

中国的量子化霍尔效应电阻标准

张钟华 贺青

中国计量科学研究院量子部

摘要 基于量子化霍尔效应建立的电阻量子化标准已在世界范围内取得了巨大的成功。为了从量子化霍尔电阻导出十进电阻量值,中国计量科学研究院建立了高准确度的低温电流比较仪。2000年中国和日本的双边比对表明,两国用量子化霍尔电阻导出的 1Ω 电阻量值仅差 $1.3n\Omega$,在公开发表的类似比对数据中为最好结果。中国计量科学研究院用计算电容法测定的 Klitzing 常数 h/e^2 的 SI 值为国际上四个最佳实验结果之一,已在 1998 年的新一轮基本物理常数平差工作中被正式采用。

关键词 量子化霍尔效应 低温电流比较仪 计算电容法

The Quantum Hall Effect Resistance Standard in China

ZhangZhonghua He Qing

National Institute of Metrology Beijing 100013, China

Abstract The Quantum Resistance Standard based on Quantum Hall Effect has been developed successfully worldwide. A cryogenic current comparator of high accuracy is completed in National Institute of Metrology to derive the decimal resistance value from the Quantum Hall Resistance. A bilateral comparison showed that the difference between 1Ω values measured by both national metrology laboratories of China and Japan based on Quantum Hall Resistance is only $1.3n\Omega$. It is the best one among the published results of similar comparison. The SI value of Klitzing constant h/e^2 determined by Cross-capacitor method at National Institute of Metrology is one of the best four experiment results in world and was adopted for the New Fundamental Physical Constants Adjustment in 1998.

Key words Quantum Hall Effect Cryogenic current comparator Cross-capacitor method

一、引言

量子化霍尔效应自 1980 年发现以来^[1],在用于建立量子电阻标准方面取得了巨大的成功。一些工业发达国家已陆续建立了量子化霍尔电阻标准。国际计量委员会建议从 1990 年 1 月 1 日起在世界范围内启用量子化霍尔电阻标准代替原来的电阻实物标准,并给出了下面的国际推荐值^[2]

$$R_K = h/e^2 = 25812.807\Omega \quad (1.1)$$

其中 R_K 表示 $i=1$ 的平台处的量子化霍尔电阻值。常数 h/e^2 被命名为 Klitzing 常数。

由于用量子化霍尔效应复现的 R_K 原则上就等于恒量 h/e^2 ,因此是极稳定的,各国测量结果的一致性也很好。达到 10^{-8} 量级甚至更高。而且量子化霍尔电阻原则上没有随时间而变化的倾向,不象用电阻实物标准组复现和保存电阻单位时那样会由于电阻线圈的电阻值随时间变化而产生不确定性。因此量子化霍尔电阻标准对实用来说是非常有价值的。

量子化霍尔电阻在实用中遇到的主要困难在于式(1.1)中的数值是个非整数,而实用中的标准电阻值为十进数值。要从式(1.1)中的数值导出实用的十进电阻值,需要建立一种高准确度的非整数比例装置。90 年代以前,有一些实验室试图运用电阻串并联的方法实现这种非整数比例装置,但比例准确度只达到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 量级^[3],未能充分发挥量子化霍尔电阻本身高准确度的特点。90 年代以后,出现了更为先进的低温电流比较仪装置^[4],可以实现任意的非整数比例值,而且原理上可以达到极高的比例准确度。但实践表明,研制此种设备的难度很高。经过十多年的努力,目前也只有五、六个国家得到了成功,比例准确度为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 量级^[5,6]。

二、低温电流比较仪

低温电流比较仪的原理与熟知的磁调制器式电流比较仪相似。两个独立回路中的电流 I_1 和 I_2 通入绕在一起的两个绕组中。如用 W_1 和 W_2 分别表

示这两个绕组的匝数,总磁动势(即总的安匝数)将为 $I_1 W_1 + I_2 W_2$ 。当电路正常工作时,应满足磁动势平衡条件

$$I_1 W_1 + I_2 W_2 = 0 \quad (2.1)$$

或写成

$$\frac{I_2}{I_1} = - \frac{W_1}{W_2} \quad (2.2)$$

其中等式右边的负号表示两个线圈之一的极性端需反接。

从式(2.2)可看到,电流比较仪的电流比值等于绕组的匝数之比。绕组的匝数是整数,一旦绕制完成后也不会随时间或温度、气压等外界因数而变化。所以电流比较仪原则上可以达到很高的比例准确度。

图 2.1 中画出了一种实际的低温电流比较仪的结构示意图。可以看到,绕组线圈及其引线均用铅制的超导屏蔽包裹着,防止线圈的漏磁通逸出而造成比例误差。线圈有多个,可以按需要串联起来构成适当的匝数比。

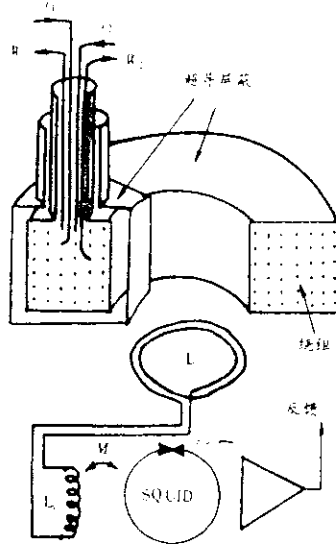


图 1 低温电流比较仪的结构

检测线圈 L 及超导量子干涉器件 SQUID 的超导输入线圈 L_i 中均为超导线圈,连结起来后就形成了一个超导回路。根据电工学中的超导回路磁链不变原理,这两个线圈的总磁链总是保持不变。当比例线圈的安匝数平衡条件未得到满足时,所形成的不平衡磁通就会由超导状态的检测线圈 L 耦合到超导量子干涉器件 SQUID 的超导输入线圈 L_i 中。不平衡信号经放大后反馈到从动电流源中以保持如式

(2.1) 所示的磁动势平衡条件。图 2.2 中为用低温电流比较仪构成的电阻比较电桥。电路中的量子化霍尔样品等效于一个四端钮电阻。

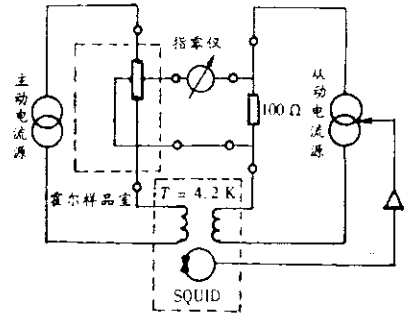


图 2 低温电流比较仪电桥

尽管低温电流比较仪在原则上可能达到很高的比例准确度,但在实践中涉及的问题也相当复杂。下面是几个与低温电流比较仪的比例准确度有关的问题。

在减小漏磁通引起的误差方面,用超导材料制作的磁屏蔽确实能起很好的屏蔽作用。从理论计算和实验两方面均已证实,使用设计得当的超导屏蔽后可使由于漏磁通而引起的电流比例误差低于 10^{-11} 量级,而且还有可能进一步提高。这样小的误差对于实际使用的低温电流比较仪已经足够。

另一方面的问题是由所谓的冻结磁通引起的。由于 SQUID 是一种极为灵敏的磁通检测仪器,如果不进行仔细的屏蔽防护,普通实验室中的杂散干扰磁场将会使 SQUID 不能正常工作。在实际操作中,为了防护外界的干扰磁场,图 2.1 中所示的低温电流比较仪的比例绕组线圈 W_1 和 W_2 、检测线圈 L 、输入线圈 L_i 及 SQUID 的探头部分均放入用超导材料制成的圆筒中。这个超导圆筒就是低温电流比较仪的外超导屏蔽,在图 2.1 中并未表示出来。

从理论上来说,外超导屏蔽圆筒最好是完全密封的。因为根据超导体的迈斯纳效应的理论,一个封闭的超导屏蔽的内部是不会有干扰磁场的。但是实际上外超导屏蔽圆筒不可能是完全密封的,总需开有出口供比例绕组的引线及 SQUID 的输出电缆等接线通过。但是正是由于这些出口及孔的存在,这些超导屏蔽就不再是完整的密封屏蔽。理论与实践均证实,当这些超导屏蔽在浸入液氮而转变成超导态时,在出口及孔的周围会形成以出口及孔为中心的超导电流环路。同时,图 2.2 中已画出的比例绕

组的超导屏蔽的外表面上也会感应出超导电流回路。以上所说的这些超导电流所形成的磁通会与检测线圈耦合,形成干扰信号。由于在超导体中流动的超导电流是不会衰减的,所以与其相应的磁通也不会衰减,一般就形象地把这样的磁通称之为冻结磁通。

如果冻结磁通是静止不动的,则它对我们要进行的电阻测量过程来说仅仅是一种不变的直流干扰,其影响可以用换向法消除。但是实验指出,即使进行了换向操作,冻结磁通的影响还不能全部消除而会留下一定的随机分量。这样的随机分量在绝对数量上已经非常小,但仍是远远超过 SQUID 本身的噪声而成为严重的干扰源。作者对实验现象分析后认为,这种随机分量来源于冻结磁通在空间中的位置不停地有不规则的微小移动。因为进入液氮容器以及外屏蔽圆筒的液氮并不是静止不动的,它会随着外界热量的侵入和低温电流比较仪工作时的发热而沸腾挥发,在超导屏蔽内外不断造成微小的压力差,使铅制的超导屏蔽不断发生微小变形,引起冻结磁通的空间位置也随着不断发生很小的变化。反映到检测线圈中就成为一种随机噪声。实际观察到的实验现象与以上的分析是一致的。在液氮刚灌入容器的头一天中,由于容器内的各部件还未充分冷却,液氮的沸腾现象很激烈,SQUID 输出端观察到的噪声很大,整个系统无法正常工作。两三天后,液氮的沸腾逐渐减弱,噪声也随着减小。如果又在容器中插入某个较热的部件而使液氮沸腾再次加剧,噪声也会又变大起来。当此部件冷却后,液氮沸腾恢复原来的状态,噪声也再次减小。这些现象用以上关于冻结磁通的分析都能很好地解释。此外,当与液氮容器相连的氦气回收管道及储气罐中的气压发生某种变动时,在 SQUID 的输出端也立即能观察到相应的干扰信号,这也与此处的分析相一致。

上面所述的冻结磁通引起的噪声使得安匝数平衡条件式(2.1)的检测准确度降低,影响了低温电流比较仪的比例准确度。目前文献中也未提出过降低这些噪声的有效办法。但从另一个角度来看,安匝数平衡公式(2.1)的失衡量相当于图 2.2 中反馈系统的不平衡信号,它与系统中的噪声之比则为系统的信噪比。绕组的安匝数 $I_1 W_1$ 或 $I_2 W_2$ 越大,信噪比越高,平衡后的比例准确度也就越高。因此提高绕组的安匝数 $I_1 W_1$ 或 $I_2 W_2$ 与降低噪声是等效的。安匝数等于通过绕组的电流与绕组匝数的乘积。乘积中的电流同时通过被比较的电阻,其大小受到电

阻耗散功率的限制,所以事实上只能采用较多匝数的绕组来得到更大的安匝数,以提高低温电流比较仪的比例准确度。但在实验中发现,当绕组匝数较多时电流反馈回路很难锁定,常常会发生电流跳跃。目前国际上已发表的低温电流比较仪装置,匝数最多为 2000 匝左右^[5],而文献中亦未看到对电流跳跃问题进行探讨。本文作者从理论和实验两方面对此问题进行了研究,发现问题的症结在于电路的非线性特性在动态过程中产生了问题。以下将对此进行论述。

三、电流跳跃现象的消除

图 3.1 是图 2.2 中电桥的反馈系统的框图。作者已从理论和实验两方面证实,电流跳跃现象来源于图 3.1 中 SQUID 及后续电子线路的非线性特性。图 3.2 画出了 SQUID 的输出特性,这是一种分段线性化特性。如用相平面法对此非线性反馈系统进行分析,可以得到如图 3.3 所示的相平面上的积分曲线簇。由于相平面上存在多个稳定的平衡点,积分曲线分成了若干类。从某些起始点出发的积分曲线趋向某一个稳定平衡点,从另一些起始点出发的积分曲线则趋向另一个不同的稳定平衡点。在与正反馈相应的不稳定平衡点的附近,积分曲线都趋向于离开此不稳定平衡点。值得注意的是不同类积分曲线交界处的情况,从两个非常靠近的起始点出发的积分曲线趋向了完全不同的稳定平衡点。

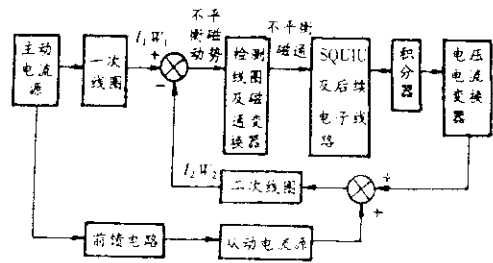


图 3 低温电流比较仪反馈系统框图

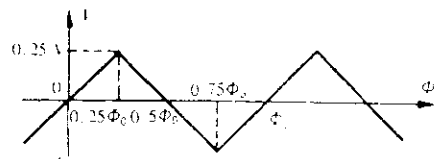


图 4 SQUID 的输出特性

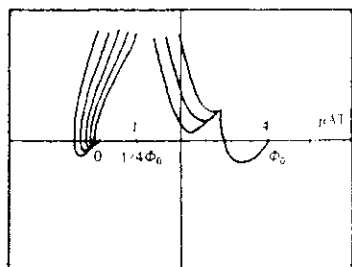


图5 相平面上的积分曲线簇

现在就可以说明低温电流比较仪中发生电流跳跃的物理过程。低温电流比较仪是一种非常精密的仪器。由于使用了前馈环节进行补偿,图 3.1 中的反馈回路的输入量 ΔIW 很小,仅为微安匝的量级。但是前馈环节是按照直流电路,也就是稳态电路设计的。对于动态过程,前馈环节的补偿作用则并不完全。也就是说在暂态过程中反馈回路的瞬间输入量 ΔIW 可能达到一定的数量,对于图 3.1 中这样的精密反馈回路来说就是一种相当大的冲击量。这样的冲击使得反馈回路的工作点不会停留在原来的稳定平衡点上而被移到相平面的某一点处。如果冲击量不太大,冲击过程过去后,反馈回路就会以这一点作为新的起始点而回归到原来的稳定平衡点处。但是如果冲击量比较大,使得反馈回路的工作点移到了别的积分曲线簇的区域,此时反馈回路就不会回到原来的平衡点而趋向别的稳定平衡点处,这就是所观察到的电流跳跃现象。实验所观察到的电流跳跃现象一般发生在电流换向过程中,而且跳跃量总是相当于整数个量子磁通,这与此处的分析均是一致的。

电流跳跃现象对低温电流比较仪的正常工作产生了严重的干扰。一方面,电流跳跃会使读数得不到正确结果。同时,电流跳跃时还会对灵敏的指零仪造成冲击,容易造成指零仪损坏。但是在阐明了产生电流跳跃的物理原因后,就可设计出一些解决此问题的方法。

产生电流跳跃的原因在于换向过程中输入量 ΔIW 的瞬间值变得比较大而对图 3.1 中的系统产生了较大冲击。 ΔIW 中的 W 代表低温电流比较仪的比例绕组的匝数。所以,最简单的避免电流跳跃的方法就是采用较少匝数的绕组。此时冲击量 ΔIW 也就成比例地减小,因而可以避免电流跳跃现象。这也就是国外发表的低温电流比较仪的匝数不高于 2000 匝的原因。但是绕组匝数较少也就意味着较小

的安匝数 $I_1 W_1$ 或 $I_2 W_2$ 。目前低温电流比较仪中的附加噪声主要是冻结磁通引起的噪声。此种噪声使得安匝数平衡条件式(2.1)的检测准确度降低,影响了低温电流比较仪的比例准确度。绕组的安匝数 $I_1 W_1$ 或 $I_2 W_2$ 越小,则信噪比越差,平衡后的比例准确度也就越低。所以采用较少匝数的绕组只是在不太明白电流跳跃的物理原因时采用的一种不得已的解决办法。本文中则提出了几种更好的解决方法:

1.设计了一种缓变换向电路。能使换向过程大大变慢,例如达到十几秒的时间。此时 IW 的冲击量就会随之大为减小,有利于达到避免电流跳跃的目的。而十几秒的时间对于精密测量过程来说还不算很长,不至于明显延长测量过程。

2.对前馈环节进行仔细的动态补偿,使电路处于动态过程,例如电流换向过程中时,前馈电路的平衡作用也能比较完全。这样能较好地避免电流跳跃现象的出现。

3.细致设定反馈回路的开环增益,避免系统产生谐振特性。因为谐振特性会促使动态过程变得更为强烈,容易导致电流跳跃的出现。

4.把电流源的采样电压提高了十倍,因而使电流源本底噪声影响也相应地降低了十倍。同时采样电阻采用了分布式结构,避免了采样电阻因电压提高而引起的发热问题。

5.用黄铜制作检测线圈的骨架,形成了通频带适当的低通滤波器,即设置了噪声的最佳截止频率。

实验证明,综合采用了上述五种措施后,可较好地避免电流跳跃现象。低温电流比较仪的匝数增加到 8000 匝左右,系统也能稳定工作。文献公开发表的国外低温电流比较仪匝数最多做到 2000 匝左右。因此,通过这些措施使我国的低温电流比较仪的实际信噪比提高了 4 倍,测量时间大大缩短。

四、与国外实验室的比对结果

2000 年 10 月,日本的国家电学计量机构 ETL 的中西正和博士(Dr. M. Nakanishi)携带了三个高稳定的 1Ω 标准电阻到中国计量科学研究院进行双边国际比对,比较两国各自用量子化霍尔电阻复现的 1Ω 电阻量值的一致性。比对结果表明,两国用量子化霍尔电阻复现的 1Ω 电阻量值的差别仅为 $1.3n\Omega^{[2]}$,优于目前文献中已发表的所有结果。比对结果说明本文中的研究成果为我国电学计量基准达到世界先进水平起了重要的作用

五、量子化霍尔电阻 SI 值的测定

式(1.1)中量子化霍尔电阻的国际推荐值是 Klitzing 常数在 SI 单位制中的表达值。国际计量委员会在决定量子化霍尔电阻的 SI 值时,综合了当时国际上已发表的最好的实验结果。这样的实验有两种类型:一种是用计算电容方法直接测定量子化霍尔电阻的 SI 值;另一种是用回旋加速器测定精细结构常数 α ,再结合光速 c 和真空磁导率 μ_0 间接导出量子化霍尔电阻的 SI 值。中国早已建立了计算电容装置^[8],并进行了量子化霍尔电阻 SI 值的测定工作。1988 年,中国的测定结果为国际计量委员会正式采用,作为决定式(1.1)中量子化霍尔电阻的国际推荐值的根据之一^[2]。

1998 年,国际数据委员会 CODATA 汇集了国际上各种最佳的物理实验结果,进行了新一轮的基本物理常数平差工作^[9]。在用计算电容法测定 Klitzing 常数的实验工作中,只有美、英、澳、中四个国家的实验结果被 CODATA 选择作为决定 Klitzing 常数的依据,其情况如图 5.1 所示。美、中两国数据非常接近,与国际平均值的差别为 10^{-9} 量级,英、澳两国的数据则偏差较大。

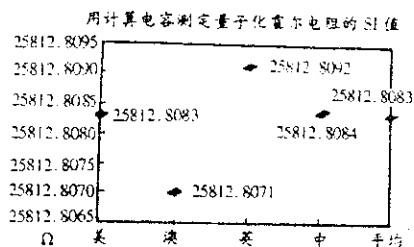


图 6 1998 年基本物理常数平差时用于决定 Klitzing 常数 h/e^2 的 4 个国家的实验结果

六、结论

中国计量科学研究院已建立了高准确度的量子

化霍尔电阻标准。由于对低温电流比较仪中的电流跳跃现象进行了深入的研究,采用了适当措施避免测量实验中电流跳跃现象的出现,可把低温电流比较仪的信噪比提高 4 倍。2000 年中国和日本的双边比对表明,两国用量子化霍尔电阻导出的 1Ω 电阻量值仅差 $1.3n\Omega$,在公开发表的类似比对数据中为最好结果。中国计量科学研究院用计算电容法测定的 Klitzing 常数 h/e^2 的 SI 值为国际上四个最佳实验结果之一,已在 1998 年的新一轮基本物理常数平差工作中被正式采用。

王大珩院士对实验工作进行了多方面的指导;中国科学院物理研究所周均铭、黄绮研究员提供了量子化霍尔电阻的实验样品;整个实验工作得到了计量院有关部门的大力支持,特于此致谢。

参 考 文 献

- [1] K. v. Klitzing, G. Dorda and M. Pepper, New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on Quantized Hall Resistance, Phys. Rev. Lett. 45(1980)494-497.
- [2] F. Delahaye et al., Report from the working group on the Quantum Hall Effect, Report of the 18th Meeting of CCE, BIPM, 1988.
- [3] Zhang Zhonghua et al., A precise measurement of QHR at NIM, IEEE Trans. on Instrum. & Meas. IM-40(1991)889-892.
- [4] D. B. Sullivan and R. F. Dziuba, Low temperature direct current comparator, Rev. Sci. Instr. 45(1974)517-519.
- [5] F. Delahaye, DC and AC techniques for resistance and impedance measurements, Metrologia 29(1992)81-93.
- [6] M. Nakanishi et al., Resistance ratio bridge using cryogenic current comparator with dc - superconducting quantum interference device magnetometer, Jpn. J. Appl. Phys. 34(1995)3284-3289.
- [7] M. Nakanishi, Zhang Zhonghua et al., Mutual comparison of resistance standard comparison between NIM and ETL, to be published.
- [8] Zhang Zhonghua, A Cross-capacitor with fixed value in NIM, Acta Metrologica Sinica 6(1985)33-38.
- [9] P. J. Mohr and B. N. Taylor, CODATA Recommended values of the fundamental physical constants: 1988, J. Phys. Chem. Ref. Data 28 (1999)1713-1852.