流体力学的制外单位	66
引言	66
4-1 质量和重量	66
4-2 密度,比容,比重	69
4-3 力,压力	72
4-4 功,能,功率	73
4-5 英制单位	79
第五章 热工流体力学的单位制换算	83
引言	83
5-1 热力计算中的单位制换算	83
5-2 流体力学的单位制换算	87
5-3 热工流体力学计算式的单位换算	91
一、国际单位制与现行单位换算时保持不变的计算式	93
二、单位换算时常系数有变化的计算式	94
三、系数有量纲的计算式的单位换算	96
四、国际单位制与现行单位换算时参量有所变化的计算公式	98
五、准则与准则公式的单位换算	101
结束语	105
附录	106
I. 重要物理常数表	106
II. 单位换算系数表	107
III. 热工流体力学现行单位与国际单位制的单位换算表	119
IV. 英制单位与国际单位制换算表	129
V. 英制单位与现行单位换算表	144
参考文献	150

第一章 建立单位制的一般问题

1-1 物理量的单位选择

科学研究与工程技术工作都离不开对各种各样物理量的测量。所谓对某一物理量作测量，就是将它与另一个同类量作比较，而后者就是测量单位。一般说来，物理量的单位可以任意地、互不相关地选择。但是，任意选定的物理量单位在实用中并不一定方便，而不方便的单位就没有生命力。因此需要合理地进行物理量的单位选择。

现在我们首先来讨论单位选择问题。假定我们选择“米”作为测量长度的单位，同时我们还可以任意地选择时间单位——“秒”和质量单位——“千克”，因为长度、时间、质量这三个物理量互相独立无关。当我们选定了长度单位和时间单位之后，怎样选择速度单位呢？

我们知道，速度 v 与所通过的路程的长度 s 及时间 t 之间存在匀速直线运动的关系式

$$v = K \cdot \frac{s}{t} \quad (1-1)$$

或者从 t_1 时刻的行程 s_1 到 t_2 时刻的行程 s_2 ，速度为

$$v = K \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = K \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

于是，变速直线运动的瞬时速度为

$$v = K \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = K \frac{ds}{dt} \quad (1-1a)$$

式中, K ——比例系数.

如果令 $K = 1$, 则 (1-1) 和 (1-1a) 式可分别简化为

$$v = \frac{s}{t} \quad (1-2)$$

和

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1-2a)$$

由于已经选定长度单位为 1 米, 时间单位为 1 秒, 因此以上两式中速度单位都得确定为 1 米/秒.

如果我们象选择长度单位和时间单位那样, 也任意选择速度单位, 比如选用 1 千米/小时 (公里/小时), 那么由 (1-1) 式得到

$$1 \frac{\text{千米}}{\text{小时}} = K \frac{1 \text{ 米}}{1 \text{ 秒}}$$

即

$$K = \frac{\text{千米/小时}}{\text{米/秒}} = \frac{\text{千米} \cdot \text{秒}}{\text{米} \cdot \text{小时}} = \frac{1000 \text{ 米} \cdot \text{秒}}{3600 \text{ 米} \cdot \text{秒}} = \frac{5}{18}$$

可见, 如果选择长度单位为米, 时间单位为秒, 速度单位为千米/小时, 那么 (1-1) 式中的比例系数 K 将不等于 1, 而等于 $\frac{5}{18}$. 匀速直线运动公式 (1-1) 可改写为

$$v = \frac{5}{18} \frac{s}{t} \quad (1-3)$$

显然, 如果我们选择的速度单位不是千米/小时, 而是完全独立的, 与米、秒无关的任意单位, 那么 (1-1) 式中的比例系数 K 不仅不等于 1, 而且还应有量纲.

比较 (1-1) 至 (1-3) 式发现, 速度单位选择不恰当, 将使计

算公式复杂化,造成许多不方便。因此,任意选择速度单位是不合适的。速度单位最好利用匀速直线运动的速度公式来确定,而令其比例系数等于1。诸如此类的测量单位还有很多,例如加速度、力、能,等等。

1-2 基本单位,导出单位,单位制

实践中除了少数几个物理量,它们的单位有可能独立选择外,其他物理量的单位几乎都是利用相应的物理公式来选定的。

借以确定某物理量的测量单位的物理公式或方程,称为定义方程。

$$v = \frac{s}{t}$$

是速度单位的定义方程; $F = ma$ 是确定力单位的定义方程; $A = F \cdot s$ 是确定功单位的定义方程;

$$N = \frac{A}{t}$$

是功率单位的定义方程,等等。

测量单位可以独立地、互不相关地任意选择的物理量,称作“基本量”,如长度、质量、时间。基本量的测量单位称作“基本单位”,如米、千克、秒。

测量单位凭借定义方程来确定的物理量叫作“导出量”;而导出量的测量单位叫作“导出单位”。所谓“导出量”和“导出单位”,是指它们可通过定义方程由基本量和基本单位推导出来。

基本单位和导出单位的总和,称为物理量的测量单位制,简称单位制。

单位制中基本单位的数量越多,在物理方程中有量纲且不等于1的比例系数的数量也增加。如前所述,如果把速度单位也独立选取作为基本单位,那么(1-1)式中的 K 将有量纲而且不等于1,这样的单位制显然使用很不方便。基本单位的数量太少,同样对单位制的使用带来不方便。人类长期的科学技术活动和生产实践证明:对于不同的科技领域建立有三个或者四个基本单位的单位制是最合理的。

建立一种单位制,选用哪些物理量作为基本量,选用哪些单位作为基本单位,一般来说是任意的,完全着眼于该单位制在科技领域和国民经济某个部门实用上是否方便。

1-3 科技界现行的各种单位制

在人类长期的生产实践和科学技术活动中,不同国家在不同时期选用了各种各样不同的测量单位,建立了许多不同的单位制,而且出现许多制外单位。这种测量单位不统一的状况,严重地阻碍了各专业之间的科技交流,妨碍新的科研成果直接在工程技术领域迅速推广,尤其对科技领域内的国际交往造成严重的障碍。长期以来,人们一直在寻求一个统一的、合理的、国际通用的单位制。

目前我国使用的单位制大致有以下几种:

在力学方面主要有:

米·千克·秒制, MKS 制(又称实用单位制),它的基本单位是长度单位——米(m),质量单位——千克(kg),时间单位——秒(s)。

厘米·克·秒制, CGS 制(又称物理单位制),它的基本单位是长度单位——厘米(cm),质量单位——克(g),时间单位——秒(s)。

米·千克力·秒制, MKGFS (又称工程单位制), 它的基本单位是长度单位——米(m), 力单位——千克力(kgf), 时间单位——秒(s)。

扩展到热学和分子物理学领域, 还要增加一个基本单位, 即温度单位——度($^{\circ}\text{C}$)和引进制外单位, 即热量单位——卡(cal)。

扩展到电、磁学方面, 也要在力学基本单位的基础上增加相应的基本单位, 如在电学中增加电流单位——安培(A), 而构成米·千克·秒·安制, 即 MKSA 制, 又称绝对实用单位制。

在国外, 主要在英语国家, 长期使用英制单位。

1960 年 10 月第十一届国际计量大会, 通过了一个国际上通用的、对一切科技领域和所有物理-工程计量都适用的统一单位制, 称为国际单位制(Système International d'Unités), 缩写为 SI。它的基本单位共有七个, 是长度单位米(m), 质量单位千克(kg), 时间单位秒(s), 电流单位“安培”(A), 热力学温标“开尔文”(K), 物质的量的单位“摩尔”(mol) 和发光强度单位“坎德拉”(cd)。另外, 还有两个补充单位: 平面角单位——“弧度”(rad) 和立体角单位——“球面度”(sr)。

1-4 十进制单位和国际制词冠

各种单位制中, 任何一个物理量单位, 无论是基本单位还是导出单位, 为了计算方便, 除了它的主单位外, 还有一定数量的比主单位大或比主单位小的单位。譬如在国际单位制中, 长度的主单位是米, 比米大的单位有千米(公里), 比米小的单位有分米、厘米、毫米、微米等。它们之间的关系是

$$1 \text{ 千米} = 1000 \text{ 米}$$

$$1 \text{ 分米} = 0.1 \text{ 米}$$

$$1 \text{ 厘米} = 0.01 \text{ 米}$$

$$1 \text{ 毫米} = 0.001 \text{ 米}$$

$$1 \text{ 微米} = 10^{-6} \text{ 米}$$

其他各种物理量单位也都可以组成各种大单位或小单位,或者叫倍数单位或约数单位。在多数单位制中,许多单位也象长度单位米那样采用十进制的倍约关系,这样的单位称作十进制单位。由十进制组成的倍数单位或约数单位用十进制词冠表示。经国际协议共有 16 个这样的词冠,称为国际制 (SI) 词冠,列于下表。

国际制 (SI) 词冠

因 数	词 冠		代 号
	中 文*	英 文	
10^{18}	壤	exa	E
10^{15}	秭	peta	P
10^{12}	埃	tera	T
10^9	京	giga	G
10^6	兆	mega	M
10^3	千	kilo	k
10^2	百	hecto	h
10	十	deca	da
10^{-1}	分	deci	d
10^{-2}	厘	centi	c
10^{-3}	毫	milli	m
10^{-6}	微	micro	μ
10^{-9}	纤	nano	n
10^{-12}	沙	pico	p
10^{-15}	尘	femto	f
10^{-18}	渺	atto	a

* 采用中国物理学会名词委员会关于大小数命名法的意见 (见物理, 第 8 卷, 第 6 期, 1979 年 12 月)。

在各单位制中另外有一些单位是非十进制单位，譬如时间单位秒、分、时、日。非十进制单位不如十进制单位使用方便，但由于历史原因，一直沿用至今。英制单位基本上是非十进制的单位，所以正在逐渐被淘汰。

1-5 导出单位的量纲式

前面已经提到，各种单位制中的导出量或导出单位，可以通过定义方程由基本量或基本单位推导出来。现在我们来进一步研究这个问题。

作为定义方程的物理公式应该是基本量的直接函数，或者经过顺序叠代可以表示为基本量的直接函数。以力学方面的导出量为例，我们可以举出下列一些定义方程：

$$v = \frac{s}{t}; \quad a = \frac{v}{t}; \quad F = ma;$$

$$p = \frac{F}{s}; \quad A = F \cdot s; \quad N = \frac{A}{t}; \dots$$

如果我们在建立单位制时选定长度、质量和时间作为基本量，而把它们相应的主单位选作基本单位，那么在上述方程中，速度 v 是长度和时间的直接函数；而其余的量，如加速度 a 、力 F 、压强 p 、功 A 、功率 N 等，都可以通过顺序叠代表示为长度、质量和时间的直接函数。例如：

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{v}{t} = m \cdot \frac{s}{t^2} = m \cdot s \cdot t^{-2}$$

这种用基本量直接表示的导出量的公式称作该导出量的量纲式。通常用大写字母来表示基本量的量纲，即用 L 表示长度量纲，用 M 表示质量量纲，用 T 表示时间量纲；用符号 $\dim$ (dimension) 表示导出量的量纲。因此力的量纲应改写为

$$\dim F = L M T^{-2}$$

如果我们把国际单位制(SI)的基本单位,即米(m),千克(kg),秒(s)代入上述力的量纲式,而用方括号表示力的导出单位,则得出

$$[F] = [m \cdot kg \cdot s^{-2}]$$

这种用基本单位直接表示导出单位的公式,称作该导出单位的量纲式。在国际单位制中,力的单位被命名为牛顿(N),所以

$$[F] = [N] = [m \cdot kg \cdot s^{-2}]$$

同样可以写出其他物理量的量纲式和它们在国际单位制中的导出单位的量纲式。例如功的量纲式为

$$\dim A = L^2 M T^{-2}$$

代入国际单位制的基本单位,得到功的导出单位量纲式为

$$[A] = [m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}]$$

讨论了导出单位的量纲式以后,应该着重指出:

(1) 在不同的单位制中,选用的基本量和基本单位是不同的。所以同一个物理量由于使用的单位制不同,会有不同的量纲式和不同的单位。对于基本量不同的单位制,同一物理量的量纲式完全不同,譬如同一物理量在国际单位制和英制中有完全不同的量纲式。对于基本量相同的单位制,同一物理量的量纲式也相同。例如国际单位制、米·千克·秒制、厘米·克·秒制都采用长度、质量、时间作为基本量,在这些单位制中同一个物理量的量纲式将完全相同。例如功的量纲式在这三种单位制中都是 $\dim A = L^2 M T^{-2}$ 。国际单位制(SI)与米·千克·秒制(MKS)在力学单位制中采用相同的基本单位,都是米、千克、秒,因而它们的力学导出单位的量纲式也相同,例如物理量功的导出单位在这两种单位制中的量纲式都是 $[A] = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$ 。国际单位制与米·千克·秒制在力

学范围内是重合的。

CGS 制中采用的基本单位是厘米、克、秒, 所以功的导出单位的量纲式在 CGS 制中就应是 $[A] = [\text{cm}^2 \cdot \text{g} \cdot \text{s}^{-2}]$ 。显然, 国际单位制中功的单位要比 CGS 制中功的单位大 $(100)^2 \times (1000)^1 \cdot 1^{-2} = 10^7$ 倍。

(2) 如上所述, 物理方程中的比例系数与单位选择有关。在单位制中作为定义方程的那些物理方程的比例系数, 我们都令其等于 1 ($K = 1$), 用连续顺序叠代的办法由基本单位推导出导出单位。这种导出单位称作“一贯”导出单位。由基本单位和一贯导出单位构成的单位制称作一贯单位制。一贯制结构是建立各种单位制的一个重要原则。国际单位制是目前运用这一原则最合理、范围最广泛的单位制, 它适用于所有科学技术领域和国民经济各个部门。

在一贯单位制中, 当我们应用物理方程时, 如果全部物理量都使用主单位, 那么就能保持比例系数等于 1, 由已知量的主单位值直接求得未知物理量的主单位数值。反之, 如果使用比主单位大的倍数单位或比主单位小的约数单位, 那么物理方程中的比例系数就不等于 1, 即出现单位换算问题。本章第一节中提到的匀速直线运动的速度方程就是一个明显的例子, 使用的速度单位不是主单位米/秒, 而是千米/时, 结果导出换算系数为 $\frac{5}{18}$ 。

另外, 在一贯制单位中用作定义方程的那些物理方程的比例系数总是无量纲的。因此, 在热工流体力学或其他物理计算中, 应该把全部物理量换算到同一个单位制, 并且用主单位数值运算, 以保持方程中的比例系数无量纲、而且等于 1。掌握这一原则可以帮助我们少出许多差错, 并节省运算时间。

(3) 大多数物理方程在单位制中被用作定义方程, 但并

非全部。少数物理方程并不是定义方程，因而它们有不等于 1 的带量纲的系数。例如，万有引力公式

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

以国际单位制为例，它用长度单位、质量单位、时间单位为基本单位。而力的单位已由牛顿第二定律导出。因此在万有引力方程中，比例系数 G 不仅不等于 1，而且有量纲，它的量纲是

$$\begin{aligned} [G] &= \frac{[F] \cdot [r^2]}{[m^2]} = \frac{[N] \cdot [r^2]}{[m^2]} \\ &= \frac{\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} = [\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}] \end{aligned}$$

系数 G 称为万有引力常数，它的数值由实验测定：

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \left(\frac{\text{米}^3}{\text{千克} \cdot \text{秒}^2} \right)$$

因此，有些物理方程在单位制中未被作为定义方程，它们的比例系数不等于 1，而且是有量纲的。这些比例系数都具有明确的物理意义，它们的数值往往由实验来测定。