

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209263

# 基于低温电流比较仪的微弱电流放大器设计\*

丁立<sup>1</sup>, 鲁云峰<sup>2,3</sup>, 赵建亭<sup>2,3</sup>, 鄢志丹<sup>1</sup>, 贺青<sup>2,3</sup>

(1. 中国石油大学(华东)控制科学与工程学院 青岛 266000; 2. 中国计量科学研究院电磁所 北京 100029;  
3. 国家市场监督管理总局重点实验室(电学量子基准) 北京 100029)

**摘要:**文章设计并制作了一款基于低温电流比较仪(CCC)的低噪声电流放大器,可以用于 pA 量级微弱电流的精密测量。该放大器由最大匝比 2 000:1 的超导比例线圈、直流超导量子干涉器以及超导屏蔽等组成,建立了该放大器等效输入电流噪声、电流灵敏度以及反馈回路模型,在此基础上提出了降低放大器噪声和提高放大器灵敏度的方法。实验结果表明,CCC 超导比例线圈与匝数为 12 的检测线圈的耦合系数可以达到 0.61,当 CCC 电流放大比例为 2 000:1 时,在 1 Hz 频率下,放大器的等效输入电流噪声为 30 fA/Hz<sup>0.5</sup>,电流灵敏度为 4.71 nA/ $\Phi_0$ ,该放大器的性能在对峰峰值为 6 pA 的方波电流测试中得到了验证。

**关键词:**低温电流比较仪;直流超导量子干涉仪;电流放大器;低噪声;微弱电流

**中图分类号:** TB971 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1045

## Design of weak current amplifier based on the cryogenic current comparator

Ding Li<sup>1</sup>, Lu Yunfeng<sup>2,3</sup>, Zhao Jianting<sup>2,3</sup>, Yan Zhidan<sup>1</sup>, He Qing<sup>2,3</sup>

(1. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China;  
2. Division of Electricity and Magnetism, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;  
3. Key Laboratory of Electrical Quantum Standards for State Market Regulation, Beijing 100029, China)

**Abstract:** A low noise current amplifier based on the cryogenic current comparator (CCC) is designed and fabricated, which can be used for precision measurement of pA level weak current. The amplifier consists of superconducting proportional coils with a maximum turn ratio of 2 000:1, a DC-superconducting quantum interference device and a superconducting shield. The equivalent input current noise, current sensitivity and feedback loop model of the amplifier are established. On this basis, the methods to reduce the amplifier noise and improve the amplifier sensitivity are proposed. Experimental results show that the coupling coefficient between CCC superconducting proportional coils and pick-up coil with 12 turns is 0.61. When the CCC current amplification ratio is 2 000:1, the equivalent input current noise of the amplifier is 30 fA/Hz<sup>0.5</sup> at 1 Hz. The current sensitivity is 4.71 nA/ $\Phi_0$  and the performance of the amplifier has been evaluated in the test of peak to peak 6 pA square wave current.

**Keywords:** cryogenic current comparator; DC-superconducting quantum interference device; current amplifier; low noise; weak current

## 0 引 言

电流测量尤其是微弱电流测量在电磁测量领域具有重要的地位;随着国际单位制基本单位重新定义<sup>[1]</sup>,电流单位安培要实现量子化复现,发展微弱电流(小至 100 pA)高准确传递和测量技术极为关键<sup>[2]</sup>;国际校准和测量能力(calibration and measurement capability, CMC)中提高

微弱电流测量能力也是各国努力提高和发展的方向;量子电压和量子电阻基准在电学计量领域已广泛应用<sup>[3-4]</sup>,量子电流中的微弱电流精密测量技术是当前电磁计量热点。实际测量中,由于微弱电流信号易受噪声干扰,需要有效地抑制噪声并对其进行准确放大。通常测量微弱电流使用的方法有运算放大器电路放大后测量和直接测量采样电阻上的电压实现测量;前一种方法依赖运放的噪声水平,可达几个 pA/Hz<sup>0.5</sup>,存在

收稿日期:2022-01-28 Received Date: 2022-01-28

\* 基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDC07010100)、国家自然科学基金(51777199)项目资助

放大倍数不准确的问题;采样电阻法则受限于电阻本身大小、准确度和噪声水平。两种方法都存在限制。本文采用低温电流比较仪(cryogenic current comparator, CCC)构成的放大器,兼具低噪声及准确比例特点,测量微弱电流优势明显。

低温电流比较仪是精密电流比例装置,主要用于计量领域<sup>[5]</sup>。基于 CCC 的电阻电桥,可以将标准电阻与量子霍尔电阻标准进行比对<sup>[6-7]</sup>,以校准标准电阻,传递不确定度可达到  $10^{-10}$  量级。CCC 由于采用直流超导量子干涉器(DC-superconducting quantum interference device, DC-SQUID)作为磁检测器,具有极高的电流灵敏度,本文所用的是直流超导量子干涉器(DC-SQUID),由两个约瑟夫森结的超导环构成,将磁通信号转换为电压信号,可检测  $10^{-6} \Phi_0$  大小的磁通变化,具有  $10^{-21} \text{ Wb/Hz}^{0.5}$  的磁通分辨率<sup>[8-9]</sup>,其在电磁测量等领域有广泛的应用。在放大器中,CCC 用作超导变压器,通过检测线圈将其连接到 DC-SQUID 的输入端,DC-SQUID 可以检测 CCC 的不平衡磁通,经过磁通-电压-电流变换后,进行反馈<sup>[10]</sup>。采用低温电流比较仪构成放大器对微小电流放大后进行测量,其准确度大大提高。

本文设计并制作了基于 CCC 的电流放大器。CCC 超导线圈最高可满足 2 000:1 的电流比例,设计了超导屏蔽,分析了放大器灵敏度、噪声及反馈传递函数;为获得最佳灵敏度,采用 MAXWELL 有限元分析软件对 CCC 超导屏蔽管的自感  $L_{\text{CCC}}$  进行仿真,计算并优化 SQUID 检测线圈参数;对放大器噪声项进行分析和计算,评估影响放大器噪声的因素和来源。经测试,放大器中超导比例线圈与检测线圈的耦合系数为 0.61。对于原边匝数为 2 000 匝,放大器的电流灵敏度为  $4.71 \text{ nA}/\Phi_0$ ,在 1 Hz 频率下,输入电流噪声最小可达到  $30 \text{ fA/Hz}^{0.5}$ 。在对峰峰值 6 pA 方波电流测试中验证了放大器性能。

### 1 CCC 原理

CCC 是将线圈绕组包裹在一个未封闭的环形超导屏蔽管(其通常由 0.1 mm 铅皮制作)内构成,如图 1 所示。屏蔽管分为三层,是一个类似蛇吞尾巴的构造<sup>[11]</sup>,层层压覆,层与层之间用绝缘材料阻隔,因而只在结尾处有很少量的漏磁。采用此种结构,依据迈纳斯效应,管内两个线圈中循环的方向相反的电流产生的不平衡磁通会在超导屏蔽外表面感应出一个超导电流,使  $B$  为 0,如图 2 所示,由安培环路定理,对 CCC 超导屏蔽管截面的闭合路径内包围的电流有:

$$\oint_c B dl = 0 = \mu_0 I \tag{1}$$

$$I = N_1 I_1 - N_2 I_2 + I_E \tag{2}$$

式中:  $I_1, I_2$  表示流入两个线圈的电流,  $N_1, N_2$  表示线圈的匝数,  $I_E$  表示感应电流。

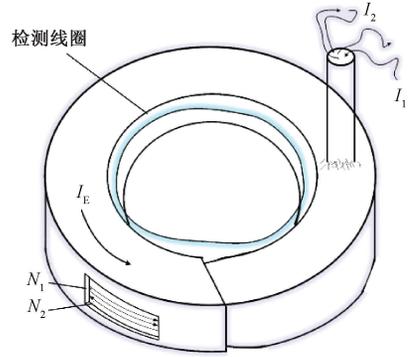


图 1 CCC 结构

Fig. 1 CCC structure

联立式(1)和(2)则有:

$$I_E = N_2 I_2 - N_1 I_1 \tag{3}$$

超导屏蔽管的长度足够长时,检测线圈检测到的通量与环面内两线圈的位置无关。而且屏蔽管的重叠部分越长,就越能屏蔽重叠间隙漏出的由两个线圈产生的磁通,使其泄漏微乎其微。这种情况下,检测线圈与 CCC 耦合,只检测由屏蔽外表面感应电流产生的磁通。因此,绕组比误差可以降低到不可检测的水平。检测线圈与 DC-SQUID 内置的输入线圈相连,这样磁通经检测线圈传递到 DC-SQUID 输入线圈,并最终由 DC-SQUID 检测并转换为电压输出,将输出电压通过反馈电阻实现负反馈来调节线圈内的电流,以消除 CCC 内部的安匝不平衡。以文献[12]中的方式可以得到:

$$I_E = \frac{N_1}{N_2} I_1 \tag{4}$$

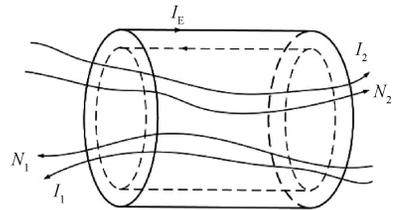


图 2 CCC 截取图

Fig. 2 CCC interception

### 2 放大器设计

整个放大器结构如图 3 所示。电流信号  $I_{\text{IN}}$  由 CCC 的 2 000 匝原边线圈输入,产生的磁通信号经检测线圈传递到 SQUID, SQUID 将磁通信号转换为电压信号,再经读出电路放大,输出一个  $\pm 10 \text{ V}$  间的电压信号。SQUID 读出电路使用的是直接读出 FLL,相比于磁通调制的

FFL 读出电路,结构更加简单<sup>[13-14]</sup>。为避免反馈回路引入干扰而影响 SQUID 正常工作, SQUID 输出与反馈回路间经过 1:1 光耦隔离。隔离后的信号通过反馈电阻转换为电流信号,再施加于 CCC 的副边绕组实现负反馈,反馈电阻大小从几千  $\Omega$  到几个  $M\Omega$  可调,以保证整个系统能够正常锁定并稳定工作。最终达到安匝平衡,实现电流放大。输出可以通过测量采样电阻两端压降获得。

此外,电流源,光耦,反馈电阻等各部分拆分为独立模块分装到机箱中,方便各模块单独测试,封闭机箱也可以减少外界电磁干扰。电路供电采用锂电池,减少市电引入的干扰。

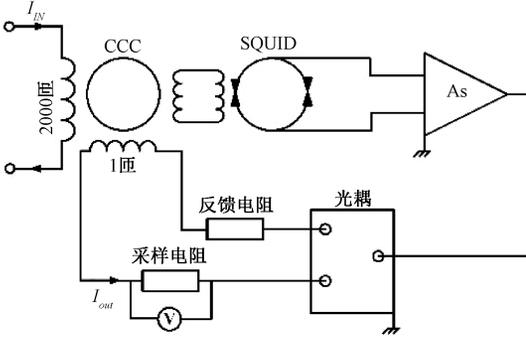


图3 放大器整体结构

Fig. 3 Overall structure of the amplifier

为了使放大器获得良好的电流灵敏度, CCC 和 SQUID 之间要满足最佳的耦合,那么检测线圈自感就必须与 SQUID 输入线圈的自感匹配<sup>[15]</sup>。CCC-SQUID 的磁通转换器如图 4 所示,主要由缠绕在超导屏蔽管内侧的检测线圈和 DC-SQUID 的输入线圈组成。

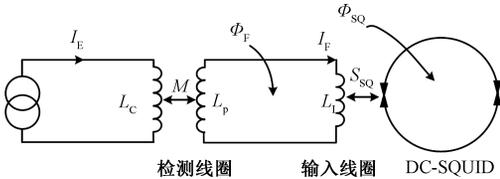


图4 CCC-SQUID 磁通转换器

Fig. 4 CCC-SQUID flux transducer

放大器灵敏度  $S_{CCC}$  表示 SQUID 上产生一个磁通量子  $\Phi_0$  所需要的 CCC 原边绕组中的输入电流,单位为  $A/\Phi_0$ ,其值越小,代表灵敏度越高。

$$S_{CCC} = |\partial I_E / N_1 \partial \Phi_{SQ}| = |\partial I_E / N_1 \partial I_F| S_{SQ} \quad (5)$$

式中:  $I_E$  为 CCC 超导屏蔽管上的感应超导电流,  $N_1$  为原边绕组匝数,  $I_F$  是磁通转换器中的电流,  $\Phi_{SQ}$  为 SQUID 检测到的磁通,  $S_{SQ}$  为 SQUID 的电流灵敏度。当磁通转换器初始磁通为 0,即:

$$\Phi_F = (L_p + L_1) I_F + M I_E = 0 \quad (6)$$

式中:  $L_p$  和  $L_1$  分别为检测线圈和 SQUID 输入线圈自感,  $M$  为 CCC 超导屏蔽管与检测线圈间互感。

$$M = k \sqrt{L_p L_c} \quad (7)$$

其中,  $L_c$  为 CCC 超导屏蔽管自感,  $k$  为超导屏蔽管与检测线圈耦合常数,又:

$$L_p = N^2 l_p \quad (8)$$

其中,  $N$  为检测线圈匝数,  $l_p$  表示单匝检测线圈自感,式(6)带入(5)式有:

$$S_{CCC} = (L_p + L_1) \times S_{SQ} / N_1 M \quad (9)$$

式(7)及式(8)带入式(9)得到:

$$S_{CCC} = (N^2 l_p + L_1) \frac{S_{SQ}}{k N_1 N \sqrt{l_p L_c}} \quad (10)$$

对于式(10),可以将其看做一个变量为检测线圈匝数  $N$  的关系式,对  $N$  求导后,使导数为 0,得到最佳灵敏度:

$$S_{CCC}^{opt} = \frac{2 S_{SQ}}{k N_1} \sqrt{\frac{L_1}{L_c}} \quad (11)$$

此时最佳的检测线圈匝数满足:

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{L_1}{l_p}} \quad (12)$$

上述是理想情况,事实上,为了获得足够弱且基本上非常稳定的环境磁场,整个 CCC 和 SQUID 组合被外部超导屏蔽所包围。所以计算检测线圈自感时,必须考虑这个外部屏蔽。而且 CCC 环形超导屏蔽管和检测线圈之间存在感应耦合,环形超导屏蔽管对检测线圈会产生镜像效应,圆环屏蔽内壁上的线圈产生的垂直磁场会被超导材料抵消,相当于镜像线圈产生相反的磁场。在这种效应下,检测线圈自感完全可以用环形超导屏蔽管的有效自感代替。这样检测线圈最佳匝数  $N_{opt}$  可以表示为:

$$N_{opt} = \sqrt{\frac{L_1}{L_{CCC}}} \quad (13)$$

式中:  $L_{CCC}$  为 CCC 环形超导屏蔽管的有效自感。由于  $L_{CCC}$  难以直接测量,可以通过有限元仿真获得。

满足上述条件,放大器最佳灵敏度可以表示为:

$$S_{CCC}^{opt} = \frac{2 N_{opt}}{k N_1} \times S_{SQ} \quad (14)$$

制作 CCC 首先要绕制线圈, CCC 线圈由 0.05 mm 的漆包线绕制,在保证匝数的情况下,细线可以使 CCC 体积更为小巧,这一定程度上可以减缓液氮的消耗。如图 5(a) 所示,绕制好的 CCC 线圈放置到 3D 打印的聚四氟乙烯外壳中,这使得包覆的铅皮屏蔽有良好的支撑,得以塑形,这点对于 CCC 屏蔽内环表面尤其重要,直接关系到检测线圈与 CCC 的贴合程度,从而影响耦合效果<sup>[16]</sup>。最终完成的 CCC 如图 5(b) 所示,拥有三层铅皮,外部尺寸为:内径 17.8 mm,外径 40.6 mm,高度为 13 mm。

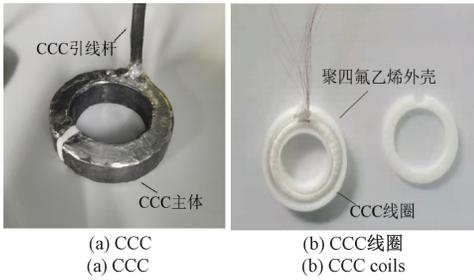


图 5 CCC 实物

Fig. 5 CCC material object

通过有限元分析软件对超导屏蔽管的有效自感  $L_{CCC}$  进行仿真计算<sup>[17]</sup>, 仿真建模如图 6 所示, CCC 外部保护筒, 铅皮屏蔽层的尺寸, 材料等均按照实际设计, 其相互位置关系也与实物对应。由于实验时 CCC 等会处于液氦环境, 因此建模时其间隙也仿真充满液氦。最终仿真得到的结果为 11.8 nH。使用的 SQUID 输入线圈自感为 1.8  $\mu$ H, 依据式 (12) 计算得到检测线圈的最佳匝数为 12。检测线圈使用铌线绕制, 在 4.2 K 下会达到超导, 将其缠绕到环形支撑件表面, 放入 CCC 内环。

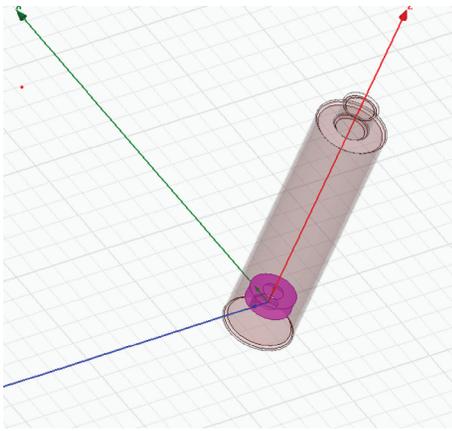


图 6 CCC 电感仿真模型

Fig. 6 CCC inductance simulation model

CCC 和 SQUID 通过如图 7 的结构组合。首先 CCC 由一组圆形夹板固定, 夹板间由螺纹连接, 可调节适应不同 CCC 高度。夹板上部通过连杆与电路板相连, 而电路板又与保护筒通过螺丝固定, 进而形成一个整体。同时 CCC 引线焊接在电路板上。SQUID 通过铌屏蔽套筒的螺纹固定到铝制圆板而与连接杆组成整体。

CCC 及 SQUID 外部由封闭的铝制圆筒作为保护支撑。在圆筒外侧包覆铅皮, 在超导状态下可以起到有效的磁屏蔽, 外部磁通噪声可以忽略不计。图 7 装置通过探杆放入到液氦杜瓦罐中, 信号引线也通过探杆引出到外界, 方便连接测试。接头及探杆部分做到了严格的密封, 防止结冰。

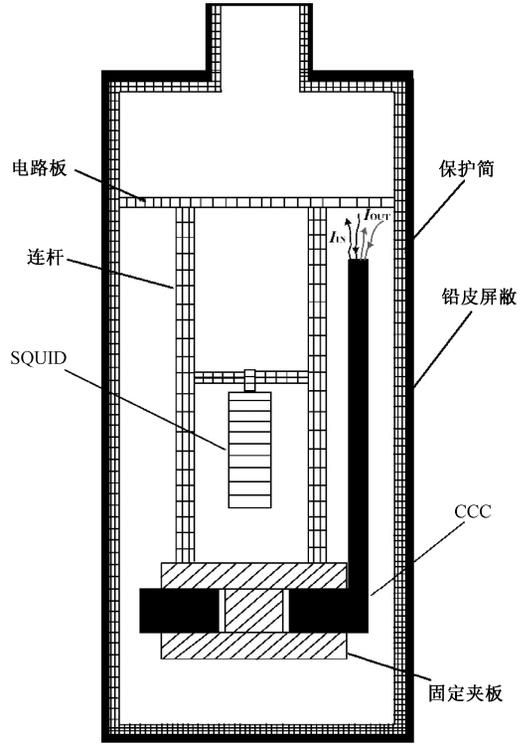


图 7 CCC-SQUID 组合结构

Fig. 7 CCC-SQUID composite structure

放大器的等效输入电流噪声  $I_n$  可以表示为式 (15)<sup>[18]</sup>, 单位为  $A/Hz^{0.5}$ , 式中第 1 项是输入电阻  $R_{IN}$  的热噪声,  $T$  为电阻温度,  $K_B$  为玻尔兹曼常数。第 2 项表示 DC-SQUID 固有噪声功率谱  $\varepsilon$  的噪声贡献,  $L_{CCC}$  表示 CCC 环形超导屏蔽管的有效自感,  $N_1$  是 CCC 原边绕组的匝数,  $k$  表示 CCC 与检测线圈的耦合常数。最后一项是 CCC 环路为抵消寄生的外部磁通  $\Phi_e$  而带来的额外噪声。

$$I_n = \sqrt{\frac{4K_B T}{R_{IN}} + \frac{8\varepsilon}{N_1^2 k^2 L_{CCC}} + \frac{1}{N_1^2} \left( \frac{\Phi_e}{L_{CCC}} \right)^2} \quad (15)$$

在外部铅皮的良好超导屏蔽下, 磁场衰减可达到 100 dB, 整个实验室也为电磁屏蔽室, 实验环境较好, 外部磁通带来的噪声可以忽略。所以放大器的输入电流噪声主要来自第 1 项电阻热噪声以及第 2 项 DC-SQUID 的固有噪声<sup>[19]</sup>。放大器的输入电阻为 20  $M\Omega$ , 放置在空气中; 使用的 DC-SQUID 固有噪声功率谱  $\varepsilon$ , 大约为  $500h$  ( $h$  为普朗克常量), 仿真计算得到  $L_{CCC}$  为 11.8 nH, 耦合常数为 0.61; 根据式 (15) 所示, 对于 2 000 匝原边绕组, 最终计算得到放大器的输入电流噪声为 34.4  $fA/Hz^{0.5}$ 。

系统简化的框图如图 8 所示, 系统的环路增益决定电流比例的误差。

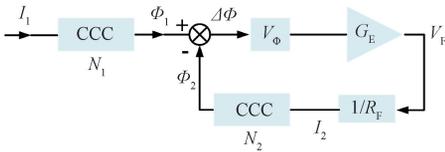


图8 放大器简化框图

Fig. 8 Simplified block diagram of the amplifier

2 000 匝原边绕组  $N_1$  及 1 匝副边绕组  $N_2$  中的电流在 SQUID 上产生的磁通差为  $\Delta\Phi$ ，环路增益  $G_0$  可以表示为：

$$G_0 = N_2 G_E V_\Phi / R_F S_{\text{CCC}} \quad (16)$$

式中： $G_E$  为 SQUID 读出电路放大倍数， $V_\Phi$  为磁通电压转换系数， $R_F$  为反馈电阻， $S_{\text{CCC}}$  为放大器灵敏度。如果副边电流只由反馈回路提供，那么有：

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \left(1 - \frac{1}{G_0}\right) \quad (17)$$

当  $G_E$  为 2 000， $V_\Phi$  为  $283 \mu\text{V}/\Phi_0$ ， $R_F$  为 10 k $\Omega$  反馈电阻， $S_{\text{CCC}}$  为  $4.71 \text{ nA}/\Phi_0$ 。计算得到  $G_0$  为 12 000。

### 3 测 试

图 9 为测试用的电流源模块，其中商用电流源最小可以输出 nA 量级的电流，通过附加的分流电阻，就可以轻松输出 pA 量级的电流。

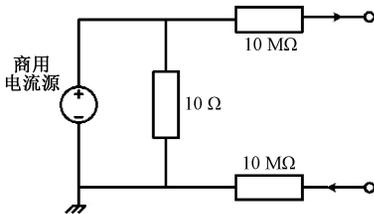


图9 电流源模块

Fig. 9 Current source module

当温度达到 4.2 K，CCC 及 SQUID 正常工作，对放大器进行测试。

测试放大器电流灵敏度，将一个小电流施加到 CCC 的原边绕组上，测量 SQUID 端输出电压。理论上，输入电流越大，SQUID 输出电压越大，二者成线性关系。将输出电压除以 SQUID 读出电路放大倍数以及磁通电压转换系数，即可得到输入电流变化对应的 SQUID 磁通量变化，即灵敏度。如图 10 所示为 1 000 匝和 2 000 匝原边绕组下测量结果。对于 2 000 匝的原边绕组，放大器的电流灵敏度为  $4.71 \text{ nA}/\Phi_0$ ，1 000 匝情况下为  $9.34 \text{ nA}/\Phi_0$ 。已知 SQUID 的电流灵敏度为  $0.239 \mu\text{A}/\Phi_0$ ，依据式 (14)，对于 2 000 匝绕组，得到

CCC 与检测线圈的耦合常数为 0.61。显然，增加匝数有利于提高放大器的灵敏度，进而可以测量更小的输入电流。

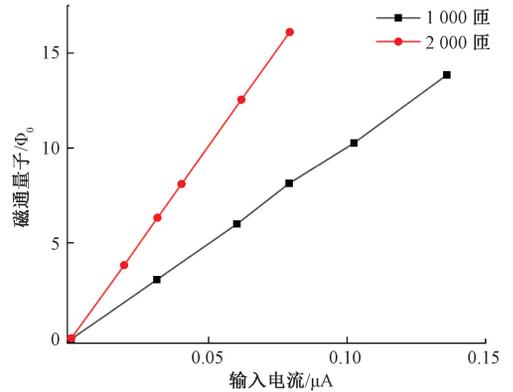


图10 磁通与 CCC 输入电流关系

Fig. 10 Relationship between magnetic flux and CCC input current

使用基于 NI5922 的频谱分析仪分别测试 1 000 匝和 2 000 匝初级绕组的等效输入电流噪声如图 11，在 1 Hz 的频率下，对于 2 000 匝的原边绕组，测得其输入电流噪声约为  $30 \text{ fA}/\text{Hz}^{0.5}$ 。对于 1 000 匝，噪声比 2 000 匝情况大，约为  $41 \text{ fA}/\text{Hz}^{0.5}$ 。根据式 (15) 此时 SQUID 能量分辨率噪声贡献较大，随着匝数的增加，SQUID 的固有能量分辨率噪声贡献将显著下降，其他因素占主导，增加匝数对噪声的影响不再显著。

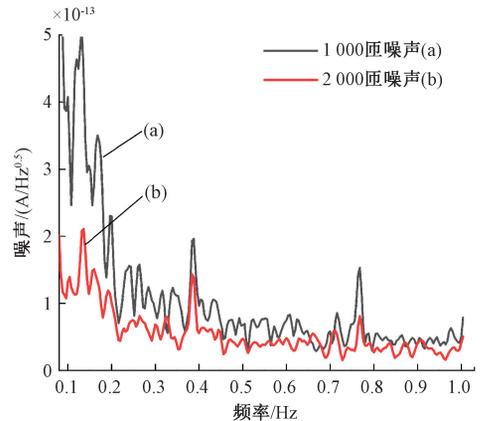


图11 放大器输入电流噪声

Fig. 11 Amplifier input current noise

图 12 为放大器检测到的由图 9 电流源输出的峰峰值 6 pA，频率为 0.1 Hz 方波输入电流信号。可以看出，放大器能较好地跟踪输入信号的变化，且其检测范围还可以更小。测试证明该放大器可以用于测量极低的直流电流。

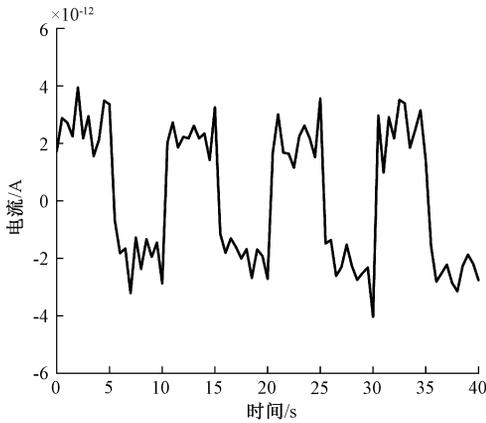


图 12 0.1 Hz,峰峰值 6 pA 方波输入电流检测结果

Fig. 12 0.1 Hz, peak to peak 6 pA square wave input current detection results

## 4 结 论

本文研制了基于低温电流比较仪(CCC)的低噪声精密电流放大器。制作了最高匝数比为 2 000:1 的 CCC,设计制作了 CCC-SQUID 的组合固定装置及超导屏蔽等。推导了放大器灵敏度,电流噪声及反馈环路模型。对 CCC 超导屏蔽环自感进行仿真,并据此设计了检测线圈。分析了相关因素对噪声的影响。对于 2 000 匝的原边绕组,放大器的电流灵敏度为  $4.71 \text{ nA}/\Phi_0$ , CCC 与检测线圈的耦合常数可达到 0.61。在 1 Hz 的频率下,输入电流噪声约为  $30 \text{ fA}/\text{Hz}^{0.5}$ ,折合为  $60 \text{ pA} \times \text{匝}/\text{Hz}^{0.5}$ 。

论文中德国联邦计量院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)制作的 2 065 匝的 CCC 电流噪声为  $100 \text{ fA}/\text{Hz}^{0.5}$ ,电流灵敏度约  $5 \text{ nA}/\Phi_0^{[20]}$ ,本文所做 CCC 电流噪声,灵敏度性能优于其所做。Wilfrid 等在制作的 CCC,主要用于电阻比对,其等效的输入电流噪声约为  $80 \text{ pA} \times \text{匝}/\text{Hz}^{0.5[10]}$ 。

进一步提升微小电流的检测能力,可以通过减小输入电流噪声来实现。减小输入电流噪声则又可以通过优化检测线圈与 CCC 之间的耦合,提高  $k$  值达成。其中一种途径是加入铁芯,因为铁芯拥有高磁导率,但是,铁芯也可能成为新的噪声源,给测量带来不利影响。再者,尽量减小检测线圈与 CCC 间缝隙,也可以增强耦合。另外,适当的增加输入电阻的阻值,或者将电阻放置到液氮中,也可以减少由电阻带来的热噪声。对于放大器灵敏度,可以尝试将原边绕组的匝数提高,来获得提升,在实际操作时,线圈匝数越大,绕制难度越大,更好的是通过使用多个绕组串联来实现大匝数。

## 参考文献

- [ 1 ] OFPACIFIC P. Resolutions adopted [ R ]. France: CGPM, 2018.
- [ 2 ] PEKOLA J P, SAIRA O P, MAISI V F, et al. Single-electron current sources: Toward a refined definition of the ampere [ J ]. Reviews of Modern Physics, 2013, 85(4): 1421-1472.
- [ 3 ] 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 ZH 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.
- [ 4 ] 张钟华. 量子计量基准及 SI 基本单位的重新定义 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(1): 1-5.  
ZHANG ZH H. Quantum measurement standards and redefinition of the SI unit [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2007, 21(1): 1-5.
- [ 5 ] SANCHEZ C A, WOOD B M, INGLIS A D. CCC Bridge with digitally controlled current sources [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1202-1205.
- [ 6 ] 李正坤,张钟华,贺青,等. 低温电流比较仪动态特性的研究 [ J ]. 仪器仪表学报, 2006, 27(8): 825-829.  
LI ZH K, ZHANG ZH H, HE Q, et al. Study on the dynamic characteristic of the cryogenic current comparator [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(8): 825-829.
- [ 7 ] 张钟华,贺青. 低温电流比较仪介绍 [ J ]. 电测与仪表, 2000(4): 9-11.  
ZHANG ZH H, HE Q. Introduction of the cryogenic current comparator [ J ]. Electrical Measurement Instrumentation, 2000(4): 9-11.
- [ 8 ] HASHIMOTO S, ODA T, YAMADA K. The measurement of small magnetic signals from magnetic nanoparticles attached to the cell surface and surrounding living cells using a general-purpose SQUID magnetometer [ J ]. Physics in Medicine and Biology, 2009, 54(8): 2571-2583.
- [ 9 ] ZAKOSARENKO V, SCHMELZ M, SCHOENAU T, et al. Coreless SQUID-based cryogenic current comparator for nondestructive intensity diagnostics of charged particle beams [ J ]. Superconductor Science and Technology, 2018, 32(1): 1-6.
- [ 10 ] WILFRID P, DOMINIQUE L, FÉLICIEN S. A resistance bridge based on a cryogenic current comparator achieving sub- $10^{-9}$  measurement uncertainties [ J ]. IEEE

- Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70): 1-14.
- [11] 鲁云峰, 赵建亭, 贺青, 等. 基于低温电流比较仪的微弱电流精密测量技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2812-2817.  
LU Y F, ZHAO J T, HE Q, et al. Low current precision measurement technique based on cryogenic current comparator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2812-2817.
- [12] DIETMAR D, MARTIN G, ECKART P, et al. Aspects of application and calibration of a binary compensation unit for cryogenic current comparator setups[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(10): 2820-2827.
- [13] ZHOU Y W, LI H, CHO E Y, et al. Electronic feedback system for superconducting quantum interference devices [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(7): 1-5.
- [14] 郑东宁. 超导量子干涉器件[N]. 物理学报, 2021, 70(1): 1-14.  
ZHENG D N. Superconducting quantum interference device[N]. Acta Phys Sin, 2021, 70(1): 1-14.
- [15] JAVIER S, AGUSTÓN C, CONRADO R O. Ultimate current resolution of a cryogenic current comparator[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(6): 1306-1313.
- [16] JAVIER S, FRANCISCO L, AGUSTIN C, et al. Calculation of effective inductances of superconducting devices—Application to the cryogenic current comparator[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1999, 9(1): 58-62.
- [17] SESE J, BARTOLOME E, CAMON A, et al. Simplified calculus for the design of a cryogenic current comparator[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003(52): 612-616.
- [18] GAY F, PIQUEMAL F, GENEVÈS G. Ultralow noise current amplifier based on a cryogenic current comparator[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(12): 4592-4595.
- [19] GERT R, ELENA B, JAVIER S E, et al. 1:30 000 cryogenic current comparator with optimum squid readout[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(2): 621-625.
- [20] DRUNG D, GÖTZ M. Improving the stability of cryogenic current comparator setups [J]. Supercond, Sci. Technol, 2009(22): 1-8.

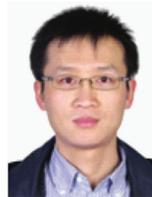
### 作者简介



丁立, 2019年于中国石油大学(华东)获得学士学位, 现为中国石油大学(华东)硕士研究生, 主要研究方向为低温电流比较仪及精密测量。

E-mail: dingli1781122@163.com

**Ding Li** received his B.Sc. degree from China University of Petroleum (East China) in 2019. He is currently a master student at China University of Petroleum (East China). His main research interests include cryogenic current comparator and precision measurement.



鲁云峰(通信作者), 2005年于天津大学获得学士学位, 分别在2007年、2016年于哈尔滨工业大学获得硕士、博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要从事量子电学计量相关研究。

E-mail: luyf@nim.ac.cn

**Lu Yunfeng** (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin University in 2005, received his M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Harbin Institute of Technology in 2007 and 2016, respectively. He is currently an associate research fellow at National Institute of Metrology. His main research interest is quantum electrical metrology.