

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311114

# 低温超导全张量磁梯度测量系统研制与应用\*

刘建英<sup>1</sup>, 郭华<sup>2</sup>, 郭子祺<sup>1</sup>, 乔彦超<sup>1</sup>, 秦静欣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心 北京 100083)

**摘要:**首先介绍了低温超导全张量磁梯度测量系统的组成、仪器布局和硬件连接;然后分析了系统研制过程中各模块测试结果,包括测控系统噪声测试和 SQUID 灵敏度测试,指出组成系统的 SQUID 传感器的一致性至关重要;其次,详细阐述了系统地面静、动态实验,测试了系统动态范围、测量精度和稳定性,系统静态实验磁梯度测量精度均优于 $\pm 30$  pT/m;最后,在江苏丹阳进行了野外飞行试验,根据 DZ/T 0142—2010 航空磁测技术规范,测量结果表明各张量分量重复线内符合精度优于 $\pm 25$  pT/m,每条测线动态测量灵敏度均值均优于 $\pm 30$  pT/m。此套系统以达到工程样机水平,大大提高了低温超导全张量测量系统的实用化程度,为我国在低温超导航磁测量领域接下来的研究工作打下了坚实的基础。

**关键词:** 测控系统;低温超导;超导量子干涉仪;全张量;吊舱

中图分类号: TH763.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40 170.99

## Development and application of a low temperature superconducting full tensor magnetic gradient detection system

Liu Jianying<sup>1</sup>, Guo Hua<sup>2</sup>, Guo Ziqi<sup>1</sup>, Qiao Yanchao<sup>1</sup>, Qin Jingxin<sup>1</sup>

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Firstly, this article introduces the composition, instrument layout, and hardware connection of the low-temperature superconducting full tensor magnetic gradient measurement system. Then, the test results of each module in the system development process are analyzed, including the noise test and SQUID sensitivity test of the measurement and control system. Secondly, the ground static and dynamic experiments of the system are described in detail. The dynamic range, measurement accuracy, and stability of the system are tested. Each component of the magnetic gradient measurement accuracy of the system static experiment is better than  $\pm 30$  pT/m. Finally, the flight test is implemented in Danyang, Jiangsu Province. According to the DZ/T 0142—2010 Technical Specifications for Aeromagnetic Survey, the measurement results show that the coincidence accuracy in the repeated lines of each tensor component is better than  $\pm 25$  pT/m, and the average dynamic measurement sensitivity of each measuring line is better than  $\pm 30$  pT/m. This system has reached the level of engineering prototype, greatly improving the practicality of the low-temperature superconducting full tensor measurement system. It provides a solid foundation for future research work in the field of low-temperature superconducting navigation magnetic measurement in China.

**Keywords:** measurement and control system; low temperature superconducting; SQUID; total tensor; pod

## 0 引言

超导量子干涉仪 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是目前已知灵敏度最高的一

种磁传感器,精度高达 fT 级别,同时具有低噪声和宽频带的特性,因此被认为是第 3 代磁测传感器<sup>[1]</sup>。从 20 世纪 80 年代末开始,SQUID 芯片由于制备工艺取得突破,稳定性与可靠性得到大幅度改善,因此被迅速地应用到地球物理勘探、生物磁测、物探考古和军事探潜等领

域<sup>[2-3]</sup>。目前,德国、美国、澳大利亚、加拿大以及中国先后开展了基于 SQUID 的航磁超导全张量梯度测量系统的研制工作,并取得了一定的研究成果<sup>[4-5]</sup>。根据工作温度不同,全张量磁梯度测量系统可分为高温超导和低温超导两类。高温超导全张量梯度测量系统具有液氮方便携带以及价格低廉的优势,但高温 SQUID 磁场灵敏度仅为 15 ft,且其在较强的外磁场中灵敏度会大幅度下降。低温超导全张量梯度测量系统(low temperature superconducting full tensor magnetic gradient, LTS-FTMG)尽管需要液氮提供低温环境,不方便携带和运输,但低温 SQUID 磁场灵敏度可达 1 ft 量级,能实现“真梯度”测量,并且测量时无需进行正常场校正,因此,受到各国地球物理专家的广泛关注<sup>[6-8]</sup>。

国际上,美国橡树岭国家实验室与特瑞斯坦公司利用 8 个高温磁强计搭建了全张量磁梯度测量系统,用于 UXO 探测,但 SQUID 极易失锁,系统动态性能较差<sup>[9-10]</sup>。澳大利亚联邦科学与工业研究组织与五矿公司展开合作,利用自制的 SQUID 轴向梯度计研制了一套全张量磁梯度仪样机,用于矿产及石油勘探,该系统测量灵敏度最高达到 50 pT/m<sup>[11-12]</sup>,由于数据同步性较差,因此该系统不适合搭载在飞行平台上。德国耶拿利用平面 SQUID 梯度计研制了 LTS-FTMG 测量实用化系统,命名为 MagSQUID,经过软件平衡后,静态梯度测量灵敏度可达到 10 pT/m,并于 2004 年在南非实现了野外飞行,获得了全张量磁梯度数据<sup>[13-14]</sup>。遗憾的是,该系统属于西方国家限制出口的尖端技术,对我国实行禁运,我国需要自主研发国产化的超导磁梯度张量测量系统。

我国对超导全张量磁梯度探测系统的研究要稍晚于欧美国家,但也取得了一系列成果,中科院、航空遥感中心、中国地质大学、海军工程大学、国防科技大学、吉林大学、中船重工等单位陆续开展了对磁梯度张量测量技术的研究<sup>[15-18]</sup>。在高温超导技术方面,中科院物理所一直致力于高温超导材料的研究工作,取得了一定的研究成果,但制备的高温 DC-SQUID 平面梯度计的稳定性和可靠性与国外器件相比仍有不小差距<sup>[19]</sup>。吉林大学从“十一五”开展了高温 SQUID 全张量磁梯度测量系统样机的研制,并于 2020 年实现了系统飞行实验<sup>[20-21]</sup>,系统测量精度为 30 pT,系统采用的 SQUID 为国外采购,目前已对国内禁售。

在低温超导技术方面,中科院上海微系统与信息技术研究所开展了 LTS-FTMG 测量系统研究工作,实现了超导芯片的国产化<sup>[22-23]</sup>。中科院空天院从工程应用角

度出发,从系统噪声、地面实验和飞行实验 3 个层面开展了 LTS-FTMG 测量系统关键技术研究<sup>[24]</sup>,并相继于 2020 和 2021 年完成 LTS-FTMG 测量系统野外飞行实验,获取 500 km 的测线数据,系统测量灵敏度为  $\pm 30$  pT/m,虽与德国仍有差距,但此套系统已达工程样机水平,液氮使用时间由 2 天提升到 5 天,大大提高了低温超导全张量测量系统的实用化程度,这为我国在低温超导航磁测量领域接下来的研究工作打下了坚实的基础。

## 1 方法与原理

磁梯度张量一般定义为磁场三分量( $B_x, B_y, B_z$ )在空间内的一阶导数,对三分量在  $x, y, z$  上求一阶偏导数,则磁梯度张量可表示为:

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (i, j = x, y, z) \quad (1)$$

由于地磁场为无源场,根据麦克斯韦方程组,磁位的散度和旋度均为 0,张量满足式(2)和(3),因此 9 个张量中仅有 5 个独立分量。

$$B_{ij} = B_{ji} \quad (i, j = x, y, z) \quad (2)$$

$$B_{xx} + B_{yy} + B_{zz} = 0 \quad (3)$$

LTS-FTMG 系统采用正六棱台安装 SQUID 芯片,如图 1 所示,正六棱台的 6 个面上各放一个梯度计,其中任 5 个即可解算出全张量信息,保证了一定的数据冗余度。张量  $B_{ij}$  与测量值  $G_m$  ( $m = 1, 2, \dots, 6$ ) 的转换关系如式(4)所示, $\alpha$  为六棱台侧面与底面夹角。

$$\begin{pmatrix} B_{xx} \\ B_{yy} \\ B_{zz} \\ B_{xy} \\ B_{yz} \\ B_{zx} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 8 & -7 & -1 & 2 & -1 & -7 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & -3 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ -4 & -1 & 5 & -10 & 5 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -3 & 2 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \\ G_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{9\sin 2\alpha} \\ \frac{1}{\sqrt{3}\sin 2\alpha} \\ \frac{1}{2\sqrt{3}\sin 2\alpha} \\ \frac{1}{9\sin 2\alpha} \\ \frac{1}{2\cos 2\alpha} \\ \frac{4}{9\sin 2\alpha} \end{pmatrix}^T \quad (4)$$

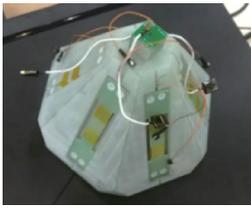


图 1 六棱台实物图

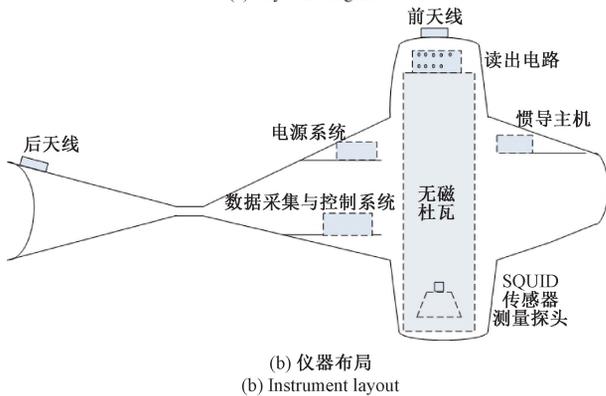
Fig. 1 Physical drawing of hexagonal pyramid

## 2 系统概述

LTS-FTMG 系统需要低温环境,重量较大,且为了减少飞机对 SQUID 的干扰,多采用有人机悬挂吊舱装置进行飞行实验。吊舱实物及其内部仪器布局如图 2 所示,其内部硬件组成实物如图 3 所示,从左到右依次为电源系统、组合惯导系统(惯导主机+前天线+后天线)、数据采集与控制系统、读出电路、无磁杜瓦和 SQUID 传感器测量探头。



(a) 实物图  
(a) Physical diagram



(b) 仪器布局  
(b) Instrument layout

图 2 吊舱及仪器布局图  
Fig. 2 Pod and instrument layout diagram

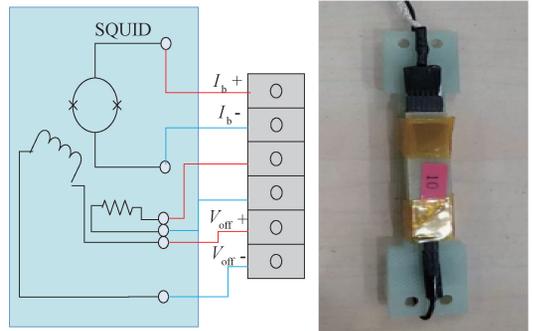
### 2.1 SQUID 传感器

SQUID 有 3 对引脚线,分别为加热线、偏置电流  $I_b$  和偏置电压  $V_{off}$ 。 $I_b$  和  $V_{off}$  用来调节 SQUID 工作点。每个 SQUID 都进行了封装和气密封,可长期使用。SQUID 内置的调制/反馈线圈用于读出电路控制耦合至 SQUID 的磁通。图 4 为其结构示意图和实物图。



图 3 硬件系统实物图

Fig. 3 Physical diagram of the hardware system



(a) 示意图  
(a) Schematic graphics  
(b) 实物图  
(b) Physical drawing

图 4 SQUID 结构示意图、实物图

Fig. 4 SQUID structure diagram, physical drawing

SQUID 在使用前需对其关键性能进行测试,从 12 个传感器中根据静态灵敏度指标选取了 6 个性能参数最优越的传感器用于组建系统。

SQUID 噪声水平的测试需要在电磁屏蔽室中进行,测试采用频谱仪作为测量仪器,调节电路使 SQUID 传感器处于锁定工作状态,将电路的输出端接到频谱仪的输入端,利用快速傅里叶变换的方式完成 SQUID 传感器噪声测试,图 5 所示为 6 个 SQUID 的噪声功率谱密度图,一般低频段噪声值较高,取低频段噪声整体趋势作为噪声测量结果,如图 5 中虚线所示,例如图 5(a)读出低频段整体趋势噪声为  $1.8 \times 10^{-6} \text{ nT/cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,转换单位后为  $0.18 \text{ pT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。6 个 SQUID 噪声统计如表 1 所示,从表 1 中可以看出,SQUID 梯度计噪声均处于  $0.18 \sim 0.35 \text{ pT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$  之间,噪声值一致性较好。

表 1 SQUID 噪声测试统计表

Table 1 SQUID noise test statistical table

SQUID 序号	1	2	3	4	5	6
梯度噪声/ $\text{pT}/(\text{m} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$	0.18	0.24	0.19	0.18	0.27	0.35

### 2.2 无磁杜瓦

无磁杜瓦为 SQUID 梯度计提供 4.2 K 的低温环境,为了保证 SQUID 传感器能够较长时间浸泡在液氮中,综合考

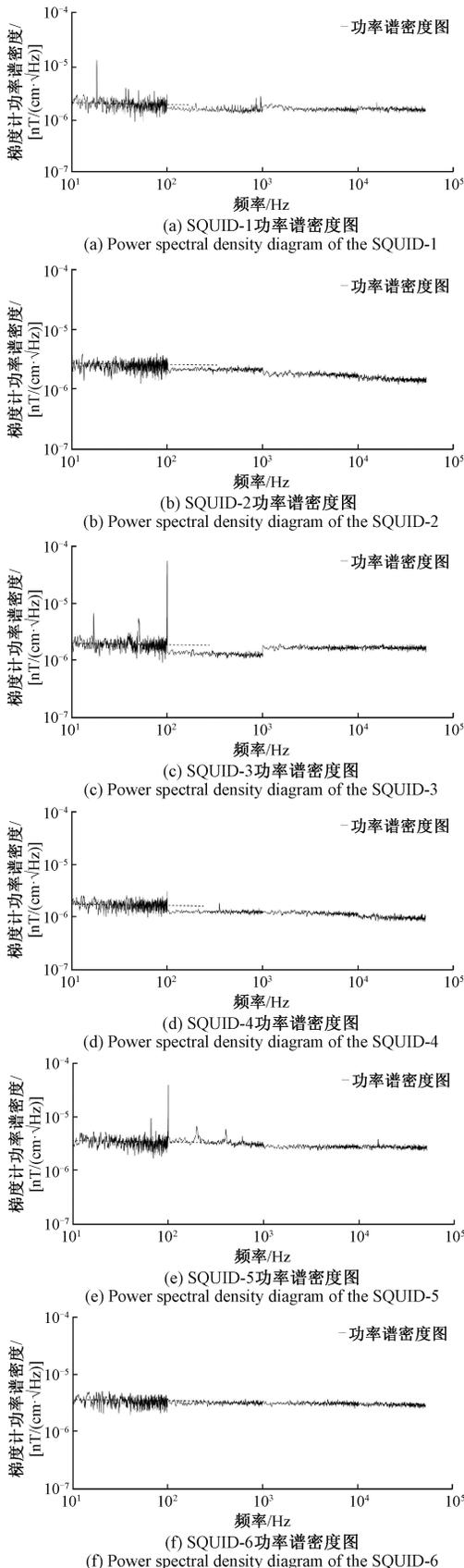


图5 SQUID功率谱密度图

Fig. 5 Power spectral density diagram of the SQUID

虑吊舱内部仪器设备总重量要求和 SQUID 探头和支架的尺寸结构设计了无磁杜瓦需要满足的结构和参数,加工完成后在外部均匀地包裹 2~3 层铝箔膜对其进行防电磁干扰屏蔽设计,利用铝金属对电磁波的反射、吸收和趋肤效应原理有效的防止外部电磁干扰进入杜瓦,降低干扰对 SQUID 传感器的影响。无磁杜瓦可实时监测杜瓦内温度和压力,在顶端增加了压力阀,静态条件下液氦保存时间能够连续工作 5 天,大大降低了低温测量的使用成本。

### 2.3 惯导系统

LTS-FTMG 系统在飞行实验中采集磁数据的同时需同步记录吊舱的位置和姿态信息,这对数据处理中姿态校正、坐标系转换、磁补偿和数据反演至关重要。本系统采用的是 Novatal 公司高精度 SPAN-CPT 型号组合惯导系统,能够自主寻北,在差分工作模式下,偏航角测量精度为  $0.05^\circ$ ,俯仰角和滚转角测量精度为  $0.015^\circ$ 。

### 2.4 测控系统

测控系统由读出电路、同步数据采集与控制系统和上位机 3 部分组成,主要功能包括 SQUID 工作点调节、信号放大、模数转换和数据存储、记录等。本系统采用 FPGA+Labview CRIO 系统架构搭建,其坚固性和防震性更适合航空平台,除此之外,其 FPGA 并行工作模式有效提高了系统工作的稳定性。

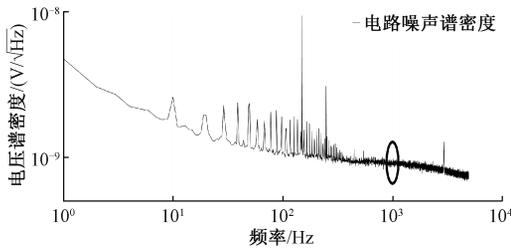
测控系统噪声水平的测试需要在测试前将读出电路的输入端引脚短路,上电使其工作,调节电路使其处于调试的工作状态,利用数据采集与控制系统采集数据,采样率设置为 10 kHz,平均计算次数为 100 次,图 6 为测控系统 9 个通道电压噪声功率谱密度图,取 1 kHz 处电压噪声测量结果,得到测控系统各通道的电压噪声,电压噪声统计结果如表 2 所示。

表 2 电路噪声统计表

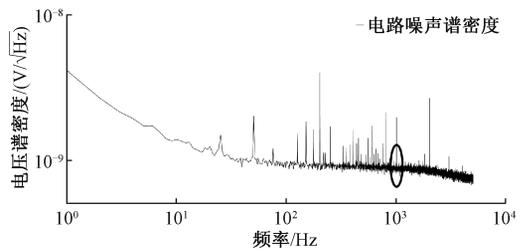
Table 2 System noise statistics table

通道	电路噪声/(nV/√Hz)	读出电路放大倍数
CH1	0.90	30 753
CH2	0.89	30 707
CH3	0.90	30 720
CH4	0.87	30 709
CH5	0.90	30 796
CH6	0.90	30 784
CH7	0.89	30 731
CH8	0.89	30 748
CH9	0.88	30 767

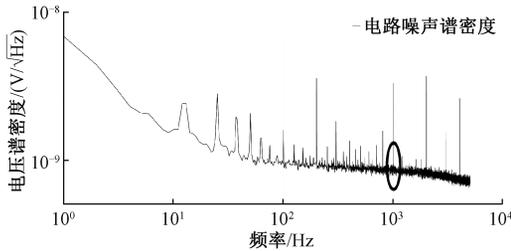
从表 2 中可以看出读出电路放大倍数介于 30 700~30 800 之间,放大倍数基本一致,测控系统 9 个通道系统噪声均等于或优于  $0.9 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。



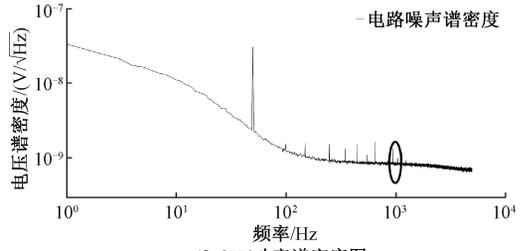
(a) CH1功率谱密度图  
(a) Power spectral density diagram of CH1



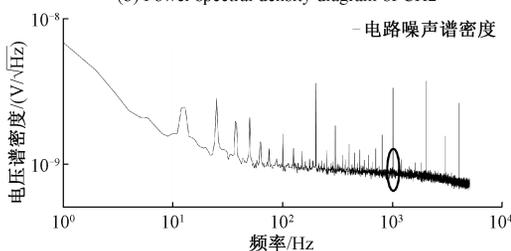
(e) CH5功率谱密度图  
(e) Power spectral density diagram of CH5



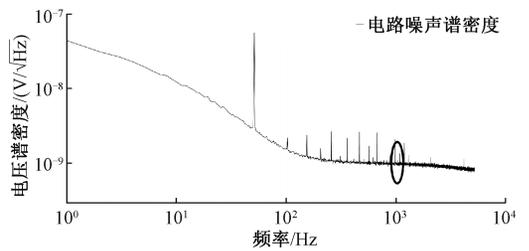
(b) CH2功率谱密度图  
(b) Power spectral density diagram of CH2



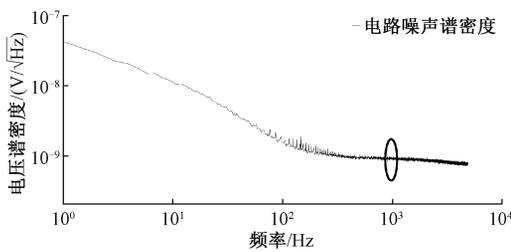
(f) CH6功率谱密度图  
(f) Power spectral density diagram of CH6



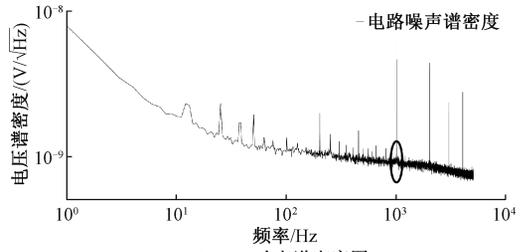
(c) CH3功率谱密度图  
(c) Power spectral density diagram of CH3



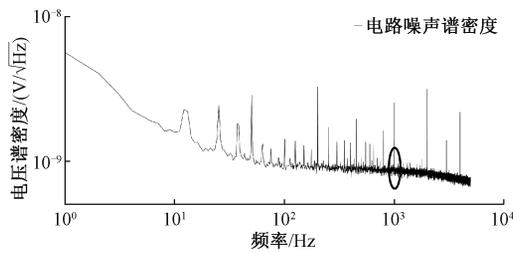
(g) CH7功率谱密度图  
(g) Power spectral density diagram of CH7



(d) CH4功率谱密度图  
(d) Power spectral density diagram of CH4



(h) CH8功率谱密度图  
(h) Power spectral density diagram of CH8



(i) CH9功率谱密度图  
(i) Power spectral density diagram of CH9

图 6 电路噪声功率谱密度图

Fig. 6 Power spectral density diagram of circuit noise

### 3 系统实验

#### 3.1 系统地面静态实验

为了测量 LTS-FTMG 系统静态指标,在野外采集 1 h 静态磁数据如图 7 所示,从图 7 中可以看出,数据波动较小且稳定性较好,6 个梯度计全部正常工作,未出现失锁现象。

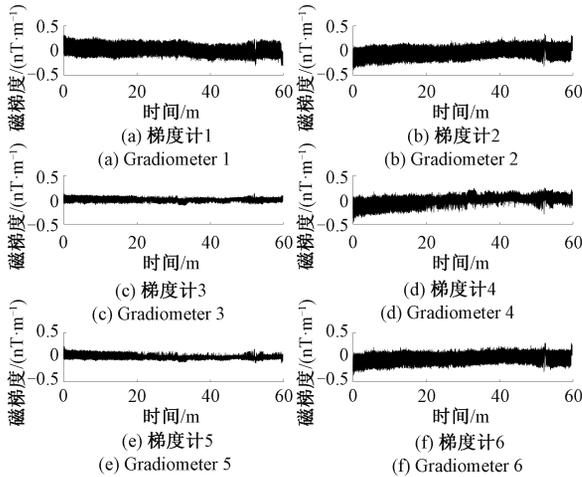


图 7 系统静态测量数据

Fig. 7 System static measurement data

根据 DZ/T 0142—2010 航空磁测技术规范静态噪声式(5)统计噪声结果<sup>[25]</sup>,如表 3 所示,各通道数据静态噪声均优于 30 pT/m。

表 3 地面静态测量数据四阶差分

Table 3 The fourth order difference value of ground static measurement data

通道	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
四阶差分/(pT·m <sup>-1</sup> )	24.50	26.80	14.70	15.30	14.40	23.00

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (B'_i - B')^2} \quad (5)$$

$$B'_i = \frac{T_{i-2} - 4T_{i-1} + 6T_i - 4T_{i+1} + T_{i+2}}{16} \quad (6)$$

$$B' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B'_i \quad (7)$$

其中,  $n$  为数据点数,  $i=1, 2, \dots, n$  为数据序列号,  $T_i$  为测线上第  $i$  个磁测数据,  $B'_i$  为测线上每个测点及其前后两个数据点的四阶差分,  $B'$  为测线数据四阶差分的平均值。

#### 3.2 系统地面动态范围测试实验

为了验证 LTS-FTMG 系统的动态范围,在河北雄安进行了系统地面动态实验。

实验 1) LTS-FTMG 系统静止,在距离杜瓦 2.5 m 处晃动两次铁棒,数据出现明显波动但未出现失锁现象,如图 8 所示,说明系统灵敏度较高且稳定性较高。

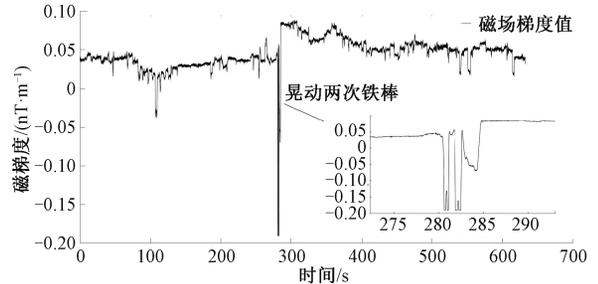


图 8 系统野外静态测试

Fig. 8 Field static test of the system

实验 2) 将 LTS-FTMG 安装在无磁小车上以偏航角为例,无磁小车在地面行进过程中做 90° 和 180° 运动,以其中一个梯度计为例,与偏航角数据进行比对如图 9 所示,当无磁小车偏航角变化时,梯度计数据会发生明显的变化,且与偏航角变化一一对应,说明 LTS-FTMG 系统能够稳定反应姿态的变化,在偏航角连续剧烈变化的条件下,梯度计未出现失锁现象,能够稳定跟踪偏航角的变化,说明 LTS-FTMG 系统动态范围合适,可进行飞行实验测试。

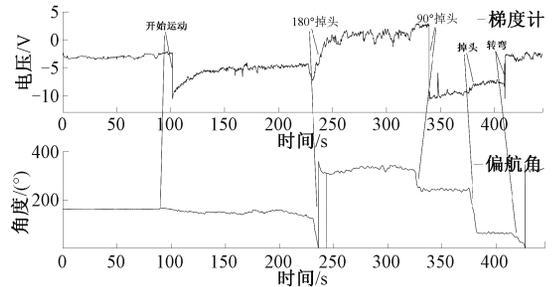


图 9 系统动态实验数据

Fig. 9 The data of system dynamic experiment

### 4 飞行实验

为了验证 LTS-FTMG 系统飞行的稳定性,在江苏丹阳进行了系统重复线和面积积性测线飞行实验。飞行区域内磁场变化较平稳,但也存在人为活动的异常点。

#### 4.1 重复线飞行实验

重复线飞行高度为 800 m,长度为 10 km,直升机以 80 节/h(1 节 = 1.852 km) 的速度匀速飞行,受风向影响,速度和航向会稍有偏差,两条重复线以位置数据进行同步,同方向重复飞行两次。根据 DZ/T 0142—2010 航空磁

测技术规范,在测量飞行条件下,按照式(8)计算重复线的内符合精度,测量结果如表 4 和图 10 所示,从表 4 中可看出各张量分量重复线内符合精度均优于 $\pm 25$  pT/m。从图 10 中可以看出两条重复线各张量分量变化趋势保持一致,尤其是在后半段的波峰变化处吻合度较高。

$$\varepsilon_j = \pm \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{ij}^2} \quad (8)$$

$$\delta_{ij} = F_{ij} - F_i \quad (9)$$

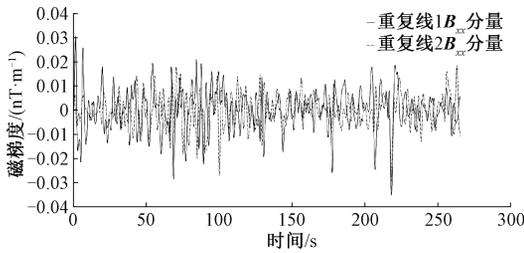
$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^m F_{ij}}{m} \quad (10)$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, m$  为重复线的条数,  $n$  为重复线的段数,  $F_{ij}$  为第  $j$  条重复线第  $i$  点的数据,  $F_i$  为所有重复线在该点的平均值,  $\delta_{ij}$  为第  $j$  条重复线第  $i$  点的数据与所有重复线在该点的平均值的差值,  $\varepsilon_j$  为第  $j$  条重复线的内符合精度。

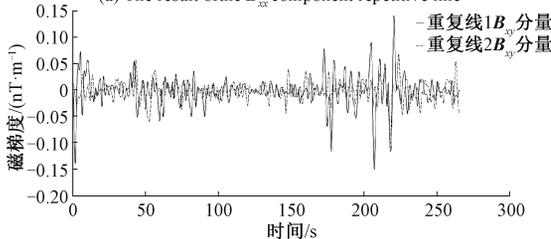
表 4 重复线内符合精度测量表

Table 4 Measurement value of coincidence accuracy in repeated lines

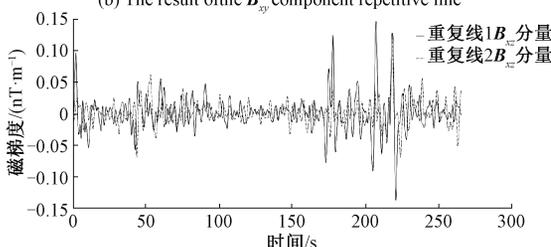
分量	$B_{xx}$	$B_{xy}$	$B_{xz}$	$B_{yy}$	$B_{yz}$	$B_{zz}$
内符合精度/(pT·m <sup>-1</sup> )	9.65	20.21	20.25	11.49	14.20	16.27



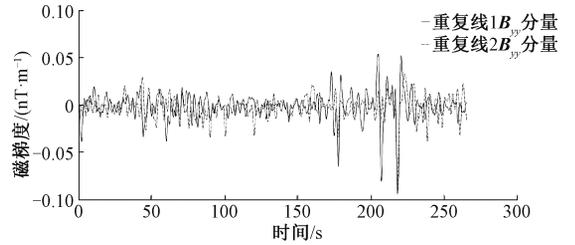
(a)  $B_{xx}$  分量重复线结果  
(a) The result of the  $B_{xx}$  component repetitive line



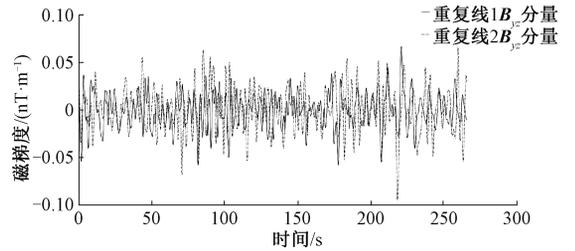
(b)  $B_{xy}$  分量重复线结果  
(b) The result of the  $B_{xy}$  component repetitive line



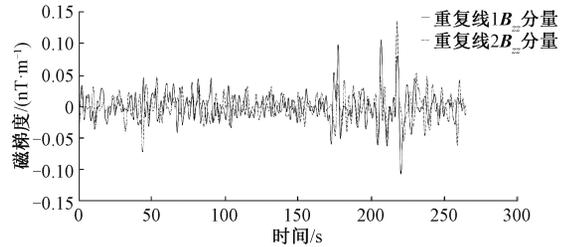
(c)  $B_{xz}$  分量重复线结果  
(c) The result of the  $B_{xz}$  component repetitive line



(d)  $B_{yy}$  分量重复线结果  
(d) The result of the  $B_{yy}$  component repetitive line



(e)  $B_{yz}$  分量重复线结果  
(e) The result of the  $B_{yz}$  component repetitive line



(f)  $B_{zz}$  分量重复线结果  
(f) The result of the  $B_{zz}$  component repetitive line

图 10 重复线各分量结果

Fig. 10 The results of each component of repeated line

### 4.2 测线飞行实验

LTS-FTMG 共飞行 10 条测线,飞行高度为 200 m,测线间距为 500 m,根据 DZ/T0 142—2010 航空磁测技术规范,在飞行条件下,按照式(11)计算每条测线的动态精度指标,测量结果如表 5 所示,从表中可以看出,每条测线动态测量精度均优于 $\pm 30$  pT/m。

表 5 测线动态四阶差分测量结果

Table 5 Dynamic fourth-order difference measurement results of survey line

分量/ (pT·m <sup>-1</sup> )	$B_{xx}$	$B_{xy}$	$B_{xz}$	$B_{yy}$	$B_{yz}$	$B_{zz}$
测线 1	9.12	8.22	9.81	8.25	6.45	8.46
测线 2	8.57	8.99	6.66	9.13	7.57	9.62
测线 3	7.32	15.66	11.66	14.63	6.36	13.86
测线 4	6.98	7.09	8.84	7.97	7.53	7.79
测线 5	8.21	11.60	9.63	10.42	6.24	10.73
测线 6	6.89	14.21	9.63	13.78	7.03	14.16
测线 7	12.88	26.71	18.67	25.77	11.39	25.94
测线 8	10.01	25.93	13.20	22.02	8.79	20.12
测线 9	11.02	25.93	19.78	22.04	12.33	22.65
测线 10	11.18	24.46	19.68	22.36	14.87	25.22

$$S_i = \frac{1}{\sqrt{70}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (B_i - B)^2} \quad (11)$$

$$B_i = T_{i-2} - 4T_{i-1} + 6T_i - 4T_{i+1} + T_{i+2} \quad (12)$$

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i \quad (13)$$

## 5 结 论

在超导磁测领域,国外对我国实施了芯片禁售和关键技术封锁的政策,本文成功研制的 LTS-FTMG 系统在关键技术上实现了国产化,打破了国外对我国的技术封锁。本文介绍了 LTS-FTMG 系统工程样机的组成结构、噪声测试和静、动态实验,并在江苏省开展了飞行实验,实验结果表明 LTS-FTMG 系统工作稳定,各项指标满足《航空磁测技术规范》(DZ/T 0142—2010)的要求,为航磁多参量数据测量、地质解译提供了宝贵的实测数据。

LTS-FTMG 系统进行地面动态范围测试实验,用晃动的铁棒模拟外界磁场变化,定性的分析了梯度计能够稳定工作并测量到外界磁场的变化;利用无磁小车模拟姿态变化对梯度计的影响,定性分析了梯度计对姿态变化的灵敏度和系统稳定性。这两次实验未进行定量分析,一方面是因为定量的磁梯度很难产生,另一方面是因为能够模拟实际飞行姿态和振动变化的多自由度转台自身具有磁性,对梯度计产生磁干扰,很难控制单一变量进行测试。因此,本文对这部分实验采取了定性分析法。

本文 LTS-FTMG 系统经过大量实验的测试和系统优化,液氦使用时间由 2 天提升到 5 天,测控系统电路噪声降低至  $0.9 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ ,在野外飞行条件下,系统长时间稳定可靠工作,未出现失锁现象,飞行数据精度达到  $30 \text{ pT/m}$ ,其系统稳定性和灵敏度得到大大提升,经过技术查新此套系统是国内实用化程度和测量灵敏度最高的一套低温超导航磁测量系统。获得的全张量梯度飞行数据,为后期开展航磁张量数据处理研究工作提供了宝贵的数据来源。

本文研制的 LTS-FTMG 系统也存在不足之处,张量梯度图缺少对比图,如能在系统飞行过程中增加总场和三分量数据测量,将有助于张量梯度图更全面的解译分析。

总之,本文研制的低温超导全张量磁梯度测量系统实用化和工作稳定性较好,有效提高了 LTS-FTMG 系统

实用化水平,为 SQUID 传感器在地球物理领域的应用打下基础。

## 参考文献

- [1] MEYER H G, STOLZ R, CHWALA A. SQUID technology for geophysical exploration [J]. *Physical Status Solidi*, 2010,2(5):1504-1509.
- [2] 丁立,鲁云峰,赵建亭,等. 基于低温电流比较仪的微弱电流放大器设计[J]. *仪器仪表学报*, 2022,43(5): 86-92.  
DING L, LU Y F, ZHAO J T, et al. Design of weak current amplifier based on the cryogenic current comparator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022,43(5):86-92.
- [3] CLEM T R, FROELICH M C, OVENVAY D J, et al. Advances in sensor development and demonstration of superconducting gradiometers for mobile operation [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 1997, 7(2):3287-3293.
- [4] STOLZ R, SCHMELZ M, ZAKOSARENKO V, et al. Superconducting sensors and methods in geophysical applications [J]. *Superconductor Science and Technology*, 2021, 34(3): 033001.
- [5] 申茂冬. 高温超导全张量磁梯度测量技术研究[D]. 长春:吉林大学. 2017.  
SHEN M D. Research on high temperature superconducting full tensor magnetic gradient measurement technology[D]. Changchun: JiLin University, 2017.
- [6] SCHMIDT P W, CLARK D A. Advantages of measuring the magnetic gradient tensor [J]. *Preview*, 2000, 85: 26-30.
- [7] SCHMIDT P W, CLARK D A. The magnetic gradient tensor: Its properties and uses in source characterization [J]. *The Leading Edge*, 2006,25(1):75-78.
- [8] 潘琦,刘得军,程星,等. 磁力梯度测量技术的新发展 [J]. *地球物理学进展*, 2018,33(6):2568-2574.  
PAN Q, LIU D J, CHENG X, et al. New development of magnetic gradient measurement technique [J]. *Progress of Geophysics*, 2018,33(6):2568-2574.
- [9] SMITH D V, BRACKEN R E. Field experiments with the tensor magnetic gradiometer system for UXO surveys a case history [C]. SEG Int'l Exposition and 74th Annual

- Meeting, 2004, 23:806.
- [10] JEFFREY G T, WILLIAM E D. Initial design and testing of a full-tensor airborne SQUID magnetometer for detection of unexploded ordnance [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2004, 23:798-801.
- [11] BICK M, LESLIE K E, BINKS R A, et al. Axial high-temperature superconducting gradiometer with a flexible flux transformer [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(26):5347-5349.
- [12] SCHMIDT P W, CLARK D A, LESLIE K E, et al. GETMAG-A SQUID magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration [J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(4):297-305.
- [13] STOLZ R, ZAKOSARENKO V, SCHULZ M, et al. Magnetic full tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications [J]. Leading Edge, 2006, 25(2):178-180.
- [14] 吴佩霖, 黄玲, 张群英, 等. 航磁补偿系统延迟偏差补偿方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(6):1447-1457.
- WU P L, HUANG L, ZHANG Q Y, et al. Aeromagnetic compensation method for the interference magnetic fields caused by system delay [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6):1447-1457.
- [15] 赵建扬, 林春生, 贾文抖, 等. 用于超导磁梯度测量的误差补偿方法 [J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(5):41-45.
- ZHAO J Y, LIN CH SH, JIA W D, et al. Error compensation method for superconducting magnetic gradient measurement [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(5):41-45.
- [16] 王士良, 邱隆清, 王永良, 等. 航空超导全张量磁梯度仪的串扰研究 [J]. 低温物理学报, 2017, 39(1):36-40.
- WANG SH L, QIU L Q, WANG Y L, et al. Study on crosstalk of an airborne magnetic full-tensor SQUID gradiometer system [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2017, 39(1):36-40.
- [17] SUI Y Y, KANG P, CHENG D F, et al. Analysis and simulation of flight effects on an airborne magnetic gradient tensor measurement system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2015, 64(10):2657-2665.
- [18] 刘建英, 郭子祺, 乔彦超, 等. 基于 NI cRIO 的航空超导全张量磁梯度数据采集系统及方法: ZL 201910162456.0 [P]. 2020-12-04.
- LIU J Y, GUO Z Q, QIAO Y CH, et al. Data acquisition system and method of aeronautical superconducting full tensor magnetic gradient based on NI cRIO: ZL 201910162456.0 [P]. 2020-12-04.
- [19] TIAN Y J, WANG T S, CHEN K, et al. Flip-chip type high-Tc gradiometer for bio-magnetic measurements in unshielded environment [J]. Science in China, 2000, 43(1):82-87.
- [20] 赵静. 高温超导磁梯度仪关键技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- ZHAO J. Study on key technology for HTS SQUID magnetic gradiometer [D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [21] 郭华, 王明, 岳良广, 等. 吊舱式高温超导全张量磁梯度测量系统研发与应用研究 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(1):360-370.
- GUO H, WANG M, YUE L G, et al. Development and application of a full tensor magnetic gradient measurement system for the cabin HTS [J]. Chinese Journal of Geophys, 2022, 65(1):360-370.
- [22] 荣亮亮, 张树林, 武俊, 等. 航空低温超导全张量磁梯度测量系统研发与应用 [C]. 第十三届中国国际地球电磁学术研讨会, 2017:179-187.
- RONG L L, ZHANG SH L, WU J, et al. Development and application of full tensor magnetic gradient measurement system for aviation cryogenic superconductor [C]. The 13th China International Symposium on Earth Electromagnetism, 2017:179-187.
- [23] 修春晓. 航磁全张量梯度数据软补偿及正反演方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- XIU CH X. Research on soft compensation and forward and inverse method of aeromagnetic full tensor gradient data [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [24] GUO Z Q, JI S X, QIAO Y C, et al. A noise suppression method for superconducting full tensor aeromagnetic gradient measurement data [C]. The International Symposium on Deep Earth Exploration and

Practices, 2018, 93(s1): 367-368.

- [25] 中国国土资源航空物探遥感中心. 航空磁测技术规范: DZ/T 0142-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center. Technical specification for aeromagnetic survey: DZ/T 0142-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

## 作者简介



**刘建英** (通信作者), 2010 年于徐州师范大学获得学士学位, 2013 年于北京理工大学获得硕士学位, 现为中科院空天信息创新研究院助理研究员, 主要研究方向为航空磁场探测。

E-mail: liujy201787@aircas.ac.cn

**Liu Jianying** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Xuzhou Normal University in 2010, and received her M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2013. She is currently an assistant researcher at the Aerospace Information Innovation Research Institute of the Chinese Academy of

Sciences. Her main research interest includes the detection of airborne magnetic fields.



**郭华**, 2005 年于吉林大学获得学士学位, 2007 年于吉林大学获得硕士学位, 2016 年于中国地质大学(北京)获得博士学位, 现为中国自然资源航空物探遥感中心正高级工程师、博士生导师, 主要研究方向为航空地球物理数据处理与解释研究、前沿航空地球物理装备系统研制工作。

E-mail: hyguohua@126.com

**Guo Hua** received his B. Sc. degree from Jilin University in 2005, received his M. Sc. degree from Jilin University in 2007, and received his Ph. D. degree from China University of Geosciences Beijing in 2016. He is currently a senior engineer and a Ph. D. advisor at China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center. His main research interests include the development of cutting-edge equipment in geophysics and data processing and interpretation.