

# 超导量子干涉器件读出电路中匹配变压器的传输特性研究\*

刘明<sup>1)2)</sup> 徐小峰<sup>1)</sup> 王永良<sup>1)</sup> 曾佳<sup>1)</sup> 李华<sup>1)</sup> 邱阳<sup>1)</sup>  
张树林<sup>1)</sup> 张国峰<sup>1)</sup> 孔祥燕<sup>1)†</sup> 谢晓明<sup>1)</sup>

1) (中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

2) (中国科学技术大学信息学院电子科学技术系, 合肥 230027)

(2013年4月26日收到; 2013年6月8日收到修改稿)

在磁通调制超导量子干涉器件 (SQUID) 的读出电路中, 匹配变压器具有放大信号和阻抗匹配的功能, 是实现 SQUID 低噪声读出的关键元件. 利用模拟 SQUID 电路对匹配变压器进行性能测试, 研究了不同绕制匝数变压器的传输特性, 确定最佳绕制匝数比. 在变压器拾取 SQUID 电压信号的耦合网络中, 研究了不同电容对变压器传输特性的影响, 实现了变压器耦合网络参数的匹配和优化. 室温下匝数比为 1:20 的匹配变压器在匹配电容  $C = 1 \mu\text{F}$  时, 输出源电压增益为 21.2, 带宽范围可达到 210 kHz. 最后在基于磁通调制式 DC SQUID 读出电路中, 对匹配变压器的工作性能进行了评估与验证.

**关键词:** 超导量子干涉器件读出电路, 匹配变压器, 低噪声, 传输特性

**PACS:** 85.25.Hv, 84.37.+q, 84.32.Hh, 72.70.+m **DOI:** 10.7498/aps.62.188501

## 1 引言

超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID)<sup>[1]</sup> 及其读出电路可以实现微弱磁场的探测, 低噪声高性能的读出电路是实现微弱信号探测的一个重要环节<sup>[2]</sup>. DC SQUID 器件本身具有很低的噪声和很高的摆率, 但作为磁强计的传感器其性能易受到电子学系统, 尤其是传感器与电子学部分之间耦合网络的限制<sup>[3]</sup>. DC SQUID 是低阻抗器件, 动态电阻  $R_d$  为 5—10  $\Omega$ , 而前置放大器的源电阻一般远远大于此数值. 为实现 SQUID 与低噪声前置放大器之间的最佳源阻抗匹配, 两者之间需插入一个阻抗匹配网络. 在采用磁通调制式 (flux modulation, FM) SQUID 读出电路中, 通常在磁通锁定环 (flux locked loop, FLL) 中利用匹配变压器<sup>[4]</sup> 来实现信号放大及阻抗匹配.

本文研究了初级端接入不同匹配电容实现 LC 谐振的匹配变压器的传输特性以及不同匝数变比对匹配变压器传输特性的影响, 并在实际 SQUID 电路 FLL 中对匹配变压器的性能进行了验证.

## 2 匹配变压器耦合网络

在 FLL 中, 如图 1(a) 所示, 匹配变压器隔离了 SQUID 器件和电子学部分, 避免了后端噪声对前端 SQUID 器件探测到的微弱信号造成影响. 匹配变压器通过与串接的匹配电容  $C$  形成 LC 谐振<sup>[5]</sup>, 在实现阻抗匹配的同时兼顾系统频率特性, 获得较高增益和品质因数 (即  $Q$  值).

实验中, 首先利用模拟 SQUID 信号进行电子学部分的测试. 通过电阻网络模拟 SQUID 的阻抗水平, 源信号经电阻网络分压后获得可以与真实 SQUID 信号强度相比拟的微弱信号, 如图 1(b) 所

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (批准号: KGXC2-EW-105) 和中国科学院百人计划项目资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xykong@mail.sim.ac.cn

示. 由此可得到模拟测试电路的传输函数  $H(\omega)$  为

$$H(\omega) = K_0 \cdot G(\omega) \cdot \frac{j\omega L_{in}}{1 + j\omega C + j\omega L_{in} + r}, \quad (1)$$

$$Z(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L_{in} + r}, \quad (2)$$

其中,  $K_0$  为放大器的增益,  $G(\omega)$  为变压器自身的传递函数,  $L_{in}$  为变压器初级电感,  $C$  为匹配电容,  $r$  为变压器初级端输入电阻. 传输函数  $H(\omega)$  是关于频率  $\omega$  的函数,  $L_{in}$  和  $C$  决定了匹配变压器的传输特性. 选择合适的  $L_{in}$  和  $C$ , 可使得匹配变压器工作在合适的状态, 且工作特性达到最佳.

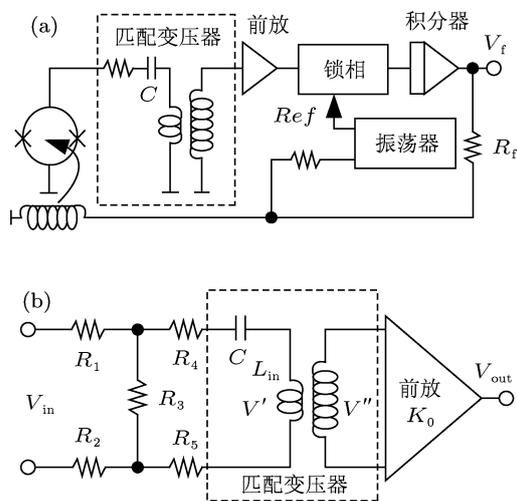


图1 原理图 (a) FLL 电路简图; (b) 变压器电容匹配示意图

### 3 匹配变压器传输特性

实验中的匹配变压器采用锰 (Mn) 材质的环形磁芯 (内直径  $d = 3.79$  mm, 外直径  $D = 7.41$  mm, 高度  $h = 2.30$  mm), 直径为 0.10 mm 铜制漆泡线绕制而成.

由于磁芯损耗使得磁芯的磁导率随频率而发生变化, 并考虑到分布电容的影响, 网络分析仪测量的匹配变压器初级线圈电感量在不同频率下对应的值有所不同. 为了避免发生信号失真, 被传递的信号频率应处于线圈电感频率特性变化相对平直的范围. 图 2 给出了绕制匝数分别为 5 : 100 和 8 : 160 匹配变压器初级线圈电感在不同频率下的网络分析仪测量结果.

匹配变压器的传输特性由变压器初级电感  $L_{in}$  和匹配电容  $C$  决定. 绕制匝数决定了变压器初级线圈电感的大小, 线圈变比决定了匹配变压器的增益. 在 FLL 读出电路中, 通过选择合适的初级匝数及变压器线圈变比, 可获得符合电路特性要求的匹配变压器.

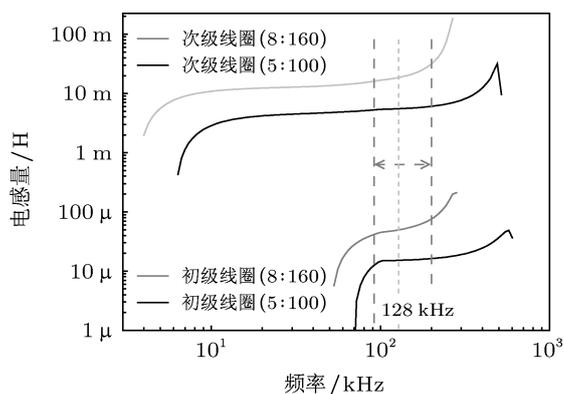


图2 不同绕制匝数匹配变压器初级线圈电感

### 3.1 不同匹配电容下变压器传输特性

匹配变压器的初级匝数为 5, 变比为 1 : 20, 考虑在不同匹配电容下的传输特性, 结果如图 3 所示. 表 1 列出了不同匹配电容值时, 匹配变压器的谐振频率、带宽、源电压增益以及  $Q$  值, 从表 1 中可看到, 随着匹配电容的减小, 匹配变压器谐振频率增大, 源电压增益增大,  $Q$  值增大, 带宽减小. 当匹配电容减小到一定临界值时, 如  $C = 20$  nF 时, 匹配变压器源电压增益开始减小, 变压器整体性能下降.

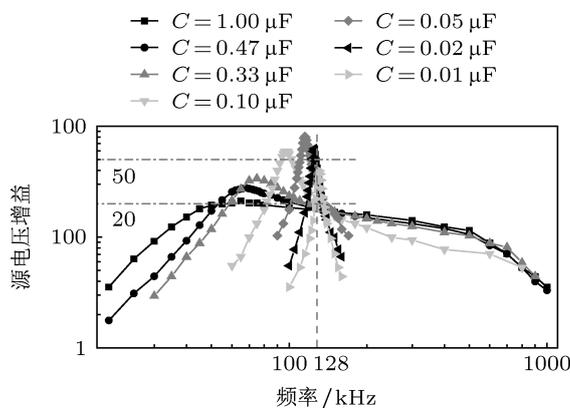


图3 匹配变压器 (5 : 100) 不同匹配电容值下传输特性

表 1 匹配变压器 (5:100) 不同匹配电容下的相关参数

电容/ $\mu\text{F}$	谐振频率/kHz	带宽/kHz	源电压增益	Q 值
1.00	65	210	21.2	1.9
0.47	68	58	27.9	7.4
0.33	75	33	33.9	14.3
0.10	97.5	15	59.7	40.8
0.05	115	8	81.0	90.3
0.02	125	6.5	63.0	112.1
0.01	131	6	39.8	137.1

### 3.2 不同初级匝数及变比的匹配变压器的传输特性

匹配变压器的初级匝数及变比确定了变压器本身的转换能力, 根据实际电路需求选择合适的初级匝数及变比获得最佳的性能. 图 4(a), 4(b) 给出了

初级线圈匝数分别为 5 和 8, 变比为 1:20 的匹配变压器在不同匹配电容下的谐振频率、带宽及源增益的变化曲线. 随着匹配电容的增大, 匹配变压器的谐振频率减小, 带宽增大, 增益先增大达到临界值后减小. 可以看出, 初级线圈匝数为 5 的匹配变压器在谐振频率及带宽方面优于初级线圈匝数为 8 的匹配变压器, 但在增益上会有所牺牲, 即相同变比, 初级线圈匝数小的匹配变压器在谐振频率及带宽方面较优, 初级线圈匝数大的匹配变压器在增益方面较优. 图 4(c), 4(d) 则给出了初级线圈匝数为 5, 变比分别为 1:15 和 1:25 的匹配变压器在不同匹配电容下的谐振频率、带宽及增益. 变比为 1:15 的匹配变压器在谐振频率及带宽方面优于变比为 1:25 的匹配变压器, 而在增益方面会有所牺牲, 即相同初级线圈匝数, 变比小的匹配变压器在谐振频率及带宽方面较优, 变比大的匹配变压器在增益方面较优.

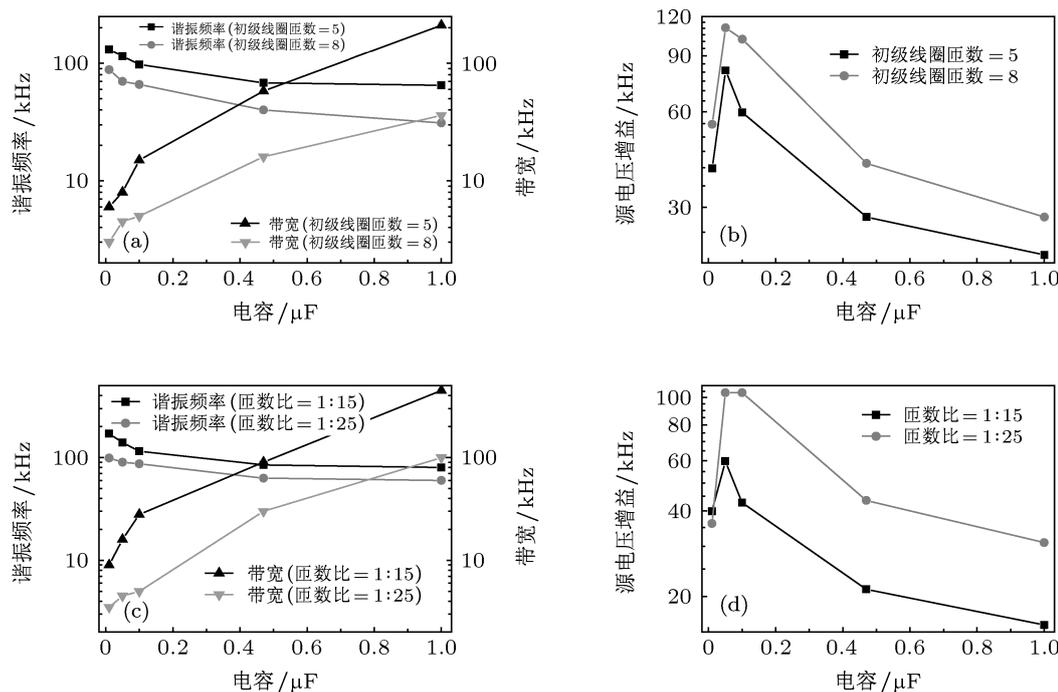


图 4 不同初级及变比匹配变压器传输特性比较 (a) 不同初级相同变比匹配变压器谐振频率及带宽比较; (b) 不同初级相同变比匹配变压器增益比较; (c) 相同初级不同变比匹配变压器谐振频率及带宽比较; (d) 相同初级不同变比匹配变压器增益比较

此外, 环境因素对匹配变压器的传输特性存在一定影响, 主要表现为环境温度和周围导体干扰. 可通过良好的散热和适当的电磁屏蔽解决这些问题, 使匹配变压器长期稳定工作.

在 FLL 读出电路中, 典型调制频率为 100 kHz 到 500 kHz, 匹配变压器决定了系统带宽范围 [6].

FLL 读出电路要求高带宽及相对稳定的对外输出信号, 需要选用带宽较大的匹配变压器及匹配电容. 综合考虑以上 FLL 读出电路的要求和匹配变压器带宽与增益的变化趋势, 实际电路中选取初级线圈匝数为 5, 变比为 1:20 的匹配变压器, 匹配电容为  $C = 1 \mu\text{F}$ .

#### 4 匹配变压器在 SQUID 读出电路中的性能

为了进行实验验证, 采用美国 STAR Cryoelectronics 公司生产的商用低温 DC SQUID 作为测试器件以及 FLL 读出电路作为比较对象. 自制 FLL 读出电路的调制频率为 128 kHz, 将所选匹配变压器及匹配电容 (传输特性曲线如图 5(a) 所示) 接入自制 FLL 读出电路中. 相同器件在相同测试环境下, 只改变外接 FLL 读出电路, 多次测量比较 STAR FLL 读出电路及自制 FLL 读出电路的输出结果. 图 5(b) 给出了其中一组 STAR FLL 读出电路及自制 SQUID 读出电路的磁通噪声谱测量结果, 可以看到, 自制 FLL 读出电路输出白噪声和低频噪声均略优于 STAR 电路. 由此说明, 优化后的匹配变压器可满足 FLL 读出电路的特性要求, 实现器件与电路的最佳耦合匹配, 达到低噪声放大的目的.

#### 5 总结

电容匹配下, 匹配变压器可以达到大的源电压增益和  $Q$  值, 但带宽有限. 匹配变压器在小的初级匝数和低变比情况下带宽、增益等性能最佳. SQUID 读出电路要求较高的带宽, 在 FLL 读出电路中匹配变压器决定系统带宽, 因此选用传输特性带宽较大的匹配变压器及匹配电容. 初级线圈匝数小及变比小的匹配变压器在较大的匹配电容时能

够获得较大带宽. 根据系统要求和匹配变压器的传输特性优化选择了高带宽的匹配变压器 (5 : 100), 并将其成功应用于 SQUID 读出电路中.

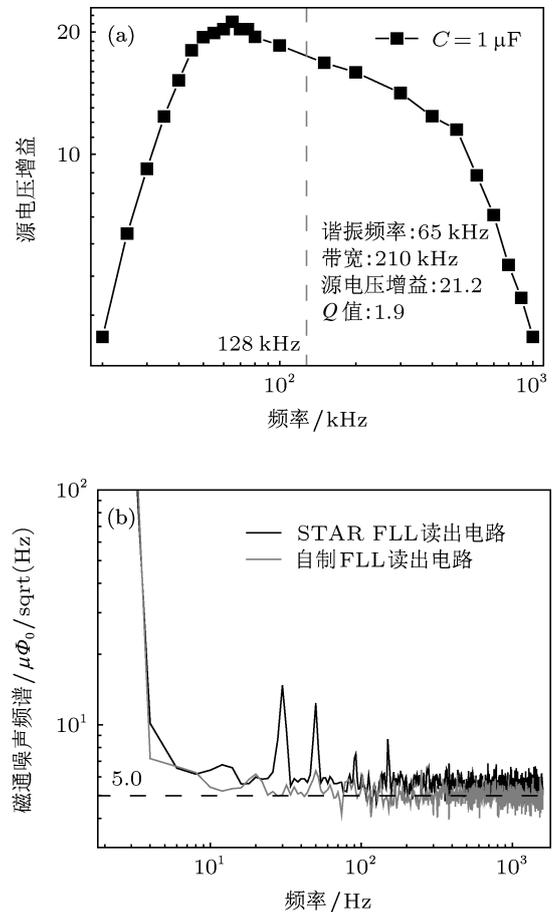


图 5 低温验证结果 (a) 变压器传输特性曲线; (b) 磁通噪声频谱

- [1] John C, Alex I B 2004 *The SQUID Handbook Vol.1 Fundamentals and Technology of SQUIDS and SQUID Systems* (Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA) p137
- [2] Wang Y L, Wang H W, Xie X M 2008 *Rare Metal Mater. Eng.* **37** 457 (in Chinese) [王永良, 王会武, 谢晓明 2008 稀有金属材料与工程 **37** 457]

- [3] Zhang L H, Weng Y J, Chen L 1991 *Cryo. & Supercond.* **19** 1 (in Chinese) [张利华, 翁尧钧, 陈烈 1991 低温与超导 **19** 1]
- [4] Bill W 2001 *Handbook for Sound Engineers* (3rd Ed.) (Oxford: Focal Press)
- [5] John C, Claudia D T, Giffard R P 1979 *J. Low Temp. Phys.* **37** 405
- [6] Drung D 2003 *Supercond. Sci. Technol.* **16** 1320

# Study on transmission characteristics of matching transformer in DC superconducting quantum interference device readout\*

Liu Ming<sup>1)2)</sup> Xu Xiao-Feng<sup>1)</sup> Wang Yong-Liang<sup>1)</sup> Zeng Jia<sup>1)</sup> Li Hua<sup>1)</sup>  
Qiu Yang<sup>1)</sup> Zhang Shu-Lin<sup>1)</sup> Zhang Guo-Feng<sup>1)</sup> Kong Xiang-Yan<sup>1)†</sup>  
Xie Xiao-Ming<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

2) (Electronic Science and Technology Department, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

( Received 26 April 2013; revised manuscript received 8 June 2013 )

## Abstract

In a magnetic flux modulated DC superconducting quantum interference device (SQUID) readout, the matching transformer could realize the function of signal amplification and impedance matching, which is the key element of a low noise SQUID readout. We use a simulated DC SQUID readout to test the characteristics of matching transformer, study the transmission characteristics of transformer with different turns, and confirm its best turn ratio. In the coupling network that the transformer picks up voltage signals of SQUID, We also study the transmission characteristics of transformers with different matching capacitances, realize the matching of the parameters and the optimization in the transformer coupling network. At room temperature, for the matching transformer with a turn ratio of 1 : 20, when matching capacitance is 1  $\mu$ F, the gain of output voltage source could reach 21.2 and its bandwidth could reach 210 kHz. Finally, in magnetic flux modulation DC SQUID readout, we evaluate the performance of the matching transformer.

**Keywords:** SQUID readout, matching transformer, low noise, transmission

**PACS:** 85.25.Hv, 84.37.+q, 84.32.Hh, 72.70.+m

**DOI:** 10.7498/aps.62.188501

\* Project supported by the Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KGCX2-EW-105), and the One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: xykong@mail.sim.ac.cn