

1990 年的新计量标准

Barry N. Taylor

1990 年 1 月 1 日, 在电学单位中, 伏特和欧姆的新的实用基准将开始生效。这两项新基准是由国际度量衡委员会 (CIPM) 和它的电量咨询委员会 (CCE) 推荐的。新基准的实行将带来世界性的影响。它不仅将改变电压和电阻的旧量值, 而且也要影响到电流和功率的度量。在同一天, 作为基本物理量之一的温度, 也将开始使用新的国际实用温标。

一、国际单位制中的伏特与欧姆

我们知道, 世界公认的计量单位是国际单位制 (SI)。SI 的三个基本力学量是长度、质量和时间, 它们的单位分别为米 (m)、公斤 (kg) 和秒 (s)。米是用真空中的光速定义的, 秒是由铯-133 基态的两个超精细能级之间的跃迁定义的, 只有公斤是用人工制品来定义的, 即制造一个标准质量块作为公斤的国际基准原型。

力的国际单位是牛顿 (N), 它按牛顿第二定律由三个基本力学量导出, 即 $N = m \cdot kg \cdot s^{-2}$ 。能量的单位焦耳 (J) 由功的定义公式得到, 即 $J = N \cdot m = m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$, 而功率的单位瓦特 (W) 的定义公式为 $W = J/s = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$ 。

国际单位制中的基本电学单位是安培 (A)。它的定义是: 两条通有恒定电流的无限长平行直导线在真空中彼此相隔 1 m 的距离, 假设导线的横截面积可以忽略, 当在每米长度上两条导线间的作用力为 2×10^{-7} N 时, 导线中所通过的电流强度即为 1 安培。这一定义意味着真空中的导磁率 μ_0 必须精确地等于 $4\pi \times 10^{-7}$ N/A²。

最后, 伏特 (V) 与欧姆 (Ω) 可依次由安培与瓦特导出, 即

$$V = W/A = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1},$$

$$\Omega = V/A = W/A^2 = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}.$$

伏特与欧姆的定义如此复杂, 在实验室中难于用很高的准确度复现。事实上, 在各国的

物理

国家标准实验室中, 作为欧姆基准的线绕电阻器由于绕制工艺和老化过程的差别, 其真值互不相同, 而且与国际单位制定义的值也有一定的偏差。以电化学原理为基础并用标准电池复现的伏特基准, 也同样达不到足够的一致性。而在科学、工业以及商业中, 电压和电阻的精确计量无疑是十分重要的。因此, 有必要建立伏特与欧姆的实用基准 (或称为“复现法”)。新的实用基准应比 SI 制给出的定义具有更好的长期稳定性和精确的可复现性。

二、量子标准

交流与直流约瑟夫森 (Josephson) 效应是弱耦合超导体的特征。例如, 两个超导铌薄膜被 1 nm 厚的绝缘层隔开, 形成约瑟夫森结。当这个结被频率为 f 的微波辐射照射时, 其伏安特性曲线在量子化电压 U_J 处将发生电流阶跃。第 n 个台阶电压 $U_J(n)$ 的值为 nf/K_J , 这里 n 为整数, K_J 称为约瑟夫森常数。

约瑟夫森效应的理论指出, K_J 是一个普适恒量, 其值精确地等于 $2e/h$, 这里 e 是电子电荷, h 是普朗克常数。大量实验证实 K_J 与所用的超导材料、照射频率、温度以及其它实验变量都无关。例如有实验证明, 由不同的超导体制成的两个约瑟夫森装置所得到的 K_J 值相差在 2×10^{-6} 范围内。这是伏特基准建立的基础。

量子霍尔效应是二维电子气所特有的, 在实验上可用 GaAs-Al_xGa_{1-x}As 异质结构来实现。在强磁场 (B 达到 10 T 数量级) 及低温下 (约 1 K), 电子气被局限在异质结构的界面区, 且完全量子化。当恒定电流 I 沿界面流过时, 在电流平面内, 正交于电流方向上的电压降称为霍尔电压 U_H 。对于固定的电流 I (典型值为 10—50 μ A), 霍尔电压与磁通密度 B 的关系曲线将出现一系列的 U_H 保持恒定的平台, 平台的霍尔电阻 R_H 是量子化的, $R_H(n) = R_K/n$, 这里 n 是阶数, R_K 称为克利青 (Klitzing) 常

数,以 1980 年发现了量子霍尔效应的克劳斯·冯·克利青命名。图 1 是量子霍尔效应的实验结果。实验时的温度为 1.39 K, 电流固定在 25.52 μA 。由图 1 可以清楚地看到,从 $n = 2$ 开始的量子霍尔效应平台。 R_K 是 $n = 1$ 时的霍尔电阻,其值为 25813 Ω 。

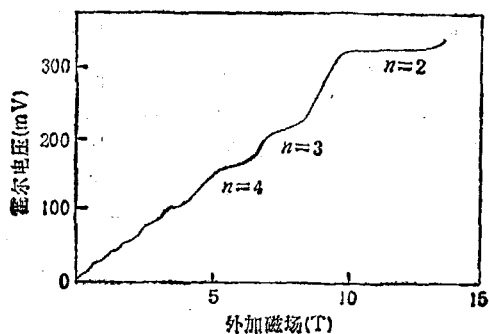


图 1 实验得到的量子霍尔平台

(这是由 Marvin Cage 和国家标准局的同事们测定的霍尔电压 U_H 与外加磁场的关系曲线,实验温度为 1.39 K, 电流 I 恒定在 25.52 μA , 霍尔电阻 U_H/I 显示出量子化值为 R_K/n 的平台, $R_K \approx 25813 \Omega$ 是普适恒量)

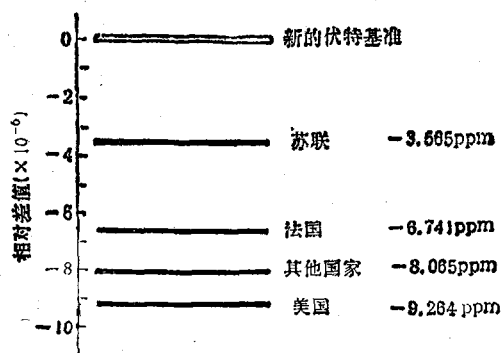


图 2 伏特的新实用基准与现行的四种国家标准的比较 (所有这些标准都以约瑟夫森效应为基础,但新标准使用的是经修正的约瑟夫森常数,因此它比旧标准更接近于 SI 中的伏特)

许多实验证实,如果量子霍尔装置在一定的规范, R_K 也是一个不变的常数,这与量子霍尔效应理论相一致。根据量子霍尔效应理论, $R_K = h/e^2$ 或 $R_K = \mu_0 c / 2\alpha$ 。这里 c 为真空中的光速,精确值为 299792458 m/s, $\alpha = 1/137$ 是精细结构常数。就目前的实验水平来看, R_K 值复现的相对精度可以达到 10^{-9} 数量级。

于是,约瑟夫森效应和量子霍尔效应提供了电压和电阻的“量子标准”,它通过普适恒量

K_J 和 R_K 值建立起统一的伏特和欧姆基准。被国际度量衡委员会采用的 K_J 和 R_K 约定值分别是

$$K_{J-90} = 483597.9 \text{ GHz/V},$$

$$R_{K-90} = 25812.807 \Omega.$$

这里下标 90 表示这些值是在 1990 年 1 月 1 日开始生效。

应该指出的是,以约瑟夫森效应为基础的伏特标准早在 1970 年就已各国使用了,但数值各不相同。图 2 示出了各国原用的标准值与按 K_{J-90} 产生的基准的比较。

三、与国际单位制的相容性

由于 K_{J-90} 与 R_{K-90} 的确定是对 K_J 和 R_K 的直接测量以及对相关基本常数的测量为依据,而这些测量所用的都是国际单位制,因此新的伏特与欧姆基准与 SI 的相容性是有保证的。国际度量衡委员会确认,新的伏特基准与 SI 的伏特的符合程度在 0.4 ppm 范围内。类似地,新的欧姆基准与 SI 的欧姆的一致性在 0.2 ppm 范围内。

但是必须强调,约瑟夫森常数和克利青常数的约定值是仅为实用电学量的计量采用的。国际度量衡委员会和电量咨询委员会并不打算用 K_{J-90} 和 R_{K-90} 定义 SI 制中的伏特和欧姆。这是因为如果以量子标准代替 SI 中的伏特和欧姆, μ_0 值就不再是一个有精确定义的常数,从而将取消 SI 中安培的定义,由此产生的后果是使电学单位与 SI 中的基本单位公斤及其导出单位不相容。

四、在新年里

新年伊始,新伏特和欧姆国际基准的实施将带来世界性的影响。各国的电量标准、测量仪器和电子系统都需要按新基准进行校正,例如标准电池、电阻器、固态电压基准、高精度数字电压表、数字繁用表以及可编程电源等。以美国为例,国家标准局的原伏特和欧姆的复现值将分别增加 9.264 ppm 和 1.69 ppm。由于 $A = V/\Omega$, $W = V^2/\Omega$, 相应地,安培和瓦特的

复现值将分别增加 7.57 ppm 和 16.84 ppm。

在校正各种标准和仪器时必须记住，如果一个测量单位增加的量是每百万分之 x ，则用这个单位所测量的值将减小 x ppm。例如，美国标准电池的电动势值从新年那一天开始必须比

其原值减小 9.264 ppm。类似地，若用数字电压表测量某一恒定的输入电压，则其读数在调整到新标准后也要比原来小 9.264 ppm。但是对可编程电压源，情况则相反，按新的标准，它的正向电压输出将增大 9.264 ppm。

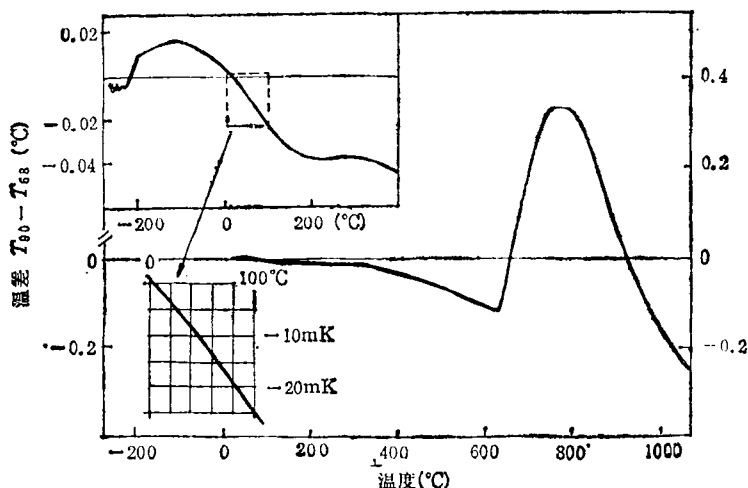


图3 ITS-90 与 IPTS-68 的比较

(左上角的图为 400°C 以下纵轴放大比例的温差曲线;左下角的图是在 0—100°C 温区内两个坐标比例都放大后的温差曲线)

计量领域中的另一世界性事件是实用温标的修订。按 1988 年国际度量衡委员会的推荐，1968 年国际实用温标 (IPTS-68) 将被 1990 国际实用温标 (ITS-90) 所取代。这是因为近年来科学实验不断发现 IPTS-68 在某些温区与 SI 定义的热力学温度偏离甚大。经过修订的

新实用温标则更接近于热力学温度。图 3 是两个温标的比较，显然，ITS-90 的实施将给精密温度计量带来好处。

(陈康琪根据 Physics Today 1989 年第 8 期第 23—26 页编译)

(上接第 269 页)

$Al_{40}Cu_{10}Ge_{25}Mn_{25}$ 和 $Al_{8.8}Fe_{3.7}Ce_1$ 两种准晶合金的磁化强度与温度的关系。

可以看出，这些铁磁性准晶的磁化强度都很低，仅为 2—6 emu/g，且准晶颗粒在 $2\mu m$ 左右，常常多少还包含一些其他顺磁相，因此还不能足以对磁性作深入的研究。但随着对准晶形成规律的了解，一定能获得更满意的铁磁性准晶样品，直至获得有应用价值的准晶磁性材料。

[1] D. Schechtman et al., *Phys. Rev. Lett.*, **53**(1984), 1951.

[2] 郭可信, 物理, **14**(1985), 449; 姜小龙等, 物理, **16**(1987), 405.

[3] 木村薰, 固体物理, **23**(1989), 689.

[4] X. K. Zhang et al., *Phys. Lett.*, **A 136** (1989), 312.

[5] G. D. Pang et al., *Phys. Rev.*, **E38** (1988), 12649.

[6] J. Yuan, *J. Phys. C*, **1**(1989), 7951.

[7] T. Goto et al., *J. Phys. F*, **17**(1987), 743.

[8] M. Eibschutz et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 169.

[9] M. Eibschutz et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987), 2443.

[10] M. E. McHenry et al., *J. Appl. Phys.*, **61**(1987), 4232.

[11] A. P. Tsai et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**(1988), L2252.

[12] K. K. Fung et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 2060.

[13] J. G. Zhao et al., *Supplement Trans. JIM*, **29** (1988), 497.