

量子地球物理深部探测技术及装备发展战略研究

林君^{1,2}, 嵇艳鞠^{1,2*}, 赵静^{1,2}, 佟训乾^{1,2}, 易晓峰^{1,2}

(1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院, 长春 130015; 2. 国家地球物理探测仪器工程技术研究中心, 长春 130026)

摘要: 量子传感与测量技术是实现地球深部重磁场精细化探测的颠覆性技术之一, 成为国际地球物理探测装备的重点发展方向。本文聚焦我国地球重磁场的量子高精度测量前沿技术布局, 梳理了量子地球物理探测装备的发展现状, 分析了深部资源探测中超导量子电磁探测系统、磁矢量梯度探测系统和超导重力探测系统、冷原子绝对重力探测系统等需求, 研判量子精密测量技术的国际发展态势, 剖析我国该领域发展面临的科技难题、技术瓶颈和机遇挑战。针对我国量子地球物理探测装备在核心技术攻关、完全国产化和探测应用等方面能力不足问题, 提出了新一代量子高精度地球物理深部探测装备的发展目标、技术体系、重点任务、战略规划, 突破超导量子芯片和高灵敏度传感器等“卡脖子”技术瓶颈, 建立我国自主可控的量子地球物理探测技术及装备发展的协同组织模式, 推动深部探测装备高质量跨越式发展, 为解决深部矿产资源探测、揭示地球深部构造等重大问题提供技术支撑。

关键词: 矿产资源; 深部探测; 量子高精度测量; 超导量子电磁探测; 超导重力探测; 冷原子绝对重力探测

中图分类号: P318.1 **文献标识码:** A

Development Strategy of Quantum-Based Deep Geophysical Exploration Technology and Equipment

Lin Jun^{1,2}, Ji Yanju^{1,2*}, Zhao Jing^{1,2}, Tong Xunqian^{1,2}, Yi Xiaofeng^{1,2}

(1.College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130015, China; 2. National Geophysical Exploration Equipment Engineering Research Center, Changchun 130026, China)

Abstract: Quantum-based sensing and measurement technology is a disruptive technology that can realize fine detection of the gravity and magnetic fields in deep Earth, and it has become a key development direction for geophysical exploration equipment worldwide. This study focuses on the frontier technologies for the quantum-based high-precision measurement of Earth's gravity and magnetic fields, summarizes the development status of quantum-based geophysical exploration equipment, and analyzes demand for the superconducting quantum-based electromagnetic detection system, magnetic vector gradient detection system, superconducting gravity detection system, and cold-atom absolute-gravity exploration system during deep resource exploration. Moreover, the international trend of quantum-based high-precision measurement technology as well as the development opportunities and challenges in this field are analyzed. To improve the core technology research, complete localization, and exploration application of quantum-based geophysical exploration equipment in China, we propose the development goals, technical system, key tasks, and strategic planning for a new generation of quantum-based high-precision deep geophysical exploration equipment. This aims to achieve breakthroughs in superconducting quantum chips and high-sensitivity sensors, establish a collaboration model for the independent development of China's quantum-based geophysical exploration equipment, promote the high-quality development of deep

收稿日期: 2022-05-17; 修回日期: 2022-06-20

通讯作者: *嵇艳鞠, 吉林大学仪器科学与电气工程学院教授, 研究方向为时间域电磁法理论及探测技术; E-mail: jiyj@jlu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“深地探测技术装备创新发展战略研究”(2021-XY-27)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

exploration equipment, and provide strategic support for solving major problems associated with deep mineral resource exploration and revealing of Earth's deep structure.

Keywords: mineral resources; deep detection; quantum-based high-precision measurement; superconducting quantum-based electromagnetic detection; superconducting gravity detection; cold-atom absolute-gravity detection

一、前言

全球范围内的清洁能源转型引发了大量战略性矿产需求,我国经济正在由高速增长转向高质量发展阶段,仍将是世界第一大矿产资源消费国。从当前的形势来看,我国主要战略矿产资源的勘查能力薄弱,供给生产增长相对缓慢,难以满足清洁能源迅速增长的需求,导致对外依存度逐年提高,矿产资源安全已上升到国家战略高度 [1,2]。战略性矿产资源是储能电池不可或缺的原材料,在未来新能源开发利用和碳中和持续性发展中具有十分重要的作用。我国主要战略矿产资源铜、镍矿等对外依存度都超过 70%,钴甚至高达 95%。铁矿石、铜精矿、石油等资源对外依存度已高达 50%~80%,超过了国家经济安全警戒线的 40%。2019 年铁矿石的对外依存度为 76%,铜精矿的对外依存度为 84.6%;2020 年铁矿石的对外依存度为 77.3%,铜精矿的对外依存度为 83.3% [3]。2030 年前,随着新一代信息技术、高端装备制造、新基建等新兴产业的快速发展,对铁矿、铜矿等战略性矿产需求还将快速增长、并将持续维持在高位态势。另外,我国矿产资源探明储量严重不足、矿产资源家底较为薄弱,人均拥有矿产资源与世界相比存在着明显的差距,仅仅为美国等发达国家的十分之一。据不完全统计,地下 2000 m 以浅的矿产资源查明率仅有三分之一,远低于矿业发达国家的 60.5%~73% 的平均值。近年来,我国新增查明金属矿产资源储量多为低品位、埋藏深、覆盖层较厚的矿床资源,金属矿勘探地区更加复杂、远景区深度不断加深、具有经济价值的矿床发现难度逐年加大。

量子传感器是传感领域的颠覆性变革技术,被誉为工业生产的“倍增器”、科学研究的“先行官” [4]。量子地球物理探测技术主要是利用量子效应和量子传感器对磁场、重力场和地电场等目标进行有效探测的方法技术。量子磁场传感器是利用环境磁场对量子本身特性的影响实现高精度测量,包括超导量子干涉磁力仪 (SQUID), 金刚石氮空位色心 (NV

center) 原子磁力计,冷原子磁力仪和铯光泵磁力仪等 [5~7]。量子重力传感器在真空环境中利用激光和磁场捕获、控制冷铷原子的量子态,通过测量不同能级的原子比率来实现重力场和重力梯度场的测量。随着超导量子磁测 SQUID 芯片、冷原子测量绝对重力技术的快速发展以及量子重力梯度传感器的突破,基于高精度量子地球重磁场传感器的量子地球物理探测技术已经成为深部战略矿产资源、火山活动监测、地球结构等精细化探测的颠覆性技术之一,成为国际地球物理探测装备的重点发展方向。美国、德国、中国、日本、英国等国家在量子精密测量技术领域的研发起步较早,先后制定了国家战略规划引导量子传感技术研发,重点研究量子测量技术的传感器、研发量子增强型传感器,用于工业精度测量、地球探测、地质和储层勘探、国防技术和导航等领域,其研究水平始终站在前沿技术的制高点,尤其在重力场、磁场、电磁场等地球物理探测方面,经过长时间的技术积累和设备迭代,技术水平相对领先、装备成熟。我国量子传感的顶层规划仍局限于行业或特定领域,如量子通信、量子计算领域,尚缺乏明确的国家级战略规划,对量子测量和量子传感的快速发展关注度不足。我国量子地球物理探测技术及装备研发相对起步较晚,但是经过历代科研工作者的不懈努力,近年来取得了长足的进步,促进了我国量子地球物理深部探测技术装备的发展,缩小与发达国家在该领域的技术差距。

本文从战略角度全面调查了国内外量子地球物理探测技术的研究现状、装备研发水平及发展趋势,剖析了我国高精度重力场、磁场和电磁场等领域探测技术与装备发展面临的关键问题,指出了我国在关键芯片和核心部件制备工艺、前沿性关键技术、高性能国产化系统研发等方面面临的系列挑战,明晰了我国量子地球物理探测技术及装备的重点研究任务和总体发展路径,为我国量子地球物理深部探测技术装备发展提供新思路,为我国矿产资源能源可持续供给和战略安全提供技术保障。

二、量子地球物理探测技术及装备研究现状

量子地球物理探测技术主要围绕高精度观测地球磁场和重力场，根据采集的参量类型进行分类，可分为标量总场、总场梯度、矢量三分量、张量梯度测量系统；按照搭载平台类型进行分类，可分为地面、航空、井中、海洋、卫星平台，包括地面和海洋、井中、地空超导量子时域电磁探测系统，航空超导量子磁矢量梯度探测系统，航空超导重力系统，航空超导重力梯度系统，地面原子绝对重力，航空原子绝对重力系统，航空原子绝对重力梯度系统等，如图1所示。

(一) 国外研究现状

1. 航空铯光泵磁总场探测系统

近年来，高精度铯光泵磁传感器在航空磁测技术领域应用广泛。国外产品以加拿大Scintrex公司的CS-3型和美国Geometrics公司的G-824A型为代表，灵敏度分别为 $0.6 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$ 和 $0.3 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$ ，目前美国和加拿大均规定灵敏度优于 20 pT 的磁力仪对我国严格禁运[8]。在航磁总场探测系统方面，主流产品为加拿大RMS公司的AARC510数据收录与补偿系统，分辨率可达 0.32 pT 、系统噪声为 0.1 pT ，补偿后剩余噪声水平为 10 pT ($0.05\sim 1 \text{ Hz}$ ，RMS均方根值)[9]。

2. 航空超导全张量磁探测系统

德国耶拿物理学高技术研究所(IPHT)与Supracon公司合作，研制了首套直升机吊舱式低温超导航空全张量磁梯度系统Jessy Star，在南非进

行了飞行实验，系统噪声优于 10 pT/m (4.5 Hz 带宽，RMS均方根值)。2004年，澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)与中国五矿集团有限公司合作，研制了高温超导地面全张量磁梯度测量系统GETMAG，系统噪声为 $2 \text{ pT/m}@10 \text{ Hz}$ [10]。美国特瑞斯坦技术公司利用高温超导磁传感器研制了航空全张量磁梯度系统(T877)，系统噪声为 $8 \text{ pT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2020年，IPHT采用变压器型耦合结构、亚微米尺寸约瑟夫森结和厘米尺度拾取环等新技术，研制出新一代磁矢量梯度计，其本征噪声为 $13 \text{ fT/m}/\sqrt{\text{Hz}}$ [11]。继南非首飞实验后，Jessy Star系统又陆续在各地展开实验。IPHT在深部矿产勘探中开展了一系列应用，包括在西班牙成功探测到HYPGEO黄铁矿带，在德国图林根森林探测到地下 800 m 的白云岩侵入，在芬兰北部拉普兰绿岩带中部发现地下 1200 m 深的镍铜铂矿床并准确解释了矿体分布形状。

3. 地面和海洋超导电磁探测系统

超导电磁探测系统被列为对全球矿业贡献的38项创新性技术之一，已成为了探测深部大型金属矿、地热油藏等资源的较为先进的技术手段。德国、日本、澳大利亚等国家长期致力于高温和低温超导量子传感芯片研制，通过近30年的技术攻关，已经将高、低温超导量子传感器成功用于地面电磁系统和井中电磁探测系统中，主要技术指标如表1所示。2007年，CSIRO研制了高温超导电磁系统LandTEM，在近10年的应用中发现了价值超60亿美元的硫化镍矿床储量以及其他类型矿床[12,13]。

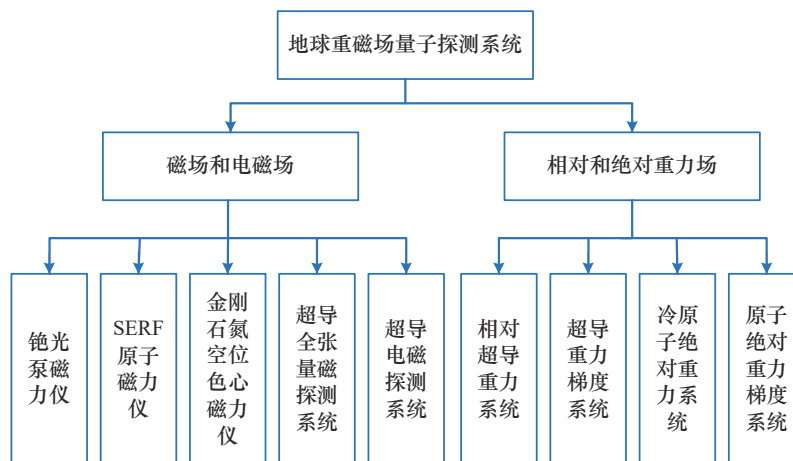


图1 量子地球物理探测主要装备

表1 国内外SQUID-TEM系统主要技术指标对比

| 单位/参数 | 低温DC SQUID (2011年) | 高温DC SQUID (2007年) | 高温DC SQUID (2015年) |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 研发单位 | 德国 IPHT | 澳大利亚 CSIRO 组织 | 日本 SUSTERA 协会 |
| 噪声水平/ $fT\sqrt{Hz}@10\text{ kHz}$ | 15 | 45 | 30 |
| 摆率/ $mT\cdot s^{-1}$ | 10 | 2.66 | 10 |
| 系统带宽/MHz | 8 | 1 | 0.1 |

2011年, IPHT研制了低温亚微米级直流超导量子干涉器(简称SQUID)、亚fT量级超导磁传感器, IPHT与Supracon公司合作研制了地面低温超导电磁探测系统, 低温超导技术水平处于世界领先。2013年, 日本超导传感技术研究协会(SUSTERA)研发了高温DC SQUID芯片, 并与原日本金属矿业事业团(现JOGMEC)合作研发了系列高温超导电磁系统SQUITEM, 高温超导技术水平处于世界领先, 探测深度达地下1000~2000 m [14]。在日本、泰国、澳大利亚、秘鲁、智利等地的多金属矿探测中得到应用。该系统于2017年探测到了澳大利亚南部低阻覆盖层厚度为150 m深的地下铜、银、金、铅及锌的多金属矿床, 于2018年在泰国成功探测到地下2000 m的储油层 [15]。

海洋超导电磁探测领域的发展也较为迅猛, 为深海资源探测、油气藏等战略资源的勘察开发开辟了新的技术途径。2012年, 德国IPHT在DESMEX项目中使用模块化SQUID传感器以及专用于海洋环境下的液氮制冷技术, 研发了两代SQUID海洋时间域系统, 并已开展了浅海域浅层地质特征高分辨成像和深海域大深度探测等实际海洋勘探, 实测有效探测深度达到1 km。2015年, Joe Kirschvink提出使用金属镓对冷泵进行润滑的技术, 通过提高冷泵的致冷效率以及降低液氮的蒸发速率, 解决了低温SQUID在深海探测时因液氮快速蒸发导致的工作时间短和工作不稳定的问题 [16]。2016年, Chwala等人基于LTC SQUID系统对德国沿海地区波罗的海沿岸的海底磁化目标进行了扫描式探测, 在寻找废弃沉积物和未爆炸军火方面取得了明显的效果 [17]。

4. 地面和航空超导重力系统

20世纪90年代, 美国斯坦福大学最先开展超导重力梯度仪的研究, 用于引力波探测、空间重力测量等基础物理研究。2002年, 美国马里兰大学的Paik研究组研发了地面超导重力系统, 仪器噪声低至

$0.02\text{ E}/\sqrt{Hz}@0.5\text{ Hz}$, 比传统梯度仪低2~3个量级。英国的ARkex、加拿大的Gedex和澳大利亚的力拓集团均致力于航空超导重力梯度仪的研制工作 [18], 旨在突破旋转加速度计式重力梯度仪的分辨率极限, 获得更大深度的资源勘查能力。然而, 航空超导重力梯度仪的研发并不顺利, 迄今尚无与旋转加速度计式重力梯度仪性能相当的航空超导重力梯度仪的报道, 说明其实用化仍需突破一系列难度超乎寻常的技术瓶颈。

超导航空重力梯度系统作为新一代技术, 是目前航空重力梯度勘探系统研究的重点和热点。国际上, 美国斯坦福大学率先开展低温超导重力梯度系统的研制, 其他研究机构紧跟其后。目前, 研发设备已经成型或正处于试飞准备阶段的主要有: 英国ARKeX公司研制的EGGTM航空重力梯度系统, 加拿大Gedex公司和马里兰大学联合研制的HD-AGG航空重力梯度系统, 实际飞行测量精度达到20 E; 澳大利亚的力拓集团和西澳大学联合研制的VK-1重力梯度仪, 地面车载测量精度达到20 E。

5. 地面原子绝对重力和航空原子重力梯度探测系统

美国斯坦福大学朱棣文小组于20世纪90年代最早提出冷原子干涉重力仪 [19], 2001年重力测量不确定度达到 $3.4\text{ }\mu\text{Gal}$, 2008年测量灵敏度优化至 $8\text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{Hz}$ 。法国巴黎天文台研究小组采用自由下落冷铷原子的方法测量重力加速度, 重力测量不确定度达到 $4.3\text{ }\mu\text{Gal}$, 测量灵敏度为 $8.9\text{ }\mu\text{Gal}/\sqrt{Hz}$ [20]。2019年, 美国加州理工学院伯克利分校研制了车载可移动原子重力仪, 准动态试验测量灵敏度为 $0.5\text{ mGal}/\sqrt{Hz}$, 测量总不确定度为 $40\text{ }\mu\text{Gal}$ 。德国联邦物理技术研究院(PTB)基于光钟技术开发出可用于地球精密测量的量子重力仪。

在量子重力梯度仪研制方面, 英国伯明翰大学率先研发了量子重力仪样机, 2018年成功实现了量子重力梯度仪样机测试实验。2019年, 系统重力场

测量精度提升至 10~99 mGal 数量级, 探测深度有望突破现有技术的数倍以上 [21]。目前, 英国伯明翰大学正在研发搭载在无人机上的小型化航空重力梯度仪。而在小型化原子绝对重力系统的研究方面, 美国国家航空航天局 (NASA) 下属喷气推进实验室 (JPL) 完成了冷原子干涉重力梯度系统实验室样机的研制。2019 年, 法国 ONERA 小组首次将冷原子绝对重力测量系统搭载在飞机上进行试验 [22], 在重复测线和交叉测点上的重力值误差为 1.7~3.9 mGal。目前, 原子干涉型重力梯度系统距离航空实用化还有较大差距。2022 年, 英国国家量子技术中心的伯明翰大学研究人员, 成功研制了世界上第一台在实验室条件之外的量子重力梯度仪, 在真实世界的条件下找到埋在地表下 1 m 的户外隧道, 并将这一事件称为“这是传感领域的一个‘爱迪生时刻’, 将改变社会、人类的理解和经济发展”, 随着重力感应技术的成熟, 水下导航和揭示地下的应用将成为可能 [23]。

(二) 我国量子地球物理探测技术及装备研发现状

我国在深部矿产资源探测技术装备研究方面经历了几代人长期不懈的艰难探索, 通过引进、吸收和创新, 取得不小进展, 自主研制了一系列量子地球物理探测装备 [24~27], 为完善国内勘探地球物理技术装备体系做出贡献。但部分自主研制的量子地球探测装备核心指标与国外先进水平还存在差距, 冷原子、超导量子等高精度测量重磁场的芯片和传感器仍高度依赖国外, 自主研制的系统仍处于样机阶段。特别是在航空超导重力梯度系统、航空冷原子绝对重力测量系统方面的研制处于空白, 在进行资源探测时更多采用国外进口设备, 我国自主研制的装备距离达到完全国产化、真正具有野外探测能力还有相当长的一段路要走。

在光泵传感器系统方面, 中国科学院空天信息创新研究院 (原电子学研究所) 研制的铯光泵传感器经中国计量科学研究院测试, 灵敏度达到 $0.45 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$; 研制的磁总场探测系统与磁补偿软件, 经过多次野外试验, 其剩余噪声水平为 10 pT ($0.05\sim 1 \text{ Hz}$, RMS 均方根值)。中国自然资源航空物探遥感中心自主研制的数字化航空氦光泵磁力仪和梯度仪, 灵敏度达到 0.25 pT (单位带宽有效值)。在航空高低温超导全张量磁探测系统方面,

上海微系统与信息技术研究所和中国自然资源航空物探遥感中心联合研制了航空低温超导全张量磁梯度系统, 系统噪声为 $75 \text{ fT}/\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}$, 已经开展了实验飞行测试。吉林大学和自然资源航空物探遥感中心联合研制了航空高温超导全张量磁梯度系统, 系统噪声达到 $30 \text{ pT}/\text{m}$ (5 Hz 带宽, RMS 均方根值), 在江苏丹阳开展了测线飞行试验。吉林大学研制出了地面超导时域电磁探测系统等装备 [28~30]。

在地面和航空超导重力系统方面, 早在 1970 年, 我国开始超导重力仪的研制, 但可惜的是没有研制出系统样机。2010 年, 我国重新启动了超导重力仪器的研制工作, 由中国科学院电工研究所负责研制超导重力仪以及华中科技大学负责研制航空超导重力梯度仪, 突破了超导重力仪的设计、制作、集成和测试等关键技术, 研制出了超导重力梯度仪原理样机, 实验室的噪声水平为 $7.2 \text{ E}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。中国航天科技集团公司第 707 研究所与中国自然资源航空物探遥感中心联合研制了旋转加速度计式航空重力梯度系统, 在国内首次实现重力水平分量梯度测量, 精度达到 70 E。

在地面原子绝对重力系统研制方面, 中国计量科学研究院、华中科技大学、中国科学院精密测量科学与技术创新研究院、浙江工业大学等单位开展了量子重力仪的研制。2017 年, 国内 4 家单位参加了“第十届全球绝对重力仪国际比对”并取得有效比对数据, 具体指标如表 2 所示, 其中华中科技大学研制的原子重力仪测量灵敏度达到 $4.2 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 达到国际领先水平, 其采用新型量子重力微机电系统 (MEMS) 芯片, 芯片的灵敏度高达 $8 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、动态范围高达 8000 mGal [31]。2019 年, 中国科技大学研制了原子重力仪, 测量 g 值的灵敏度分别为 $35.5 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $42.5 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 积分时间 2000 s 后稳定度分别达到了 $0.8 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.3 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ [32]。在运动平台原子重力仪研制方面, 浙江工业大学和中国自然资源航空物探遥感中心联合研制的移动式原子重力仪系统, 2020 年在国内首次完成了船载系泊环境下的绝对重力测量工作, 重力测量灵敏度为 $16.6 \text{ mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2022 年在中国南海某海域开展了一系列测量实验, 在航速小于 $2.1 \text{ km}/\text{h}$ 条件下, 基于扩展卡尔曼滤波算法将绝对重力测量灵敏度从

表2 国内各单位的原子重力仪性能和国际比对结果

| 机构名称 | 灵敏度和分辨率 | 不确定度 | 国际比对结果 |
|-------------------------|--|---------------------|----------------------------------|
| 华中科技大学 | 4.2 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 0.5 $\mu\text{Gal}@100\text{s}$ | 3.0 μGal | 1.3 \pm 3.1 μGal |
| 中国计量科学研究院 | 44 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 0.2 $\mu\text{Gal}@3\text{e}4\text{s}$ | 5.2 μGal | -2.4 \pm 4.6 μGal |
| 中国科学院精密测量 科学与技术创新研究院 | 30 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 1 $\mu\text{Gal}@4\text{e}3\text{s}$ | 10 μGal | -3.8 \pm 10.2 μGal |
| 浙江工业大学 | 90 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 4 $\mu\text{Gal}@1\text{e}3\text{s}$ | 20 μGal | -11.4 \pm 14.1 μGal |
| 中国科技大学 | AG02: 35.5 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 0.8 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}@2\text{e}3\text{s}$ AG12: 42.5 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 1.3 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}@2\text{e}3\text{s}$ | — | — |
| 国防科技大学 | 210 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$, 5.1 $\mu\text{Gal}@3\text{e}3\text{s}$ | — | — |

300.2 $\text{mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 提升至 136.8 $\text{mGal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

三、量子地球物理探测技术装备发展面临的挑战

纵观我国量子地球物理技术装备发展现状，其面临的挑战主要体现在研发体系、核心技术、创新能力、产业应用等几个方面。

(一) 中长期系统化发展体系不完善

国际上如德国、日本、澳大利亚等国家，一方面，构建了前沿技术与未来科学研究体系，瞄准地球重磁场的量子精密测量等领域进行布局长期研究，相关研究已经超过 40 余年，并在地面、井中、海洋、航空量子地球物理装备研制都有布局，不懈追求技术领先，形成了面向深地矿产资源勘探的井、地、海、空立体探测体系；另一方面，建立了基础研究与工程应用的长期协作发展体系，德国 IPHT 与 Supracon 公司有着长期稳定的合作关系，日本 SUSTERA 协会与矿业勘探 JOGMEC 公司合作非常紧密，IPHT 和 SUSTERA 等国家科研院所主要针对工程应用需求，研发专用芯片、传感器和探测系统，通过 Supracon、JOGMEC 等勘探企业进行实际勘探应用和多次系统迭代更新，最终实现探测系统的工程实用化。

我国通过“十一五”“十二五”“十三五”国家重点研发专项等系列计划，开始研制地球深部重磁场的高精度量子传感探测技术装备，主要包括了地面超导电磁探测系统、地面超导重力仪、航空超导全张量磁探测系统、航空量子铯光泵磁探测系统、地面原子绝对重力系统、航空量子重力梯度系统、船载量子重力梯度系统等。一方面，国内研究直接

从跟踪国际先进系统起步，有利于赶超国际先进水平，初步实现了量子重磁场探测系统工程样机，并攻克了部分关键技术，但核心技术指标和成熟度与国际领先水平有较大的差距，研制的探测系统尚不能开展深部矿产资源勘探应用。另一方面，我国在深井、海洋和航空超导电磁探测、航空原子绝对重力和重力梯度系统、航空超导重力系统等前沿领域的研究和布局处于空白，量子精密测量深地探测装备系统化的发展体系处于零散分布状态，不完善、拼凑捆绑现象严重。量子精密传感技术和探测装备研发具有技术难度大、周期长等特征，例如，超导应用技术需要几十年或上百年的长周期持续研究才能落地，国内研究主要依托项目资助，但多数项目结束后研究基本停滞、研究团队重组，缺少长期研究规划和长远目标，尚未形成科研院所与企业稳定合作体系，国家层面中长期系统化发展布局不充分，量子精密地球物理场探测体系构建还需要进一步完善。

(二) 关键芯片和核心部件的基础工艺能力不足

在前沿颠覆性技术领域，基础研究更需要学者根据兴趣开展自由探索，构建长期的宽容研究氛围、科学合理的评价机制和个人长期的发展空间十分重要。由于我国的研发人才团队不稳定，所以很容易导致研究的中断，无法坚持到有成果产出的阶段。一方面，对于从事一些不能立即预见有明显应用前景的基础研究团队，即使研究人员人数很少，也要保留火种团队或火种苗子；另外一方面，对于基础工艺和制备技术等急于跟踪前沿性的研究，过多追求量子传感器或样机系统更高性能指标，将导致底层基础技术、基础工艺能力不扎实，底层基础研究的创新和前沿性不突出，工程实用化重视程度

不够，从而导致关键核心技术受制于国外的局面不能得到根本性改变。

德国在量子精密测量领域的应用研究相对独立，对于未来科学和预见性技术的研究不需考虑应用市场效益，主要原因是基础研究的应用存在很大的不确定性和未知性。例如，发现巨磁阻效应之后的近20年内没有都得到应用，直至计算机硬盘中得以应用，才开启了通向新技术的世界大门。反观国内，研发机构一定程度上缺少可持续性的基础研究，尤其在关键芯片和核心部件方面的基础研发能力严重不足。通常看到国际上研制出了新的高精度量子或原子磁场探测系统后，确定其具备良好的应用前景和潜力，才开始启动高精度量子重磁场探测系统等研究，而不是从超导量子原子精密测量重磁场的基础理论出发；当发现国产化探测装备的主要指标与国际领先水平存在差距，才开始重视于传感器关键芯片和核心部件的基础工艺等研究，但对于SQUID和冷原子测量磁场的基础理论不清楚，源头和背后的东西没有搞清楚，导致了面对高灵敏度SQUID芯片设计、传感器等“卡脖子”的技术问题时，难以提出原创性的研究思路。

（三）前沿性的综合关键技术创新能力不强

我国研制的多数量子重磁场探测技术装备，因在量子重磁场测量基础理论研究薄弱，以跟踪国外思想和技术方法为主，导致了前沿性关键技术原始创新能力不强。国内虽然已经有低温超导SQUID磁场芯片、SQUID磁矢量梯度芯片、铯光泵磁传感器等研制的相关报道，但在噪声水平、灵敏度指标等方面与世界最先进指标仍存在着一定差距；单个芯片或者样机的高精度指标并不能代表关键技术已经攻克，小批量研发能力尚未形成。我国在高性能SQUID传感器芯片的关键技术尚未完全解决，量子重力MEMS芯片仍处于研究探索阶段，深海低温液氮或液氮保温技术和运动噪声的消除仍需要进一步深入研究；航空环境平台超导梯度仪的振动和外部噪声抑制、量子重力梯度仪的地面振动噪声、拉曼光相位噪声以及原子探测噪声抑制等技术还面临着巨大的技术挑战。

国内在低温超导SQUID亚微米约瑟夫森结、高温超导高质量薄膜制备、长基线光刻、超导恒温制冷、超导电磁屏蔽、冷原子体系的单量子态产

生、激光冷却技术、三维磁光阱、离子阱技术等基础核心技术的研究不充分、不透彻。芯片和传感器指标提升离不开反复失败积攒的经验，核心技术攻关更需要长期坚持研究。我国的经济实力已经发展到了具备开展未来科学基础研究能力的阶段，需要瞄准颠覆性、前瞻性、战略性、前沿性的量子精密地球物理场探测方向，从多角度、多层面的底层技术开展研究，经历多次反复摸索以弄清本质，要有打破沙锅问到底的精神，解决基础研究和关键技术双脚不落地现状。

（四）量子探测国产化系统探测工程应用能力不足

我国已经成功研制了地面超导电磁探测系统、地面超导重力仪、航空超导全张量磁探测系统、航空量子铯光泵磁探测系统、地面原子绝对重力系统、航空量子重力梯度系统、船载量子重力梯度系统等。国产研制的量子重磁场探测系统多处于样机阶段，虽然实现了部分技术指标，但是在运动平台大动态范围的重磁场测量关键技术、屏蔽减震工程技术等方面还处于研发阶段，探测系统的实用性和成熟度不高，主要原因有两方面，一方面，西方国家在地球物理场探测高灵敏度SQUID芯片、高精度重力传感器及惯性器件等领域均对我国实施禁运；另一方面，航空高低温全张量磁测、航空重力/重力梯度测量的核心技术主要由加拿大、俄罗斯、美国及德国所拥有，导致了国内研制的量子地球物理探测系统野外实际探测能力不足，野外勘探应用程度较低，无法满足深地矿产资源探测需求。

四、量子地球物理探测技术装备重点建设任务和总体发展路径

（一）我国量子地球物理探测技术装备重点建设任务

随着量子传感及测量技术的不断发展，高精度、高分辨率、高灵敏度、高智能化的地球物理场探测装备，将在地球深部矿产资源探测发展中处于重要的支撑地位，具有广阔的发展空间和应用前景。为此，亟需突破深地物理场量子精密测量理论方法，研制深部地球物理专用的高低温超导量子干涉器芯片、高灵敏度高分辨率金刚石氮-空位(NV)色心量子矢量磁传感器、冷原子和超导重力以及重力梯度测量系统等，建立空-天-地-井全

方位立体化的深部量子地球物理探测体系。

量子地球物理探测技术装备重点建设任务如图2所示，在“十四五”“十五五”“十六五”3个五年规划中，分近期目标、中期目标和远期目标，针对高灵敏度传感技术、新材料与制备工艺、量子芯片生产能力、稳定和可靠性技术瓶颈、工程化和国产化完整链条、多物理场反演成像方法、全方位的探测体系等多个方面，依次进行重点建设。量子地球物理探测技术装备具体建设任务如图3所示，分“高精度传感技术”“前沿颠覆性技术”“实用可靠性技术”三个层次，在重力、磁场、电磁场、地震四个方面，对量子地球物理探测技术装备具体的建设任务分别作出了建议和憧憬。

剖析不同磁场角度下NV色心的频率偏移机制；研究NV色心的基态电子自旋和氮核自旋的操控技术、激光和微波场对金刚石量子态的精准调控方法、基于光跃迁的电子自旋量子态读出技术、基于动力学解耦序列的噪声抑制方法等。通过研发金刚石氮空位色心的量子传感器，实现高灵敏度和纳米级空间分辨率的探测方法。

研究SERF原子磁传感器的原子自旋对于外界波动磁场的响应机制，建立Bloch方程中原子自旋对外界波动磁场及高频率调制场的响应模型，研究原子极化率均匀度、气室中不同位置的原子极化率差异使各通道对磁场响应机理，研究非屏蔽地球物理场探测时泵浦光强度调制和频率调制方法，实现地球物理场非屏蔽环境下高灵敏度微型化梯度测量，将为地球物理量子探测奠定坚实基础，成为地球物理深部探测的颠覆性技术。

(二) 我国量子地球物理探测技术装备总体发展路径

1. 研究新物理效应或机理的量子传感理论

研究基于金刚石氮空位色心的新型单自旋量子磁传感技术，建立矢量测量NV色心的物理模型，

2. 突破量子传感器的制备工艺与测量应用关键技术

攻克高精度超高分辨率的冷原子干涉重力梯度

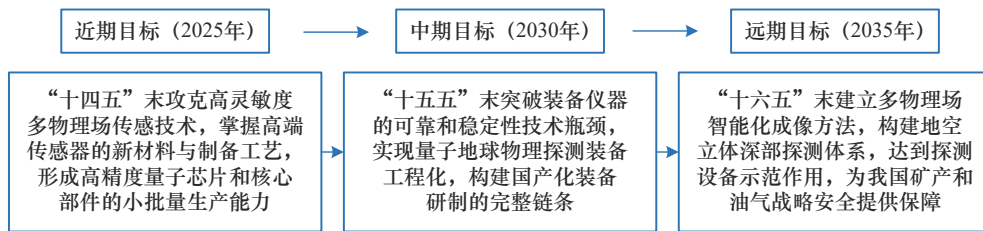


图2 量子地球物理探测技术装备重点建设任务

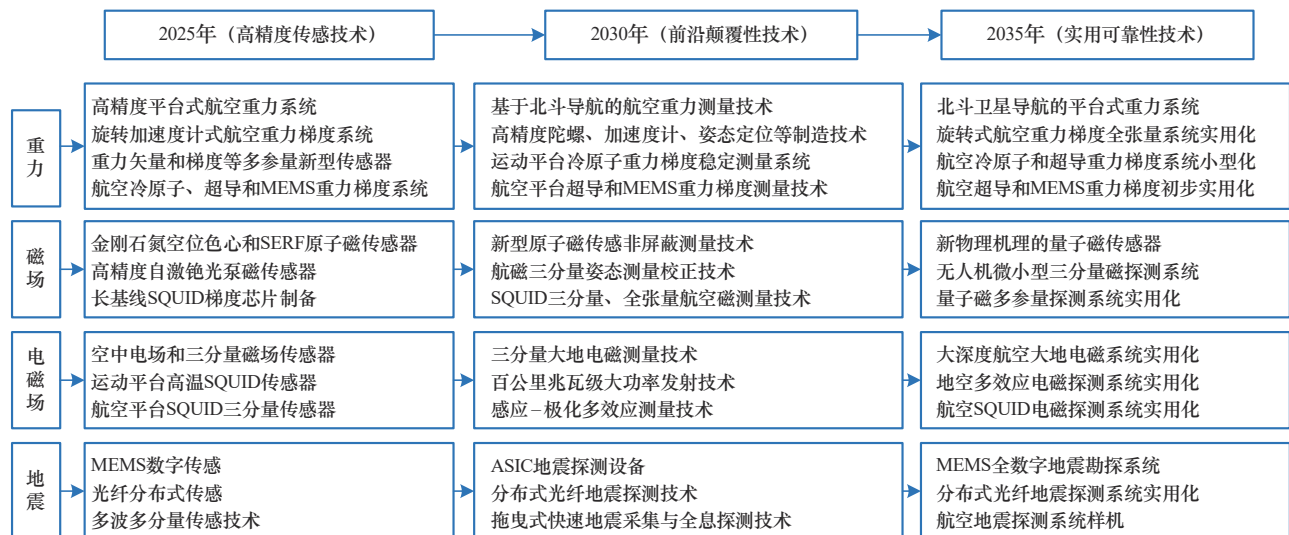


图3 量子地球物理探测技术装备具体建设任务

仪、芯片级冷原子绝对重力传感器、高重频小型冷原子物理探头、超导重力传感器、超导重力梯度敏感探头的研发。研究冷原子体系下单量子态的激光冷却技术、离子阱技术等，研究高效率激光冷却原子和光抽运量子态制备方法，研究短距离原子自由落体测量、量子绝对重力测量方法等。研究交叉耦合噪声抑制技术和共模耦合噪声抑制技术、移动平台上共模耦合信号的实时消除技术，开展地面车载测量作业和航空搭载适应性试验，实现航空重力梯度仪和航空冷原子干涉重力梯度仪的工程样机研制。

攻克高精度超导量子干涉磁传感器、三分量高低温超导电磁传感器、阵列高纯锗传感器、原子矢量磁传感器等制造加工技术。研究芯片级原子磁力计的硅微加工制造技术、具有长寿命和高灵敏度的磁场测量量子相干性的金刚石设计加工技术。研究地磁环境中磁通量子干涉时的超导约瑟夫森结晶粒边界、热噪声、涡流钉扎、磁滞以及磁通陷入的结构模型与优化方法 [33,34]；研究无源地磁场和有源激励电磁场等不同应用场景对高温 SQUID 芯片的性能影响机理。研究高温超导量子干涉器芯片的 YBCO 超导薄膜制备工艺，揭示脉冲激光沉积温度、杂相颗粒尺寸和密度、羽辉中的化学成分、靶法线方向角、激光能量等对高温超导薄膜质量和高温 DC SQUID 芯片噪声水平的影响机理 [35]；研究高温超导磁测芯片制备工艺和低形变的低温封装技术 [34,36,37]，攻克高温超导芯片制备工艺 [38]，研制完全国产化的航空飞行平台专用磁矢量梯度芯片，实现地球物理探测领域专用高温 SQUID 芯片的国产化，提高 SQUID 芯片在磁法、电磁法和重力测量领域的应用水平，提升我国深部资源探测能力。

3. 构建深部量子地球探测技术装备工程实用化体系

为了实现地球深部多物理属性的智能化和精细化探测需求，急需建立达到国际领先的航空、井中、海洋、卫星等多种移动平台地球物理探测技术体系。研发运动平台下的重磁总场、三分量、梯度、全张量、电磁场、相对重力和绝对重力等多参量测量技术装备，提高多种移动平台的矿产资源探测灵敏度和深度，已经成为高分辨率、精细化地球物理技术装备的发展趋势。

移动平台测量重点需要攻克重磁场振动噪声处理和运动姿态控制技术，研究振动噪声的实时测

量和自适应处理方法，研究惯性稳定平台的动基座运动姿态测量和实时反馈控制技术、量子重力测量系统的姿态控制方法，冷原子重力梯度仪的高采样率、动态运动噪声压制、环境适应性技术，攻克冷原子重力梯度仪的地面可移动测量关键技术，突破地面移动测量和机载适应性试验位姿和振动控制技术、基于超导量子传感器的航空电磁探测技术、无人机地-空探测关键技术等。

五、对策建议

(一) 制定量子地球重磁多场量精密探测技术装备的国家发展战略规划

针对我国量子传感顶层规划仍局限于地方政府层面，尚缺乏明确的国家级战略规划的现状，建议我国需早日研究出台量子科技领域的国家发展战略规划，布局量子传感领域的前沿技术，引导国内量子传感研究健康快速发展，致力于开发地球物理场专用的量子器件制备技术以及量子传感技术。对于 SERF 原子磁力仪和金刚石氮空位色心磁力仪等新机制方面的基础研究，建议采取多点散发式研究，形成各个方向都有人员长期开展研究的局面；对于航空平台的冷原子干涉重力和重力梯度系统的研制，鉴于距离实用化还有较大差距的现实，建议作为前沿和颠覆性技术进行重点攻克对象，同时也可将移动平台搭载测量与实验对象拓展到卫星重力测量领域；对于航空和海洋等移动平台的高低温航空超导磁矢量、三分量磁探测系统，建议短期内能够实现较高的成熟度和实用化；与此同时，建议聚焦移动平台重磁场测量的“卡脖子”技术进行重点攻关，以工程实用化研发为目标，打破国际欧美发达国家的技术围剿。

(二) 设立量子地球物理场精密传感与探测技术装备试验工程应用类项目

应鼓励开展国产仪器的工程实验应用研究，针对超导量子芯片和传感器、冷原子绝对重力梯度系统、金刚石氮空位色心原子磁力仪等，设立实验和工程技术类支持专项，开展研发可靠性及稳定性的实验和测试研究、仪器系统典型区域工程应用和系统实用性迭代研究，打破国产仪器不能用、不好用的局面。“卡脖子”技术最终体现在工程应用方面，

国内仪器装备研发的较多,但实用的较少。相关领域不愿用国产仪器的根本原因是其不好用、不适用,仅追求性能指标的突破。因此,建议在面向深部关键矿产资源与非常规油气能源等国家重大战略需求上,集中整合国内超导量子芯片和传感器、冷原子绝对重力梯度系统、金刚石氮空位色心原子磁力仪等研发优势资源与科技力量,构建量子精密地球物理探测仪器研发体系。在基础研究方面,探索大深度探测方法的原创性新理论;在装备关键技术攻关方面,攻克地球重磁场专用芯片制备、超导量子磁场和磁矢量梯度场传感器、原子磁力仪、原子重力仪等研制的“卡脖子”核心技术,提升量子传感器的灵敏度、分辨率、测量极限、摆率和动态范围等性能。通过攻克运动平台、地球非屏蔽环境下磁场多参量测量的系列关键技术,提高地球物理场的量子精密测量原创能力和高端技术研发能力,实现量子高精度地球物理场探测系统的国产化和实用化,开创我国自主研制地球物理深部探测装备的新局面,提高地球物理装备深部智能化、精细化探测水平,从而服务深部矿产与油气探测,实现国家能源自主可控。

(三) 完善多学科交叉型工程实验技术人才培养模式和评价机制

探索适合地球物理仪器科技创新、有利于科技人才队伍稳定和发展的体制、机制,由于仪器研发周期较长,人才评价和职称晋级等方面需要建立新的评价机制。通过设立工程系列的高级工匠和工程师等系列人才称号,从研发地球物理仪器的国产化和实用化等方面建立第三方评价模式,让从事仪器研发等工程应用方面的工程师得到相应发展空间。建议国内科研机构工程系列人员开展多学科访问交流,从而促进多学科交叉融合,进一步带动技术创新,通过设置国际合作项目积极鼓励工程技术人员深度参与国际合作,培养一批扎根国内地球物理仪器研发的人才队伍。

致谢

感谢中国工程院的大力支持以及审稿专家的建议与指导。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: May 17, 2022; Revised date: June 20, 2022

Corresponding author: Ji Yanju is a professor from the School of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University. Her major research fields include time-domain electromagnetic theory and detection technology. E-mail: jiyj@jlu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Innovative Development of Deep-Earth Exploration Technology and Equipment” (2021-XY-27)

参考文献

- [1] 鞠建华, 王婧, 陈甲斌. 新时代中国矿业高质量发展研究 [J]. 中国矿业, 2019, 28(1): 1-7.
Ji J H, Wang Q, Chen J B. Study on the high quality development of China mining industry in the new era [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(1): 1-7.
- [2] 吴初国, 汤文豪, 张雅丽, 等. 新时代我国矿产资源安全的总体态势 [J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 9-15.
Wu C G, Tang W H, Zhang Y L, et al. Overall trend of China's mineral resources security in the new era [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(6): 9-15.
- [3] 郭娟, 崔荣国, 闫卫东, 等. 2020年中国矿产资源形势回顾与展望 [J]. 中国矿业, 2021, 30(1): 5-10, 54.
Guo J, Cui R G, Yan W D, et al. Outlook and overview of mineral resources situation of China in 2020 [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(1): 5-10, 54.
- [4] 蒿巧利, 赵晏强, 李印结. 全球量子传感发展态势分析 [J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(1): 59-68.
Hao Q L, Zhao Y Q, Li Y J. Analysis on the Development Strategies and Trends of Quantum Sensing [J]. World Sci-Tech R&D, 2022, 44(1): 59-68.
- [5] Battersby S. Quantum sensors probe uncharted territories, from Earth's crust to the human brain [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(34): 16663-16665.
- [6] Jensen K, Skarsfeldt M A, Strkind H, et al. Magnetocardiography on an isolated animal heart with a room-temperature optically pumped magnetometer [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-10.
- [7] 田倩飞. 美国公布《推动量子信息科学: 国家挑战与机遇》[J]. 科研信息化技术与应用, 2016, 7(5): 95-96.
Tian Q F. The United States announced *Advancing quantum information science: national challenges and opportunities* [J]. Information Technology and Application of Scientific Research, 2016, 7(5): 95-96.
- [8] Kim B, Lee S, Park G, et al. Development of an unmanned airship for magnetic exploration [J]. Exploration Geophysics(Melbourne), 2021, 52 (4): 462-467.
- [9] Chen L, Wu P, Zhu W, et al. A novel strategy for improving the aeromagnetic compensation performance of helicopters [J]. Sensors, 2018, 18(6): 1846.
- [10] Schmidt P, Clark D, Leslie K, et al. GETMAG-a SQUID magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration [J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(4): 297-305.
- [11] Stolz R, Schmelz M, Zakosarenko V, et al. Superconducting sensors and methods in geophysical applications [J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(3): 1-10.

- [12] Macfarlane J C. Electromagnetic and metrological applications of superconductivity: An Australian historical perspective [C]. Sydney: 2011 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, IEEE, 2011.
- [13] Della Corte A, Fagaly R. The IEEE awards in applied superconductivity(2016) [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1–10.
- [14] Motoori M, Ueda S, Masuda K, et al. A newly developed 3ch system of SQUITEM III and the result of its field test [C]. Porto: 2nd Conference on Geophysics for Mineral Exploration and Mining, 2018.
- [15] Hasegawa D, Watanabe T, Ito T, et al. Seismic interferometry imaging of subsurface structure in the southernmost area of South Japanese Alps [C]. Tokyo: The 13th SEGJ International Symposium, 2018.
- [16] Kirschvink J, Isozaki Y, Shiuya H, et al. Challenging the sensitivity limits of Paleomagnetism: Magnetostratigraphy of weakly magnetized Guadalupian-Lopingian(Permian) limestone from Kyushu, Japan [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 418: 75–89.
- [17] Schmelz M, Zakosarenko V, Chwala A, et al. Thin-film based ultralow noise SQUID magnetometer [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(5): 1–5.
- [18] Difrancesco D. Advances and challenges in the development and deployment of gravity gradiometer systems [C]. Capri: EGM 2007 International Workshop, 2007.
- [19] He S, Wu D, Miao Q. The principle of cold atom interference and its application in navigation [C]. Tianjin: 2020 International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation, IEEE, 2020.
- [20] Ménoiret V, Vermeulen P, Le Moigne N, et al. Gravity measurements below $10^{-9} g$ with a transportable absolute quantum gravimeter [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1–10.
- [21] Adams B, Macrae C, Entezami M, et al. The development of a High data rate atom interferometric gravimeter(HIDRAG) for gravity map matching navigation [C]. Beijing: 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, IEEE, 2021.
- [22] Bonvalot S, Bresson A, Bidet Y, et al. Airborne absolute gravimetry using cold-atom interferometry: First experiment and comparisons with classical technologies [C]. San Francisco: AGU Fall Meeting Abstracts, 2019.
- [23] Stray B, Lamb A, Kaushik A, et al. Quantum sensing for gravity cartography [J]. Nature, 2022, 602: 590–594.
- [24] 林君, 刁庶, 张洋, 等. 地球物理矢量场磁测技术的研究进展 [J]. 科学通报, 2017, 62(23): 2606–2618.
Lin J, Diao S, Zhang Y, et al. Research progress of geophysical vector magnetic field survey technology [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(23): 2606–2618.
- [25] 熊盛青. 航空地球物理科技创新与应用 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 791–818.
Xiong S Q. Innovation and application of airborne geophysical exploration technology [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 791–818.
- [26] 熊盛青, 周锡华, 薛典军, 等. 航空地球物理综合探测理论技术方法装备应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2018.
Xiong S Q, Zhou X H, Xue D J, et al. Aero-geophysical integrated exploration theory, technology, method, equipment and application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [27] 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 等. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(10): 3629–3664.
Lyu Q T, Zhang X P, Tang J T, et al. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(10): 3629–3664.
- [28] 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 (1): 36–40.
Wang S 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 (1): 36–40.
- [29] 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 Geophysics, 2022, 65(1): 360–370.
- [30] 底青云, 方广有, 张一鸣. 地面电磁探测系统(SEP)研究 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3629–3639.
Di Q Y, Fang G Y, Zhang Y M. Research of the surface electromagnetic prospecting(SEP) system [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3629–3639.
- [31] Tang S, Liu H, Yan S, et al. A high-sensitivity MEMS gravimeter with a large dynamic range [J]. Microsystems & Nanoengineering, 2019, 5: 45.
- [32] Xie H T, Chen B, Long J B, et al. Calibration of a compact absolute atomic gravimeter [J]. Chinese Physics B, 2020, 29(9): 84–91.
- [33] Graser S, Hirschfeld P J, Kopp T, et al. How grain boundaries limit supercurrents in high-temperature superconductors [J]. Nature Physics, 2010, 6(8): 609–614.
- [34] Myoren H, Kobayashi R, Kumagai K, et al. Noise properties of digital SQUID using double relaxation oscillation SQUID comparator with relaxation oscillation resonant circuit [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(4): 1–5.
- [35] Kaczmarek L L, IJsselsteijn R, Zakosarenko V, et al. Advanced HTS dc SQUIDS with step-edge Josephson junctions for geophysical applications [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(7): 1–5.
- [36] Hato T, Tsukamoto A, Tanabe K. Portable cryostat with temperature control function for operation of HTS-SQUID at a higher slew rate [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1–4.
- [37] Wakana H, Adachi S, Hata K, et al. Development of integrated HTS SQUIDS with a multilayer structure and ramp-edge Josephson junctions [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 782–785.
- [38] Adachi S, Tsukamoto A, Hato T, et al. Production of HTS-SQUID magnetometer with ramp-edge junctions exhibiting lowered noise in AC biasing mode [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 1–4.