

# 质量基本单位千克的定义演变及其意义

赵宇帆 冯杰

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2019-06-03)

**摘要:**千克的定义从米制公约起发展到国际千克原器,到现今基于普朗克常量的新定义,经历了200多年.新定义的最大特点是改变依赖实物的定义方式,基于自然常数,这是由于以实物定义具有不稳定性和不可靠性以及量值传递的不便性,且千克的重新定义使SI体系协调统一,并潜移默化地更新质量测量观.千克定义的演变无论对质量测量相关领域还是对大众对科学精神的不断认识都有着重要的意义.

**关键词:**千克 新定义 普朗克常量 质量 国际单位制

2019年5月20日,千克等4个基本单位的新定义正式生效,国际计量进入新时代.国际单位制是高中物理教学中不可忽视的内容,千克在基本单位中的地位举足轻重.了解千克的前世今生,有利于教师开拓自己的专业视野,建立教学中的“一桶水与一碗水”的关系.并体会在一个单位的演变过程背后所涉及的科学思想与科学方法的碰撞,以小见大,将不断探索、严谨求实的科学态度渗透到教学中去.

## 1 千克定义的演变历史

### 1.1 初具雏形——米制公约与档案千克

千克定义的由来可追溯至1790年法国人塔莱朗的十进制设想中.当时的法国科学院高度重视这一设想的提出,成立专门委员会进行研究,于1791年制定米制公约.其中规定一立方米纯水在4℃时的重量为千克.这是历史上首次尝试对千克这一度量单位做出标准化定义.

1792年至1799年间,档案千克诞生.档案千克是千克的标准原器,由法国天文学家德朗布和密仲用金属纯铂制成.法国国家档案馆将其收录保存.它的诞生为国际千克原器的出现提供了重大参考价值.

1875年5月,20多个国家应法国之邀出席巴黎外交会议.会上,各国共同签署米制公约,千克标准化定义的国际地位初具雏形.

### 1.2 承前启后——国际千克原器

金属铂的稳定性极佳,金属铱的抗腐蚀性极强,由此在1878年,设在法国巴黎的国际计量局向英国一家公司订购了3个铂铱合金圆柱体.它们于一年后被制成,分别被命名为“KI”“KII”“KIII”.1880年,经过科学家对3个柱体的精心测量校准,发现“KIII”这个高和底面积直径均为39 mm的正圆柱体与记录在册的千克质量完全吻合.1882年10月15日,“KIII”被官方确立为国际千克原器(the International Prototype of Kilogram, IPK)<sup>[1]</sup>.

1889年9月26日,第一届国际计量大会上,国际计量局正式批准将国际千克原器的质量定义为1千克.至此,千克有了国际层面上标准统一正式的定义,该定义意义重大影响深远,在计量历史上持续了近130年.

### 1.3 革故鼎新——普朗克常量的数值

近百年间,科学家不断反思推敲,发现了上述定义的局限性.2013年,国际质量及相关量咨询委员会制定计划重新定义千克,商榷出千克重新定义的

4个条件,起草了千克重新定义的指南<sup>[2]</sup>.

2018年11月13日—16日,在法国巴黎召开的第26届国际计量大会上,国际计量局颁布千克的新定义:千克(kg)是一个质量单位,其量值为固定普朗克常量的数值.即用普朗克常量定义千克,其量值为固定普朗克常量的数值精确地等于  $6.626\ 06 \times 10^{-34}$ .

重新定义的千克将于2019年5月20日正式实施.千克定义的发展历程如图1所示.

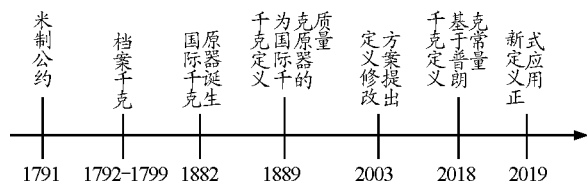


图1 千克定义的发展历程

## 2 重新定义千克之因

如前所述,以国际千克原器的质量定义千克持续了百年之久,一方面,这一定义使得千克在国际范围内得以正名,有了统一明朗而准确的定义,的确有着里程碑式的地位,另一方面,随着科学技术的不断进步,科学精神的日益丰富,这一定义的局限性逐渐浮出水面.

### 2.1 以实物定义的不稳定性

虽然由铂铱金属合金制成的国际千克原器本身具有稳定性、耐腐蚀性的优点,但是这一优点也是相对性的.国际千克原器诞生至今的100多年里,由于外界环境如灰尘、空气、光线、清洁等的影响加之其自身的微小变化,其质量改变了  $50\ \mu\text{g}$ <sup>[3]</sup>.这两万分之一改变似乎微乎其微,对千克的定义来说却是致命的.基准的变化意味着全世界所有的测量都不再准确.

### 2.2 量值传递的不便性

确立基准后,国际计量局将国际千克原器复制,保留6个作为官方复制品,将其余复制品作为国家千克原器分发至各个米制公约国.量值传递过程即为国际千克原器的复制和分发过程.然而,无论是开

始的复制过程,还是分发过程中的运输途径、保存方式,包括之后的校对,与原件的比较都带来了相当的挑战,增加了量值传递工作不便程度<sup>[3]</sup>.

### 2.3 以实物定义的不可靠性

国际千克原器作为看得见摸得着的实物,其真实性与客观存在性却同时也给其恒久的存在带来了潜在的威胁.二战期间,作为精神惩罚,战败国的国家千克原器被收回<sup>[4]</sup>.试想若是国际千克原器因某些不可控因素被偷窃或是掠夺、损坏,将给科学界带来措手不及的制约.

基于以上的局限性,重新定义千克的迫在眉睫.且改变依赖实物的定义方法,也有着重大的意义.

### 2.4 使 SI 体系协调统一

首个改变实物定义法的基本单位是长度单位米,定义由“光在真空中在  $(299\ 792\ 458)^{-1}\ \text{s}$  内的行程”取代了国际米原器的长度.2005年,国际计量局初步计划采用新方法定义 SI 其他4个非物理常量定义基本单位.随着质量单位千克的重新定义,热力学温标基本单位开尔文、电流单位安培、物质的量基本单位摩尔也被重新用基本物理常量定义,使得 SI 的7个基本单位的定义方式趋于统一,千克定义的更新也结束了基本单位依赖实物定义的历史,开启了新的时代.

### 2.5 更新质量测量观

质量这一物理量无论在自然科学中还是在生产生活中,都至关重要.质量基本单位的重新定义,极大地影响着与质量测量相关的各种领域.一方面,千克新定义对计量和科研界的意义深远.新定义对不确定度的要求使得其优势不仅是在测量单一数值,而且在于能够通过使用一个单一的单位制,应用于25个数量级的范围中转换单位而本质上没有不确定度<sup>[5]</sup>.另一方面,千克新定义也影响着生产者的测量方式.传统的称量需进行一系列标定,直到溯源到国际千克原器.而新定义使之只需要通过确定普朗克常量的严格数值来实现测量.使用普朗克常量作为测量质量的基础,为探索物理世界提供了更加

精密的工具,增加了发现新现象的可能性.普朗克常量也许未来也会变化,那么质量单位将随着新的知识进行调整.为实现SI成为普适测量单位制,质量测量观正在悄然发生变化.

### 3 千克新定义的复现

#### 3.1 方案的选择

在修订的过程中曾有两种方案:一种是将宏观质量与普朗克常量通过一台瓦特天平联系起来,自然丰度单晶硅X射线晶体密度法;一种是将宏观质量与阿伏伽德罗常量通过在接近理想的硅球中对原子计数联系起来.从国际计量局规定的不确定度方面,二者是等价的.基于好复现的原则,最终敲定了方案一<sup>[6]</sup>.

#### 3.2 相关常量

##### 3.2.1 普朗克常量

普朗克常量用 $h$ 表示,是量子力学中的重要基本常量,用来表示量子的大小,诞生于黑体辐射的理论解释中,普朗克认为黑体辐射出的能量是一份一份的,每一份的能量大小为 $h\nu$ ,普朗克常量可谓是普朗克创造性的神来之笔,是量子世界与经典世界的桥梁.

##### 3.2.2 约瑟夫森常量

约瑟夫森效应是一种超导电流的隧道效应.交流约瑟夫森效应的根据是:当两个弱耦合的超导体之间流动的直流超导电流的临界值被超过时,在弱耦合区域两端出现直流电压 $U$ ,而且有频率为 $f$ 的交流电流流过.这里

$$\frac{U}{hf} = \frac{1}{2 \times 10^4 e} \quad (1)$$

则

$$U = \frac{hf}{2 \times 10^4 e} \quad (2)$$

其中,人们把等于 $\frac{2e}{h}$ 定义为约瑟夫森常量.

##### 3.2.3 克里青常量

量子化霍尔效应自1980年被发现以来,各国家陆续建立了量子化霍尔电阻标准.国际计量委员会

建议从1990年1月1日起在世界范围内启用量子化霍尔电阻标准代替原来的电阻实物标准,并给出了下面的国际推荐值

$$R_K = \frac{h}{e^2} \quad (3)$$

式中 $R_K$ 表示 $i=1$ 的平台处的量子化霍尔电阻值.常量 $\frac{h}{e^2}$ 被命名为克里青常量.

#### 3.3 复现原理及方法

复现宗旨是利用瓦特天平测量普朗克常量,将质量用普朗克常量表示出来.

瓦特天平的左端为磁场中的通电线圈,右端放置待测物体,如图2所示.

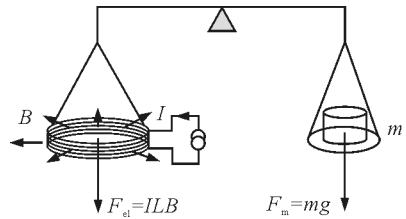


图2 瓦特天平原理图

给线圈通电后,左侧线圈所受安培力与右侧物体重力平衡.即

$$BIL = mg \quad (4)$$

使天平以速度 $v$ 上下摆动,将二力平衡模式转换为机械功率与电功率相等模式.即

$$BILv = mgv \quad (5)$$

线圈由于切割磁感线产生感应电动势

$$BLv = \epsilon \quad (6)$$

式中 $I$ 为初始状态下线圈中通入的恒定电流值,可利用欧姆定律,通过测量悬挂相串联的采样(线圈)电阻 $R$ 及 $R$ 上的压降得出<sup>[7]</sup>

$$I = \frac{U}{R} \quad (7)$$

由此,式(5)可写为

$$\epsilon \frac{U}{R} = mgv \quad (8)$$

其中, $U$ 和 $\epsilon$ 的数值与约瑟夫森效应相关, $R$ 的数值与量子霍尔效应相关.

$$\epsilon = \frac{nf_1}{K_J} \quad (9)$$

$$U = \frac{nf_2}{K_J} \quad (10)$$

$$R = \frac{R_K}{i} \quad (11)$$

其中,  $n$  和  $i$  为整数,  $f_1$  和  $f_2$  分别是约瑟夫森电压的测量频率,  $K_J$  为约瑟夫森常量,  $R_K$  为克里青常量.

将式(9)、(10)、(11)代入式(8)中, 得出

$$m = \frac{n^2 f_1 f_2 i}{4g\nu} h \quad (12)$$

由此, 就将质量与普朗克常量联系起来, 实现了用物理常量定义质量单位.

#### 4 结论

新定义的复现方式是利用瓦特天平测量普朗克常量, 其中电压的测量与电阻的测量分别基于国际电压基准和量子化电阻标准. 以机械功率和电功率的关系将质量与普朗克常量相关, 实现用普朗克常

(上接第 115 页)

两个问题:

(1) 现行及过去的各个版本的高中物理教材中关于光是否发生明显衍射的表述是不客观的, 甚至是错误的.

(2) 当孔、缝的尺寸大约为照射光波长的几十倍到几百倍或屏的尺寸大约为照射光波长的几百倍时, 能够发生明显衍射. 这可认为是光发生明显衍射的条件.

#### 3 结束语与讨论

光波属于电磁波. 对于电磁波发生明显衍射的条件, 不能简单地模仿机械波, 而要根据不同波段具体分析. 有几点值得商榷讨论:

(1) 在无线电波、微波范畴的电磁波, 其波长与机械波相当. 因此, 这一范畴的电磁波, 发生明显衍射的条件可参照机械波.

(2) 对于可见光波, 其波长已经比机械波小得

量定义千克. 千克定义的更新影响着教学领域、测量领域、科技领域, 对大众的科学素养的提高也有着广泛的意义.

#### 参考文献

- 1 沈乃激. 质量单位千克定义的历史、现状和发展趋势[J]. 物理, 2014, 43(09): 606 ~ 612
- 2 国际单位制迎来历史性变革“千克”等4项基本单位被重新定义[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(11): 123 ~ 124
- 3 冯杰. 大学物理专题研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011. 61 ~ 62
- 4 任孝平, 蔡常青, 张跃, 等. 质量单位重新定义后的量值传递研究[J]. 中国计量, 2016(09): 77 ~ 78
- 5 朱星, David B. Newell. 采用自然恒量的新国际单位制[J]. 物理, 2014, 43(07): 468 ~ 469
- 6 沈乃激. 计量学与基本物理常数质量单位千克重新定义的方案(一)[J]. 中国计量, 2012(11): 54 ~ 56
- 7 李正坤, 张钟华, 鲁云峰, 等. 能量天平及千克单位重新定义研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 68 ~ 81

很多, 故机械波发生明显衍射条件不能简单迁移使用.

(3) 波长越短的电磁波, 要发生明显衍射, 必须使障碍物(孔、缝、屏)的尺寸比波长大得越多.

致谢: 本文的完成得助于安顺学院黄绍书教授的悉心指导和提出宝贵的修改意见, 再此真诚感谢.

#### 参考文献

- 1 高级中学课本物理第二册(必修)[M]. 北京: 人民教育出版社, 1990. 230 ~ 232
- 2 人民教育出版社课程教材研究所物理课程教材研究中心. 普通高中课程标准实验教科书物理·选修3-4[M]. 北京: 人民教育出版社, 2010. 59 ~ 60
- 3 束炳如, 何瑞伟. 普通高中课程标准实验教科书物理·选修3-4[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2007. 83 ~ 85
- 4 廖伯琴. 普通高中课程标准实验教科书物理·选修3-4[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 2011. 100 ~ 102
- 5 赵凯华. 新概念物理教程光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 163 ~ 166