

# 适用于超高灵敏磁测量的新型高效磁屏蔽研究\*

李园园<sup>1,2</sup> 王祝宁<sup>3</sup> 王三胜<sup>1,2,†</sup>

(1 北京航空航天大学 微纳测控与低维物理教育部重点实验室 北京 100191)

(2 北京航空航天大学 航天器磁学与超导技术联合实验室 北京 100191)

(3 山东省质量技术监督教育培训中心 济南 250013)

2016-12-05 收到

† email: wangssh@buaa.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20170505

## A new type of passive magnetic shielding for superconducting quantum interferometers

LI Yuan-Yuan<sup>1,2</sup> WANG Zhu-Ning<sup>3</sup> WANG San-Sheng<sup>1,2,†</sup>

(1 Key Laboratory of Micro-Nano Measurement-Manipulation and Physics(Ministry of Education), Beihang University, Beijing 100191, China)

(2 Joint Laboratory for Spacecraft Magnetic and Superconducting Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

(3 Shandong Education Training Center of Quality and Technical Supervision, Jinan 250013, China)

**摘要** 高效磁屏蔽对于超高精度超导量子干涉仪(SQUID)等超高灵敏器件可靠稳定工作至关重要。实践中一般采用多层的高磁导率笨重复合磁屏蔽,或者用小型的轻量屏蔽桶配合差分式平面梯度计完成超高灵敏信号测量。文章作者提出并实现了一种新型的高性能磁屏蔽装置,采用实时的动态磁补偿与高温超导线圈相结合就可以实现。对该装置磁屏蔽效果进行了数值仿真计算,并实际测量了该屏蔽装置的轴向和横向磁场,装置屏蔽因数最高可达80 dB;实验测量发现,新型装置可以同时有效地屏蔽轴向与纵向磁场干扰。

**关键词** 复合磁屏蔽, 超导量子干涉仪, 高温超导环

**Abstract** High-efficiency magnetic shielding is very important for the reliability and stability of ultrahigh precision superconducting quantum interferometers. In practice, high permeability bulky multilayered magnetic shielding, or small lightweight shield buckets with differential plane gradient meters are generally used to realize ultrahigh sensitivity signal measurements. In this paper, a new type of high performance magnetic shielding device is proposed, which is realized by combining real-time dynamic magnetic compensation with high-temperature superconducting coils. The effect of the hybrid magnetic shield has been evaluated using numerical simulation and experimental measurements of the axial and transverse magnetic fields; the shielding factor was found to be as high as 80 dB. This new type of active magnetic shield with a high-temperature superconducting ring improves not only the axial but also the transverse shielding effect.

**Keywords** hybrid magnetic shielding, superconducting quantum interferometer, high-temperature superconducting ring

\* 国家国防科技工业局资助项目

## 1 引言

随着超导量子干涉仪的超高精度磁测量技术的广泛应用,磁屏蔽越来越重要。这是因为实验测量需要避免受到周围环境的高杂散磁场的影响,需要屏蔽周围电磁噪声干扰。传统的磁屏蔽通常是由几层高磁导率材料和高电导率材料组合而成<sup>[1-3]</sup>,这样的屏蔽系统是基于铁磁屏蔽和涡流屏蔽原理,可以很有效地减少环境磁场噪声,但是由于高成本和复杂的设计,往往不能满足实验要求(特别是野外环境)。基于这个原因,人们先后提出几个有效的屏蔽技术,如:对开孔屏蔽桶进行优化设计<sup>[3, 4]</sup>,增大屏蔽区域的屏蔽效果;采用闭合反馈回路的动态补偿系统进行屏蔽<sup>[5, 6]</sup>;应用高温超导材料进行磁屏蔽<sup>[7, 8]</sup>;采用高温超导材料与铁磁性材料进行复合屏蔽<sup>[9, 10]</sup>等。

本文提出一种新型的高效主被动磁屏蔽技术,即采用实时的动态磁补偿与高温超导闭合线圈屏蔽相结合的方法。该屏蔽装置可以同时屏蔽横向与轴向磁场,屏蔽因数最高可达80 dB。

## 2 新型高效磁屏蔽方法

### 2.1 超导效应的磁屏蔽

超导磁屏蔽的屏蔽原理与高磁导率磁屏蔽的屏蔽原理完全不同,超导磁屏蔽利用的是超导体的迈斯纳效应。由于超导体“不允许”其内部有任何磁场,如果外界有一个磁场要通过超导体内部,那么超导体必然会产生一个与之相反的磁场,保证内部磁场强度为零,这就产生感应电流。它工作是自适应的,不消耗功率,不需外加电源。

建立一个等效电路来分析超导的屏蔽能力,可以简化为一个电阻串连电感和一个理想的电压源。在变化场下,描述该电路的方程是<sup>[11]</sup>

$$N^2 L_0 \frac{di}{dt} + Ri = NAB_0 \omega \cos(\omega t), \quad (1)$$

其中 $N$ 为线圈的匝数, $L_0$ 是一匝线圈的电感, $R$ 是电路的电阻, $i$ 是电路的电流, $A$ 是线圈所包围的区域面积。(1)式的右边是由变化场引起的电势。在这里,我们假设一个均匀的正弦波场,角频率 $\omega$ ,磁场峰值 $B_0$ 。在一个超导环处于超导状态下,即 $R=0$ 。由(1)式得到,每匝线圈的电流为

$$i = -\frac{AB_0}{NL_0} \sin(\omega t). \quad (2)$$

对(2)式的两边乘以 $N$ ,得到线圈总的安培数为

$$iN = -\frac{AB_0}{L_0} \sin(\omega t). \quad (3)$$

用有限元方法对超导环的屏蔽效果进行研究:用有限元分析法建立超导圆环的三维空间模型如图1(a)所示,外面的球为无限大的空气域,中心区域圆环为超导环。在设定边界条件和沿 $z$ 轴施加一个恒定磁场 $B_z$ 之后,获取最终的磁屏蔽计算结果。图1(b)为横向磁通密度模分布图,从图中可观测到,超导环内磁通密度模较

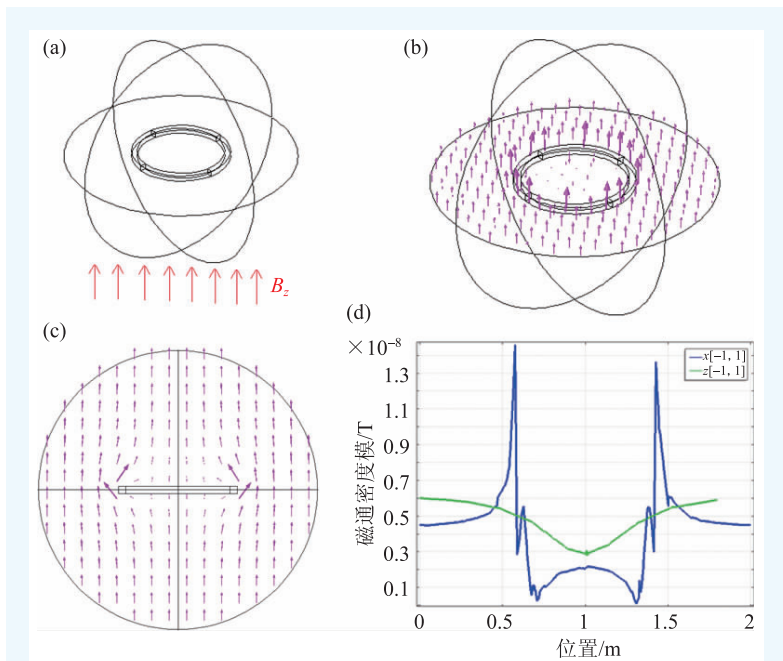


图1 (a)超导圆环的三维空间模型;(b)横向磁通密度模分布图;(c)轴向磁通密度模分布图;(d)一维横向与轴向磁通密度模点线图

小, 边缘较大, 原因是超导环具有迈斯纳效应, 产生感应电流来抵消内部磁场, 增强外部磁场, 所以内部磁场较小而边缘较大。图 1(c) 为轴向磁通密度模分布图, 在中心轴线上, 磁场密度模有最小值, 可以观察到磁力线被排斥在超导环外侧。图 1(d) 中的两条曲线分别表示沿着直径方向 (即  $x$  轴), 由  $x=-1\text{ m}$  到  $x=1\text{ m}$  处横向磁通密度模大小 (即图中的  $x[-1, 1]$  曲线) 和沿着超导环轴向方向 (即  $z$  轴), 由  $z=-1\text{ m}$  到  $z=1\text{ m}$  处轴向磁通密度模大小 (即图中的  $z[-1, 1]$  曲线)。由图 1 可清晰观测到超导环内部磁通密度模比环外磁场小。在内部从边缘到圆心, 磁场逐渐增大的原因为: 远离超导环, 即感应电流在内部产生的抵消磁场逐渐减弱, 和外界磁场叠加以后, 磁场值会变大。图中绿色线为轴向磁通密度模沿中心轴线, 在超导环内逐渐减小, 中心位置为最小值。

## 2.2 主动屏蔽与超导环复合屏蔽

三轴亥姆霍兹线圈作为主动屏蔽装置, 主动给三轴亥姆霍兹线圈施加一定的电流来补偿地磁场, 因此, 它可以屏蔽掉一些恒定和低频变化磁场, 实现实时补偿, 但是市电干扰和一些中高频交变磁场无法屏蔽掉, 上述超导屏蔽可以克服这些问题, 结合主动屏蔽动态补偿的优势和超导磁屏蔽进一步降低渗透磁场的优势, 我们提出了一个主被动磁屏蔽系统, 如图 2 所示。

## 2.3 实验结果

下面用超导量子干涉器件 (SQUID) 对该系统的屏蔽效果进行定性分析。我们把超高灵敏度的 SQUID 放在屏蔽区域, 只用三轴线圈屏蔽, 不加超导环线圈, SQUID 测试结果如图 3(a) 所示; 只用超导线圈屏蔽, 不

加三轴线圈, SQUID 测试结果如图 3(b) 所示; 三轴线圈和超导环一起屏蔽, SQUID 测试结果如图 3(c) 所示。从图 3(c) 可以清楚看到施加的三角波, 没有周围噪声的干扰, 当按下复位按钮时, 数字电压表上显示数值为 0 附近, 此时 SQUID 进入磁通锁定工作状态, 可以展开微弱磁场的测量。图 3(a), (b) 有明显的噪声干扰, 磁场噪声超过 SQUID 的测量量程, SQUID 不能进行正常工作。因此, 可以证明该装置能有效地屏蔽外界磁场干扰, 使 SQUID 在此装置中稳定进行工作, 不用搭建昂贵的磁屏蔽室和多层复合结构的磁屏蔽桶。该装置最明显的优势是: 提供一个开放的磁屏蔽环境, 方便进行一些样品扫描成像系统平台的搭建。

对该屏蔽装置进行定量分析研究: 在超导环的中心区域, 即  $z=0$  ( $z=0$ ) 处, 沿着横向  $x$  轴, 以  $10\text{ mm}$  为间隔, 均匀测量 9 个点。屏蔽因子  $SF=20\log(B_0/B_z)$ ,  $B_z$  是屏蔽之后测得的轴向磁场值,  $B_0$  是无屏蔽系统测得的轴向磁场值。在有无超导环磁屏蔽的两种情况下 ( $z=0$  曲线表示没有超导环屏蔽条件下,  $z=1=0$  曲线表示有超导环屏蔽条件下), 通过高精度磁通门传感器测得的 SF 结果显

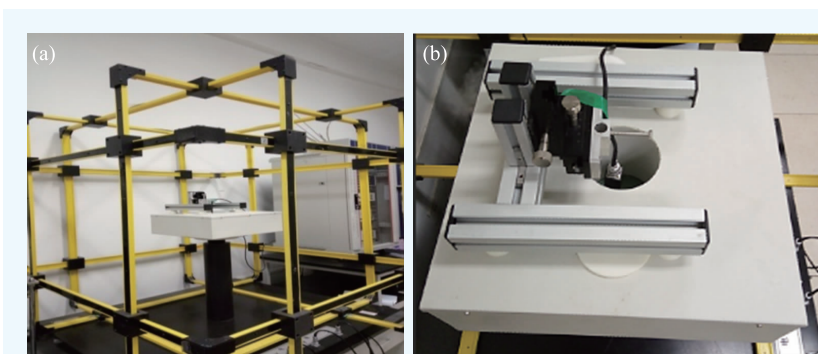


图 2 (a) 整个系统的实物图; (b) 高温超导环的实物图

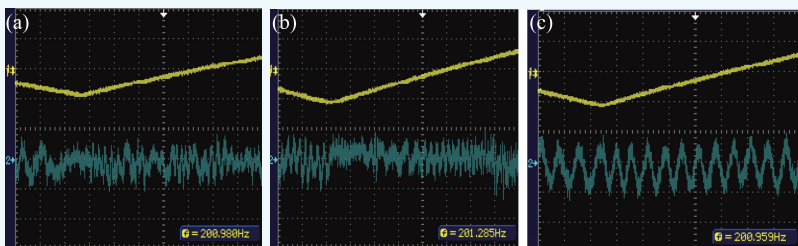


图 3 SQUID 测试结果 (a) 只用三轴线圈屏蔽; (b) 只用超导线圈屏蔽; (c) 三轴线圈和超导环一起用于屏蔽

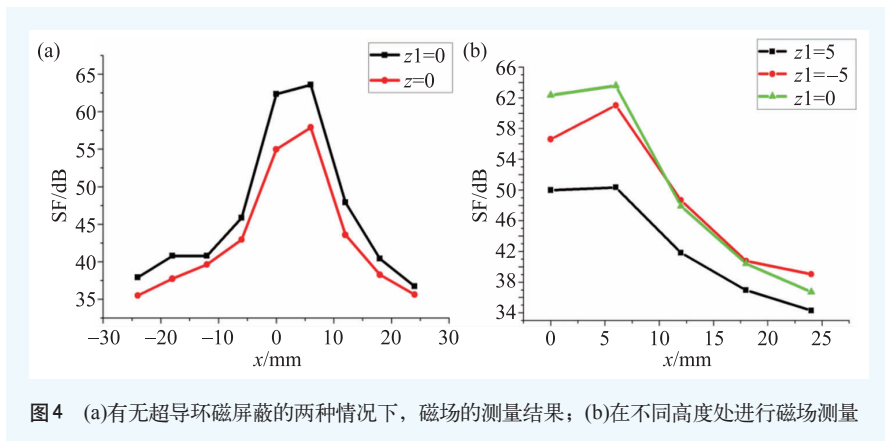


图4 (a)有无超导环磁屏蔽的两种情况下,磁场的测量结果;(b)在不同高度处进行磁场测量

示在图4(a)中。当超导环存在时,轴向屏蔽因子比无超导环时屏蔽因数大,最大10 dB。在中心区域, SF为最大值,沿着半径方向, SF逐渐减小。因此可以说,超导环在 $z$ 轴的屏蔽磁场非常有效。

进一步对超导环的有效屏蔽区域进行研究:在不同高度处进行磁场测量,如图4(b)所示。从该图中可观测到,在 $z=0$ 处,中心区域屏蔽因数最好且提供均匀的区域,沿着 $x$ 轴,屏蔽因数逐

渐下降。随着高度增加或降低,屏蔽因数均小于 $z=0$ 处的屏蔽效果。因此,要尽可能地把SQUID传感器放置在超导屏蔽中心。

### 3 结束语

本文提出主动屏蔽与超导屏蔽相结合的方法,既可以实时进行补偿,还可以有效抑制交变磁场的干扰,不仅可以有效地屏蔽轴向磁场,还可以屏蔽纵向磁场干扰,有效地提高了磁场的屏蔽效果。在此屏蔽环境下,可以使用高灵敏度SQUID来进行微弱磁场测量。我们需要进一步提高该装置的屏蔽区域和对不同幅值与频率的交变磁场进行分析与研究。

**致谢** 感谢北京大学物理系杨涛教授和清华大学顾晨老师的讨论与合作。

### 参考文献

- [1] Sumnert T J *et al.* J. Phys. D, 1987, 20: 1095
- [2] Mager A J. IEEE Transactions of Magnetics, 1969, MAG-6 (1): 67
- [3] Tanaka S *et al.* Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009, 321(7): 880
- [4] Tanaka S *et al.* Superconductor Science and Technology, 2006, 19 (5): S280
- [5] Octavian B, Doina C, Miuta R. Bioelectromagnetism Laboratory—Case Study. IEEE, 2013, 2442—2447
- [6] Baltag O *et al.* Advances in Electrical and Computer Engineering, 2010, 10 (4): 135
- [7] Rabbers J J *et al.* Superconductor Science and Technology, 2010, 23 (12): 125003
- [8] Otsuka H, Itoh I. Journal of Applied Physics, 1994, 75 (10): 6966
- [9] Gozzelino L *et al.* Superconductor Science & Technology, 2016, 29 (3): 034004
- [10] Gozzelino L *et al.* Superconductor Science & Technology, 2012, 25 (11): 115013
- [11] Chen G *et al.* IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010, 20 (3): 997