

11-20-2022

Trend Observation: Research Development Trend and Enlightenment of Superconducting Quantum Interference Device

Recommended Citation

(2022) "Trend Observation: Research Development Trend and Enlightenment of Superconducting Quantum Interference Device," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*, Vol. 37 : Iss. 11 , Article 22.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220412002>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol37/iss11/22>

This Information & Observation is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.

Trend Observation: Research Development Trend and Enlightenment of Superconducting Quantum Interference Device

趋势观察：

超导量子干涉器件 相关研究发展态势与启示*

超导量子干涉器件 (superconducting quantum interference device, SQUID) 是指由 1 个或 2 个约瑟夫森结 (Josephson junction) 和超导体组成的闭合环路构成的器件, 主要融合了约瑟夫森隧道效应和磁通量子化原理制作而成的高精度磁传感器。

目前, 量子科技发展已经成为我国未来在高技术领域发展的重要内容; 作为其中重要技术之一, SQUID 与应用系统技术突破将是未来我国高技术发展的重点领域; 全面梳理 SQUID 研究方向与态势将为我未来在相关领域的发展设计提供有力支撑。

1 超导量子干涉器件相关研究发展态势

SQUID 具有 4 个特点: ① 接近量子极限的磁探测灵敏度, 可以探测低至 $10\text{--}15\text{ T}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 的磁场信号; ② 很宽的频响特性, 超导体对磁场而非磁场变化率产生响应, 因而可以探测直流到 GHz 的信号, 通常测试系统的频响受读出电路的限制, 一般可达 $10\text{--}100\text{ MHz}$ 量级; ③ 很大的动态范围, 动态范围很容易达到 130 dB 水平, 磁信号幅度变化 $6\text{--}7$ 个

量级不会影响系统的工作稳定性; ④ 很高的线性响应特性^①。20 世纪 60 年代出现以来, 其相关研究一直在不断地持续开展。2012—2021 年, 该领域科学引文索引 (SCI) 与科技会议录索引 (CPCI) 数据库收录的 5 106 篇核心论文显示, 美国、德国、中国、日本、印度、法国、英国、俄罗斯、意大利等多个国家在此领域的研究非常活跃。作为最灵敏的磁探测器件之一, SQUID 在众多领域的应用研究已经取得显著进步, 发挥着难以替代的作用。

1.1 作为科学仪器, SQUID 广泛应用于基础科学研究

基于 SQUID 的低温射频放大器可具有接近量子极限的噪声水平, 在诸如暗物质探测等基础科学领域中扮演着重要的角色。美国、德国、加拿大、法国、瑞典、意大利等国家均涉足此领域。例如, 美国国家航空航天局执行的“GP-B 计划”, 利用 SQUID 等技术检验广义相对论, 测量地球引起的空间畸变和引力拖拽效应等; 瑞典查尔姆斯理工大学的科学家利用基于 SQUID 制作的实验设备, 在真空中捕获到不断出现和消失的光子, 成功将虚拟光子转变成真实光子, 制

*本文执笔人: 周涛 (中国科学院成都文献情报中心)、陆颖 (中国科学院成都文献情报中心)、孔祥燕 (宁波大学信息科学与工程学院)、史继强 (中国科学院成都文献情报中心)

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220412002

修改稿收到日期: 2022 年 11 月 1 日

① 郑东宁. 超导量子干涉器件. 物理学报, 2021, 70(1): 018502.

成了可测量的光，首次观测到被预言的动力学卡西米尔效应；2021年，美国斯坦福大学与普林斯顿大学等合作利用微波复用SQUID深入搜索由膨胀引力波产生的宇宙微波背景辐射的B模偏振^②；美国国家标准技术研究所和科罗拉多大学波德分校的研究人员开发了一种基于SQUID阵列的装置，可为许多应用提供具有越低能量的超低噪音检测，并进一步用于探索宇宙大爆炸的奥秘^③。

在科学实验室中，德国耶拿大学关于重力实验和相对性原理的研究将SQUID作为超高灵敏度的位置检测器^④。扫描SQUID显微镜是结合SQUID和扫描探针技术发展起来的高灵敏度微区磁信号探测仪器，已经应用于基础科学、纳米材料科学和分子生物技术等研究领域，可有效检测集成电路芯片缺陷等^⑤。

1.2 民用方面，SQUID 应用于无损检测、地球资源探测及医疗领域

SQUID测试技术与常规感应线圈法相比，在低频段具有明显的技术优势，并且具有空间分辨率高、可检测材料大深度缺陷和更细小缺陷、灵敏度更高等优点。基于高温超导体的SQUID在液氮下工作，整套装置更加轻巧、便携，可用于多种常规手段不易使用的场合，如检测飞机轮毂结构缺陷、药品中微小磁性颗粒。在无损检测时，为在干扰严重的环境中应用高温SQUID磁强计，常将SQUID做成磁梯度计来使用——它们在航空航天领域最常见的用途是用于维护航空和航天器部件的无损检测。

SQUID应用于地球资源探测已有超过30年的历

史，主要集中在矿产勘查、油气构造勘探等方面。我国未探明的矿产资源基本分布在深部矿或者隐伏矿中，而高灵敏度的SQUID磁探测系统对深层地质构造的磁探测能力独特，远强于传统感应线圈式探头，可在探寻深层资源方面发挥重要作用。近年来，国内相关单位也加强了相关方面的研究布局，在器件制备、系统集成和实地应用研究方面都取得了显著进展。中国科学院上海微系统与信息技术研究所成功研制出国际第2套航空低温超导全张量磁梯度测量系统，并进行了多次野外飞行测量，得到了航空超导全张量磁梯度分布图^⑥。

另外，由于SQUID以其极高的灵敏度在探测微弱的生物磁信号方面具有巨大的技术优势，脑磁图仪、心磁图仪、胎儿心磁图仪等基于SQUID的医疗设备相继研发并得到应用^①。鉴于SQUID的技术优势，发展并提高SQUID磁强计在生物磁测方面的应用研究，是世界学术界和工业界的研究热点方向。近年来，美国、德国、日本和中国在此领域研究多有布局，主要集中于脑磁图、心磁图等相关领域的系统研发与临床应用。

1.3 国防方面，SQUID 广泛应用于航空探潜反潜、未爆物探测、低频电磁波通信等领域

SQUID能探测水下潜艇，其中高温超导体制成的SQUID，可在液氮温度（77 K）下工作，可以测量几十T的磁场；并且，由于其体积小，可构成阵列，能准确地确定潜艇的位置、深度、运动轨迹和航向。除此之外，SQUID具有大带宽并且是矢量测量，因此是目前理想的航空反潜磁力仪。SQUID可在数公里外

② Vavagiakis E M, Ahmed Z, Ali A, et al. The simons observatory microwave SQUID multiplexing detector module design. *The Astrophysical Journal*, 2021, 922(1): 38-48.

③ Mates A J B, Becker D T, Bennett D A, et al. Simultaneous readout of 128 X-ray and gamma-ray transition-edge microcalorimeters using microwave SQUID multiplexing. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(6): 62601.

④ Vodel W, Nitzsche S, Koch H. High sensitive DC SQUID based position detectors for application in gravitational experiments at the drop-tower Bremen. *Space Forum*, 1998, 4(1/2): 167-181.

⑤ Cui Z. *The Scanning SQUID "Multi-Tool": Advanced Sensor Development and Novel Applications*. Stanford: Stanford University, 2019.

⑥ 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. *地球物理学报*, 2022, 65(1): 360-370.

捕捉到水中物体对地球磁场最微弱的干扰变化，其获取的信号通过海底光纤传入岸上的超高速信息处理中心，从而让反潜专家锁定敌方水下来袭平台的准确位置。由于 SQUID 具有较强的反潜探测技术优势，目前在反潜磁异常探测技术领域活跃的美国、德国、加拿大、澳大利亚、日本、英国等国家和地区十分重视其应用研发。

此外，针对战后大量战争遗留未爆物，可利用 SQUID 开展未爆物检测，属于磁法探测的范畴——其在弱磁检测领域具有巨大技术优势，可提供更高的灵敏度和矢量能力，比传统的磁场张量系统有更好的检测能力^⑦。目前，国内外相关专家已成功开展了相关实验研究，包括地下核爆武器探测、陆基浅埋未爆物探测、水雷检测（舰艇防护），以及水下移动平台未爆物探测。

低频电磁波对有耗介质（如岩石、土壤和海水等）有很大的穿透深度，是地下、水下和楼宇间建立无线通信的电磁媒介。低频电磁波技术的一个重要基础就是高灵敏度检测，SQUID 的优异性能在无线电频谱低频端具有极好的综合性能，在无线电频谱低端的开发和应用研究上具有很高的技术价值和发展潜力^⑧。目前，基于 SQUID 的低频无线电技术的应用开发仍然属于进展缓慢的技术领域，真正在无线电通信领域采用 SQUID 技术的成功应用并不多见。例如，尽管美国海军实验室很早已制作了低温 SQUID 甚低频天线，但目前仍在潜艇中进行实验验证。

1.4 SQUID 相关技术应用于量子计算等前沿新兴科学领域

量子计算机采用量子比特作为其基本单元，超导

量子计算被视为最有可能实现通用容错量子计算机的体系之一，在近十几年内迅猛发展。采用超导约瑟夫森结实现的超导量子比特以其在可控性、低损耗及可扩展性等方面的优势被认为是最有希望实现量子计算机的固态方式之一。SQUID 可用于构建超导量子比特，也可用于超导量子比特的低噪声读出，还可做成高灵敏度的单光子水平微波信号放大器来探测量子比特态的信息。超导量子比特和谐振腔构成的耦合系统，即腔量子电动力学系统，已成为超导量子计算研究的基本单元，并且超导多能级和谐振腔耦合的体系也是当前的研究热点之一。2021 年中国科学院量子信息重点实验室通过制备千 Ω 级高阻抗 SQUID 在微波谐振腔—半导体量子芯片耦合研究中取得重要进展，探测到半导体量子点受微波驱动调制的干涉新现象^⑨。而在量子退火架构中，射频 SQUID（rf SQUID）磁通量子位被广泛使用，例如商业平台 D-Wave 计算，rf SQUID 通量量子比特表现出高重现性、长相干时间和中等水平的非谐性。

基于双轨排列的负电感超导量子干涉器（nSQUID）这类新型量子比特的研究在耦合器件的量子态传输速度和基础物理问题的研究上有着很大的优越性。中国科学院物理研究所、清华大学等成功完成了 nSQUID 这类新型量子比特（包括位相量子比特）的制备和器件量子相干性的测量，发展出了一套成熟的超导量子比特制备的多层膜工艺，填补了国内在这一研究领域的空白^⑩。

高速超导存储器是发展超导高性能计算技术的核心器件之一。中国科学院上海微系统与信息技术研究所在 2020 年提出了一种新型三维纳米 SQUID 超导

⑦ Young J A, Keenan S T, Clark D A, et al. Development of a high temperature superconducting magnetic tensor gradiometer for underwater UXO detection. [2022-11-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5603585>.

⑧ 郑鹏, 刘政豪, 魏玉科, 等. HT_cSQUID 低频通信接收机和穿墙通信接收实验. 物理学报, 2014, 63(19): 198501.

⑨ Wang B C, Lin T, Li H O, et al. Correlated spectrum of distant semiconductor qubits coupled by microwave photons. Science Bulletin, 2021, 66(4): 332-338.

⑩ 赵士平, 刘玉玺, 郑东宁. 新型超导量子比特及量子物理问题的研究. 物理学报, 2018, 67(22): 228501.

存储器件可以从原理上突破超导存储器的集成度瓶颈^⑪。

2 我国量子科技相关政策与趋势

量子科技发展一直是我国高度重视的高技术领

域，超导量子干涉器件相关技术作为量子科技的重要组成部分，一直备受关注。我国自2006年就开始布局量子科技产业发展，多年来已经发布多项政策规划支持指导量子科技高速发展（表1）。

通过梳理我国量子技术相关的政策规划，其主要

表1 2006年以来中国量子科技领域相关重要政策

Table 1 Important policy of quantum science and technology in China since 2006

年份	政策名称	相关内容
2006年	《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》	重点研究量子通信的载体和调控原理及方法，量子计算，电荷—自旋—相位—轨道等关联规律以及新的量子调控方法，受限小量子体系的新量子效应，人工带隙材料的宏观量子效应，量子调控表征和测量的新原理和新技术基础等
2011年	《国家“十二五”科学和技术发展规划》	突破光子信息处理、量子通信、量子计算、太赫兹通信、新型计算系统体系、网构软件、海量数据处理、智能感知与交互等重点技术，攻克普适服务、人机物交互等核心关键技术。
2013年	《国家重大科技基础设施建设中长期规划（2012—2030年）》	建设未来网络试验设施，主要包括：原创性网络设备系统，资源监控管理系统，涵盖云计算服务、物联网应用、空间信息网络仿真、网络信息安全、高性能集成电路验证以及量子通信网络等开放式网络试验系统
2015年	《中国制造2025》	积极推动量子计算、神经网络等发展
2016年	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》	着力构建量子通信和泛在安全物联网
2016年	《国家创新驱动发展战略纲要》	在量子通信、信息网络、智能制造和机器人、深空深海探测、重点新材料和新能源、脑科学、健康医疗等领域，充分论证，把准方向，明确重点，再部署一批体现国家战略意图的重大科技项目和工程
2016年	《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》	布局太赫兹通信、可见光通信等技术研发，持续推动量子密钥技术应用。
2016年	《“十三五”国家信息化规划》	加强量子通信、未来网络、类脑计算、人工智能、全息显示、虚拟现实、大数据认知分析、新型非易失性存储、无人驾驶交通工具、区块链、基因编辑等新技术基础研发和前沿布局，构筑新赛场先发主导优势
2016年	《信息通信行业发展规划（2016—2020年）》	发挥互联网企业创新主体地位和主导作用，以技术创新为突破，带动移动互联网、5G、云计算、大数据、物联网、虚拟现实、人工智能、3D打印、量子通信等领域核心技术的研发和产业化
2017年	《“十三五”国家基础研究专项规划》	认识和了解量子世界的基本现象和规律，通过对量子过程进行调控和开发，在关联电子体系、小量子体系、人工带隙体系等重要研究方向上建立突破经典调控极限的全量子调控技术，实现量子相干和量子纠缠的长时间保持和高精度操纵，实现可扩展的量子信息处理
2018年	《关于全面加强基础科学研究的若干意见》	加快实施量子通信与量子计算机、脑科学与类脑研究等“科技创新2030—重大项目”
2019年	《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》	加快量子通信产业发展，统筹布局和规划建设量子保密通信干线网
2020年	《关于科技创新支撑复工复产和经济平稳运行的若干措施》	大力推动关键核心技术攻关，加大5G、人工智能、量子通信、脑科学、工业互联网、重大传染病防治、重大新药、高端医疗器械、新能源、新材料等重大科技项目的实施和支持力度
2021年	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	加快布局量子计算、量子通信、神经芯片、DNA存储等前沿技术

^⑪ Chen L, Wu L L, Wang Y, et al. Miniaturization of the superconducting memory cell *via* a three-dimensional Nb nano-superconducting quantum interference device. *ACS Nano*, 2020, 14(9): 11002-11008.

存在以下3个方面的趋势。

(1) 对于量子科技的顶层设计越来越频繁。近年来,国家对量子计算技术、量子精准测量技术等关键技术的研发与产业布局越来越重视。2018年以来,国家出台多项政策推进量子技术发展,形成从领域顶层设计到整体学科布局的全面性顶层规划。

(2) 量子科技相关政策规划层级越来越高。量子科技越来越得到国家重视,量子计算、量子通信、量子检测等一批关键技术 in 规划中不断提出,国家先后组织召开专题会进行学习、研讨、布局。

(3) 量子科技规划的体系化程度越来越高。早期规划主要集中在单一科技规划中,近年来更多地涉及社会发展、金融创新、区域整合等各个方面,突出显示量子科技在社会生产活动中的重要作用。

3 我国发展 SQUID 相关技术的建议

SQUID 技术是我国推进高精尖仪器研发,打破国外垄断的重要技术领域之一。为进一步促进我国在该领域突破一些关键技术,加强应用场景的建设,提升应用范围与水平,提出5个方面的建议。

(1) 建立国家超导电子学工程应用中心或中国科学院超导量子干涉器件工程应用中心。根据 SQUID 在军用、民用等不同应用场景,①发现、拓展并构建超导量子干涉器件在我国国民经济中的应用场景,开展场景研究与分析;②以应用场景为导向,解决突破关键技术封锁与应用的技术问题,联合社会力量,开展技术攻关;③强化体制机制建设,构建社会、政府、科研共同参与,政府指导、社会支撑、科研机构实施

的面向国家任务的灵活管理与经济分配机制。

(2) 加强 SQUID 关键技术研发。不断改进 SQUID 设计、采用并开发新型超导材料和小型化支撑技术,以促使 SQUID 在未来得到更广泛和成熟的应用。低温 SQUID 所需的低温环境及产生的巨大运营成本是限制其应用推广的一个重要因素,采用高温超导材料制备的器件可以在很大程度上减少这种限制的影响。因此,不断改进高温 SQUID 制备技术,提升器件性能及一致性是未来 SQUID 应用的关键之一。

(3) 进一步拓展深化 SQUID 应用场景。SQUID 技术的发展也依赖于新的创新应用的开发。例如,脑科学研究越来越受到重视,基于 SQUID 的脑磁图测量有可能发挥更大的作用。量子计算的热潮也促进和拓展了 SQUID 器件的应用,建议进一步深化 SQUID 在量子计算、超导高性能计算等前沿新兴领域中的技术应用。

(4) 建立依托中国科学院的全国重点实验室,聚集科研力量。汇聚中国科学院相关领域人才,以全国重点实验室重组为契机,将相关 SQUID 的研发纳入新全国重点实验室的重要研究方向;依托国家量子研发在北京、上海、深圳、合肥等地的布局,将中国科学院相关力量向长三角整合。

(5) 以 SQUID 高端平台建设为契机,探索建立中国科学院围绕关键技术研发与市场整合的新机制。进一步凝聚高校、研究所、企业等的力量,探索构建新的市场技术研发、利益分配、人才交流等机制,构建符合国家发展需要的“高、精、尖”产业技术研发模式和生态发展格局。

■责任编辑:文彦杰