

# 旋转超导体产生的微弱伦敦磁场的探测

谢晓明, 孙 越

(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)

**摘 要:** 旋转超导体在其内部产生一均匀磁场, 称为伦敦磁场。伦敦磁场的研究具有重要理论和应用价值。本文对微弱伦敦磁场的探测方法进行了初步研究, 使用多层超导筒屏蔽外界环境磁场的干扰, 采用超导量子干涉器件 (SQUID) 来读出旋转超导体产生的磁场。通过对冻结磁通产生的干扰信号的有效分离, 成功地观测到了伦敦磁场信号。通过理论分析, 确定了伦敦磁场探测对应屏蔽性能的要求, 对提高伦敦磁场探测信噪比的措施进行了讨论。

**关键词:** 旋转超导体; 伦敦磁场; 超导屏蔽; 冻结磁通; 超导量子干涉器件 (SQUID)

中图分类号: O511

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2008)S4-420-04

## 1 引言

抗磁性是超导体最重要的物理特征之一。然而有趣的是旋转超导体在其内部产生一均匀磁场,  $B_L = -(2m/e)\omega$ 。该效应由 Fritz London 于 1961 年预言, 并陆续在传统超导体、高温氧化物超导体和重费米子超导体中获得证实<sup>[1-3]</sup>, 该效应被称为伦敦效应,  $B_L$  常被称为伦敦磁场。

与旋转超导体有关的研究虽然不是热门, 但也一直引入关注。从理论上而言, 可以严格求解 Ginzberg-Landau 方程从而得出伦敦磁矩的更加严格的表达<sup>[4]</sup>; Martin Tajmar<sup>[5]</sup>等人指出, 在广义相对论范畴, 还需要增加一与引力场有关的伦敦引力磁矩 (Gravitomagnetic London Moment), 该推想获得了初步的实验验证。如果他们的实验结果被最终证实, 有可能使得广义相对论的实验室验证成为可能。Stanford 大学另一太空广义相对论验证项目 Probe B-General Relativity 也利用了旋转超导体产生的伦敦磁场<sup>[6]</sup>。该项目的核心实际上是一个超导陀螺, 利用超导量子干涉器件 (SQUID) 检测由于广义相对论效应引起的陀螺姿态的微小变化。该项目研制的陀螺到目前为止是精度最高的陀螺。伦敦磁矩的大小只与转动角速度有关, 比例系数为物理学常数。该特性已经被用来精确测定超导电子 Copper 对的质量<sup>[7]</sup>。

伦敦磁场非常微弱  $\omega=1$  弧度/s 时,  $B_L \approx 11.4 \text{ pT}$ 。对于探测灵敏度高达  $fT/\sqrt{\text{Hz}}$  的 SQUID 系统, 该信号强度并无挑战, 但问题在于噪声。城市环境磁场通常

约 30~50  $\mu\text{T}$ , 其变化也常高达数百 nT。要将环境场的影响降低至可忽略的程度, 必须使用超导屏蔽。而对于非理想超导屏蔽, 其内部的剩余磁场非常复杂。此外转动过程中超导棒和探测线圈的位置变化、磁通蠕动、机械振动等都会产生复杂的干扰信号, 从而影响伦敦磁场的探测。文献中对伦敦磁场的探测虽然屡有报道, 但是很少给出原始结果及数据处理方法。由于伦敦磁场在理论和应用方面都具有重要意义, 因而具有很好的研究价值。

本文将报道伦敦磁场探测实验和信号处理方法, 并将讨论提高检测信噪比的措施。

## 2 实验构型和实验参数

伦敦磁场探测装置见图 1。超导棒通过一环氧杆安装在超导屏蔽筒内, 法兰盖中央和屏蔽筒底部安装无磁轴承, 既可方便超导棒旋转, 又可防止旋转过程中超导棒的剧烈晃动。马达驱动环氧棒旋转, 转速为每秒 1~10 转 (1~10 cps), 既可匀速旋转, 也可对转速编程。磁场信号由 SQUID 记录。

实验过程中尝试了多种屏蔽方案。如多层镀铅 (90%Pb10%Sn) 铜筒和多层机加工铌筒, 不同口径、不同环境磁场下冷却 (屏蔽室) 和不同冷却速度等, 最终成功实现了伦敦信号探测所需要的屏蔽效能。

## 3 结果与分析

### 3.1 实验结果

首先研究了超导棒以不同速度匀速旋转情况下的

收稿日期: 2008-08-10

作者简介: 谢晓明, 男, 1965 年生, 博士, 中科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, 电话: 021-62511070, E-mail: xmxie@mail.sim.ac.cn

SQUID 输出。图 2a, 图 2b 分别为 1 cps, 8 cps 转速下的 SQUID 的输出。

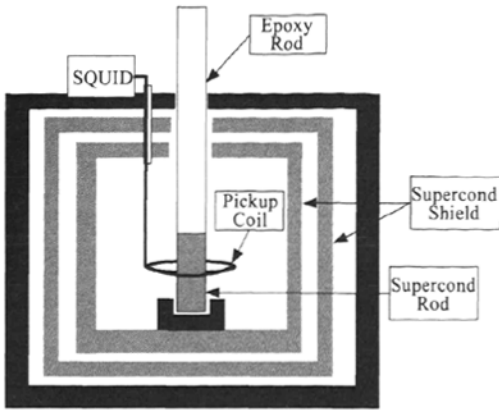


图 1 设计构型 I: 伦敦磁场探测装置示意图

Fig.1 Model I: schematic diagram of London field detecting device

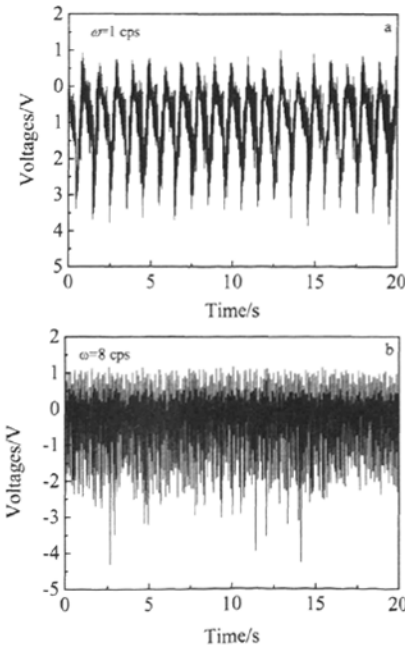


图 2 超导棒匀速旋转时 SQUID 输出信号

Fig.2 The output signal of SQUID with uniform speed rotate of superconducting rod: (a) 1 cps; (b) 8 cps

总体而言, 超导棒匀速旋转情况下 SQUID 输出呈周期性变化特征, 信号的峰值高度在不同转速下相同, 显然该信号源于屏蔽筒中的剩余场。信号中可见幅度

可观的高频干扰, 经反复验证, 证实干扰来源于驱动马达和超导棒旋转激发的振动噪声。对两信号进行仔细比较发现不同转速情况下信号的直流分量不同。改变转速, 发现该直流分量的变化与转速成正比, 与伦敦磁场信号的理论预期一致。

图 3 显示超导棒转速从 0 增加至 9 cps, 再降低至 0 情况下的 SQUID 输出。虽然信号中包含很强的噪声, 但显然角速度增加时, 信号的直流分量同步增加, 与伦敦磁场的预期一致。改变超导棒旋转方向, 发现 SQUID 输出电压变化由图 3 中的伞形改变为 V 字形。以上结果可以判断, 观察到的和角速度成正比的信号确实是伦敦磁场。

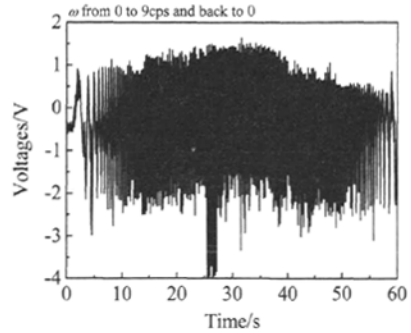


图 3 超导棒从 0-9 cps-0 情况下的 SQUID 输出

Fig.3 The output signal of SUQID with rotating speed from 0 to 9 cps and back to 0 of superconducting rod

### 3.2 结果分析

从前面的实验结果和初步分析可以看出, 设计的实验装置可以探测到旋转超导棒产生的伦敦磁场信号。除了马达电磁干扰和振动噪声外, 主要干扰信号来源于屏蔽筒中的冻结磁通。图 4 为实验装置的俯视图。其中外圈为超导屏蔽, 虚线大圆表示 SQUID 探测线圈, 内部灰色区域及虚线小圆柱表示超导棒。由于机加工和轴承误差, 实际超导棒在绕自身轴旋转的同时, 底部固定点也在围绕一圆周旋转(见连接 5 个示意位置的内部虚圆周)。虽然由于磁通守恒, 屏蔽筒内部的总磁通不变, 但旋转时显然将导致屏蔽筒内部的磁场分布发生周期性变化, 这正是实验中观察到周期性干扰信号的原因。对于理想情况(屏蔽筒无限长, 底部固定点围绕圆周匀速运动), 探测线圈中的磁通变化可以近似为正弦, 如屏蔽筒尺寸有限, 或超导棒底部固定点运动不规则, 则 SQUID 输出信号中的周期性电压将出现复杂的非正弦变化, 事实上, 图 3 中的电压时间波形已经明显偏离正弦函数。



图4 伦敦磁矩探测装置示意图 (俯视图)

Fig.4 Schematic diagram of London moment detecting device (top view)

假定上述屏蔽筒内的剩余磁场导致的电压输出用正弦函数近似, 考虑到伦敦磁场的贡献:

$$B(t) = B_0 \sin(\omega t + \varphi_0) + \kappa_1 \omega \tag{1}$$

$$V(t) = \kappa_2 B_0 \sin(\omega t + \varphi_0) + \kappa_1 \kappa_2 \omega \tag{2}$$

$$\overline{V(t)} = \kappa_1 \kappa_2 \omega \tag{3}$$

其中  $\kappa_1$  为伦敦磁场系数,  $\kappa_2$  为由 SQUID 量程和探测线圈有效面积确定的比例系数。对多组不同转速的实验数据进行处理, 结果见图 5。可以求得:  $\kappa_1 \kappa_2 = 0.0857 \text{ mV}$ , 折算至  $100^\circ/\text{s}$ , 伦敦磁场对应的电压约为  $23.8 \text{ mV}$ 。

通过准确标定  $\kappa_1$  和  $\kappa_2$  系数, 可以求得伦敦磁场的绝对值。由于本研究的主要目的信号的探测及提高信噪比的方法, 因而未对相关系数进行进一步标定。

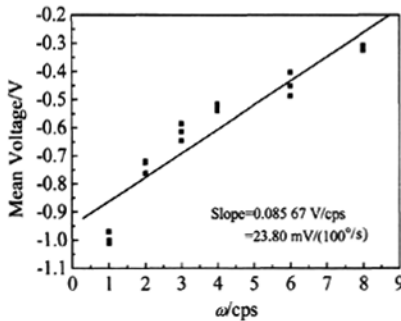


图5 平均电压法分离伦敦磁场分量

Fig.5 Magnetic component separated by average-voltage methods

### 3.3 对实验结果的进一步分析

由上述分析可以进行推广。

$$B(t) = \frac{2m}{e} \omega + B(\varphi, t) \tag{4}$$

其中第二项为屏蔽筒内剩余场的贡献, 处理不再局限于正弦关系, 且考虑了磁通蠕动导致的时间变量。

$$\Delta V = \kappa_2 \Delta \Phi = \kappa_2 A_{\text{eff}} (\kappa_1 \Delta \omega + \Delta B(\varphi, t))$$

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \kappa_1 \kappa_2 A_{\text{eff}} \frac{d\omega}{dt} + \kappa_2 A_{\text{eff}} \left[ \frac{\partial B}{\partial \varphi} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\partial B}{\partial t} \right] \\ &= \kappa_1 \kappa_2 A_{\text{eff}} \frac{d\omega}{dt} + \kappa_2 A_{\text{eff}} \frac{\partial B}{\partial \varphi} \omega + \kappa_2 A_{\text{eff}} \frac{\partial B}{\partial t} \end{aligned}$$

其中  $\kappa_1$  为伦敦磁矩系数,  $A_{\text{eff}}$  为探测线圈的有效面积,  $\kappa_2$  为 SQUID 在特定量程下的磁通电压比。

$$\Delta V = \kappa_1 \kappa_2 A_{\text{eff}} \Delta \omega + \kappa_2 A_{\text{eff}} \Delta B(\varphi) + \kappa_2 A_{\text{eff}} \Delta B(t) \tag{5}$$

假定  $A_{\text{eff}} = 5 \text{ mm}^2$ , 磁通电压比为  $0.7 \text{ V}/\Phi_0$  (有效面积和磁通电压比相当与实验中实际数值), 取  $\Delta \omega = 100^\circ/\text{s}$ , 按照实验结果, 伦敦磁场对应的电压为  $26.6 \text{ mV}$ , 若要求公式 (5) 中第二项和第三项的干扰信号不大于伦敦磁场信号的  $1/10$ , 可以求得:  $\Delta B(\varphi) \leq 1.57 \times 10^{-12} \text{ T}$ ,  $\Delta B(t) \leq 1.57 \times 10^{-12} \text{ T}$ , 即旋转一周探测线圈感受到的磁场变化不大于  $1.57 \text{ pT}$ , 磁通蠕动引起的磁场变化也不大于  $1.57 \text{ pT}$ 。同理可以分析不同转动角速度情况下, 不同信噪比探测对于超导屏蔽和磁通蠕动的要求。

事实上, 本项目初期, 使用了多层镀 PbSn 铜筒 (6 层, 镀 90%Pb10%Sn), 但实验过程中观察到明显的磁通蠕动, 导致伦敦磁矩信号被完全淹没。将超导屏蔽筒改为双层机加工铌筒后, 基本消除了磁通蠕动的影响, 屏蔽能力虽然没有达到  $1.57 \text{ pT}$  (实际约  $0.1 \sim 0.2 \text{ nT}$ ), 但已能够观测到伦敦磁场信号。

### 3.4 超导屏蔽夹层中的伦敦磁场

从上述讨论可以看出, 要提高伦敦磁场探测的灵敏度, 必须降低冻结磁通和减少磁通蠕动。使用高质量的机加工多层铌筒, 成功解决了磁通蠕动问题, 但是图 1 结构中, 冻结磁通比较复杂, 无法大幅度降低。为此, 设计了另一实验构型, 见图 6。将 SQUID 探测

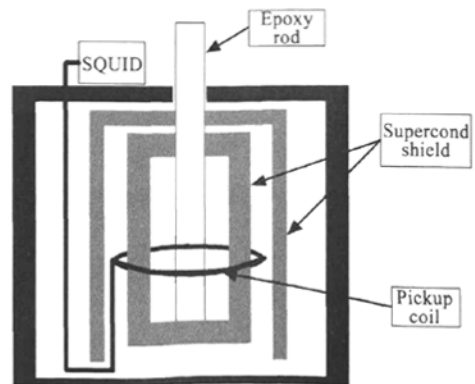


图6 设计构型 II: 探测屏蔽夹层中的伦敦磁场

Fig.6 Model II: schematic diagram of London field detecting device

线圈安装在双层超导屏蔽的狭小夹层中, SQUID、探测线圈和法兰盖刚性固定。使用马达驱动整个多层超导屏蔽筒旋转。由于超导夹层宽度远远小于其高度, 预期夹层中的冻结磁通会比较小。该构型下典型的伦敦磁场信号探测结果如图 7 所示。和图 3 相比, 信号的信噪比明显提高。

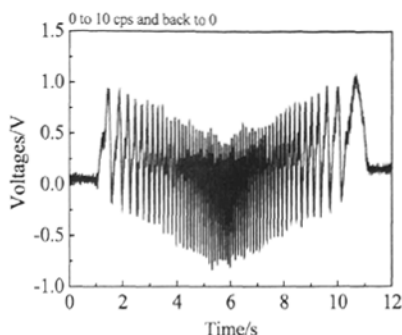


图 7 设计构型 II 情况下探测到的典型伦敦磁场

Fig.7 Typical London field detected by model II

## 4 结 论

### Detection of London Moment of Rotating Superconductor

Xie Xiaoming, Sun Yue

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

**Abstract:** A rotating superconductor will generate a uniform magnetic field in its interior, which is called London field. Investigation on London field has great importance on both theoretical and application aspects. A method for detecting the weak London field was investigated. The environmental magnetic field was shielded using multilayer superconducting cylinder, and the signals from the London moment was readout by a Superconducting Quantum Interference Device (SQUID). By distinguished and separated noise signal caused by frozen flux, London field was successfully observed. Based on theoretical analysis, the properties of requirements on shielding were determined and means to improve the signal to noise ratio were discussed.

**Key words:** rotating superconductor; London field; shield; frozen flux

**Biography:** Xie Xiaoming, Ph.D., State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, P. R. China, Tel: 0086-21-62511071, E-mail: mxie@mail.sim.ac.cn

本文研究了旋转超导体产生的微弱伦敦磁场的探测方法。在两种不同的设计构型下, 都成功探测到了旋转超导体产生的微弱伦敦磁场。分析了冻结磁通和磁通蠕动等因素对伦敦磁矩探测的影响, 从理论和实验角度分别讨论了提高伦敦磁场探测灵敏度和信噪比的方法。本研究结构可以为进一步深入研究伦敦磁场及其应用打下了基础。

#### 参考文献 References

- [1] Hendricks J B, King C A, Rorschach H E. *Journal of Low Temperature Physics*[J], 1971, 4(2): 209
- [2] Verheijen A A, Van Ruitenbeek J M, R De Bruyn Ouboter. *Nature*[J], 1990, 345: 418
- [3] Martin A Sanzari, Cui H L, Francis Karwacki. *Appl Phys Lett*[J], 1996, 68(26): 3802
- [4] Capellmann H. *Eur Phys J*[J], 2002, B25: 25
- [5] De Matos C J, Tajmar M. *Physica*[J], 2005, C432: 167
- [6] John T Anderson. *Near Zero: New Frontiers of Physics*[M]. US: Stanford, 1988
- [7] Tate J, Cabrera B, Felch S B *et al. Physical Rev*[J], 1989, 62: 848