

量子测量技术与产业发展白皮书

(2022)

量子信息网络产业联盟

2023年5月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议等，均不构成投资或法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归量子信息网络产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

量子信息网络产业联盟

联系电话：010-62300592

邮箱：qia@caict.ac.cn

编制说明

量子测量技术利用量子态以及它们对环境变化的高度敏感性实现物理量的精密测量。未来量子传感器将在许多领域大显身手，提升信息获取能力，从医疗诊断和成像、高精度导航、地球监测，到未来的物联网应用。量子测量技术路线繁多，但都具有独特的性质，使其适用于特定的应用场景。各种技术体系具有不同的成熟度：一些产品已经商业化，而某些样机仍处于开发的早期阶段。

我国量子测量领域具备良好的研究与应用实践基础，总体发展态势良好，未来有望进一步取得更多技术研究、应用探索与产业培育新成果。为对量子测量领域总体发展态势、科研、应用及产业的进展情况和热点问题，及技术演进趋势和应用前景等进行持续跟踪研判，联盟组织研究编写了 2022 年版《量子测量技术与产业发展白皮书》，供业界参考。

报告编写单位：中国信息通信研究院、中国计量科学研究院、国仪量子（合肥）技术有限公司、中国电子科技集团公司电子科学研究院、北京航空航天大学、山东国耀量子雷达科技有限公司、北京未磁科技有限公司、北京量子信息科学研究院

报告编写组成员：张萌、万传奇、曹士英、张雪松、张春磊、刘奕彤、李文文、丁铭、申屠国樑、杨仁福

前 言

量子测量技术作为量子信息领域的一个重要分支，受到广泛的关注，其测量精度有望突破经典物理的极限，未来将在基础理论研究、航空航天、生物医药、惯性制导、能源勘探等诸多领域应用，因此受到各国政府的关注，竞相布局，加大研究开发的力度。近年来，科研领域保持活跃，性能指标不断提升，同时与生物医疗、地质探测等诸多领域相结合涌现出一系列应用成果案例。

本报告对量子测量领域的总体发展态势、关键技术研究、应用场景探索和产业发展进行分析探讨，阐述我国面临的机遇与挑战，为我国量子信息技术发展提供策略建议。

本研究报告共分为五章，相关章节内容安排如下：

第一章：量子测量领域概况。介绍量子测量技术的原理概念分类、意义重要性、各国政策项目布局以及文献与知识产权分析等。

第二章：科研进展与成果。介绍量子测量领域各技术分支近年来科研领域重要热点、进展、成果和趋势。

第三章：应用场景探索。介绍量子测量领域近年来应用领域重要热点、进展、成果和趋势。

第四章：产业发展动态。介绍量子测量领域近年来产业领域重要热点、进展、成果和趋势。

第五章：发展趋势建议。总结量子测量领域发展趋势，梳理我国发展中面临的主要问题，并提出意见与建议。

目录

一. 量子测量领域概况	1
(一) 量子测量更准确、更精细、更可靠	1
(二) 各国政府布局加快推动量子测量发展	3
(三) 量子测量科研与技术创新持续活跃	10
二. 科研进展与成果	18
(一) 多种技术路线面向不同应用场景	18
(二) 光钟不确定度突破 $1\text{E-}19$ 量级	24
(三) 量子时频传递突破飞秒量级	27
(四) 量子磁测量取得诸多科研进展	28
(五) 里德堡量子天线测量进展迅速	31
(六) 量子重力测量工程化日趋成熟	33
(七) 量子成像实现“超长距”“非视域”	35
(八) 基于纠缠的量子测量提升精度	37
三. 应用场景探索	39
(一) 量子测量为无创检测和诊断提供新手段	39
(二) 光量子雷达“软目标”探测助力环境治理	43
(三) 量子目标识别与探测“看得远”、“辨得清”	44
(四) 量子重力仪将成为测绘勘探的新方案	46
(五) 量子测量赋能行业数字化转型	47
(六) 量子痕量检测开拓新型应用场景	49
四. 产业发展动态	50
(一) 量子测量产业稳步发展，资本持续注入	50
(二) 从样机到产品，量子测量企业持续发力	52
(三) 标准研究逐步开展，尚未形成标准体系	54
五. 总结与发展	57

图目录

图 1 量子测量技术体系框架	2
图 2 论文产出总体趋势	11
图 3 论文产出主要国家分布	11
图 4 主要机构论文产出年代分布	12
图 5 Web of Science学科类别	13
图 6 关键词聚类	14
图 7 专利申请数量年度趋势	15
图 8 专利申请数量年度趋势	15
图 9 公开国年度分布	16
图 10 主要技术研发机构分布	17
图 11 技术概念聚类分布	18
图 12 量子测量技术主要物理路线	19
图 13 金刚石中氮-空位 (NV) 色心原子结构和能级结构	21
图 14 SQUID结构示意图	23
图 15 光钟不确定度指标以及未来的应用场景	25
图 16 欧美和中国主要量子测量企业分布	54

表目录

表 1 2021年1月-2022年12月量子测量领域投融资情况	51
表 2 量子测量国家标准计划项目	56

一、量子测量领域概况

（一）量子测量更准确、更精细、更可靠

测量传感技术是现代信息技术的重要组成部分，与通信技术、计算技术构成信息技术产业的三大支柱。如果将计算机比作大脑，将通信网络比作神经，那么传感器就相当于五官，获取各方面的原始信息。随着科技的发展和应用领域的扩展，对测量传感技术的要求也日益严苛，极弱信号的探测、纳米级/分子级的空间分辨率、超宽的动态范围、芯片级的模块尺寸等等，经典的测量传感技术在某些特定场景中难以满足。

量子测量，也称量子传感，是指利用量子特性获得超高精度的传感测量技术，即基于对中性原子、离子、光子等微观粒子系统的调控和观测，提升传感测量的性能。量子体系的状态极易与外界环境相互耦合从而发生改变，量子计算中为了保护量子比特的状态，延长相干操作的时间需要一系列严苛的外围保障措施，比如接近绝对零度的环境温度等。如果将量子体系的“敏感性”加以利用，可以利用量子体系状态的改变，例如能级跃迁、原子级别相干性等，以更高灵敏度和精度，实现对外界多种物理量的探测，即测的更准确。同时，由于量子测量的“探针”可以是原子团，甚至单个原子、离子或光子，探测与测量的空间分辨率可以达到细胞，甚至分子的尺度，即测的更精细。此外，量子测量是利用微观粒子的固有性质，如原子的能级结构和相

干性等，测量物理量，不需要依靠外部的计量校准和溯源，具有良好的复现性和统一性，即测的更可靠。

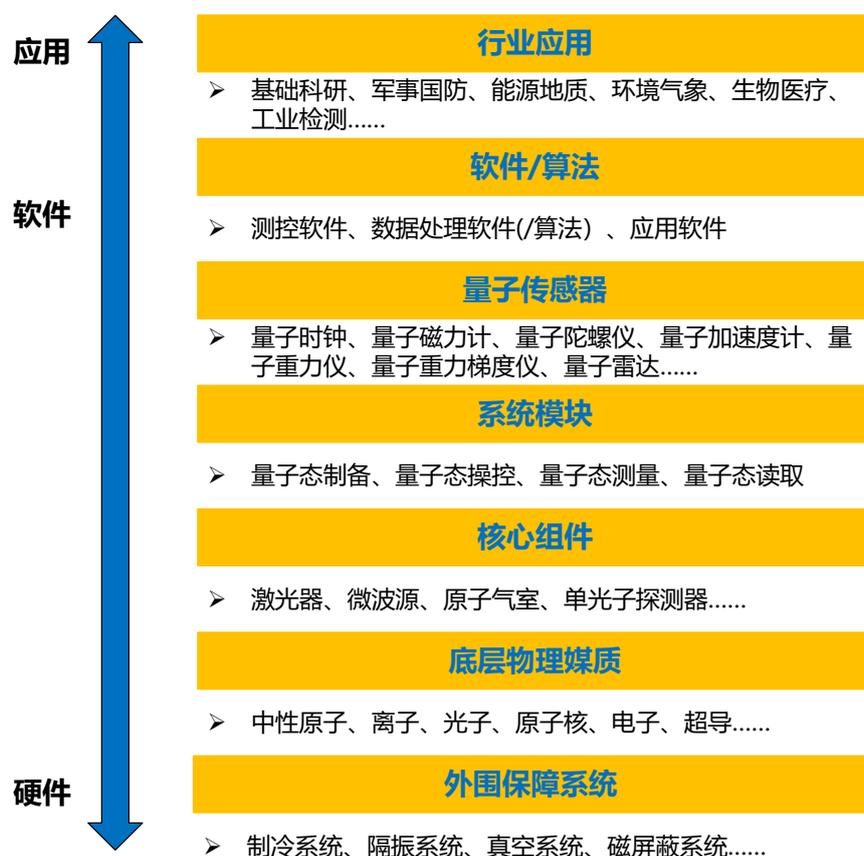


图 1 量子测量技术体系框架

量子测量技术体系架构如图 1 所示。底层为实现量子测量的量子体系，或称为物理媒质，以及外围的保障系统。物理媒质包括原子、离子、电子、光子等微观粒子体系。根据不同物理媒质的不同性质可以实现不同物理量的测量。包含物理媒质的集成器件是量子测量装置的核心，比如原子气室、NV 色心探针等。其他核心器件还包括用于量子态产生、调制、探测的器件，包括激光器、微波发生器、光电探测器等。由核心器件和必要的光学、电学器件组件共同组成系统模块，

进一步组成量子测量装置（或称为量子传感器）。为了实现精准的控制以及数据的处理分析，完整的量子测量装置或系统还包括必要的软件功能模块。

近年来在实验验证和样机开发上取得了诸多成果。硬件系统样机开发方面，国内外高校和研究机构研制的原理实验平台日趋成熟，实验上能够获得超越传统测量技术的测量精度，性能指标不断提升。部分技术方向正逐步探索工程化和落地应用。软件算法开发方面，目前研究的热点在于数据处理算法，将 AI 等技术对测量数据挖掘分析，更有效地获得精确测量结果；通过对参数化的量子测量体系迭代优化，亦可获得更高的测量精度；应用软件方面目前研究较少，未来商用落地和产业化需要开发简单的交互操控系统和直观的结果展示界面。总体而言，量子测量进入从基础科研向商业落地转化关键期。

（二）各国政府布局加快推动量子测量发展

量子测量的对象涵盖电磁场、加速度、角速度、重力应力、时间频率等诸多物理量，未来将在基础理论研究、航空航天、生物医药、惯性制导、能源勘探等诸多领域应用，特别是很多技术涉及军事国防领域，因此受到全球各国政府的关注，近年来竞相布局，加大科研投入的力度。

美国早在 2016 年就提出了十大“Big Ideas”作为长期研究计划，其中包括“量子飞跃：引领下一次量子革命”计划，着眼于实现更高效

的计算、通信、传感和模拟；国防部高级研究计划局（DARPA）设立小企业创新研究（Small Business Innovation Research, SBIR）和小企业技术转让（Small Business Technology Transfer, STTR）项目，支持包括量子传感与计量在内的十余个技术领域的研究。2020年7月，美国国家科学基金会（NSF）和白宫科学技术政策办公室（OSTP）宣布建立三所新的“量子飞跃挑战研究所”¹。这些研究所将获得总计7500万美元的资金，用于量子信息科学研究与开发。其中，科罗拉多大学博尔德分校的研究所，主要研究利用量子态增强传感和分布，以及在精密测量中广泛应用量子传感技术²。2020年12月，美国空军拨款3500万美元量子研究资金，AOSense等8家量子测量企业获得资金支持。DARPA启动的Micro-PNT计划也支持了芯片级原子钟、集成微型主原子钟（冷原子钟）、量子陀螺等领域的研究，开发小型化、芯片化的定位导航授时系统，重点研究和发展无源定位导航技术，确保军队能够在全球定位导航系统拒止条件下保持高精度的定位导航授时能力。2021年8月，美国能源部提供近5400万美元资助包括低温纳米级量子传感在内的10个项目³。2021年9月，美国国家科学基金会（NSF）宣布再成立两个新的“量子飞跃挑战研究所”，以推进量

¹ https://www.nsf.gov/news/special_reports/announcements/072120.jsp

² https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2016244

³ <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-54-million-increase-energy-efficiency-microelectronics-technologies>

子生物传感技术和量子模拟研究⁴。其中，量子生物传感技术研究所将确定新型的量子生物传感系统并开发用于观察和发现的下一代工具。2021年11月，美国空军研究实验室(AFRL)宣布资助10亿美元用于开发“空间和核先进原型、实验和技术”，包括量子传感器⁵。2022年3月，美国国家科学技术委员会量子信息科学小组委员会发布了《Bring Quantum Sensors to Fruition》的战略报告⁶，近期目标是开展量子测量技术成熟度和可行性研究，确定战略价值高的重点研究方向，加大投入力度，同时量子测量研究人员与潜在用户深度合作，联合攻关，加快产业化进程和应用模式探索。中长期目标是完成核心组件集成化和研发基础设施建设，并逐步建立量子测量标准化体系。

欧洲量子技术旗舰计划⁷成立于2018年，目的是将研究机构、行业和公共资助者聚集在一起，促进欧洲量子产业的发展，使量子研究成果成为商业应用和颠覆性技术。2022年11月，欧盟发布的量子旗舰计划战略研究和行业发展报告⁸中指出，量子传感与测量技术主要聚焦于压力、温度、重力、磁场测量，以及时钟同步、定位导航、超高分辨成像等领域，并在将医学、物理、化学、生物学、地球物理、气候科学、环境科学等应用领域产生重大的影响。并计划在2030年

⁴ https://www.nsf.gov/news/special_reports/announcements/090221.jsp

⁵ <https://afresearchlab.com/news/afrl-awards-record-breaking-1b-contract-to-space-dynamics-laboratory/>

⁶ <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2022/03/BringingQuantumSensortoFruition.pdf>

⁷ <https://qt.eu/>

⁸ https://qt.eu/app/uploads/2022/11/Quantum-Flagship_SRIA_2022.pdf

之前实现部分量子传感器的商业化，同时大力发展量子传感器网络以及空间量子增强传感器。欧洲量子旗舰计划启动了 20 个研究项目，其中有 4 个项目直接与量子测量相关，分别是 macQsimal（用于传感和计量应用的微型原子蒸气池量子器件开发），MetaboliQs（利用室温金刚石量子动力学实现安全的多模式心脏成像），iqClock（集成化量子时钟）和 ASTERIQS（金刚石量子传感技术）。

英国量子技术战略委员会启动国家量子技术计划⁹，投资 1.2 亿英镑建立 4 个量子技术中心。其中，英国国家量子技术中心将聚焦量子传感器和测量技术，应用于国防、地球物理学、医学诊断、建筑、海军导航、数据存储主机、健康监测、游戏接口、GPS 替换、数据存储产品、本地网络定时和重力成像等领域，量子成像中心将聚焦新型超高灵敏度相机，包括单光子可见光和红外摄像机、单像素摄像机、极端时间分辨率成像、三维轮廓、高光谱、超低通量隐蔽照明、超视距成像和局部重力场成像等技术领域。并计划在五年内为四个中心投资 9400 万英镑，刷新了量子技术中心，以保持英国通过英国国家量子技术计划在量子技术方面建立的技术研究领导地位。2022 年 8 月，英国研究与创新署（UKRI）宣布将对本国的 17 个量子研究新项目投入 600 万英镑，致力于利用量子计算、成像、传感、模拟等技术解决一些基础研究问题，包括反物质引力的量子传感、用量子光子学模拟高

⁹ <https://uknqt.ukri.org/>

能物理、量子增强干涉测量等¹⁰。

德国实施的“量子技术——从基础到市场”计划¹¹，将在 2018—2022 年间为量子技术研发、产业化拨款 6.5 亿欧元，重点研究包括用于高性能高安全数据网络的测量技术在内的诸多技术领域，为量子技术的发展打下牢固的学术和经济基础。2022 年 6 月，德国联邦教育和研究部（BMBF）公布了“量子系统研究计划”¹²，在未来十年将德国带入欧洲量子计算和量子传感器领域的领先地位，并提高德国在量子系统方面的竞争力。该计划的最终目标是研究和进一步发展量子系统、将量子系统用于实际应用以及塑造量子生态系统。研究重点包括量子计算机、量子通信、基于量子的测量技术、量子系统的基础技术。

法国 2021 年发布《量子技术国家战略》¹³，计划在 2021-2025 期间投资 18 亿欧元，用于发展量子传感器在内的量子信息领域，并推动相关产业的教育培训工作。

加拿大自然科学和工程研究理事会（NSERC）2021 年 7 月宣布与欧盟委员会开展合作¹⁴，计划开展包括量子测量在内的量子技术研究，双方将各自提供约 400 万欧元的资金支持联合研究项目。

¹⁰ <https://www.ukri.org/news/6-million-to-spur-the-uks-quantum-leap/>

¹¹ <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Federal-Government-Framework-Programme-Quantum-Technologies-2018-bf-C1.pdf>

¹² <https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/forschung-fuer-arbeit/quantensysteme/quantensysteme.html>

¹³ https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/01/dossier_de_presse_quantique_vfinale.pdf

¹⁴ https://www.nserc-crsng.gc.ca/Media-Media/NewsDetail-DetailNouvelles_eng.asp?ID=1262

芬兰国家技术中心 2022 年 1 月启动量子技术工业(QuTI)项目¹⁵，以加快芬兰量子技术的进步，将在量子计算、通信和传感设备等方面开发新的组件、制造和测试解决方案以及算法，以满足量子技术的需求。QuTI 联盟由 12 个合作伙伴组成，部分由芬兰商业部出资，总预算约为 1000 万欧元。

日本文部省发布量子飞跃旗舰计划（Q-LEAP）¹⁶，资助光量子领域的科学研究，重点支持包括量子测量和传感器在内的 3 个技术领域的研发，每个技术领域设立 1 个基础研究项目和 2 个旗舰项目。基础研究项目每年资助 2000 万~3000 万日元，旗舰项目每年资助 3 亿~4 亿日元。在量子测量和传感器领域，设置了固体量子传感器及量子光传感器 2 项旗舰项目。

在我国，中共中央政治局于 2020 年 10 月 16 日就量子科技研究和应用前景举行第二十四次集体学习，中国科学院院士薛其坤进行讲解，提出了意见和建议。习近平总书记为当前和今后一个时期的我国量子科技发展做出重要战略谋划和系统布局。十九届五中全会发布的“十四五”规划建议中也提到对量子信息等前沿领域实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。2020 年 12 月以来，各省市陆续出台“十四五”规划与建议，提出加快突破核心关键技术，前瞻布局量子科技。

¹⁵<https://www.vttresearch.com/en/news-and-ideas/major-project-brings-together-finnish-industry-and-research-quantum-technology>

¹⁶ http://www.mext.go.jp/b_menu/boshu/detail/1402996.htm

安徽省特别提到要加快形成量子信息产业创新链，打造具有全球影响力的“量子中心”，并且积极布局空地一体量子精密测量实验设施。2022年1月，国务院发布了《计量发展规划(2021—2035年)》¹⁷，提出在2035年建成以量子计量为核心、科技水平一流的国家现代先进测量体系。文中指出“量子度量衡”计划的实施重点是基于量子效应和物理常数的量子计量技术，以及计量基准、计量设备的微型化、芯片化技术，形成核心设备的开发能力，并加快量子测量设备的产品研发和落地应用。同月，在国务院印发的《“十四五”数字经济发展规划》¹⁸中，明确提出要瞄准传感器、量子信息等战略性前瞻性领域，提升数字技术的基础研发能力。注重基础软硬件、核心电子元器件、关键基础材料和生产装备的供给水平，增强关键产品自给保障能力。

由于量子测量技术涉及军事国防等敏感领域，以上信息统计并不完善。但是总体来看，各国的量子信息政策、法案、重大项目中均对量子测量技术与产业进行了布局，可见其重要性和广阔的应用前景。我国在量子测量领域与国际先进水平尚有差距，但重视程度逐渐加大，近年来在多个方向实现突破，未来也将加强量子测量领域系统布局谋划。

¹⁷ http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm

¹⁸ <https://hbsjzxh.hebtu.edu.cn/a/2022/01/15/AEC9F80426664575AF0AC751C44DECA4.html>

(三) 量子测量科研与技术创新持续活跃

面对日趋激烈的国际竞争，量子测量已经成为全球科技竞争的战略要地，世界主要国家已将量子测量上升到国家战略层面并高度重视，各国不断加大资金投入和政策支持，在量子测量基础研究、试验验证以及技术应用等方面开展研究，目前呈现出中美领跑、各国争相角逐的竞争格局。

基于文献数据、专利数据等的客观分析有助于识别量子测量领域的机遇和挑战，做好量子变革时代的战略布局，把握创新方向。因此，本报告基于 SCI-EXPANDED 和 Orbit 专利数据库 2000 年至 2022 年的数据（检索时间 2023 年 1 月 30 日），通过文献计量和知识可视化技术，分析全球量子测量技术基础科研态势。

1. 文献分析

(1) 论文产出总体趋势分析

近年来，全球量子测量领域科研论文数量持续上升。美国的研究论文数量处于领先地位，中国在量子测量领域的研究论文数量排名第二，仅次于美国，并在 2015 年首次超越美国，之后论文数量持续领先美国。德国、日本、英国等紧随其后。这离不开我国自近年来对量子测量领域的持续研发投入，以及相关政策支持。论文产出总体趋势如图 2 所示（注：2022 年论文数量有所下降，是由于 SCI-EXPANDED 数据库收录具有一定迟滞性，2022 年部分论文数据暂未收录），论文

产出主要国家分布如图 3 所示。

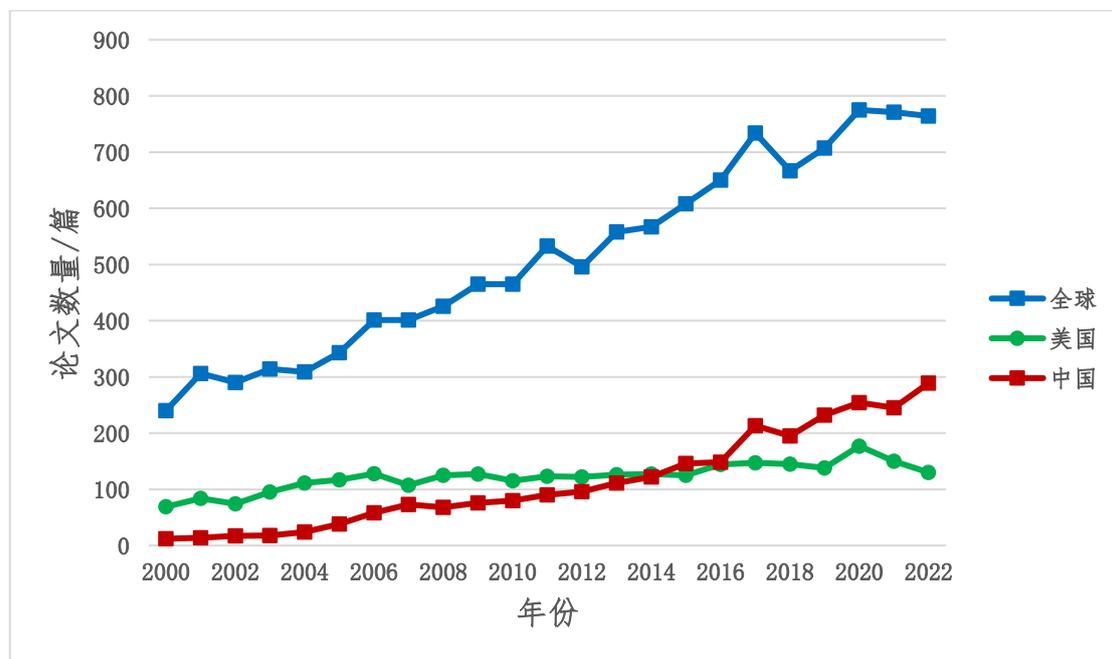


图 2 论文产出总体趋势

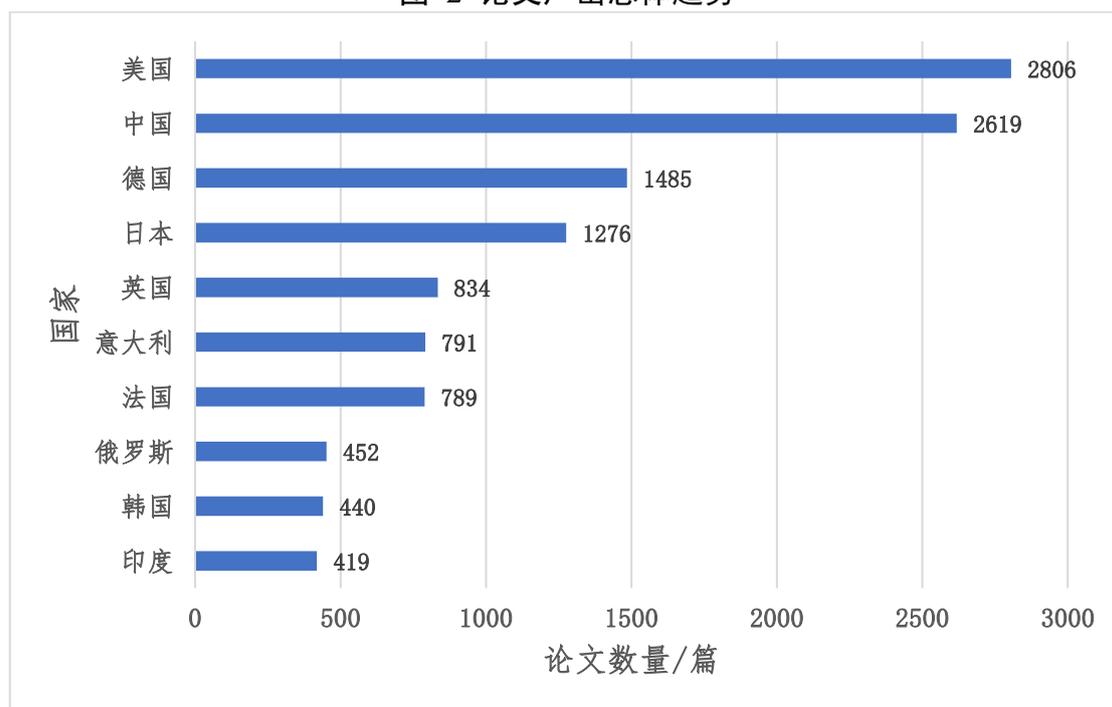


图 3 论文产出主要国家分布

(2) 研究机构分析

国外在量子测量领域的主要科研机构有法国国家科学研究中心、

美国加州大学、意大利国家研究委员会、美国国家标准技术研究所等。近年来，我国的中国科学院、中国科学技术大学等单位也持续开展科研攻关，位列量子测量领域研究论文发表数量的国际前沿行列。主要机构论文产出年代分布如图 4 所示。

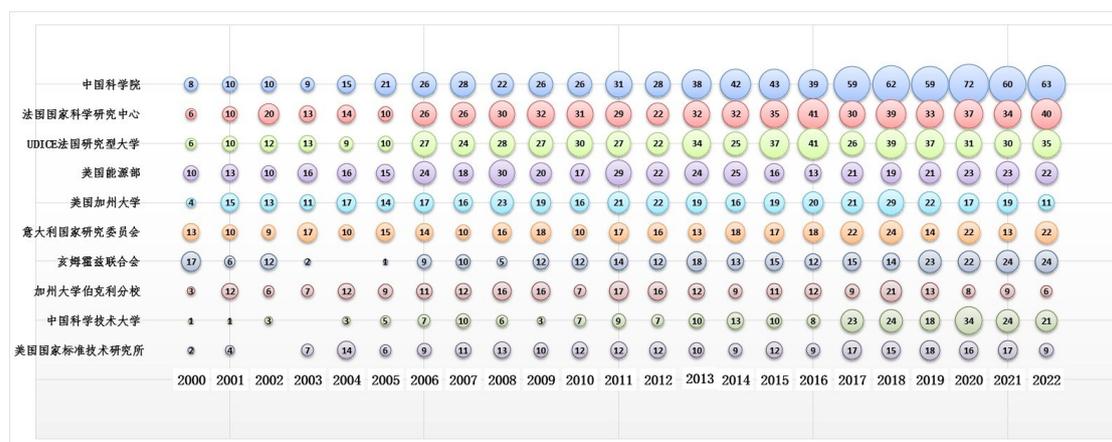


图 4 主要机构论文产出年代分布

(3) 研究学科和热点分析

量子测量相关的学术论文多分布在物理学、光学材料科学和工程等领域，同时与计算科学、数学、化学等领域也有较多关联，涵盖的范围也比较广，交叉特点显著。Web of Science 学科类别如图 5 所示。

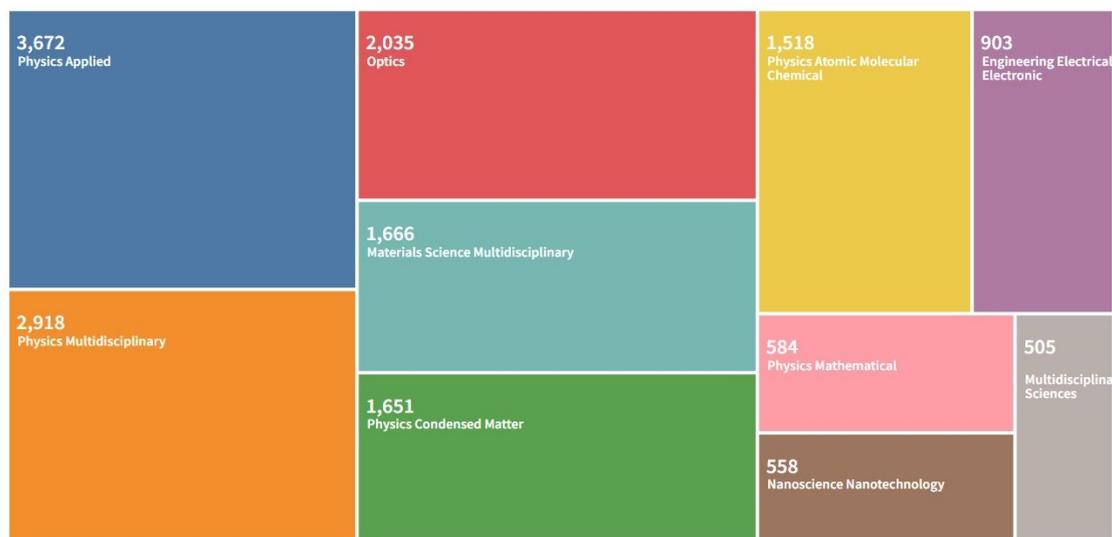


图 5 Web of Science 学科类别

量子测量作为多学科交叉前沿领域，关键词聚类如图 6 所示，图中节点大小代表关键词频次高低，连线粗细代表共现关系强弱，不同椭圆中的点线代表不同的聚类。其中呈现出 4 个主要的聚簇，①绿色表示量子调控和量子纠缠等，关键词有纠缠(entanglement)、量子态(state)等；②蓝色表示量子传感器的应用，关键词有超导量子干涉仪(SQUID)、原子磁力计(atomic magnetometer)等，同时，还有数据读出技术(readout)及其噪声(noise)等，噪声水平是限制传感器实际应用的直接因素；③黄色表示高分辨的原子光谱和磁共振波谱，关键词有原子光谱(light、spectroscopy)、核磁共振(nuclear-magneticresonance)等；④红色表示量子磁场测量相关技术，关键词有磁性(magnetic properties)、纳米颗粒(nanoparticles)等。此外，量子计量(quantum metrology)、氮空位色心(nitrogen-vacancy centers)、自旋系统(spin、electron spin、single spin、solid-state spin)等也是主要研究主题。

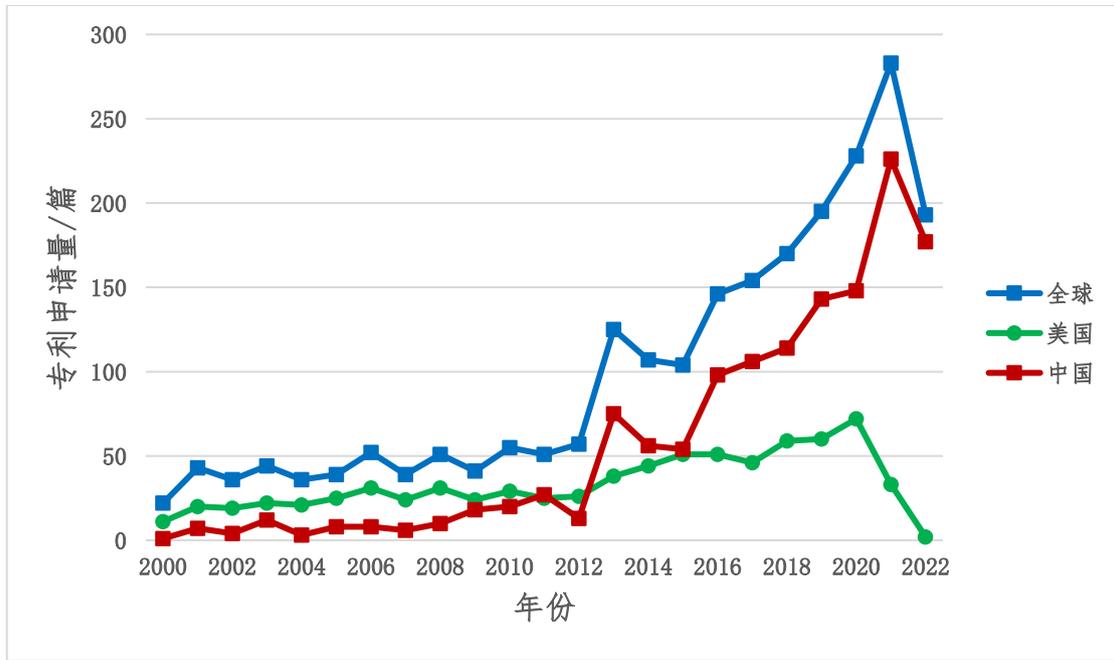


图 7 专利申请数量年度趋势

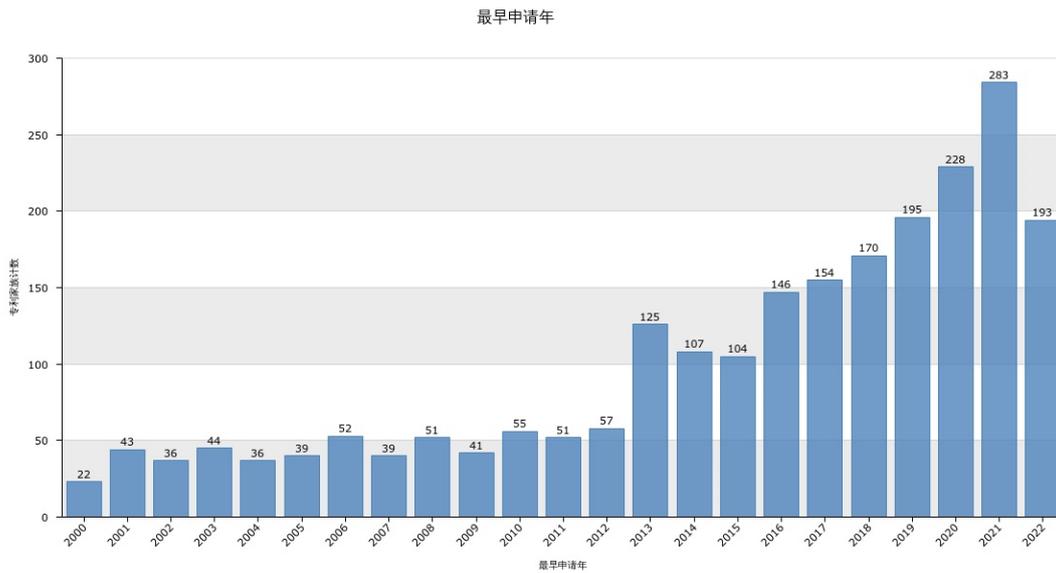


图 8 专利申请数量年度趋势

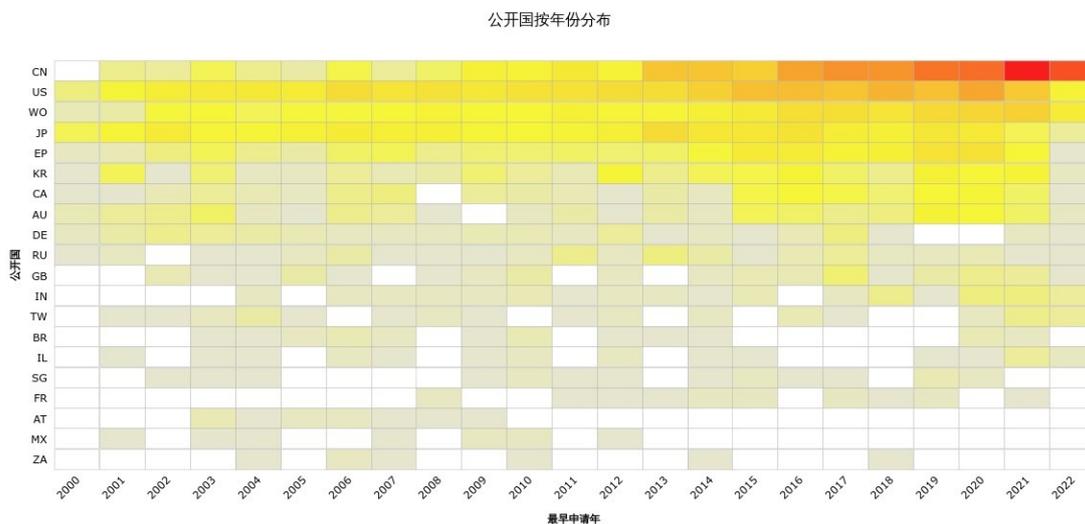


图 9 公开国年度分布

(2) 技术研发国家及机构分析

基于一个专利家族中优先权专利申请人所在的国家，统计其所在国的专利申请数量，可知某个国家在本领域的技术研发状况。总体上，专利申请最多的国家是中国，为 1138 件；第二是美国，为 547 件，其次是日本，为 282 件。可见量子测量领域技术集中度较高，专利技术创新主要集中在以上三个国家。

美国和日本早期在量子测量领域专利申请量较多，随着我国在量子测量领域的基础研究和应用探索的持续深入，我国专利申请逐渐超越美日，处于国际领先地位。美国量子测量领域专利申请兴起较早，但是随后发展较为平缓。中国虽起步稍晚，但近年来专利申请量逐年递增且增速高于美国，开始进入高速发展阶段，显示出中国对于量子测量领域研发投入显著增多。

量子测量领域的创新主体都以企业和科研院所为主，专利集中离

散程度较为一致，全球主要申请机构有：合肥本源量子计算科技有限责任公司、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、精工爱普生、北京航空航天大学、诺斯罗普·格鲁曼公司、韩国标准与科学研究所等。主要技术研发机构分布如图 10 所示。

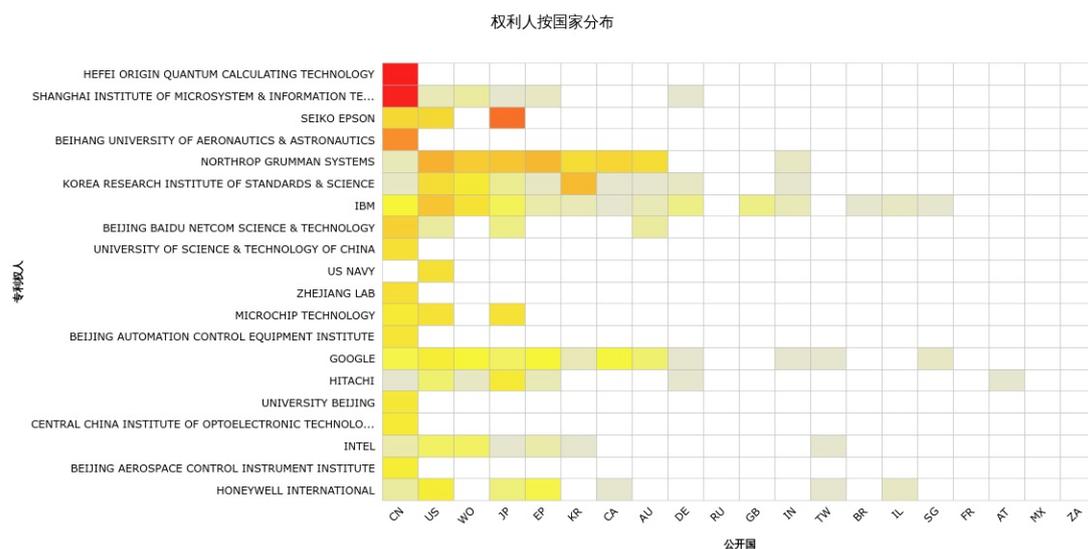


图 10 主要技术研发机构分布

(3) 市场技术布局分析

IPC 分类号反映了该项专利的研究内容和技术主题，全球量子测量领域专利技术主要集中在 G01R-033（测量磁变量的装置或仪器）、G06N-010（量子计算机，例如基于量子力学现象的计算机系统）、H01L-039（应用超导电性的或高导电性的器件，专门适用于制造或处理这些器件或其部件的方法或设备）、A61B-005（用于诊断目的的测量）、H03L-007（频率或相位的自动控制）等类。相关专利涉及超导量子干涉装置、磁场、约瑟夫森结、量子、磁传感器、光电探测器、光源、激光束等技术方向。技术概念聚类分布如图 11 所示。



图 11 技术概念聚类分布

二、科研进展与成果

（一）多种技术路线面向不同应用场景

量子测量近年来受到广泛的关注，也是公认的距离实用化最近的量子科技领域之一。不同的研究领域或不同的应用场景下对这一技术的称呼略有差异。从科研角度，通常将其称作“量子精密测量”或简称“量子测量”；从样机、产品或装备角度，存在“量子传感器”、“量子测量设备”的说法；从应用的角度，这一技术领域被称为“量子感知”、“量子计量”。再根据应用领域进一步细分，还包括用于时间频率基准和同步的“量子时钟（原子钟/离子钟）”、用于重力探测的“量子重力仪（原子重力仪）”、用于磁场检测的“量子磁力计（原子磁力计）”、用于惯性定位导航的“量子陀螺仪（原子陀螺仪）”、“量子加速度计（原子加速度计）”、用于目标识别和成像的“量子雷达”、用于射频场检测或接收的“量子天线（原子天线）”等等。它们共同的特

点就是利用量子力学的原理，通过对测量单元的量子态进行制备、操控和测量，实现对物理量高精度、高灵敏度的探测。本文中将以“量子测量”代指这一技术和应用领域。

量子传感单元是量子态制备、操控和测量的物理载体，也是实现量子测量的物理基础。基于量子传感单元能级跃迁、相干叠加和量子纠缠等特性实现物理量探测是量子测量技术研究与应用的核心命题”。根据量子传感单元实现的物理媒介和制备操控方式不同，量子传感单元存在冷原子、热原子蒸气、金刚石氮空位（NV）色心、里德堡原子、量子纠缠、超导干涉仪、单光子等多种技术路线，如图 12 所示。多种技术路线各具特点，面向不同的应用领域和场景，目前平行发展，暂不存在技术路线竞争和融合收敛的趋势。



图 12 量子测量技术主要物理路线

冷原子干涉技术是 20 世纪 70 年代逐渐发展起来的。因为原子束中的原子横向动量极小，从而给我们提供了观察物质波某些表现的可能。由于原子具有内部结构和能级，并且具有质量，干涉现象还受到

能级跃迁、惯性及重力的重要影响，这使原子干涉呈现出远比光子或电子与中子干涉更丰富的内容。激光冷却可使原子达到很低的动能，其德布罗意波长远大于通常情况下原子的线度，甚至达到光波波长的程度，从而使物质波及其干涉现象成为更广泛的物理实验的对象。由于原子具有质量，原子干涉仪作为灵敏的惯性传感器，可以精确测量加速度、引力常数、重力加速度差等，从而在导航、探矿、大地勘察、地震预报、环境监察等方面有重要应用。

金刚石（钻石）氮-空位（NV）色心是指金刚石中的一种特殊的发光点缺陷，由一个替代的氮原子与其紧邻的一个碳原子空位组成，形成一个自旋为 1 的量子体系。NV 电子自旋本身具有原子量级尺寸，有潜力实现亚纳米空间分辨率。当施加 532nm 的绿色激光，电子从基态跃迁到激发态。从激发态衰减到基态的过程中，会发出红色荧光。光子计数与自旋相关，NV 电子自旋 $m_s=0$ 态的荧光强度比较强，而 $m_s=\pm 1$ 态发出的荧光比较弱，可以通过荧光强度区分自旋状态。在室温下相干时间可以长达 1.8ms，可以被定位至小于 10nm 的空间精度，电子自旋对外界磁场非常灵敏，NV 色心与其他待测样品之间距离可以小于 5nm。外加磁场下，能级发生塞曼劈裂，如图 13 (b)所示。此时 $|0\rangle$ 和 $|\pm 1\rangle$ 之间的能级差变为 $\omega_{\pm} = D \pm \gamma_e B_z$ ，若施加对应频率的微波就会激发 NV 在相应能级间的振荡，从而在磁共振谱中观测到相应的谱峰。

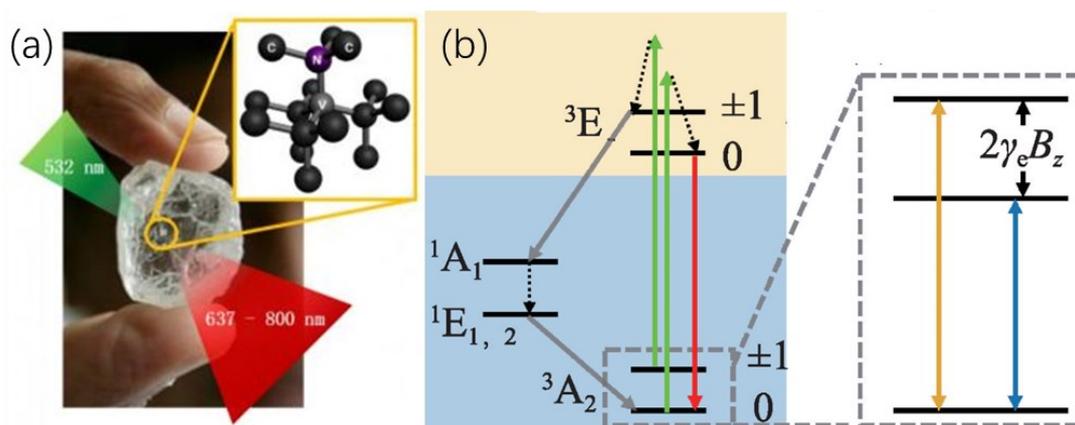


图 13 金刚石中氮-空位 (NV) 色心原子结构和能级结构

原子蒸气作为一种量子测量实现方式。原子核和电子具有自旋的内禀属性，原子核和电子的自旋属性又进一步决定了原子整体的自旋属性，自旋的原子会与外界场产生耦合，这种量子自旋特性是原子蒸气作为量子测量实现方式的理论基础。同时，碱金属原子具有易于人为操控的特殊的原子结构，导致其具有极强的量子测量应用潜力，是重要的原子蒸气原材料。最后，通过精密的操控手段，可实现自旋极化且物理性质宏观可测的原子系综，这就使得对极其微小物理量的测量成为了可能。在外界物理场的作用下，自旋极化的原子系综表现出宏观可测的物理属性的变化。如在外界磁场作用下，碱金属原子进一步发生塞曼能级分裂，分裂的能级差大小 ΔE_L 与外界磁场成正比。且在外界作用下，原子相对于自旋方向发生自旋进动。如在外磁场中，原子发生拉莫尔进动，其进动频率 $\omega_L = \Delta E_L / \hbar = \gamma |B|$ 。通过测量塞曼能级分裂的能级差大小 ΔE_L 或自旋进动频率 ω 即可实现对极其微弱磁场以及相关物理量的探测。这类量子自旋特性即是原子蒸气作为量子测量实现方式的理论基础。

里德堡原子是指具有高激发态的电子(主量子数 n 很大)的原子。里德堡原子半径很大,具有很长的寿命,因此由里德堡原子构成的量子体系中也具有较长的相干时间。此外,里德堡原子具有高极化率,对外场的响应极其灵敏,很容易受到外部场的影响。同时,里德堡原子能级的间隔小,其能级跃迁频率可以被微波信号覆盖,因此可以由微波电场耦合里德堡态实现微波电磁场对里德堡原子相互作用的调控。基于原子的场传感器使用里德堡原子作为射频接收介质。传统上来讲,里德堡态是价电子驻留在远离原子核的轨道中的原子的状态。而这种弱束缚、准自由电子的里德堡原子提供了原子独特的物理属性,包括对外部电场和磁场的高灵敏度。里德堡原子提供从 MHz 量级到 THz 量级的宽带射频覆盖。

超导量子干涉仪(SQUID)结合了磁通量子化和约瑟夫森隧穿的物理现象,研究发现了超导体(S)和被一薄绝缘层(I)隔开的普通金属(N)之间存在单电子隧穿效应,后来约瑟夫森从理论上进行了证实,人们将这种 S-I-S 和 S-N-S 的结构称为约瑟夫森结。在外磁场中,将两个约瑟夫森结和超导环并联之后会发生宏观量子干涉现象,SQUID 就是基于这种物理效应来对外磁场进行精确测量的。若超导环并联两个约瑟夫森结,则可以构成直流 SQUID (DC-SQUID),若并联一个,则称为射频 SQUID (RF-SQUID),如图 14 所示。大多数 SQUID 的应用都是与超导输入电路耦合从而配置成磁强计或梯度计。与各种类型的标量磁场测量仪器相比,SQUID 磁强计或梯度计是矢量装置,只

测量垂直于磁通回路平面的磁场分量变化，SQUID 梯度计可以抵消大量环境磁场噪声。

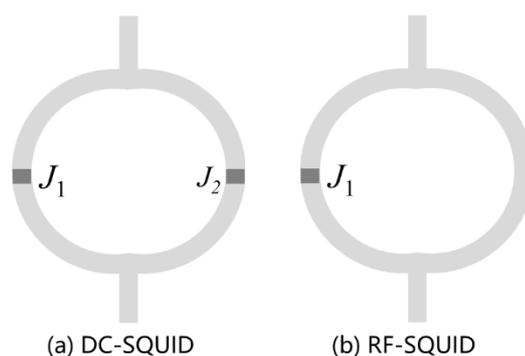


图 14 SQUID 结构示意图

量子纠缠是多粒子微观系统的独特现象，是量子力学中著名的争议性理论。A 和 B 粒子状态无法用各自状态的乘积（直积态）来表述，例如 $|\beta_{01}\rangle = (|01\rangle + |10\rangle) / \sqrt{2}$ ，则两粒子处于纠缠态，对其中一个粒子的测量将同时导致两个粒子状态的确定（坍缩），无论两个粒子相距多远。量子纠缠技术目前主要是应用于量子雷达和量子时间同步领域。

单光子探测是对光子最为精密的测量，一个单光子的能量极其微弱，约为 10^{-19} 焦耳，如何高效灵敏的检测单光子的数量和能量是量子信息、生物检测、光量子雷达等领域的核心技术之一，这要求单光子探测器有非常大的增益同时又要保持极低的噪声。一个理想的单光子探测器应该具备以下几个特点：探测效率近乎为 100%，几乎无噪声，无死时间，无时间抖动，无后脉冲等其他引起噪声的现象，可宽谱测量且具有光子数分辨能力。目前技术发展所能达到的单光子探测器都只能达到部分指标，其主要类型有光电倍增管(PMT)、基于半导体(主

要是硅、镉、铟镓砷)的雪崩光电二极管(APD)、量子点场效应管探测器(FET)、超导纳米线(SNSPD)、上转换单光子探测器。

(二) 光钟不确定度突破 $1\text{E}-19$ 量级

国际上,从二十世纪七十年代末就开始了光钟相关的研究。进入二十一世纪以来,在激光冷却和飞秒光梳技术的推动下,光钟研究得到了快速发展。光钟的研究主要有两个发展方向:一个是基于单离子囚禁的离子光钟,另一个是基于中性原子光晶格囚禁的光晶格原子钟。单离子光钟由于只囚禁一个粒子,有利于隔离周围环境的干扰且系统更加简单,具有较低的系统频移不确定度,但也正是由于只有一个粒子,受量子投影噪声的影响,稳定度很难进一步提升;光晶格原子钟同时囚禁成千上万个粒子,因此信噪比高,能够实现比单离子光钟更高的稳定度,然而粒子之间的相互作用对频率的影响需要精密的操控才能实现较低的系统频移不确定度。

目前,光钟的评定不确定度指标已经比现行复现秒定义的铯原子喷泉钟高2个数量级,因此推动了修改秒定义的讨论,将秒定义从铯原子的微波跃迁频率修改到光频跃迁。目前,考虑的范围包括 ^{87}Sr 、 ^{88}Sr 、 ^{171}Yb 、 Hg 中性原子和 Hg^+ 、 Al^+ 、 Sr^+ 、 Yb^+ 离子等光频跃迁,其中 ^{87}Sr 、 ^{171}Yb 和 Al^+ 、 Sr^+ 呼声较大。国际时间频率咨询委员会 CCTF 在 2015 年提出了秒定义修改路线图,2020 年启动了秒定义变更的准备工作。各类光钟目前不确定度指标以及未来的应用场景如图 15 所

示。

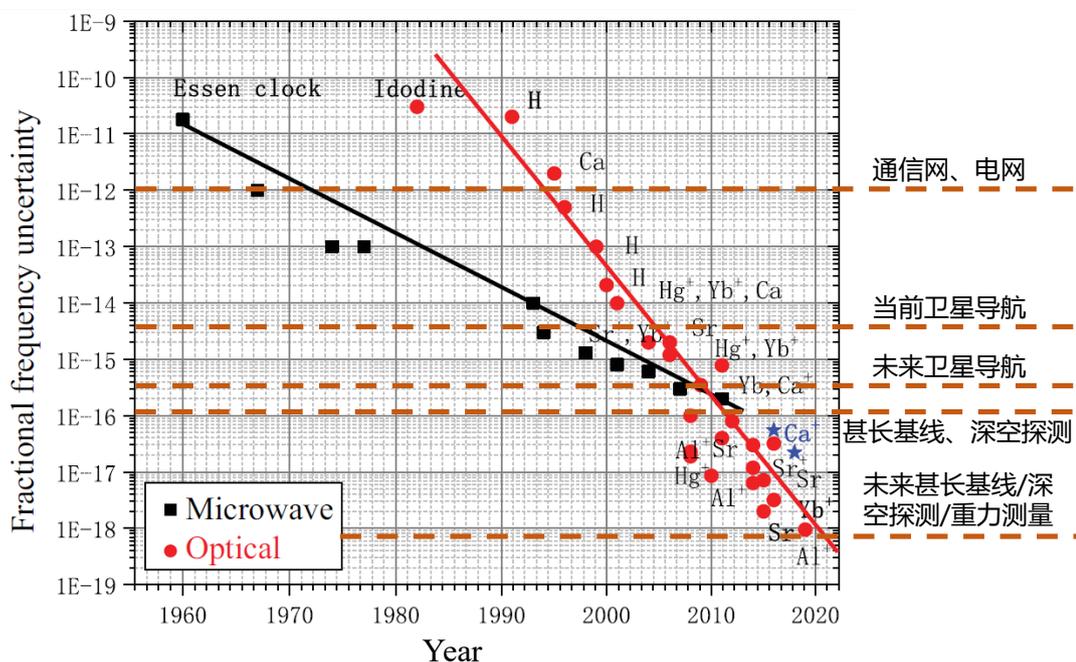


图 15 光钟不确定度指标以及未来的应用场景

在单离子光钟方面，国外从上世纪七十年代末就开始研究。铝离子、镱离子、钙离子等具有超窄的光频跃迁，不易受外界电磁场干扰，适合于建立光钟。美国 NIST 的 David J. Wineland 小组创立了基于量子逻辑的铝离子光钟，2010 年不确定度评定¹⁹达到了 8.6×10^{-18} ，在 2019 年²⁰达到了 9.4×10^{-19} ，是国际上第一台不确定度进入 10^{-19} 量级的光钟，成为目前世界上最准确的原子钟。2019 年，德国 PTB 研制的镱离子光钟的不确定度达到 2.8×10^{-18} 。2022 年，中科院精测院²¹研制的钙离子光钟不确定度达到 3×10^{-18} 。同年，武汉量子技术研究院

¹⁹ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.104.070802>

²⁰ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.123.033201>

²¹ <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.17.034041>

研制的国内首台基于量子逻辑技术的铝离子光钟原理样机²²不确定度达到 7.9×10^{-18} 。

中性原子光晶格钟方面，II 族碱土金属元素锶，以及外层有两个电子的类 II 族元素，例如：汞、镱等，适合于作为时间频率基准的光钟。美国是传统的时频研究强国，代表着全球时间频率研究的最高水平，目前开展光钟研究的实验室主要分布在 NIST 和 JILA。2015 年，JILA 的锶原子光晶格钟²³不确定度达到了 2.1×10^{-18} ，并且大大提升了光钟的稳定度，达到了 $2.2 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$ 。2018 年，NIST 实验室的镱原子光晶格钟²⁴不确定度达到 1.4×10^{-18} ，稳定度达到了 $1.5 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$ 。2019 年，美国 JILA 的锶光钟小组实现了又一次不确定度评估，锶光钟的整体不确定度达到了 2.0×10^{-18} ，稳定度达到了 $4.8 \times 10^{-17}/\sqrt{\tau}$ 。2015 年，日本东京大学的 Katori 小组报导了基于低温环境的锶原子光晶格钟²⁵，不确定度达到了 7.2×10^{-18} ，2020 年，不确定度指标进一步提升²⁶，达到了 3.5×10^{-18} 。

除了上述达到 10^{-18} 量级的研究成果以外，其他主要光钟目前基本都在 10^{-17} 的水平。其中，法国 SYRTE 的锶光钟 2014 年不确定度 4.1×10^{-17} ，是国际上首次为国际原子时合作贡献数据的光钟。日本

²² <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-022-00451-1>

²³ <https://www.nature.com/articles/ncomms7896>

²⁴ <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0738-2>

²⁵ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631070515000730?via%3Dihub>

²⁶ <https://www.nature.com/articles/s41566-020-0619-8>

NICT 的铯原子光晶格钟在 2017 年达到了 5.7×10^{-17} ，并且也是最早为国际原子时合作贡献数据的光钟之一。德国 PTB 的铯原子光晶格钟在 2020 年不确定度达到了 1.5×10^{-17} ，还建立了不确定度 7×10^{-17} 的可搬运铯原子光晶格钟，用于大地测量领域。英国 NPL 在 2020 年建立了不确定度为 1×10^{-17} 的铯原子光晶格钟。

2022 年 10 月 31 日，长征五号 B 遥四运载火箭托举梦天实验舱升空，同时也将我国自研的高性能光钟送入太空，希望与空间主动氢原子钟和空间冷原子微波钟一起建成世界上在轨运行的精度最高的空间时间频率系统²⁷。

（三）量子时频传递突破飞秒量级

光学时钟在精确导航、重新定义“秒”的基本单位以及引力测试中得到了应用。目前最先进的光学时钟的频率不稳定性已达到 10^{-19} 量级，因此需要更高精度的时频传递技术。在过去的 20 年间，国际和国内学者提出了十余种基于纠缠光子对的量子时间同步协议，实验中得到皮秒量级的时间同步精度。

2022 年 4 月，国家授时中心团队在两种光纤距离(7 公里的现场光纤链路²⁸和 50 公里的实验室光纤链路²⁹)上进行了双向量子时钟同步实验。通过 7 公里长的光纤，在位于国家授时中心园区内的氢脉泽

²⁷ <https://mp.weixin.qq.com/s/S9fAsHMbYC7-1fxy544n4g>

²⁸ <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-30-7-10269&id=470327>

²⁹ <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9720084/authors#authors>

和位于骊山天文台的铷钟之间进行双向量子同步的现场测试，结果表明，短期同步稳定度达到了铷钟对氢脉泽的固有频率稳定度。在 7680 秒时，长期同步稳定度达到 19.3 皮秒。同时，该团队在实验室光纤上演示了光纤双向量子时钟同步实验，距离达到 50 公里。他们使用公共参考时钟，在 57300 秒时实现了 54.6 飞秒的同步稳定度和 1.3 ± 36.6 皮秒的精度。使用独立参考时钟，结合微波频率转换技术也实现了相当的性能，在 57300 秒时的稳定度为 89.5 飞秒。

同年 6 月，美国能源部(DOE)下属费米实验室和阿贡国家实验室团队在同一根光纤上同时传递量子信号和经典时钟信号并实现高精度时钟同步³⁰，展示了经典信号与量子信号的共存能力。并且位于相距 50 公里的两地的时钟仅有 5 皮秒的时间差。

同年 10 月，中国科学技术大学团队实现百公里级的自由空间高精度时间频率传递实验³¹，时间传递稳定度达到飞秒量级，频率传递万秒稳定度优于 4×10^{-19} 。该团队基于双飞秒光梳和线性光学采样，在相隔 113 公里的新疆南山天文台和高崖子天文台之间实现了频率偏移 $6.3 \times 10^{-20} \pm 3.4 \times 10^{-19}$ ，万秒不稳定性为 4×10^{-19} 。

(四) 量子磁测量取得诸多科研进展

在弱磁测量领域，常用的基于电磁感应定律的磁通门磁强计，灵

³⁰ <https://news.fnal.gov/2022/06/quantum-network-between-two-national-labs-achieves-record-synch/>

³¹ <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05228-5>

灵敏度为 $0.1\sim 1\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级 ($1\text{nT} = 10^{-9}\text{T}$)；基于电子共振的光泵磁强计灵敏度可提高 3 个量级，达到 $0.1\sim 1\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级 ($1\text{pT} = 10^{-12}\text{T}$)；基于超导约瑟夫森效应和磁通量子化的超导量子干涉仪灵敏度可以达到 $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级 ($1\text{fT} = 10^{-15}\text{T}$)，灵敏度又提高了 3 个数量级，但需要液氮冷却，成本较高且不便移动。2002 年普林斯顿大学物理系 Romalis 小组首次将无自旋交换弛豫 (Spin-Exchange Relaxation-Free, SERF) 效应应用于磁场测量，实现了 $0.54\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度，超越超导量子干涉仪，首次进入亚 $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 水平，创造了当时的磁测量世界纪录；之后又在 2010 年将 40Hz 频率处梯度差分模式下的灵敏度指标进一步提升至 $0.16\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。利用该技术理论可实现 $\text{aT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级 ($1\text{aT}=10^{-18}\text{T}$) 的灵敏度。

基于无自旋交换弛豫 (SERF) 原子自旋的极弱磁场测量的工作原理是利用磁屏蔽装置创造的近零磁环境大幅降低碱金属原子的拉莫尔进动频率，同时通过提高其原子密度增加自旋交换率，在自旋交换率远大于拉莫尔进动频率时，原子的自旋交换弛豫得到充分抑制，实现 SERF 状态，从而可以在极高的原子密度下实现较长的弛豫时间，提高极弱磁场的测量灵敏度。北航研究团队在超高灵敏磁场测量装置基础上，2014 年起先后开展了两代高灵敏度小型化原子磁强计研制，2021 年研制出的第二代原子磁强计在 $10\sim 100\text{Hz}$ 频率范围内实现了 $2\text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度，优于国外公开报道的小型化原子磁强计灵敏度最

好水平³²。

金刚石中的氮空位(NV)色心因为其磁力灵敏度、稳定性和与环境条件的兼容性而成为量子磁力计研究的热点方向之一。2022 年基于金刚石 NV 色心的科学研究取得了诸多进展。5 月，印度卡哈拉格普尔理工学院报道³³利用金刚石中量子缺陷的亚秒时间磁场显微术，并能够以 50 至 200 fps 的帧速率实现动态宽场磁场成像。6 月，瑞士苏黎世联邦理工学院报道³⁴用单自旋量子磁力仪进行扫描梯度测量，利用扫描金刚石探针尖端的单个氮空位中心的机械振荡，将局部空间梯度上转换为交流磁场，通过对反铁磁体中的形貌缺陷和原子台阶上出现的纳特斯拉场（nT）、石墨烯器件中的直流电以及顺磁性和反磁性金属进行成像，展示了梯度测量的能力。8 月，中国科大基于 NV 色心量子传感器实现了皮特斯拉(pT)水平的高灵敏微波磁场测量³⁵，相比此前该体系实现的亚微特斯拉指标水平，测量灵敏度提升了近 ten 万倍。同月，中科大团队实现了太阳光驱动量子磁力计³⁶，将太阳光过滤和聚焦后照射在金刚石 NV 色心上用于量子磁力计的初始化和状态读取，从而解决量子传感器的能耗问题。

³² <https://hkxb.buaa.edu.cn/CN/10.7527/S1000-6893.2022.27752>

³³ <https://www.nature.com/articles/s41598-022-12609-3>

³⁴ <https://www.nature.com/articles/s41467-022-31454-6>

³⁵ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abq8158>

³⁶ <https://journals.aps.org/prxenergy/accepted/9607cK25D4a18803a7914f5164e2f133eb90a6171>

（五）里德堡量子天线测量进展迅速

自上世纪 90 年代以来，里德堡原子由于其在量子调控、量子存储、单光子制备等领域的重要作用，里德堡原子一直是国际上量子信息领域研究的热点。2007 年，英国杜伦大学研究人员首次在高激发的里德堡态中实现了电磁诱导透明（EIT）现象，并于 2008 年首次提出里德堡原子的 EIT 现象可以用于电场测量，至此，里德堡原子作为一种新型电场传感与电磁信号接收介质首次被认识。

第一个真正意义上在原子蒸汽池中实现的基于里德堡原子的微波电场测量实验实现于 2012 年，由美国俄克拉荷马大学的 James Shaffer 研究小组实现。Shaffer 小组利用里德堡原子的 EIT-AT 分裂光谱技术实现了灵敏度为 $30 \mu\text{V}/\text{cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 微波电场测量，该灵敏度比传统的可溯源至国际标准单位制的微波电场计高了将近 2 个数量级，而在计量溯源性方面，里德堡原子电场测量系统可直接溯源至普朗克常数，使得原子电场计极有可能成为像原子钟一样的新一代微波电场计量标准。Shaffer 小组在之后使用复杂的光谱技术，包括使用马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder interferometer, MZI）对光相位进行测量，或使用频率调制光谱技术等，成功将测量灵敏提高至 $3 \mu\text{V}/\text{cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。2020 年，山西大学研究团队通过搭建原子超外差测量系统，实现基于原子超外差方法的微波电场精密测量³⁷，实验获 55

³⁷ <https://www.nature.com/articles/s41567-020-0918-5>

$\text{nV/cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的测量灵敏度，其最小可测量的电场强度可达到 780 pV/cm 。2021 年，美国国家标准技术研究院（NIST）Christopher Holloway 研究小组采用重泵浦技术，将里德堡原子电场传感器的灵敏度提高至 $50 \text{ nV/cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ³⁸。2022 年，NIST 研究了微波腔增强技术对于测量灵敏度的影响，与不使用腔增强技术相比，灵敏度提高了近 2 个数量级。此外，Christopher Holloway 研究员小组，也在着力推动原子微波电场传感器在计量领域的应用，发表了一系列文章分析原子电场计的不确定度。2022 年，中国科学院技术大学研究团队基于室温铷原子体系，利用多体系统相变点对于扰动更加敏感的特点，将灵敏度提升至 $49 \text{ nV/cm}/\sqrt{\text{Hz}}$ ³⁹。除弱电磁场测量外，里德堡原子同样可用于对较强电场进行高准确度测量。2014 年，NIST 利用室温蒸汽池中 ^{85}Rb 里德堡原子的双光子 Autler-Townes 分裂和强场效应，实现了约 40 V/m 的强场测量。2019 年，美国密歇根大学 Georg Raithel 教授研究小组实现了约 5 kV/m 的强场测量，且测量精度小于 1.5%。

与传统基于金属偶极天线相比，里德堡量子天线具有高灵敏、宽频带响应(MHz - THz)、可溯源至国际单位制 (SI)、高空间分辨力、抗损伤等优势，使里德堡量子天线在雷达、计量以及通信等领域的应用吸引了大量的研究。如关于微波弱场至强场幅值、相位、极化、入射角、电磁脉冲测量和系统小型化的工程研究。除了绝对场或矢量场

³⁸ <https://pubs.aip.org/aip/apl/article/119/21/214001/40767/Enhancement-of-electromagnetically-induced>

³⁹ <https://www.nature.com/articles/s41567-022-01777-8>

测量外，里德堡量子天线在亚波长成像方面也取得了很好的进展。

（六）量子重力测量工程化日趋成熟

1991 年美国斯坦福大学朱棣文小组，首次在实验上利用原子物质波干涉实现了重力加速度的测量。这种利用量子效应的原子重力仪测量灵敏度已达到地球重力加速度的十亿分之一，测量时间比经典方法缩短百倍以上，且无机械落体器件产生的仪器损耗，引起了各国科学团队的密切关注。基于原子干涉效应的量子重力仪发展迅速，已经从原理样机阶段步入工程化样机阶段，当前该方向的挑战是实现更高的稳定性，满足量子重力仪小型化、可搬运的工作需求。目前国外有美国斯坦福大学，法国巴黎天文台，法国宇航局、美国加州大学，意大利弗洛伦萨大学，英国伯明翰大学，德国洪堡大学等在进行相关方向的研究。

法国宇航局（ONERA）2018 年报道了船载 GIRAFE 型原子重力仪实验，该船载重力仪静态测量时系统不确定度 $6 \times 10^{-8} \text{ g}$ ，动态时 $1.7 \times 10^{-7} \text{ g}$ 。静态测量灵敏度 $8 \times 10^{-7} \text{ g} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。经过测试，该船载原子重力仪测量精度已经超过同船的传统弹簧式重力仪。进一步地，该小组于 2020 年报道了机载 GIRAFE 原子重力仪的实验⁴⁰。

美国加州理工学院伯克利分校 2019 年报道实现了一种可移动原

⁴⁰[https://www.cell.com/the-innovation/fulltext/S2666-6758\(22\)00026-1?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2666675822000261%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/the-innovation/fulltext/S2666-6758(22)00026-1?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2666675822000261%3Fshowall%3Dtrue)

子重力仪并进行了车载实验。在车载实验中，总行程 7.6 km，在每个测量点，15 分钟完成开机调试，测量时间 20 分钟。在车载环境下，振动噪声加大，测量灵敏度可达到 $5 \times 10^{-7} \text{ g} / \sqrt{\text{Hz}}$ ，测量总不确定度为 $4 \times 10^{-8} \text{ g}$ 。

国内于 2006 年左右才开始原子重力仪研究，第一台原理样机出现在 2010 年左右，比国外晚了近 20 年，经过多年的发展后，截止到目前，已经有多家团队跟进原子重力仪研究，包括中国计量科学研究院，华中科技大学，浙江工业大学，中科院武汉数学物理研究所，中国科学技术大学，国防科技大学，中国航空计量技术研究所等。中国计量科学研究院研制的原子重力仪灵敏度达到 $4 \times 10^{-7} \text{ g} / \sqrt{\text{Hz}}$ ，不确定度达到 $5 \times 10^{-8} \text{ g}$ 。华中科技大学搭建的上抛的冷原子绝对重力仪灵敏度达到 $4.2 \times 10^{-9} \text{ g} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。浙江工业大学开发出的重力仪灵敏度达到了 $1 \times 10^{-7} \text{ g} / \sqrt{\text{Hz}}$ ，不确定度达到 $1 \times 10^{-7} \text{ g}$ ，并开展了车载和船载实验。中科院精密测量研究院团队研发的冷原子重力梯度仪样机的分辨率已经达到 0.9 E ($1 \text{ E} = 10^{-9} / \text{s}^2$)。2022 年 11 月，中科院精密测量院团队研制出集成化高精度原子绝对重力梯度仪⁴¹。基于垂向层叠双原子干涉仪方案，该重力梯度仪探头体积仅为 95L，测量精度达到 0.86 E ($1 \text{ E} = 1 \times 10^{-9} / \text{s}^2 = 0.1 \mu \text{ Gal/m}$)，是目前国际上集成度最高的亚 E 水平的原子重力梯度仪。

⁴¹ <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.18.054091>

除此以外，近年来一些新的技术方案被提出。如 2021 年 5 月，以色列本-古里安大学团队在原子芯片上实现了斯特恩-格拉奇干涉仪⁴²，该方案可用于重力测量。不同于传统冷原子干涉仪，这种干涉仪用磁场调控原子的量子态而不是使用激光，它可以在短距离内用作高精度表面探针，而且也避免了激光的热效应。

（七）量子成像实现“超长距”“非视域”

单光子雷达是将高灵敏度、高精度的单光子探测技术、相关光学技术和计算处理算法应用于激光雷达领域形成一类新型雷达，实现在成像距离、成像速度、成像分辨率等方面的突破。远距离单光子雷达技术研究现阶段的主要目标是针对远距离高价值目标探测、成像和识别的应用需求，开展高速单光子探测与成像系统技术研究，突破高效率低噪声单光子探测技术、高效抗噪单光子计算成像算法及极限灵敏度高分辨单光子成像等关键技术，研制单光子成像样机，实现百公里量级目标探测、成像和识别，并开展相关的外场试验验证。2021 年，中国科学技术大学的研究人员实现了一种紧凑的同轴单光子雷达系统并完成最远达 205.1 公里的 3D 成像实验，通过光子效率算法实现了在每像素仅 0.44 个信号光子的情况下能够精确 3D 成像⁴³。同年，中科大团队利用频率上转换单光子探测技术，通过实验实现了毫米级

⁴² <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abg2879>

⁴³ <https://opg.optica.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-8-3-344&id=449006>

非视域三维成像⁴⁴，这是目前非视域成像的最高精度，其横向空间分辨能力达到 2 毫米，纵向空间分辨能力达到 0.18 毫米。

量子关联成像（即鬼成像）源于对量子纠缠对的相关性研究。最早的量子关联成像使用纠缠光源之间的高阶关联性进行关联成像。量子关联成像不受瑞利衍射极限限制、抗干扰能力强、能够有效抑制大气湍流干扰的优点；使用纠缠光源的关联成像对实验环境要求较高、且存在纠缠光源制备难度高的限制；赝热光关联成像则存在成像分辨率和对比度互相限制的问题。量子鬼成像提供了许多优于经典成像的优点，包括低光子通量和用于成像光敏结构的非简并物和图像波长，但是图像重建速度慢。图像重建时间取决于所需图像的分辨率，该分辨率与图像分辨率成平方比例。2022 年，金山大学团队提出一种在量子鬼成像实验中产生超分辨图像的新方法⁴⁵，并且实验性地重建了一个低分辨率图像，用较少的测量获得无损的高分辨率超分辨图像。

量子照明激光雷达或称为量子照射激光雷达，采用量子态的激光对目标场景进行照射，能够实现探测信噪比的大幅提升，在嘈杂以及较大损耗的传输环境中实现目标探测增强效果。理论研究表明：具有 m 比特纠缠的量子照明可以有效提高信噪比 2^m 倍。即使在噪声和损耗很强的环境下、探测器上不存在纠缠时，量子增强效果仍然存在。量子照明探测由于使用非经典光源（纠缠光源）进行探测，具有抗敌

⁴⁴ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.053602>

⁴⁵ <https://www.nature.com/articles/s41598-022-14648-2>

方干扰、可解决隐身目标探测问题以及相位测量精度高等优点；但是该探测体制存在使用光子信息维度少、纠缠光源制备难度高、实验环境要求高等问题。2021年，中国科学技术大学团队研究了纠缠相干态（ECS 态）的量子照明方式⁴⁶。纠缠相干态在噪声环境下具有纠缠鲁棒性强的优点。对比传统双模压缩态（TMSV）和相干态作为照明光源的探测性能，结果表明：低反射率目标且发射光子数远小于背景噪声时 ECS 态的探测性能比相干态好，比 TMSV 态差。量子照明系统的探测性能由量子纠缠度大小决定。

量子增强激光雷达基于干涉测量原理，通过测量干涉光路中两条光路的相位差得到目标信息。2008年意大利波沃特伦托大学 L. Pezzé 和 A.Smerzi 提出了基于相干态和压缩真空态输入的相位测量方案⁴⁷。2021年，山西大学团队提出基于集成量子压缩光源的量子增强多普勒激光雷达探测方法⁴⁸，使用量子压缩态光场作为多普勒激光雷达的本振信号以提高系统的探测精度。相较于传统相干多普勒激光雷达系统，该方法的多普勒信息探测灵敏度提升了 3 dB。

（八）基于纠缠的量子测量提升精度

量子纠缠物理路线理论上可突破标准量子极限，逼近海森堡极限。2022年10月，美国 JILA 和 NIST 研究团队实现了高精度腔中的纠

⁴⁶ <https://wulixb.iphy.ac.cn/article/doi/10.7498/aps.70.20210462>

⁴⁷ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.100.073601>

⁴⁸ <http://www.irla.cn/en/article/doi/10.3788/IRLA20210031>

缠增强物质波干涉测量⁴⁹。研究团队利用光-物质相互作用，在不同原子之间产生纠缠，对重力加速度进行更精确的测量，其测量精度突破了标准量子极限。

近年来，一些学者提出在量子纠缠的基础上构建量子传感网络，即利用量子纠缠把若干个分布式的量子传感器“连接”起来，在特定场景下可以提升测量性能。英国牛津大学团队于2022年9月使用光子链路成功“纠缠”了相隔2米的两个⁸⁸Sr⁺离子，实现了全球首个纠缠光学原子钟的量子网络⁵⁰。11月，斯坦福大学、康奈尔大学和美国能源部布鲁克海文国家实验室研究团队实现基于模式纠缠的自旋压缩原子态的分布式量子传感⁵¹。该研究小组的实验装置产生了对时间和加速度的超精确测量；与没有利用量子纠缠的类似装置相比，他们的时间测量结果要精确3.5倍，而加速度测量结果要精确1.2倍。

量子纠缠这一物理路线，充分利用了量子力学所特有的特性，理论测量精度上可突破经典物理极限，但现在并不是量子测量领域的一个关键研究方向。由于在理论上对纠缠度的要求很高，使得量子纠缠技术的发展面临着巨大挑战。一方面，现有量子测量技术在测量精度方面存在瓶颈，还没有达到标准量子极限，仍然受经典噪声的限制，在此情况下，即使采用了量子纠缠技术，它的测量精度仍将淹没在经

⁴⁹ <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05197-9>

⁵⁰ www.nature.com/articles/s41586-022-05088-z

⁵¹ <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05363-z>

典的噪声中；同时，由于量子光学和原子分子动力学方法所需实验条件苛刻且难以实现大规模集成，使得量子测量在实际应用领域受到了极大制约。另一方面目前量子纠缠态产生、调控和远距离分发方面等技术还不够成熟，不能满足工程应用需求。就上述的纠缠光钟网络为例，纠缠态的持续时间只有 9ms，目前最先进的光钟也需要 500ms 的探测时间。

三、应用场景探索

（一）量子测量为无创检测和诊断提供新手段

生命科学技术使人类社会发生翻天覆地的变化，借助它人们加深对生物代谢过程的理解、有效地诊断和治愈疾病、提升农业生产力。随着与信息技术等学科不断融合，生命科学技术正在发生革命性变化。量子测量技术可望进一步推动生命科学的变革。

量子磁力计在临床医疗的应用宽泛，包括冠心病、心肌缺血等心血管疾病的早期筛查以及治疗预后的长期监测、神经康复监测、脑科学、脑认知、脑机接口、脑疾病精准诊断、细胞原位成像等前沿应用。目前，临床医疗的主要应用为脑磁图（Magneto-encephalography，MEG）与心磁图（Magneto-cardiography，MCG）。

心磁图仪经历了超导心磁图仪和非超导心磁图仪两个主要阶段，总体受限于人类测量磁场技术的进步。超导心磁图仪以老牌的超导技

术强国为主。德国、加拿大、日本、美国、英国以及芬兰均有厂家提供系统解决方案。使用多通道的心磁图系统，可以诊断心肌缺血，还可以诊断心律失常。由于超导心磁图需要采用一阶梯度才能完成心磁数据采集，其临床功能得到了有效验证，但其昂贵的售价及超导维护费用限制了超导心磁图仪的发展和临床应用。另外，超导心磁图仪需要周期性地补充液氦以保证磁场传感器的正常运行，导致超导心磁图仪的使用成本较高。因此世界各国的科学家们不断寻找其替代方案，最主要的挑战是如何获得高磁场探测灵敏度以便探测心脏磁场的微弱信号。2022年8月，东京工业大学工程学院团队报道了开胸活体大鼠的心磁研究⁵²，使用基于金刚石中氮空位中心系综的量子传感器以毫米级的空间分辨率对活体大鼠标本产生的心磁信号进行侵入式测量。

美国 GENETESIS 公司 2017 年通过采购美国 QuSpin 公司所生产的原子磁力计开始进行基于原子磁力计的心磁图仪开发，推出了全球首台基于原子磁力计的非超导式心磁图仪，产品于 2019 年获得美国 FDA 510K 认证，并在 2020 年 12 月正式获得了的 FDA 的“突破性影像设备”的资质认证。2022 年我国也颁发了国内首张、全球第二张原子磁力计心磁图仪的医疗器械注册证⁵³。

脑磁图仪的研发与应用也是从超导量子干涉仪方案开始的。1968

⁵² <https://www.nature.com/articles/s42005-022-00978-0#Sec1>

⁵³ <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1745185841256476793&wfr=spider&for=pc>

年,美国物理学家 Cohen 利用多匝感应线圈在磁屏蔽室内探测到了人类大脑阿尔法波信号;1972 年科恩采用超导量子干涉仪技术,成功地探测到了脑磁信号,标志着现代脑磁图仪的开端。从 20 世纪 80 年代开始,商业化脑磁图仪出现,从最开始的单通道系统发展成为 300 多通道全脑覆盖的成熟系统。

目前各国也逐步开展非超导式脑磁图仪的研究和应用。2021 年,俄罗斯量子中心、斯科尔科沃科学技术研究院和高等经济学院的研究人员开发了一种适用于脑磁图的室温固态量子传感器-钇铁石榴石磁力计(YIGM)⁵⁴,可在室温下工作,并且具有较宽动态范围,其理论灵敏度小于 $1 \text{ fT} / \sqrt{\text{Hz}}$,结合其紧凑的尺寸和其他特性,使其成为多通道 MEG 应用的完美候选。研究人员还使用 YIGM 进行了人脑 α 节律采集试验,结果与光泵磁力计结果一致。英国量子传感与计时技术中心的研究人员通过衍生公司 Cerca Magnetics 开发了一种可穿戴的 SERF 光泵浦磁力计用于脑磁图的探测,目前已安装在多伦多的儿童疾病医院(SickKids),用于自闭症的开创性研究⁵⁵。“可穿戴”意味着患者可以在扫描过程中自由移动,而且可以适应不同的头部尺寸。系统工作在非低温环境下,具有轻巧耐磨性,特别适用于儿童和运动障碍患者,从而使得该技术在功能性神经成像方面具有革命性意义。

⁵⁴ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hbm.25582>

⁵⁵ <https://quantumsensors.org/news/2021/08/24/wearable-brain-imaging-system-installed-in-toronto-for-autism-research>

除心脑血管测量以外，量子测量还可以应用在病理组织成像、病毒抗原抗体检测等诸多领域。传统病理组织成像方法包括 H&E 染色、免疫组化和免疫荧光等，以光学成像为主，容易受到光学背景强、信号不稳定、定量不准确和不同光学方法不能共用等问题的影响，进而影响组织病理检测的精准性。磁共振成像（MRI）有望解决光学成像的上述不足，然而，传统 MRI 受限于较低的灵敏度和空间分辨率，很难应用于组织水平微米分辨率的成像。2022 年 1 月，中国科学技术大学的研究团队实现了一种组织水平的免疫磁标记方法⁵⁶，通过抗原-抗体的特异性识别，将超顺磁颗粒特异标记在肿瘤组织中的 PD-L1 等靶蛋白分子上，接着将组织样品紧密贴附在金刚石表面，然后利用金刚石中分布在近表面约百纳米的一层 NV 色心作为二维量子磁传感器，在 400 nm 分辨率的 NV 宽场显微镜上进行磁场成像，在毫米级的视野范围里达到微米级空间分辨率，最后通过深度学习模型重构磁场对应的磁矩分布，为定量分析提供基础。

近年来，新冠病毒全球肆虐，对其检测和预防都成了巨大工程。2021 年 12 月，麻省理工学院报道了一种基于量子物理的传感器 SARS-CoV-2 virus 病毒检测方法⁵⁷。通过基于 NV 色心的分子传感器，将 SARS-CoV-2 RNA 的存在转化为可以光学读出的明确磁噪声信号。该方法速度快，有望达到几百个 RNA 拷贝的灵敏度，假阴性率低于

⁵⁶ <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.2118876119>

⁵⁷ <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.1c02868>

1%。同时使用不同的固态缺陷和涂覆物可以实现其他 RNA 病毒的检测。报告指出该方法可能会比现在所有的检测方法更快、更便宜、更准确。

（二）光量子雷达“软目标”探测助力环境治理

光量子雷达除了进行实体硬目标探测外，还可以实现烟雾、云团甚至温室气体等“软目标”分布情况或大气含量的检测。近些年，光量子雷达在林业、气象、交通、能源等行业探索出众多应用场景。

随着红外单光子检测技术的发展，更多红外谱段的单光子探测研制为红外光量子雷达的研发提供了技术支撑。如 1572nm 的高效率低死时间和高计数率红外单光子探测器的研制为红外二氧化碳光量子雷达的研究工作铺垫了基础，同理，1654nm 则对应着温室气体甲烷，两种温室气体的监测设备在双碳环保领域提供了一种新的技术监测手段。3 微米波段的红外单光子探测器则对应着挥发性有机物的吸收谱线，基于其研制的 3 微米波段光量子雷达可以实现对挥发性有机物区域浓度分布的测量。以上的相关工作国内已经有部分单位进行了尝试研究，特别是在双碳经济的背景下，温室气体的区域监测光量子雷达目前是一个必然的发展趋势。

单光子探测器结合气体光谱学可以实现对二氧化碳或者甲烷等温室气体的分布进行成像，从而可以快速可视化和量化管道或储气设施中的泄漏情况。对水平区域范围内的大气颗粒物浓度、大气的能见

度进行监测，利用测量结果可进行各类成分污染源的溯源工作。

在森林防火方面，光量子雷达通过对火灾产生烟尘的监测实现火灾的预警监控。与传统雷达相比该技术实时性强，传统雷达进行 360 度扫描需要 1 小时时间，而单光子探测器灵敏度高，所需积分时间短，扫描一周仅需要 8 分钟左右。与视频监控技术相比，该方案不受雨雾等恶劣天气以及强太阳光的影响，在各种天气环境下均可正常工作。

在高速公路、港口河道能见度探测方面，光量子雷达可实时进行路面、航道团雾检测，并且由于采用红外波段，相比较于传统激光雷达可见光波段，对人眼更安全。在机场对风场进行探测可以辅助飞机的升降。

在气象观测领域，主要用于测量垂直高空的气溶胶廓线浓度分布、大气边界层、大气能见度、云层分布、风场等信息，为气象的实时观测提供数据支撑。

随着与行业融合的不断深入，未来会催生出更多的应用场景，光量子雷达也有望成为量子测量技术最先在民用领域落地的技术方向。国内国耀量子雷达有限公司和英国 QLM Technology 等公司正积极扩展光量子雷达的应用市场。

（三）量子目标识别与探测“看得远”、“辨得清”

雷达是利用电磁波探测目标的设备，不仅要“看得见”，还要“辨得清”。但是经典雷达在面对新型隐身目标和电磁干扰手段时显得无

能为力。为了实现更高的灵敏度，可以增加发射功率和接收机口径，但是二者不可能无限的增大。单光子探测增强雷达通过提升量子探测效率用另一种方式提升雷达探测性能。我国在单光子探测增强雷达探索方面较为突出。中电 14 所研制的量子激光雷达在 200km 低层大气的外场实验中证实同样口径、同样发射功率下，该系统探测距离比现有的经典激光雷达推远一倍。对移动目标进行跟踪测距，重复频率大约 25Hz。下一步将在飞机上装载进行外场实验。

在陆地上雷达就是“千里眼”，但是到了水下，由于微波和光波的损耗较大，无法进行远距离目标探测和识别。传统采用声纳的方式进行水下探测，但是仍不能满足未来深海探测需求。新一代战略核潜艇下潜能力将达到 1000m，探测难度极大。磁反潜或将称为深海的“千里眼”。地磁场无处不在，核潜艇作为一种金属物体经过海底时，会导致地磁场产生极其微弱的变化，这种变化传统手段无法探测。而量子磁力计具有 fT 量级的灵敏度，使得深海磁反潜称为可能。

在天文观测中，常常使用长基线干涉测量或者甚长基线干涉测量，即用多个天文望远镜同时观测一个天体，模拟一个大小相当于望远镜之间最大间隔距离的巨型望远镜的观测效果。基线长度可达到数公里至数千公里，乃至洲际距离，具有超高的分辨率，还可以灵敏地捕获微弱信号，虚拟出一个“地球级别”的巨型望远系统。多台天文望远系统的观测数据需要相干计算，因此要求时间同步与相位同步具有高精度。当前光钟的精度已经达到 10^{-18} 至 10^{-19} 数量级，将满足未来甚

长基线干涉测量、深空探测等方面的同步需求。

（四）量子重力仪将成为测绘勘探的新方案

高精度的重力及重力梯度测量对于地球表面重力场建模、地质灾害预警、能源勘探、惯性导航等诸多领域具有重要的意义。量子重力仪以冷原子干涉仪为基础，通过原子内态干涉精准测量重力。由于量子重力仪是一种绝对重力仪，理论上不存在漂移，不需要频繁校准。冷原子重力仪、重力梯度仪样机开发起步早，技术成熟，已经进入小型化和商用化阶段。法国 Muquans、美国 AOSense、英国 M Squared Lasers、国内微伽量子、中科酷原、国盾量子等初创公司陆续推出量子重力仪产品。近些年逐步开展地下测绘、地质监测、能源勘探等领域的应用探索。

2022 年，由英国国家量子技术中心的伯明翰大学研究团队研制的冷原子重力梯度仪进行了外场实地探测，实验结果表明成功探测到地下三英尺深的一条隧道⁵⁸。这一成果意味着可以在不对路面挖掘破坏的前提下探测地下物质，在考古、建筑/公路规划、地下基础设施维护等领域具有广阔的应用前景。在使用该技术之前，为了确定地下基础设施的准确位置，需要在公路上打洞，一方面破坏道路，另一方面工程成本极高，据统计英国每年在这方面的投资就高达 50 亿英镑。量子测量技术的商用将为政府节省下这笔巨大的开支。

⁵⁸ www.nature.com/articles/s41586-021-04315-3

美国利用法国初创公司 Muquans（已被 iXblue 公司收购）生产的冷原子重力仪监测火山活动⁵⁹。地下岩浆的运动会引起重力值微弱的变化，地质学家通过对重力的测量可以估计地下岩浆的含量和运动情况，实现对火山活动的检测以及火山爆发的预警。iXblue 还与意大利国家地质和火山研究所地震台网中心 Etno 观察站（INGV-OE）的合作研究实现了世界上第一次将量子重力仪用于对由火山活动引起的重力变化的探测⁶⁰。

（五）量子测量赋能行业数字化转型

随着物联网技术的发展以及对智能制造需求的不断增强，以测量检测、通信传输、数据处理为主要功能特征的传感器产业得到快速发展。近几年，越来越多的公司引进了量子测量传感装置及仪器仪表，从工业制造、电力能源、地质勘探、气象监测、交通运输等方面积极探索应用模式，促进量子测量技术帮助垂直行业实现数字化转型升级。

量子磁力计在工业检测中的应用，达到无损探伤的目的。通过测量该信号可间接得到材料内裂纹或孔洞等缺陷位置信息。金属材料施加交变电流后周围会产生磁场，量子磁力计可以探测到缺陷处微弱的磁场梯度变化，从而判断材料缺陷位置及大小，实现非接触式材料探伤。该无损探伤技术有望应用于许多工业领域。例如，随着新能源汽

⁵⁹<https://www.bigislandvideonews.com/2022/03/19/volcano-watch-absolute-quantum-gravimeter-to-measure-kilauea-mass-changes/>

⁶⁰ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022GL097814>

车的普及，锂电池的应用越来越广泛。锂离子电池因其具有比能量高、循环寿命长、无记忆效应、安全性高等优势而迅速占据主流市场。车用锂电池的质量关乎生命财产安全，需要快速、无创、精准的诊断工具对锂电池内部的结构缺陷进行检测。基于热原子蒸气物理路线的量子磁力计可实现低成本、便携、灵活的高精度磁场测量，对电池制造缺陷、电荷状态、以及杂质含量等信息进行无创精准地感知。该技术方案有可能在短期内实施落地，目前英国工艺创新中心已启动量子传感器应用于工业检测的研究项目（2020年-2023年）⁶¹，旨在开发基于光泵磁力计的电池在线测试系统。

量子测量在新能源汽车方面的又一应用就是电池监测器，对电池剩余里程做出准确评估。由于电动汽车运行工况复杂，传统的基于霍尔效应的检测方法很难满足实际要求，因此需要采用高精度且具有较高响应速度的非接触式传感技术来实现对电池参数和工作状态的实时监测。电动汽车电池电流瞬时峰值可达到几百安培，而且平均电流只有10安左右，而一般传感器要保证动态范围达到几百安培，很难实现数十毫安测量精度，不能对电动汽车剩余行驶里程进行精确预测，因此剩余电量通常必须用10%模糊度来估算，这样电池的使用效率就很低了。2022年，东京科技大学与矢崎集团团队合作，研发出一款以金刚石NV色心为物理路线，以量子传感器为核心的电池监视器雏形

⁶¹<https://www.uk-cpi.com/news/cpi-joins-consortium-to-develop-quantum-sensors-for-end-of-line-battery-testing>

⁶²,用以对电动汽车电池电量进行准确监控,在 $\pm 1000\text{A}$ 动态范围内,检测精度可达1%,工作温度范围可达 $-40\sim+85^{\circ}\text{C}$,同时,该团队在全球统一的轻车试验周期(WLTC)模式下,对电池监测器进行了试验评估。这种新型电池监视技术能够实现对汽车电池状态以及充放电情况实时监控。这项技术使电池的使用效率增加了10%。据预测2030年全世界将拥有2000万辆新电动汽车,如果应用这项技术运行能量将下降3.5%,相应的生产能量也降低很多。

（六）量子痕量检测开拓新型应用场景

量子测量技术除了传统的时频、重力、角速度、磁场等领域取得进展,近年逐步拓展探测物理量的广度,代表性方向即痕量检测。冰芯是保存环境大气的独特档案,对冰芯进行定年是正确解读其中古气候信息的关键。我国青藏高原被誉为世界第三极,拥有众多的山地冰川,是中低纬度古气候研究的宝贵资源。但科研人员一直以来缺少为青藏高原深冰芯绝对定年的可靠方法。半衰期为268年的放射性³⁹Ar覆盖了50-1800年的定年范围。作为一种惰性气体,³⁹Ar在大气中分布均匀,是山地冰川的理想定年同位素。然而,³⁹Ar在环境中的同位素丰度极低,可低至十亿亿分之一,因此冰芯中³⁹Ar的定量分析难度较大。

2021年7月,中科大运用全光激发实现对极其稀有同位素氩-81

⁶² <https://www.nature.com/articles/s41598-022-18106-x>

的单原子探测⁶³，这种“原子阱痕量分析”检测方法，可以逐个地数出环境样品中所含的氩-81原子，对地球与环境科学研究具有推动作用。2022年9月，中科大发展原子阱痕量分析 (ATTA) 方法并对极其稀有的 ³⁹Ar 进行单原子水平的灵敏探测，大幅度提高了 ³⁹Ar 的检测效率、分辨率及灵敏度，首次对冰芯进行了氩-39 (³⁹Ar) 同位素定年测量，成功将定年分析所需冰样降低到了几公斤，为青藏高原羌塘冰川冰芯建立了上千年的精准年代标尺⁶⁴。

四、产业发展动态

（一）量子测量产业稳步发展，资本持续注入

量子测量的产业发展起步比量子计算和量子通信要早。在第一次量子浪潮中，量子测量领域就催生出诸如原子钟、核磁共振仪等商用产品。随着新一代量子测量技术的逐步成熟，量子传感器走出实验室，向产品化迈进。近年来，诸多高校、科研院所孵化出一系列初创公司，产品根据不同行业用户需求不断迭代升级。同时量子传感器生产厂商逐渐摸索出一条自主可控的供应链条，正在从定制化开发走向量产。另一方面一些老牌的量子测量公司，例如传统原子钟设备商，也在积极研发诸如下一代芯片光钟等新的产品形态并探索新的商业模式。德国博世这种传统工业巨头企业也成立了量子测量研发部门，在车载量

⁶³ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.023201>

⁶⁴ <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2200835119>

子陀螺仪、医用心脑磁图仪等领域进行布局。法国导航、光子学、空间和海事自治领域的高科技公司 iXblue 成功收购量子测量公司 Muquans，希望成为欧洲光子和量子技术领域的新领导者。

近年来，资本市场对量子测量行业的重视程度逐步提高，不少初创公司接受政府和社会的投资，日益发展壮大。表 1 汇总了 2021 年 1 月到 2022 年 12 月量子测量领域投融资情况。虽然一些公司没有披露具体融资数额，但是从趋势中我们可以看出越来越多的资本流入量子测量产业。在资本和市场双重激励下，量子测量产业将进一步发展壮大，推出适合更多新型场景的量子传感器。不过我们也看到，受到疫情以及国际形势的影响，资本市场正在逐渐降温，未来更多的资金会转入相对风险较小或者商业模式更清晰的行业，只有极少资金去孵化这种前沿的领域。未来短时间内新成立的量子测量公司在投融资方面可能会受到一些影响。

表 1 2021 年 1 月-2022 年 12 月量子测量领域投融资情况

公司名称	国家	轮次	时间	金额（元）
国仪	中国	B 轮	2021.01	数亿
QLM	英国	种子轮	2021.04	~2.5 千万
Qnami	瑞士	A 轮	2021.05	~2.8 千万
ColdQuanta	美国	A+轮	2021.05	~1.4 亿
未磁科技	中国	股权融资	2021.05	未披露
Q-CTRL	澳大利亚	B 轮	2021.11	~1.7 亿
国仪	中国	C 轮	2021.12	数亿
Zero Point Motion	英国	种子轮	2022.03	~2 千万

中科酷原	中国	A 轮	2022.03	数千万
未磁科技	中国	A 轮	2022.06	数亿
昆迈医疗	中国	Pre-A 轮	2022.07	数千万
QLM	英国	A 轮	2022.08	~9.6 千万
Genetesis	美国	C 轮	2022.10	~1.2 亿
ColdQuanta	美国	B 轮	2022.11	~7.6 亿

来源：根据公开信息整理（截至 2022 年 12 月）

（二）从样机到产品，量子测量企业持续发力

量子测量设备的供应商目前以科研机构孵化的初创企业为主，一些老牌工业企业纷纷着手布局相关产品。未来量子测量传感装置将向着两个方向发展，面向科研等高精尖领域的产品将充分利用量子特性进一步提升测量精度，而面向行业用户的商用产品将逐步实现小型化、低成本、可量产。目前面向个人消费者的应用前景尚不明朗。近些年，基于冷原子干涉、热原子蒸气、金刚石 NV 色心以及单光子探测增强几种路线的量子传感器已逐渐从实验室样机开发迈进商用产品制造销售。

欧美国家的量子测量领域有着很深的研究基础，技术产品种类更加丰富，近年来，已经有几十家以量子测量技术为核心的初创企业涌现，产品形态包括原子钟、原子重力仪、原子加速度计、原子磁力计、超导磁力计、超导重力仪、光量子雷达、量子图像传感器等，还包括诸如金刚石色心显微镜、顺磁共振谱仪等高端仪器仪表。由多路量子磁力计探头可进一步集成为超导/原子心脑磁图仪。

受资金、市场等因素鼓舞，许多量子测量公司还发布了一些新产品和新解决方案。这些公司正在利用先进的量子器件来赋能信息通信、生物医疗、国防安全和工业应用等诸多行业。比如美国公司 Gigajot Technology 发布了首批量子图像传感器(Quanta Image Sensor, QIS) 产品，以量子技术为基础，实现了在常温下准确地单光子探测与光子计数，与彩色滤波、光子泊松处理、读取噪声与模数转换等技术相结合，使读出噪声的性能较常规 CMOS 成像提高了 5~10 倍。这些创新成果为开发下一代量子成像系统奠定了基础。英国量子磁力计公司 Cerca Magnetics 在大多伦多的病童医院成功安装了第一套 OPM-MEG 系统，对于自闭症进行了开创性研究。这个系统包括 32 个 QuSpin 公司生产的光学泵浦磁力计探头，安装于头盔上，在具有神经发育障碍遗传史患儿中开展自闭症的研究与诊断。英国量子激光雷达公司 QLM 与无人机公司 Inzpire 合作，研究无人机载光量子雷达对甲烷排放进行量化检测。

国内量子测量企业主要集中在原子钟、光量子雷达、量子重力仪、量子磁力计、高端仪器仪表等领域。同时也积极探索新的衍生产品。比如由 NV 色心磁力计衍生出的量子电流互感器，可实现大动态范围下的交直流电精确测量与监控。2022 年，量子电流互感器已经在合肥挂网试运行⁶⁵。为了更好地在测量传感市场中立足，许多国内初创公

⁶⁵ <https://m.gmw.cn/baijia/2022-09/16/1303143773.html>

司采取自主研发、沿途下蛋的策略。一方面自主研发，保障关键技术和供应链的自主可控，最大限度地避免“卡脖子”的风险；另一方面从整机研发过程中孵化出一些关键零部件产品，扩大销售规模，将收入进一步投入整机的研发与迭代中，形成良性循环。近些年国内量子传感器供应商也不断扩展市场，与行业用户共同探索量子测量技术在不同领域、不同行业的应用场景与解决方案。

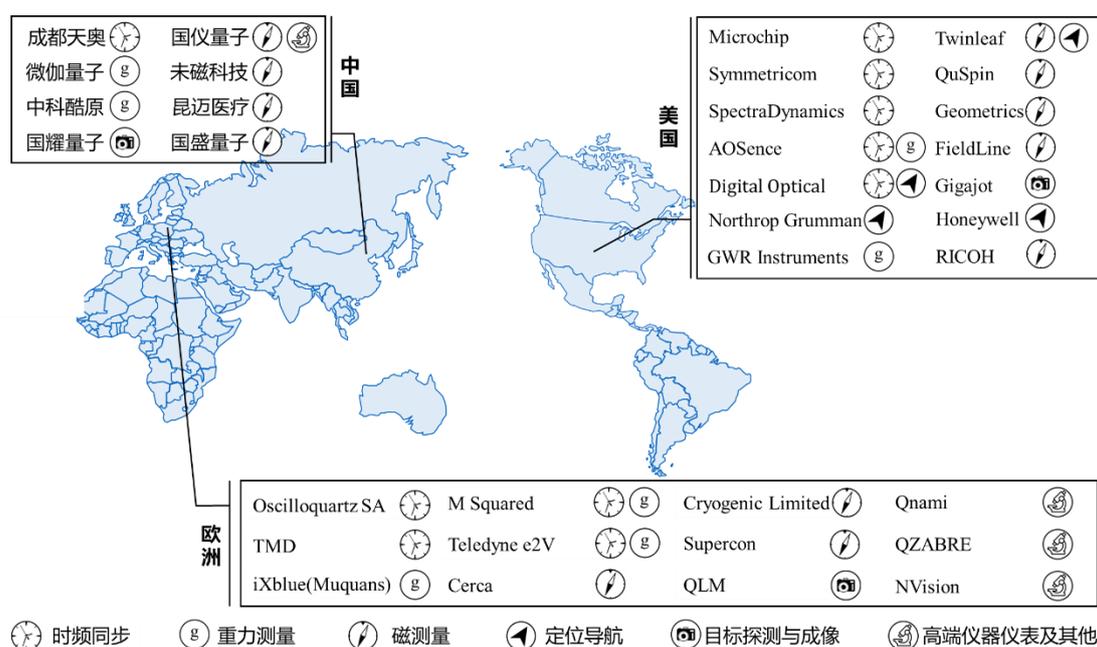


图 16 欧美和中国主要量子测量企业分布

(三) 标准研究逐步开展，尚未形成标准体系

标准是引导和规范产业发展的重要工具，标准化是构建产业链的关键，是产业成熟的必经之路。随着量子测量技术的进步，国际标准化组织对这一领域的标准化十分重视，并积极开展相关工作。

目前，国际多个标准化组织均在量子领域开展初步标准化研究与探索，但研究重点多为量子计算、量子通信密钥等，在量子测量领域

标准化工作主要为报告和用例形式。

2018年，IETF组织的互联网技术研究工作任务组 IRTF，设立了量子互联网研究组（QIRG），研究量子互联网应用案例，量子测量应用方面目前包含量子时钟网络、高灵敏度量子传感和基于量子信息技术的干涉望远镜三个应用案例条目。

在国际电信联盟 ITU-T 方面，2019年9月 ITU-T 设立 FG-QIT4N（面向网络的量子信息技术焦点组），主要是对量子增强型网络技术、量子信息技术驱动的新型服务及应用开展标准化预研工作，已从术语定义、应用案例、网络影响、成熟度等维度对量子信息技术进行研究，报告中对量子时频同步技术与应用前景做了深入的研究和探讨。

2020年，由欧盟出版办公室发布的《关于量子标准：量子技术为工业做准备》新报告，报告了“量子技术为工业做准备”研讨会的成果，研讨会由 CEN 和 CENELEC 与联合研究中心（JRC）、欧盟委员会通信网络、内容和技术总局（DG CNECT）和德国标准化协会（DIN）共同组织。研讨会参加者确定了三个主要领域：（一）量子密钥分配和量子安全保障；（二）量子计量、传感和成像；（三）量子计算和互联网。作为标准化的具体行动，研讨会建议将重点放在量子技术术语的标准化和制定欧盟量子技术标准化路线图上。

近年来，国家标准化管理委员会密切跟踪国内外量子信息发展动态，积极推进量子信息标准化工作。2019年1月整合国内资源，成立全国量子测量与计算标准化技术委员会（SAC/TC 578），开展量子计

算与测量相关国家标准研制工作。目前我国量子测量标准化工作已迈开第一步。中国通信标准化协会（CCSA）量子通信与信息技术特设任务组也积极开展量子同步技术的研究。

2021年8月24日，国家标准化管理委员会下达《精密光频测量中光学频率梳性能参数测试方法》国家标准计划项目，由全国量子测量与计算标准化技术委员会归口管理，以加快量子计算与测量基础标准研制。

2021年10月13日，国家标准化管理委员会下达了《量子测量术语》《量子精密测量中里德堡原子制备方法》《光钟性能表征及测量方法》《单光子源性能表征及测量方法》《原子重力仪性能要求和测试方法》等5项量子信息领域国家标准计划项目。如表2所示，这5项国家标准计划项目由中国计量科学研究院牵头起草，以量子测量为切入点，率先将量子测量技术在卫星导航定位、深空深海探测、重大科学装置、高端装备制造等重要产业领域应用成果转化为国家标准，完善量子信息领域标准体系，支撑产业健康持续发展。

表2 量子测量国家标准计划项目

序号	计划号	项目名称	制修订	主管部门	归口单位
1	20214287-T-469	光钟性能表征及测量方法	制定	国家标准化管理委员会	全国量子测量与计算标准化技术委员会
2	20214288-T-469	量子测量术语	制定		
3	20214289-T-469	原子重力仪性能要求和测试方法	制定		
4	20214291-T-469	单光子源性能表征及测量方法	制定		

5	20214293-T-469	量子精密测量 中里德堡原子 制备方法	制定		
---	----------------	--------------------------	----	--	--

注：数据摘自《国家标准化管理委员会关于下达 2021 年第三批推荐性国家标准计划及相关标准外文版计划的通知》

2021 年 12 月，由中国信息通信研究院牵头在 CCSA 完成了《量子同步技术的演进及其在通信网络中的应用研究》。报告系统梳理了未来通信网络的同步需求以及现有经典同步技术的能力，从量子时钟源和量子同步技术两个层面梳理分析量子同步技术方案以及其在通讯网络中的应用前景，指出量子同步技术发展实用化需要推进的核心技术，展望未来量子同步技术应用模式，给出发展建议。

总体而言，量子测量领域的标准化仍处于初级探索阶段，尚未形成标准化体系。同时，也可以看到由于量子精密测量产品的精度已经超出传统检测认证机构的能力范围。亟需建立量子测量领域的标准化体系，优先研究量子测量产品的评价指标及测试方法，尽快建立起第三方检测认证的渠道。

五、总结与展望

总体来看，量子测量的发展不再单纯追求性能指标（如精度、灵敏度）的提升，更加注重样机工程化和应用场景探索，正在形成技术创新、工程实践、应用落地“三维”发展新坐标，牵引量子测量技术产业迈向新的阶段。首先，量子测量技术创新仍在飞速发展。通过系统优化、噪声分析与抑制等手段使得测量的精度、灵敏度等系统参数进一步提升。近年来不断有新的技术方案被提出，测量对象也被拓展

到温度、相位、距离和痕量等。量子测量与生物医疗、地质勘探、环境科学等学科交叉融合，探索出一系列有前景的应用模式。其次，**工程化成为量子测量落地应用的重要支撑**。近年来，量子测量样机的小型化、集成化、可移动、可穿戴成为研究热点。未来商用还需进一步降低成本、功耗，增强鲁棒性和易操作性。最后，**产学研用各方共同探索有商业价值的应用场景和解决方案**。量子测量在基础科研、军事国防、生物医疗等领域具有重要的战略价值和广阔的应用前景，需要建立产学研用多方合作的平台，在交流沟通中碰撞出灵感的火花，多种技术路线在不同行业中“八仙过海，各显神通”，赋能行业数字化转型。

目前经济发展正处于新旧动能转换的关键节点，因此需要科技创新产业升级来提升经济发展质量。这将给予了量子测量技术与产业发展的机遇。量子测量领域未来发展应把握住机遇，加速从科研向产业的转换，探索应用场景，扩展行业用户，尽快实现产业落地。



量子信息网络产业联盟
联系电话：010-62300592
邮箱：qia@caict.ac.cn