

采用自然恒量的新国际单位制

(北京大学 朱星 编译自 David B. Newell. *Physics Today*, 2014, (7): 35, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

目前使用的国际单位制(SI)于1960年正式颁布,其历史渊源来自于法国大革命时代的米制。新的度量衡系统存在一个统一度量的起点——米——用此定义长度、体积和质量。米的定义来自于一个自然恒量——通过巴黎的地球子午线从北极到赤道距离的一千万分之一。体积和质量的单位由此推导出来,升定义为 0.001 m^3 ,千克是1升蒸馏水在 4°C 时的质量。其后,在1799年,根据这些定义,两个铂制造的长度和质量标准器放置在了巴黎的法国档案馆。一个“用于永恒、受益大众”的新度量衡体系从此诞生。

76年之后,米制公约于1875年签署,成立了三个国际组织:国际度量衡总会(CGPM),国际度量衡委员会(CIPM)和国际度量衡局(BIPM),它们的官方职能是维护SI单位制。

SI是个充满活力、不断演化的单位制。随着新知识的更新和测量的需求而演变,尽管有时跟不上科学进展的快速步伐。高斯,韦伯,麦克斯韦和开尔文是新科学的创始者,他们协助扩展这个单位制,并且发展了一种与基本力学单位相容的概念框架,由此可以按需建立导出单位。这个单位制清楚地解释了如何通过测量实现基本单位,导出单位的组成为基本单位的乘积,前置因子为1。

现行的SI仍具备原有的框架,包括7个基本单位(以及相应的定义),22个具有明确名称和符号的导出单位。然而,国际共识是,我们

需要构建一个新的SI单位制,以反映当今物理世界的最新进展。下一代SI单位制的新框架不再定义7个基本单位,取而代之的是采用7个基本自然恒量的严格值,根据这些恒量,可以实现所有SI单位及其定义。这样,现行的所有基本单位和它们的定义都一去不复返了。

一个能描述物理测量的单位制必须考虑到所有物理量,以及与之相关的方程式。一个简单例子如下:

$$F=ma=mdv/dt=md^2x/dt^2, \quad (1)$$

其中所有变量为:力 F ,质量 m ,加速度 a ,速度 v ,长度 x ,时间 t 。这一关系是牛顿第二运动定律。

通过物理学定律,仔细选择独立基本量的一个子集可以推导出其他量。基本量的选择并非唯一的,但是它们必须是完备的,并且非冗余的。为了完整地定义单位制,我们必须对每个基本量定义一个独有的参考量。参考量也可以是一种特殊的器具,如在现行SI单位制中质量标准为一个国际千克原器(IPK)。

另外一例表现在质能关系式中

$$E=hc=h\nu=mc^2=eV=kT, \quad (2)$$

普朗克常数 h 、光速 c 、基本电荷量 e 以及玻尔兹曼常数 k 也是参考量,因为它们是具有特定数值的不变量。

在现行的SI单位制中有7个基本量:时间、长度、质量、电流、热力学温度、物质的量以及发光强度。表1为这些基本量及其定义。现行的SI单位制中的参考量是通过基本单位定义的:秒、米、千克、安培、开尔文、摩尔和坎德拉。

新的SI单位制也含有7个基本量:频率、速度、作用、电荷、热容量、物质的量和发光强度。特定参考量是一组定义常数的精确值:铯-133原子基态的超精细劈裂 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$, c , h , e , k , 阿伏加德罗常数 N_A , 以及光照度 K_{cd} 。然而,为了保证新旧单位制转换的连续性和易用性,这些数值将用现行SI单位制中的表达,以避免采用新的基本单位可能产生的混淆。表2为新的基本量、定义常量和相应的定义。

如表1与表2所示,SI单位制中现行的和未来的定义相似,特别是将现行的基本量“时间”和“长度”可以与新的基本量“频率”和“速度”相比较。这些定义是完全等效的,特别是对“发光强度”的定义。这种等效性是由于现行的SI已经将自然恒量作为其组成基础。事实上,如果国际千克原器(IPK)被暂时赋予一个自然不变量的身份,则所有现行基本单位的定义可以转换为新SI的形式。除了 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$, c , 和 K_{cd} 之外,其他4个量的定义写为:国际千克原器的质量 $m(K)$ 为严格的1千克;磁导率 μ_0 为严格的 $4\pi \times 10^{-7}$ 牛顿/安培²;水的三相点 T_{TPW} 为严格的273.16开尔文;碳-12的摩尔质量 $M(^{12}\text{C})$ 为严格的0.012千克/摩尔。

由于SI单位制随着科学技术的进展不断改进,或许可以认为迫在眉睫的新SI不过是另外一种形式的更新,其中所使用的“不变量” $m(K)$, μ_0 , T_{TPW} 和 $M(^{12}\text{C})$ 被 h , e , k 和 N_A 所取代。

表1 现行的SI单位制中的基本量、基本单位和定义

基本量	基本单位	定义
时间	秒	秒是铯-133原子在基态的两个超精细能级间跃迁9192631770个周期所持续的时间。
长度	米	光在真空中在时间1/299792458秒内所经路径的长度。
质量	千克	质量单位，等于国际千克原器的质量。
电流	安培	置于真空中的两个无限长导体中通过相同恒定电流，这两个间距为1米的导体平行摆放，其圆截面积可以忽略不计，在这两个导体之间每米长度上受力为 2×10^{-7} 牛顿时，导线中电流强度为1安培。
热力学温度	开尔文	热力学温度单位，为水在三相点的热力学温度的1/273.16。
物质的量	摩尔	体系中的物质的量，其中包含的基本单元等于在0.012千克的碳-12中所含的原子数，基本单元是原子、分子、离子、电子及其他粒子，或者这种粒子的组合。
发光强度	坎德拉	指在特定方向上，由一个频率为 540×10^{12} 赫兹单色光辐射，并且在此方向上的辐照强度为1/683瓦/球面度。

表2 新的SI单位制基本量，定义常量与定义

基本量	定义常量	定义
频率	$\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$	铯-133原子未受干扰的基态超精细劈裂频率 $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ 为严格的9192631770赫兹。
速度	c	光在真空中速度 c 是严格的299792458米/秒。
作用	h	普朗克常数 h 是严格的 6.626×10^{-34} 焦耳秒。
电荷量	e	基本电荷量 e 是严格的 1.602×10^{-19} 库仑。
热容量	k	玻尔兹曼常数 k 是严格的 1.380×10^{-23} 焦耳/开尔文。
物质的量	N_A	阿伏加德罗常数 N_A 是严格的 6.022×10^{23} /摩尔。
发光强度	K_{cd}	频率为 540×10^{12} 赫兹单色光辐射的发光能力 K_{cd} 是严格的683流明/瓦。

在数字中的X表示在SI单位制重新定义时将被确定的数位。使用“定义常数”是为了在更宽泛的范围中包含自然恒量。

新单位制的一个重要优点是具有严格的转换系数，将能量用焦耳、千克、米的倒数、赫兹、开尔文或者电子伏来表达都没有不确定度。不同单位的转换将不会造成附加的不确定度。例如，一位研究人员用千克描述某种颗粒的质量，而实际测量值却是电子伏或者赫兹。

建立在严格定义常量基础上的新SI框架将对国家计量机构和日常的计量产生影响。水的三相点 T_{TPW} 的数值将没有变化，但是增加了小于等于 1×10^{-6} 的相对不确定度。碳-12的质量没有变化，但是增加了 7×10^{-10} 的相对不确定度。国际千克

原器的质量数值 $m(K)$ 增加了 2×10^{-8} 的相对不确定度。

将SI单位制整体建立在自然恒量的设想已经酝酿了十多年。2011年第24届CGPM大会正式接收了CIPM的提案，新的SI单位制所定义的常量列于表2中。从那时起，国际计量团体做出重要的努力，以保证测量 h 、 e 、 k 和 N_A 中的减少的不确定性的一致性。2018年举行的第26届CGPM大会将接受新的SI单位制。

对于熟悉现行SI单位及其基本单位定义的教师或者其他人员来说，这种转换会更为困难。一般来说，物理教学从我们身边的经典力

学现象开始，然后过渡到经典电磁学。学习量子力学和狭义—广义相对论是高年级的内容。而使用新的SI时，在低年级讲课时，教师必须解释为什么质量这样平常熟悉的量会与普朗克常数相关。

对于计量和科研界，新SI单位制的意义更加深远。新修订后的SI的优势不仅是在测量单一数值，如1 kg或者1 A，而是能够通过使用一个单一的单位制，应用于25个数量级的范围中而本质上没有不确定度。

生产者可以按照需求，通过基本恒量的严格数值，利用工厂车间中可以使用的各种方法来实现他们的测量。比如，一个药厂可以使用微瓦天平测量剂量。这种天平可以连接到量子电学标准。而在传统的称量中，需要经过一系列标定，直到溯源到国际千克原器。

使用自然恒量作为我们测量单位制的基础，将为探索物理世界提供更加精密的工具，因而增加了发现新现象的可能性。或许未来人们会发现，这些基本自然恒量会随着时间变化。如果发生这种情况，SI单位制将随着新的知识进行调整。SI将成为一种普适测量的单位制，“用于永恒、受益大众”。