文章编号: 1007 - 4252(2022)02 - 0002 - 127 DOI: 10.20027/j.gncq.2022.0013

超导量子干涉器件及其地磁探测应用进展

李海盛[1,2,3],邱隆清[1,2,3,*],张国峰[1,2,3],王 硕[1,2,3],伍 俊[1,2,3],裴易峰[1,2],
陶 泉[1,2,3],倪 志[1,2,3],董 慧[1,2,3],荣亮亮[1,2,3]

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200050; 2. 中国科学院超导电子学卓越创新中心,上海 200050; 3. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 超导量子干涉器件(SQUID)是一种基于约瑟夫森隧道效应和磁通量子化效应的宏观量子化高灵敏度磁探测器,其中低温 SQUID 噪声可达 fT/Hz$^{1/2}$,在基础研究、材料科学、地球物理、天体物理、生命科学等领域都有非常广泛的应用。地球磁场可以近似为一个磁偶极子,但是地球磁场的微弱波动包含着丰富的信息,可以反映太阳风活动、地球电离层活动乃至地震先兆等信息,具有巨大的研究价值。本文系统回顾了国内外使用 SQUID 传感器进行地磁观测的研究进展,并讨论了中科院上海微系统所进行的 SQUID 系统观测地磁长时间波动及舒曼共振信号的探测结果。最后,对 SQUID 地磁观测的前景进行了展望。

关键词: 超导量子干涉器件; 地球磁场; 低噪声
中图分类号: O511+.9; P318.6 **文献标志码:** A

Superconducting quantum interference device and its application in geomagnetic detection

LI Hai-sheng[1,2,3], QIU Long-qing[1,2,3,*], ZHANG Guo-feng[1,2,3], WANG Shuo[1,2,3], WU Jun[1,2,3], PEI Yi-feng[1,2], TAO Quan[1,2,3], NI Zhi[1,2,3], DONG Hui[1,2,3], RONG Liang-liang[1,2,3]

(1. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Center for Excellence in Superconducting Electronics, Shanghai 200050, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Superconducting quantum interference device (SQUID) is a macro quantized high-sensitivity magnetic detector based on Josephson tunnel effect and flux quantization effect. The low-temperature squid noise can reach the order of fT/Hz$^{1/2}$. It is widely used in basic research, material science, geophysics, astrophysics, life science and other fields. The earth's magnetic field can be approximated as a magnetic dipole, but the weak fluctuation of the earth's magnetic field contains rich information, which

收稿日期: 2022-01-25; **修订日期:** 2022-02-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61873256).
作者简介: 李海盛(1996-),男,硕士,主要研究方向为 SQUID 地磁探测应用(E-mail: lhs@mail.sim.ac.cn).
通信作者: 邱隆清(1979-),男,博士,副研究员,主要研究方向为地球物理勘探应用(E-mail: lq.qiu@mail.sim.ac.cn).

can reflect the solar wind activity, the earth's ionospheric activity and even earthquake precursors, and has great research value. This paper systematically reviews the research progress of geomagnetic observation using SQUID sensor at home and abroad, and discusses the detection results of geomagnetic long-time fluctuation and Schumann resonance signal observed by SQUID system carried out by Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences. Finally, a brief prospect of SQUID-based geomagnetic observation is prospected.

Key words: Superconducting quantum interference device; Earth's magnetic field; Low noise

0 引言

数千年来人们对地球磁场的观察与研究从未停止,尤其自太空时代开始以来,对地球磁场的持续观测已被认为是更好地了解我们的星球、地球环境和与之相关的自然灾害的一项主要任务。由于太阳粒子在电离层或地球表面的强烈爆发而产生的磁暴可能会对卫星,特别是通信卫星或位于地球上的电子设备造成一些重大的实际影响。对磁场的观测对于更好地了解空间天气和自然灾害至关重要,而且可能有助于对自然灾害的早期预警。为了获得更丰富更精确的地磁信息,人们不断发明并改进观测仪器,提升观测手段。目前地磁观测常用的传感器是磁通门计、感应线圈磁力计、质子旋进式磁力仪等[1]。随着微电子技术的蓬勃发展,探测仪器种类越来越多,探测手段也变得多种多样,从地面磁力测量,到海洋的磁力探测,再到卫星磁力观测。与此同时,整个观测过程正朝着数字化、自动化和智能化全方位发展。

虽然测量方式越来越丰富,但是大部分时候地磁信号很微弱,要在复杂的电磁环境干扰下快速鉴别出这些弱信号还需要更先进的监测手段。超导量子干涉器件(SQUID)作为高灵敏度磁传感器,已在地磁探测中发挥了重要作用[2]。本文首先简要介绍地磁信号的特征及其观测意义,随后分析 SQUID 的原理及其关键参数,接着总结了几十年来全世界各研究机构或团队开发并应用该传感器监测地磁活动的研究进展,并展示了我们课题组研制的 SQUID 系统所取得的成果,最后探讨了将 SQUID 应用在地磁探测领域的发展前景。

1 地磁信息概述

人类对于地球磁场存在的认识来源已久,始于天然磁石和磁针的指极性。从空间尺度将地球磁场分类,它包括了相对稳定的内源场和扰动的外源场。内源场由地核偶极子磁场和岩石圈磁场组成,地核偶极子磁场作为主磁场,是地球内核的热量和物质流动驱动了外核中液态铁的对流,在地球自转的作用下涡电流持续地产生的磁场。外源场主要由地表以上 60~1 000 km 的电离层、1 000 km 的磁层向外延伸到磁层顶,以及耦合电离层和磁层的电流构成[3]。地球磁场从时间(频率)尺度上划分,跨度高达二十个数量级,如图 1 所示,长周期变化的磁场包含了数百万年变化的地核过程、数百年地球磁偶极矩衰减、周期 11 年的太阳黑子活动等,短周期的磁场变化主要包含磁层亚暴、地磁脉动(Pc~Pi),阿尔芬波(IAR),闪电雷暴活动等[4-5]。

地磁场中包含着如此丰富的物理变化过程,观察地磁场活动有利于了解地球演化、自然灾害、地质构造的机理,也能够为气象观测、灾害预警、寻找矿产资源等应用探索做出贡献。

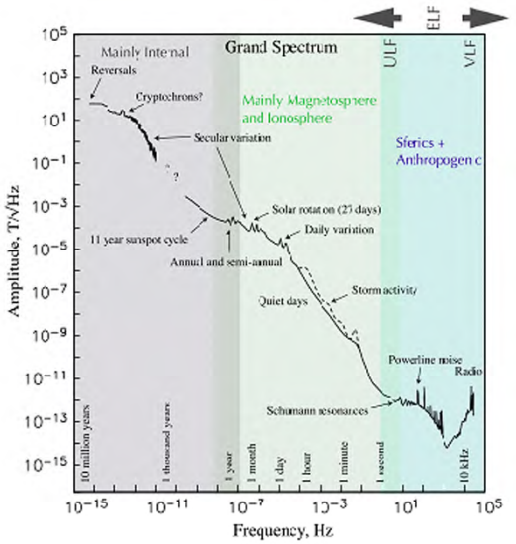

图 1 地磁变化的幅度谱

Fig. 1 Amplitude spectrum of geomagnetic variations

2　SQUID 原理及关键参数

自 1911 年 Onnes 发现汞的超导特性就开启了超导物理研究的大门[6]，1964 年英国物理学家布赖恩·约瑟夫森[7]预言了超导弱连接的隧穿，实验上还观测到一个超导环中的两个约瑟夫森结的干涉效应，还表明具有两个约瑟夫森结的电路中的临界电流是穿过环路磁通量的周期函数，其周期等于通量量子 Φ_0（约为 2.068×10^{-15} Wb）。这些研究得出的结论很快被用于研发 SQUID 器件，SQUID 的运行本质上就是基于超导体的两个效应特性：闭合环路的磁通量量子化和约瑟夫森效应。从器件结构可以分为两种类型：（1）直流 SQUID，简称 DC-SQUID，使用直流偏置，包含两个约瑟夫森结（如图 2 所示）[8]；（2）射频 SQUID，简称 RF-SQUID，包含一个约瑟夫森结，该超导环与 LC 谐振回路耦合形成单结器件，优点是只需要一个结制备相对简单。从器件的工作温度分类，可以分为高温超导 SQUID（工作于液氮温度）和低温超导 SQUID（工作于液氦温度）。相比于高温超导 SQUID，噪声更低（10^{-15} T/$\sqrt{\text{Hz}}$，即 fT/$\sqrt{\text{Hz}}$）、灵敏度更高的低温超导 SQUID（主要是 DC-SQUID）在地磁探测领域更受欢迎。

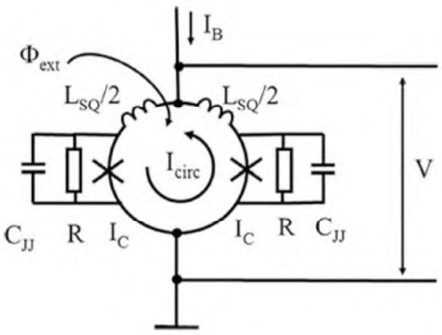

图 2　DC-SQUID 结构图

Fig. 2 The structure of DC-SQUID

以 DC-SQUID 为例，在恒流偏置下，SQUID 电压随磁场响应曲线呈现周期非线性特点，因此 SQUID 必须与读出电路配合工作在磁通锁定环（Flux-Locked Loop，简写作 FLL）方式下才能构成磁传感器，实现磁通-电压线性转换。在 FLL 中，除了 SQUID 的本征噪声外，FLL 的噪声主要来自读出电路的电压噪声 $\sqrt{S_V}$，其贡献用磁通噪声来表征，即 $\sqrt{S_\Phi}=\sqrt{S_V}/(\partial V/\partial\Phi)$，其中 $\partial V/\partial\Phi$ 为 SQUID 工作点处磁通-电压转换系数，决定于 SQUID 磁通-电压调制曲线的斜率。一般情况下，SQUID 动态电阻仅有几欧姆，电压调制信号也只有几十微伏，其噪声远低于室温半导体放大器的噪声，易造成 SQUID 应用中普遍存在的阻抗（噪声）匹配问题。为了实现 SQUID 与读出电路前置放大器之间的噪声匹配，读出电路已经先后发展出磁通调制[9]及应用于直接读出的 APF[10]、NC[11]、DROS[12]、SBC[13]等提高磁通-电压传输率抑制前置放大器噪声的方案。

常见的低温 SQUID 磁测系统一般由 SQUID 芯片、直流电源、输入线圈、读出电路（滤波器、放大器、积分器）、低温恒温器、液氦等组成。相比于地磁观测常用的磁通门磁力计，它具有更低的噪声，有利于观测非常微弱的地磁信号；相比于感应线圈磁力仪，它能够在 DC～MHz 的工作频率范围内具有较高且恒定的灵敏度，相当于在宽频率范围内始终能够以高信噪比监测地球磁场变化。

相较于 SQUID 在磁屏蔽环境的应用，在非屏蔽地磁环境中应用时将面临更多挑战：（1）SQUID 传感器的摆率是磁通锁相环跟踪磁通变化而不失锁的最大速率，一般来说磁屏蔽室中所需要的摆率很小，通常<10 Φ_0/s。而在非屏蔽地磁环境中，为了保证系统能稳定工作而不失锁，通常需要系统摆率达 MΦ_0/s 甚至更高。（2）由于野外环境中射频信号较复杂，会导致 SQUID 输出漂移，产生较高的噪声等问题。为了获得良好的射频屏蔽效果又不额外增加噪声，通常选用较薄的超级绝缘薄膜作为屏蔽层。（3）由于 SQUID 是高灵敏度矢量传感器，在较强的地磁背景下，微小的姿态变化（平移或旋转）都可能提升系统噪声。因此，做好系统的减振防护在地磁观测中尤为重要。

3　国内外研究进展

3.1　早期研究进展

将 SQUID 应用于地磁探测具有悠久的历史，在 SQUID 发明不久，Zimmerman 的团队[14]就于 1973 年采用 SQUID 磁力计对地球磁场的变化进行观测研究，并成功观测到电离层、磁层引起的磁波动以及地磁脉动现象。1974 年 Fraser-Smith 和 Buxton[15]发挥 SQUID 的低频低噪声优势，将 SQUID 传感器放

在混凝土减振平台上，实现了 0.1～14 Hz 频段地磁活动的观测，该范围内的频谱如图 3 所示，填补了低于 1 Hz 和高于 7 Hz 地磁背景测量的空白。1988 年 Nichols 等人[16]采用 SQUID 阵列系统地研究了地磁场的低频信号特征及地磁空间相关性。如图 4 所示，他们为了减小系统振动，精心设计了减振平台及防风罩等，同时，还在无磁杜瓦内外分别放置了大量的低温及常温倾角仪和温度计等，同步检测 SQUID 的磁信号、倾角变化信号及温度变化等信号。实验比较了系统间距从 1～3 000 m 内多个间距的地磁空间相关性。结果表明，在几分钟内，不同测试点间磁场变化差异的标准差可达 0.5 pT，通过角度校正、倾角校正等数据处理后，不同测点间的相关性能提升 71 dB，为后续 SQUID 地磁观测及相关研究奠定了良好的基础。后来可能是因为在露天环境下使用 SQUID 进行长期观测难度较大以及液氦成本高等问题，使得户外 SQUID 地磁监测工作一度被中断。

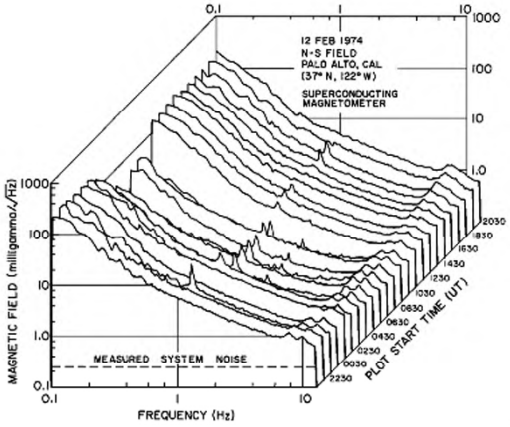

图 3 1974 年 2 月 11 日到 12 日期间 24 h 内 0.1～14 Hz 地磁活动[15]

Fig. 3 Complete 24-hour display of geomagnetic activity in the frequency range 0.1～14 Hz for February 11-12, 1974[15]

3.2 法国 LSBB 实验室

位于法国东南部的低噪声跨学科地下科技实验室(Laboratoire Souterrain a Bas Bruit，简称 LSBB)，由战略核防御的发射控制中心改造而成。该实验室位于地下 518 m，具备优越的减振、电磁波屏蔽等性能，因而科学家们在此地开展了大量的跨学科研究，在重力场、机械波、暗物质探索、脑电图、生物学、电磁、地质和水文方面均有诸多研究[17-23]。

Waysand 等人在实验室内安装了一个金属胶

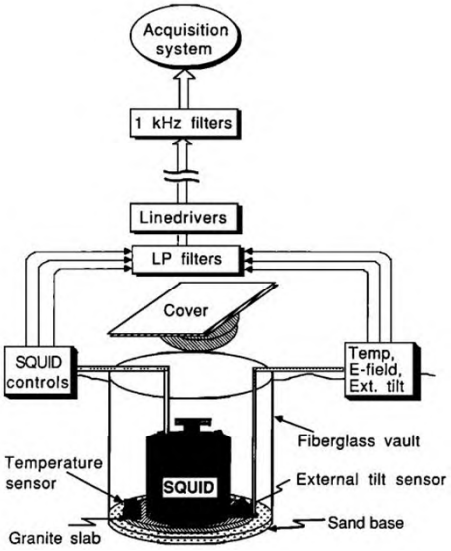

图 4 磁力计的配置[16]

Fig. 4 Magnetometer configuration[16]

囊，这种屏蔽使其成为不同于零高斯腔的低通滤波器，相当于 40 Hz 低通滤波器[24]，体积为 1 268 m^3。自 2001 年以来，在地下的主通道处一直运行着一个宽带地下地震台阵，同时实验室内放置了一个能够长时间运行的低温 SQUID。为了进一步减小振动的影响，Schultze 等人[25]将三轴 SQUID 放入胶囊内，通过沙箱将系统与地面隔离，如图 5 所示，系统噪声实现了 2 fT/$\sqrt{\text{Hz}}$，观察到了地磁信号中的一阶舒曼共振(f = 8 Hz)和海浪信号(f = 0.6 Hz)。该金属腔为 SQUID 系统提供一个良好屏蔽的同时，也将地球磁场的幅值降为约外界磁场的 1/6，这是该地下实验室的一个小小的遗憾。

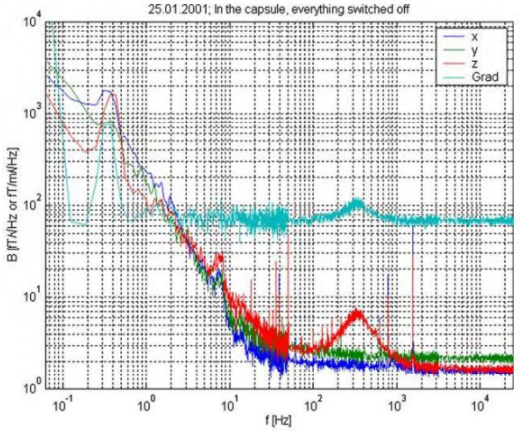

图 5 胶囊内的 3 轴磁噪声频谱[25]

Fig. 5 3-axes magnetic noise spectrum within the cabin[25]

同时，LSBB 也开展了 SQUID 磁信号与地震仪信号的相关性实验，获得了高度相关的结果。当地震发生时，会释放两种类型的地震波。p 波从原点径向振荡，而 S 波垂直于传播方向振荡。p 波与大气和电离层的耦合很弱，但会对离子运动造成足够大的干扰，以至于被几千公里外的 SQUID 捕获。2003 年 Gaffet 等人[26] 首次结合 3D 地震仪阵列(图 6)，研究了地震期间观测得到的磁场与机械波的相关性，用于分析地震波引起的扰动。

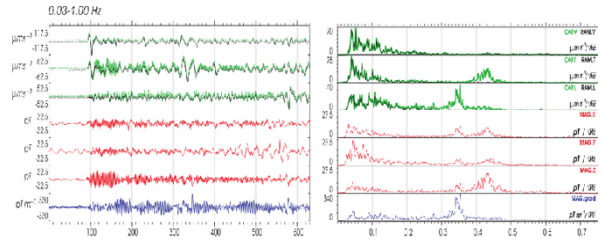

图 6　左: 地震仪、SQUID 磁强计、梯度计原始时域信号; 右: 左图推导出来的功率谱密度[26]

Fig. 6 Left: Seismograph, SQUID magnetometer, gradiometer raw time domain signals; Right: Power spectral density derived from the left figure [26]

2013 年 Henry 等人[27] 在地磁活动较弱时，采用两套三轴 SQUID 系统进行长时间同步采集地磁波动信号，结果如图 7 所示，两套系统在 72 h 内实现了亚 nT 级跟踪磁信号的水平。

除了两套 SQUID 系统一致性的测试外，LSBB 还使用 SQUID 分析了地磁场在极低频段的信号特征。如图 8 所示，Waysand 等人[28] 分析了在地震平静时期 SQUID 在 0.2～1 mHz 的信号，实验发现激发频率正好与地球的初步地球参考模型的频谱对应，证明 SQUID 观察到了极低频出现的电离层响应[25]。

之后 LSBB 实验室还开展了 SQUID 地磁观测领域的国际合作研究。在 2013 年，法国 LSBB 和南非国家航天局(SANSA) 的 Thabang 等人[29] 合作，在南非研究高温 SQUID 系统是否满足观察空间天气中磁暴的条件。他们将系统放在室内的混凝土柱子上，柱子底部是压缩沙子，达到双重隔振的效果。经观测发现在某场小型磁暴时，SQUID 与磁通门时域信号具有极高的相关性(图 9)，证明 SQUID 具有应用于空间天气观测的潜力。

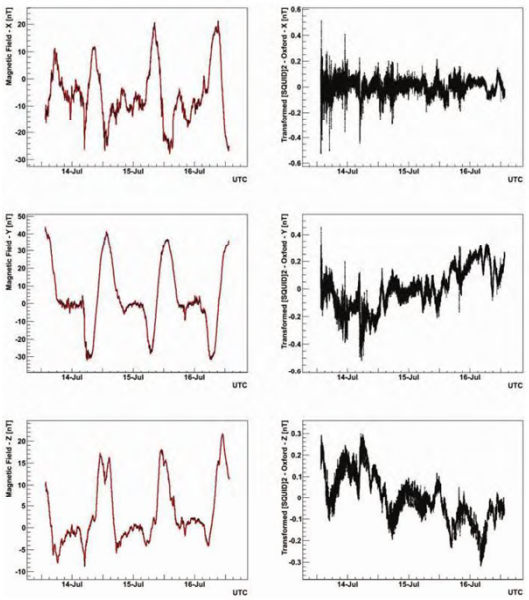

图 7　两套 SQUID 系统在 LSBB 胶囊(顶部: NS，中间: EW，底部: Z) 中 72 h 记录的磁测信号(左) 及其差值(右)[27]

Fig. 7 Magnetometry signals recorded in the LSBB Capsule (Top: NS, middle: EW, bottom: Z) over a 72 h period, The right hand plot shows the difference between the two lines [27]

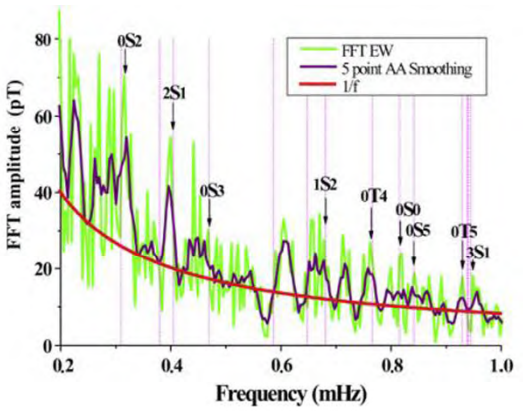

图 8　SQUID 测得的峰值与地球正常模式相比[28]

Fig. 8 Peak measured by SQUID compared to Earth´s normal model [28]

3.3　德国 IPHT 研究所

德国莱布尼兹光子技术研究所(Leibniz-IPHT) 坐落于"光学之城"耶拿，是德国莱布尼茨学会的下属研究机构，该研究所长期开展 SQUID 器件[30-33]、SQUID 读出电路[34-35] 的研发，并基于 SQUID 器件在地球物理勘探领域开展了多项引领性的工作，如超导全张量航磁[36]、超导瞬变电磁法(TEM)[37] 等。

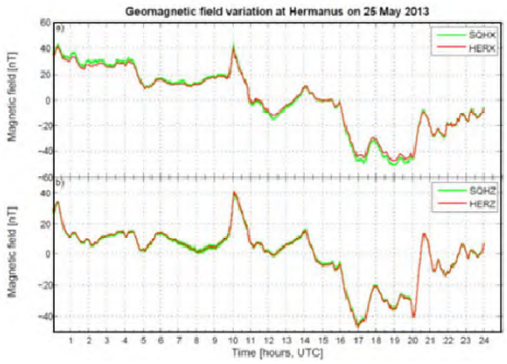

图 9　SQUID 与磁通门在 2013 年 5 月 25 日观察到的小型磁暴[29]

Fig. 9 A small magnetic storm observed by SQUID and fluxgate on May 25, 2013 [29]

在 SQUID 地磁探测领域，Chwala 等人[38] 利用地球磁场优越的空间相关性，采用两套三轴 SQUID 系统评估系统的本征噪声。为了降低风噪的影响，他们将两套间隔 2 m 的系统完全埋入地下，图 10 所示为系统在非屏蔽环境下测得的噪声，两套系统对应方向具有良好的相关性。如图 11 所示，他们通过时域、频域去噪处理，可实现地磁环境下系统本征噪声的评估，噪声低至 1.2～1.5 fT/$\sqrt{\text{Hz}}$。

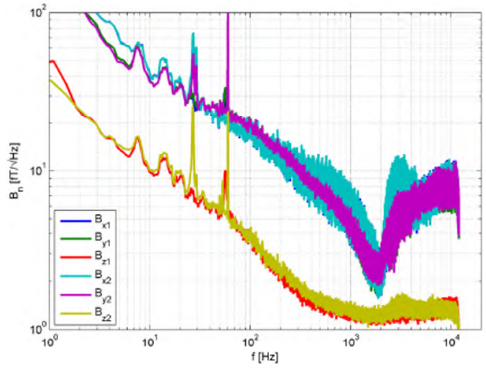

图 10　两套三轴 SQUID 系统的在非屏蔽环境下的噪声[38]

Fig. 10 Noise of two triaxial SQUID systems in unshielded environment [38]

3.4　日本

日本是一个地震高发地区，在地震预测方面做了大量的工作。Kasai 等人[39] 利用了高温 SQUID 系统在 2001～2002 年期间研究了火山、地震等地壳活动带来的超低频(ULF)波异常现象，系统置于帐篷内以降低风噪。如图 12 和 13 所示，实验观测到了活火山附近磁平静和活跃时的信号特征。

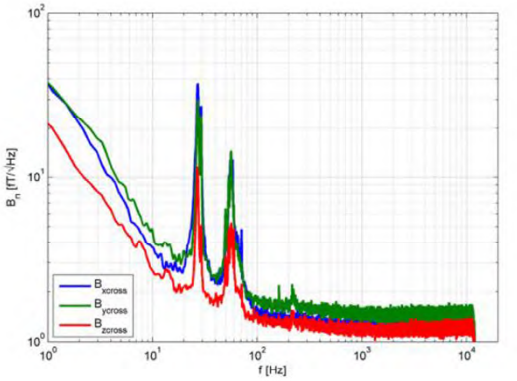

图 11　通过频域中的互相关估计 SQUID 系统固有噪声[38]

Fig. 11 Estimated intrinsic noise of SQUID system by cross-correlation in the frequency domain [38]

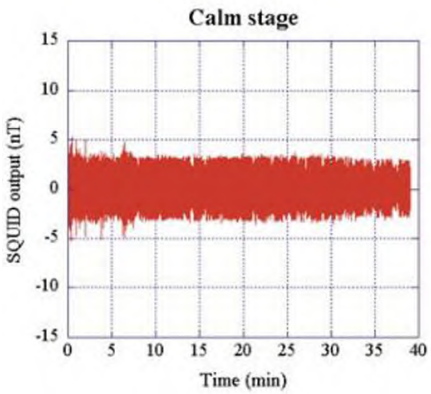

图 12　平静时期的 SQUID 时域信号[39]

Fig. 12 SQUID time domain signal during quiet period [39]

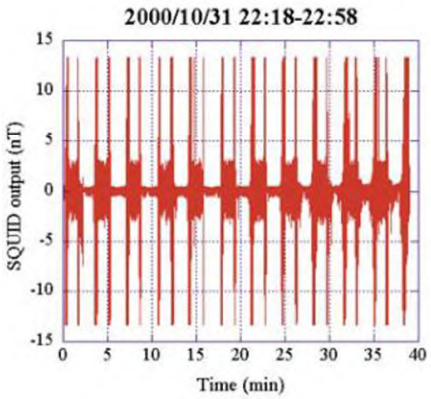

图 13　磁异常时期的 SQUID 时域信号，超量程的信号被截断[39]

Fig. 13 SQUID time domain signal during magnetic anomaly, over-range signal is truncated [39]

2017～2018 年 Kawai 等人[40-41]采用低温超导 SQUID 系统对地球磁场的舒曼谐振及地磁脉动现象进行了研究。他们在野外将 SQUID 系统放在 35 cm 厚的混凝土上然后罩上塑料盒以降低振动及风噪的影响。同时，为了屏蔽外界的高频信号，他们采用不同厚度的铜箔包覆 SQUID 器件，形成低频滤波器。经过优化，选取了 0.08 mm 厚度的铜箔，最终系统噪声约为 25 fT/$\sqrt{\text{Hz}}$，带宽约为 1 kHz，满足舒曼谐振及地磁脉动观测的需求。测试结果如图 14 所示，在东西(H)、南北(D)方向清楚地记录到一至六阶舒曼谐振，而竖直方向该信号不明显; 同时选择 12 h 数据进行时频分析，结果如图 15 所示，可明显识别一阶舒曼共振，Pc1 地磁脉动(f = 2 Hz)[40]，阿尔芬波的高次谐波[41]随时间变化规律。

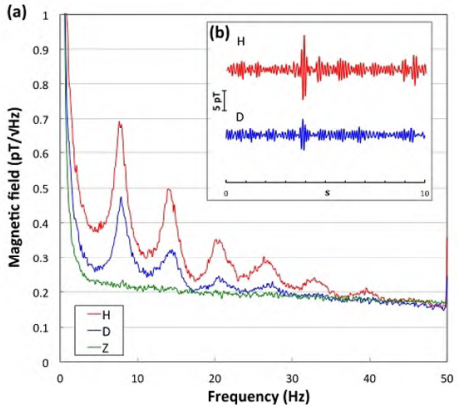

图 14　(a) 使用 1 h 数据快速傅里叶变换得到的频谱; (b) 10 s 5～10 Hz 带通滤波的时域波形[40]

Fig. 14 (a) Spectrum obtained by fast Fourier transforming 1 h of data; (b) Time domain waveform of 5～10 Hz bandpass filtered for 10 seconds[40]

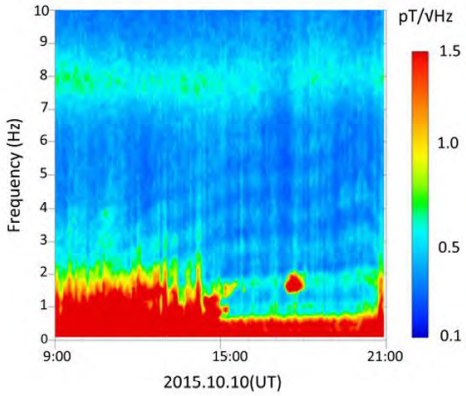

图 15　9:00～21:00 水平信号 0.1 Hz 高通滤波后的时频图[40]

Fig. 15 The Dynamic spectra after 0.1 Hz high-pass filtering of the horizontal signal from 9:00 to 21:00[40]

3.5　国内

国内使用 SQUID 进行应用探索的相关研究起步较晚，早期廊坊物探所(地矿部物化探研究所)使用高温超导 SQUID 进行大地电磁测深及超导瞬变电磁探测的应用研究[42-43]。自 2005 年起中国科学院上海微系统与信息技术研究所超导实验室(现为中国科学院超导电子学卓越创新中心)开始超导电子学的研究，其中低温超导 SQUID 器件及应用是重要方向之一。目前已实现从设计到工艺制备再到读出电路的整体研制能力[44-48]，例如已成功研制出高灵敏度 SQUID 磁强计及平面梯度计[49-51]，并成功应用于地球物理勘探[52-53]、极低场磁共振[54-59]、生物磁成像等方面[60-62]。

近年来，我们也开展了基于 SQUID 的地磁探测应用研究。实验中我们使用了本课题组自主研制的小结低温 SQUID 芯片，芯片灵敏度为 $\partial B/\partial\varphi_0 = 1.0nT/\varphi_0$，三个芯片使用螺丝固定在环氧模块上。无磁杜瓦里灌入液氦，两两正交组成的三轴磁强计用于探测地磁场变化，无磁杜瓦外层包裹着多层超级绝缘，搭配低噪声的磁通锁相放大电路和 NI 9250 型 24 位低噪声采集系统记录信号。经测试，系统带宽约为 100 kHz，摆率约为 2 mT/s，系统在淮南地下 848 m 的矿道内进行了静态观测，白噪声能够低至 3 fT/$\sqrt{\text{Hz}}$。

后来，我们使用该 SQUID 系统在上海近郊开展地磁探测实验，为了减小振动的影响将系统半埋于地下。图 16 显示了 19:00 到次日 7:00 三轴 SQUID 探测到的磁场变化，从波形上可以明显看出该地夜间 1:00～5:00 这四个小时内人文干扰很小; 对信号进行时频分析，以南北方向为例，观察到了一至七阶舒曼谐振及其随时间的变化规律(图 17)。

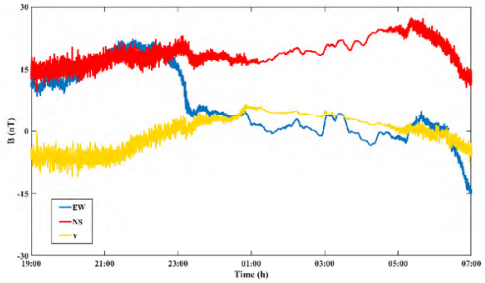

图 16　SQUID 测得的三个方向 19:00～次日 7:00 的时域信号

Fig. 16 Time domain signals from 19:00 to 7:00 in three directions measured by SQUID

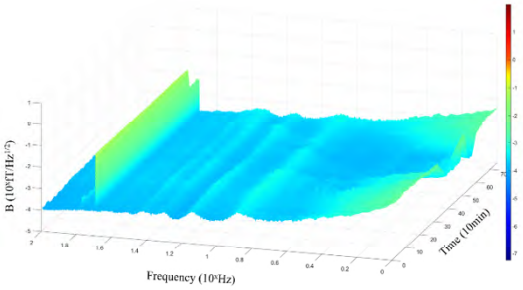

图 17 地磁 NS 分量 12 h 内的三维时频图

Fig. 17 3-D time-frequency diagram of NS component of geomagnetic field within 12 hours

4 总结

从 20 世纪 SQUID 发明至今，该传感器在地磁观测领域的可行性得到了逐步验证，同时许多研究使得低温 SQUID 能够在自然环境下更加稳定地长时间运行，同时保持了低噪声的性能，凸显了 SQUID 的优势。最后，使用我们自主研制的低温超导三轴 SQUID 系统在野外进行长时间地磁监测，成功观察到了舒曼共振等地磁信号。鉴于地球磁场中含有大量低频信息，也就意味着信号波长极长，在全球范围内均有着很好的相关性，因此，开展全球性联合观测将有力地推动本研究领域的发展。

参考文献:

[1] 王晓美. 地磁场相对变化观测技术研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2019.

[2] Clem T R, Foley C P, Keene M N. SQUIDs for Geophysical Survey and Magnetic Anomaly Detection [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 481-543.

[3] 徐文耀. 地球电磁现象物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.

[4] Mandea M, Chambodut A. Geomagnetic Field Processes and Their Implications for Space Weather [J]. Surveys in Geophysics, 2020, 41: 1611-1627.

[5] Constable C. Earth's Electromagnetic Environment [J]. Surveys in Geophysics, 2016, 37: 24-45.

[6] Onnes H K. The superconductivity of mercury [J]. Comuns Kamerlingh Onnes Lab Univ Leiden, 1911: 122-124.

[7] Jaklevic R C, Silver A H, Lambe J, et al. Quantum Interference Effects in Josephson Tunneling [J]. Physical Review Letters, 1964, 12(7): 159-&.

[8] Schmelz M, Stolz R. Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) Magnetometers [J]. Springer International Publishing, 2017, 19: 279-311.

[9] Forgacs R L, Warnick A. Digital-Analog Magnetometer Utilizing Superconducting Sensor [J]. Review of Scientific Instruments, 1967, 38(2): 214-220.

[10] Drung D. Advanced SQUID read-out electronics [J]. Squid Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications, 1996, 329: 63-116.

[11] Seppä H. Dc-Squid Electronics Based on Adaptive Noise Cancellation and a High Open-Loop Gain Controller [J]. Superconducting Devices and Their Applications, 1993, 64: 346-350.

[12] Lee Y H, Kim, et al. 3-Channel Double Relaxation Oscillation Squid Magnetometer System with Simple Readout Electronics [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1995, 5(2), 2156-2159.

[13] Xie X M, Zhang Y, Wang H W. A voltage biased superconducting quantum interference device bootstrap circuit [J]. Superconductor Science & Technology, 2010, 23(6): 065016.

[14] Zimmerman J E, Campbell W H. Tests of cryogenic SQUID for geomagnetic field measurements. Final report [J]. Geophysics, 1975, 40(2): 269-284.

[15] Fraser-Smith A C, Buxton J L. Superconducting magnetometer measurements of geomagnetic activity in the 0.1 to 14Hz frequency range [J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(22): 3141-3147.

[16] Nichols E A, Morrison H F, Clarke J. Signals and Noise in Measurements of Low-Frequency Geomagnetic Fields [J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(B11): 13743-13754.

[17] Junca J, Bertoldi A, Sabulsky D O, et al. Characterizing Earth gravity field fluctuations with the MIGA antenna for future Gravitational Wave detectors [J]. Physical Review D, 2019, 99(10): 104026.

[18] Bouare H, Mesgouez A, Lefeuve-Mesgouez G. Contribution to the modeling and the mechanical characterization of the subsoil in the LSBB environent [J]. E3S Web of Conferences, 2019, 88: 06001.

[19] Derode B, Guglielmi Y, Cappa F, et al. Seismicity and hydromechanical behavior of a fractured porous rock under a high pressure fluid injection [J]. EDP Sciences, 2011, 01003.

[20] Girard T A, Felizardo M, Fernandes A C, et al. Neutron and alpha backgrounds in the LSBB [J]. i-DUST, 2010, 03003(6).

[21] Dumont G, Yedlin M, Zandi A S, et al. EEG Measure-

ments in a Low-Noise Environment [J]. Proceedings of i-DUST, 2010: 2.

[22] G Galès, Erauso G, Cayol J L, et al. Microbiology of shallow subsurface aquifer and carbonate rocks studied by culture-dependent and culture-independent methods. Preliminary results on an underground laboratory, the LSBB, Rustrel, France [J]. E3s Web of Conferences, 2016, 12: 05002.

[23] Pozzodiborgo E, Borgo E, Danquigny C, et al. Monitoring geomagnetic signals of groundwater movement using multiple underground SQUID magnetometers [C]. //i-DUST 2014-Inter-Disciplinary Underground Science & Technology. Apt, France: EDP Sciences, 2014, 4: 02004.

[24] Waysand G, Barroy P, Blancon R, et al. Seismo-ionosphere detection by underground SQUID in low-noise environment in LSBB-Rustrel, France [J]. European Physical Journal Applied Physics, 2009, 47(1): 1-4.

[25] Waysand G, Marfaing J, Pozzo di Borgo E, et al. Earth-ionosphere couplings, magnetic storms, seismic precursors and TLEs: Results and prospects of the [SQUID]^2 system in the low-noise underground laboratory of Rustrel-Pays d'Apt [J]. Comptes Rendus Physique, 2011, 12: 192-202.

[26] Gaffet S, Guglielmi Y, Virieux J, et al. Simultaneous seismic and magnetic measurements in the Low-Noise Underground Laboratory (LSBB) of Rustrel, France, during the 2001 January 26 Indian earthquake [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 2010, 155(3): 981-990.

[27] Henry S, Pozzo d B E, Cavaillou A. Tracking geomagnetic fluctuations to picotesla accuracy using two superconducting quantum interference device vector magnetometers [J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84: 024501.

[28] Dziewonski A M, Anderson D L. Preliminary reference Earth model [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1981, 25: 297-356.

[29] Thabang M, Elda S, Daniel G, et al. Correlation between fluxgate and SQUID magnetometer data sets for geomagnetic storms [J]. E3s Web of Conferences, 2014, 4: 02002.

[30] Stolz R, Schmelz M, Anders S, et al. Long baseline LTS SQUID gradiometers with sub-μm sized Josephson junctions [J]. Superconductor Science and Technology, 2020, 33(5): 055002.

[31] Schmelz M, Stolz R, Zakosarenko V, et al. Field-stable SQUID magnetometer with sub-fT $Hz^{1/2}$ resolution based on sub-micrometer crosstype Josephson tunnel junctions [J]. Superconductor Science & Technology, 2011, 24(6): 065009.

[32] Chwala A, Stolz R, Zakosarenko V, et al. Full Tensor SQUID Gradiometer for Airborne Exploration [J]. Preview, 2012, 156: 92.

[33] Schmelz M, Zakosarenko V, Chwala A, et al. Thin-film based ultralow noise SQUID magnetometer [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26: 1-5.

[34] Oukhanski N, Stolz R, Meyer H G. Ultra-low-drift and very fast dc SQUID readout electronics [J]. Journal of Physics Conference, 2006, 43: 1270-1273.

[35] Oukhanski N, Stolz R, Meyer H G. High slew rate, ultrastable direct-coupled readout for dc superconducting quantum interference devices [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(6): 063502.

[36] Stolz R, Zakosarenko V, Schulz M, et al. Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications [C]. //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004. Jena; 2006, 2: 178-180.

[37] Chwala A, Smit J P, Stolz R, et al. Low temperature SQUID magnetometer systems for geophysical exploration with transient electromagnetics [J]. Superconductor Science & Technology, 2011, 24(12): 4535-4537.

[38] Chwala A, Kingman J, Stolz R, et al. Noise characterization of highly sensitive SQUID magnetometer systems in unshielded environments [J]. Superconductor Science & Technology, 2013, 26: 035017.

[39] Kasai N, Fujinawa Y, Iitaka H, et al. Development of the HTS-SQUID system for measuring ULF bandmagnetic field changes related with earthquakes [J]. Superconductor Science & Technology, 2001, 14: 1135.

[40] Kawamura M, Kuwashima M, Toya T. Comparative Study of Magnetic Pc1 Pulsations between Low Latitudes and High Latitudes: Source Region and Propagation Mechanism of the Waves Deduced from the Characteristics of the Pulsations at Middle and Low Latitudes [J]. Memoirs of National Institute of Polar Research. Special issue, 1981, 18: 83-100.

[41] Kawai J, Miyamoto M, Kawabata M, et al. Characterization and demonstration results of a SQUID magnetometer system developed for geomagnetic field measurements [J]. Superconductor Science Technology, 2017, 30: 084002.

[42] 赵　毅, 王赤军. HTc RF—SQUID 磁力仪及其应用研究 [J]. 地学仪器, 1995: 18-23.

[43] 王赤军, 陈晓东, 赵　毅, 等. 77K SQUID 磁强计在

TEM 测量上的应用研究 [J]. 地球物理学报, 1999, S1: 161-166.

[44] Wang Y, Xie X M, Dong H, et al. Voltage Biased SQUID Bootstrap Circuit: Circuit Model and Numerical Simulation [J]. 2011, 21(3): 354-357.

[45] Wang Y, Xu X, Zhang G, et al. Low Noise SQUID Readout for Detection of Small Magnetic Field Signal [C]. // Superconductive Electronics Conference. Cambridge MA (US), IEEE, 2013: 1-3.

[46] Wang Y L, Zhang G F, et al. Noise Performance Comparison Between Current and Voltage-Bias Readout Schemes for DC SQUID [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(7): 1601407.

[47] Wang Y, Zhang G, Zhang S, et al. Small signal analysis of SQUID direct readout schemes [J]. Physica C Superconductivity, 2019, 569: 1353590.

[48] Ywab C, Szb C, Gzb C, et al. Low-drift and compact readout electronics for practical SQUID magnetocardiography working in unshielded environment-Science Direct [J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2020, 575: 1353685.

[49] 韩昊轩, 张国峰, 张 雪, 等. 低噪声超导量子干涉器件磁强计设计与制备 [J]. 物理学报, 2019, 068: 295-300.

[50] Zhang X, Zhang G, Wang Y, et al. A high-balance planar SQUID gradiometer [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29: 1600503.

[51] Zhang G, Zhang X, Wang Y, et al. Sub-micron Josephson junctions fabricated with cross-line process [J]. Physica C Superconductivity, 2019, 562: 32-35.

[52] Song Z, Dai H, Rong L, et al. Noise Compensation of a Mobile LTS SQUID Planar Gradiometer for Aeromagnetic Detection [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29: 1600205.

[53] Rong L, Bao S, Wu J, et al. High-Performance Dual-Channel Squid-Based TEM System and Its Application [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(8): 1-4.

[54] Dong H, Hwang S M, Wendland M, et al. Ultralow-field and spin-locking relaxation dispersion in postmortem pig brain [J]. Magnetic Resonance in Medicine, 2017, 78(6): 2342-2351.

[55] Huang X L, Dong H, Qiu Y, et al. Adaptive suppression of power line interference in ultralow field magnetic resonance imaging in an unshielded environment [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2018, 286: 52-59.

[56] Liu C, Chang B L, Qiu L Q, et al. Effect of magnetic field fluctuation on ultra-low field MRI measurements in the unshielded laboratory environment [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2015, 257: 8-14.

[57] Hui D, Qiu L, Wen S, et al. Ultra-low field magnetic resonance imaging detection with gradient tensor compensation in urban unshielded environment [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(10): 146.

[58] Liu C, Chang B L, Qiu L Q, et al. Multichannel ULF-MRI Study in Magnetic Unshielded Urban Laboratory Environment [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(4): 162804.

[59] Wang W, Ma P, Dong H, et al. A magnetic nanoparticles relaxation sensor for protein-protein interaction detection at ultra-low magnetic field [J]. Biosensors & Bioelectronics, 2016, 80: 661-665.

[60] Li Y, Dong H, Tao Q, et al. Enhancing the magnetic relaxivity of MRI contrast agents via the localized superacid microenvironment of graphene quantum dots [J]. Biomaterials, 2020, 250: 120056.

[61] Hua L, Zhang S, Zhang C, et al. SQUID-Based MCG Measurement Using a Full-Tensor Compensation Technique in an Urban Hospital Environment [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(6): 1601805.

[62] Tao R, Zhang S, Huang X, et al. Magnetocardiography based Ischemic Heart Disease Detection and Localization using Machine Learning Methods [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2019, 66(6): 1658-1667.