

# 国际单位制基本量的新定义

(北京大学 朱星 编译自 Benjamin Skuse. *Physics World*, 2018, (11): 32)

2018年11月国际单位制基本量的改革方案得到了官方批准。这标志着长期以来使用实体来定义基本量方式的终结，基本量将用自然界精确而不改变的常量定义。

在巴黎郊外一个地下8米深的环境严格控制的保险库中，143年以来保存着一个铂合金柱体。这个柱体高度仅仅39 mm，从来没有被人类的手触碰过。如同独特的俄罗斯套娃，这个柱体被放置在三层玻璃钟罩里，如果要进入这个房间，必须由三位不同的掌握钥匙人同时打开房门。在这个神秘物体周围，有六个用同样铂合金铸造的“相同”柱体。

尽管这种精心保护可以与“都灵圣体裹尸布”相匹敌，但这个柱体并不是神圣的宗教物品。它是国际千克原器(International Prototype Kilogram, IPK)，是唯一的千克测量参照物。这个放置于法国塞夫勒的国际度量衡局总部(BIPM)的IPK将很快失去其独特的地位，成为一个过去时代的遗物。与珍藏在BIPM的国际米原器(International Prototype Metre, IPM)一样失去其典雅的地位，IPM在1960年以前一直作为国际长度米的标准。

2018年11月16日，来自53个国家的计量学家和决策人聚集在法国凡尔赛的国际度量衡总会(the General Conference on Weights and Measures, CGPM)。该委员会每四年召开一次会议，常规讨论计量方面的预算等事宜。但是这次会议不同一般。成员国投票决定了接受SI(International System of Units (Système International))自1960年以

来最重大的变革。这项变革包括重新定义开尔文(kelvin)，安培(ampere)和摩尔(mole)，但是最重要的是千克(kilogram)的重新定义(图1)。

每个成员国投下一票，整个过程实时在线显示。全体成员都投了赞成票，这标志着使用实物作为基本单位的时代结束了，这种方法人类已经用了上千年。最终实现了麦克斯韦首先提出的建议，他预言：测量标准迟早要采用永恒不变的自然常量来定义。

## 牢固的基础

1870年，麦克斯韦在利物浦举行的英国科学促进会上指出，“如果我们需要得到长度、时间、质量的标准，其数值要保证绝对恒定不变，我们一定不能在我们居住的星球的尺度、运动或者质量中寻找，而是从那些不灭的、固定不变的并且全同的分子的波长、振动周期，以及绝对质量中寻找。”

国际单位制的重大改革已被批准，麦克斯韦关于“绝对恒定不变”标准的要

求将被实现。新的SI单位将于2019年5月20日正式实施，这正是1875年签署的第一个国际测量单位公约——米制公约实施144年之后。然而，为什么基于自然常量的单位制如此重要？

单位制是一个社会的基本，至少从古埃及时代就是如此。他们使用身体不同部位或者周围的物体作为测量的标尺。这些标准在不同地点或许有很大差别。对于17—18世纪的欧洲自然科学家来说，单位制的差异，特别是长度和质量，使得他们无法对比在不同地方测量的同一物理现象的结果。

人们做了各种尝试去建立通用的测量方法，1799年法国引入了米制，主要是两个单位——米和千



图1 现行的SI单位制有7个基本量：千克、米、秒、安培、开尔文、摩尔和坎德拉。如果按照计划，从2019年起，所有7个基本量将用自然常量来定义

克。标准米(Metre of the Archives)和标准千克(Kilogram of the Archives)保存在法国巴黎的国家档案馆里,作为法律上和实用上的定义单位。这两个标准物持续90年,直到被IPM和IPK代替,铂合金的标准物硬度更高,设计更合理。

#### 普适的共识

长期以来,SI单位制已经与科学融为一体。从用能量定义的焦耳到测量催化活性的酶活性单位卡塔尔(katal),SI单位制中所有29个单位可以用7个基本单位及其组合定义:秒、米、千克、安培、开尔文、摩尔和坎德拉。但是,随着20世纪以来科学变得更加精确,新的问题出现了。任何依赖于某个物体、实验或者现象的单位都是不稳定的。

考虑单位秒。历史上,秒与地球的自转有关,自转一个周期被定义为24小时,每小时60分钟,每分钟60秒。然而,如果地球转动减慢将会怎样?实际上地球转动确实在逐渐减慢。一天将会变长,因而每秒也会相应长一些。一辆速度为30 km/h的车辆的实际速度会慢些,

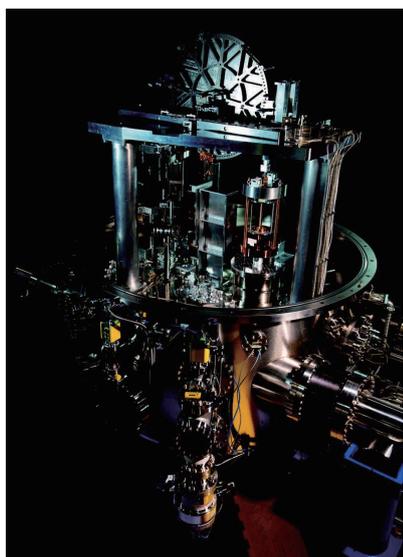


图2 Kibble天平

一个30 W的灯泡会暗些,更广义地,整个宇宙的膨胀速度会不同。

然而,如果一秒的概念和时长不变,但是地球自转不再出现在秒的定义中,而采用某些在宇宙中不管何时何地都不改变的量作为度量,那么秒就变成稳定的。正是在1967年,秒的定义改为铯-133原子基态的两个超精细能级 $\Delta\nu$ 间跃迁9192631770个周期所持续的时间。

其后在1983年,米也被重新定义了,米是光在真空中1/299792458秒内所经路径的长度。科学家从那时起使用这个高度精确值测量时间和距离,整个社会都受益,比如卫星定位系统GPS。

#### 普朗克常数来救场

尽管作为实物的千克原器为社会服务了143年,但是千克的定义本质上是不稳定的。即使千克原器IPK发生微小的增重或者减重,用千克表达的宇宙质量会发生巨大的变化。令人担忧的是,IPK确实在变化。计量学家测量了1988—1991年间,IPK的质量比周围6个对照物的质量平均值减少了50  $\mu\text{g}$ 。根据定义,这就是说对照物质量增加了一些,或许由于吸收空气中的分子。但是,其他国家的千克复制品质量也有增加。因此,很有可能IPK确实损失了质量。或者说,这些千克复制品与IPK均增加或者减少了质量,只不过变化速率不同。

在1991—2014年间,计量学家没有观测到IPK及对照物的质量漂移(最后测量时间为2014年)。但是,IPK及其参照物的质量没有漂移并不意味着其质量没有变化。它们或许同时增加或者减少质量。这个问题看来无解,原因是质量的测量总是溯源到IPK。

“选用修订后的SI单位制,我

们将不必担心这些问题。”BIPM质量部门原主任Richard Davis说(他现在是这个委员会的顾问)。与原来千克是用金属柱体的质量定义不同的是,新的SI千克是根据基本的量子物理常量:普朗克常数。

普朗克(Max Planck)发展了一种理论,即能量是以小包形式出现,被称为量子。普朗克常数 $h$ 将电磁辐射的一个量子与其频率相联系,通过著名的公式 $E=h\nu$ 。普朗克常数通过爱因斯坦的质能方程与质量联系起来。目前, $h$ 的测量值大约为 $6.62607 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$ ,但是计量学家希望固定这个数值,以导出千克的定义。

这样,人们就与这个物理上的不稳定物体IPK告别了,并且与普朗克常数的不确定性告别了。“重新定义后,普朗克常数被确定为一个固定的数值,回避了由于IPK质量变化产生的不确定度”,美国国家标准与技术局Stephan Schlamminger说,“使用确定的普朗克常数,可以研制精确度更高的千克标准”。

#### 如何精确测量普朗克常数

最开始的步骤是将与普朗克常数有关的数值尽可能的测量准确。权威性的测量依赖于两个不同类型的实验。第一个是Kibble天平(图2),以前称为watt天平。目前,仅有法国、加拿大、英国拥有Kibble天平,并且能够精确测定普朗克常数。然而,其他很多实验室正在构建他们自己的天平。如同其他高技术天平,Kibble天平使用浸没在磁场中的线圈产生的电磁力,来平衡千克质量。这套仪器使得计量学家获得电流和电压的精确值,从中可以导出普朗克常数。

另一种测量技术是X射线晶体密度法(XRCD),或称阿伏伽德罗

表1 新一旧SI单位制中基本量的定义对照表

基本量	基本单位	旧SI单位制	新SI单位制	转变的内容
质量	千克 (kg)	千克等于国际千克原器的质量。	千克将用普朗克常数的确定值 $h = 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ (单位也可以表示为: 焦耳秒 J s, $\text{J s} = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ )。此处米和秒分别由 $c$ 和 $\Delta\nu$ 所定义。	千克将用普朗克常数定义, 而不是用金属柱体(IPK)的质量所定义。
电流	安培 (A)	置于真空中的两个无限长导体平行摆放, 间距为1米, 其圆截面积可以忽略不计, 当通过相同恒定电流, 在这两个导体之间每米长度上受力为 $2 \times 10^{-7}$ 牛顿时, 导线中电流强度为1安培。	安培是用基本电荷 $e = 1.602176634 \times 10^{-19}$ (单位库伦) 所定义的, 库伦等于安培秒 (A s)。这里秒是由 $\Delta\nu$ 所定义。	安培的新定义是每秒钟有多少基本电荷通过。而旧定义是基于一个想象中而又无法实现的实验所定义, 涉及电流在两个无限长平行线中流动。
物质的量	摩尔 (mol)	体系中的物质的量, 其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, 或者这些粒子的组合。	一摩尔物质包含严格的 $6.02214076 \times 10^{23}$ 个基本单元。这个数字是阿伏伽德罗常数 $N_A$ , 单位为 $\text{mol}^{-1}$ 。	摩尔的新定义是以某个确定的原子或者分子个数定义的, 而不是直接与测量某个样品的质量相联系。
热力学温度	开尔文 (K)	开尔文是热力学温度单位, 定义为水在三相点时温度的 $1/273.16$ 。	开尔文 (K) 是用玻尔兹曼常数的固定值 $k = 1.380649 \times 10^{-23}$ 所定义的, 单位为 $\text{J K}^{-1}$ , 等价于 $\text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , 其中千克、米和秒分别通过 $h$ , $c$ 和 $\Delta\nu$ 所定义。	开尔文是通过联系热力学温度与能量的玻尔兹曼常数来定义的。而旧的定义涉及到水的液-固-汽三相共存点。

实验。将完整的硅-28晶体加工成几乎完美的1千克的球形。使用光学干涉仪, 计量学家首先计算外形直径, 由此推导出体积。然后, 将光学干涉仪与X射线分析技术相结合, 计算出原子间距, 每个占位的体积, 然后计算出整个球体中原子数目。最后, 称重球体可以确定阿伏伽德罗常数。这种处理方法可以定义在一摩尔物质中有多少原子或者分子——这是一个与质量很不同的量, 因此可以定义摩尔本身。使用原子物理中的公式, 可以将阿伏伽德罗常数与普朗克常数连接在一起, 因而获得普朗克常数的精确值。

世界上许多实验室使用这两种方法, 非常精确地测量普朗克常数。最终共同认可的数值是  $6.626070150 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$ , 相对不确定度仅仅为10 ppb。相应的阿伏伽德罗常数确定为  $6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。一旦普朗克常数和阿伏伽德罗常数确定, 获得数据的这个复杂设备则可以用做测量千克和摩尔的标准。

### 对于应用的冲击

解释这个过程最简单的方法是考虑Kibble天平。到现在为止, 这项技术用于精确测量电流和电压值, 然后将这两个值代入方程而得到普朗克常数。而未来实验中, 普朗克常数是个确定的值, 同样的测量将得到在天平上的物质质量。换句话说, 任何使用Kibble天平的人都可以实现理想的千克值。同理, 这种方法也可以应用于安培和开尔文值的测量, 将来的测量可以分别用电子电量  $e$ 、玻尔兹曼常数  $k$  来导出安培和开尔文。精确测量基本物理常量的仪器可以转而用来实现安培和开尔文单位(表1)。而对于其他单位, 如米、秒和坎德拉定义会有些调整, 但是本质上没有改变。

新的SI单位制除了对计量学有影响外, 对其他领域并没有直接的影响, 而普通公众不会注意到这些变化。虽然这些基本量的定义改变了, 但是人们的目标是保持它们的值不变。千克、开尔文、安培和摩尔的新定义完全依据自然常量, 因而使得它们数值保持不变, 容易获

得并且实用。因此, 科学家可以在任何地点、任何时间和任何尺度(数量级)测量这些基本量。

Schlamminger补充说, 我们第一次能够以相同的极高精确度测量微小或者巨大的量值尺度, 这是因为基本常量值与尺度大小无关。这是个很重要的问题。在重新定义米之前, 仅可能对一米左右的长度进行精密测量。但是, 在重新定义米以后, 在需要高精度测量的场合, 如微电子行业中, 将获得巨大的好处, 人们可以在任何微小尺度进行精密测量。

类似地, 新的千克定义使得人们可以用相同的精确度测量千克、克、毫克等, 甚至可以推广到用千克去测量原子质量。计量学家正在加紧制造Kibble天平等新装备, 用来在大尺度或者小尺度精确测量质量。因此, 新的质量单位和SI单位制可以普适性地满足21世纪的需要, 并且将在未来一直保持下去。Schlamminger恰如其分地总结说: “新的SI单位制是美好和逻辑的创新。”