

文章编号 1004-924X(2010)11-2421-09

# STEP 卫星加速度计测量头线圈的 超导特性测试及改进

杨 勇<sup>1,2</sup>, 曹喜滨<sup>1</sup>, 王肃文<sup>2</sup>, D. GILL<sup>2</sup>, R. TORRII<sup>2</sup>, J. MESTER<sup>2</sup>, P. WORDEN<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 斯坦福大学 汉森实验室, 美国 加州 94305-4085)

**摘要:** 为确保 STEP 卫星超高精度加速度计的测量头线圈三维超导膜在设计的工作电流范围内完全超导, 以实现  $10^{-18} g$  精度的加速度测量, 对测量头线圈进行了低温超导测试, 测试证明三维超导膜存在不完全超导缺陷。利用分段测试法对三维膜线圈的二维组成部分进行了测试, 确定了测量头线圈超导缺陷的位置, 并分析了造成超导缺陷的原因。根据测试和分析结果改进了线圈设计, 实现了测量头线圈的完全超导, 并标定线圈的最大工作电流为  $-40 \sim 40$  mA, 满足 STEP 卫星加速度计对超导电流要求的  $-10 \sim 10$  mA, 设计裕度达到 300%。通过测试、分析与改进设计, 定型了 STEP 卫星超高精度加速度计测量头线圈的研制, 为完成 STEP 任务奠定了技术基础。同时, 实现了三维超导膜线圈的制造与工程应用。

**关键词:** 加速度计; 超导量子干涉仪; 测量头线圈; 三维超导膜; 低温超导; 等效原理检验卫星

**中图分类号:** TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101811.2421

## Test of superconductivity of pick-up coils for STEP accelerometer and their modification

YANG Yong<sup>1,2</sup>, CAO Xi-bin<sup>1</sup>, WANG Su-wen<sup>2</sup>,  
D. GILL<sup>2</sup>, R. TORRII<sup>2</sup>, J. MESTER<sup>2</sup>, P. WORDEN<sup>2</sup>

(1. *Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;*

2. *W. W. Hansen Experimental Physics Laboratory, Stanford University, Stanford CA 94305-4085, USA)*

**Abstract:** To ensure the fully superconductivity of a 3D superconducting film in the range of working current required by an accelerometer in the STEP mission and to realize the acceleration measurement in an accuracy of  $10^{-18} g$ , the cryo superconductivity of pick-up coils was tested by several experiments. Tested results show that there are superconductivity failures in the 3D film coils. A subsection method was used to test the 2D composition of the 3D film coils separately, by which the locations of superconductivity failures were determined and the reasons why the failures were happened were obtained. Finally, the method to improve the coil design was presented. After modification according to the method, the film coils have turned to be fully superconducting and their allowable superconducting

收稿日期: 2010-04-23; 修订日期: 2010-09-13.

基金项目: 美国宇航局基金资助项目 (No. NAG5-10799; No. NASA Code S AO 99-OSS-05)

currents are demarcated from  $-40$  mA to  $40$  mA. With a  $300\%$  margin, they satisfy the requirement of the STEP mission for the working current range from  $-10$  mA to  $10$  mA. Through the test, analysis and modification, the design and manufacture of pick-up coils are finalized, which lays the technical foundation for STEP mission, and completes engineering applications of 3-D superconducting film coils.

**Key words:** super-accurate accelerometer; Superconducting Quantum Interference Device (SQUID); pick-up coil; 3-D superconducting film; Cryo-superconductivity; Satellite Test of the Equivalence Principle (STEP)

## 1 引言

超导量子干涉仪 (Superconducting Quantum Interference Device, SQUID) 是测量磁场极其精确的量子机械电路<sup>[1]</sup>; 由于其能够探测非常微弱的电磁信号, 因此在超高精度测量领域得到广泛应用。例如, 美国宇航局 2004 年发射的“重力探测器”卫星 GP-B<sup>[2]</sup>, 其目标为测量验证地球重力场中两个极其微弱的广义相对论效应, 使 GP-B 陀螺发生  $6.6''/a$  和  $40.9 \times 10^{-3}''/a$  的漂移, 利用 SQUID 进行超高精度测量, GP-B 成功地实现了科学目标<sup>[3]</sup>。

等效原理检验卫星 (Satellite Test of the Equivalence Principle, STEP) 是美国宇航局与欧空局第一个在基础科学领域合作的空间计划<sup>[4]</sup>, 目的是研制一颗低轨地球卫星, 用于检验广义相对论的理论基础——等效原理是否在更高精度严格成立<sup>[5]</sup>。按照该科学任务要求, 需研制一种超高精度加速度计, 以达到  $10^{-18} g$  精度的加速度测量<sup>[6]</sup>, 相当于  $10^{-12} m$  量级位移的测量, 如此超高精度的测量几乎是在挑战人类技术的极限。由于 GP-B 和 STEP 空间计划的研制任务都由斯坦福大学承担, 因此, 在继承 GP-B 卫星成功经验的基础上, 斯坦福大学设计的 STEP 卫星超高精度加速度计也采用了 SQUID 作为精确测量微弱电磁信号的核心器件<sup>[7]</sup>。而与 SQUID 相连, 能够敏感加速度计检测质量的位移并将其转换成电信号的测量头是两组三维低温超导膜线圈, 也是世界上首次研制的三维低温超导膜线圈。

三维低温超导膜线圈与加速度计的测量精度密切相关, 其直接影响 STEP 卫星任务的完成效果。为保证超导膜线圈具备任务要求的超导特性, 本文对三维超导膜线圈的超导特性进行了测

试。测试显示初样设计的线圈存在超导缺陷, 因此测定了超导缺陷的位置, 分析了超导缺陷的成因, 改进了三维超导膜线圈的设计和加工工艺。最后测试验证了改进后的线圈, 结果表明其满足 STEP 卫星的设计要求, 由此定型了三维超导膜线圈的研制。

## 2 三维超导膜线圈及测试设备

作为敏感检测质量位移的测量头, 三维超导膜线圈的开发是 STEP 卫星超高精度加速度计的关键技术之一。要使加速度计达到  $10^{-18} g$  的测量精度, 须在满足几何约束与磁约束的条件下精确设计并制造三维低温超导膜线圈, 其主要参数包括膜线圈的圈数、各圈的半径、膜线的宽度以及各圈膜线之间的距离等。研制的线圈初样上镀有铌 (Nb) 作为超导材料, 以金 (Au) 作为抗氧化层的三维超导膜, 有 6 圈膜线, 平均半径约  $2$  cm, 膜线宽度和膜线之间距离均为  $100 \mu m$ , 如图 1 所示。膜线的内端点由超导金属 Nb 丝跨接于线圈顶面的可接触平面区域, 与膜线外端点相接的另一块可接触平面区域分别经线圈拐角延伸到线圈

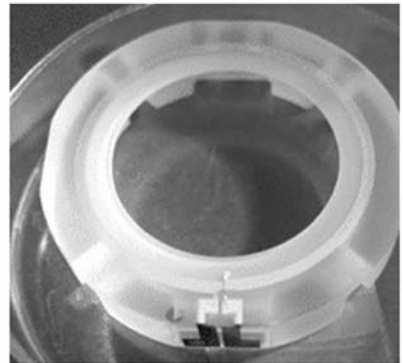


图 1 三维超导膜线圈

Fig. 1 Three dimensional superconducting film coil

的侧面,构成线圈的两个接点平面。

若要线圈上的三维低温超导膜能够实际应用在 STEP 卫星的加速度计上,首先需要对其超导特性进行测试。为此,本文专门设计并建立了一套用于测试三维低温超导膜线圈的设备,如图 2 所示。

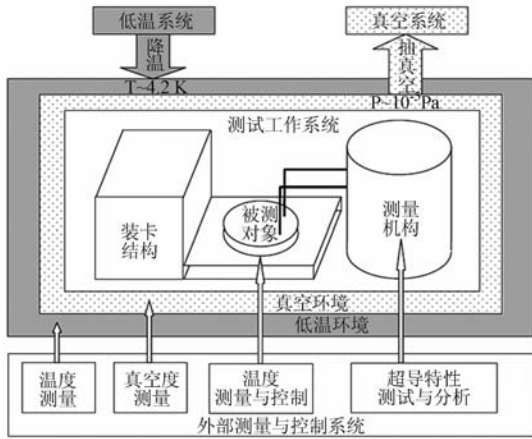


图 2 测试设备系统组成

Fig. 2 System configuration of test facility

测试设备由真空低温系统、测试工作系统和外部测量与控制系统组成。其中,真空低温系统为三维膜线圈的测试提供了真空( $10^{-5}$  Pa)、低温(4.2 K,  $-269$  °C)的测试环境;测试工作系统装配于真空低温系统内部,用于装卡三维膜线圈并通过压簧探针接触被测对象,将线圈的被测部分与外部电路连接组成测试回路;外部测量与控制系统可实时监测真空低温系统的温度、压强等实验环境,通过温度传感器和加热器可实现对测试工作系统中被测对象周围环境的温度控制,并与测试工作系统中的测量机构组成测试外电路,通过 LabView 软件编程设计输入测试电流,测量输出电压并计算得出被测对象的伏安曲线,实现对被测对象超导特性的测试与分析。

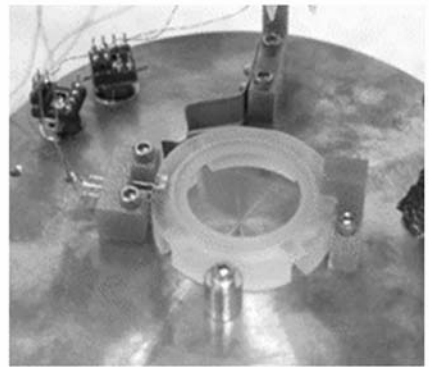
在应用测试设备对三维低温超导膜线圈进行超导特性测试之前,为了验证测试设备的性能、可信度和可靠性,先对一个已知的超导体进行了测试。结果表明,测试过程中真空系统的真空度和降温过程的温度变化,以及被测对象电阻的变化都可以实时地通过外部测量与控制系统观测到。应用该设备测试并验证了已知超导体的超导特性,从而证明了测试设备能够满足三维低温超导膜线圈超导特性的测试要求,同时根据已知超导

体超导特性的测量数据反向给出了测试设备的系统误差。

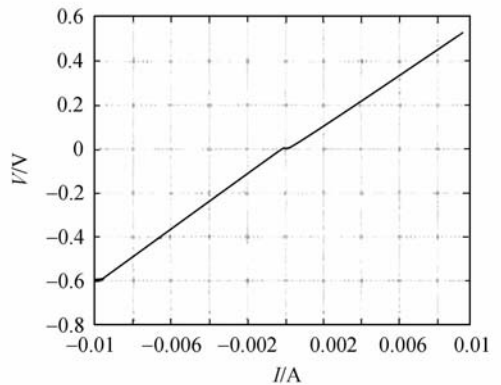
### 3 超导特性测试

#### 3.1 超导缺陷的发现

三维低温超导膜线圈是世界上首次实现的三维制造的超导膜线圈,根据 STEP 加速度计的设计,三维超导膜连接外部导线的接点在线圈侧面的 2 块 L 形接点平面上,如图 1 所示。因而,最能够直接表现膜线圈超导特性的是线圈侧面上三维超导膜的 2 块 L 形接点平面之间的超导测试。为此,使压簧探针只接触线圈侧面上 L 形的超导膜接点平面,建立了侧面二维测试的装配结构,对同批初样线圈中的 5 # 线圈进行测试,如图 3(a) 所示,用铜限位柱和 G10 材料的限位平面将被测



(a) 装卡结构  
(a) fixing assembly



(b) 伏安曲线  
(b) V-I Curve

图 3 5 # 线圈的侧面二维测试

Fig. 3 Two dimensional test for coil 5 from side

线圈定位于测试底板的中心,并用铜簧片压紧线圈来消除装卡结构由于温度变化而产生的形变,以确保压簧探针在测试过程中始终与测量触点区域的可靠接触。

定义 4 个探针的信号端分别为输入电流流入端为  $I_+$ ,流出端为  $I_-$ ,输出电压正测量端为  $V_+$ ,负向测量端为  $V_-$ 。

当测试系统温度降至大约 6.37 K 时,线圈超导膜的电阻发生突变,从 750  $\Omega$  左右突然降至 60  $\Omega$  左右,出现了超导临界状态。待系统达到真空低温的测试环境后,对 5# 线圈上超导膜的超导特性进行了测试:由正、负两个电流输入端输入步长为 0.1 mA、幅值为  $-10 \sim 10$  mA 的步进测试电流,从电压输出端测量 2 个触点间的电压,得到 4 组伏安曲线,如图 3(b) 所示。发现三维 5# 线圈虽然在降温过程中出现超导临界状态,但是并不完全超导,在 4.2 K 的低温环境仍然存在 59.7278  $\Omega$  的剩余电阻。表明三维低温超导膜 5# 线圈的超导性存在缺陷,线圈上的超导薄膜大部分超导,但仍有小部分薄膜不超导。

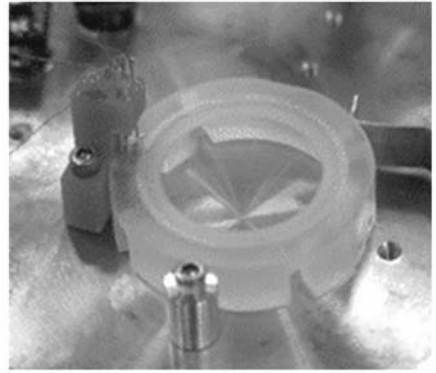
为了确定线圈超导膜的超导缺陷是否为共性问题,对与 5# 线圈同批设计制造的 2# 线圈进行了相同的侧面二维测试,同样出现了线圈超导膜不完全超导的缺陷。由此结果发现:测量头线圈的三维超导膜存在超导缺陷可能是共性问题,说明线圈的设计制造上可能出现问题,造成了初样线圈的缺陷。

### 3.2 线圈超导缺陷及其成因的确定

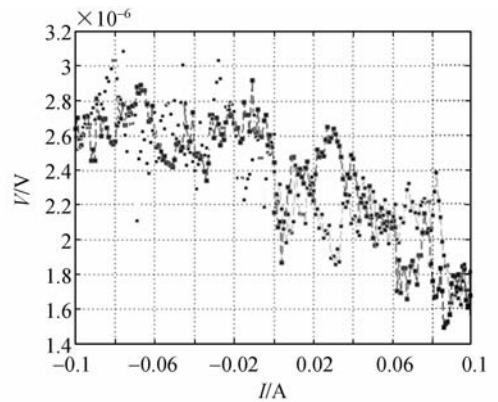
为了确定线圈三维超导膜不超导的部位,将对线圈的测试方式由侧面二维测试改为顶面二维测试,如图 4 所示,以分段测试线圈顶面镀膜的超导性。

令 4 个压簧探针竖直地压在超导膜位于线圈顶面的 2 个可接触平面上,并按照与上述侧面二维测试中相同的信号端定义配置 4 个压簧探针。同样抽真空、降温使测试系统达到真空低温的测试环境,并在降温过程中观察线圈的电阻变化。观测到当测试环境温度降至约 6.21 K 时,监测到线圈顶面上的超导膜的电阻发生突变,由大约 600  $\Omega$  突然降至 0 电阻,出现了标准的超导临界状态。

待系统的测试环境达到稳态后,同样由正、负两个电流输入端输入幅值为  $-10 \sim 10$  mA、步



(a) 装卡结构  
(a) Fixing assembly



(b) 伏安曲线  
(b) V-I Curve

图 4 5# 线圈的顶面二维测试

Fig. 4 Two dimensional test for coil 5 in top

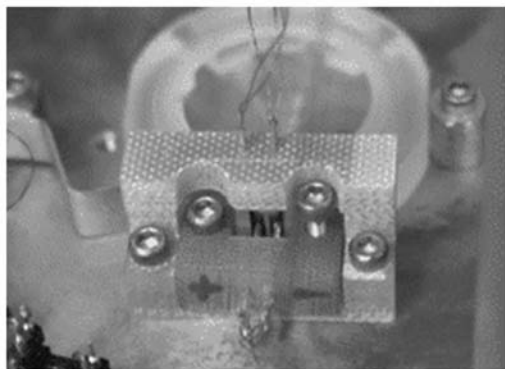
长为 0.1 mA 的步进测试电流,从正、负 2 个电压输出端测量超导膜位于线圈顶面的 2 个可接触平面间的电压,测试得到 4 组电压随电流变化的伏安曲线,如图 4 所示,可见测得的输出电压与输入电流的变化是不相干的,输入电流的幅值是线性变化的,而输出电压几乎是随机变化的,而且其变化的量级在测试系统电压测量设备的仪器误差范围内,经计算 5# 线圈超导膜顶部 2 个可接触平面间的电阻约为  $-3.5892 \times 10^{-6} \Omega$ ,属于测试设备系统误差。

上述 5# 线圈顶面二维测试结果表明处于线圈顶面的二维多匝超导薄膜是完全超导的,验证了顶面二维线圈的超导电性,排除了 5# 线圈的超导膜缺陷存在于线圈顶面二维膜线圈中的可能性。用同样的方法,对 2# 线圈也进行了顶面二维测试,得到与 5# 线圈相同的测试结果,表明 2

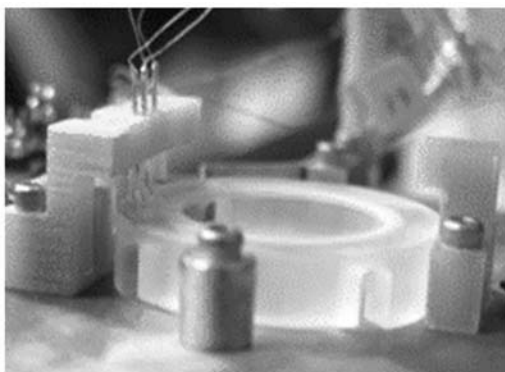
个线圈的超导特性基本一致,即线圈顶面的二维多匝薄膜是完全超导的,但三维超导膜不完全超导,二者具有共性的超导缺陷,愈加说明线圈的设计可能存在问题。

鉴于 STEP 卫星加速度计的测量头线圈是按照相同标准加工制造的,因此,为了确定上述测试中发现的 5#线圈和 2#线圈三维超导膜的超导缺陷是由设计缺陷造成,则需通过测试来验证其他线圈也存在相同的超导缺陷。而且,为保证三维超导膜线圈在 STEP 加速度计中的工程应用,还需要确定三维超导膜线圈出现缺陷的位置,并分析确定造成缺陷的原因,进而改进三维超导膜线圈的设计以使其满足工程应用的要求。

为此,本文设计了可以对测量头线圈进行三维超导特性测试的装配结构,如图 5 所示,并对 4#线圈进行了三维超导特性测试。



(a) 侧面测试  
(a) Test for side



(b) 顶面测试  
(b) Test for top

图 5 4#线圈的三维测试装卡结构

Fig. 5 Fixing assembly of three dimensional test for coil 4

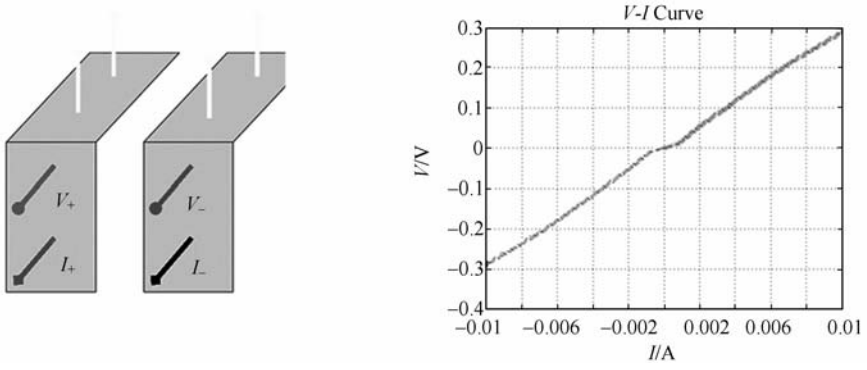
定义测试的信号端分别为输入电流流入端为  $I_+$ ,流出端为  $I_-$ ,电压正输出端为  $V_+$ ,负输出端为  $V_-$ 。同样,由  $I_+$  和  $I_-$  输入步长为 0.1 mA、幅值为  $-10 \sim 10$  mA 的步进测试电流,从  $V_+$  和  $V_-$  测量输出电压,由 LabView 软件记录并绘制出相应的伏安曲线,再由 Matlab 软件计算出相应的电阻。

按上述相同的抽真空、降温方法使系统逐渐达到真空低温的测试环境。观测到当测试系统温度降至大约 7.11 K 时,超导膜 4#线圈的电阻发生突变,由大约 600  $\Omega$  突然降至几乎零电阻,出现超导临界状态。待系统的测试温度达到 4.07 K 的稳态后,按照如图 6 左排栏所示的定义顺序,对 4#线圈进行了 4 组目的不同的测试:

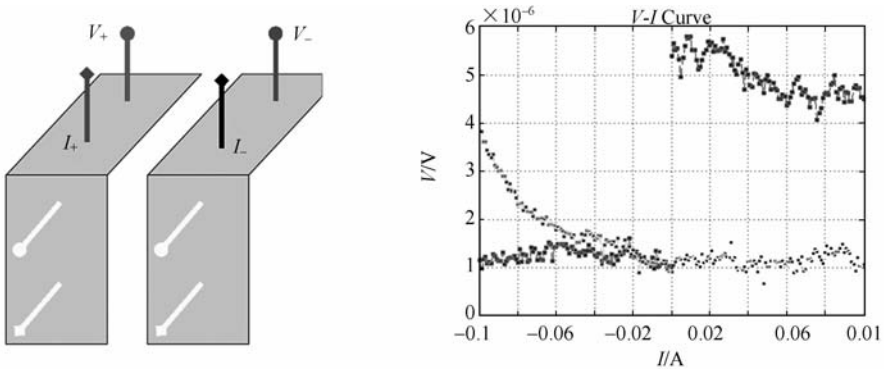
(1) 定义压在膜线圈侧面左接点平面的压簧探针为  $V_+$  和  $I_+$ ;压在膜线圈侧面右接点平面的压簧探针为  $V_-$  和  $I_-$ 。这组测试与上述线圈的侧面二维测试相同,目的是首先确定 4#线圈的三维超导膜是否存在与 5#线圈和 2#线圈相同的不完全超导的缺陷。测量结果表明:由伏安曲线计算得出 4#线圈侧面的两接点平面间电阻约为 30.266 6  $\Omega$ ,即 4#线圈存在残余电阻,与 5#线圈和 2#线圈同样存在超导缺陷。由此,可以确定初样研制的测量头线圈存在共性的超导缺陷问题。

(2) 定义压在膜线圈顶面左侧可接触平面的压簧探针为  $V_+$  和  $I_+$ ;压在膜线圈顶面右侧可接触平面的压簧探针为  $V_-$  和  $I_-$ 。这组测试与上述线圈顶面二维测试相同,测试电流流过 4#线圈顶面的二维膜线圈而直接形成测试回路,没有涉及到 4#线圈的三维膜结构。如图 6(b) 中伏安曲线可见,随着输入电流的步进变化,输出电压的变化是随机的,属于测试系统电压测量设备的仪器误差。由伏安曲线计算得到 4#线圈顶面二维超导膜的电阻约为  $-9.126 3 \times 10^{-6} \Omega$ ,属于测试系统误差,说明 4#线圈顶面的二维膜线圈完全超导,与 5#线圈和 2#线圈的顶面二维测试结果相同。由此,可以确定初样研制的测量头线圈存在设计缺陷。

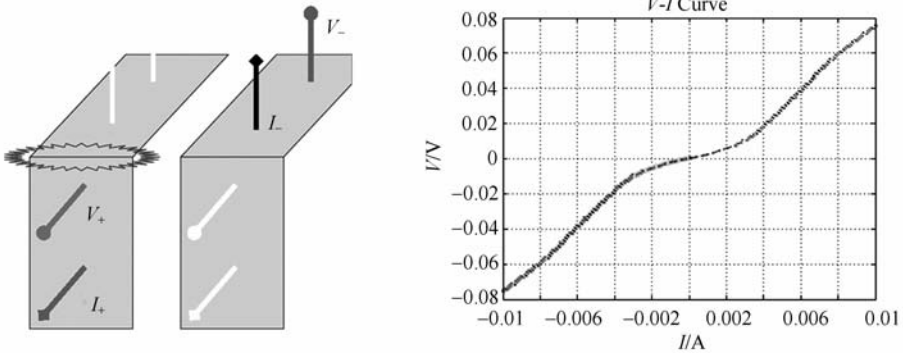
(3) 定义压在膜线圈侧面左侧接点平面的压簧探针为  $V_+$  和  $I_+$ ,压在膜线圈顶面右侧可接触平面的压簧探针为  $V_-$  和  $I_-$ 。这组测试是从三维方位上对 4#线圈进行测量,旨在寻找并确定线



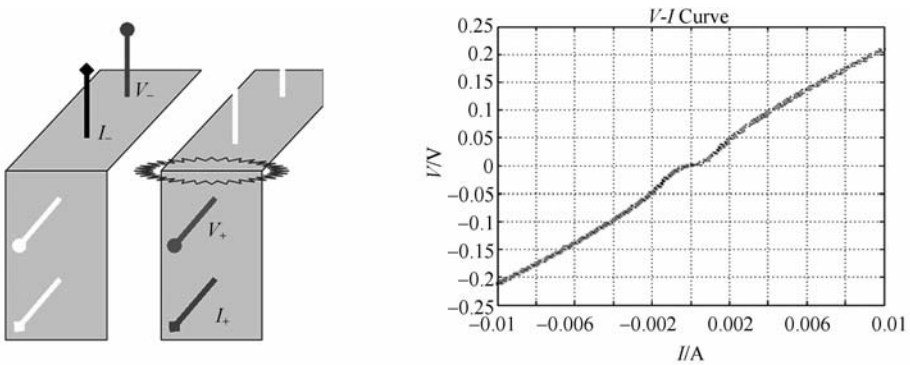
(a)侧面三维模式及结果  
(a) Three dimensional side mode and result



(b)顶面二维模式及结果  
(b) Two dimensional top mode and result



(c)左侧面右顶面三维模式及结果  
(c) Three dimensional left-side and right-top mode and result



(d)左顶面右侧面三维模式及结果  
(d) Three dimensional left-top and right-side mode and result

图 6 4#线圈的三维测试结果

Fig. 6 Results of three dimensional test for coil 4

圈三维超导膜缺陷的位置及成因。4#线圈顶面的二维超导膜与侧面的左接点平面膜层串联组成的三维膜接入到测试回路中,则输入电流仅流经4#线圈顶面二维超导膜与侧面二维超导膜连接的左侧过渡拐角,而不流经右侧拐角。测量输出电压并计算得到电阻均值为 $8.3809\ \Omega$ ,即测试回路中三维膜层的残余电阻。由于相对复杂的线圈顶面二维膜都完全超导,故侧面二维膜存在超导缺陷的可能极小,因此基本可以确定线圈左侧拐角存在超导缺陷。如图6(c)所示,伏安曲线的非线性变化暴露了超导缺陷的成因,当输入电流 $<3\ \text{mA}$ 时,可以测得一较小的线性电阻,而当输入电流 $>3\ \text{mA}$ 时,测得一较大的线性电阻。这与无缺陷的超导膜的非线性伏安特征类似:超导膜有一个可耐受的电流阈值,当超导电流小于该阈值时,超导膜处于超导态,其电阻为零;而当超导电流大于该阈值时,超导膜变为不超导,显现电阻。说明左侧拐角处有一部分膜层的可耐受极限电流为 $3\ \text{mA}$ ,当输入电流 $>3\ \text{mA}$ 时,这部分膜层由超导态变为不超导,表现为伏安曲线斜率的突然增大。这从物理上分析有多种可能的因素,但在工程上最直接的判断是由膜层过薄所致。上述分析结果表明:4#线圈三维膜层的左侧拐角处存在超导缺陷,而成因是膜层过薄,可耐受的极限超导电流过小。

(4)定义压在膜线圈顶面左侧接点平面的压簧探针为 $V_+$ 和 $I_+$ ;压在膜线圈侧面右接点平面的压簧探针为 $V_-$ 和 $I_-$ 。与测试(3)类似,这组测试的输入电流流经线圈顶面二维超导膜与侧面二维超导膜连接的右侧过渡拐角,而不流经左侧拐角。测量输出电压并计算得到残存电阻均值为 $21.6661\ \Omega$ ,与测试(3)中约 $8.3809\ \Omega$ 的残存电阻相加,恰好与测试(1)中约 $30.2666\ \Omega$ 的4#线圈总残存电阻吻合,从而充分证明了线圈膜层的拐角处是超导缺陷所在的位置。如图6(d)所示,伏安曲线的非线性变化再次说明了造成超导缺陷的原因是膜线圈拐角处的膜层过薄。测试(4)充分验证了测试(3)的分析结果。

上述超导特性的测试结果表明:STEP卫星超高精度加速度计的测量头线圈存在设计缺陷,

导致线圈膜层拐角处的膜层过薄,造成三维超导膜线圈不完全超导。因此,需要改进测量头线圈的设计,使其完全超导,并且保证超导膜可耐受的电流阈值足够大,以满足加速度计对其超导电流工作范围的要求。

## 4 线圈的设计改进及测试验证

根据低温超导理论以及上述的测试分析,可以确定三维膜线圈的超导缺陷成因为:三维超导薄膜线圈拐角处的部分膜层过薄,使得部分无应力薄膜层的临界磁场过小,当输入电流增大到一个比较小的值时,电流在线圈中产生的磁场就穿透了过薄的膜层,造成膜层的电阻由超导态到常态的突变。

根据目前超导膜线圈的镀膜工艺,镀膜机只能同时对二维的平面镀膜,因此制备三维膜线圈需要对顶面二维膜线圈和侧面二维膜线圈分别镀膜。结合镀膜工艺判断,导致三维膜线圈超导缺陷的主要成因也是顶面膜层与侧面膜层相接的拐角处膜层过薄,因此需要增加膜层厚度。

为此,对三维超导膜线圈采取了改进措施,修改了原来的凝溶石英基底拐角处的机械设计并重新镀膜。在原来的设计中,对石英基底拐角处做导圆加工以尽量增大线圈外形各处的曲率半径,减小膜层厚度的差异,尽量保持三维膜层的整体厚度相同,如图7(a)所示;而为了增加线圈拐角处膜层的厚度,将设计修改为:在线圈拐角处凝溶石英基底导圆加工的基础上再进行倒角加工,将原来镀膜的弧面改为一个小斜面,如图7(b)中虚线框突出的部分。同时,镀膜工艺除了过去分别对线圈顶面和侧面进行镀膜外,还要对改进后加工出的小斜面进行二维镀膜。而三维膜线圈由过去的两次二维镀膜修改为三次二维镀膜。

根据修改的设计和工艺,加工并重新镀膜后,对改进后的三维超导膜线圈的超导特性进行了测试。由于在STEP卫星加速度计的设计中,超导电路连接测量头线圈的位置在其侧面的接点平面上,因此从工程应用的角度,采用侧面二维测试方法直接测量三维线圈的超导特性,如图8所示。



(a) 线圈基底的原设计  
(a) Original design of coil base



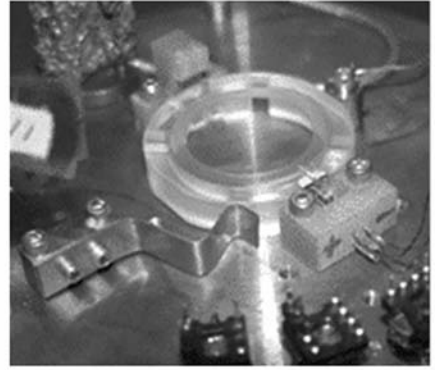
(b) 线圈基底的修改设计  
(b) Modified design of coil base

图 7 线圈设计的改进

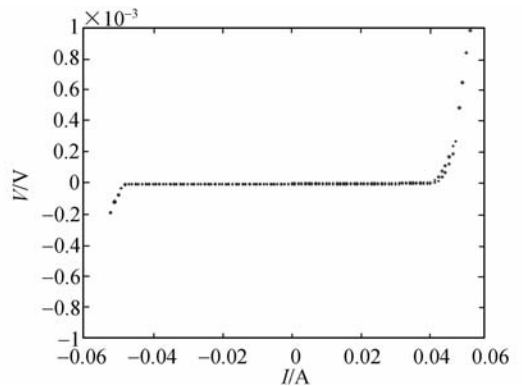
Fig. 7 Improved design of coil

测试系统达到真空低温环境后,由  $I_+$ 、 $I_-$  端输入步长为 0.1 mA、幅值为  $-60 \sim 60$  mA 的步进测试电流,以充分测试三维膜线圈可耐受电流的阈值,并标定其最大工作电流。测试结果表明:改进后的三维超导膜线圈实现了完全的超导电性,并且可耐受电流阈值达到 48 mA,即当超导电流的幅值为 48 mA 时,三维膜线圈处于超导临界状态。

根据上述测试结果,标定三维超导膜线圈的最大工作电流为  $-40 \sim 40$  mA,而超高精度加速度计对测量头线圈工作电流的要求仅为  $-10 \sim 10$  mA,因此,改进后线圈的超导特性能够满足工程应用的要求,且其超导工作电流的设计裕度达到 300%。



(a) 装卡结构  
(a) Fixing assembly



(b) 伏安曲线  
(b) V-I curve

图 8 改进线圈的超导特性测试

Fig. 8 Test of superconductivity for modified coil

## 5 结 论

对 STEP 卫星超高精度加速度计工程研制的测量头线圈进行了超导特性测试,发现三维超导膜线圈存在部分不超导的缺陷。分析了可能造成缺陷的原因,通过测试证明了由于测量头线圈初始设计的不完善导致其膜层过薄而产生了不超导缺陷,提出了改进的线圈超导性的设计方法和加工工艺,测试实验验证了改进后的三维膜线圈完全超导。根据实验结果标定了其超导电流工作范围为  $-40 \sim 40$  mA,以 300% 的裕度满足了加速度计  $-10 \sim 10$  mA 的设计要求,为工程实现  $10^{-18} g$  精度的加速度测量奠定了技术基础。

## 参考文献:

- [1] LOCKHART J M. SQUID readout and ultra-low magnetic fields for Gravity Probe-B [C]. *Proceedings of the Meeting; Cryogenic optical systems and instruments II. Los Angeles, CA, United States, 1986*;148-156.
- [2] EVERITT C W F, BUCHMAN S, DEBRA D B, *et al.*. Gravity probe B: countdown to launch [J]. *Lecture notes in Physics*, 2001,562:52-82.
- [3] EVERITT C W F, ADAMS M, BENCZE W, *et al.*. Gravity probe B data analysis [J]. *Space Science Reviews*, 2009,148: 53-69.
- [4] STEP study team, STEP Satellite Test of the E-

quivalence Principle Report on the Phase A Study [R]. ESA SCI(93) 4, March 1993.

- [5] MESTER J, TORII R, WORDEN P, *et al.*. The STEP mission: principles and baseline design [J]. *Class. Quantum Grav.*, 2001,18(13):2475-2486.
- [6] WORDEN P W. On behalf of the STEP Team, STEP Payload Development [J]. *Advances in Space Research*, 2007,39:259-267.
- [7] TORII R. SQUID position sensor development [J]. *Class. Quantum Grav.*, 1996,13:A159-A163.
- [8] WORDEN P, TORII R, MESTER J C, *et al.*. The STEP payload and experiment [J]. *Advances in Space Research.*, 2000,25(6):1205-1208.

## 作者简介:



**杨 勇**(1981—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,2004 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,现为哈尔滨工业大学卫星技术研究所与美国斯坦福大学汉森实验室联合培养博士生,主要从事航天器总体设计和基于卫星平台的超高精度测量方面的研究。E-mail: yang\_brave@hit.edu.cn



**Dale Gill**,男,美国人,工程师,1979 年于美国加州大学伯克利分校获得硕士学位,现为斯坦福大学汉森实验室 STEP 项目研发工程师,主要从事超导镀膜等方面的研究。



**Rodney Torrii**,男,美国人,高级研究员,1989 年于美国布朗大学获得博士学位,现为斯坦福大学汉森实验室 STEP 项目经理,主要从事低温物理学和基于卫星平台的超高精度测量等方面的研究。



**John Mester**,男,美国人,高级研究员,1983 年于美国约翰霍普金斯大学获得学士学位,1985 年、1992 年于美国哈佛大学分别获得硕士、博士学位,现为斯坦福大学汉森实验室 STEP 项目副经理,主要从事低温物理学和基于卫星平台的超高精度测量等方面的研究。



**Paul Worden**,男,美国人,高级研究员,1967 年于美国莱斯大学获得学士学位,1969 年、1976 年于美国斯坦福大学分别获得硕士、博士学位,现为斯坦福大学汉森实验室 STEP 项目副总负责人,主要从事无拖曳卫星、重力场测量、基于卫星平台的超高精度测量等方面的研究。

## 导师简介:



**曹喜彦**(1963—),男,黑龙江肇东人,教授,博士生导师,1985 年、1988 年、1991 年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为哈尔滨工业大学航天学院院长,主要从事航天器总体设计等方面的研究。E-mail: xbcao@hit.edu.cn

## 副导师简介:



**王肃文**(1959—),男,江苏扬州人,高级研究员,1982 年于南京大学获得学士学位,1984 年于美国路易斯安那州立大学获得硕士学位,1988 年于美国杜克大学获得博士学位,现为斯坦福大学汉森实验室 STEP 项目主任,主要从事低温物理学和基于卫星平台的超高精度测量等方面的研究。E-mail: suwen@stanford.edu