

量子霍尔电阻计量技术的应用与分析

商佳尚

(北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 目前国际上公认准确度最高的现代电阻计量技术是量子霍尔电阻计量技术, 但是其量子化、非连续特性使它在实际计量应用中受到很多限制; 围绕先进的电阻比较与计量技术进行分类对比与分析, 同时为实现 10^{-8} 量级相对不确定度的电阻计量给出可行的技术方案; 并且针对不同方案给出分析结论, 为相关计量实验室根据自身条件建立高准确度电阻计量标准提供重要参考; 最后, 针对目前国内量子霍尔电阻的研究动向进行了介绍, 特别对可能在室温环境工作的石墨烯量子霍尔电阻的发展潜力进行了简要说明。

关键词: 电阻; 量子化霍尔效应; 计量

Application and Analysis of Metrology Techniques by the Quantum Hall Electrical Resistance

Shang Jiashang

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The quantum Hall electrical resistance technology is internationally recognized for the most up to date electrical resistance standard with the highest accuracy, but its metrological application is limited because of its quantization and non-continuous. Advanced electrical resistance comparison and metrology techniques are contrasted and analyzed by category, and feasible technical solutions are proposed for electrical resistance metrology with relative uncertainty of 10^{-8} in this paper. Furthermore, analysis conclusions are given to different technical solutions, which can provide important references for different metrology laboratories to establish high accuracy electrical resistance standard according to their own conditions. In the end, the domestic and overseas research tendency of quantum Hall electrical resistance is introduced, and especially, the development potential of graphene quantum Hall electrical resistances, which maybe could work at room temperature, is simply described.

Keywords: electrical resistance; quantum Hall effect; metrology

0 引言

在量子霍尔电阻计量标准研制使用之前, 国际上普遍使用的是实物电阻标准。实物电阻标准的不确定度水平在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 量级, 长期以来 (1990 年之前几十年) 为世界的电阻计量溯源提供了重要保障, 但是实物电阻标准也存在一些问题: 一方面, 实物电阻标准的电学特性会由于一些不能完全控制的物理、化学过程而发生缓慢的变化; 另一方面, 越高级别的实物电阻标准数量越少, 如果在各种灾害中造成损坏或意外丢失, 则不可能复制出与原来实物标准绝对一致的电阻标准, 之前持续担负量传任务的标准电阻量值就可能无法保证原有的连续性与稳定性, 给国家利益甚至国际社会带来无法估量的损害。

1985 年, 德国物理学家冯·克里青^[1]的因为发现量子化的霍尔效应获得诺贝尔奖。各国技术领先的计量机构根据这一基本原理纷纷成功研制量子霍尔电阻计量标准。并且从 1990 年 1 月 1 日起, 国际计量委员会推荐各国最高计量机构采用量子霍尔电阻标准替代传统的实物电阻标准。试验证明, 采用量子霍尔电阻标准后, 电阻量值的量传准确性比传统实物电阻标准提高至少两个数量级, 而且可以完全避免电阻单位量值随时间积累缓慢变化的问题, 同时也消除了由于各种不确定因素造

成实物电阻基准损坏带来的巨大风险。

1 霍尔电阻的构成及原理

量子化的霍尔器件是通过特定的半导体工艺制作的, 在一定条件下, 半导体界面处的电子会被约束在界面附近, 使电子不能够在垂直于界面的方向运动, 但在平行于半导体界面的方向可以自由移动, 这就是克里青在量子化霍尔效应研究中发现的“二维电子气”。基于电子气在二维空间的自由运动特性, 克里青沿着半导体界面的法线方向施加一个强磁场, 于是其中的电子在磁场的作用下形成电流, 该电流可以使得电子气的两侧构成电位差, 即霍尔电压 V_H , 如图 1 (a) 所示^[2]。

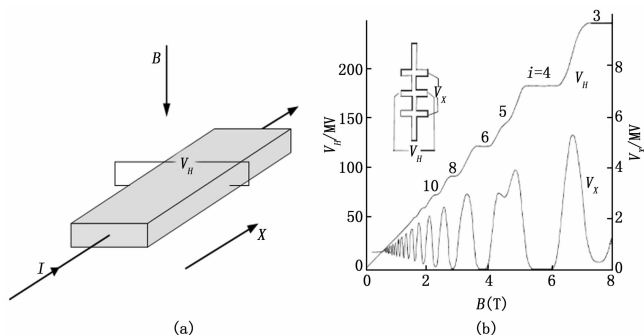


图 1 霍尔效应示意图

收稿日期: 2016-04-14; 修回日期: 2016-04-28。

作者简介: 商佳尚 (1981-), 女, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事电磁、无线电及时间频率的计量测试工作。

根据冯·克里青的研究, 霍尔电压 V_H 与磁场强度 B 之间并不是简单的线性关系, 霍尔电压大体随着磁场强度的增加而

增加,但是增加过程中会出现如图 1 (b) 所示的平台阶段。这是由于二维电子气中的电子能量是由一系列量子化能级(即朗道能级)描述的,在相同的能级之内,霍尔电压表现为一个恒定的数值。而且在一个稳定的能级状态下,原来流经半导体的主电流方向(X 方向)的电压会变为零。在每一个台阶处,相应的霍尔电压除以电流则对应一个霍尔电阻,即:

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{h}{i \cdot e^2} \quad (1)$$

其中: $i=1, 2, 3, \dots$, 表示不同的量子化能级,在不同的能级可以获得不同的霍尔电阻值,这种阻值离散的效应就是一种“量子化的霍尔效应”。

在一个稳定的量子化能级中,霍尔电阻阻值完全由一个物理常数 h/e^2 来决定,用该常数除以能级数就是对应能级的霍尔电阻值。从量子化霍尔电阻定义的(1)式可以看出,霍尔电阻标准的量值不依赖于器件的自身属性,而只和基本物理常数(即普朗克常数 h 和电子电荷 e)有关。根据这一个重要关系,国际计量委员会可以利用自然常数完成标准电阻阻值的计量量传与溯源工作,既有利于提高计量准确度,又可以避免实物电阻标准的误差因素与器件损坏风险。

有实验表明量子化霍尔电阻标准的相对不确定度能够达到 10^{-10} 的水平,超出传统的实物电阻标准 3 个数量级。根据克里青的研究,量子化霍尔电阻的推荐值为:

$$R_K = 25\,812.807\, \Omega \quad (2)$$

在利用砷化镓-铝砷化镓异质结材料制作的量子化霍尔电阻器件进行量值传递的时候,通常推荐使用第二能级对应的量子化霍尔电阻值,即:

$$R_H = 25\,812.807\, \Omega/2 \quad (3)$$

2 量子霍尔电阻的量值传递方法与应用分析

量子化霍尔电阻具有非常高的准确度与稳定性,但是其量值是具有量子化特征的一系列固定数值,而且不是整数。为了利用量子化霍尔电阻进行高准确度的量传,需要利用电位差计比较法或低温电流比较仪法^[3],将非整数的量子霍尔电阻标准量值传递给不同标称值的标准电阻。

2.1 电位差计比较法

利用电位差计比较装置进行量子霍尔电阻溯源的装置如图 2 所示,把被校准电阻与低温量子霍尔电阻串联连接,用同一个电流源供电以保证两个电阻的电流一致性。测量过程需要利用可调电流源、可调电阻以及高阻抗指零仪 D 组成电位差平衡测量电路。首先将该电位差计测量电路与霍尔电阻两端连接,调节电流使得霍尔电压 V_H 与测量电路电压 V_P 近似相等,记录指零仪 D 的读数 D_H ,然后锁定电位差平衡测量电路中的电阻与电流源大小并将其切换连接到被校准电阻 R_S 两端,这时可以从指零仪 D 中测量出 V_P 与 V_S 的电压差值,即指零仪的读数 D_S 。根据串联电路中霍尔电阻 R_H 与被校准电阻 R_S 的电流相等,可以得到如下关系式^[4]:

$$\frac{R_S}{R_H} = \frac{V_S}{V_H} = \frac{V_P + D_S}{V_P - D_H} = \frac{1 + D_S/V_P}{1 - D_H/V_P} \quad (4)$$

由于霍尔电阻 R_H 与被校准电阻 R_S 是同名电阻,因此电位差计两次比较测量中获得的指零仪读数 D_H 与 D_S 都可以认为是相对于 V_P 的无穷小量(可以达到 $D/V_P \rightarrow 10^{-5}$)。整理

(4) 式,并忽略其中 D_H/V_P 和 D_S/V_P 小量值相关的二次方项,可以得到被校准电阻与霍尔电阻的比值:

$$\frac{R_S}{R_H} = 1 + \frac{(D_H + D_S)}{V_P} \quad (5)$$

由于霍尔电阻 R_H 是高准确度的量子化标准电阻值,因此可以通过上式比值获得被校准电阻 R_S 的高准确度测量值。

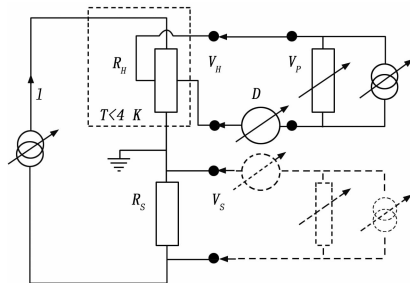


图 2 电位差计比较法

上述方法可以获得 10^{-8} 量级的测量重复性,但是该方法通常只用于 1:1 (即被校准电阻的名义阻值与量子化霍尔电阻阻值非常接近) 的电阻溯源比较试验,对于电阻计量传递中经常用到的整十倍阻值(如 $100\, \Omega$ 或 $10\, \text{k}\Omega$ 等)的标准电阻,该方法难以保证其完成高准确度的计量溯源。为此,电学计量测试领域的研究者提出许多方案解决霍尔电阻对任意阻值进行比较量传的问题,其中包括哈蒙型电阻组合的方案^[5],以及约瑟夫森电压结方案^[6]等。其中约瑟夫森电压结的方式效果比较好,它利用可调节的约瑟夫森电压标准代替上述方法中产生 V_P 的电位差计测量电路,并实现约瑟夫森电压准确可知。首先将约瑟夫森电压标准与霍尔电阻 R_H 两端相连接,通过调节约瑟夫森电压使其非常接近 V_H ,记录下此时的约瑟夫森电压 V_{PJ1} (V_{PJ1} 与 V_H 之差为 ΔV_H , $\Delta V_H \approx 0$)。然后再将约瑟夫森电压标准与被校准电阻 R_S 两端相连接,调节约瑟夫森电压使其非常接近 V_S ,记录下此时的约瑟夫森电压 V_{PJ2} (V_{PJ2} 与 V_S 之差为 ΔV_S , $\Delta V_S \approx 0$)。于是可以得到如下关系式:

$$\frac{R_S}{R_H} = \frac{\Delta V_S + V_{PJ2}}{\Delta V_H + V_{PJ1}} \quad (6)$$

因为约瑟夫森电压可以在 $0 \sim 10\, \text{V}$ 之间调节,由此可以实现利用霍尔电阻对非 1:1 同名义值电阻的高准确度测量,其相对测量不确定度水平可以达到 10^{-8} 量级。

2.2 低温电流比较仪法

如图 3 所示,两支参与比较的电阻分别为 R_P 与 R_S ,为了避免经过被校准电阻的串联电流对量子霍尔电阻引入更大误差,对参与比较的两支电阻分别建立独立的电流回路,而将它们的电路分别引出,并且都缠绕在超导磁通干涉仪(SQUID)的导磁螺线管上。超导磁通干涉仪是低温电流比较仪的核心器件,根据其工作原理,可以给出电流比较仪的平衡方程为:

$$I_P N_P - I_S N_S = 0 \quad (7)$$

其中: N_P, N_S 分别为两个电路缠绕在超导磁通干涉仪中的线圈匝数,而 I_P, I_S 分别为两个电路中的电流。通过(7)式可以看出,当两个电路的线圈匝数相同的时候,电流比较仪处于平衡位置,即超导磁通干涉仪的输出为零。如果超导磁通干涉仪的输出不为零,则作为反馈信号放大后驱动改变可调电流

源的输出,最终使电流比较仪中的电路满足(7)式的平衡条件,即 $I_p/I_s = N_s/N_p$,其控制准确度水平可以达到 10^{-12} 量级。

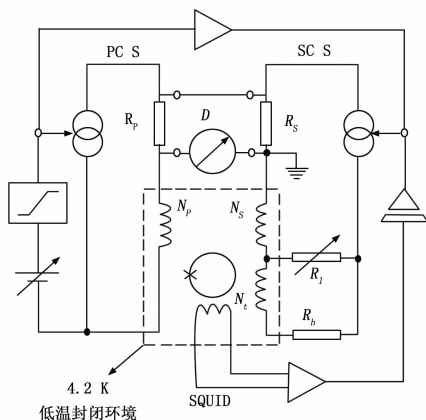


图3 低温电流比较仪法

在达到上述平衡条件之后,还需要通过微调线圈匝数使两支参与比较的电阻的电压完全相同:

$$U = I_p R_p = I_s R_s \quad (8)$$

即指零仪D的读数近似为零,具体工作方式如图4所示。经过上述两个调节过程的配合调节,如果最终使得(7)式和(8)式同时得到满足,则可以得到如下关系式:

$$N_p/R_p = N_s/R_s \quad (9)$$

根据(9)式,可以通过匝数比例,把量子霍尔电阻的量值传递给被校准电阻,最终获得被校准电阻的阻值。

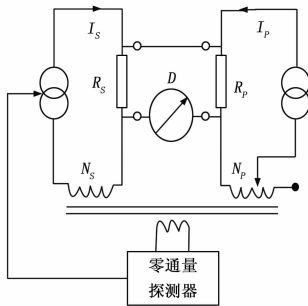


图4 低温电流比较仪工作过程示意图

3 国内外量子霍尔电阻的研究动向

我国在量子电阻基准领域的研究已经处于国际领先水平。由中国计量科学研究院研制的低温电流比较仪的相对不确定度达到 10^{-10} 量级,其建立的量子化霍尔电阻基准的准确度水平优于国外。根据最新报道得知,该院自主研制的单个量子化霍尔器件,结束了我国电阻基准所用标准器件依赖国外进口的现状。自主研制的单个量子霍尔器件能够取代国际计量局标准样品,用于我国量子电阻国家基准系统,开展电阻量值传递、国际比对等工作^[7]。

目前国际上正在探索将新材料的量子化霍尔效应应用于量子电阻标准,有研究者发现石墨烯可以在300 K的温度下表现出量子化霍尔电阻效应,这种材料有可能取代现在基于砷化镓—铝砷化镓异质结材料的电阻标准设备。并且经过研究发现石墨

烯有可能在温和的条件下产生霍尔电阻效应,这可以大大降低制作量子霍尔电阻器件的复杂度及其使用维护成本,那么量子霍尔电阻的应用将更加广泛,甚至形成商用产品,各种不同的实验室都可能使用该系统得到更为准确的电阻值^[8]。

4 结束语

量子霍尔电阻是目前国际公认准确度最高的电阻标准。但是由于其自身的量子化特性,只有与一系列量子化霍尔电阻固定值相同的电阻才能完成直接的比较溯源。因此,开展量子霍尔电阻与任意阻值电阻的比较和量传方法研究,对量子霍尔电阻真正走向计量应用有决定性的重要意义。本文针对利用量子霍尔电阻对被校准电阻进行比较溯源的方法进行了分类介绍,通过对几种方法的比较可以发现:

1) 在串联电路中采用电位差计电路直接比较的方法只能解决量子霍尔电阻的同名电阻的计量问题,使量子霍尔电阻的计量量传受到很大限制。

2) 在以上串联电路基础之上,将约瑟夫森电压结代替电位差计比较电路,可以解决量子霍尔电阻对非同名义值电阻进行量传的问题,而且比较电路相对简单。但是该方法需要利用约瑟夫森电压结,这对实验室的硬件设备条件与操作人员的技能水平都提出更高的要求。

3) 低温电流比较仪的方法对量子霍尔电阻与被校准电阻分别建立回路。该方法虽然电路相对复杂,但是只要前期设计合理,保持系统性能的稳定可靠,可以在相对紧凑的独立系统中解决量子霍尔电阻对1 Ω到100 kΩ电阻的高准确度量传问题,而且可以有效避免量子霍尔电阻与被校准电阻在同一回路中相互干扰的问题。

4) 基于石墨烯技术的量子霍尔电阻标准的发展,会降低量子霍尔电阻对低温环境的要求,使量子霍尔电阻的应用更具有广泛性。

参考文献:

- [1] Klaus von Klitzing, The Quantized Hall Effect [R]. Nobel Lecture, 1985.
- [2] 张钟华. 量子计量基准概况及研究进展 [J]. 中国测试, 2009, 35 (1): 1-8.
- [3] Jechelmann B, Jeanneret B. The quantum Hall effect as an electrical resistance standard [J]. Rep. Prog. Phys., 2001, 64: 1603-1655.
- [4] Reedtz G M, Cage M E. An automatic potentiometric system for precision measurement of the quantized Hall resistance [J]. J. Res. NBS, 1987, 92, 303-10.
- [5] Small G W. Comparison of quantized Hall resistance with 1-ohm standard [J]. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1983, 32, 446-7.
- [6] Hamilton C A, Burroughs C J, Chieh K. Operation of NIST Josephson array voltage standard [J]. J. Res. Natl Inst. Stand. Technol., 1990, 95, 219-35.
- [7] 林莉君, 陈杭杭. 我国量子电阻基准传递不再受制于人 [N]. 科技日报, 2016, 4, 14.
- [8] 电磁咨询委员会 (CECM) 战略规划工作组. 电磁学中的大问题 [R]. 电磁咨询委员会 (CECM) 战略规划文件, 2011, 5.