

安培的新时代

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Mark W. Keller, José Aumentado. *Physics*, December 12, 2016)

一个精准的量子电流源已被设计，用于根据即将重新定义的国际单位制定标电流。

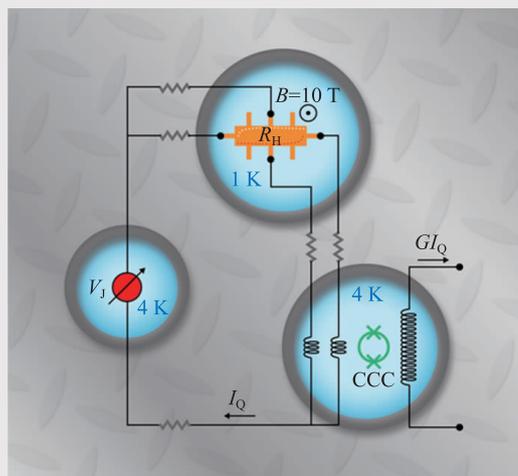
计量工作者的本性是保守的，他们知道，一个新测量标准的草率采用可能导致科学和商业领域的混乱。因此，国际单位制(SI)自1960年诞生以来，正在经历的第一次重大修订，是一件大事。两年以后，在巴黎的度量衡大会上，官员们将采用一种新的国际单位制，其中每个单位都可以从几个基本常数的固定值中获得。目前，所有的目光都集中在千克原器上：“千克”将不再由一个铂铱合金圆柱体的质量定义，该原器制作于1889年，并一直保存在巴黎拱顶。然而，电阻和电压标准的进步有点被忽视。事实上，没有这些进步，新的SI是不可能实现的。新的报告来自 Wilfrid Poirier 和他在法国计量测试实验室的同事们。他们把这些电学标准之进步结合在一起，创建了一个基于电子电荷 e 的电流源，与原来定义“安培”的方式相反。新电流源，具有前所未有的低的不确定性，将能更好地完成电流定标；以至于与重新定义的SI保持一致，促进量子计量三角形(quantum metrology triangle)的闭合。

Poirier 等的电流源由三部分组成(见图)：约瑟夫森(Josephson)电压源(V_J)，量子霍尔电阻(R_H)和放大器——基于超导的低温电流比较仪(CCC)。电压源是由 n_j 个超导 Josephson 结串联而成，在频率 f 微波的驱动

下，产生一个电压 $V_J = n_j f \phi_0 / 2e$ ，这里 h 是普朗克常数。电阻来自于一个二维电子气，通过一个强磁场它被置于第 i 阶量子霍尔态。霍尔电阻 $R_H = (h/e^2)/i$ ，总电流 $I_Q = V_J / R_H = e(n_j f i / 2)$ 。上述参数要么有精确值，要么不确定性非常小，主要的不确定性来自连接霍尔电阻的引线电阻。在新装置中，Poirier 等以精巧的设计，解决了引线电阻问题和放大器稳定性问题。

电阻器、电压源和电流放大器，三个主要部件都必须冷却到 4 K 或者更低。三台低温恒温器，加上配套的电子控制和数据采集系统，整个装置占用的实验室空间等于一个典型的两轿车车库。他们计划将所有三个低温空间合并。其中，关键步骤是采用基于石墨烯的量子霍尔器件，它可以工作于一个较低的磁场(可能低至 3.5 T，而不是 10 T)，并工作在较高的温度(高于 1 K)。

新的电源也将影响前沿计量。在几个国家计量院有研究者致力于单电子隧穿(SET)设备：以频率 f 发出单个电子，从而产生电流 $I_{SET} = ef$ 。



Poirier 和同事们创建的量子电流源。分三个部分：约瑟夫森电压源(V_J)，量子霍尔电阻(R_H)，和放大器——基于超导的低温电流比较仪(CCC)。它们均处于低温环境中

精确地比较 I_{SET} 与量子电流 I_Q ——它源自约瑟夫森电压源(V_J)和量子霍尔电阻(R_H)——之间的关系，将实现闭合量子计量三角形之长期目标。若能展示 I_{SET} 与量子电流 I_Q 全同，则可证明 V_J ， R_H ， I_{SET} 对 e ， h 依赖关系的正确性；若发现 I_{SET} 与量子电流 I_Q 之间存在偏差，将会激起对物理原因的探寻，进而修改这些关系式。迄今，最好的三角形实验给出：无偏差不确定度是 9×10^{-7} 。如果研究人员能够证明一个三角形是完美的，即在 10^{-8} 精度内相符，他们对新的 SI 提供的电气测量之基础，将更有信心。

更多内容详见：J. Brun-Picard et al. *Phys. Rev. X*, 2016, 6: 041051.