

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.01.02

电学计量中的量子标准与自然常数

刘民, 屠治国, 潘攀

(北京东方计量测试研究所, 北京 100094)

摘要: 介绍了库仑定律和安培定律在电学单位制中发挥的作用, 依据机械功率与电功率等效的原理, 选择电流单位安培(A)作为基本物理单位, 并介绍了实用单位制和电学实物计量标准。阐述了三种电学计量的量子标准原理和溯源到自然常数的途径, 分析了真空磁导率在安培定律公式中发挥的作用, 探讨了电学量子三角形与欧姆定律兼容的问题。指出基本电荷量常数不是简单地从约瑟夫森常数 K_{J-90} 和冯·克里青常数 R_{H-90} 推导而来, 而是由精细结构常数公式计算出来的, 能量守恒原理是单位制中的第一性原理, 是力学和电学计量单位的纽带。提出量子点之间的位移电流对单电子隧道泵有一定的影响, 真空磁导率不再是理想的常数, 真空磁导率的变化将成为后来理论界研究的重点。

关键词: 国际单位制; 约瑟夫森电压标准; 量子化霍尔电阻标准; 单电子隧道泵; 基本电荷量常数; 普朗克常数; 精细结构常数; 真空磁导率

中图分类号: TB939; TB971

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2024) 01-0023-07

Quantum standards and natural constants in electrical metrology

LIU Min, TU Zhiguo, PAN Pan

(Beijing Orient Institute of Metrology and Test, Beijing 100094, China)

Abstract: Introducing the role of Coulomb's law and Ampere's law in the electrical system of units. According to the principle of equivalence between mechanical power and electric power, the current unit ampere (A) is selected as the basic physical unit. The practical unit system and electrical physical measurement standards are introduced. The principles of three quantum standards of electrical measurements and the ways for tracing to the natural constant are described. The role of vacuum permeability in the formulation of the Ampere's law is analyzed. The problem of the compatibility of an electrical quantum triangle with Ohm's law is explored. It is pointed out that the elementary charge constant is not simply derived from the Josephson constant K_{J-90} and the Von Klitzing constant R_{H-90} , but is calculated from the fine structure constant formula. The principle of conservation of energy is the first principle in the system of units, and it is the link between mechanical and electrical measurement units. It is proposed that the displacement current between quantum dots has some influence on the single electron tunneling pump, the vacuum permeability is no longer an ideal constant, and the change of vacuum permeability will be the focus of later theoretical research.

Key words: International System of Unit (SI); Josephson voltage standard; quantum Hall resistance standard; single-electron tunneling pump; elementary charge constant; Planck constant; fine structure constant; vacuum permeability

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-01-21

基金项目: 科技部制造基础技术与关键部件专项(2018YFB2003403)

引用格式: 刘民, 屠治国, 潘攀. 电学计量中的量子标准与自然常数[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 23-29.

Citation: LIU M, TU Z G, PAN P. Quantum standards and natural constants in electrical metrology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 23-29.



0 引言

当前的电学量子计量标准主要由约瑟夫森电压标准^[1]和量子化霍尔电阻标准两大自然基准构成^[2]，2018年国际计量大会(General Conference of Weights & Measures, CGPM)通过新国际单位制(SI)之后，联系电学计量的自然常数是基本电荷量常数 e ，而目前直接利用基本电荷量常数 e 复现电流单位的技术尚不成熟，因此，电学计量中的量子标准如何溯源到自然常数呢？新SI之后，约瑟夫森常数 K_J 和冯·克里青常数 R_H 不再需要测量确定，这2个以前的自然常数不再是独立的自然常数，而成为基本电荷量常数 e 与普朗克常数 h 的组合运算，甚至可以取消其定义命名。电学和磁学的计量单位在麦克斯韦方程组中可以自成体系，然而，电磁学单位必须与力学计量单位(如千克、米、秒)发生联系，才能符合计量学统一的要求，为此选定了电流单位安培(A)作为电磁学基本单位的代表。

新SI中增加了7个基本物理常数的定义^[3]，并没有废除7个基本物理量单位，在物理量纲中，电流单位A仍然是电学和磁学单位的代表，SI定义为^[4]“安培，符号A，SI的电流单位。当基本电荷量 e 以单位C，即A s表示时，将其固定数值取为 $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C来定义安培，其中秒用 $\Delta\nu_{Cs}$ 定义”。相关的定义还有“真空磁导率 μ_0 ，在一定的相对标准不确定度范围内等于 $4\pi \times 10^{-7}$ Hm⁻¹，该不确定度等于本决议通过时精细结构常数 α 推荐的不确定度，即 2.3×10^{-10} 且未来真空磁导率的数值将通过实验确定”，即真空磁导率 μ_0 与圆周率 π 之间也是不绑定的关系，原本使用真空磁导率 μ_0 是为了平衡安培定律公式两边的量纲，新SI中，真空磁导率 μ_0 不再是常数，需要重新测定。

在精细结构 α 常数表达式中，为了平衡表达式等号两边的变量关系，基本电荷量 e 被定义为固定值后，就必须使真空磁导率 μ_0 成为变量，具有测量不确定度，与精细结构 α 常数的测量不确定度的大小在相同量级上。本文揭示电学计量中量子标准与自然常数的内在关系，进一步论证电学计量单位的量子化溯源的途径。

1 电磁学的两大定律与单位制

电学单位最早出现在1900年初的电气化革命时期，SI最初挑选了6个有代表性的物理量的单位作为基本SI单位，其原则为①代表性：几何、时间、力、电、热、光学等6个学科领域各选一个；②关联性：能够通过物理规律把基本物理量关联到其他物理量上，基本准则是能量守恒原理；③独立性：基本物理量之间尽量独立不相关。1960年，第11届CGPM定义了米(m)、秒(s)、千克(kg)、安培(A)、开尔文(K)和坎德拉(cd)分别对应几何、时间、力、电、热、光学的基本单位。电磁学的导出单位，如电阻 Ω 、电压V、电容F、电感H等都可由电流A导出。

有两个定律对电学单位制产生过重要影响：①库仑定律，描述了电荷量与力的关系，让力做功等价，即机械力做功等价于电磁力做功；②安培定律，描述了电流与力的关系，让功率等价，即机械功率等价于电磁功率。见图1。

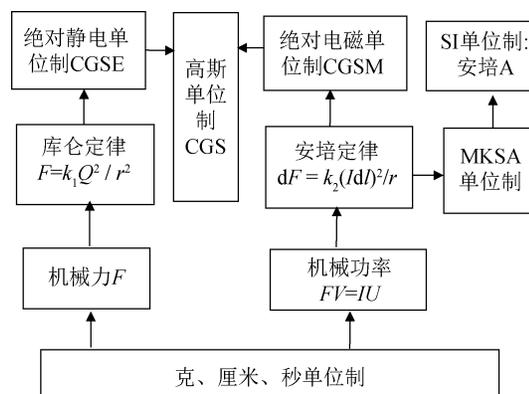


图1 电磁学的两大定律与单位制关系图

Fig.1 Relationship between the unit system and the two laws of electromagnetics

1785年，法国物理学家库伦利用扭力秤测定了电荷量与扭力之间的比例关系，总结出库仑定律。

$$F = \frac{1}{k_e} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1)$$

式中： F 为扭力秤指示的力值， q_1 和 q_2 为带电小球的电荷量， r 为带电小球的距离， k_e 为单位制系数。曾经，静电单位制(CGSE)定义 $k_e = 1$ ，M(米)K(克)s(秒)A(安)单位制(MKSA单位制)中定义了真

空介电常数 ϵ_0 , 令 $k_e = 4\pi\epsilon_0$, 用真空介电常数平衡公式(1)等号两边的量纲。

1820年, 法国物理学家安培研究电流与磁场之间的作用力, 总结出安培定律。

$$F = k_m \oint_{c_2} \oint_{c_1} \frac{I_2 l_2 \times (I_1 l_1 \times e_{r_{21}})}{r_{21}^2} \quad (2)$$

式中: F 为闭合导线 c_1 与 c_2 之间的作用力, l_1 和 l_2 为电线上的小线段, r_{12} 为2个小线段中心之间的距离, I_1 和 I_2 为流经2条电线的电流, $e_{r_{21}}$ 为 r_{12} 的单位矢量, k_m 为单位制系数。曾经的电磁学单位制(CGSM)定义 $k_m = 1$, MKSA单位制中定义了真空磁导率 μ_0 , 令 $k_m = \mu_0/4\pi$, 用真空磁导率平衡公式(2)等号两边的量纲。

电气化时代始于1900年代, 从工业生产中发展出实用单位制, 对电流、电压和电阻进行量化定义, 电学实用单位制规定了电流的单位量值及其复现方法^[5]: “1 A的恒定电流电解硝酸银溶液产出1.118 mg/s的银”, 还规定了电阻的单位量值及其复现方法: “在水三相点温度条件下, 14.452 1 g水银的均匀柱体106.300 cm两端之间的电阻为1 Ω ”。把实用单位制与经典力学单位制相结合, 产生了MKSA单位制^[6], 电学和磁学的各种单位从经典力学单位制中独立出来。

实用单位制对电流的定义存在问题, 没有联系力学与电学, 不符合SI中基本单位的联系性原则。1946年, CGPM重新定义了电流单位A为“无限长的截面可忽略的两根相距1 m的平行直导线, 通以等量恒定电流1 A时, 产生的电磁力为 2×10^{-7} N/m”, 这种定义比较牵强, 无法直接用来复现电流单位量值, 所谓“无限长”和“截面可忽略”的说法是为了简化公式(2), 用这种几乎不可实现的理想化条件简化了式(2)中的微积分和叉乘运算。这个定义已成为历史, 也没有依据此定义复现电流单位量值。然而, CGPM定义电流单位定义具有十分重要的意义, 它把真空磁导率 μ_0 引入到安培定律的公式(2)中, 规定 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Hm⁻¹。

安培定律最直接的应用是电流天平, 在质量和力值测量中, 电流天平把机械量转化为电学量有利于高精度测量。不用电流天平复现安培的单位量值的主要原因是SI中安培定义的复现方法涉及理想的几何结构, 如“无限长”和“截面可忽

略”等, 其稳定性很难保持, 直接测量力值的准确度也不高。用欧姆定律来测量电流 $I = U/R$, 分别测量电压和电阻, 再计算出电流, 往往能获得很高的准确度, 电压和电阻都可溯源到电学计量的量子标准上。

2 电学计量中的量子标准

约瑟夫森电压标准用于复现电压单位量值, 也称为量子电压标准^[7]。量子效应发生在约瑟夫森结上, 约瑟夫森结如同三明治的结构, 在“超导-绝缘-超导”层叠结构中, 绝缘层两侧的电子气发生弱耦合^[8], 绝缘层厚度10 nm, 电子气在超导层中, 见图2(a)。

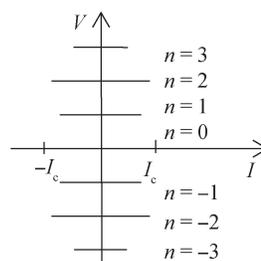
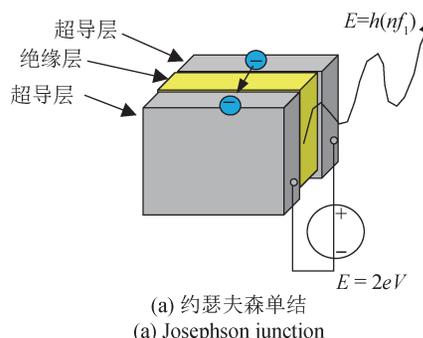


图2 约瑟夫森结上的电压和电磁辐射频率

Fig.2 Voltage and electromagnetic radiation frequency on the single Josephson junction

在2个超导层之间施加直流电压 V , 将电流穿过绝缘层且辐射出电磁波, 约瑟夫森结辐射的量子能量 $E = 2eV$, 辐射的电磁波按量子能量表达为 $E = h(nf_1)$, 则

$$E = 2eV = h(nf_1) \rightarrow V = nhf_1 / 2e \quad (3)$$

式中: f_1 为电磁辐射频率, $n = 1, 2, 3 \dots$, n 为整数。

反向过程也存在, 当外部输入的微波耦合到2个超导层之间时, 绝缘层两边出现电压 V , 库伯电子对 $2e$ 吸收 $2 eV$ 的能量, 正好等于电磁辐射能量

$E = hf_1$ 。量子电压的原理是微观的量子能量被约瑟夫森结中的库珀电子对调制成宏观的电场势能，可以把约瑟夫森结看作微观与宏观之间的桥梁。电压与电磁辐射频率之间存在线性关系，用原子钟测量电磁辐射频率的相对测量不确定度可达 1×10^{-12} 量级，量子电压相对测量不确定度可达 1×10^{-8} 量级^[9]。

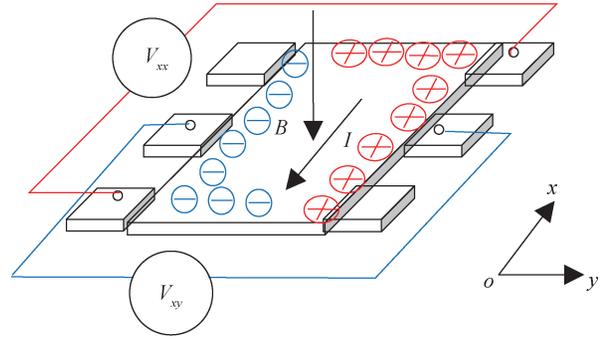
量子化霍尔电阻标准用于复现电阻单位量值，也称为量子电阻标准。电子在磁场中运动会发生偏转，使电子运动方向偏转的力称为洛伦兹力。洛伦兹力对电子电荷的作用等效于电场势能的作用，电场垂直于电流方向，在横向电极之间出现电压，该电压除以电流等于霍尔电阻。霍尔电阻不同于欧姆定律定义的电阻，只表示电压与电流的比值，没有功耗，量子化效应就发生在霍尔电阻与磁场强度的关系上。若载流子是电子和空穴，且只能存在二维分布时，称为二维电子气。二维电子气的正负载流子被束缚在二维面，不能在体内其他部分运动，见图3(a)，穿透 x - y 二维面的磁场 B ，电流 I 方向是 x 轴的反方向，朝着 x 正方向运动的电子在磁场中发生偏转，偏向 $-y$ 方向，在 y 轴的方向上产生电压 V_{xy} ，称为霍尔电压，霍尔电阻定义为 $R_H = V_{xy}/I$ ， I 为二维电子气的电流。图3(b)的横坐标为磁场 B ，左侧纵坐标为霍尔电阻 R_H ，右侧纵坐标为 x 轴方向上的电压 V_{xx} 。由图3(b)可见，磁场增加，则霍尔电阻增大，当磁场增大到 4 T 以上时，二维电子气中心部位的载流子浓度不足，载流子分布在二维平面的边缘，造成 R_H 出现平台， R_H - B 曲线的平台表示 R_H 不跟随磁场 B 的变化而变化，平台数为整数。

平台出现时电流方向的电压 V_{xx} 接近为 0。当 R_H - B 曲线二阶导数为 0 时，平台对应的霍尔电阻为

$$R_H = \frac{V_{xy}}{I} = \frac{h}{me^2} \quad (4)$$

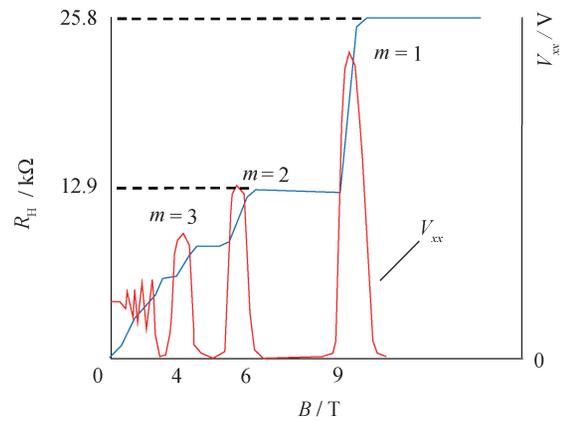
式中： R_H 为当平台为 m 时的霍尔电阻； m 为平台数， $m = 1, 2, 3 \dots$ 。

单电子隧道泵也将成为电学量子标准之一，用于复现电流量值，也称为量子电流标准。电流 I 与通过电荷量 Q 的关系是 $I = dQ/dt$ ，若电荷量 Q 用单电子个数 n 表示，已知电子电荷量为 e ，则 $Q = ne$ ，电流 I 为



(a) 二维电子气示意图

(a) Diagrammatic sketch of 2-D electron gas



(b) B - R_H 和 B - V_{xx} 曲线

(b) Curves of B - R_H and B - V_{xx}

图3 量子化霍尔电阻原理示意图

Fig.3 Diagram of the principle of quantum Hall resistance

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{edn}{dt} = ef_2 \quad (5)$$

式中： f_2 为电荷泵搬运单个电子的频率。

单电子隧道泵在频率 f_2 的电压驱动下，在一组串联的电容上传输电子电荷，每个脉冲仅允许单个电子穿越绝缘势垒，目前复现电流的范围达到 100 pA，测量不确定度达到 1×10^{-7} 量级^[10]。在 mK 量级的极低温度条件下，自由电子将单个地隧穿通过绝缘势垒，控制电压的频率 f_2 ，进而控制电荷通过的速率，即电流值。

单电子隧道泵的基本原理是介观尺度下电子运动具有库伦阻塞效应。介观尺度介于微观和宏观这两种尺度之间，当把电容器的电极板缩小到介观尺度，再把电极板之间的介质层减薄到几纳米，电容器就变成“量子点”，则电子穿越电容器介质的势垒，从一个极板(量子点)到达另一个极板，就发生库伦阻塞效应，即单个电子跨越介质层的势垒后，阻止更多电子再进入量子点。推动

电子穿越的电势就是加到电极板上的电压差。但是麦克斯韦提出了位移电流假设,认为在电场变化情况下就会形成位移电流,正比于电场变化率

$$J_D = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (6)$$

式中: J_D 为位移电流, ε_0 为真空电导率, E 为电场强度。

从式(6)可见,虽然流入和流出量子点的位移电流 J_D 是可以双向抵消的,位移电流的平均值为0,但是由于电场幅值不稳定或者触发电场的时钟发生抖动,位移电流的变化量值都会超过单个电子的电流值 1.602×10^{-19} C/s。从位移电流角度分析,单电子隧道泵要达到更高的准确度很困难。

3 电学量子三角形问题

三种电学计量的量子标准与3个自然常数联系紧密。把基本电荷量常数 e 、普朗克常数 h 、铯原子频率常数 $\Delta\nu_{Cs}$ 所联系的3个关系式(3)、(4)、(5)代入欧姆定律,若已知任意两个电学量,可推导出第3个,称为电学量子三角形^[11]。约定上述3个自然常数是否会与欧姆定律发生冲突?尤其是电流单位能否用基本电荷量来准确复现^[12]?

在新SI启用之后,电学量子三角形问题迎刃而解,电流单位A是用基本电荷量来定义的,既可以用单电子隧道泵复现,见式(5),也可以依据欧姆定律复现,把电流单位量值溯源到电压量子电阻量子标准上,见式(7)。

$$I = \frac{U}{R} = \frac{k_V [nh / (2e)] f_2}{k_R [h / (me^2)]} = \left(\frac{k_V nm}{2k_R} \right) e f_2 = k_I e f_2 \quad (7)$$

$$e' = \frac{2}{\left(\frac{2e'}{h} \right) \cdot \left(\frac{h}{e'^2} \right)} = \frac{2}{K_{J-90} R_{H-90}} = 1.602\,176\,492 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (8)$$

式中: e' 为经 K_{J-90} 和 R_{H-90} 这2个常数计算得到原体系中的电荷量常数, $K_{J-90} = 2e'/h = 483\,597.9$ GHz/V, $R_{H-90} = h/e'^2 = 25\,812.807 \Omega$ 。

从式(8)可见,这2个自然常数关联的公式中都有基本电荷量 e ,依据式(8)推导出的基本电荷量值 e' 与新SI中的固定值 $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ 的偏差相对值 $|e-e'|/e = 8.9 \times 10^{-8}$,可见 K_{J-90} 和 R_{H-90} 这2个自然常数不能直接推导出基本电荷量 e ,即基本电荷量 e 不能溯源到原先的自然常数(K_{J-90} 和 R_{H-90})。

从图4可见,基本电荷量常数 e 可溯源到精细

式中: k_V 、 k_R 、 k_I 为测量过程中与电桥、分压器有关的比例系数,无量纲, f_2 为约瑟夫森电压标准中测量的微波频率。

式(7)经过推导,发现与式(5)具有相同溯源途径,即基本电荷量常数 e 和铯原子频率常数 $\Delta\nu_{Cs}$ 。

4 量子标准溯源到自然常数

新SI固定了7个基本物理常数后,原来的自然常数如约瑟夫森常数和冯·克里青常数下降到次要地位,其量值不再由电学量子标准的测量确定,而是由新SI的基本物理常数计算获得。自然常数的地位发生了主次交换,基本电荷量常数由次要变成了主要地位,具有决定性的作用。然而,基本电荷量常数 e 并非溯源到原先的自然常数,而是由精细结构常数计算出来的。

1980年后,以实物电压基准和实物电阻基准为参考,测定了约瑟夫森常数 K_{J-90} 和冯·克里青常数 R_{H-90} 。电压基准是基于电化学原理的饱和电解液电池,电阻实物基准是基于金属合金材料稳定性的线绕电阻器。一些发达国家的国家计量院经过长期测量,约瑟夫森电压基准与化学电池实物基准相比的年稳定性,以及量子化霍尔电阻标准与金属合金线绕电阻实物基准相比的年稳定性均达到了 1×10^{-8} 量级,遂于1990年正式启用了约瑟夫森常数 $K_{J-90} = 483\,597.9$ GHz/V 和冯·克里青常数 $R_{H-90} = 25\,812.807 \Omega$,并规定这2个自然常数的固定值,没有测量不确定度^[13],在当时这2个常数的地位高于基本电荷量 e 。

结构常数 α 、光速常数 c 、真空磁导率常数 μ_0 和普朗克常数 h 。测定普朗克常数 h 时,使用了功率天平装置,功率天平装置中使用了约瑟夫森常数 K_{J-90} 和冯·克里青常数 R_{H-90} ,这个过程体现了电学与力学单位制定义中的能量守恒。

精细结构常数 α 与基本电荷量常数 e 的关系式为^[14]

$$e = \frac{\sqrt{2\alpha h}}{\sqrt{\mu_0 c}} \quad \text{或} \quad e = \sqrt{2\alpha h c \varepsilon_0} \quad (9)$$

式中: ε_0 为真空介电常数。

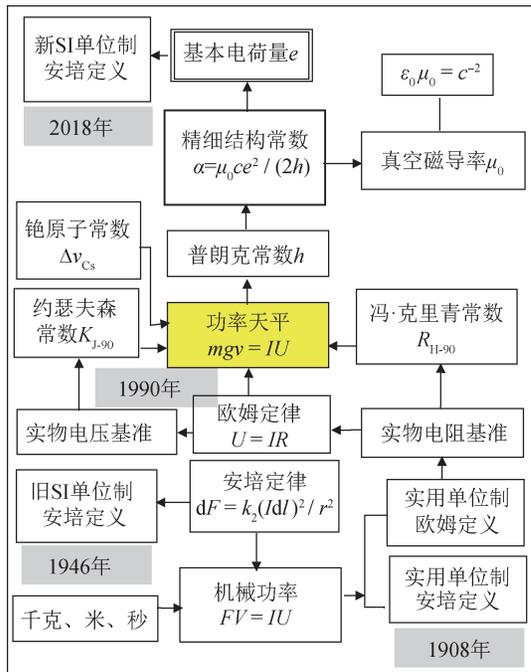


图4 电学计量相关的自然常数之间的关系

Fig.4 Relationship between the natural constants interrelated with the electrical metrology

精细结构常数还没有明确的物理意义，在早先的波尔原子模型理论中，假设电子在原子核外做轨道运动，类似于行星围绕恒星的轨道运动，精细结构常数可类比于万有引力常数 $G^{[15]}$ 。虽然当今的量子力学观点认为这样的类比不正确，但是精细结构常数 α 却保留了下来，可理解为与带电粒子之间电磁力强度相关的自然常数。

测定精细结构常数 α 的方法有很多，均为量子力学领域的基础物理实验^[16]，这些方法的测量不确定度均达到了 1×10^{-8} 量级，其中电子磁动量法的测量不确定达到了 2.5×10^{-10} 。^[17]把SI规定的自然常数固定值： $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$ 、 $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}\text{ Js}$ 、 $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}\text{ C}$ 代入精细结构常数公式(10)，假设真空磁导率 μ_0 仍为 $4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$ ，计算得到

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{2h}{\mu_0 c e^2} = 137.035\,999\,16 \quad (10)$$

一般用 α 的倒数 α^{-1} 来表示精细结构常数的值，推荐值为 $\alpha^{-1} = 137.035\,999\,173\ (35)$ 。该推荐值与自然常数计算式(10)的 α^{-1} 值相对偏差为 0.95×10^{-10} ，为平衡等式(10)，令式(10)中的 μ_0 不再与圆周率 π 绑定，即 μ_0 不恒等于 $4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$ ，而是有测量不确定度的值，因此真空磁导率 μ_0 的测量不

确定度与精细结构常数 α 的测量不确定度在相同的量级上。

用新SI的基本物理常数固定值重新计算约瑟夫森常数 $K_J = 483\,597.848\,416\ (983)\text{ GHz/V}$ 和冯·克里青常数 $R_H = 25\,812.807\,459\ (304)\ \Omega$ ，常数符号 K_J 和 R_H 与原先的常数符号 K_{J-90} 和 R_{H-90} 相比，下角标“-90”被删除了，这表示原先的 K_{J-90} 和 R_{H-90} 是1990年的约定值，现在的 K_J 和 R_H 是推导值， K_J 和 R_H 仍然没有测量不确定度，只有小数点后截断的数引入的截断误差。

5 结论

电学计量的发展历程中，在高斯单位制时代，即1900年代之前，电学和磁学没有独立的计量单位；在电气化工业革命时代，即1910年代前后，MKSA实用单位制和电学实物计量标准开启了电学计量时代；1946年，定义了电流单位，使电学计量有了独立的发展地位。1980年代前后，依据电学实物标准测定了约瑟夫森常数和冯·克里青常数，此时的量子标准溯源到电学计量实物标准上；继而在1990年定义了电学自然常数，于是量子标准反过来溯源到约瑟夫森常数和冯克里青常数；在2018年新SI定义基本物理常数之后，电学量子标准直接溯源到基本电荷量常数 e 和普朗克常数 h 。

回顾电学计量单位走过的百年历程，可见电学实用单位制所定义的电流安培和电阻欧姆，让电学单位制从力学单位体系中独立出来。SI选择了安培定律与“无限长”“截面可忽略”的理想化的电流安培定义，其目的是遵循一个原则，即“机械功率和电磁功率相等”的原则，使电压、电流和功率都具有最简化的表达式。

时至今日，自然常数取代了所有实物标准，电学计量的溯源源头变成了基本电荷量，但是电流参数仍占据基本物理量的地位，说明能量守恒原理是单位制中的第一性原理，是力学和电学计量单位的纽带。用单电子隧道效应把电流单位(安培)直接溯源基本电荷量的方法尚不成熟。当电学计量中的自然常数，如基本电荷量 e 、约瑟夫森常数 K_J 、冯克里青常数 R_H 都变成固定数值后，只有把真空磁导率 μ_0 由原来的常数改为变量，才能让安培定律公式平衡，进而满足能量守恒的要求，

因此, 关注真空磁导率的变化将成为之后理论界的研究重点。

参考文献

- [1] 严明, 刘民. 利用约瑟夫森电压标准装置测量直流电阻分压箱[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(4): 49-53.
YAN M, LIU M, Measurement of dc resistance voltage divider with Josephson voltage standard[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2010, 30(4): 49-53. (in Chinese)
- [2] 宋海龙, 孙毅, 于珉, 等. 量子霍尔效应在电阻标准中的应用综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 12-22.
SONG H L, SUN Y, YU M, et al. Review on the application of quantum Hall effect in resistance standard [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 12-22. (in Chinese)
- [3] 宋明顺, 方兴华, 马爱文, 等. 论新国际单位制(SI)的“秒制”特征及其未来发展[J]. 计量学报, 2019, 40(4): 54-548.
SONG M S, FANG X H, MA A W, et al. The characteristics of the new SI base on "Second System" and its future development[J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 40(4): 54-548. (in Chinese)
- [4] 刘民, 彭明. 基本电荷量常数定值综述[J]. 计量学报, 2020, 41(3): 322-327.
LIU M, PENG M. Review determination of the elementary charge e [J]. ACTA Metrologica Sinica, 2020, 41(3): 322-327. (in Chinese)
- [5] FABRIZIO F, STEFANO M, et al. The life and work of Giovanni Giorgi: The Rationalization of the International System of Units [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2015, 12: 152-166.
- [6] STOPES ROE H V. MKSA Giorgi and SI [J]. Nature, 1969, 222(3): 500-502.
- [7] 刘民, 李继东, 严明, 等. 一种可控约瑟夫森直流电压标准装置[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(10): 8-12.
LIU M, LI J D, YAN M, et al. PC-controlled Josephson DC voltage standard equipment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(10): 8-12. (in Chinese)
- [8] PETLEY B W. The Josephson Effects [J]. Contemporary Physics, 2009, 50(1): 71-90.
- [9] 周天地, 贾正森, 杨雁, 等. 基于PJVS的交流量子电压比例研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 85-92.
ZHOU T D, JIA Z S, YANG Y, et al. Research on AC quantum voltage ratio based on PJVS [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 85-92. (in Chinese)
- [10] STEIN F, GERSTER T, BEHR R, et al. Accuracy verification of single-electron pumps with 0.2 ppm uncertainty [C]//IEEE. 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurement. Ottawa, Canada, 2016.
- [11] FRANCOIS P, ALEXANDRE B, LAURENT D, et al. Fundamental electrical standards and the quantum metrological triangle [J]. C. R. Physique, 2004, 5: 857-879.
- [12] 张钟华. 电磁计量的量子基准及量子三角形[J]. 前沿科学, 2008, 2(7): 4-9.
ZHANG Z H. The quantum standards in electromagnetic and the quantum triangle [J]. Frontier Science, 2008, 2(7): 4-9. (in Chinese)
- [13] 邵海明, 贺青, 张中华, 等. 启用量子化霍尔电阻基准时国内直流电阻量值的修正[J]. 计量学报, 2008, 29(2): 190-192.
SHAO H M, HE Q, ZHANG Z H, et al. The corrections of DC resistance on the start day of quantum Hall resistance Standard [J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(2): 190-192. (in Chinese)
- [14] BIMAN N. The fine structure constant [J]. Resonance, 2015, 20: 383-388.
- [15] NICK F. The role of the magnetic constant μ_0 in the redefinition of the SI [C]//CPEM, 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurement. Xi'an, China. 2018: 1-4.
- [16] TOICHIRO K. Improvement of the fine-structure constant obtained from the electron $g-2$ [J]. IEEE Transaction On Instrumentation And Measurement, 2001, 50(2): 568-572.
- [17] TATSUMI A, MASASHI H, TOICHIRO K, et al. Tenth-order QED contribution to the electron $g-2$ and improved value of the fine structure constant [J]. Physical Review Letters, 2012.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 刘民(1969—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为空间计量、电磁学计量、时间频率计量、静电防护。