

国际单位制的形成、建立和发展

沈 乃 澂

(中国计量科学研究院,北京 100013)

国际单位制是目前被国际组织和世界各国普遍接受的一种通用的计量单位制,它在国际关系、人民生活、学校教育以及科学技术中产生了显著的影响。诚然,在单位制的发展中,由于历史的原因,有些单位制目前尚未废除,仍在并行使用中,但在精密科学技术领域中,广泛而统一使用国际单位制,已是必然发展的趋势。我国已正式颁布了在全国范围内使用国际单位制的法令。本文的目的是为了使广大科技工作者,包括大中学校的学生更深入了解国际单位制的建立过程及其发展的前景,以便更好地在全国使用和推广这种科学的单位制体系。

一、国际单位制的起源

国际单位制是1960年第十一届国际计量大会上正式通过并命名的,至今仅有三十年的历史。但它的形成是一个漫长的过程。它起源于米制单位,是米制单位的继承和发展。

在生产和科学技术发展的历史长河中,曾前后建立过各国各自的不同单位制,在十七和十八世纪期间,形形色色的计量单位制度已严重地妨碍了各国的贸易和国际交往以及科学技术的交流。19世纪初期,法国人开创了米制,并逐渐向全世界普及。在此基础上,法国政府于1869年邀请一些国家派代表到巴黎召开“国际米制委员会”会议。1872年8月,24个国家的代表在巴黎开会,同意在“巴黎档案局”保存的米尺和千克砝码作为米和质量的单位基准,并将所制造的复制品分发与会各国,这项工作后因法俄战争而中断。

1875年5月20日,法国政府召集了20个国家参加的“米制外交会议”,正式签署了“米制公约”,并成立了“国际计量委员会”,致力于准备米和千克原器和各种复制品的制造工作。1899年召开了第一届国际计量大会,批准了米和千克这两个原器,并将国家原器分发各成员国。会议决定,原器保存在巴黎国际计量局,该

局将成为今后国际比对和传播米制的中心。国际计量大会闭幕期间,由国际计量委员会领导国际计量局的工作。

二、单位制的形成过程

物理学是一门实验科学,为了准确地描述各种物理现象,引入了“物理量”的概念。它们是一些数学实体,如质量、力和能量等,是根据实际测量而加以定义的。引入这些物理量后,可根据它们之间的数学关系来描述物理现象。这些关系有的称为物理定律,有的则视为物理量的定义。

物理学家麦克斯韦认为,“每个物理量都可以表示为一个纯数和一个单位的乘积”。单位是选定参考量,所有同类量均用它表示。量与单位之比为一个纯数,是该量以单位所表示的值。这里引入的单位和相应的物理量一样,具有抽象的数学性质。

由于物理学是近代最精密的科学,选择各种物理量单位是极其重要的。根据物理学理论,要求所有单位能形成一个逻辑体系,用以进行物理量和物理定律之间各种关系的整个数学表示。从米制发展到国际单位制的漫长历史,是与物理学的发展密切相关的。

在建立任何一个物理量的单位时,总面临

解决两个问题：一是如何确定最方便的单位，二是用什么实物体现这个单位的标准。原则上，可以对每一个物理量单独地选择一个单位。但为了整个单位制体系的逻辑合理性，需要建立一种由某几个“基本单位”构成的一贯单位制。

1. 厘米克秒单位制和实用单位制的产生

力学现象是物理学的基础，在力学范畴内，选用三个基本量：长度、质量和时间就可描述全部力学的物理方程。厘米克秒制就是以它们的单位为基础的。所以选定厘米和克代替米和千克的原因是，1立方厘米的水的最大密度的温度时所具有的质量恰好为1克。

三个基本单位确定后，根据一贯性的要求就可以确定所有其他单位——称为导出单位。例如速度(厘米/秒)和动量(克厘米/秒)等，均可按一贯性给予定义。

考虑到电学现象时，产生一些新的问题，高斯引入了以厘米克秒制为基础的“绝对”电学单位制，即用力学量来定义电学量。实际上，电磁现象可以由两个互不相关的方程系来描述：两个磁极之间力的距离平方反比定律或两个电荷之间力的距离平方反比定律。韦伯于1851年对每一个方程系都确定了一种一贯性的“绝对”单位制，称为电磁单位制和静电单位制。物理学家用上述单位制，建立了电阻标准，并用它测量了其它电学量。

但是，电磁厘米克秒单位的量值太小，因此，后来采用了某些“实用”单位，即电阻单位欧姆，电动势单位伏特。它们分别等于相应的电磁厘米克秒制单位的 10^9 和 10^8 倍。1881年巴黎第一届国际电学大会批准了这一决议，并引入了更为实用的单位——电流单位安培，它等于相应电磁厘米克秒制单位的十分之一。1893年芝加哥会议上，根据电学的实物基准，对欧姆、伏特和安培给予了“法定”定义。1908年在伦敦召开的国际电学大会上，正式决定采用这些以实物基准为依据的一整套“国际”电学单位制。

2. 基本单位的扩展

在只用三个力学基本单位的厘米克秒单位

制中，作为导出单位的电学量的单位，表达式中常带有分数指数。例如，电流的电磁厘米克秒单位是 $\text{cm}^{1/2} \cdot \text{g}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，或者出现一些不易理解的单位表达式，如电阻单位为 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这已显示了基本单位的个数太少所出现的矛盾。

物理学家逐渐相信，电学的麦克斯韦方程应写成四量纲形式，即包括一个电学量在内的四个基本单位。在麦克斯韦方程组中再加上一项更改是合理的。在磁相互作用力的定律中引入一个比例常数，即真空磁导率，它的数值为 $4\pi \times 10^{-7}$ ，就使麦克斯韦方程组写成有理化形式了。

经过科学家和国际组织的长期讨论，国际计量委员会于1935年决定如下两点：

(1) 在写成有理化形式的方程中的真空磁导率，定义为 $4\pi \times 10^{-7}$ 牛顿每安培平方。其中，牛顿是在米千克秒单位制中引入作为力的单位的新名称。

(2) 根据两平行导线之间的力规定的安培的定义，是导出其它所有实用电学单位最适合的基础。

上述工作受到二次大战干扰而中止，1948年1月1日又正式肯定了上述决定，并正式采用实用电学单位。

3. 国际单位制的产生

二次大战后，各国的国际合作，商业往来和科技交流更为密切，促进了单位制进一步统一的工作。

当时共存的单位制有：法国采用的米吨秒制；在技术领域普遍采用的工程米制，即米千克秒制；物理学家使用的厘米克秒制；以及在英美两国使用了几个世纪的英制，即英尺磅秒制。

国际理论与应用物理协会及其符号、单位和名称委员会，曾表示应该在国际交往中采用一种“国际实用单位制”，并以米千克秒和一个电学单位为基础。

国际计量委员会应1948年第九届国际计量大会的要求，在科学技术领域和负责教育的机构中开展了国际征询。1954年第十届国际计量大会根据征询意见作出决定，这种国际实

用制应以六个基本单位为基础，它们是米、千克、秒、安培、开尔文和坎德拉。其中前两个单位的意见与1948年通过的决定是一致的。关于后两个单位的选择理由也作了说明。为了在物理学中描述热的现象，无论从系统性的理由还是计量学的理由，都必须引入一个新的基本量：热力学温度。根据热力学理论，利用卡诺循环，两个系统的热力学温度之比可以由两个热量之比来确定。如对特定物理状态的热力学温度赋予某一数值，即可定义这个单位。1948年第九届计量大会选定水的三相点作为这个物理状态，1954年第十届计量大会定义的三相点相应的热力学温度为273.16 K，此外，光强度这个物理量，也确定为一个基本单位。它定义在某指定温度下，黑体特定面积的垂直方向上的光强度。1948年第九届国际计量大会作了决定，后来又作出了修改形式。

1960年第十一届国际计量大会，将1954年采用的以六个基本单位为基础的单位制命名为“国际单位制”。对于所有作为导出单位的其他物理量，虽然给了专门符号，也可以用基本单位来表示。此外，弧度和球面度定名为“辅助单位”，既可把它们当作基本单位，也可以当作导出单位。基本单位、导出单位和辅助单位，总称为SI单位。这里的SI是普遍采用的国际单位制(International System)的法文字母的字头缩写。这一组SI单位构成了一个一贯单位制。这种单位制直接同作为现代物理学、化学和技术的基础的整个代数方程组相联系。SI单位还包括一组词冠符号，用来构成它的十进倍数单位和分数单位。

三、基本单位的定义和沿革

1960年正式决定使用SI制时，确定有六个基本单位，它们的定义如下：

(1) 长度单位(米)，(1960年第十一届国际计量大会通过)

“米等于氪-86原子的 $2P_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的 $1\,650\,763.73$

个波长的长度”。

(2) 质量单位(千克)，(1889年第一届国际计量大会批准了国际千克原器，并宣布今后以这个原器为质量单位)。

为了避免“重量”一词在通常使用中意义上发生含混，1901年第三届国际计量大会在一项声明中规定：

千克是质量的单位，它等于国际千克原器的质量。

(3) 时间单位(秒)，(1960年第十一届国际计量大会通过)

秒为1900年1月0日(即1900年1月1日)起算的回归年的 $1/31\,556\,925.9747$ 。

(4) 电流单位(安培)，(1948年第九届国际计量大会通过)

安培是一恒定电流，若保持在处于真空中相距1米的两无限长而圆截面可忽略的平行导线内，则此两导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿。

这里已将原条文中“米千克秒(MKS)制力的单位”改成了第九届国际计量大会所通过的“牛顿”。

(5) 热力学温度单位(开尔文)，(1954年第十届国际计量大会通过)

热力学温度单位开尔文是水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

1954年第十届国际计量大会通过的温度为开氏度(符号 $^{\circ}\text{K}$)。1967年第十三届国际计量大会通过了以开尔文的名称(符号K)代替开氏度(符号 $^{\circ}\text{K}$)。除以开尔文表示的热力学温度(符号T)外，也使用由式 $t = T - T_0$ 定义的摄氏温度(符号t)，按定义，式中

$$T_0 = 273.15\text{K}.$$

T_0 可近似地认为是水的冰点的热力学温度，它与水三相点的热力学温度相差0.01K。“摄氏度”这个单位与单位“开尔文”相等，而摄氏度是一个专门名称，用来代替“开尔文”表示摄氏温度。摄氏温度间隔或温差，既可以用摄氏度表示，也可以用开尔文表示。

(6) 光强度单位(新烛光)，(1948年第九

届国际计量大会通过)

全辐射体在铂凝固温度下的亮度为 60 新烛光每平方厘米。

第十一届国际计量大会在关于确定国际单位制方面作出了一些决定,现择要分列于下:

(1) 以上述六个基本单位为基础的单位制称为“国际单位制”;

(2) 该单位制名称的国际符号为“SI”;

(3) 倍数与分数单位的名称用下列词冠构成(见表 1)。

表 1

单位的倍乘因数	词 冠	符 号
10^{12}	太	T
10^9	吉	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^2	百	h
10^1	十	da
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳	n
10^{-12}	皮	p

表 1 列出了平面角和立体角两个辅助单位;以及面积、体积和频率等 27 个导出单位,并表示不排除今后增添其它单位。

在 1960 年以来的 30 年内,由于物理学各个分支学科的发展,使上述定义的基本单位也发生了很大的变化,长度(米)、时间(秒)、发光强度(坎德拉)均作了重新定义,并增加了一个新的基本单位——物质的量(摩尔)。电流单位和温度单位虽未更改定义,但与它们定义有关的物理量也具有显著的变化。现将 1960 年后新通过的定义列举如下:

(1) 长度单位(米), (1983 年第十七届国际计量大会通过)

“米是 1/299 792 458 秒的时间间隔内光在真空中行程的长度”。

(2) 时间单位(秒), (1967 年第十三届国际计量大会通过)

“秒是铯-133 原子基态的两个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”。

(3) 热力学温度(开尔文)的定义未改,但用开尔文代替了开氏度。

(4) 物质的量单位(摩尔), (1971 年第十四届国际计量大会通过的新添的基本单位)

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 原子数目相等。

在使用摩尔时应指明基本单元,它可以是原子、分子、离子、电子及其它粒子,或是这些粒子的特定组合。

摩尔的这个定义同时严格明确了以摩尔为单位的量的性质。

(5) 光强度单位(坎德拉)

1967 年第十三届国际计量大会通过了一个与原定义类似的修订定义。1979 年第十六届国际计量大会通过了如下新定义:

坎德拉是频率为 540×10^{12} 赫兹的单色辐射源在给定方向上的光强度,该方向上的辐射强度为 1/683 瓦特每球面度。

SI 单位有严格的书写原则,书写其单位符号用罗马字体表示,一般用小写,但是,如果符号是专用名称,则用大写罗马字体(第一个字母)。这些符号后面都不加标点,导出单位借助乘和除的数学符号通过代数式用基本单位表示,有些导出单位已具专门名称和特有符号,这些专门名称和符号本身又可以用来表示其它导出单位,从而比基本单位表示更简单一些。

如上所述,基本单位有七个:长度(m),质量(kg),时间(s),电流(A),热力学温度(K),物质的量(mol)和光强度(cd)。有 11 个导出单位的符号和单位是用基本单位表示的,它们是:面积(m^2),体积(m^3),速度(m/s),加速度(m/s^2)波数(m^{-1}),密度(kg/m^3),电流密度(A/m^2),磁场强度(A/m), (物质的量)浓度(mol/m^3),比体积(m^3/kg)和光亮度(cd/m^2)。此外,有 18 个导出单位具有专门名称,它们是:频率(Hz),力(N),

压力 (Pa), 能、功、热量 (J), 频率辐通量 (W), 电量、电荷 (C), 电势、电压、电动势 (V), 电容 (F), 电阻 (Ω), 电导 (S), 磁通 (Wb), 磁感应 (T), 电感 (H), 摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$), 光通 (lm), 光照度 (lx), (电离辐射) 活度 (Bq), 吸收剂量 (Gy)。这些单位的中文名称读者是熟悉的, 在此不再列出, 其他 18 个导出单位可以基本单位和专用名称的导出单位表示, 不再列举, 两个辅助单位的定义为:

平面角 (弧度, rad)。

弧度是一个圆内两条半径在圆周上截取的弧长与半径相等。

球面度是一个立体角, 其顶点位于球心, 而它在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积。

辅助单位可以把它们当作基本单位, 也可看作导出单位。因为它们纯系几何单位。

四、用不变量定义基本单位的发展趋势

从 1875 年米制公约的建立到 1960 年采用国际单位制的 85 年中, 基本单位的定义是以经典物理学(主要是牛顿力学)为基础的。一杆铂铱合金米尺、一个铂铱合金制的砝码, 定义了长度和质量的单位; 用地球绕太阳的公转周期定义了时间单位; 用导线之间的作用力定义电流单位, 实际上是用标准电池的电压和标准电阻来保持和复现电单位。这个时期是用宏观实物或宏观物理现象当作“不变量”来定义基本单位的。

进入 20 世纪以来, 由于原子物理学和量子力学的发展, 物理学从宏观世界进入到微观世界领域。人们在研究微观领域的规律时, 发现其中的量子效应比宏观现象具有更好的不变性。我们知道, 电子在原子中运动时, 当它受到外界作用时, 其能量会发生变化。这种变化是不连续的, 形成若干能级, 电子可以在允许的能级之间跃迁。跃迁时的能量变化 $\Delta E = h\nu$, 其中 h 是一个恒定的数值, 称为普朗克常数。人

们还发现, 在特定条件下的许多跃迁, 其辐射频率是非常稳定和重复的, 是很理想的不变量, 十分适合用来定义计量单位。

60 年代后, 上述思想开始实现。1960 年规定用氪 86 原子的 $2P_{10}$ 到 $5P_5$ 能级之间跃迁的真空波长的倍数来确定米的新定义, 以代替铂铱米尺。1967 年规定用铯 133 原子的超精细结构的之间的跃迁的频率来定义秒, 以代替用地球公转的天文时。电单位也已用量子跃迁的有关效应来监测, 如以超导约瑟夫森效应的能级跃迁来复现和定义电压单位, 以量子化霍尔效应的跃迁来复现和定义电阻单位。用量子效应定义单位的准确度, 均能或可望达到 10^{-8} 或 10^{-9} 量级以上的水平。这是因为, 微观世界的不变量比宏观实物和宏观现象要稳定得多。因此, 近 20 年来在计量学领域内所取得的进展远远超过以往 85 年的总和, 为基本单位从宏观实物或现象过渡到用原子世界中量子效应来定义打下了坚实的基础。

如上所述, 在原子能级跃迁中, 辐射频率是一个很好的不变量, 如铯原子钟的准确度已达到 10^{-14} 的水平。但能级跃迁由于要受到周围物理环境影响使其频率发生一定的变化, 这种现象称为频移。目前, 人们正在研究采用孤立的单个离子或原子的能级跃迁, 若能使它在极低的温度下工作, 有希望达到十分理想的结果, 预期的准确度可达 1×10^{-15} 甚至更高, 用这种效应制成的钟三千万年不差一秒, 比目前号称手表之王一年不差一秒的石英表的准确, 还要提高三千万倍。因此, 物理学家和计量学家普遍认为, 频率是当今人类测量最准确的物理量。

除此之外, 物理学家和计量学家经长期实验和理论研究, 又找到一类很好的不变量, 它可以与频率媲美, 这些量称为基本物理常数。这些常数的数值并不随地点和时间而异, 即在世界各地甚至包括宇宙空间内普遍适用。例如真空中光速 c 是一个基本物理常数, 无论是太阳发出的光, 还是遥远星系来的光, 或者是蜡烛之光, 它们的光速都是一样的。再如牛顿引力定

律中的引力常数 G 也是一个基本物理常数, 无论是太阳与九大行星之间的引力, 还是两个小球之间的引力, 它们的 G 值也是相等的. 基本物理常数的不变性反映了自然界的一定规律, 许多著名的物理定律中都含有重要的基本物理常数. 如相对论的许多公式中会有光速 c , 量子效应的公式中会有许多公式中会有普朗克常数 h , 引力定律中含有引力常数 G , 等等.

既然基本常数有很好的不变性, 它们能否用来定义基本单位呢? 早在本世纪初, 著名物理学家普朗克就提出过这样的设想, 但限于当时的科学技术水平, 无法实现他的理想. 自 60 年代开始, 这种设想正在逐步变成现实. 长度、质量、电单位、物质的量等单位都有可能用基本物理常数来重新定义. 第一个正式用常数定义的基本单位是长度米. 1983 年通过的长度米的新定义, 是用真空中光速和时间(或频率)来定义的. 因此在重新定义米的讨论中, 决定用准确测量的激光频率值 f , 通过规定的基本常数光速的数值 $c = 299\,792\,458$ 米/秒来导出激光波长 $\lambda = cf$, 从而复现长度单位米. 用频率和基本常数 c 来重新定义米, 有力地说明了用频率和基本常数来重新定义基本单位的趋势, 已由研

究阶段逐步走向实用阶段.

自 1990 年 1 月 1 日起, 国际上正式采用以约瑟夫森效应和量子化霍尔效应为基础的电学计量单位. 其中采用约瑟夫森常数

$$K_{j-90} = 483597.9 \text{ GHz/V.}$$

冯克里青常数 $R_{\lambda-90} = 25812.807 \Omega$. 我国也已决定正式采用这个决定. 采用上述决定后, 我国电压单位量值增大 8.90×10^{-6} , 电阻单位量值增大 1.53×10^{-6} , 相应的电流单位量值增大 7.37×10^{-6} . 虽然, 这项决定并未修改基本单位电流的定义, 但由于电流单位实际上依赖于电压和电阻的校准值来复现的. 因而, 上述改值也直接影响到电流单位的复现, 从发展眼光看, 未来的电单位基本单位也会依赖于基本常数作出新的定义.

我们相信, 随着科学技术的迅速发展, 将会有更多的基本单位采用这种方法来重新定义. 即用频率和基本常数作为不变量来定义基本单位.

物理学家和计量学家的目标是不断探索新的更完善的不变量作为基本单位的定义. 不变量越是恒定, 才能觉察和探索自然界任何细微变化的规律, 使人类真正成为自然的主人.

国家超导中心召开高温超导无源微波器件研究工作专题讨论会

研究表明, 优质钇钡铜氧高温超导薄膜的表面电阻很低, 在 10GHz, 77K 时的典型值为 $500 \mu\Omega$, 远低于同样温度下金、银、铜等正常金属的数值. 因此, 人们正在加紧研究各种类型的高温超导无源微波器件, 如谐振器、滤波器、延迟线、相移器等, 并将它们应用到国防、通信等部门中. 目前, 高温超导谐振器的 Q 值最高可达 30000(2GHz); 有人在 4GHz, 3% 的带宽内利用高温超导微带线制成切贝雪夫滤波器, 其插入损耗为 0.3dB, 而用金制成的同样的器件的插入损耗达 2.5dB; 在 10GHz, 10% 的带宽内, 由高温超导微带线和 PIN 管组成的数字式相移器与铜所制成的同样器件相比, 插入损耗要低 0.4—0.6dB. 这些例子充分说明了高温超导无源微波器件具有广阔的应用前景. 当然, 随着频率的提高, 超导薄膜的表面电阻也会增大(实验中已观察到理论所预言的与频率平方成正比的变化趋势), 甚至超过正常金属的表面电阻. 目前一般

把这一频率上限取为 100GHz, 因此由于表面电阻很低, 高温超导无源微波器件大多是长毫米波段以下的器件.

为了制出无源微波器件, 要求超导薄膜有较大的面积, 并且在这一较大的范围内性能均匀一致. 例如, 为了使超导延迟线能提供足敷实际应用的延迟量, 它应该有足够的长度, 面积过小的薄膜是无法胜任的. 另外, 为了制出高温超导微带线, 应要求在基片的两面成膜. 这些都给高温超导薄膜的制备提出了新的要求.

为了进一步推动我国高温超导无源微波器件的研究工作, 国家超导技术联合研究开发中心于 1990 年 10 月 16 日至 17 日在北京召开了专题讨论会, 到会代表 50 余人. 会上, 17 位研究人员报告了国内外研究情况, 并进行了充分的讨论和分析, 研究了相应的措施. 相信今后我国有关的研究工作将会更上一层楼.

(南京大学信息物理系 吴培亨)