

SI 基本单位的研究进展与改制动向^{*}

岳峻峰^{1, 2} 朱鹤年^{1, †}

(1 清华大学物理系 北京 100084)

(2 北华大学公共基础部 吉林 132013)

摘要 文章介绍了 SI(国际单位制)基本单位的研究进展与改制动向,综述了实现质量、电流与温度单位自然基准的主要方法,展望了用基本物理常量重新定义 SI 基本单位的前景及对物理学研究的影响。

关键词 计量学, SI 基本单位, 综述, 自然基准, 量子基准, 基本物理常量

Envisioned modifications of the SI base units

YUE Jun-Feng^{1, 2} ZHU He-Nian^{1, †}

(1 Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Department of Basic Science, Beihua University, Jilin 132013, China)

Abstract Research developments in the modification of the SI base units are reviewed. The main methods employed to obtain the natural standard units of mass, electric current and thermodynamic temperature are summarized. Future prospects for using fundamental physical constants to redefine the SI base units and the consequent impact on physics research are discussed.

Keywords metrology, SI base unit, natural standard, quantum standard, fundamental physical constant

随着科学与技术的发展,人们希望测量基准建立在更科学的基础上,而不是以某一实物的尺寸为基准。宏观实物基准原则上可能会被损坏,随着时间推移、环境改变、理化性能缓变等影响其量值不可避免地发生漂移,从而影响到其复现性,在传递过程中也不可避免地要引入一定的误差。麦克斯韦在 1870 年曾指出,长度、质量和时间的单位应当建立在原子波长、频率和原子质量的基础上。20 世纪 60 年代以来,以量子力学为基础的计量基准的研究取得了一系列成果,使计量基本单位的复现与量子现象密切相关,逐渐形成了量子计量学。量子计量学实现了一些基本单位或与基本单位密切相关的导出单位的定义或复现方法,为从实物基准过渡到量子基准奠定了基础。国际上已确立的量子基准有长度、时间、电压和电阻单位的基准。

某些原子的固有能级非常稳定,跃迁时辐射信号的周期自然也是恒定的。因此,跃迁所对应的量值是固定不变的。微观量子基准,包括 1960 年用氪-86 原子的特定能级跃迁所定义的米单位、1967

年用铯-133 原子特定能级跃迁所定义的秒单位等,提高了国际单位制(SI)基本单位的复现性。一些基本物理常量具有极高的恒定性,不随时间、地点和实验中所用的材料而变化。1983 年,国际计量委员会(CIPM)规定真空中光速 c_0 准确等于 299 792 458 m/s,定义 1 m 为光在真空中于 $(1/299\,792\,458)$ s 的时间间隔内所经路径的长度。

目前,国际计量界和物理学界正在讨论采用量子物理规律和基本物理常量重新定义千克、安培、开尔文、摩尔四个 SI 基本单位的问题,许多国家都开展了相关研究,并准备争取于 2011 年第 24 届国际计量大会上通过相关决议。这是自 1960 年 SI 建立以来的重大动向,用新科技成果不断完善国际单位制及其实验基础,使单位的定义主要建立在基本物理常量的基础上,可能对计量学及各科学技术领域产生深远的影响。

^{*} 2007-01-15 收到

[†] 通讯联系人, Email: zhn-dmp@mail.tsinghua.edu.cn

1 质量自然基准的研究进展

质量基准 - 国际千克原器是 7 个基本单位中唯一的实物基准,于 1889 年在法国第一届国际计量大会上确定,采用铂铱合金制成。当时估计原器量值复现的相对标准不确定度 u_{rel} 在 10^{-9} 数量级^[1],后来在几次比对中发现其量值不断发生变化,例如表面甚至内部会吸附一些气体和某些杂质,这些因素的存在使原器的质量每年大约以 1×10^{-9} 变化,清洗后仍继续发生。因此有必要用更合适的自然计量基准来代替这一实物基准。从 20 世纪 50 年代开始,科学家们对更新千克定义进行了广泛深入的探索,目前正在研究的建立质量自然基准的方法主要有三种: X 射线晶体密度法测定阿伏伽德罗常数 N_A (简称 XRCD),电功率天平测量普朗克常量,晶粒收集法。

1.1 X 射线晶体密度法测定阿伏伽德罗常数 N_A

X 射线晶体密度法测定 N_A 是一种比较成熟的方法,思路是制作一块高纯度的完整的立方晶格的硅单晶体,用 X 射线干涉仪精确地测定硅晶格间距,通过特制的硅球测定晶体的密度,在此基础上计算出晶体的原子数,单晶硅因其独特的性能而被用作研究 N_A 的首选材料, N_A 可表示为

$$N_A = \frac{Mn}{\rho V_0} \quad (1)$$

式中 M 为硅原子摩尔质量, ρ 为硅球的密度, V_0 为晶胞体积, n 为晶胞内粒子数。德国的 PTB、英国的 NPL、美国的 NIST 和日本的 NMIJ 等十几个机构参与了精密测量 N_A 的研究,主要内容包括基准硅球的研制和直径测量。目前单晶硅摩尔质量和晶格常量测定 u_{rel} 达到 10^{-8} 数量级^[1],利用新的研究方法测量单晶硅密度已达 4×10^{-8} ^[1],但尚未能达到期望目标 1×10^{-8} ,因此对硅球密度、硅晶格间距和 ^{28}Si 的同位素丰度的测量研究成为实现该方案质量基准的三个关键和难点。

1.2 电功率天平法

这是由 NPL 的 Kibble B 提出的一种机械功率与电功率比较的方法。简要原理如下:装置分两部分。第一部分为将天平一端质量为 m 的标准砝码产生的重力 mg 与另一端的电磁力进行比较。另一端用一载有电流 I 的线圈,垂直于线圈平面加一均

匀的磁通密度 B ,产生作用于线圈上的电磁力 F 。当天平达到平衡时,重力与电磁力相等。第二部分中,未加电流的相同线圈以速度 v 在相同磁场中,做垂直于磁场方向的运动,对由它产生的感应电压 U 进行精密测量。

这种方法与线圈的几何形状、磁通量密度无关。若准确测得实验地点的重力加速度 g 、线圈运动速度 v 和电功率 $UI = U^2/R$ (用约瑟夫森效应测量 U_J ,用量子化霍尔效应测量 R_H) 得到

$$m = \frac{af_J^2}{gv}h \quad (2)$$

式中 a 为组合常数, f_J 是约瑟夫森频率, h 为普朗克常量。在现有量制基础上, h 主要通过精密功率天平测得。2002 年 CODATA 推荐的 h 值 = $6.626\ 069\ 3(11) \times 10^{-34}$ Js, $u_{\text{rel}} = 1.7 \times 10^{-7}$ 。质量咨询委员会 (CCM) 在推荐给 CIPM 关于千克的定义 G1 (2005) 中^[2],建议 $u_{\text{rel}}(h)$ 应约为 2×10^{-8} 。

1.3 晶粒收集法

该方法是测定 ^{197}Au 单原子质量(不存在同位素效应),然后利用原子个数定义千克基准。具体方法为:一个 Au 粒子发射源发射金粒子到一个收集器内,然后通过比较器对收集到的一定数量粒子质量进行精确测量。一定的粒子质量又对应一定的电量。同时精确测定收集金粒子时的电量 $Q = \int_0^{t_m} I(t)dt$ 。 Q 与基本电荷 e 之比就是在收集期间($0-t_m$)通过的金粒子的数量。其表达式为

$$m = \frac{m_{\text{Au}}}{e} \int_0^{t_m} I(t)dt \quad (3)$$

式中 m 为宏观质量, m_{Au} 为金粒子质量, $I(t)$ 为测得电流, t_m 为测量时间。通过上式将宏观的质量与微观的金粒子(原子)质量连接起来。如果已知粒子宏观质量,就可求出单粒子质量。该方法测量单粒子质量的相对标准不确定度 u_{rel} 已达 3×10^{-7} ^[1]。

以上提到的几个方法都是有希望突破的方案。当普朗克常量、阿伏伽德罗常数或单粒子质量的相对标准不确定度 u_{rel} 达到或小于 1×10^{-8} 时,重新定义千克就会较顺利,目前研究也面临一些其他问题:单晶硅样品的空位和晶格缺陷差异可能造成不同样品摩尔体积差达 3×10^{-6} ;实测 N_A 与普朗克常量导出值的差异也有约 1×10^{-6} ,使 h 、 N_A 与某些常量值之间存在矛盾^[1]。

2 电流自然基准的研究进展

由于电流作为基本单位难以直接复现,1990年以前用标准电池组和标准电阻组等实物基准分别作为电压和电阻的工作基准。

在安培的定义中,真空磁导率 $\mu_0 = 12.566\ 370\ 614 \times 10^{-7} \text{NA}^{-2}$,为精确值。1990年起,用交流约瑟夫森效应和量子霍尔效应建立的电压和电阻工作基准,成为取代实物基准的电学量子基准。

约瑟夫森效应是弱耦合超导体的特性,当一个约瑟夫森结受一个频率 f 在 10—100GHz 范围内电磁波的照射时,产生外部感应交流约瑟夫森效应。它的电流-电压曲线在精密量子化的约瑟夫森电压 U_J 处具有电流台阶,第 n 个阶跃的电压与频率 f_J 的关系为

$$U_J(n) = \frac{nf_J}{K_J}, \quad (4)$$

式中约瑟夫森常量 $K_J = \frac{2e}{h}$ 。照射在约瑟夫森结上的电磁波频率 f 一旦被准确测定时,阶跃电压 $U_J(n)$ 也就被决定了。已有文献报道 K_J 的 u_{rel} 小于 4×10^{-8} ,但 CIPM 规定电压基准采用的约定值为 $K_{J-90} = (483\ 597.9 \pm 0.2) \text{GHz/V}$ 。

带有附加霍尔电极的场效应晶体管在低温强磁场中,其产生的霍尔电压 U_H 随栅压增加出现一系列的台阶,根据霍尔电压与漏极电流的关系,相应的霍尔电阻为第 i 个台阶的霍尔电压 $U_H(i)$ 与电流的商,即

$$R_H(i) = \frac{U_H(i)}{I} = \frac{R_K}{i}, \quad (5)$$

式中 i 是整数, R_K 是冯·克里青常量, $R_K = \frac{h}{e^2} = \frac{\mu_0 c}{2\alpha}$ (α 是精细结构常数)。2002年国际推荐值 R_K 的 u_{rel} 为 3.3×10^{-9} ,2004年中国计量科学研究院(NIM)的 u_{rel} 达 2.4×10^{-10} ($i=1$),处于国际领先地位。但 CIPM 规定电阻工作基准采用的约定值为 $R_{K-90} = (25\ 812.807 \pm 0.005) \Omega$ 。

专家建议通过固定 e 值来定义电流:“安培是电流单位,相当于每秒中流过 $6.241\ 509\ 468\ 3 \times 10^{18}$ 基本电荷”。如果 h 和 e 是准确已知,则约瑟夫森常量 $K_J = 2e/h$ 和冯·克里青常量 $R_K = h/e^2 = \mu_0 c / (2\alpha)$ 也是准确量,约瑟夫森效应和量子化霍尔

效应被用来直接复现 SI 的 V 和 Ω ,进而复现安培、瓦特和法拉第常量等。以两个效应和 K_{J-90} 和 R_{K-90} 约定值为基础的约定电学实用单位制将被 SI 自身所取代。如果按将来的定义 e_0, h, e 为精确值,精细结构常数 α 为导出数,其值与从电子反常磁矩 a_e 导出的 α 值相等,则 μ_0 也由实验来确定,2002年 CODATA 推荐的 α 值的 $u_{\text{rel}} = 3.3 \times 10^{-9}$,预期在 1—2 年后可达 1×10^{-9} ,这样 μ_0, e_0 的 u_{rel} 也将约为 1×10^{-9} 。

直接实现电流量子基准的前景是单电子隧道效应(SET),通过计数电子来实现电流的量子定义^[3]。充有电荷 Q 的电容器 C 储能为

$$W = \frac{Q^2}{2C}. \quad (6)$$

当电容器的线度极小时,电容量 C 变得很小,电容器上的电量也变得很小,以致于电极上只有一个电子的电荷时,利用量子力学中电子穿透势垒的隧道效应,能使单个电子从一边流入而从另一边流出,形成单向电流。对单个电子计数,可以显著提高电学计量的准确度,

$$I = ef, \quad (7)$$

式中 e 为基本电荷, f 为电子进入电容器的频率。这样就可实现基于基本电荷这一基本物理常量以及频率量的电流量子基准。该方案现在也存在较大困难:(1)电容器的电极要非常小,目前做成的电极的线度是几十纳米量级;(2)电容器所处温度达到几 mK 低温时才能观察到明显的单电子隧道效应;(3)线路寄生参数的影响使电子进入电容器的频率尚只有 MHz 量级,电流只有 pA 量级,而当前能精密测量的小电流至少需达到 μA 量级。有报道说,用新的微蚀刻技术已做出了更小的电极,并在室温下观察到了单电子隧道效应;另外,利用高频表面波也可把频率提高到 GHz 量级,相应的电流可扩大到 nA 量级。一些国家在此方面已投入了较大的力量进行研究,以求得到进一步的突破。

如果单电子隧道效应建立的电流量子基准得以实现,根据欧姆定律,电流量子基准将与现有的电压、电阻量子基准形成互相依存、互相检验的三角关系,人们形象地称其为“量子三角形”^[3]。

3 温度基准的研究进展

热力学温度开尔文(K)是水三相点热力学温度

的 $1/273.16$,某些温度范围的复现性已不超过 0.1mK 。在国际上,目前温度基准的研究工作是:使国际温标固定点的温度尽可能与热力学温度相一致,提高温标定点之间插补用的仪器的准确度,对测量温度方法进行研究,尤其是对特殊要求的、高低温的不同环境进行测温的研究。

直接测量热力学温度较难。1990年国际温标ITS-90(用 T_{90} 表示)分四个温区来定义 T_{90} (1) 0.65K 到 5.0K 之间, T_{90} 由 ^3He 和 ^4He 的蒸气压与温度的关系来定义(2)由 3.0K 到 24.5561K (Ne三相点)之间, T_{90} 由氦气气体温度计来定义,它使用三个定义固定点及利用规定的内插方法来分度,这三个点是可复现的温度点,并具有给定的数值(3)平衡氢三相点(18.8033K)到银凝固点(961.78°C)之间, T_{90} 用铂电阻温度计来定义,它使用规定的内插方法及相应的定义固定点温度来分度;(4)银凝固点(961.78°C)以上的 T_{90} 借助于一个定义固定点和普朗克辐射定律来定义。水三相点的高准确度复现和测量是ITS-90实施的关键。确立新温度基准主要有以下两种思路:

3.1 声学测温法

利用气体中声速与温度关系的测温方法。理想气体中声波的传播速度为

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (8)$$

式中 $\gamma = c_p/c_v$ 称为质量热容比,也称“比热[容]比”,它是气体的质量定压热容 c_p 与质量定容热容 c_v 的比值; M 是气体的摩尔质量, T 是热力学温度, $R = 8.314472(1 \pm 1.7 \times 10^{-6})\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为摩尔气体常量。

新温度基准的思路之一是:固定玻尔兹曼常量 $k_B = 1.3806505 \times 10^{-23}\text{J/K}$ 为约定的精确值来定义热力学温度 K 。固定 $N_A = 6.0221415 \times 10^{23}$ 来定义摩尔,这样(8)式中的气体常量 $R = k_B N_A$,可以用

$T = v^2 \frac{M}{\gamma k_B N_A}$ 来实现声学测温法这一基本测温法。

3.2 总辐射测温法

热力学温度为 T 的全辐射体(黑体)的辐射出射度为

$$M(T) = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c_0^2} T^4 = \sigma T^4, \quad (9)$$

式中 σ 是斯忒藩-玻尔兹曼常量,测量出 M ,就可

计算出 $T = (M/\sigma)^{1/4}$,固定 k_B 和 h 之后, σ 也就被确定为准确值。

上述两种温度基准方法都可以用来复现 K ,但这样水的三相点温度 273.16K 将具有一定的不确定度。

4 物质的量

物质的量的测量可通过一种基准方法根据SI单位摩尔来进行。国际计量委员会物质的量咨询委员会(CIPM/CCQM)已规定了一些基准方法,包括:同位素稀释质谱法、库仑法、重力法、滴定法、凝固点下降法。目前,CCQM尚未制定这些方法如何用作基准方法的详细技术要求。

实践中,化学家利用准确的摩尔质量表,并通过称重测定 x 的质量 $m(x)$,然后除以摩尔质量 $M(x)$,从而得出物质的量 $n(x) = m(x)/M(x)$,这个单位的体现方法,只能在实验室的条件下去实现,确定阿伏伽德罗常数的值等于 0.012kg 质量的碳-12所具有的原子数。

预计物质的量的SI单位(摩尔),有待用量子理论和基本物理常量来实现新定义,例如通过精密测定阿伏伽德罗常数的值(如文中前面提到的晶体密度法),固定 N_A 值,精确等于 6.0221415×10^{23} 个基本单元(原子、分子、离子、其他粒子或这些粒子的特定组合)的系统的物质的量,实际上就是复现了摩尔单位,效果就是定义摩尔,意味着以千克为基础的摩尔当前定义将不再应用,所以固定 N_A 值,只定义了摩尔,和千克无关。则碳-12的摩尔质量 12g/mol 不再完全精确,由实验来确定,具有不确定度,与目前的定义中 N_A 所出现的相对变化相当 μ_{rel} 可能约为 10^{-7} 量级。2002年,阿伏伽德罗常数的CODATA推荐值为

$$N_A = 6.0221415(10) \times 10^{23} \text{mol}^{-1}.$$

5 基本物理常量与量子计量基准

上面已经介绍,固定 h 用功率天平法可重新定义千克,固定 N_A 也可以重新定义千克。建立在 N_A 之上的定义概念简单,可以表述为千克是碳-12原子的指定数目的质量;而建立在 h 之上的定义更符合物理学家的意愿, h 是量子力学中最重要的常量。如果固定 e 以定义安培,则 $c_0 h e K_J = 2e/h$, $R_K =$

h/e^2 都将有精确定义值,电学计量将变得更简单、更精确。通过固定 h 的千克定义后(与 N_A 无关),还可以自由地固定 N_A 定义摩尔。因此,国际单位咨询委员会(CCU)的专家倾向在千克重新定义中固定 h 。再固定 k 值以定义温度单位开尔文,如此,7个基本物理量单位中,除坎德拉之外的6个基本单位就全部由自然基准(秒)和5个采用约定值的基本物理常量 c_0, h, e, N_A, k_B 来确定了。

未来基本物理量单位的定义方案原则上说并不是唯一的,例如也可固定 K_J 和 R_K 值来取代固定 h 和 e 。也有专家建议仍然固定 μ_0 以保持麦克斯韦方程组的完整性。目前测量不确定度 u_{rel} 很小的物理常量有里德伯常量等,科学研究的新进展也有可能将其推向作用更显著的舞台。

基本物理常量之间存在着密切的相互关系,测量某一个常量可以用多种方法和手段,为了检验按不同方法独立测出的各种常量或其组合物,考察它们在各自测量的误差范围内是否互相一致,发现部分系统误差,常采用最小二乘平差法得出常量的一组最佳估计值及其 u_{rel} ,作为国际上的推荐值。最新的一次平差所采用的数据是2002年得出的,已由CODATA推荐发表。与1986年的平差结果相比,许多常量值的 u_{rel} 均减小了一个量级左右,这反映了基本物理常量的稳定性^[3]。但不同机构、不同方案的 u_{rel} 可能有显著差别, μ_{rel} 小的结果也有可能存在未被发现的系统误差,例如,1998年的 G 和2002年的 h , 两者的 u_{rel} 都比以往相应推荐值的 u_{rel} 大。如果固定

5个约定值的基本物理常量的方案得以实现,将显著地降低相关基本物理常量的不确定度,促进自然科学的整体进步,全面实现普朗克1906年提出的用基本物理常量作为单位制基础的构想。过去测定基本物理常量的实验就将变成复现新定义实验。

2005年,CIPM和CCU曾征询各国对2007年左右能否改制的意见,我国量和单位标准化委员会绝大多数专家的意见是推迟到2011年前后再讨论。2006年8月31日,CCU主席 Mills I M 教授和国际计量局(BIPM)前局长 Quinn T J 博士在北京分别作了《21世纪国际单位制(SI)的修订》和《关于SI基本单位重新定义的建议》的报告,宣传改制工作。大改制虽然对技术工作者和实验工作者来说是困难颇多的浩大工程,但却是许多物理学学者梦寐以求的前景。

参 考 文 献

[1] 罗志勇. 计量学报 2004, 25(2):138 [Luo Z Y. Acta Metrologica Sinica 2004, 25(2):138 (in Chinese)]
 [2] Mills I M, Mohr P J, Quinn T J et al. Metrologia, 2006, 43(3):227
 [3] 张钟华. 现代计量测试, 2001, 9(3):3 [Zhang Z H. Mod. Measur. Test, 2001, 9(3):3 (in Chinese)]
 [4] 施昌彦. 现代计量学概论. 北京:中国计量出版社, 2003. 162—163, 185 [Shi C Y. The fundamentals of modern metrology. Beijing: China metrology publishing house, 2003. 162—163, 185 (in Chinese)]
 [5] Mohr P J, Taylor B N. Rev. Mod. Phys. 2005, 77(1):1



北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标,备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考)供国内各大专院校,科研机构,试验室随时选用,我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料,如硒化锌,硫化锌,多光谱硫化锌等。



- 光学透镜:平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜:各种规格直角棱镜,及其他常用棱镜。
- 光学反射镜:各种尺寸规格的镀铝,镀银,镀金,及介质反射镜。直径5mm—200mm。
- 光学窗口:各种尺寸规格,材料的光学平面窗口,平晶。直径5mm—200mm。
- 各种有色玻璃滤光片:规格为直径5mm—200mm。(紫外,可见,红外)及窄带干涉滤片。
- 紫外石英光纤:进口紫外石英光纤,SMA接口光纤探头,紫外石英聚焦探头。

地址:北京市海淀区知春路49号希格玛大厦B座#306室

电话:010-88096218/88096217 传真:010-88096216 网址:www.goldway.com.cn

联系人:陈镛先生,施楠小姐,曾安小姐

E-mail: kevinchen@goldway.com.cn, shinan@goldway.com.cn, zengan@goldway.com.cn