

iCV TA&K

Technology Advisory
& Knowledgebase



光子盒研究院

QUANTUMCHINA

Q-STAR

Quantum Strategic Trends Annual Report

2026

全球量子传感产业发展展望

序言

融合赋能 产业新程

量子传感正经历一场深刻转型。如果说去年的主题是展示量子传感器能做什么，那么今年的关键词则是“可交付”——技术开始走出实验室，进入工程验证、供应链整合与实际订单的硬核赛道。

从融资结构的变化可以看到，资本已不再为单项指标的刷新而盲目投入，而是转向那些具备工程化能力的成熟团队。产业的竞争逻辑，正在从比拼原理样机的灵敏度，转向比拼批量交付的稳定性与成本控制。

这种转向在技术路线上同样清晰。时频与磁场测量率先进入产业化阶段，在国防授时、生物成像等场景实现对经典方案的替代；重力测量在资源勘探与地震监测中找到刚性需求；电场、惯性等方向虽仍处早期，但正加速从样机向工程载荷演进。同一物理量的多条技术路线并存，构成了产业生态的丰富性与演进动力。

更深层的变化在于，量子传感正从单点设备向系统能力演进。上游核心硬件的标准化量产、外围保障系统的紧凑化设计、辅助器件的低功耗集成，正在构建可复用的硬件底座。软件定义与算法补偿的兴起，则让传感器在非理想工况下维持高精度，逐步摆脱对实验室环境的依赖，向工业级模块演进。

与此同时，国际竞争的维度也在扩展。围绕技术标准与可信供应链的布局，正成为比传统贸易手段更具影响力的市场准入门槛。未来的竞争不仅是技术指标的竞赛，更是规则制定权与生态主导权的战略博弈。

展望未来，量子传感产业的规模化拐点，取决于能否从垂直细分走向通用市场。特种需求提供了早期动能，但真正的量级跃迁，需要量子传感器在成本、可靠性与易用性上接近或优于传统方案，深度嵌入工业自动化、智能驾驶、医疗影像等民用体系。当量子传感不再需要“量子”前缀来彰显特殊性，而是成为测量系统中默认的底层技术时，这一产业才算真正完成使命。

光子盒研究院 院长

顾成建

声明

- 01** 本报告体现的内容和阐明的观点力求独立、客观，本报告中的信息或所表述的观点均不构成投资建议，请谨慎参考。
- 02** 本报告旨在梳理和呈现2025年度内全球与量子细分技术和产业领域发生的重要事件，涉及数据及信息以公开资料为主，以及对公开数据的整理。并且，结合发布之时的全球经济发展状态，对短期未来可能产生的影响进行预判描述。
- 03** 本报告重点关注2025年度量子传感细分行业发生的相关内容，以当地时间报道为准，以事件初次发布之时为准。对同一内容或高度相似内容的再次报道，若跨年度，不视为2025年发生的重要事件。
- 04** 本报告版权归光子盒研究院所有，其他任何形式的使用或传播，包括但不限于刊物、网站、公众号或个人使用本报告内容的，须注明来源（2026全球量子传感产业发展展望[R].光子盒研究院.2026.02）。本报告最终解释权归光子盒研究院所有。
- 05** 任何个人和机构，使用本报告内容时，不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删减和篡改。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、印刷等。如征得同意进行引用、转载、刊发的，需在允许范围内。违规使用本报告者，承担相应的法律责任。
- 06** 本报告引用数据、事件及观点的目的在于收集和归纳信息，并不代表赞同其全部观点，不对其真实性负责。
- 07** 本报告涉及动态数据，呈现截至统计之时的情况，不代表未来情况，不构成投资建议，请谨慎参考。

研究方法

本研究报告基于系统化、科学化和多元化的研究方法论，通过深度数据挖掘、专家洞见提炼、产业建模分析与多维价值链梳理，全方位评估量子科技的技术前沿、市场潜力及其产业化路径。

- 01** 多源数据收集与验证：本研究采用横跨多维度、多渠道的精细化数据采集策略，涵盖量子科技领域的多元数据源，包括全球量子产业链中的核心企业公开数据、领先科研机构的技术研发成果、政策法规解读、行业市场洞察及学术文献等。为确保数据的广泛代表性与严谨性，我们对采集数据进行了多轮验证与交叉比对，构建高质量的实证数据集，以支持后续分析工作的科学性与精确性。
- 02** 专家网络与深度访谈：通过建立涵盖不同领域的多层次专家网络，本研究与量子科技领域的一线从业人员展开了深度对话。受访专家包括知名量子科技企业的创始团队及技术负责人、行业协会的资深顾问、顶尖高校及科研机构的量子科学家等。访谈以结构化与非结构化相结合的方式，围绕技术路径、企业商业模式及未来发展等关键议题展开，从而提炼具有高度前瞻性的洞见。
- 03** 先进建模与数据量化分析：结合全球管理咨询领域的实践经验，研究构建了多层次分析框架与量化模型，以揭示量子科技产业的动态趋势和潜在价值。运用各类统计模型、预测算法及市场模拟技术，对投融资活动、市场规模及产业链分布进行量化分析，力求精准刻画量子科技行业的发展路径及关键驱动因素。
- 04** 产业价值链及场景化洞察：研究采用端到端价值链分析方法，全面梳理量子科技在产业链各环节中的核心要素，从上游关键技术与核心组件研发，到中下游应用场景开发及市场拓展。系统探讨了量子技术在卫星通信、无源导航、金融、化工、材料、能源电力、基础科研、生命科学等多个重点行业的潜在变革性应用，为行业赋能提供战略参考。
- 05** 地区与政策差异化分析：本研究从全球视角出发，开展了区域比较分析，重点评估全球各主要科技国家和地区在量子科技领域的政策扶持、创新生态、人才集聚及技术商业化等能力。基于差异化定位，揭示了区域之间的竞争优势与互补性，为全球量子科技协同发展提供洞见支持。

致谢

本篇报告由量子科技服务平台光子盒下属光子盒研究院和全球前沿科技咨询机构ICV TA&K联合撰写与发布。

感谢包括但不限于以下公司给予技术和素材的支持：



目录

1. 2025产业发展概览	9
2. 核心组件进展	22
3. 磁场测量	39
4. 时频测量	47
5. 重力测量	55
6. 其他物理量测量	62
7. 全球主要国家地区政策环境、供应商分析	90
8. 投融资分析	104
9. 产业分析与预测	110
10. 产业展望	116
11. 附件	123

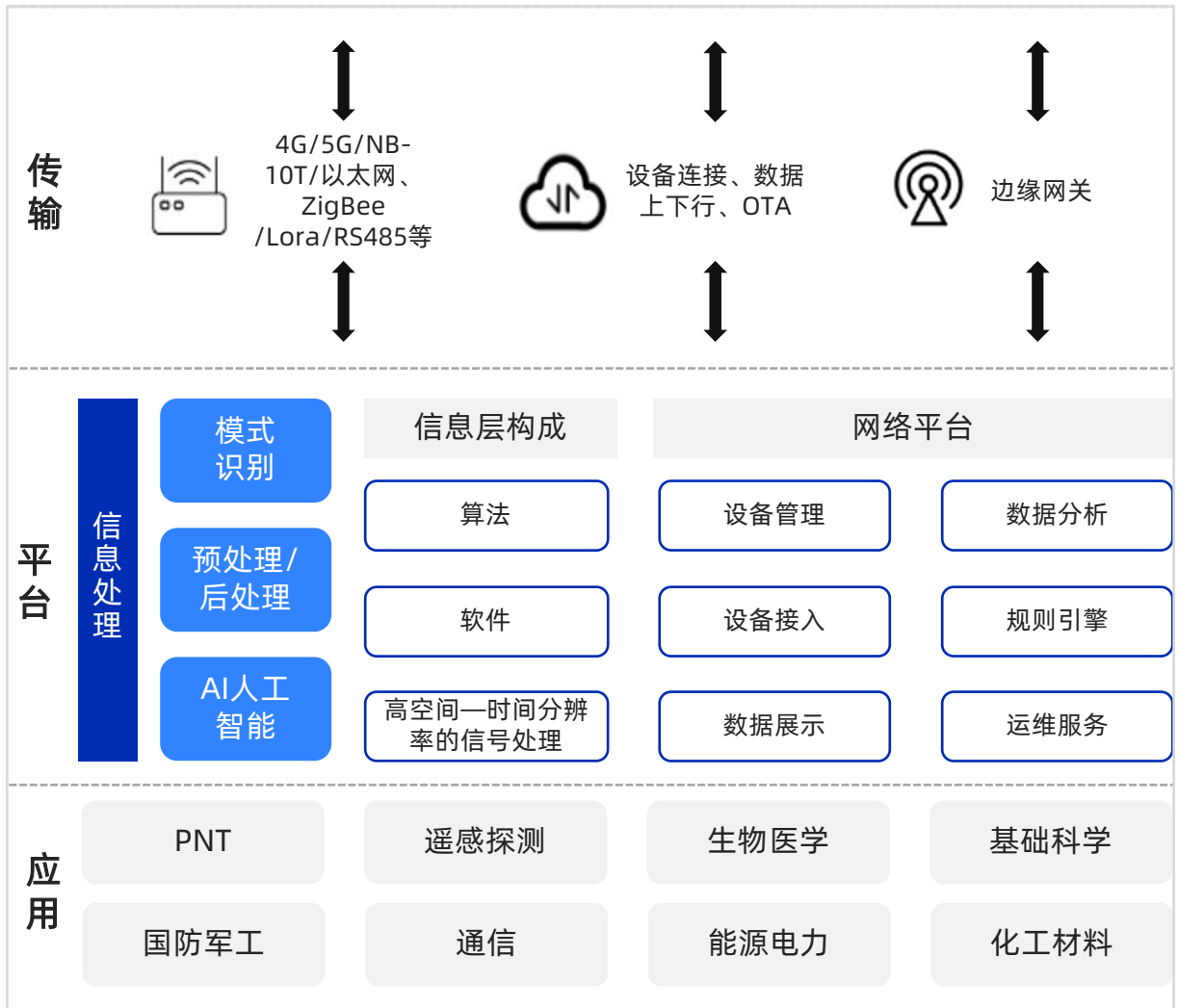
研究对象

本报告的研究对象是**量子传感**。量子传感是一个广泛的技术范畴，它不仅包括量子精密测量（含量子传感器）、还涵盖了量子信息传输、量子信息处理以及量子信息应用等多个相关领域按照技术架构划分，量子传感可划分为四层架构，分别为感知层、传输层、平台层、应用层四层。

- ▶ **感知层**：即通过量子传感设备对微观世界的变化进行探测和感知，如温度、压力、旋转、位置等，并获取相应的信息和数据。
- ▶ **传输层**：作为数据传输通道，主要负责将量子传感设备采集到的信息和数据传输到平台层进行处理和储存。
- ▶ **平台层**：主要负责量子传感设备的运行管理、数据处理、分析与存储。通过集中管控量子传感设备，实现统一的网络监控与运维管理；同时结合云计算与人工智能等技术，处理和分析采集的数据，为用户提供决策支持与数据保障。
- ▶ **应用层**：将处理后的数据转化为具体的应用和服务。例如，在导航、医疗、电力等领域，数据会根据不同的应用场景被进一步加工和利用，以满足特定领域的需求。

图表 量子传感系统架构图





ICV TA&K | 2026.2

由于量子感知层的设备与传感器部分领域仍处于早期研发阶段，应用也在探索中，量子传感的系统建设尚不成熟。因此，本报告的研究对象选取量子传感，但研究重点仍在量子感知层，即**量子精密测量**。

量子精密测量是利用量子力学特性（如原子能级、基本粒子的自旋等）进行物理量探测和感知的技术，主要通过测量微观粒子在待测物理量作用下的状态变化来实现对物理量的测量，并且依赖于对微观粒子状态的精确操控和读取。

根据实现方式不同，量子精密测量主要分为囚禁原子/离子、固态自旋、超导以及其他传感技术；根据测量的物理量不同，其主要分为磁场、电场、时频、位移/相位、惯性、压力、温度、重力等量子传感器。

图表 量子精密测量的技术与应用图谱





01

2025产业发展概览

目录

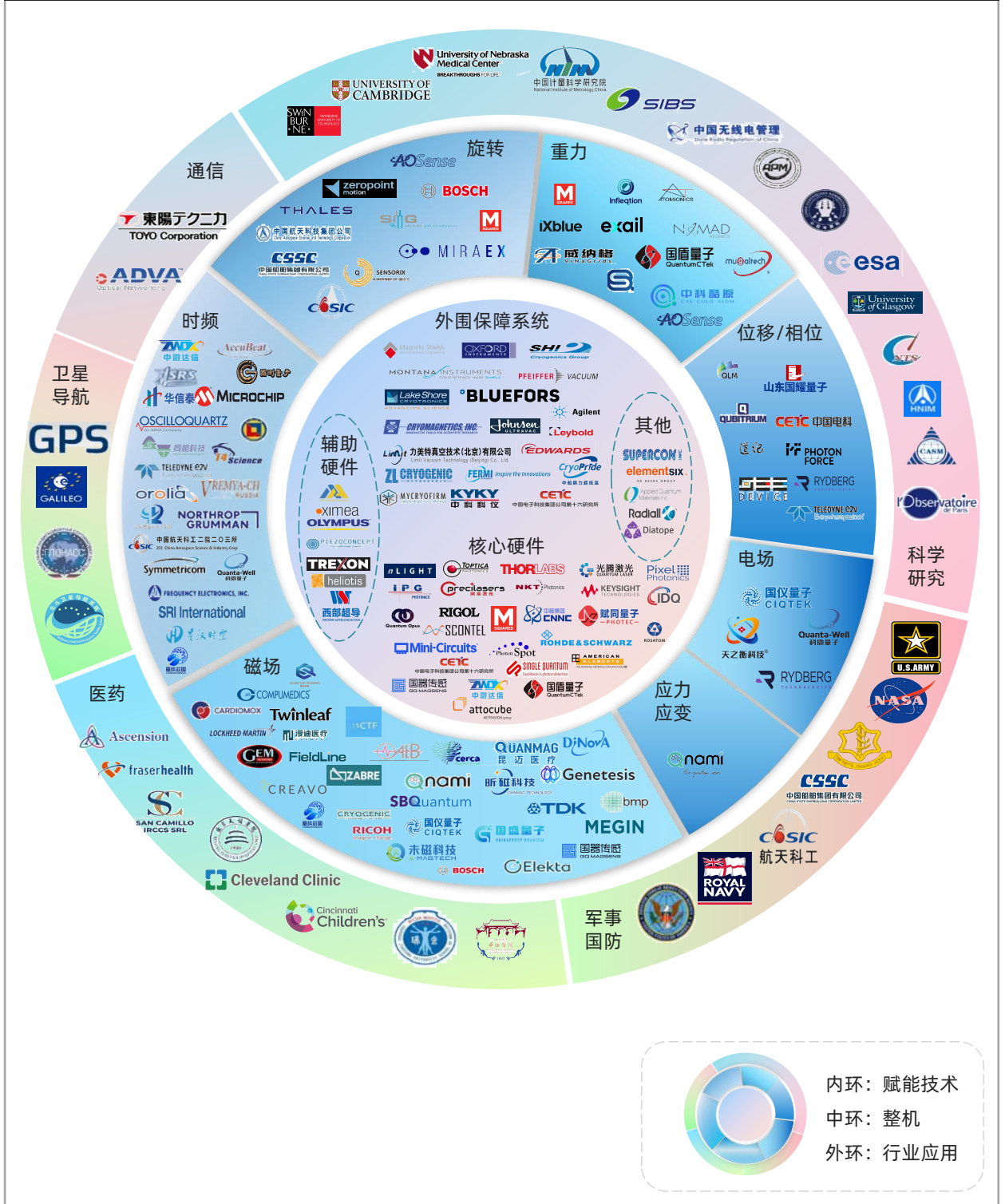
01

2025产业发展概览

- 01 全球主要经济体密集部署量子国家战略
- 02 全球量子竞争格局：阵营化协同，东西方双体系并行
- 03 上游硬件的规模化与工程化推动量子传感器走向实用
- 04 量子传感不断突破精度极限，迈入工程化与自适应新阶段
- 05 各细分领域处在不同的技术成熟度阶段
- 06 资本市场逐渐回归理性，资金开始向具备工程化交付能力的头部企业集中
- 07 多技术领域共同推动量子传感产业规模稳步增长
- 08 商业生态正经历从技术验证向市场验证的关键转型

图表 2025全球量子传感产业生态图谱

2025全球量子传感产业生态图谱

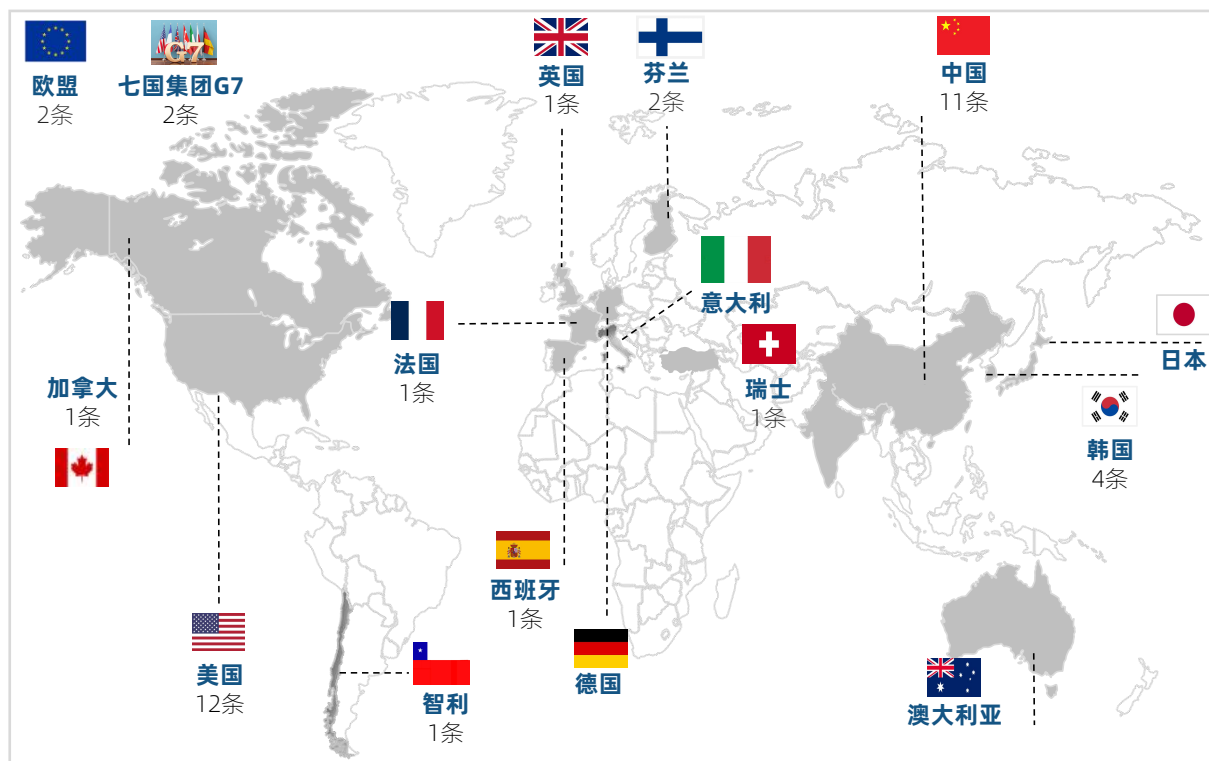


01

全球主要经济体
密集部署量子国家战略

2025年，全球主要经济体相继升级量子科技战略，政策重心呈现出从长期基础研究向加速产业化与应对国防安全挑战双重倾向的特点。

图表 2025年国家级量子信息科技政策条数



iCV TA&K | 2026.2

美国（12条）在政策发布密度上位居首位，其核心逻辑是将技术领先与国防安全深度捆绑，通过年度国防授权法案强制推行抗量子加密标准迁移，并由国防部明确了量子技术在战场信息主导中的核心任务。

中国（11条）在十五五规划建议中明确了前瞻布局未来产业的方向，并推行计量支撑产业新质生产力发展行动方案，其深刻意图在于通过量子精密调控技术的突破来彻底重塑工业计量基准与质量体系。

欧盟发布的量子欧洲战略着重布局量子生态，力求在动态变化的全球局势中维持技术自主权。这些顶层规划共同表明，量子科技已不再是单纯的实验室命题，而是各国运用行政手段加速转化的核心生产力。

02

全球量子竞争格局： 阵营化协同，东西方双体系并行

量子领域的国际协作在2025年表现出明显的阵营化协同与规则互认态势。

- ▶ 美国主导签署的美英、美日以及美韩技术繁荣协议构成了跨地域的技术同盟闭环，通过监管政策和安全标准的同步来确保核心供应链在盟友体系内的弹性与封闭性。
- ▶ 在加拿大卡纳纳斯基斯峰会上，G7领导人发布的《关于量子技术未来的共同愿景》，它明确将量子传感能力与经济安全挂钩，实质上在成员国之间建立起一个排他性的技术贸易壁垒与可信生态系统。
- ▶ 与此同时，中国政府在过去几年通过对量子科技的持续不断的投入，一方面抵抗美国封锁，一方面发挥其举国体制优势，逐渐培育出全球领军企业，逐渐形成了与西方体系并行的技术体系。

全球量子科技目前呈现出的东西方分割格局，这是新时期中美科技对抗的缩影，全球量子竞争正演变为一场关于科技与工业标准、生产能力及供应链控制权的全面对抗。同时，行业也出现与传统传感产业以及量子计算巨头深度融合的重要趋势，以此能更好地服务于国防与航空航天等国家战略阵地。

03

上游硬件的规模化与工程化 推动量子传感器走向实用

激光器、探测器、集成工艺等核心硬件的性能，直接决定了磁场、时频、位移等多种量子传感器的精度上限与工程可行性。当前，整机能力的提升不仅依赖单项指标突破，更取决于核心组件在量产中的一致性、在复杂环境下的稳定性，以及辅助系统在功耗、体积与可靠性上的整体优化。

- ▶ **制造工艺从手工制备向量产化、标准化发展。**传统量子传感器核心部件长期依赖实验室手工制作，一致性差、成本高。北京大学采用晶圆级MEMS工艺实现了原子气室的批量化集成，单片可容纳24个气室，结合光谱技术将激光线宽压窄至3.9 kHz。核心量子部件开始从手工打磨转向半导体流片，为芯片级光学频率标准的规模化生产奠定工艺基础。
- ▶ **物理极限的突破推动探测灵敏度进入新阶段。**在传统测量体系中，热机械噪声是制约灵敏度的关键因素。哥本哈根大学通过参数调制与反馈控制，在薄膜谐振器中实现了21 dB的热机械噪声压缩，证实了在现实设备参数及中等低温环境下实现量子增益的可行性，为提升量子加速度计、重力仪等力学传感器的物理灵敏度提供了远超经典理论限制的技术路径。
- ▶ **辅助系统的轻量化与适应性提升助力传感器走出实验室。**以往高性能量子传感设备常依赖大型低温、真空与减震平台，难以适应移动部署。Bluefors推出的紧凑型脉管制冷机在维持2K低温与10 mW制冷量的同时，将功耗降至1.3 kW，并凭借无运动部件设计极大降低了运行震动，为传感器在车载、船载等动态环境中的部署提供了关键支撑。

04

量子传感不断突破精度极限，
迈入工程化与自适应新阶段

全球量子传感技术的发展，正呈现出一条清晰的并行路径：在持续挑战物理指标极限的同时，系统性的工程化与环境适应能力已成为同等重要的演进维度。

一方面，对时频、磁场等物理量测量精度的极限突破，为传感器奠定了性能基础。另一方面，技术的重点正转向解决量子态在真实复杂环境中的稳定维持问题。通过将先进控制算法嵌入传感器底层，系统能够实现对动态噪声的实时识别与智能补偿，从而显著增强在非受控条件下的测量鲁棒性。

与此同时，微纳制造与集成光子技术的进步，正推动传感器从大型实验装置向紧凑化、低功耗的工程载荷转型。这种硬件集成与智能软件的深度融合，使量子精密测量逐步摆脱对实验室支撑体系的依赖，开始向深海探测、航天载荷及高动态平台等极端环境渗透。

在这一趋势下，量子传感正从精密的科研仪器，演变为能够在复杂工况下持续稳定工作的工业级测量底座。

01 重力导航系统完成144小时海军实测

Q-CTRL软件强化的量子重力导航系统在澳大利亚皇家海军多功能航空训练舰MV Sycamore上完成首次海上防御试验。验证了量子双重力仪在无GPS环境下的可靠导航能力，系统连续运行144小时并成功采集数据，且功耗降至180W。

**02 单离子光钟系统不确定度达到 5.5×10^{-19}**

NIST、科罗拉多大学等团队通过量子逻辑谱、远程激光稳定度传输、改进离子阱设计和新真空系统，实现了系统不确定度为 5.5×10^{-19} ，频率稳定性为 $3.5 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau} / \text{s}$ 的单离子光钟。

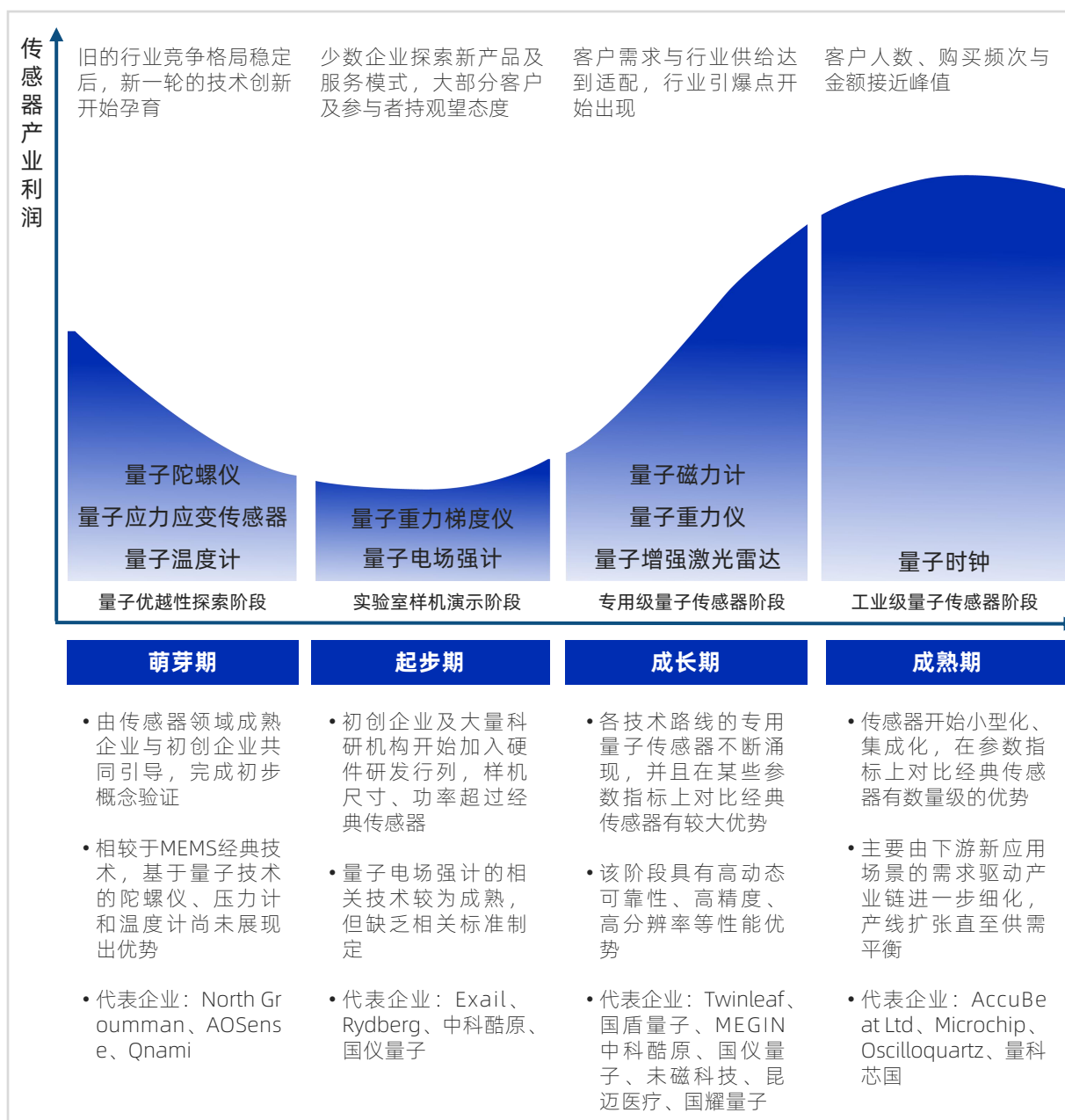


05

各细分领域
处在不同的技术成熟度阶段

量子传感技术已步入由概念验证迈向规模化应用的动态演进期。从产业发展周期来看，当前行业整体处于从“起步期”向“成长期”过渡的关键阶段，不同细分技术路线的成熟度呈现显著分化。

图表 量子传感产业发展周期示意图



- ▶ **时频与磁场测量等优势领域已率先进入成长期，形成初步商业闭环。**以原子钟和量子磁力计为代表的整机产品，已在精度、稳定性等核心指标上超越经典传感器，在高端科研、国防授时与生物磁成像等领域实现对传统方案的替代。
- ▶ **电场、旋转等新兴方向仍处于起步期，正经历从实验室样机向工程原型跨越。**相关技术虽在原理层面取得突破，但整体仍面临体积、功耗、环境适应性等工程瓶颈，尚未形成统一标准与规模化供应链。
- ▶ **应力应变、温度等传感方向尚处萌芽阶段，性能优势尚未完全显现。**相关技术仍处于早期研发与概念验证期，尚未在主流应用中展现出足以撼动成熟技术路径的综合优势。

需要指出的是，同一类量子传感器内部往往存在多条技术路线，其成熟度亦存在明显差异。以磁力计为例，SQUID技术已相对成熟，而基于NV色心等新兴原理的技术仍处于产业化早期。这种技术路线间的梯度关系，进一步丰富了量子传感产业的发展生态。

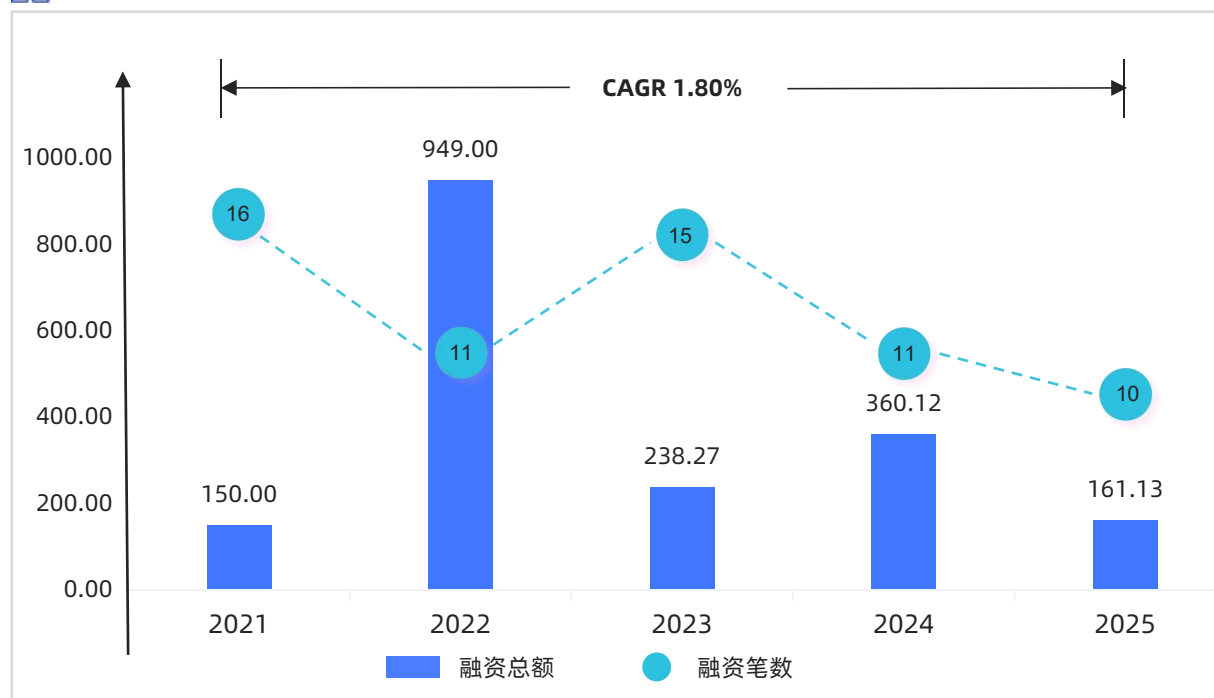
总体而言，量子传感产业的商业化进程遵循着渐进式发展规律。成熟技术持续拓展应用边界，工程化技术加速突破实用门槛，前瞻技术则为长远发展储备动能。未来产业规模的扩张速度，将取决于各技术路线能否系统性地解决从实验室性能到工程实用性、从单点突破到系统集成的一系列关键挑战。

06

资本市场逐渐回归理性，资金开始向具备工程化交付能力的头部企业集中

2025年，全球量子传感领域的资本逻辑更加集中在可务实交付、可大规模化。2025年，全球融资额较2024年增长率下降约55.2%，下降幅度明显。21-25年五年的复合年均增长率为1.8%，较21-24年的33.9%下降32.1个百分点。

图表 2021-2025年全球量子传感领域融资总额与笔数（单位：百万美元，笔）



ICV TA&K | 2026.2

注释：本次统计对未公开具体融资金额的公司进行了数额估计。

2025年融资笔数也降至五年最低，全球量子传感领域公开融资事件仅为10笔，创下过去五年新低。然而，在融资总额大幅收缩的背景下，单笔融资强度却出现极端分化。全年最大单笔融资——Infleqtion单轮1亿美元融资占全年总额的62%，凸显资金向具备工程化与商业化能力的头部企业高度集中。

需要指出的是，公开融资数据的收缩并不完全等同于行业总体投入的降温。在风险投资趋于谨慎的同时，政府专项、国防合同与大企业战略投资等非公开渠道的资金仍在持续注入，且往往更侧重于可交付的系统与明确的应用场景。

从技术路径看，中性原子系统（冷原子、原子气室等）因其在时频、导航等战略领域的应用潜力，占据约81.5%的融资份额；固态自旋体系则依托其易于集成和小型化的优势，在微观磁探测等方向保持了较高的融资活跃度。

地域分布上，美国凭借战略级项目支持在单笔金额上保持领先，中国则依托多技术路线布局在融资事件数量上表现活跃。

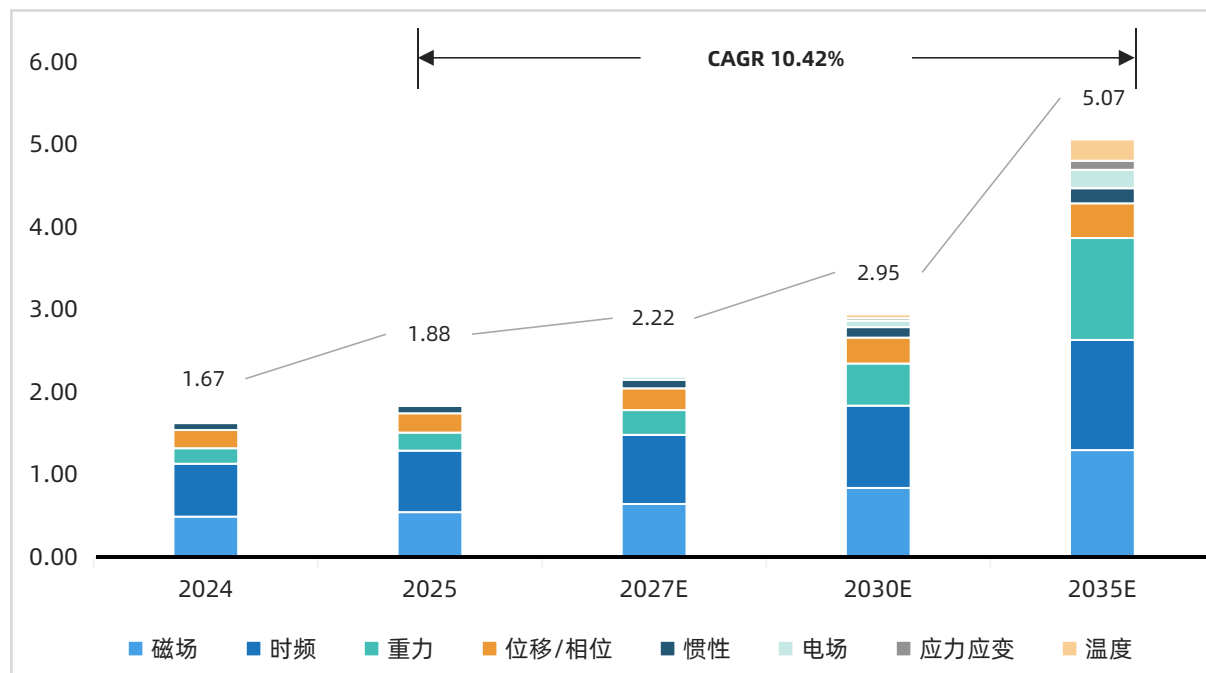
整体而言，行业已越过单纯追求参数突破的实验室阶段，正在进入以**工程化能力、可靠性与可重复交付**为关键指标的产业化攻坚期。

07

多技术领域
共同推动量子传感产业规模稳步增长

全球量子传感产业正进入稳步增长阶段。总产值预计从2025年的18.8亿美元增长至2035年的50.7亿美元，复合年均增长率达10.42%。这体现了量子传感正从单一领域的精密测量扩展至多物理量的全面覆盖。

图表 全球量子传感产业规模预测（2025-2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

虽然时频与磁场测量目前仍占据产值核心，但重力与电场等方向的加速增长，标志着技术正在由科研环境向精密工业下沉。现阶段增长动力主要源于国防安全等高精度特种需求，而在广泛的民用市场，其渗透率仍存在局限。

未来产值实现量级跃迁的逻辑，在于从垂直细分领域向大规模通用市场的跨越。通过降本提效，并深度赋能工业自动化等民用体系，量子传感才能真正打破特种应用增长的天花板，由精密科研仪器转型为规模化普及的工业底座。

08

商业生态正经历 从技术验证向市场验证的关键转型

2025年，量子传感产业的发展逻辑从比拼实验室性能指标，转向验证产品的工程可靠性、成本控制与特定场景下的商业价值。这一转型在产业链的不同环节均有体现。


▶ **上游供应链：稳定性与规模化能力成为关键门槛。** 企业的竞争基础已不仅是技术参数，更是持续供货、质量一致性与成本控制的能力。

例如，英国激光器供应商M Squared因财务问题进入破产管理程序，这一事件凸显了在需求尚未规模化爆发的阶段，单一依赖科研订单的商业模式极为脆弱。其直接后果是，下游系统集成商为保障供应链安全，加速将订单转向具备工业级量产和稳定交付记录的供应商。这推动上游领域从“技术作坊”向具备韧性的现代工业供应链体系演进。

▶ **中游整机与系统集成：产品定义更紧密围绕下游刚性需求。** 整机厂商的研发重点从追求通用性能的**极致**，转向解决特定高价值场景（如国防导航、资源勘探）中的工程痛点（如体积、功耗、环境适应性）。能否交付满足苛刻环境要求、具备明确性价比优势的可靠产品，成为生存与获得订单的关键。

同时，产业出现技术平台化整合的初步迹象。例如，量子计算公司IonQ对传感技术公司Vector Atomic的收购，表明在原子操控等底层技术同源的领域，存在通过平台复用降本增效、服务于高端客户的商业逻辑。然而，这仅是特定路径下的整合尝试，大量面向专业测量场景（如时频、重力、生物磁）的量子传感公司，其产品形态、客户群体与商业模式依然清晰且独立，行业远未形成单一垄断格局。

2025年量子传感产业的发展表明，行业已跨越单纯的技术可行性验证期，进入以市场需求和工程落地为导向的新阶段。竞争维度变得更加多元，包含了技术、供应链、成本与生态合作在内的综合能力。



02

核心组件进展

目录

02 核心组件进展

- 01 核心硬件是量子传感器性能提升的保障
- 02 外围保障系统朝向定制化发展
- 03 辅助硬件向集成化方向发展

上游发展势头强劲

量子传感系统的上游核心组件由核心硬件、外围保障系统及辅助硬件共同构成。随着量子传感技术从受控实验室向复杂现场应用跨越，上游组件的研发重心已从单一物理指标的突破，转向极致性能与环境适应性的深度协同。

- ▶ **核心硬件：实现量子态精准操控与读出的技术核心。**涵盖激光器、原子气室、微波/射频源及探测器等。当前技术迭代聚焦于激光窄线宽的长期稳定、气室的微型化封装以及单光子探测器的高效响应，通过底层材料工艺优化，直接决定系统测量的灵敏度上限。
- ▶ **外围保障系统：构建低扰动物理环境的运行保障。**包括磁屏蔽、真空及低温系统等。研发重点正从分立式设备转向多场耦合一体化设计，通过主动动态补偿与紧凑型结构，为核心硬件提供受控的物理边界，确保系统在复杂工况下的测量重复性。
- ▶ **辅助硬件：保障信号高信噪比传输与调制的关键环节。**涉及射频器件、低温线缆及调制器等。此类组件正朝着宽带化、低热损与自适应调控方向演进，通过优化相位锁定链路及传输带宽，有效抑制系统背景噪声，确保控制指令与传感数据的精确处理。


通过核心硬件的性能跨越、外围系统的环境维系以及辅助硬件的信号保真，上游产业链正形成一套高集成、低功耗、高可靠的硬件体系，支撑量子传感器在时频标定、重力测量及深空探测等领域的工程化部署。

01 核心硬件是量子传感器性能提升的保障

随着量子传感在时频标定、重力测量及空间探测等领域的应用深化，高性能激光器的频率稳定性与原子气室的真空维持能力成为提升系统精度与鲁棒性的核心。窄线宽激光器技术与微型集成气室工艺的优化，直接推动了设备体积的缩小与系统误差的降低。

在信号驱动与控制方面，微波源与射频硬件通过优化相位噪声控制与高频谱纯度输出，有效降低了反馈噪声，为量子态的精准调控提供了稳健的硬件基础。同时，单光子探测技术持续演进，超导纳米线单光子探测器（SNSPD）凭借高探测效率、低暗计数率及优异的时间响应性能，成为量子雷达、量子通信与量子成像的核心探测方案，不断拓宽量子系统的测量边界。

通过材料创新、系统集成与工程化设计，确保传感器在复杂工况下依然能维持预期的测量灵敏度与长期稳定性。

 图表 量子传感核心硬件协同架构图



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

► 激光器从高精度光源向支持系统大规模运行的基础设施演进

激光器凭借其高亮度、单色性与高相干性等特征，为冷原子操控、相干激发与高精度读出提供了不可替代的光学基础，是量子传感系统中的关键核心硬件之一。在量子传感应用逐步从实验室验证迈向工程化与规模化部署的过程中，激光器在系统中的角色也由单一光源，演变为直接影响测量精度上限与系统扩展能力的重要基础设施。

在性能需求层面，量子精密测量对激光器提出了显著高于通用光源的技术标准，核心体现在低噪声、长期稳定输出以及极窄光谱线宽等方面。

▶以**光学原子钟**为代表的时频测量体系，需要通过超稳激光器将原子跃迁频率高保真锁定，从而实现 10^{-17} 量级甚至更高精度的时间与频率测量能力。这类需求不仅强调瞬时线宽指标，更对激光器的长期稳定性与环境鲁棒性提出了系统性约束。

在此背景下，激光器相关技术路线正逐步从单点性能极限的追求，转向更具工程潜力的系统级方案探索。一方面，研究工作持续围绕腔稳激光器展开，通过腔体结构与反馈机制优化，降低环境扰动对频率稳定性的影响；另一方面，面向大规模光学体系的新一代时钟激光器也开始在保持极高稳定性的同时，向更高输出功率与系统适配能力方向发展，以满足复杂量子系统并行运行的需求。

01 4 W高功率光谱裁剪时钟激光器硬件

JILA团队研制出最大输出功率达4 W的698 nm时钟激光器硬件，其长期稳定性达到 3.5×10^{-17} ，并具备同时驱动约3000个光量子比特的能力，为大规模光学晶格钟体系提供了关键光源支撑。



02 LAPIS系列半导体激光器

光腾激光推出LAPIS系列窄线宽半导体激光器，公司自建高可靠性半导体芯片封装产线，集成光束整形，温度调节，驱动控制和光纤耦合等功能，实现量子行业场景所需求激光器的小型化，轻量化，高集成的设计，还可根据量子行业客户提出的定制类需求，进行个性化的工程开发。光腾公司的产品目前已经批量供应商用原子钟，原子磁强计，重力仪等客户，助力量子精密测量产业化进程。



在产业供给侧，当前全球用于量子精密测量的激光器主要由德国Toptica、英国M Squared（2025年8月进入破产管理（administration 程序））以及美国Vixar、Coherent等企业提供，覆盖超稳光源、关键波段激光器及相关配套模块；中国企业方面，以上海频准、光腾激光等为代表，为量子传感相关应用提供工程化的激光器产品。

▶ 单光子探测器通过提升时间分辨力与系统集成度满足工程需求

单光子探测器是量子科技各相关领域中的核心元件，通过对单个光子的高效探测与精确计数实现弱光信号识别与时间相关测量，在量子密钥分发（QKD）、光量子计算读出以及量子雷达等应用中发挥基础性支撑作用。

与传统光电探测器相比，超导纳米线单光子探测器（SNSPD）具有高探测效率、极低暗计数率和极优时间分辨性能等技术优势，是当前高性能单光子探测的主流技术路径，并已在多个量子技术领域得到广泛关注。

2025年单光子探测器技术围绕提高时间分辨能力与提升工程化集成度两个方向持续发展。一方面，系统对亚毫米量级空间测距和纳秒级时间解析的需求推动探测器在时间精度和稳定性方面持续提升；另一方面，为减轻传统低温制冷设备的体积和复杂性，对集成制冷方案、模块化设计和多通道一体化的工程优化不断推进，显著增强了探测器在复杂量子系统中的可用性与集成能力。

01 多光子增强型 SNSPD 用于激光雷达测距

德国明斯特大学通过多光子体制优化的超导纳米线单光子探测器硬件，在飞行时间（ToF）LiDAR系统中将测量时间抖动降至11 ps级，实现了0.75 mm级亚毫米测距精度。



02 全球首款四通道超低噪声半导体单光子探测器

国盾量子发布了全球首款四通道超低噪声半导体单光子探测器，通过引入热声制冷技术、采用国产高性能负反馈雪崩光电二极管等首创性探索，在保持超低暗噪声性能的同时，显著降低了体积和工程复杂度。该设备已具备量产条件，并实现交付。



在供应链层面，超导纳米线单光子探测器的产业化供给体系日益完善，全球主要供应商包括美国的Photon Spot和Quantum Opus、俄罗斯的Scontel、荷兰的Single Quantum、瑞士的ID Quantique以及中国的赋同量子等企业，共同为科研级与工程级应用提供高性能单光子探测器及整体解决方案。

▶ 原子气室利用微纳工艺实现批量化制造以适应芯片级集成

原子气室作为量子传感系统中的基础硬件，其主要作用是原子能级的精密操控与量子态读出提供稳定的原子环境。

▶ 在诸如**原子钟**、**量子RF场探测**、**原子干涉仪**等应用中，原子气室中原子的能级跃迁、相干演化及对外场的响应构成了系统灵敏度与精度的物理基础。

随着微纳制造技术与集成工艺的快速发展，原子气室正从传统的玻璃吹制体积器件向**微型化、可批量制造、易于集成**的方向演进，这不仅提高了设备的灵活性和便携性，也为芯片级量子传感器的实现提供了关键物理载体和工程基础。

原子气室的结构、尺寸、原子密度分布、温度均匀性等因素都会直接影响激光与原子作用的稳定性，进而影响整体测量系统的灵敏度与稳定性。**定制化**原子气室也因此成为中游器件供应商和整机开发者满足不同量子传感应用需求的重要一环。

近年来，原子气室技术演进呈现显著的两个方向：一是通过微纳制造与MEMS工艺实现原子气室的批量化、微型化与高一致性，以满足芯片级量子器件集成需求；二是将原子气室作为紧密耦合的敏感元件嵌入复杂量子测量体系，从而实现对外部物理量（如RF波、光场等）的直接量子态响应测量。这些演进方向共同推动原子气室从传统的实验室设备，向具备工程化、可扩展性和多功能集成能力的核心器件转变，为量子传感器在更多应用场景中的落地提供了现实路径。

01 用于光钟的硅-玻璃-硅MEMS原子气室

北京大学等团队研制出硅-玻璃-硅横向光路MEMS原子气室硬件。该器件在单颗晶圆上可集成24个原子气室，并结合调制转移光谱实现了3.9 kHz的极窄激光线宽锁定，支撑了芯片级光学原子钟的研制，为原子气室在量子时频测量中的微型化和性能提升提供了工艺基础参考。



02 里德堡原子气室实现高精度微波波达角探测

NIST等团队利用玻璃气室内的里德堡原子荧光成像技术，通过对37-GHz驻波的空间光谱分析，实现了角度误差仅约1°的波达角（AoA）探测。该方案具备 4π 全向探测与全极化敏感优势，为紧凑型、高性能微波传感提供了新路径。



在供应链与产业化供给方面，原子气室相关制造主要依托成熟的玻璃封装工艺以及近年来逐渐成熟的微机电系统（MEMS）加工路线。原子蒸气所需的碱金属原料（如铷、铯等）属于基础材料，可从American Elements、Sigma-Aldrich等化学材料供应商获取，用于原子蒸气气室的填充与制备。原子气室本体的精密封装与加工则表现出显著的定制化特征，目前多由科研实验室和专业制造单位按需求完成，部分科研机构和创新型企业已开展基于MEMS工艺的原子气室研发与小规模制造。

▶ 高性能微波源通过降低相位噪声提升量子系统调试与开发效率

微波源在量子精密测量与量子传感系统中发挥着基础信号驱动与频率参考的核心作用。

量子传感器，如原子钟、冷原子干涉仪、量子雷达等，其精确工作原理均涉及对微观量子系统（例如原子或离子的能级跃迁）的驱动与干涉，而这些过程通常需要稳定的微波信号作为参考频率或激励源。

例如，**原子钟**利用原子对微波频率的自然跃迁作为频率计量的基准，其本质是通过微波信号与原子能级共振来实现高精度频率标准。

微波源在量子测量系统开发过程中，通常需要与射频/微波测试仪器配合使用，以进行系统调试、噪声表征与性能优化，在研发和工程验证阶段占据不可替代的位置。2025年，在射频与微波硬件供给端，面向科研与工程开发的高性能仪器产品线持续拓展。信号发生器、射频合成器等设备在频率生成纯度、多通道同步及噪声表征等方面的综合性能提升，为量子测量系统的设计、测试与噪声分析提供了更先进的工具。这些进展提升了系统在原型开发与调试阶段的效率，间接支撑了量子传感整体性能的优化。

01 是德科技推出多款射频（RF）与微波器件

美国是德科技扩展了其射频（RF）与微波仪器产品组合，推出包括六款新型模拟信号发生器、两款矢量信号发生器和八款射频合成器等紧凑型测试设备。这些新产品具备低噪声、高频谱纯度、快速切换和多通道相干能力，可用于精确生成和表征微波信号，支持量子传感系统的设计与测试需求。



在全球市场上，专用的射频与微波信号源和测试仪器由全球领先的仪器供应商提供，这些设备具备低噪声、高频谱纯度、紧凑性和高集成度等特征，可满足复杂系统的测试与验证需求。代表性的供应商包括德国罗德施瓦茨（收购苏黎世仪器）与美国是德科技（Keysight Technologies）等。

02

外围保障系统朝向定制化发展

外围保障系统是量子传感设备与器件运行的基础，其性能直接关系到测量结果的稳定性、准确性和可靠性。该系统主要涵盖低温系统、磁屏蔽系统、真空系统和隔振系统等。

外围保障系统正从分立式支撑向高集成工程载荷转型。研发重心已转向复杂动态环境下的稳定性保障，通过多场耦合设计消除电磁与振动干扰，并利用材料创新实现小型化与低功耗，以适配移动平台装载需求。

磁屏蔽系统：转向被动屏蔽与主动动态补偿协同设计。如利用非晶合金等低噪声材料结合实时反馈链路，在复杂电磁环境中维持近零磁场稳定性，防止量子退相干。

真空系统：向微型化与自维持方向演进。如通过新型非蒸散型消气剂与双室架构，在缩小体积的同时维持长寿命超高真空，支撑便携式系统运行。

低温系统：聚焦大冷量与高集成布线。如新型脉冲管制冷方案提升了热负载处理能力，配合高密度柔性超导线缆，解决了信号读出过程中的热传导与串扰难题。

图表 量子传感外围保障系统协同架构图



▶ 低温系统通过设备小型化与物理环境调控支撑高灵敏度探测

量子传感领域对低温环境的依赖与量子计算存在本质区别。在量子计算中，低温是维持量子比特相干性的基础环境；而在量子传感体系中，低温系统作为外围保障架构，主要服务于特定探测组件的物理阈值。

例如，**超导纳米线单光子探测器 (SNSPD)** 与 **超导量子干涉仪 (SQUID)** 必须在极低温下维持材料的超导状态，方能分别实现对激光雷达极弱回波的捕获以及对超微弱磁场的精密测量；对于**光晶格钟**等追求极端精度的量子时钟，在计时精度达到 10^{-18} 级别时，会采用低温环境来抑制环境黑体辐射引起的频率偏移，从而保障极限稳定性。

需要明确的是，**激光冷却**并不涉及低温系统。以冷原子干涉为核心的技术路线主要利用激光束与原子的动量交换来降低原子动能，其物理腔体仍处于常温环境。

2025年低温系统的进展并非盲目追求更低的极限温度，比如聚焦于支撑环境的紧凑化与低振动化，从而解决高性能激光雷达等设备从实验室走向移动平台的集成难题。

01

紧凑型脉冲管冷头解决SNSPD工业化集成难题

Bluefors发布PT205型紧凑型两级脉冲管制冷机，在2.5 K温度下提供10 mW冷却功率，通过无运动部件设计显著降低振动水平，满足SNSPD对低机械噪声环境的部署要求。

°BLUEFORS

全球超低温制冷设备供应由高技术壁垒企业主导，其中日本住友重工和Bluefors（收购Cryomech品牌）是全球脉管制冷机与稀释制冷系统的核心供应商，Oxford Instruments等在科研级低温设备领域具有长期积累，中国量曦科技、知冷低温、中船鹏力、中电科等企业已实现GM制冷机与脉管制冷机的稳定供给。

▶ 磁屏蔽系统结合新材料与主动补偿构建接近零磁场的稳定环境

磁屏蔽系统作为隔离低频和静态磁场干扰、维持磁环境稳定性的物理边界，是量子传感系统中不可或缺的外围保障组件。

在诸如SERF原子磁力计等极弱磁场测量装置中，被动多层高磁导材料屏蔽与主动磁场补偿的组合策略被广泛采用，以创建接近零磁场的测量空间并抑制动态磁干扰。这类设计不仅依赖高磁导率材料的磁通引导能力，还结合磁场补偿线圈与反馈调控等手段来改善低频磁漂移环境，有助于提高测量系统的灵敏度与相干时间。

与传统的电磁干扰控制相比，用于极弱磁场测量的磁屏蔽更强调对残余磁场一致性、空间均匀性和低磁噪声背景的控制要求，这些指标直接影响到量子传感系统的性能极限。公开综述表明，低噪声软磁材料（如纳米晶和非晶合金）、磁化调节（如去磁处理）和主动补偿技术是当前提升磁屏蔽性能的重要方向。

磁屏蔽整体解决方案主要由具备磁学材料与工程积累的供应商提供。例如专注磁洁净室与科研级磁屏蔽空间设备的供应商（如美国Twinleaf等）在高灵敏磁测量实验室中具有较高认知度，而高磁导合金材料供应商（如德国Vacuumschmelze等）则为被动屏蔽结构提供关键材料支撑。此外，一些专业机构和集成商提供磁屏蔽结构设计、建模与现场调试等定制化服务，以适配不同研究和工程场景的特定需求。

▶ 真空系统朝小型化与稳定性方向发展

真空系统是量子精密测量设备的基础物理保障之一，其核心作用在于为冷原子、离子阱等量子载体提供超低压环境，最大限度减少背景气体分子碰撞对量子态相干性的破坏，从而直接影响测量灵敏度和系统稳定性。

在基于冷原子与离子干涉的量子感知器件中（如重力仪与惯性传感器），超高真空环境是延长原子/离子相干时间、提高探测灵敏度的关键，因为背景气体碰撞是主要的相干破坏通道。对于精密原子钟与中性原子量子测量设备，真空有助于降低背景粒子引起的能级扰动和频率漂移，从而确保长期稳定的时频基准。

随着量子传感器向现场部署与移动平台应用迈进，真空保障技术正呈现小型化和高性能稳定性的双重发展趋势。通过优化腔体集成设计、小体积泵浦与吸气材料组合（如非挥发性消气剂NEG、微型Getter/离子泵）以及微纳封装（晶圆级阳极键合等），系统可以在无需持续外部供能的条件下维持长期高真空，为便携式导航、现场惯性测量等应用提供工程级支撑。

01 双腔紧凑型结构提升冷原子制备集成度

波恩大学团队开发了一种基于永久磁体的紧凑型双腔真空装置。该设计通过压差泵浦隔离原子源与探测区，在显著缩小系统体积的同时，实现了每秒超过 10^7 个原子的高效传输。其双色磁光阱方案能在2.5秒内积累约 2×10^7 个 ^{174}Yb 原子，并将原子冷却至 $10 \mu\text{K}$ 以下。为冷原子传感器的便携化部署提供了关键基础设施。



02 新型真空系统助力单离子光钟突破 10^{-19} 精度极限

NIST与科罗拉多大学博尔德分校等团队通过升级真空系统显著降低了背景气体分子与离子的碰撞偏移，使 $^{27}\text{Al}^+$ 单离子光钟的系统不确定度压低至 5.5×10^{-19} 。验证了超高真空环境在抑制能级扰动、保障时频标准极限稳定性方面的支撑作用。



全球高性能真空泵及真空监测设备的供应仍表现出较高的品牌集中度。英国 Edwards Vacuum、美国安捷伦（Agilent）等企业在高性能真空泵与泵控系统领域具有较高市场覆盖；在真空计与残余气体分析仪等高精度真空监测设备市场，则由瑞士英福康（Inficon）、美国MKS Instruments、德国莱宝（Leybold）等企业主导。

03


辅助硬件向集成化方向发展

量子传感的上游辅助硬件体系主要由射频器件、低温线缆及光电/声光调制器组成，这些组件正从单一性能提升转向系统级优化，共同保障了量子态信息的精准驱动、稳定传输与高效调制。

射频器件正通过改进回路设计与微波腔结构，向高频动态调控与低反馈噪声方向发展，以实现量子态更精细的频率解耦。

低温线缆侧重于新型柔性超导材料的应用，在降低系统热载荷的同时进一步压低本底噪声，确保极低温下的信号保真度。

调制器则聚焦于微型化集成与自适应相位修正，通过与原子气室等核心组件的深度融合，显著提升了系统在复杂环境下的自校准能力与长期稳定性。

 图表 量子传感辅助硬件协同架构图



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

▶ 射频技术利用电子化调谐手段实现全固态与量子极限探测

在量子精密测量中，射频（RF）场既可作为被测目标直接调制传感原子能级，也可作为控制/读出手段，通过高集成腔体和脉冲序列实现对量子态的精准操控与高灵敏度测量。

在**里德堡原子传感器**中，高激发态原子对外加 RF/微波/毫米波场高度敏感，外界射频作为被测信号直接调制原子的能级结构，使系统能够实现从微波到毫米波频段的无损量子探测。

在超导量子电路中，射频硬件通常演化为高度集成的腔体、传输线和上/下变频器，用于将极微弱的电磁扰动耦合到超导量子态，并通过量子非破坏测量等技术实现高灵敏度信号读出。

对于自旋磁力计与原子钟等系统，射频脉冲序列是实现量子比特或自旋态翻转、相位积累和能级锁定的核心控制手段，其频率与时序直接影响系统的相干时间、频率分辨率和整体测量稳定性。

随着量子传感向超高灵敏度、宽频段监测及空间矢量识别方向发展，射频技术正呈现出显著的迭代趋势：一是通过高集成度、可寻址的阵列化设计，替代传统的分立式机械扫描，以提升探测效率和空间分辨率；二是利用量子增强接收与低噪声放大技术，在从微波到太赫兹的宽频段内逼近探测的灵敏度极限。这些演进旨在增强系统在复杂电磁环境中的鲁棒性与信息获取能力，并为实现芯片化、低功耗的量子射频感知模块奠定基础。

01

RF量子上变频器（RQU）突破低频电磁探测极限

斯坦福大学研发出基于约瑟夫森干涉仪的量子上变频硬件，实现低频（DC至300 MHz）信号向微波C波段（5 GHz）的无损转换。该技术具备46.9 dB的相敏增益，支持背向作用回避（BAE）等测量协议，使低频电磁感知的灵敏度能够超越标准量子极限（SQL）。



Stanford

02

磁通调谐超导腔助力隐藏光子暗物质搜寻

费米国家实验室等团队研制出用于隐藏光子暗物质搜寻的电子调谐探测系统。该硬件将3D微波腔与SQUID耦合，利用Transmon量子比特执行量子非破坏性测量，实现了微波光子计数。基于此，研究在5.672-5.694 GHz频段内对暗物质参数设定了新上限（ $\epsilon < 8.2 \times 10^{-15}$ ），为极低温下的高灵敏度暗物质探测提供了新架构。



Stanford

全球射频器件市场已形成较为成熟的梯队化供给体系。核心供应商主要有美国Mini-Circuits、英国Teledyne e2v、德国attocube、以及中国的中微达信等厂商，涵盖了从基础衰减器、混频器到高精度的射频驱动终端。

▶ 低温线缆通过微型化高密度互连降低系统热负载与信号串扰

在量子精密测量体系中，低温线缆是连接极低温感测核心（例如 mk 区之间）与常温控制与读出电子的关键物理纽带。

它既负责传输控制脉冲，又需高保真地引出来自低温量子传感元件（如超导纳米线单光子探测器、SQUID 等）的微弱信号，同时在传输路径上极力抑制热载荷，以免干扰超导或低噪声环境。

随着量子探测从单点感知向大规模阵列与高通道密度方向发展，低温线缆技术正呈现两个显著的迭代趋势：

一是**微型化与高密度集成**。传统刚性同轴线体积大、热泄露高且难以支持多路并行，而基于灵活微波结构（例如 polyimide 基板上的微带线或多通道柔性低温线缆）的解决方案，可在有限空间内实现更高通道密度并降低热负载，为大规模量子探测阵列提供工程可行的互联路径。

二是**复合材料与信号保真度优化**。为同时实现低热导与高频信号完整性，行业正在采用包括 NbTi 等超导材料在内的低损耗互连，以在低温下降低驻波损耗和热载荷，同时优化几何结构和屏蔽设计以抑制串扰和相位漂移，从而提升系统的时间分辨率与信噪比。

全球高性能低温线缆市场主要由日本 Keycom、法国 Radiall、荷兰代尔夫特以及中国西部超导等具备特种材料研发能力的供应商主导，涵盖了微波低温线缆、抗低温连接器及万米级超导线材等关键领域，正加速向高带宽、低热损的集成布线方案转型。

▶ 调制器采用多频谱动态控制策略解决复杂环境下的稳定性难题

在量子传感领域，调制器（如声光调制器 AOM、电光调制器 EOM）主要作用于光学原子钟（光晶格钟、离子钟）、冷原子干涉仪等传感器件。通过对激光频率、相位和强度的超快调控，调制器不仅负责生成特定的能级跳转脉冲，还承担着抵消多普勒频移、压制光频噪声以及实现高保真度量子态读出的任务。

2025年，调制器正从传统单一频率驱动向更复杂周期性、多频谱、动态控制策略演进。在量子传感研究中，采用周期性调制、强驱动与多频谱编码等方法可以增强信噪比和控制精度；同时，基于周期性驱动的 Floquet 工程等动态调制策略正在

被探索，用于补偿环境扰动、拓展频率响应范围并实现更高性能的量子控制与测量。此类技术方向的深入发展，有望为更广谱段的量子探测和更高稳定性的精密测量提供新的方法论基础。

01 多频光谱技术提升冷原子束光钟精度

Computational Physics与美国海军天文台团队通过对探测激光进行精密的相位与强度调制，产生均匀的频率边带，从而能够同时探测横向速度分布中的所有原子。这一调制方案将Ramsey-Bordé干涉条纹幅度提升了14倍，使光钟的Allan方差在1秒平均时间内达到 3.4×10^{-15} 。

 Computational Physics, Inc
an employee-owned company



02 双调制 Floquet 工程消除光晶格钟频移

中科院国家授时中心等团队引入了一种双调制（DM）Floquet工程方法，通过同时驱动光晶格激光和探测激光，实现了对原子运动和电子能态的独立控制。该技术成功消除了晶格调制带来的多普勒频移，在浅晶格中实现了原子的动力学局域化。

 中国科学院国家授时中心
National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences

 中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

 山西大学
SHANXI UNIVERSITY

产业供给方面，全球调制器供应体系涵盖了多种物理机制。除电光调制器外，法国AA Opto-Electronic公司的高光功率声光调制器（AOM）在全球科研市场占据重要地位；中国企业如中国电科（CETC）等则在声光、电光调制器的产业化供应方面形成了完善的产品线，覆盖了从可见光到近红外波段的关键传感需求。



03

磁场测量

QUANTUM MEASUREMENTS


磁场测量： 多技术路线并行发展

量子传感磁场测量多技术路线并行发展，典型的技术路线有：

SQUID作为高精度科研级技术的基石，长期占据磁脑图（MEG）与磁心图（MCG）的高端市场，是目前临床研究的黄金标准。

SERF原子磁力计（光泵磁力计（OPM）中灵敏度最高的技术之一）凭借常温、可穿戴的优势，极大提升了临床检测的便捷性与普及潜力。

NV色心磁力计具有微型化、高空间分辨的优势，在微观探测与工业监控领域表现突出，是最有潜力的发展方向。

 图表 量子磁场测量典型技术路线和传感器

技术路线	传感器
超导	超导量子干涉器件（SQUID）
中性原子（原子蒸气）	光泵磁力计（OPM，如SERF原子磁力计）
固态自旋	NV色心磁力计

ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

▶ 技术：金刚石NV色心技术路线是发展热点

原子磁力计实现超高灵敏度检测与闭环智能控制

2025年，原子磁力计通过硬件微型化与智能控制算法的闭环融合，以解决高灵敏度与高环境鲁棒性之间的固有矛盾。

通过微机电系统（MEMS）工艺，传感器实现了从大型实验室装置向芯片级模组的跨越。这种“硬件集成+算法闭环”的模式，使原子磁力计能够自主进入并维持在自旋挤压态，在复杂动态环境下维持接近极限的探测能力。

混合蒸气室小型化SERF磁力计达到飞特斯拉级灵敏度



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

- 西安交通大学等团队利用微型化Rb-Cs混合蒸气室，通过单光束方案与差分检测抑制光噪声，在芯片尺寸下实现20 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 灵敏度，为心脑血管原位检测提供硬件支撑。

实时反馈控制与卡尔曼滤波提升原子磁传感精度



- 波兰华沙大学与波兰科学院团队通过实时监测原子电流并反馈调节，利用扩展卡尔曼滤波克服传感器非线性。系统可自主驱动原子系综实现自旋挤压，在实时探测中获得量子增强的测量效果。

固态自旋技术路线突破性能边界并拓展多维应用

金刚石NV色心在2025年展现出显著的多维演进特征。

在物理机制层面，研究者正通过非荧光读出路径绕过荧光饱和效率的瓶颈，刷新灵敏度上限；在时间维度，探测带宽已跨入纳秒量级，具备捕捉极快瞬态磁动力学的能力。

此外，单片集成与多路复用技术解决了单点传感器效率低、部署难的工程难题。这种全方位的性能提升，标志着NV色心已从静态磁成像工具演变为支持高速、多任务并行感知的综合性精密测量平台。

单NV色心磁力计，时间分辨率1.1 ns

ETH zürich

- 苏黎世联邦理工学院与马克斯·普朗克研究所研发的单NV色心磁力计实现了 1.1 ns 的时间分辨率与 0.9 GHz 的瞬时带宽，满足微电子瞬态检测需求。

NV色心全集成紧凑型磁力计



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 中国科学技术大学等团队开发出一种基于氮空位（NV）中心的全集成量子磁力计，实现了小型化与高性能的统一。在 $10.5 \times 9.3 \times 4.5 \text{ cm}^3$ 的体积内实现 $390 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度，总功耗仅10.2 W。

双NV探针实现多路复用扫描成像

ETH zürich

- 苏黎世联邦理工学院集成两个NV色心的扫描探针，结合频率复用技术，实现多个磁场分量的并行成像。系统首次测得载流导线的空间相关磁场波动协方差，提供微观噪声关联探测的新手段。


产品：磁场测量装备多路径并行发展


当前，量子磁场测量装备正处于多技术路线并行发展的阶段。最为成熟且在临床科研中广泛部署的**SQUID系统**，凭借极高的灵敏度和成熟的软件生态，在神经成像等高端应用场景中仍占据基准地位。与此同时，以**光泵磁力计（OPM）**为代表的新一代量子磁传感技术正逐渐从实验室科研转向工程化和临床/现场可用方向，其常温、可穿戴的特性有望显著降低设备运行成本并拓宽应用场景。而**NV色心量子磁力计**等固态量子传感路线也在室温高分辨磁测、工业微观探测等领域展开快速探索。


图表 2025全球量子磁场测量领域部分代表性企业产品及参数

机构	产品分类	产品参数	应用领域	产品外观
 MEGIN 芬兰	SQUID	型号：TRIUX™ neo 通道数：306	临床癫痫诊断 脑疾病临床诊断 和脑科学研究	
 未磁科技 X-MAGTECH 中国	OPM (SERF)	型号：Marvel MEG® Pro/Max 通道数：256/312 灵敏度：10 fT	脑科学 脑机接口 脑疾病	
 昆迈医疗 QUANMAG HEALTHCARE 中国	OPM (SERF)	型号：PyraMag Epoch系列 灵敏度：10-20 fT	脑疾病临床诊断 和脑科学研究	
 国器传感 GQ MAGSENS 中国	OPM (SERF)	型号：GQSERFS1.0 灵敏度：10-15 fT 响应带宽：0~300 Hz 特性：多轴，多通道阵列式	工业检测 生物医疗 地磁导航 磁异常侦察	
 QANT 美国	NV色心	型号：Q.DM 10 灵敏度：10 pT/√Hz 动态范围：2.7μT	用于研究和工业的高精度磁场测量	
 国盛量子 CHINAPROSP QUANTUM 中国	NV色心	型号：QDM-100 灵敏度：≤100 pT/√Hz 采样率：≥3 kHz	航磁物探 电流测量 空间探测 无损探伤	


应用：生物医学与电力能源是量子传感磁场测量的重要应用方向


 **生物医学领域**作为量子磁力计的重要应用方向之一，对高精度、无损、高分辨率的磁场检测设备提出了持续增长的需求。特别是心磁、脑磁图仪等高端设备，其在神经科学研究、临床诊断等领域展现出巨大的应用潜力。


 **电力能源领域**是量子精密测量在磁场应用的重要方向。由于电流流动产生磁场，因此可以通过测量磁场来测量电压和电流。电流量子传感器利用这一原理，将磁场测量转化为频率测量，提高准确性，并且采用非接触式测量方式，避免电路干扰。目前，远程溯源、远程校准等已经成为探索性研究的方向。例如，量子电压电流传感器可以通过频率的远程校准来保障量值的准确性，这种方法为计量领域的发展带来了新的可能性。

 **自主导航与地学探测领域**已成为规避卫星导航失效风险的核心方案。量子磁力计可以捕捉地球内部极细微的地磁强度分布变化，通过提取地磁“指纹”信息，配合人工智能算法实现无须卫星信号的高精度自主导航。这种方式在地质制图、磁异常探测以及自主无人系统的长航时任务中具有极高的可靠性。此外，对于太空探测，高带宽、低漂移的量子传感器也是研究行星演化与磁场物理的基础工具。

除了生物医学和电力能源的应用领域外，量子精密测量技术在磁场的应用领域还包括科学研究、军事国防、工业检测等。

 **科学研究领域**，金刚石NV色心磁力计能够深入研究蛋白质以及DNA等微观结构，实现单分子识别。

 **军事技术领域**，量子磁力计已被应用于磁异常地图测绘与水上反潜技术。通过生成高精度的磁力地图，量子磁力计能够帮助显著提高反潜作战的效率和准确性。

 **工业检测领域**，金刚石NV色心磁力计可用于金属探测、材料分析、无损探伤以及电池缺陷检测等方面，为工业生产提供了高效、准确的检测手段。

150小时MagNav航磁导航飞行测试



- 美国SandboxAQ与空客创新中心Acubed在2025年7月完成了超过150小时的MagNav航磁导航飞行测试，验证了AQNav在真实飞行场景中满足航空导航性能标准。11月，SandboxAQ加入美国国防部创新单位DIU的量子传感转化计划，以推进MagNav技术的军事级开发与测试。

金刚石量子磁力计用于地球遥感与自主导航项目



- 加拿大SBQuantum获得欧洲航天局（ESA）百万美元合约。该公司提供的升级版金刚石量子磁力计具有极高的带宽和灵敏度，将被用于支持地球遥感观测以及未来外太空行星的自主导航任务。

便携式量子脑磁图扫描仪用于战场脑损伤评估项目



- 英国国防部资助Cerca Magnetics公司研发一款便携式量子脑磁图扫描仪，旨在用于战场环境，实时监测士兵在遭受爆炸冲击后的脑磁场变化，以进行脑损伤的即时评估。

PyraMag Epoch 96无液氦脑磁图系统



- 中国昆迈医疗发布全球首个获得医疗器械注册证的96通道无液氦高密度脑磁图设备PyraMag Epoch 96，其采用的量子传感阵列实现了亚毫米级别的脑部功能成像，显著降低了脑科学研究与临床诊断的设备维护门槛。

未磁科技多款MEG、MCG获医疗器械注册证



- 中国未磁科技全球首款256通道无液氦脑磁图仪Marvel MEG Pro，以及心磁图仪 Miracle MCG Pro 系列多个型号获中国国家医疗器械注册证。

国仪量子发布多款量子磁场、电场测量传感器

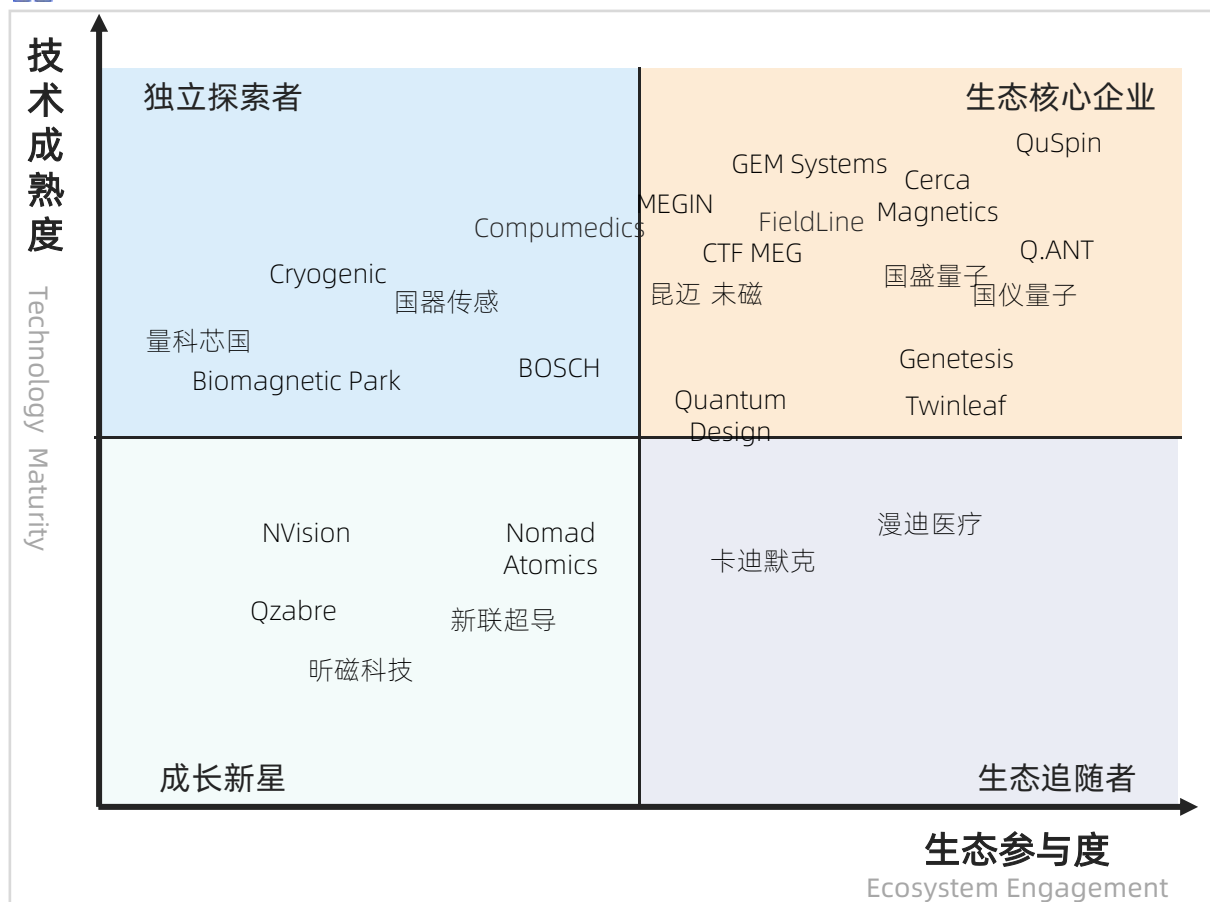


- 国仪量子发布了自主研发的量子钻石单自旋传感器、量子磁力仪、微波场强仪等量子传感器，服务于芯片无损检测、心脑血管疾病的早期诊断，以及高精度微波电场测量等领域。

▶ 供应商：未来SERF与NV色心将会占据更多市场份额

量子磁力计目前商业化相对成熟，市场上主要还是早期的光泵磁力计与SQUID为主，未来SERF与NV色心磁力计可能会占据更多市场份额，并通过成本优势进一步推广量子商业化。

图表 量子磁场领域 Q-EMC 模型



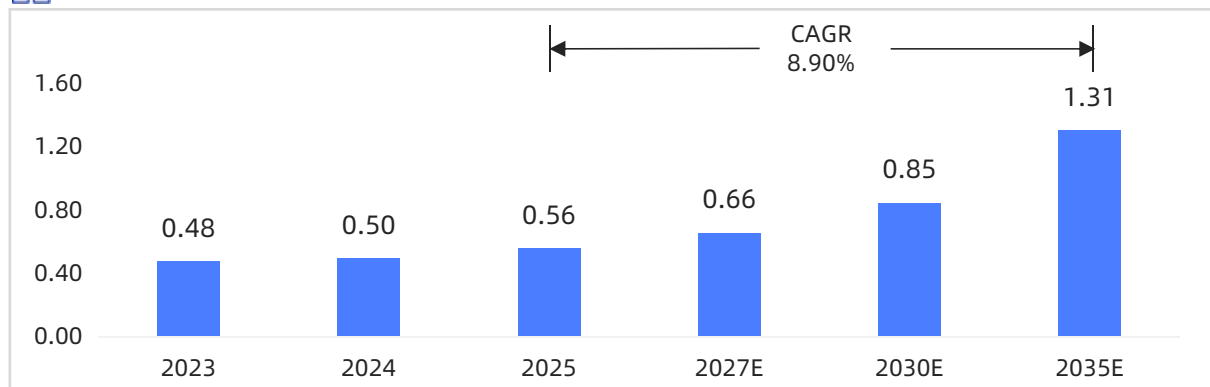
ICV TA&K | 2026.2

- ▶ SQUID技术代表供应商多属于生态核心企业，如MEGIN（芬兰）、Compumedics（澳大利亚）及CTF MEG（加拿大）。这类技术长期占据磁脑图（MEG）与磁心图（MCG）等高端磁场成像市场，是临床和科研领域广泛认可的高灵敏度方案。
- ▶ OPM（SERF）技术正推动磁成像向常温、可穿戴方向跨越。典型供应商有Cerca Magnetics（英国）与FieldLine（美国）、未磁科技（中国）、昆迈医疗（中国）、国器传感（中国）。其产品无需液氮冷却，极大提升了临床检测的便捷性与普及潜力。
- ▶ NV色心技术在微观探测与工业监控领域表现突出，典型企业如国盛量子（中国）、国仪量子（中国）等，专注于NV色心磁力计在电网、电池检测等领域的应用。

▶ 市场：欧美地区占据重要地位，市场竞争较为激烈

未来，量子磁场测量产业规模将逐年增长，2035年预计达到的13.1亿美元，2025-2035年的复合年均增长率为8.90%。

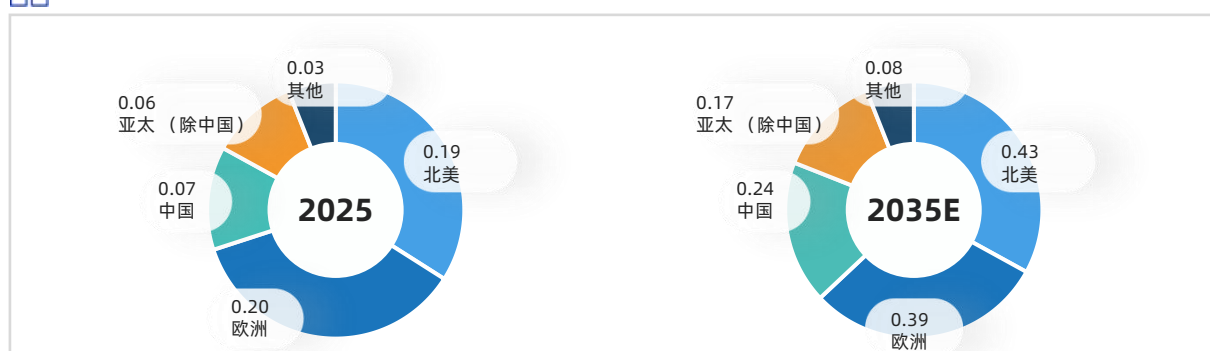
图表 全球量子磁场测量领域产业规模（2023-2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

当前全球市场高度集中，2025年北美与欧洲凭借先发技术优势共同占据约70%的市场份额。预计到2035年，中国市场份额将上升至18%，反映出产业重心正表现出向亚太地区转移的迹象。

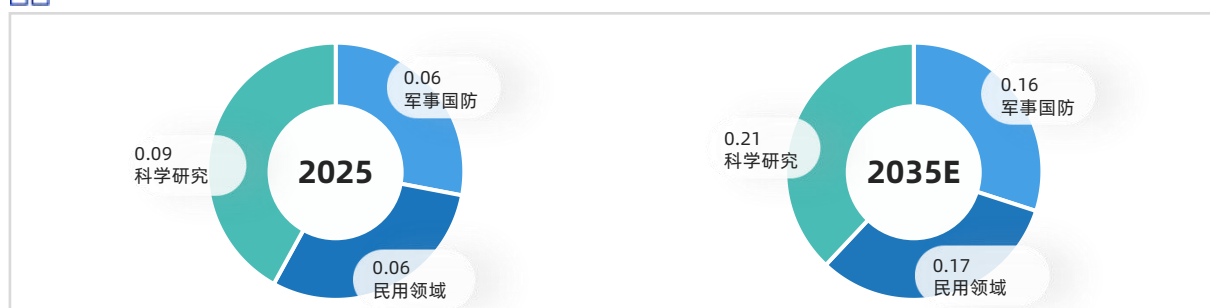
图表 全球各地区量子磁场测量产业规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

2025年科学研究占据42%的市场规模比例，是现阶段最主要的应用支柱。但随着技术在生物医疗、地球物理勘探及地磁导航等领域的突破，民用和军事国防的市场规模占比将逐步扩大。

图表 全球量子磁场测量下游应用规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2




04

时频测量

时频测量： 时间同步的精度革命

量子时频测量通过原子能级跃迁或自旋进动等物理现象的高稳定性，确立了极高精度的时间与频率基准，是定位导航、深空探索、电力网络同步及基础物理研究的核心支撑。

目前的技术体系涵盖了低成本量产的铷、铯原子钟，具备高稳定性的氢原子钟，以及面向便携场景的芯片级原子钟。随着精密光谱技术的演进，单离子光钟已将频率稳定度提升至 10^{-19} 量级。核钟研究正从理论构想转向工程实证，利用受外界干扰极小的钷-229原子核能级跃迁进行计时，其理论精度超过了现有的光学原子钟水平。

 图表 量子时频测量典型技术路线和传感器

按工作频率分类	物理实现方式分类
微波原子钟	(中性原子) 原子蒸气室钟：铷原子钟、CPT 原子钟（包括芯片级原子钟CSAC）
	原子束钟：铯原子钟
	氢原子钟（主动振荡型）
光钟	(中性原子) 冷原子喷泉钟：铯喷泉钟、铷喷泉钟
	(囚禁离子) 离子阱光钟：多离子光钟、单离子光钟 典型离子：铝离子、钙离子、镱离子。
核钟	核跃迁时钟：钷-229核钟

▶ 技术：时频技术不断突破计时精度与稳定性

⚗ 光晶格钟利用原子系综与量子相干调控刷新稳定度记录

光晶格钟通过囚禁数万个中性原子获得极高信噪比。

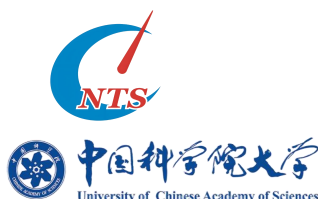
2025年的研究核心在于突破传统测量的物理限制——利用纠缠（Entanglement）打破散粒噪声限制，以及利用擦除转换（Erasure Conversion）延长原子相干时间。光晶格钟正从单纯增加原子数量转向对原子量子态的精细操纵的探索。

纠缠增强型原子钟频率精度 1.1×10^{-18}



- JILA团队基于二维光晶格锶原子钟，通过自旋压缩与腔量子非破坏测量实现纠缠增强，将单台钟的频率精度推进至 1.1×10^{-18} ，测量性能超越标准量子极限（SQL）2.0 (2) dB，成为当前精度最高的纠缠增强型原子钟。

锶光晶格钟系统不确定度 1.96×10^{-18}



- 中国科学院国家授时中心与中国科学院大学团队通过温控腔监测黑体辐射频移、导电膜抑制 Stark 频移以及旋转装置控制隧穿效应，将锶原子光晶格钟的系统不确定度评估推进至 1.96×10^{-18} 。

擦除转换技术利用读出机制创新延长原子相干时间至百秒级



- 加州大学伯克利分校将晶格散射等误差转化为“擦除信号”，使 ^{87}Sr 原子相干时间突破 100 秒（自旋回波下达 150 秒），解决了限制光钟分辨率的退相干瓶颈。

⚗ 离子光钟通过单/多离子受控环境挑战系统准确度巅峰

离子钟因离子受电磁力囚禁且不受晶格频移影响，是挑战“绝对准确度”的天花板。2025年的研究重点在于通过量子逻辑谱（QLS）控制单离子误差，以及通过动态解耦（DD）消除多离子系统中的非均匀性，旨在让离子钟在保持极致准确度的同时提升稳定度。

单铝离子光钟不确定度 5.5×10^{-19}



- NIST等团队利用单 $^{27}\text{Al}^+$ 离子，通过改进离子阱设计（抑制微运动）、升级真空系统（降低碰撞频移）以及通过3.6公里光纤链路进行远程激光稳频（实现1秒探测）等关键技术，将单离子光钟的系统不确定度刷新至 5.5×10^{-19} 。

准连续动态解耦方案实现多离子钟频移抑制



- 魏茨曼科学研究所针对多离子链（多达7个离子）开发动态解耦方案，将电四极矩和塞曼频移抑制3个数量级，使频率非均匀性低于 7×10^{-17} ，为多离子光钟扩展提供了理论与实验基础。

核钟开启下一代计时能级探索

核钟利用原子核内部的跃迁（钷-229），环境敏感度远低于电子能级。而固态核钟是利用固体晶体载体中嵌入的原子核能级跃迁作为频率参考的时频标准体系，它结合了核频率标准的高稳定性与固态材料的工程化潜力，是未来高精度集成化时频装置的一个重要发展方向。

钷-229 核钟完成温度敏感性系统评估



- NIST等团队首次在掺杂钷-229的氟化钙晶体中，系统测量了其核钟跃迁的温度依赖性。研究发现，其中最稳定的谱线在整个温区内仅偏移 62(6) kHz，平均温度系数低至约 0.4 kHz/K。直接验证了核钟跃迁在固态宿主中极高的本征抗干扰能力，并据此推算出，若未来要实现 10^{-18} 的系统精度，所需的晶体温度稳定度须控制在 5 μK 水平。此项研究为全固态核钟的工程化迈出了关键的参数标定第一步。


产品：微波原子钟是主要商业化产品

微波原子钟（包括铷、铯、氢激射器等）凭借长期验证的可靠性与成熟的产业供应体系，依然是全球通信同步、导航授时及工业计时的主力基础时序解决方案。

铷原子钟是最常见的商用品种之一，被广泛用于通信基站同步、卫星导航、网络时间同步、电网同步等领域。

光学原子钟已从实验室研究迈入商业化边缘，部分机构和企业已推出基于光学频率基准的交付级系统或“机柜式”商业原型，开始在计量基准与高精度时频应用中试点部署。


核钟因技术复杂性，目前仍主要停留在实验室原型与基础研究阶段，尚未进入产业化交付流程。


 图表 2025全球量子时频测量领域部分代表性企业产品及参数


机构	产品分类	产品参数	应用领域	产品外观
 Accurate Frequency & Time 以色列	铷钟	型号：AR133-03 稳定度： $< 1E-11 @ 1s$	航空领域 保密通信领域 电子情报领域	
 MICROCHIP 美国	铯钟	型号：5071A 稳定度： $\leq 5E-12 @ 1s$	GNSS 拒绝 5G 航空与雷达授时	
 SAFRAN 法国	氢原子钟	型号：iMaser 3000 稳定度： $< 6E-14 @ 1s$	导航地面站授时 VLBI 天文同步 卫星监测与大地测量	
 SHIMADZU Excellence in Science 日本	锶光晶格钟	型号：Aether Clock OC 020 稳定度： $*E-18 @ 1s$	先进的科学研究 地球物理监测 高精度定位/授时系统 未来深空导航	
 量科芯国 LIANGKEXINGUO 中国	CPT原子钟	型号： WSAC.50 稳定度： $3E-11 @ 1s$	水下导航 水下通信与信息探测	

▶ 应用：高精度量子授时正在支撑GPS信号拒止环境下的长航时自主导航与未来通讯网络的底层同步

量子时频领域的应用主要集中在自主导航定位（PNT）、下一代同步通信以及国防安全等关键领域。

 在自主导航与授时领域：高精度的时间频率是所有定位系统的核心。在深海潜航、极区作业或遭遇强电磁干扰的环境下，由于无法接收外部卫星信号，移动平台需要依赖自带的高稳定性原子钟来维持坐标方位。量子时钟通过极低的频率漂移特性，能够确保导航系统在断链状态下长时间维持定位精度，为各类无人化平台提供不需要外部信号校准的生存能力。

 在同步通信与大规模网络领域：随着6G网络以及卫星互联网的部署，通信系统对节点间的同步精度要求已迈入飞秒级别。量子时钟凭借高稳定性和低温漂特性，可以作为通信主网的稳定底座。即使在长时期脱离导航卫星授时的情况下，它依旧能独立支撑大规模基站的宽带传输、业务切换以及数据溯源功能，确保关键基础设施的平稳运行。

 在科学研究与地质监测领域：当原子钟的精度达到海森堡限制并实现远程组网后，它将转化为感知物理场变化的探测仪。通过比对全球分布的量子钟频率差，可以实时监测地壳形变带来的重力势能变化，或者在深空探测中捕捉暗物质等微弱物理效应，将单纯的计时工具转变为基础科研的多功能传感器。

增强型原子钟用于军事作业

[dstl]

- 英国国防科学技术实验室（DSTL）研制出增强型量子原子钟原型，旨在消除军事作业对GPS系统的过度依赖，确保军用装甲车辆、飞行器以及加密通信网在失去外部时空参考时仍能进行数十亿年误差不超一秒的精确协同。

光学原子钟首次水下测试

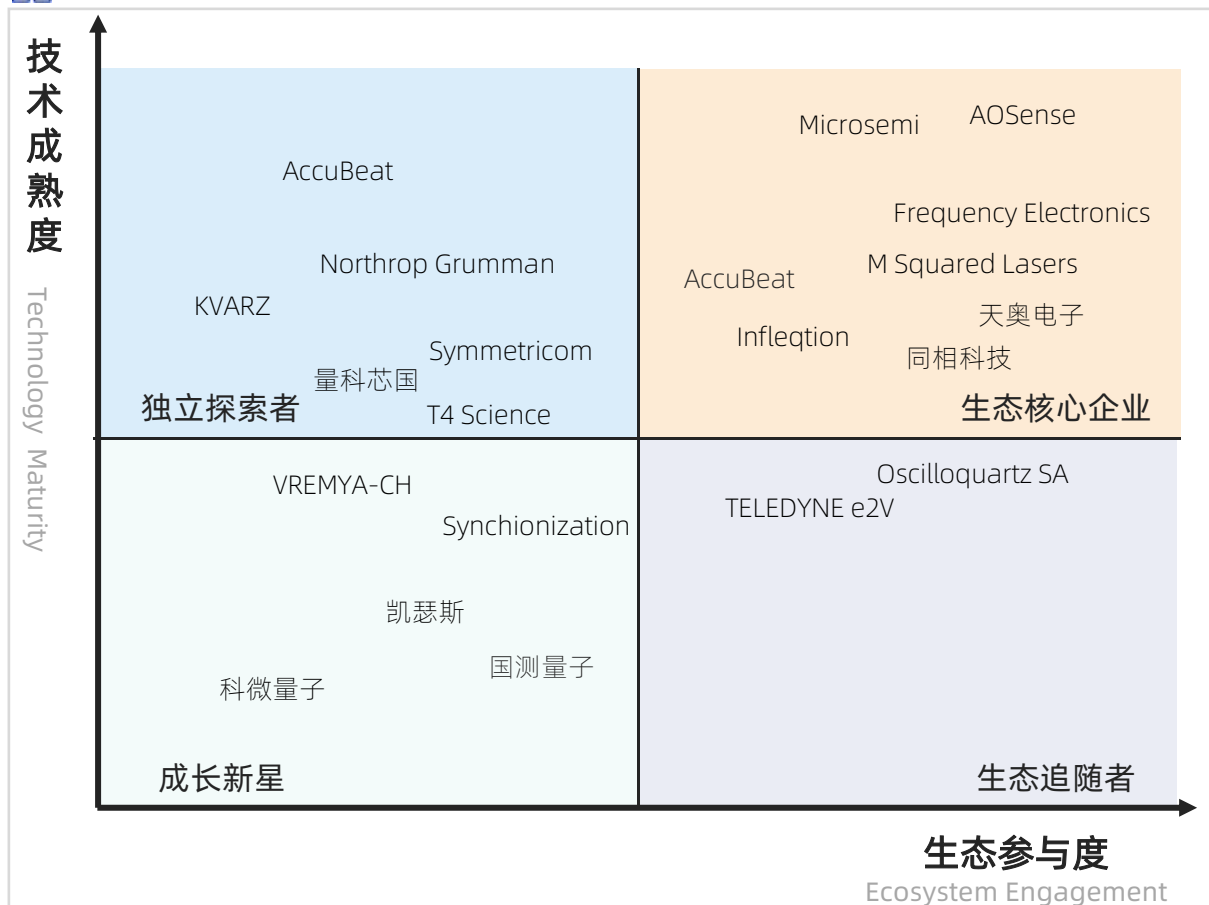


- Infleqtion与英国皇家海军及MSubs合作在2025年10月完成全球首次量子光学原子钟水下应用。Tiqker型原子钟在Excalibur自动驾驶潜艇测试台上通过了实地验证，证明了量子计时技术在水底隔绝环境下的稳定性和实战部署潜力。

► 供应商：技术成熟度普遍较高，商业化较为成熟

时频测量是量子精密测量中成熟度较高的领域，市场包括深耕原子钟的行业龙头、专注高稳定性基准的传统供应商，以及积极布局本地化解决方案的新兴企业。

图表 量子时频领域 Q-EMC 模型



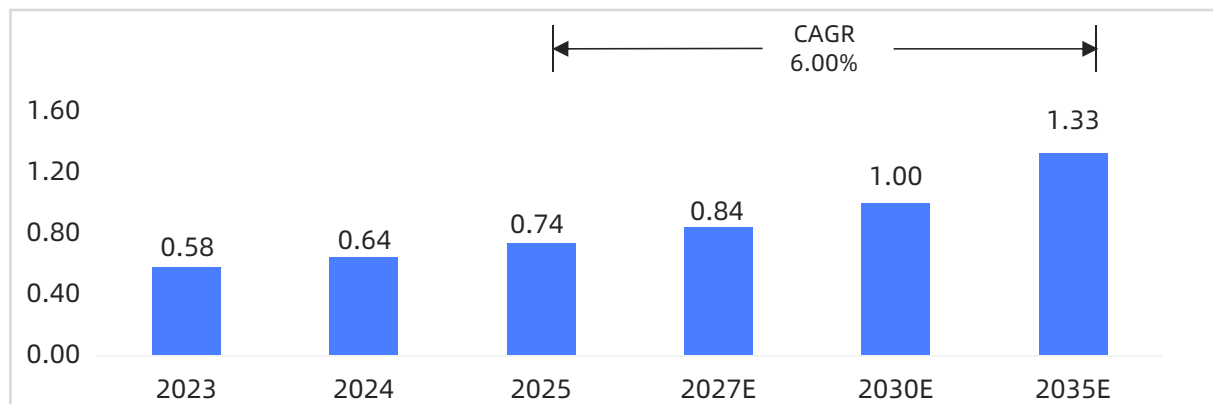
ICV TA&K | 2026.2

- 在芯片/微型原子钟（CSAC）细分市场，全球竞争集中于更极致的小型化、低功耗与长期频率稳定性等性能指标。历史上 Symmetricom 的技术积累被 Microsemi（后被 Microchip Technology 收购）整合，为 Microchip Technology（美国）在 CSAC 产业化供应体系中奠定了领先优势。
- 同时，包括 Safran（法国，收购 Orolia Group）、Oscilloquartz SA（瑞士）、Frequency Electronics, Inc.（美国）、AccuBeat Ltd（以色列）等国际厂商在全球 CSAC 与原子时钟市场中保持重要地位。中国厂商如量科芯国等也在积极布局芯片级原子钟与微型原子钟方案以满足卫星导航、通信同步等本地化大规模部署需求。
- 在更广泛的铷原子钟与高稳定性氢原子钟领域，市场呈现出由传统供应商构成的相对分散但成熟的竞争格局，企业通过产品线整合和长期服务协议强化在通信基准、国防与空间导航等专业应用中的供应能力。

▶ 市场：市场化较为成熟，主要集中在军事领域

量子时频测量产业规模逐年增长，预计2035年达到13.3亿美元，2025-2035年复合年均增长率为6.00%。

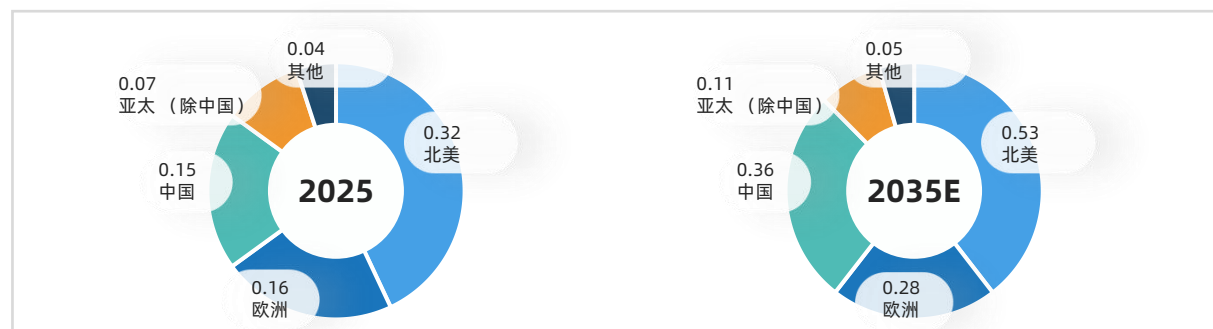
图表 全球量子时频测量领域产业规模（2023-2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

北美地区在2025年以43%的市场份额保持领先地位。预计到2035年，中国市场份额将由20%上升至27%，产值规模达到3.6亿美元。与此同时，欧美地区的市场份额虽略有收缩。

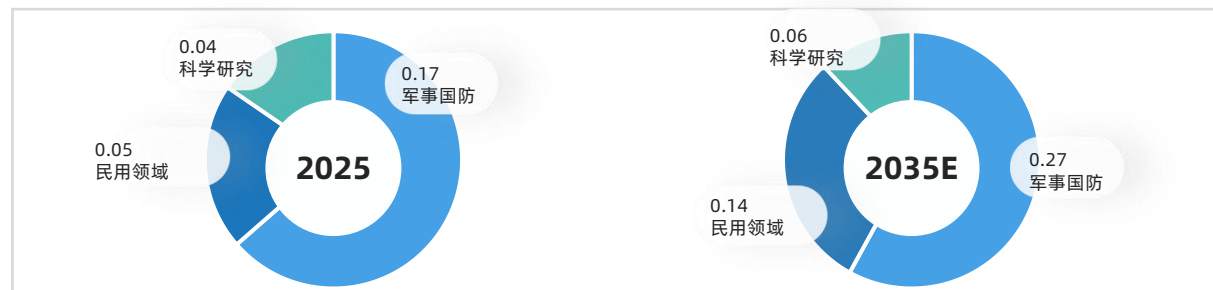
图表 全球各地区量子时频测量产业规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

军事国防是量子时频测量的核心支撑，2035年市场规模将达2.7亿美元，持续服务于卫星导航与战略通信。民用领域，通信基站同步、金融时间戳及电力调度等应用构成稳定需求，而光学钟/核钟等技术将贡献中长期增量。

图表 全球量子时频测量下游应用规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2



05


重力测量

重力测量： 高精度与抗干扰优势下实现应用突破

重力测量通过捕捉重力加速度的微弱变化，能够精确揭示地质演变、地下质量分布以及流体迁移导致的重心位移，仪器类型主要分为量子重力仪与量子重力梯度仪。

重力测量通常利用冷原子干涉原理，将原子的自由下落过程转化为相位信息，从而直接获取绝对重力值。相比传统机械式或超导式设备，量子重力仪具有长期零漂移、无需频繁校准的天然优势，被视为重力仪技术的第三次范式迭代。

重力梯度仪通常由两台重力仪组成，目的是消除仪器漂移。然而，量子重力仪在提高精度方面已经显著，将两个高精度的绝对重力仪组合成重力梯度仪可能会增加成本，但却无法体现明显的指标优势。因此，未来的发展趋势可能需要在系统优化和成本效益之间取得平衡。

 图表 量子重力测量典型技术路线和传感器

技术路线	传感器名称
冷原子干涉	冷原子绝对重力仪 冷原子重力梯度仪
悬浮纳米颗粒	基于悬浮纳米颗粒的量子重力测量方案（研究中，基于光力学）

ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

▶ 技术：量子重力测量以冷原子技术路线为主

冷原子干涉路线通过工程集成与量子增强实现性能跨代提升

冷原子重力仪利用原子物质波的干涉，通过精密测量重力引起的干涉相位差来实现绝对重力测定。2025年，该路线在提升设备环境适应性的同时，通过引入纠缠态与多维阵列架构，突破了传统单轴感测与标准量子极限（SQL）的束缚。

高精度原子重力仪实现超150天野外监测



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 中国科学技术大学等团队研发出USTC-AG12绝对重力仪并在距实验室800公里的山地成功运行。通过振动后补偿技术实现 $18.6\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度和 $0.6\mu\text{Gal}@1000\text{s}$ 的稳定性，并利用连续观测数据验证了其在地震面波分析中的可靠性，证实了冷原子技术在长期地质监测中的实战价值。

二维物质波阵列实现多轴惯性矢量感知



- 德国汉诺威大学利用3×3的玻色-爱因斯坦凝聚（BEC）阵列在1.6 mm²空间内实现了对加速度、角速度及重力梯度的同步测量。该方案兼容高转速环境并支持3D激光场重构，解决了传统传感器单轴感测的局限，为高集成度全自主量子惯导奠定了技术基础。

纠缠增强型冷原子重力仪成功超越标准量子极限



- 德国汉诺威大学与德国宇航中心（DLR）团队在BEC动量态干涉仪中引入量子纠缠态，实现了超越标准量子极限（SQL）1.7 dB的测量灵敏度。结合德尔塔踢准直（DKC）技术，该研究显著增强了原子团的相干性与系统扩展潜力。

粒子群优化算法提升船载原子重力仪动态监测精度



- 浙江工业大学等团队针对海洋作业中的剧烈振动干扰，提出基于粒子群优化（PSO）的四系数振动补偿模型。实验显示该算法在航行状态下将外部吻合精度提升至0.407 mGal，有效抑制了复杂海况下的随机噪声，推动了量子重力仪在移动平台上的实用化。



光学悬浮力学路线拓展量子感知至新物理探测前沿

除原子干涉外，利用激光悬浮的纳米粒子作为敏感单元，已成为探测极微弱力学扰动的新型路径。该技术在真空环境下具备极高的力学品质因子，不仅可作为微观重力梯度仪，更在搜寻宇宙暗物质等基础科学前沿展现出独特优势。

利用光学悬浮纳米粒子传感器搜寻暗物质散射




- 耶鲁大学团队利用工作在量子测量区域的光学悬浮纳米粒子传感器，搜寻由过境暗物质粒子散射产生的瞬时冲力。该实验在1-10⁷ GeV/c²的质量范围内，对一类通过长程力与标准模型中子耦合的暗物质模型设定了迄今最严苛的上限（单中子耦合强度 ≤ 1×10⁻⁷, 95%置信度）。

▶ 产品：研发加速，精度与应用拓展并进

在重力测量领域，量子绝对重力仪已完成从科研样机向工程产品的跃迁。

量子重力仪克服了传统绝对重力仪无法长时间连续运行的缺陷，正成为地震监测、资源普查及国家大地水准面维护的新型骨干装备。预计到2026年，随着小型化技术的进一步成熟，量子重力测量将逐步进入空基与潜航平台，开启动态引力制导与实时测绘的新阶段。

 图表 2025全球量子重力测量领域部分代表性企业产品及参数

机构	产品分类	产品参数	应用领域	产品外观
 中科酷原 CAS COLD ATOM 中国	量子绝对重力仪	型号：WAG-H5-2 灵敏度：15 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 稳定性：< 1 μGal 准确度：< 10 μGal	惯性导航 地震研究 大地测量学	
 国盾量子 QuantumCTek 中国	量子绝对重力仪	型号：A-Grav 短期灵敏度：< 20 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ (安静台站环境) 准确度：< 5 μGal 精度：< 5 μGal	重力基准值 无漂移的连续重力监测 无漂移的流动重力勘测	
 AOSense 美国	量子绝对重力仪	型号：Compact gravimeter 采样率：20Hz	大地测量 精准导航 自然资源勘探 地体监测	
 exail 法国	量子重力梯度仪	型号：Absolute Quantum Gravimeter 灵敏度：50 $\mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$ 稳定性：2 μGal 准确度： $\leq 10 \mu\text{Gal}$	地球物理学 土木工程	

iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

应用：短期将在能源勘探、地震火山监测等领域中发挥重要作用

量子重力测量技术通过捕获地球质量分布引起的微弱引力变化，为不依赖外部信号的导航、远距矿产普查以及关键自然灾害预警提供高可靠数据支撑。

- 资源勘探与能源普查领域：**地下矿藏、深层水源以及地热能源与周围岩层的密度差异会引起局部的重力异常。量子重力传感器可以穿透地表，实现对资源储量的动态估算和空间建模。相比传统物理勘探方法，量子重力仪具备更高的空间分辨率，能够更准确地锁定金属矿脉、油气田以及稀缺水源的分布范围，显著降低勘测成本。
- 地球科学研究与环境监测领域：**量子重力仪可以用于监测冰川消融速度、局部水位动态以及地壳运动引发的质量分布重组。在火山喷发预警和地震研究中，通过长期部署量子监测网络，可以感知掩埋在地下深处的岩浆移动或板块应力积累，为物理海洋学、水文学及自然灾害防御提供量化的预警依据。
- 自主导航定位与隐蔽侦察领域：**重力场分布具有独一无二的地域特征且无法被屏蔽或伪造。利用量子冷原子干涉仪探测到的高精度重力图，潜艇和水面舰艇可以在完全关闭无线电通信、不依赖 GPS 信号的情况下，通过重力特征匹配实现绝对定位。这种方式在地磁干扰强烈的极区或复杂的深海环境中，能够为各类舰船提供具备隐蔽性的自主定位能力，且其定位误差不会随时间累积。

量子重力导航海上实验



- 2025 年 7 月，澳大利亚量子技术公司 Q-CTRL 与澳大利亚国防部合作，完成了量子导航/重力导航技术的海上现场试验。该系统利用软件强化的量子双重重力仪实现了 144 小时连续运行，在 GPS 不可用环境下验证了其导航能力及设备的稳定性与低功耗表现。

资源勘探合同



- 2025 年 11 月，加拿大空间采矿公司 CSMC 获得卢森堡空间局合同，开发基于冷原子干涉的 Quantum Atomic Subsurface Mapper (QASM) 量子重力感测器，作为未来轨道/空间资源探测平台的开发与验证项目。

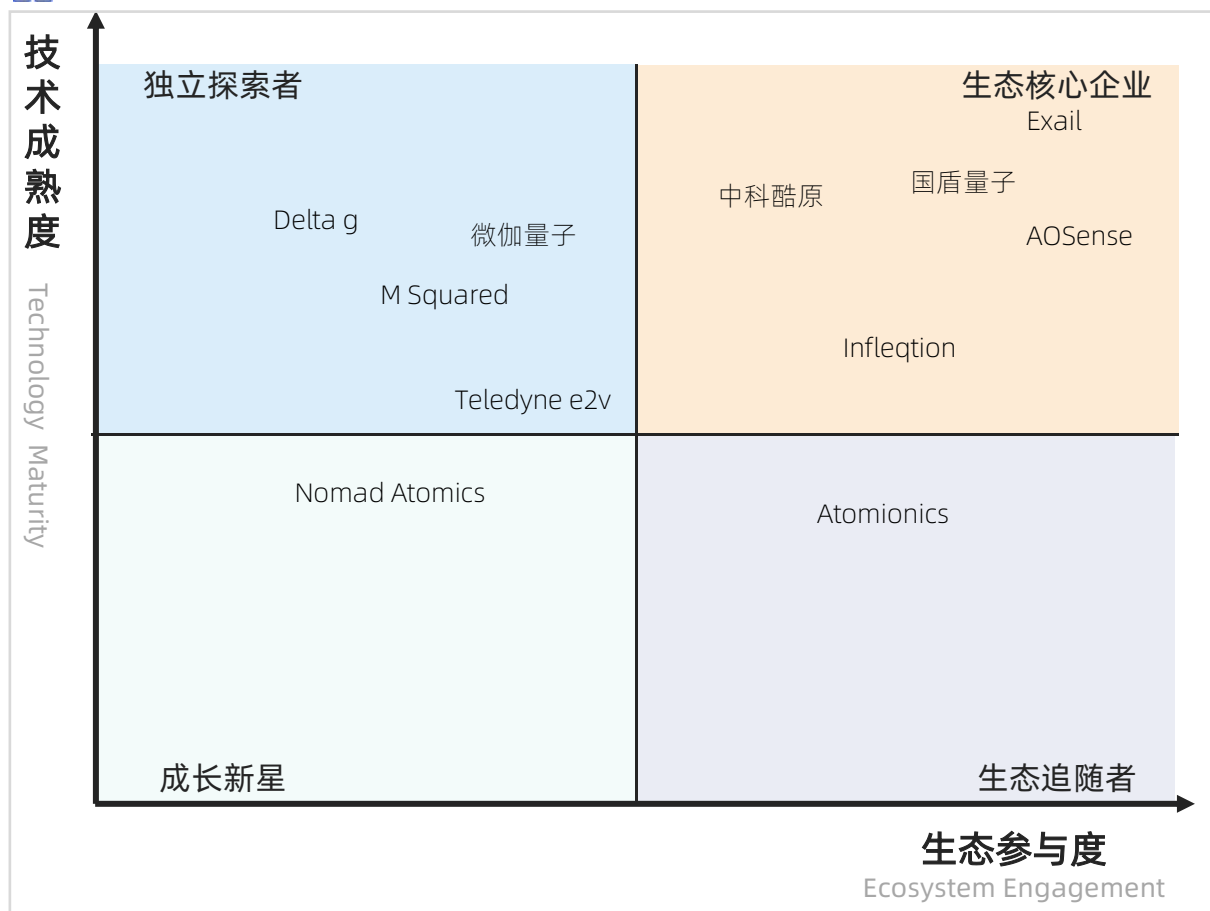
量子重力仪网络项目



- 欧盟于 2025 年 6 月发起了 EQUIP-G 项目，由法国 CNRS 牵头并联合 20 余家欧洲机构，旨在开发并部署欧洲范围的量子重力仪网络，通过高精度重力测量支持地球内部动力学、能源资源管理、风险评估等多学科应用。

► 供应商：全球供应体系呈现高度集中的寡头格局

图表 量子重力领域 Q-EMC 模型



ICV TA&K | 2026.2

当前全球量子重力测量市场仍处于产业化的初期探索阶段，技术溢价与应用实效之间的平衡是影响其大规模普及的核心变量。

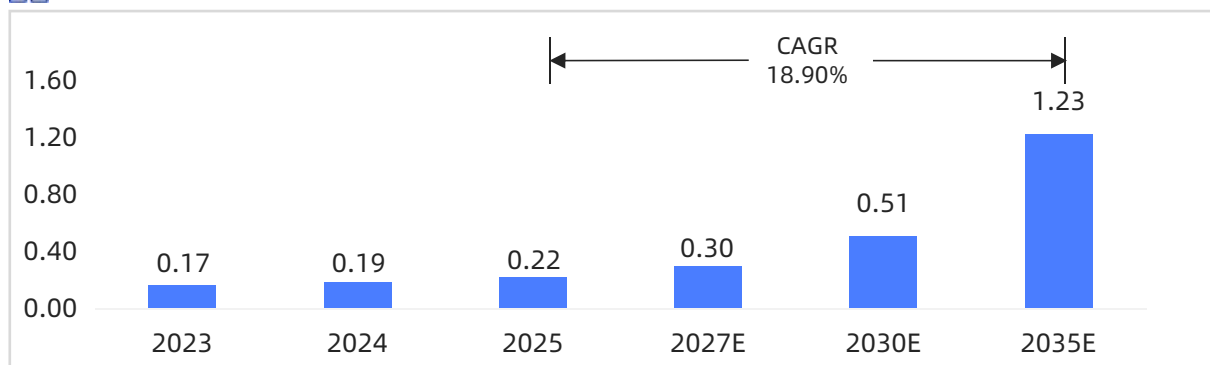
尽管量子重力仪在长期零漂和绝对测量方面具备天然的物理优势，但在短期测量精度与静态稳定性指标上，尚未对传统光学及超导重力仪形成压倒性的优势；叠加其高昂的购置与维护成本，导致下游用户对技术的边际收益认知不足，整体采购规模仍局限于高精尖科研及国家战略工程。

目前，全球市场的核心参与者呈现出跨国协同与垂直深耕的态势，主要厂商包括Exail（法国）、M Squared（英国，2025年进入破产管理程序）、AOSense（美国）、Nomad Atomics（澳大利亚）、Atomionics(新加坡)以及中国的中科酷原、国盾量子与微伽量子等。

▶ 市场：有望加速替代经典重力仪，市场份额逐年增加

未来量子重力测量产业规模将逐年增长，2035年将达到12.3亿美元，2025-2035复合年均增长率达18.90%。

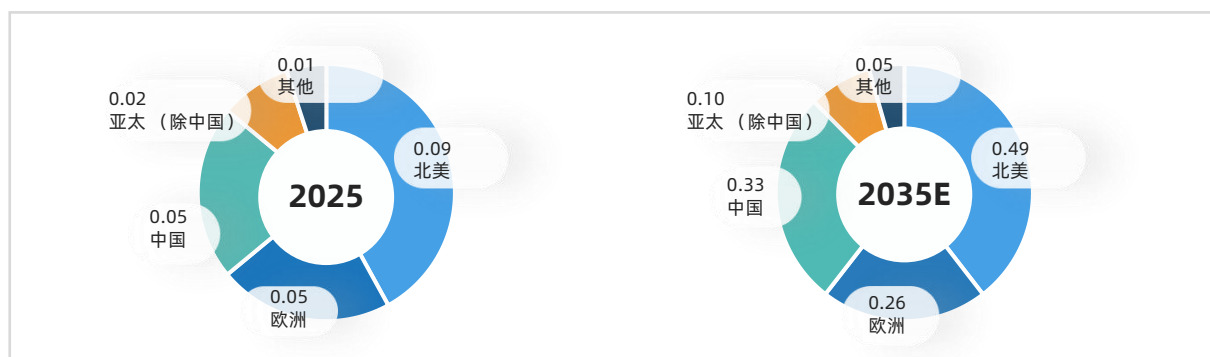
图表 全球量子重力测量领域产业规模（2023-2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

在量子重力仪技术指标方面，中国与美国目前处于全球领先序列。2025年，两国产业规模分别为0.5亿美元和0.9亿美元。预计到2035年，中国市场占比将提升至27%。其在地震监测与地下资源探测领域的持续投入正转化为显著的产值份额。

图表 全球各地区量子重力测量产业规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

量子重力测量当前仍以军事国防与科学研究为主，GPS拒止下的匹配导航是国防应用的基本动力。民用方面，除地震预警等公共安全项目外，能源矿产勘探需求受油气投资节奏影响，正成为新兴增长点。商业化落地受制于连续运行、抗振及运维成本，预计2035年民用市场规模达1.5亿美元。

图表 全球量子重力测量下游应用规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2



06

其他物理量测量



目录

06 其他物理量测量

01 位移/相位测量

02 旋转测量

03 电场测量

04 应力应变测量

05 温度测量

06 软件算法平台


01

位移/相位测量： 突破传统极限提升测量精度

位移与相位测量是量子传感的重要基础能力，其核心在于通过对电磁波或物质波相位变化的精密探测，实现对距离、速度、形貌及振动等物理量的高精度解析。在技术路径上，该类测量方法不仅支撑局域尺度的精密测量，也逐步向远距离探测场景延伸。

从应用形态看，位移与相位测量技术可分为两类体系：一类是面向近距离高精度测量的局域精密测量体系，主要包括基于原子干涉、量子光学干涉及固态自旋的各类传感方案，广泛应用于重力测量、精密位移检测及高分辨成像等场景；另一类是面向远距离目标探测的量子探测体系，其核心是将相位测量能力扩展至开放空间环境，实现对目标的非接触式探测与识别。

在远程探测方向，量子雷达与量子增强型激光雷达（LiDAR）作为代表性技术路径，正成为位移与相位测量向工程应用拓展的重要方向。基于不同量子作用机制，该领域逐步演化出多类硬件实现路径。

 图表 量子雷达典型技术路线

技术路线	应用量子技术部位	成熟度
干涉式量子雷达	发射端	技术探索期
接收端增强型量子雷达	接收端，经典与量子融合的实用化路线	实用化/工程化早期（最成熟）
量子照明雷达	发射端和接收端	实验室原理验证期

▶ 技术：技术创新与精确控制显著提升成像与测距水平

量子干涉雷达通过物理机制调控刷新微观相位提取效率

该路线在2025年展现出从对称光路向非对称相互作用模型演进的趋势。其技术核心在于利用光子的二阶相干性与空间关联特性，通过重塑干涉结构榨取更高的相位信息量。这种“结构换效率”的策略，使单光子精密位移计等硬件在极低光子数环境下，依然能实现远超传统光学极限的精度，为半导体原位检测提供了物理层面的新范式。

非对称SHOM干涉协议实现纳米级测厚精度突破



- 湖南师范大学等团队通过样本半插入式设计打破了HOM干涉的对称性，将相位测量的Fisher信息提取效率提升5个数量级，在室温下实现了4.09 nm的测厚精度。

量子Shack-Hartmann波前传感方案



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



中国科学院
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

- 中国科学技术大学与中国科学院团队提出量子Shack-Hartmann波前传感方案，利用纠缠光子对的质心分布重建相位图样，显著提升了量子感知在散射介质干扰下的可靠性。

量子增强雷达通过相干调制提升工业级动态感知性能

该路线侧重于将单光子探测器的超高时间分辨率与经典相干雷达架构融合。2025年的研究重点在于解决量子激光雷达（LiDAR）在连续工作模式下的相干性维持问题。通过将光学信号直接下变频至微波频段，量子增强雷达正摆脱实验室脉冲探测的局限，向具备高动态测距与测速能力的工业化感测终端转型。

量子调频连续波相干雷达实现测距测速同步增强



粤港澳大湾区量子科学中心
QUANTUM SCIENCE CENTER OF
GUANGDONG-HONGKONG-MACAO
GREATER BAY AREA

- 深圳大学等团队利用自外差检测方案开发出量子FMCW雷达，突破了脉冲式量子雷达难以连续探测的工程瓶颈。实现了对运动目标距离与速度的量子同步增强测量，为超分辨率相干成像奠定了基础。

量子照明雷达通过逻辑过滤强化强噪声环境探测韧性

量子照明雷达路径专注于高背景噪声、高损耗环境下的非合作目标探测。2025年，通过在雷达接收端引入条件投影和零光子减法等算法，研究者实现了在极低信噪比环境下对微弱反射信号的精准识别，解决了量子相干性在真实大气环境下易被破坏的痛点。

零光子减法干涉方案显著提升量子照明雷达成功率



- 北京理工大学等团队针对量子照明雷达在强热噪声下探测概率低的问题，研究提出ZPS增强方案。通过对“未探测到光子”事件的条件投影实施背景剔除，系统在不改变硬件的前提下将探测成功率提升1-2个数量级。

▶ 产品：位移与相位测量领域产品聚焦量子成像仪与量子雷达

当前，面向位移与相位测量的量子传感产品主要聚焦将底层量子感测能力转化为工程可用的探测终端。与传统测量仪器相比，量子方案通过单光子探测、相干干涉增强等技术，在远距测距、微动/振动识别及弱信号提取等场景中展现出潜在优势。产业界正围绕这些应用方向推进产品化探索，推动技术从理论与实验验证向特定行业工程化落地。

从全球竞争格局看，该领域有多类代表性开发者：如Quantum Computing Inc. (QCi) 的量子光子振动仪在微动测量上实现了高灵敏度检测；QLM Technology的量子气体LiDAR在环境遥感与工业监测场景取得工程验证；中国的国耀量子等企业则在量子增强测距与成像方向开展原型系统研发。与此同时，相关底层组件供应商（如高稳光源厂商）在整个生态中发挥着关键支撑作用。


总体而言，量子位移/相位测量产品正沿着高精度传感与工程化适配方向演进，在特定细分场景中逐步展现实用价值，但在远距、复杂环境下的全面部署仍面临技术挑战和突破空间。


 图表 2025全球量子位移/相位测量领域部分代表性企业产品及参数


机构	产品分类	产品参数	应用领域	产品外观
 山东国耀量子 中国	基于单光子探测器	型号：颗粒物光量子雷达 探测距离：5-15km 距离分辨率：≤30m,可调 时间分辨率：1s,可调	大气环保检测	
 QLM 英国	基于单光子探测器	型号：Quantum Gas 探测距离：200 米 可探测甲烷泄漏率： 0.012 g/s	探测甲烷泄漏	
 QCI 美国	基于单光子探测器	型号：Quantum Photonic Vibrometer 精度：110 nm 频率范围：30-25,000 Hz	远程监控检测	
 RYDBERG TECHNOLOGIES 美国	基于原子天线的量子增强雷达	型号：RFMS 测量不确定性：比传统天线标准低一个数量级	用于测量和表征宽范围频率和强度的射频场	


应用：量子雷达与量子成像技术助力医学、国防、航空航天等领域位移相位测量产业化

量子精密测量技术在位移与相位方向的应用，主要依托量子雷达与量子成像的产业化进程，通过捕捉极微小的空间位移及波函数相位漂移，为多个领域提供超越经典极限的探测能力。

 **生物医学与细胞工程领域：**该技术是实现超分辨显微成像的关键，能够用于观测单个细胞的活动轨迹以及生物分子的动态交互。尤其在眼科医疗中，利用量子相位的敏感度可以大幅提升光学相干断层扫描（OCT）的清晰度，在不损伤组织的前提下实现对视网膜深层结构的精密剖析。

 **在国防军工与自主导航领域：**针对微弱目标和隐身军事目标的探测，量子雷达展现出了独特的优势。同时，在失去GPS信号或遭遇电磁对抗的极端环境下，基于相位敏感的量子传感器可以维持极低漂移的惯性导航，确保飞行器和各类无人平台的位置精度与时序同步。

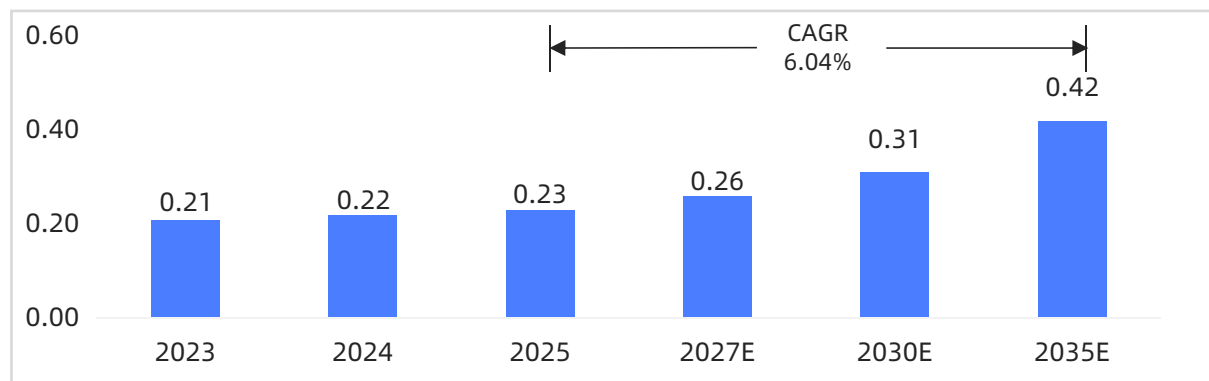
 **环保监测与气象观测领域：**通过对光波相位扰动的实时监测，量子精密测量能够识别大气中极低浓度的颗粒物排放，实现污染源的精准定位。在交通气象方面，该技术能实时感知要道的风速、风向及能见度变化，为航空航天和陆路运输提供高置信度的决策支持。

 **工业制造与智能感知融合领域：**相位测量在半导体芯片的无损探伤和超精密加工中起着核心监控作用。随着该技术与人工智能、大数据及物联网的融合，量子成像系统正在转向自动化识别与智能化协同，通过构建全方位监测网络提升复杂环境下的目标分类与跟踪性能。

▶ 市场：区域市场与本地需求绑定，军事国防占据主导地位

预计未来量子位移/相位测量产业规模将逐年增长，2035年将达到4.2亿美元，2025-2035复合年均增长率6.04%。

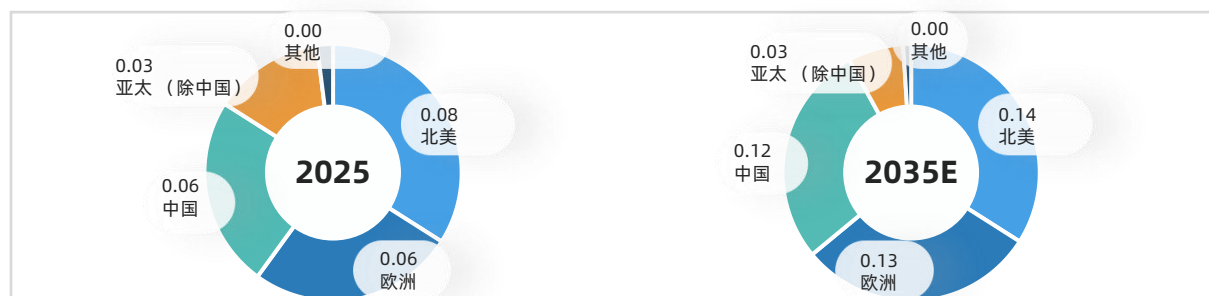
图表 全球量子位移/相位测量领域产业规模（2023-2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

量子位移相位测量产值高度集中于北美、欧洲与中国，预计2035年合计份额超90%。其中，北美（34%）由国防采购驱动；欧洲（30%）依托科研体系与精密仪器集群；中国（28%）受益于制造业升级与半导体质检等场景落地。这一格局凸显高端制造与战略科技投入的核心拉动作用。

图表 全球各地区量子位移/相位测量产业规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

军事国防是量子位移/相位测量主要应用领域，2035年市场规模预计为0.9亿美元。量子探测与激光雷达等技术在远程目标识别及高精度定位中的性能优势，是支撑军事应用的核心动力。航空航天精密装配、工业微位移检测以及高端医疗影像设备的迭代升级，共同推动了民用市场规模的增长，预计2035年将到达0.6亿美元。

图表 全球量子位移/相位测量下游应用规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

02

惯性测量： 尚未充分展现量子优越性


惯性测量以量子陀螺仪与加速度计为核心，构成了下一代惯性导航系统的底层感知链路。该技术通过捕获原子量子态在惯性空间中的演化，实现对加速度与角速度的高维度解析。利用物质波干涉或自旋进动特性，量子惯性传感器在长航时自主导航、深海及深空探测等卫星信号受限场景中，展现出接近物理极限的长期稳定性与极低的零偏漂移。

目前，量子惯性传感领域已形成三条典型的技术路径：

冷原子干涉类：以冷原子干涉陀螺仪（AIG）与加速度计为代表，利用物质波干涉实现测量，面向需极高零偏稳定性的战略级应用。

原子自旋类（中性原子蒸气）：以SERF陀螺仪与核磁共振陀螺仪（NMRG）为代表，利用原子蒸气中电子自旋或核自旋的进动特性。该路径在动态范围、环境适应性及小型化方面具有优势，正加速向微纳卫星及工业平台渗透。

固态自旋类：以金刚石氮-空位（NV）色心陀螺仪为代表，利用固态缺陷的自旋特性，具备极佳的芯片级集成潜力。

 图表 量子惯性测量典型技术路线和传感器

技术路线	传感器名称
中性原子（冷原子干涉）	冷原子干涉陀螺仪、冷原子干涉加速度计
固态自旋	金刚石NV色心陀螺仪（研究中）
中性原子（原子蒸气）	SERF陀螺仪、核磁共振陀螺仪

iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

► 技术：原子干涉是研究热点

量子加速度计通过空间关联与动态滤波提升探测维度

量子加速度计的研究重心正在从实验室环境下的精度刷新向复杂动力学环境下的多轴感知与抗噪能力跨越。在原子干涉路径下，2D 物质波阵列技术的应用实现了单一传感器对线性加速度、重力梯度及高阶导数的同步捕获。同时，针对外部电磁与机械噪声，通过高频敏感矢量翻转技术配合非线性预测滤波，使系统具备了在动态背景下提取微弱力学信号的韧性。

冷原子干涉路线：基于二维BEC阵列的多轴惯性矢量测量



- 德国汉诺威大学利用 3×3 的玻色-爱因斯坦凝聚态（BEC）阵列构建了空间关联探测体系。该方案通过2D阵列的空间排布同步获取重力梯度、线性加速度及角加速度信息，解决了传统原子干涉仪敏感轴单一的局限。

冷原子干涉路线：利用高频k矢量反转技术抑制动态噪声



- 美国海军研究实验室引入592 Hz的快速k矢量反转技术，通过频繁切换惯性敏感方向并结合非线性滤波，在维持高带宽输出的同时显著降低了磁场与振动引起的相位误差，强化了系统的部署韧性。

量子陀螺仪通过读出增强与环境补偿拓宽测量量程

量子陀螺仪在 2025 年实现了从轨道实测到微观读出效率的全面突破。冷原子干涉陀螺仪通过中国空间站的成功运行，验证了其在微重力及高动态平台下的工作可靠性。在固态自旋路径下，利用腔量子电动力学产生的两场干涉效应，解决了长期以来核自旋状态光学读出信噪比极低的痛点。

冷原子干涉路线：中国空间站冷原子陀螺仪完成首次轨道实测



- 中科院精密测量研究院等机构依托中国空间站，利用内置压电反射镜实时补偿高动态转速波动，成功捕获空间原子干涉条纹并实现单次测量分辨率 $50 \mu\text{rad/s}$ 。测量结果与空间站经典陀螺仪的记录高度一致，首次在轨验证了冷原子干涉仪作为空间高精度旋转传感器的可行性。

NV 色心路线：利用腔增强效应实现灵敏度跨代提升



- 麻省理工学院与美国陆军研究实验室等利用腔量子电动力学耦合技术，通过金刚石 NV 色心电子自旋辅助实现了对核自旋状态的高效光学读出，将固态量子陀螺仪的灵敏度提升了 3 个数量级，并支持单传感器的三维转动矢量解析。

冷原子干涉路线：利用相位色散补偿解决大角速度测量限制



- 东京工业大学团队针对大角速度环境下原子条纹对比度下降的瓶颈，通过双光子失谐补偿塞格纳克相位偏移，使原子陀螺仪在 $1.0^\circ/\text{s}$ 的高转速下依然维持稳定输出。


▶ 产品：量子惯性传感器仍处于工程化过渡阶段


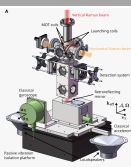


量子旋转测量（量子陀螺仪）作为下一代惯性导航的核心传感链路，正处于由原理验证向工程化过渡阶段。基于原子干涉、核自旋与核磁共振等量子机理的陀螺测量技术，在理论精度、长期稳定性及抗干扰能力方面具备显著优势，有望支撑长航时自主导航及深海、深空等GPS拒止环境下的高精度姿态控制。

在技术成熟度上，核磁共振陀螺仪（NMRG）凭借小型化与集成优势已进入战术级样机验证阶段；冷原子干涉陀螺具备极高潜在精度，但仍面临动态范围、环境适应性与系统复杂度等工程挑战，固态NV色心等方案则处于早期探索阶段。与此同时，量子加速度计在绝对测量与长期稳定性方面已具备一定成熟度，但在带宽与系统集成方面仍依赖与经典器件的融合优化。

总体来看，量子惯性传感器仍以样机为主，其性能优势在复杂工程环境中尚未充分释放，体积、成本与稳定性仍是主要约束。核磁共振陀螺具备较强的短期应用潜力，而冷原子干涉体系在高精度惯导领域具有长期发展前景。


从系统层面看，量子陀螺并非对传统惯导的直接替代，而是与MEMS陀螺、光纤陀螺及激光陀螺等形成异构融合，通过多传感器融合与混合导航架构实现性能互补。当前，航天科技、航空工业及中国电科（CETC）（中国）等体系力量正推进工程化验证，AOSense（美国）、Vector Atomic（美国，2025年被 IonQ 收购）等企业聚焦冷原子惯导，Northrop Grumman（美国）在核磁共振陀螺方向具备工程积累，Bosch（德国）则探索基于NV色心的芯片化惯性传感方案。


 图表 2025全球量子惯性测量领域部分代表性企业产品及参数


机构	产品类型	产品参数	应用领域	产品外观
 universit� PARIS-SACLAY 法国	冷原子加速度计-陀螺仪	形态：实验室样机 短期灵敏度为 1.8×10^{-6} rad/s per $\sqrt{\text{Hz}}$	全球导航卫星系统 地球物理测量	
 NORTHROP GRUMMAN 美国	核磁共振陀螺仪	形态：工程样机 零偏稳定性： $10^{-2} \text{ }^\circ / \text{h}$	军事应用 精确导航 无人驾驶	

应用：量子惯性测量实现无GPS环境下的稳定导航

量子旋转测量技术以极高的角速度灵敏度和近乎零的零偏漂移为核心，通过精确捕捉载体的姿态变化，并与量子加速度计协同构建完整惯性测量链路，为惯性测量系统（IMU）提供高稳定度的方向与运动参考。

 国防军工与长航时自主导航领域：量子惯性传感器是实现强对抗环境下“全天候”导航的核心。在深海潜航、极区探索或GPS信号受严重干扰的战场环境中，移动平台无法依赖外部卫星授时和定位。量子旋转测量结合量子加速度测量，可有效抑制随时间累积的导航误差，确保潜艇、飞行器以及导弹在长期航行中维持精准的姿态与轨迹，从而提升系统的生存与作战能力。

 航空航天与深空探测领域：在航天器姿态控制与轨道测量中，量子陀螺仪可感知微小角动量扰动，而量子加速度计则用于精确测量轨道机动与微推力变化。二者协同可支撑卫星高精度指向、空间交会对接以及深空探测器的姿态与轨道控制。

 民用智能装备与工业精控领域：随着器件的小型化与集成化，量子惯性传感技术有望逐步进入高端民用市场。在复杂环境下，量子陀螺与加速度计的融合可提升自动驾驶系统在隧道与地下场景中的定位稳定性，提高医疗机器人在微创操作中的轨迹控制精度，并增强消费电子设备的姿态感知与防抖性能。

量子惯性导航北极测试

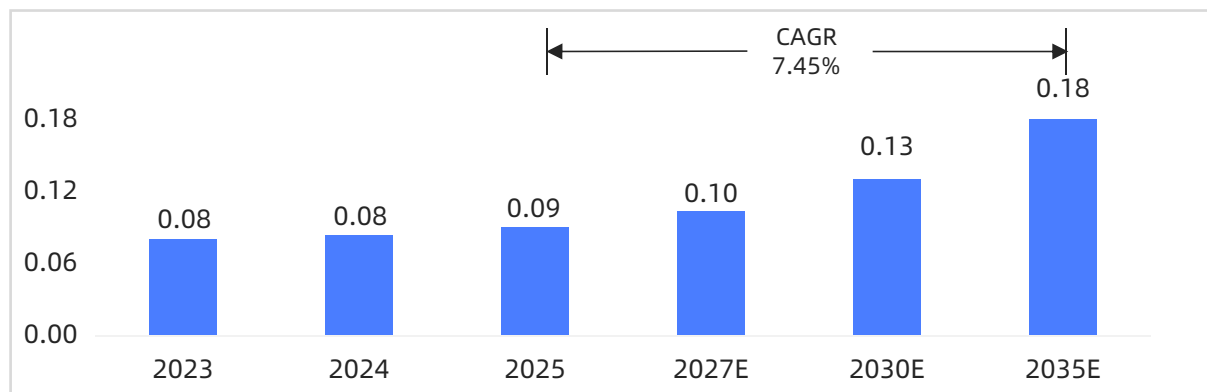


- 英国皇家海军与伦敦帝国理工学院合作，在北极海域完成了量子惯性导航传感器的现场试验。该测试使用基于冷原子系统构建的量子惯性导航装置测量加速度与旋转等惯性参数，在卫星信号不可用条件下验证了设备的长期稳定性与抗环境干扰能力。

▶ 市场：北美地区占据主导地位，军事国防领域成为主要应用场域

量子旋转测量产业规模持续增长，由2025年的0.9亿美元增长至2035年的1.8亿美元，年复合增长率为7.45%。

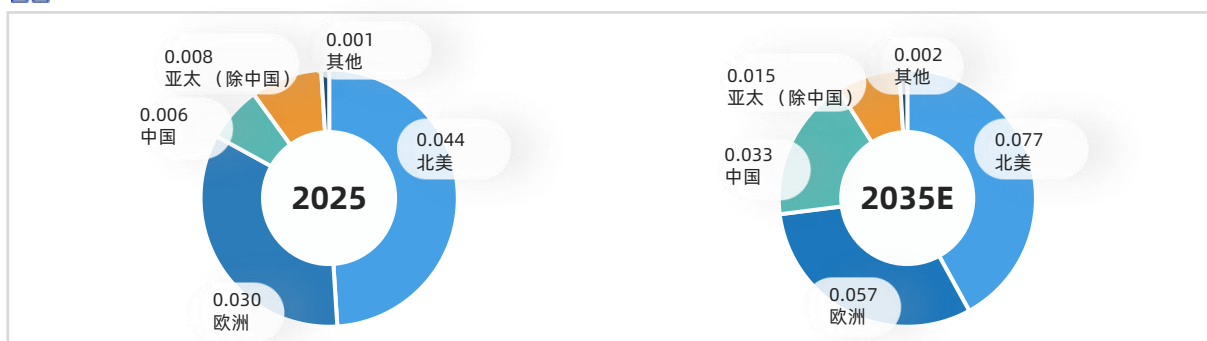
图表 全球量子惯性测量领域产业规模（2023-2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

北美与欧洲保持领先，但中国市场正因科研转化加速而快速扩张。预计到2035年，中国产业规模将达到0.33亿美元。亚太地区对高精度惯性导航的需求，正由先进飞行器与深海探测设备的零部件自主研发直接带动。

图表 全球各地区量子惯性测量产业规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

军事国防领域是主要应用领域。2035年军事国防市场规模预计为0.28亿美元，量子陀螺仪在卫星信号受阻环境下的长时间自主惯性导航性能，是该领域需求增长的主要动力。同期科学研究领域的市场规模将达到0.24亿美元。民用领域市场规模预计为0.16亿美元，应用场景主要集中在高精度工业校准及深地作业。

图表 全球量子惯性测量下游应用规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2


03

电场测量： 实现电磁信号的可溯源精密感知

电场测量作为量子精密测量的关键环节，通过量子态对电势能及电磁波的高度敏感响应，打破了传统金属天线与扫描探针在物理尺寸及灵敏度上的限制。

其技术路线涵盖了基于里德堡（Rydberg）原子的射频感知、基于固态自旋（如金刚石NV或碳化硅色心）Stark效应的微观成像，以及利用囚禁离子阵列的超精密电场探测。

相比传统方案，量子电场测量的优势在于具备极宽的频段覆盖（从直流至太赫兹）、亚波长级别的非侵入式测量以及极高的空间分辨率，已成为6G通信、半导体器件诊断及基础物理探索的底层核心能力。

 图表 量子电场测量典型技术路线和传感器

技术路线	传感器名称
里德堡原子	里德堡原子电场计
固态自旋	NV/SiC 色心电场传感器（基于 Stark 效应）
囚禁离子	囚禁离子电场与力传感器

ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

▶ 技术：凭借超高灵敏度和宽频带优势，实现微波电场的高精度测量

里德堡原子体系：从微波波段探测向低频亚千赫兹性能增益拓展

基于里德堡原子的电场探测已具备超宽频带和原子溯源优势，现阶段的研究重点正在攻克低频段（亚千赫兹）探测中易受背景噪声干扰的难题。通过利用耗散时间晶体等量子多体物态的稳定性，研究人员实现了对微弱电场信号的相干放大。这种技术演进的逻辑在于，利用非平衡态量子物质的鲁棒性来过滤噪声，从而在传统传感器难以触及的低频和直流范围内，实现了探测灵敏度的量级化提升。

利用里德堡耗散时间晶体提升低频传感



- 加州理工学院喷气推进实验室 (JPL) 团队开发出 Stark 调制里德堡耗散时间晶体传感方法，在 300 Hz 下实现了 $7.8\mu\text{V cm}^{-1}\text{Hz}^{-1/2}$ 的灵敏度。相比现有的里德堡传感技术，该方法在亚千赫兹频段的性能提升了约 8.7 倍，为超低频电磁屏蔽环境下的信号捕捉提供了可能。



固态自旋体系：非光学读取与半导体器件内部的原位成像

固态自旋（如金刚石 NV 色心与碳化硅空位）的电场测量技术正从实验室标准样片探测转向功率半导体器件原位诊断。为了克服复杂器件内部光学窗口受限的问题，现阶段开发了非光学读取技术，利用载流子转换逻辑替代荧光探测。这种转变意味着量子传感器可以直接集成在半导体封装或工业电路中，实时测绘器件工作状态下的内部电场分布，对优化宽禁带半导体动力学过程具有直接的工程意义。

NV 色心电荷态的非光学读取



- 德国柏林亥姆霍兹材料研究中心 (HBZ) 与柏林自由大学等研制出“表面电压检测磁共振 (SVD MR)”技术。通过环境条件下的开尔文探针力显微镜 (KPFM) 结合激光，实现了对钻石表面数纳米处 NV 色心束缚电荷的非光学读取，为电场/电压的单自旋检测提供了新思路。

碳化硅器件内部电场的空间测绘



- 德国埃尔朗根-纽伦堡大学利用 SiC 硅空位色心的 Stark 效应，在工作状态下的 p-i-n 二极管内部实现了电场与载流子浓度的纳米级原位成像。该技术标志着固态量子传感已具备直接诊断半导体功率器件失效机制的能力。



囚禁离子体系：利用磁梯度映射驱动电场灵敏度的跨量级跃迁

囚禁离子系统因其极高的相干性，一向被视为量子精密测量的极致物理平台之一。现阶段的技术突破在于利用静态磁场梯度构建了一种新型耦合机制，将电场引起的离子微弱机械位移映射为易于观测的内部自旋能级变化。这种信息转换逻辑极大地放大了离子对电场的响应权重，使得原本微弱的 DC/AC 信号在自旋表征中变得极其显著，从而在极低噪环境下实现了探测性能的指数级增长。

电场引起的离子位移映射技术




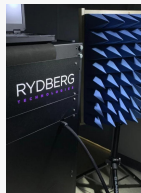

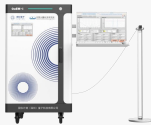
- 英国萨塞克斯大学等团队通过磁场梯度将电场驱动的离子位移转换为自旋相位的变化，使囚禁离子对电场的灵敏度提升了六个数量级。该方案不仅支持超灵敏的直流/交流电场探测，还能对电场噪声频谱进行精细化分析，在微观表面力学研究领域具有重要应用价值。

▶ 产品：注重小型化、集成化和定制化发展

在量子传感电场测量领域，目前的供应商主要聚焦于将里德堡原子和金刚石NV色心这两大核心技术转化为商用探测设备。主要供应商有Rydberg Technologies（美国）、国仪量子（中国）等。

量子电场测量技术正处于从高灵敏度原型向高性能工程化载荷演进的关键阶段。基于里德堡原子的量子传感机制，该类测量技术利用原子极高的极化率和电偶极矩，使得电磁场的微弱变化能够通过原子能级响应光谱精确读出，具有高灵敏度和可溯源测量能力。实验研究已在RF和微波频段实现了数十微伏/米甚至更高精度的电场探测，并展示了对复杂电场信号的响应特征。

图 表 2025全球量子电场测量领域部分代表性企业产品及参数

机构	产品分类	产品参数	应用领域	产品外观
 美国	里德堡原子 电场传感器	型号：Rydberg Field Measurement System 测量不确定度：比传统天 线标准低一个数量级	射频测试与测量 计量学 射频传感与探测	
 中国	里德堡原子 微波场强仪	型号：QuEM-I 频率范围：0.2GHz - 40GHz（可扩展） 幅度范围：1 μ V/cm - 0.1V/cm 测量不确定度： \leq 5%	微波计量测试 电磁兼容 电磁环境监测 频谱分析 无线通信	

应用：量子电场测量提升复杂电磁环境下的感知能力

量子电场测量技术通过里德堡原子态的受激响应，将复杂的微波电场还原为频率分布，为无线通信标准的精确定标以及功率半导体的性能评估提供物理依据。



射频计量与无线电校准领域：传统的电场传感器往往需要复杂的定标过程且容易受环境金属反射干扰。量子场强计利用里德堡原子的相干效应，直接将微波电场强度与基本物理常数挂钩，实现了电场测量向国际单位制（SI）的远程溯源。这种自校准特性使其成为卫星通信、导航设备以及微波频率标准研发过程中的“终极量具”。



频谱监测与电磁空间管理领域：随着频谱资源的日益紧缺，对微弱干扰信号的精准识别成为提升通信质量的关键。里德堡场强计具备极高的灵敏度和极宽的响应频率，能够实时监测基站、雷达站周边的微弱电场波动。通过对复杂频谱环境的量化分析，监管部门可以有效识别非法频谱占用和电子对抗中的异常干扰信号，从而优化无线通信系统的资源调度效率。

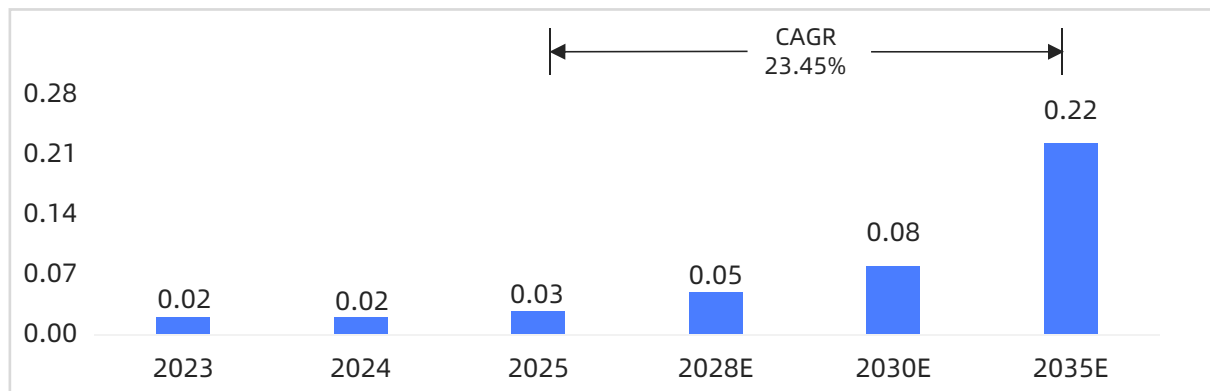


半导体器件诊断与工业微区成像领域：在高性能芯片制造过程中，内部电场分布的均匀性直接决定了功率器件的耐压上限。通过测量固态缺陷（如碳化硅色心）的Stark效应，可以在纳米尺度上非接触式地绘制工作状态下的器件内部电场。这种探测深度与分辨率的结合，为半导体失效分析、载流子迁移监测以及新型电子材料的研发提供了微观层面的实验数据支持。

▶ 市场：未来受里德堡原子场强计技术创新推动，有望在多领域广泛应用

量子电场测量增速较快。全球市场规模预计从2025年的0.3亿美元快速扩张至2035年的2.2亿美元，年复合增长率达23.45%。

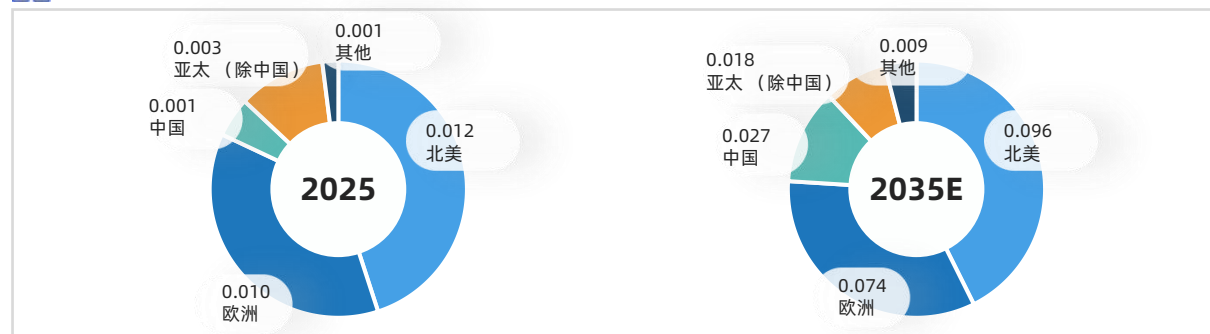
图表 全球量子电场测量领域产业规模（2023-2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

市场高度集中于北美与欧洲，2035年两地产值份额合计占据全球的76%。中国市场目前基数较小，但增长势头强劲，2035年市场占比将提升至12%，产值规模达到0.27亿美元。

图表 全球各地区量子电场测量产业规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

民用领域是量子电场测量的核心增长点，2035年市场规模预计达到0.44亿美元。里德堡原子电场传感器在5G/6G通信基站校准、高频微波测量及医疗生物电成像领域的应用推广，是民用领域增长的重要推动力。军事国防领域的市场规模到2035年将增长至0.2亿美元，主要应用于电子战中的高灵敏度信号侦测与宽频带通信。

图表 全球量子电场测量下游应用规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

04

应力应变测量：
材料内部形变的高精度感知

量子应力应变测量基于晶格畸变对固态自旋缺陷能级的调制效应。

NV色心等量子缺陷通过自旋能级变化与光学读出，实现对材料局域应力/应变的高灵敏探测，已在微纳材料分析与应变成像等科研场景中得到广泛验证。随着多物理场建模与干扰解耦算法的发展，其测量精度与环境适应性持续提升。作为另一类固态自旋体系，SiC色心通过应变工程可调控自旋性质并提升读出对比度，为优化量子传感器性能提供了新的材料路径。

但整体来看，量子应力/应变测量仍以实验研究与高附加值应用为主，距离大规模工业在线监测在系统集成与长期稳定性方面仍存在工程挑战。

 图表 量子应力/应变测量典型技术路线和传感器

技术路线	传感器名称
固态自旋	NV色心量子应力/应变传感器 SiC色心量子应力/应变传感器

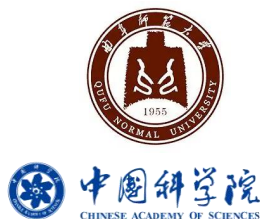
ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

▶ 技术：固态自旋技术路线实现了微观力学响应的原位非破坏性转化

极高压物理环境下NV色心性能优化与探测跨越

目前，金刚石NV色心正从常规环境探测向百万倍大气压等极端物理边界拓展。通过改进缺陷制备工艺与能级建模，研究者成功解决了高压环境下量子比特性能退化的瓶颈，实现了对材料力学及磁学特性的原位精密监测。

金刚石NV色心240 GPa极端高压探测突破



- 曲阜师范大学与中国科学院团队通过离子注入结合高压高温（HPHT）退火工艺制备浅层缺陷，有效降低了内部残余应力并提升了相干性。该方案将NV色心的工作压力极限从140 GPa提升至240 GPa，并在180 GPa下成功观测到金属钛的迈斯纳效应，为极端压力下的应力分布可视化提供了关键工具。

碳化硅 (SiC) 应变工程与单片集成化传感

碳化硅平台正展现出从测量对象向调控工具转变的技术趋势。通过主动利用应变工程重塑能级结构，并结合半导体微纳加工工艺，SiC路线在信号对比度与器件集成度上实现了跨越，大幅降低了量子传感进入工业原位监测的门槛。

应变工程显著增强SiC缺陷自旋读出对比度



- 哈尔滨工业大学等研究团队通过在碳化硅绝缘体薄膜 (SiCOI) 中引入受控静态应变，实现了超过60%的自旋读出对比度。该方案在保持单自旋长相干性的前提下，突破了室温量子传感长期面临的信号信噪比瓶颈，为高性能量产型量子探测器的研发开辟了新路径。

单片集成4H-SiC高品质因数纳米机械谐振器



- 德国埃尔朗根-纽伦堡大学 (FAU) 等团队利用电化学刻蚀技术，在单晶4H-SiC晶圆上实现了无预应力单片谐振器的制备。该结构具备高达 2×10^5 的室温品质因数，且在高温热处理下表现出极强的工艺鲁棒性，是构建自旋-力学混合系统、实现芯片级原位力学感知的核心组件。


▶ 产品：仍处于实验室探索阶段，商业化面临挑战

当前，量子应力/应变传感器在实验室环境中已取得显著进展，但在向商业化产品转化过程中仍面临多重工程与市场挑战。

一方面，在材料成本、探头寿命、封装工艺及批量一致性等方面仍有待优化，以满足规模化制造与长期稳定运行的要求；另一方面，其性能优势与应用价值尚未被市场充分认知，适配的应用场景仍在探索之中。

从产业路径看，该产品短期内更可能在极端工况检测、高附加值科研与工业场景中率先落地，通过小规模应用验证其性能与可靠性，再逐步向更大规模市场扩展。整体而言，当前全球专注于量子应力/应变传感器研发与生产的供应商数量有限，产品仍处于实验室验证与初步商业化阶段。


 图表 2025全球量子应变应力测量领域部分代表性企业产品及参数


机构	产品分类	产品参数	应用领域	产品外观
 瑞士	量子应力/应变传感器	从外部压力容器获得0.5毫巴的精度	工业过程监控	-


ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2


应用：降低成本后，应用潜力广泛

量子应力/应变测量技术通过感知原子能级及固体缺陷对外部形变量的微弱响应，在实验研究与高附加值应用中已展现出将力学参数检测精度推向新物理极限的能力，并在航空航天、地质资源、工业制造及医疗健康等领域具备潜在应用价值，但整体仍处于工程化早期阶段。

 **航空航天与海洋工程领域：**飞行器在不同飞行状态下外壳所承受的动压变化，以及深海潜航装备面对的极端静压，是决定载体结构安全与航向控制的关键。量子压力传感器能够在宽量程范围内保持极低的噪声水平，即使在严苛的气流波动或压力梯度变化中，也能实时提供高置信度的反馈数据，辅助飞行控制系统完成精细的姿态微调。


 **地质测量与能源勘探领域：**地下岩层的应力分布以及深井钻探中的压力波动是油气资源开采中最重要的安全参数。量子压敏单元具备优秀的长期稳定性和抗环境干扰能力，能够深入地表或海底极端深度，对地层压力进行高分辨率监测。这不仅能够有效预防钻井喷涌等安全事故，还能通过力学特征的精确测定，提升对页岩气、地下矿藏等复杂地质构造的识别效率。

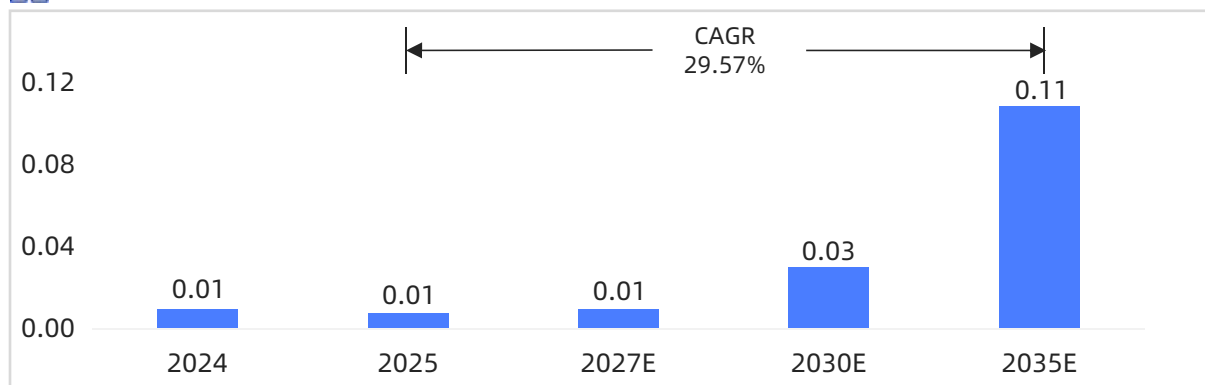
 **在半导体制造与高精度工业领域：**光刻工艺及超精密加工对生产环境的稳定性有近乎严苛的要求。量子压力测量系统可以捕捉生产线上极微弱的振动应力与局部气压干扰，确保工艺流程的良率与产品一致性。此外，在特殊材料的无损检测过程中，通过对零件内部残余应力的量子化测绘，可以预判材料的疲劳损伤，降低工业设施的维护成本。

 **生物医疗与康复辅助领域：**人体内部的生理应力变化直接反映了器官的代谢水平或骨骼的负荷状态。数字化、小型化的量子压敏传感器可以被集成在高性能人工关节或心脏瓣膜中，实现对人体内部动态负荷的长效、无损监测。此外，在高端外骨骼和康复设备中，量子传感技术能够更敏锐地感知肢体意图及压力反馈，提升人机协同的流畅度。

▶ 市场：处于商业化早期，极端环境精密监测驱动增长

量子应力应变测量目前处于产业化早期，但增长势头极强。全球产值预计由2025年的0.1亿美元增长至2035年的1.1亿美元，年复合增长率高达29.57%。


 图表 全球量子应力应变测量领域产业规模（2024-2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2026.2

当前市场由MEMS（微机电系统）传感器占据主流，其具备低成本、易集成等成熟商业优势。相比之下，以NV色心为代表的量子压力传感器仍处于从实验室向极端工业场景转化的探索阶段，目前仅有瑞士Qnami等少数公司实现商用。虽然尚未形成大规模市场替代，但其在极端温压环境下的超高灵敏度是其核心竞争优势。

航空航天作为首要应用场景，2035年市场规模预计达0.194亿美元，重点利用量子技术解决极端环境下的结构精密测量难题。工业自动化和地质能源领域产值规模分别可达0.116亿美元与0.097亿美元，高分辨率探测需求的提升促使这两大场景加速引入量子测量方案。生物医学工程受生物相容性及技术复杂性制约，发展相对缓慢。

 图表 全球量子应力应变测量下游应用规模（2030E & 2035E）（单位：十亿美元）




iCV TA&K | 2026.2

05

温度测量： 极端环境下的高精度温度感知

量子温度测量是宏观热力学与微观量子体系之间的重要连接，其通过原子、电子或超导量子比特的能级变化，实现对温度这一宏观物理量的精确量化。在极端环境下，该类技术突破了传统热电阻与红外测温方法的性能限制，并能够在强电磁干扰、活体细胞内部及近绝对零度等条件下提供高精度的热力学反馈。

其技术路径主要包括：利用里德堡（Rydberg）原子对黑体辐射的高灵敏响应，实现无需外部校准的绝对测温；利用冷原子体系对原子动能分布与相空间密度的精确控制，实现高精度低温区间测量；利用金刚石NV色心等固态自旋对晶格热膨胀及声子作用的敏感响应，实现纳米尺度的局域温度探测；以及利用超导量子比特的动力学特性，在毫开尔文（mK）量级实现原位温度监控。此外，基于量子点荧光的温度传感器在生物医学成像等领域已有应用，但其更多依赖光致发光特性，通常不列入高精度量子相干测量体系。

 图表 量子温度测量典型技术路线和传感器

技术路线	传感器名称
固态自旋	金刚石NV色心量子温度计
中性原子（里德堡原子）	里德堡原子温度计
中性原子（冷原子）	冷原子温度计
超导量子比特	超导量子比特原位温度计（量子计算芯片专用）

ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

► 技术：量子温度计正向原位自溯源、极低温探测及感算一体化阵列发展

 里德堡原子体系依托能级特性建立自校准绝对测温基准

基于里德堡原子的传感方案利用高激发态原子对黑体辐射（BBR）的强耦合特性，实现了无需校准的基准级测量。技术核心在于将环境辐射作为驱动源，监测原子在里德堡能级间的转移概率，从而直接推导出绝对温度。这一路径将测量精度提升至毫开尔文量级，其自校准特性标志着测温技术从经验测量迈向量子定义，为建立芯片级、高精度的国家温度基准提供了硬件支撑。

里德堡原子毫米波黑体辐射感知实现绝对测温



- 美国国家标准与技术研究院（NIST）团队利用冷原子的里德堡态对130 GHz频段黑体辐射的强耦合特性，通过场电离读出技术监测态跃迁动力学。系统在常温下实现了约2 K的系统误差，验证了其作为无需校准的SI溯源初级温度标准的可行性。

利用蒸汽泡原子传感器实现黑体辐射测温的实用化



- 美国NIST团队在微型蒸汽泡中利用光学激发的铷原子实现测温，单秒不确定度为0.1%。证明了利用里德堡能级特性的量子温度计具备从大型实验室装置向紧凑型硬件转换的能力，在308 K至344 K范围内分辨率达到0.04%。



金刚石NV色心驱动自旋阵列向感算一体化跨越

固态自旋体系凭借出色的空间分辨率，正从单点测温向高像素阵列成像演进。技术趋势在于将量子感知与感内计算架构融合，利用金刚石NV色心零场分裂与温度的线性关系进行并行处理。这种集成架构规避了海量数据传输导致的延迟，为高功耗器件、生物医疗领域的瞬态热管理提供了高速且低功耗的智能化解决方案。

金刚石NV色心阵列实现感算一体化超快温度感知



- 中北大学与中国科学院团队利用金刚石NV色心阵列结合矩阵矢量运算架构，实现了温度传感与实时处理的集成。系统单次检测延迟缩短至196.8 μ s，展示了量子传感在高速智能温控与瞬态热场识别领域的应用潜力。



超导量子比特攻克毫开尔文温区下的芯片在线监测

针对量子计算与低温物理实验中极低温温控的瓶颈，利用超导量子比特作为感测单元已成为主流。超导量子温度计可直接集成在超导电路芯片上，通过分析能级占据率的玻尔兹曼分布实时获取有效温度。目前的演进重点在于利用相干控制与色散读出技术，在20 mK至300 mK的极低温度区间内实现原位探测。这对于理解量子比特与复杂多热源环境的热化机制、优化制冷架构具有重要的工程意义。

基于超导量子比特的极低温原位测温技术




- 芬兰阿尔托大学研究利用Transmon量子比特的前三个能级占据率分布，实现了20 mK至300 mK范围内的原位测温。通过 π 脉冲序列与色散读出，该技术成功揭示了量子比特的热化动力学过程，为超导量子芯片提供了高灵敏度的在线监测方案。


▶ 产品：技术优势显著，但仍处于实验室阶段


目前，量子温度计仍处于实验室研究阶段，尚未实现商业化应用。尽管量子传感器在提高空间分辨率方面优势显著，能够实现比传统传感器更精确的微观尺度温度测量，但市面上采用量子精密测量技术进行温度测量的产品极为稀少，专注于该领域的研发和生产企业也相对较少。

▶ 应用：量子温度测量可用于量子计算芯片管理与生命科学微观分析

量子温度传感技术利用其纳米级的空间分辨率以及出色的生物亲和性，可以将热力学监测从宏观表征推向分子与细胞层级，为生命组学、半导体研发及精密能源领域提供核心数据。

 **生命科学与生物医学领域：**由于量子温度传感器（如纳米金刚石NV色心）的体积微小且具备生物安全性，它能够被植入活体细胞内部进行原位监测。这使得科研人员可以捕捉细胞代谢、基因表达或药物反应过程中产生的微小热量波动，揭示热力学特性对生物化学反应的深层影响。在热敏感药物筛选、肿瘤热疗监控以及单细胞动力学研究中具有不可替代的作用。


 **量子芯片与纳米材料热管理领域：**随着微纳加工工艺接近物理极限，芯片内部的局部过热已成为制约性能的关键。量子温度传感器通过达到微开尔文级别的灵敏度，可以精确识别量子计算芯片在高速运算时的温度分布，通过实时监控芯片表面的热点演化动态，保障超导或半导体量子比特运行环境的稳定性。此外，在纳米新材料的合成与性能优化过程中，该技术能够提供精确的界面热传导数据，指导材料结构的设计方向。

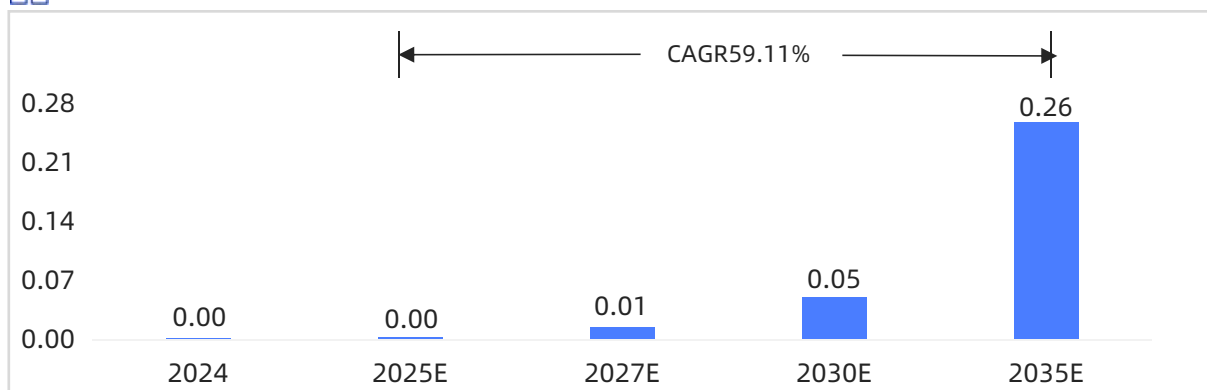
 **能源科学与工业精密监测领域：**在高功率密度电池循环、新型光伏电池光电转化效率分析等场景下，局部温度梯度直接关系到能量损耗及安全寿命。量子温度测量平台可以实现在强干扰、空间受限环境下的高频采样，为能源设备的优化设计提供精确的物理场参照图。

▶ 市场：市场尚处于初步探索阶段，发展潜力有待挖掘

量子温度测量领域目前正处于市场初步探索的萌芽阶段，中短期内难以实现显著的市场规模扩张。

然而，随着量子技术的迅猛进步与下游应用领域需求的日益增长，量子温度传感器的性能将得到显著提升。预计2035年全球量子温度传感产业规模将达到2.6亿美元，2025-2035年复合年均增长率59.11%。


 图表 全球量子温度测量领域产业规模（2024-2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

当前市场竞争格局尚未确立主导企业，中国、日本、韩国等亚太国家在实验室阶段具备一定的先发优势。基于金刚石NV色心的多物理量传感器是目前微纳尺度温度与多场成像的研发重点，例如扫描NV探针显微镜。该类设备能够同步采集表面磁场、电场及温度分布，有效解决了微观尺度下探测维度单一的限制，为微电子器件失效分析及超导量子计算热管理提供了关键技术支撑。

在应用市场结构中，科学研究领域一直是主要应用领域，2035年市场规模预计0.52亿美元，主要服务于微纳尺度的极端物理实验和生物单细胞测温。工业领域市场规模预计0.26亿美元，侧重于评估极端工况下电子元件的热敏感性。民用及生物医学领域受限于现阶段昂贵的系统集成与维护成本，仍处于应用场景验证阶段，大规模商业普及尚需时日。

 图表 全球量子温度测量下游应用规模（2030E & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

06

软件算法平台：
支撑多物理量感知与噪声抑制

▶ AI与量子传感器深度融合，显著提升提升系统的环境鲁棒性

在量子精密测量领域，软件与算法的核心作用已不再局限于数据后期处理，而是深度参与到量子态的实时控制与噪声抑制中。量子传感器的灵敏度极易受到环境磁场、热噪声及振动的干扰，传统的物理屏蔽手段往往受限于载荷空间和成本。

2025年，通过AI与量子控制算法的深度融合，系统能够实时识别并补偿环境噪声，使传感器在复杂多变的动态环境中保持理论极限级别的灵敏度。特别是在量子相位测量和薄弱信号重构方面，算法的进步让NISQ（中等规模相干量子）时代的硬件提前具备了在恶劣工况下工作的能力。

将算法与硬件协同优化，使得在无需硬件升级的前提下大幅提升系统的探测带宽与动态范围，对于航空航天导航、生物医学微弱磁场识别等场景极具工程价值。

变分量子算法通过自适应控制框架优化相位传感

Danmarks
Tekniske
Universitet



TU Delft
Delft University of Technology



- 丹麦技术大学等提出一种结合梯度下降与贝叶斯优化的混合变分算法（VQA）。通过协同优化，成功识别出能够抵御特定环境噪声的理论最优探测方案，展现了在处理非理想、复杂噪声环境下的极强自适应纠偏能力。

扩展卡尔曼滤波实现原子磁力计实时量子误差抑制



- 华沙大学与波兰科学院 开发出集成扩展卡尔曼滤波（EKF）与线性二次调节器（LQR）的反馈控制系统。该算法能够实时预测原子磁力计的估计误差并自动执行控制反馈，使原子系综自主维持在自旋挤压态，实现了动态环境下的实时量子增强。

跨维度贝叶斯方法实现自旋缺陷环境高通量表征



- 芝加哥大学与阿贡实验室开发出一套基于跨维度贝叶斯推理的计算工具。该工具能从稀疏且多噪的相干数据中，鲁棒地反演还原出半导体自旋缺陷周边环境（自旋浴）的原子位置与超精细耦合分布，解决了量子探测中的病态逆问题，为自旋缺陷的数字孪生研究奠定了基础。

▶ 平台化与软件定义架构加速量子传感迈入工程化商用阶段

量子传感技术正逐步脱离对单一实验载体和人工调优的依赖，向标准化程度更高的商用组件演进。软件定义量子传感器的理念通过核心软件控制层屏蔽了底层物理过程的复杂性，使得非量子专业的工程人员能够通过应用层接口直接定义测量功能。这种模式解决了科研装置与工业产品之间的衔接难题，显著降低了量子精密测量系统在不同应用场景下的部署成本。

平台化发展的意义在于建立了从仿真模型到实地部署的全链路支撑体系。在海洋钻探、长航时导航及智慧农业等领域，软件平台将复杂的量子测量信号转化为标准的位置参数或理化指标。随着地磁特征库比对算法与高保真数值模拟平台的成熟，量子传感技术正在由专业科研仪器转变为具备互换性的商用传感器模块。

AQNav磁力导航平台实现商业航空性能验证



- SandboxAQ在与空客子公司Acubed的合作完成了跨越全美200个机场、累计超过150小时的实测。AQNav通过大规模定量模型（LQM）过滤飞机干扰，在无卫星信号环境下实现了优于74米的定位精度，满足商业航空的所需导航性能标准。

Q-CTRL软件加固重力导航平台成功完成海军实测



- Q-CTRL与澳大利亚皇家海军合作展示了针对导航开发的软件加固量子感测技术。该平台的核心是一套量子双重重力仪（Quantum dual gravimeter），在海军MV Sycamore号舰艇的实测中，该系统在强震动环境下连续自主运行144小时。

Classiq农业量子平台推动精准农业生产跨域



- Classiq与Florence Quantum Lab达成战略合作，将高抽象量子软件开发平台引入精准农业领域。该平台整合了先进的量子增强型生物传感器，利用AI-量子混合算法对土壤微生物交互、养分路径及复杂的生态系统进行建模。这套系统能实时提供高精度的土壤健康诊断，将量子测量数据转化为肥料输送优化建议，为保障粮食安全提供了全新的数字化底座。

A dark blue background featuring a stylized globe with a grid overlay. A robotic hand is visible in the lower right, pointing towards the globe. The number '07' is prominently displayed in white on the left side.

07

全球主要国家地区
政策环境、供应商分析

目录 07

全球主要国家政策环境、供应商分析

01 美国

02 中国

03 欧洲

01

美国

► 政策：美国量子政策以国防需求带动技术落地

美国自2018年提出《国家量子倡议法案》以来，持续加大在量子领域的政策支持与资金投入，逐步形成高密度的政策体系。

2025年，美国发布了12项国家级量子相关政策，分别与英国、日本、韩国达成《科技繁荣协议》，深化量子等前沿技术领域的合作；12月，美国国防部将“量子与战场信息优势”列为六大关键技术领域之一，用于支撑未来作战能力体系建设。

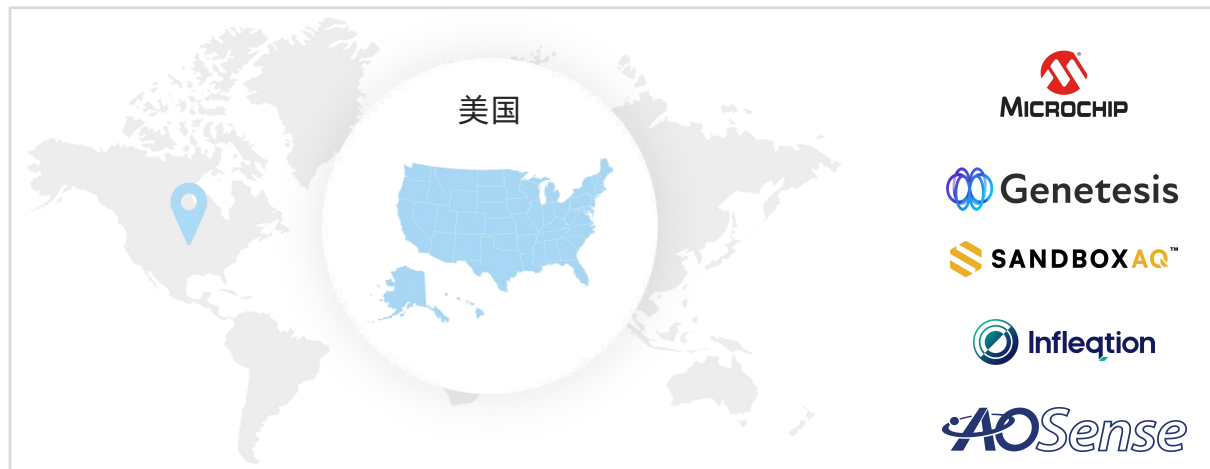
在具体推进路径上，美国形成了由国防需求牵引的技术转化机制。以量子传感为例，相关技术通常通过国防部及DARPA项目进入早期验证阶段，在试点应用中完成性能评估与系统集成，随后逐步转入规模化采购。这一“研发资助—原型验证—批量采购”的路径，使企业能够在技术尚未完全成熟阶段即获得稳定订单来源，加速产品工程化与产业化进程。

与此同时，美国在推动技术发展的同时，通过出口管制等制度手段对关键量子技术进行限制，强化其在全球产业链中的主导地位。整体来看，美国量子政策呈现出以国防需求为牵引、以政府采购为支撑，并辅以国际合作与技术管控的体系化推进模式。

量子科技已逐步从科学研究延伸至国家安全与战略竞争领域，通过量子通信、量子传感与量子计算等技术路径，提升信息获取、处理与决策能力，并在复杂环境下形成新的技术优势。

▶ 美国代表性厂商：在时频、重力与磁传感领域已形成完整产业梯队与成熟商业化体系

图表 美国量子传感代表性厂商



ICV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2



Infleqtion公司是一家全球领先的量子技术系统开发商，业务领域涉及量子组件、量子计算机、量子软件和量子传感器等。

2025年10月，Infleqtion与英国皇家海军及MSubs合作完成全球首次量子光学原子钟水下应用。Tiqker型原子钟在Excalibur自动驾驶潜艇测试台上通过了实地验证，证明了量子计时技术在水底隔绝环境下的稳定性和实战部署潜力。



SandboxAQ专注于为客户提供融合量子技术与人工智能的创新解决方案，研究领域前沿且高度专业化。

2024年，SandboxAQ推出了全球首个AI和量子驱动的商业实时导航系统——AQNav。2025年7月，SandboxAQ与Acubed完成了超过150小时的MagNav航磁导航飞行测试，验证了AQNav在真实飞行场景中满足航空导航性能标准；同年11月，SandboxAQ加入美国国防部创新单位DIU的量子传感转化计划，以推进MagNav技术的军事级开发与测试。



Genetesis是一家美国医疗技术服务商，专注于重新定义心肌缺血和冠状动脉疾病检测方式的医学影像。

公司拥有领先的高科技成像技术，其心脏成像平台于2019年成功获得FDA 510(k)认证，成为全球首个获得监管批准并投入商业应用的基于OPM的MCG系统。同时，Genetesis积极构建开放的量子生态体系，与众多研究机构及企业展开深度合作，共同推动量子技术的创新发展。



公司成立于2004年，深耕于精密导航、时间和频率标准、重力测量领域，是原子光学传感器的领先开发商和制造商。

公司所提供的产品主要包括陀螺仪、加速度计、惯性测量单元（IMU）、重力仪、重力梯度仪和原子频率标准等，产品体系丰富。公司为美国国防部、DARPA、空军、陆军、海军、NASA、NSF、DTRA等的众多政府资助项目研发了最先进的冷原子技术。



公司成立于1989年，是智能、互联和安全嵌入式控制解决方案的领先供应商，产品体系丰富，其中，时钟和计时（Clock & Timing）领域产品——芯片级原子钟（CASC）于2011年推出，是世界上第一个商用芯片级原子钟。

2025年，Microchip推出TimeProvider®4500 v3主时钟（TP4500），支持在最长800公里的长距离光传输链路中实现亚纳秒级时间分发精度。

02

中国

► 政策：中国“十五五”规划将量子科技明确提升至国家未来产业的首位

2025年6月，《计量支撑产业新质生产力发展行动方案（2025—2030年）》提出面向量子通信、量子计算、量子精密测量高速发展的需求，开展量子传感、量子效应和量子调控关键技术研究，围绕时间频率、温度、磁场、电场、力学等物理量，攻克新一代计量基准量子化、计量标准小型化、量值传递扁平化等量子精密测量关键技术，研发量子计量基标准核心器件，提升深低温、强磁场、超高压等极端条件和复杂环境下的精密测量能力，选取典型领域开展示范应用。

2025年10月，中国《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》将量子科技明确提升至国家未来产业的首位，与生物制造、氢能等并列为新的经济增长点，这标志着中国量子科技发展已迎来政策驱动的战略机遇期，为实现高水平科技自立自强提供了坚实政策指引。

从“十三五”规划将量子通信技术首次纳入国家战略部署，奠定其基础发展基调，到“十四五”规划明确提出要加快发展量子信息等前沿技术，再至“十五五”规划将量子科技提升至国家未来产业首位，这一连贯的政策导向清晰勾勒出国家层面对量子科技发展的一脉相承与战略升级，体现了中国前瞻性布局的坚定决心和对该领域作为未来科技竞争制高点的深刻认知与持续投入。

▶ 中国代表性厂商：量子传感厂商呈现梯度分化，并在磁传感与重力领域具备了显著集群优势

图表 中国量子传感代表性厂商



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2



国盾量子主要从事量子通信、量子计算、量子精密测量产品的研发、生产和销售，并提供相关技术服务，是中国量子信息产业化的开拓者、实践者和引领者。

2025年，公司冷原子重力仪完成多台交付，应用于地质勘测、巨灾防范等场景；小型化单光子成像雷达初代产品完成定型，进入技术迭代与工程优化阶段；超远距单光子成像及低空目标探测成像系统完成多场景应用验证。组件方面，公司已具备焦平面单光子阵列器件的全面性能标定与测试能力。深度制冷自由运行单光子探测器、自由运行单光子探测器持续向高校及科研院所供货，支撑科研仪器与超远距探测等应用。



未磁科技成立于2020年，是全球极少拥有量子精密磁场测量底层技术、心磁图仪、及脑磁图仪的量子科技准独角兽企业。公司实现了底层技术和核心器件的完全自主可控，并瞄准心、脑重大疾病精准诊断和脑科学领域进行商业应用落地，率先成功研制了完全自主知识产权的心磁图仪、脑磁图仪等高端医疗影像器械，成为全球同时获批无液氦脑磁图仪和心磁图仪上市的创新企业。

未磁科技在高端无创磁成像领域成果显著：全球首款256通道无液氦脑磁图仪 Marvel MEG Pro 及心磁图仪 Miracle MCG Pro 系列多个型号获得中国国家医疗器械注册证，且已在近40家医院装机使用并开展深入临床合作。



国仪量子成立于2016年，是全球少数具备顺磁共振、核磁共振、光探测磁共振技术产品研发、制造和服务等完备能力的厂商之一。核心技术是以量子精密测量为代表的先进测量技术，为全球范围内企业、政府、研究机构提供以增强型量子传感器为代表的核心关键器件、用于分析测试的科学仪器装备、赋能行业应用的核心技术解决方案等优质的产品和服务。

其产品线包括众多基于量子效应的检测与分析装备，如量子钻石单自旋谱仪、微波场强仪、宽场NV显微镜、扫描NV探针显微镜、量子自旋磁力仪等。



中科酷原是同时具备原子量子计算和量子精密测量研发和产业化能力的公司，是中国最早开始中性原子量子技术研究的团队之一。2010年，公司团队研制出了中国首台原子重力仪，并于2024年实现了国际上首次量子重力梯度仪的商业交付。

2025年，中科酷原的量子重力测量产品在多个关键应用场景中得到验证。其海洋原子重力仪WCAG-M5-2圆满完成两百余天远海测量及海南找矿项目测评；高精度重力仪WAG-H5-2通过国家地震局观测比对。基于此，公司成功入围2025年国家“量子绝对重力仪”揭榜挂帅项目。



国盛量子是中国首家专注量子工业测量的国家级高新技术企业。基于量子金刚石传感技术，公司开发了量子磁力仪、量子电流测量装置、量子无损检测装置、量子半导体检测装置等产品，为能源电力、精密加工、半导体检测等领域提供了优质的解决方案，产品性能达到中国领先水平。

2022年，国盛量子与国网安徽联合研发的世界首台量子电流互感器挂网运行。2023年，与中国科学技术大学编制发布了中国首个量子测量地方技术标准——《固态自旋量子磁力测量技术性能表征》。25年，国盛量子自主研发并生产的金刚石量子磁力仪产品首次实现交付，成为中国首个可商用的金刚石量子磁力仪。



山东国耀量子成立于2017年，依托中国科学技术大学技术，融合近红外量子探测与激光雷达技术，主营颗粒物光量子雷达、能见度光量子雷达、高分辨测风激光雷达等产品，应用于大气监测、气象环保、智慧交通等领域。

2025年，国耀量子自主研发的能见度光量子激光雷达成功获得中国《气象专用技术装备使用许可证》。同年，中国国家标准《颗粒物光量子雷达技术规范》立项，山东国耀量子将作为该标准的主要起草单位之一，参与技术标准的制定工作。



微伽量子成立于2018年，是一家专注于高精度量子精密测量仪器研发、制造和服务的高新技术企业。公司率先实现商用高精度绝对重力仪的国产化并积极开展应用示范，为地震研究、资源勘探、地质调查、计量测绘等领域提供精密重力测量仪器与服务。



昆迈医疗成立于2019年，专注于原子磁力计（OPM/光泵磁力计）量子弱磁场传感的研究，突破了传统超导SQUID腹冷磁力计对液氦和大型磁屏蔽室的依赖，致力于推动高灵敏度磁成像在临床和科研中的应用落地，已累计获得10个科研与临床商业化装机订单。

2024年5月，昆迈医疗自主研发和生产的创新医疗器械产品“脑磁图系统”在北京获批上市，是全球首个临床获批的无液氦脑磁图系统。2025年8月，昆迈医疗推出高密度临床无液氦脑磁图系统PyraMag Epoch 96，在探测精度等多个关键指标上实现突破性提升，全面满足科研与临床高阶应用需求。



国器传感成立于2023年，是一家专注于量子精密测量系统研发、生产及系统方案应用的新兴科技企业。

公司产品覆盖多通道阵列式SERF原子磁强计，以及高性能碱金属气室、多通道精密分光系统、高精度电控系统等核心部件。其中推出的双轴磁强计系统是针对当前磁场测量技术在多轴同步、高通道集成与实时处理等方面的局限而研制的高性能磁测平台。产品具备优异的极弱磁检测能力，推动了多轴多通道磁测技术向更高空间分辨率、更完整方向信息及更强实时性的方向发展，有望为工业、医疗、科研及国防领域提供更为强大的磁场测量与成像工具。



量科芯国成立于2019年，专注于量子精密测量领域，从事面向微纳/低轨卫星应用的星载小型原子钟、系列小型原子磁强计、里德堡量子天线等量子传感器的研发和生产，瞄准低轨卫星时空基准、水下目标探测、磁异常探测、磁导航定位、水雷磁引信、鱼雷磁制导、里德堡量子雷达、里德堡量子通信及等应用产品与相关技术服务及解决方案。

2025年4月，搭载武汉量科芯国研发的星载原子钟设备的卫星互联网技术试验卫星发射升空，用于开展低轨卫星低成本、高精度时频基准建立及星间时间同步在轨试验，探索其在导航增强与低轨通信中的应用效能。

03

欧洲

▶ 政策：欧洲量子政策以产业推进与技术管控并行

2025年7月，欧盟发布了《量子欧洲战略：变化世界中的量子欧洲》，提出在量子研究、量子基础设施建设、产业生态体系发展、军民和太空技术融合以及人才培养等方面采取系统性措施，目标是到2030年提升欧洲在量子技术领域的整体能力。该战略强调增强科研与产业之间的衔接，支持初创企业成长，并推动科研成果向应用转化。

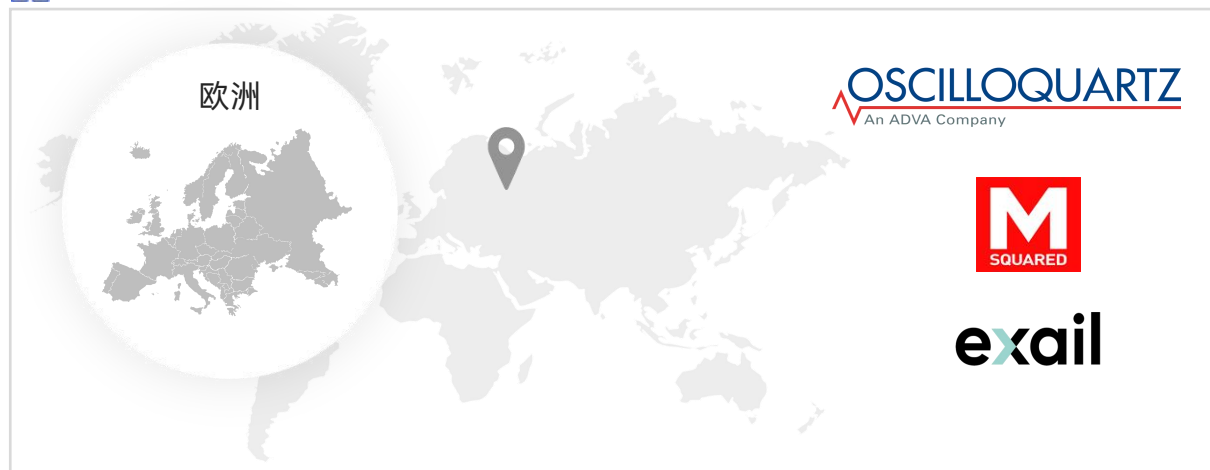
2025年9月，欧盟委员会将量子计算机、低温电子元件、参数信号放大器和低温冷却系统等技术纳入《欧盟军民两用物项出口管制清单》（EU 2021/821附件一）。这一规定适用于与量子技术相关的硬件设备和关键组件，在整个欧盟范围内实施统一管理，旨在规范出口流程，保障供应链安全，维护欧盟在全球竞争中的公平环境。

与此同时，英国依托国家量子技术计划推进产业化进程，并通过与美国、日本等国家的合作机制加强国际协同研发与技术转化能力。

从总体上看，欧洲在量子技术领域的政策一方面通过欧盟层面的统一战略和监管框架推动科研与产业发展，另一方面由英国等国家通过国家项目与国际合作补充推进，整体形成以产业转化与技术安全并行的政策体系。

▶ 欧洲代表性厂商：量子传感产业加速整合，向稳健发展转型

图表 欧洲量子传感代表性厂商



iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2



公司成立于1949年专注于频率基准、原子钟、GNSS 时钟及网络同步解决方案的研发和制造，产品应用于 生物医学成像、激光雷达、量子传感等领域。2014年，Oscilloquartz被德国通信设备厂商ADVA Optical Networking收购，随后随着ADVA与Adtran合并，成为Adtran旗下的核心时频品牌，持续提供高稳定性的铯原子钟、精密同步设备及整体解决方案。

2025年8月，澳大利亚国防科学与技术集团（DSTG）选用了Oscilloquartz的高性能光泵铯原子钟（OSA 3300 HP）作为其定位导航与授时（PNT）研究的时间频率参考。



M Squared 成立于2005年，是英国国家量子技术计划（NQTP）的长期核心供应商，曾被视为冷原子传感和光学原子钟领域不可或缺的上游支柱。然而，2025年8月，该公司因资不抵债进入行政托管程序，导致全球多个高精度量子传感项目的超稳激光器供应中断。其资产和知识产权最终被出售给由其前高管组建的新实体 Novacene Photonics。

The logo for Exail, featuring the word "exail" in a bold, lowercase sans-serif font. The "x" is a light blue color, while the other letters are black.

Exail收购iXblue并融合ECA Group技术，打造了新品牌。其量子重力仪在多领域应用中性能卓越，测量精度达 10^{-8} m/s^2 。公司还推出智能激光系统等产品，并与顶尖学术实验室合作研发下一代量子技术。

2025年12月，Exail成功向加那利群岛火山研究所交付了三台绝对量子重力仪（AQG）。Exail通过整合光纤惯导与冷原子重力传感技术，已在海军与深海监测领域建立起稳固的商业壁垒，成为欧洲少数具备正向盈利能力且能大规模交付工业载荷的量子传感领军企业。

08

投融资分析

目录

08

投融资分析

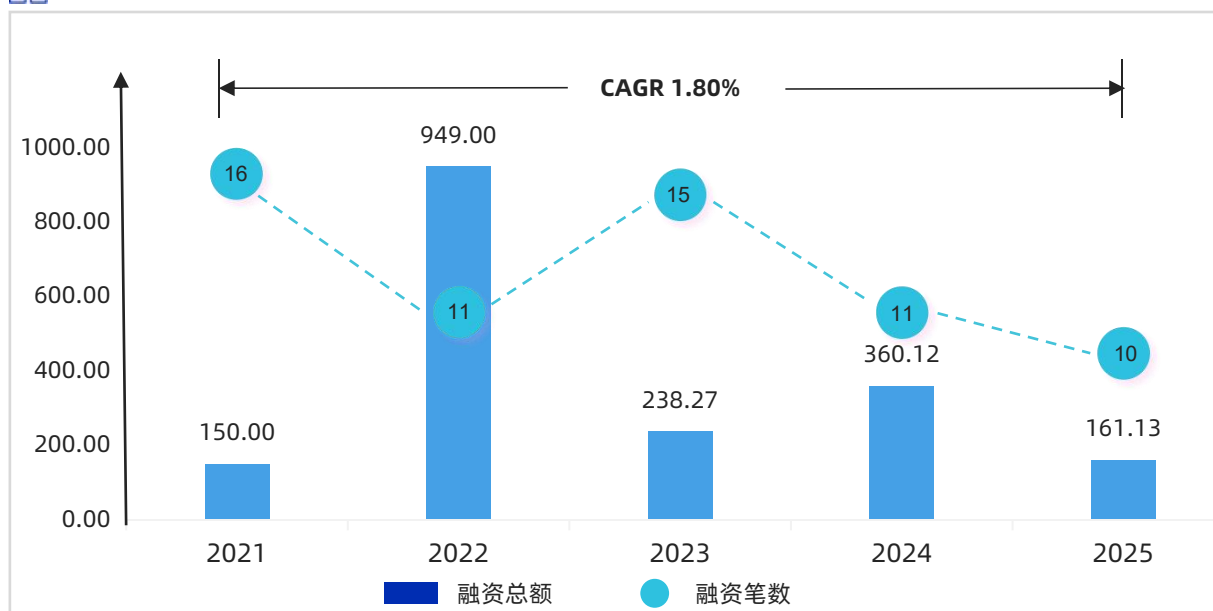
- 01 投资回归理性，资金向头部领军企业集中
- 02 美中两地领跑投融资市场，美国金额领先，中国表现活跃
- 03 融资轮次向中后期推移，大额融资占据主力
- 04 中性原子技术路径领跑市场，固态自旋展现稳健潜力

01 投资回归理性，资金向头部领军企业集中

2025年，全球量子传感领域的资本投向出现结构性变化。全年融资总额为1.61亿美元，较2024年的3.60亿美元下降约55.2%。2021至2025年的五年复合增长率降至1.8%，较2021至2024年期间的33.9%回落32.1个百分点。

融资额下降的直接原因是早期风险投资收缩，更深层因素则在于退出渠道的结构性变化：主要资本市场IPO窗口收紧，并购成为重要退出路径，军工订单正逐步替代部分早期融资功能。在此背景下，资本更青睐具备订单能力或可嵌入大系统集成团队，而非仅依赖技术概念的初创项目。

图表 2021-2025年全球量子传感领域融资总额与笔数（单位：百万美元，笔）



ICV TA&K | 2026.2

注释：本次统计对未公开具体融资金额的公司进行了数额估计。

从资本偏好看，两类企业获得资金的逻辑明显分化：一类是平台型企业，通过构建底层通用能力（如原子钟核心模块、芯片化传感单元），获得产业资本和战略融资支持，验证路径以标杆订单和生态合作为主；另一类是垂直场景型企业，聚焦油气勘探、电网同步、医疗诊断等细分领域，依赖试点项目、行业认证和渠道合作来验证商业可行性，融资规模相对较小但落地路径清晰。

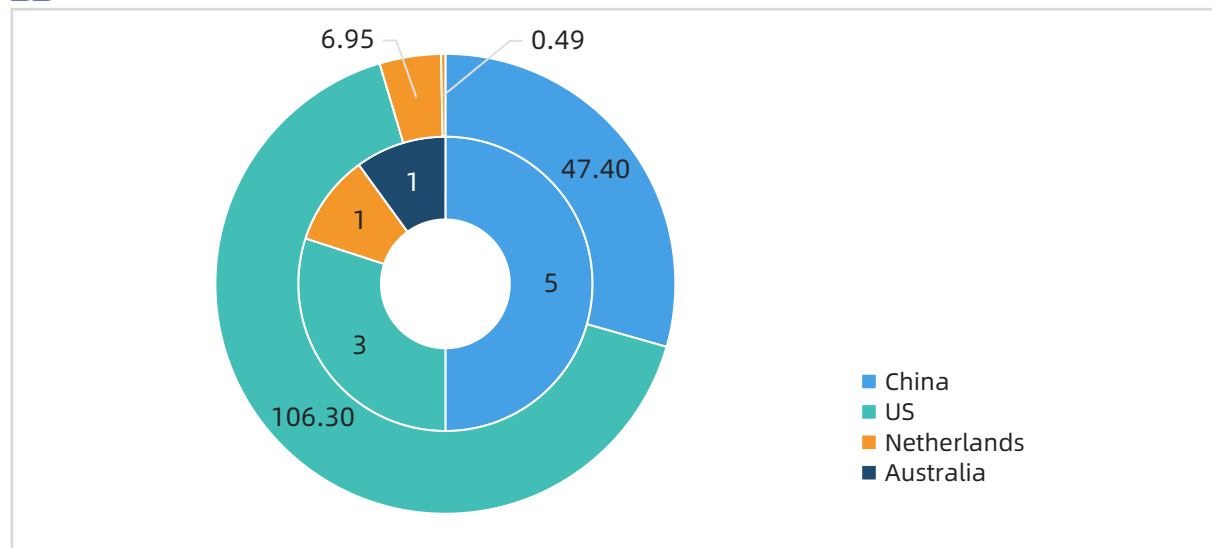
融资重心呈现出向头部企业集聚的特征。资金正加速流向拥有明确商业化节点、专利保护体系及成熟工程团队的企业。以2025年Inflection获得的大额融资为例，这种大规模资金向少数项目集中的现象表明，在市场全面爆发前，资本更倾向于投资具备行业领军潜力的稳健型企业，力求在未来量子技术渗透进单细胞检测、电网同步及资源探勘等潜力市场时，通过这些核心企业占据产业主导地位。

02

美中两地领跑投融资市场， 美国金额领先，中国表现活跃

全球量子精密测量领域的投融资分布呈现出高度集中的双极化特征。2025年，美国与中国作为技术高地，吸引了全球绝大部分资金，但在资金性质与表现形式上存在显著差异。

图表 2025年各国量子精密测量领域企业融资情况（单位：百万美元，笔）



iCV TA&K | 2026.2

注释：本次统计对未公开具体融资金额的公司进行了数额估计；
内圈代表融资笔数，外圈代表融资金额。

从融资规模看，美国依然领跑全球，年度融资3次、总额1.06亿美元，单笔平均融资强度位居首位。资金来源以国防预算与战略资本为主，订单与股权深度绑定，企业更早进入军工及政府项目采购体系，技术迭代与交付同步推进。

中国市场投资活跃度较强，融资5次、总额0.47亿美元，频率全球居首。但单笔规模偏小、多处于早期轮次，呈“高频次、低单笔、偏早期”特征，资本以分散布局为主。资金来源以产业基金和地方国资为主，侧重区域产业链协同，企业商业化更多依赖地方政府订单及行业试点验证。

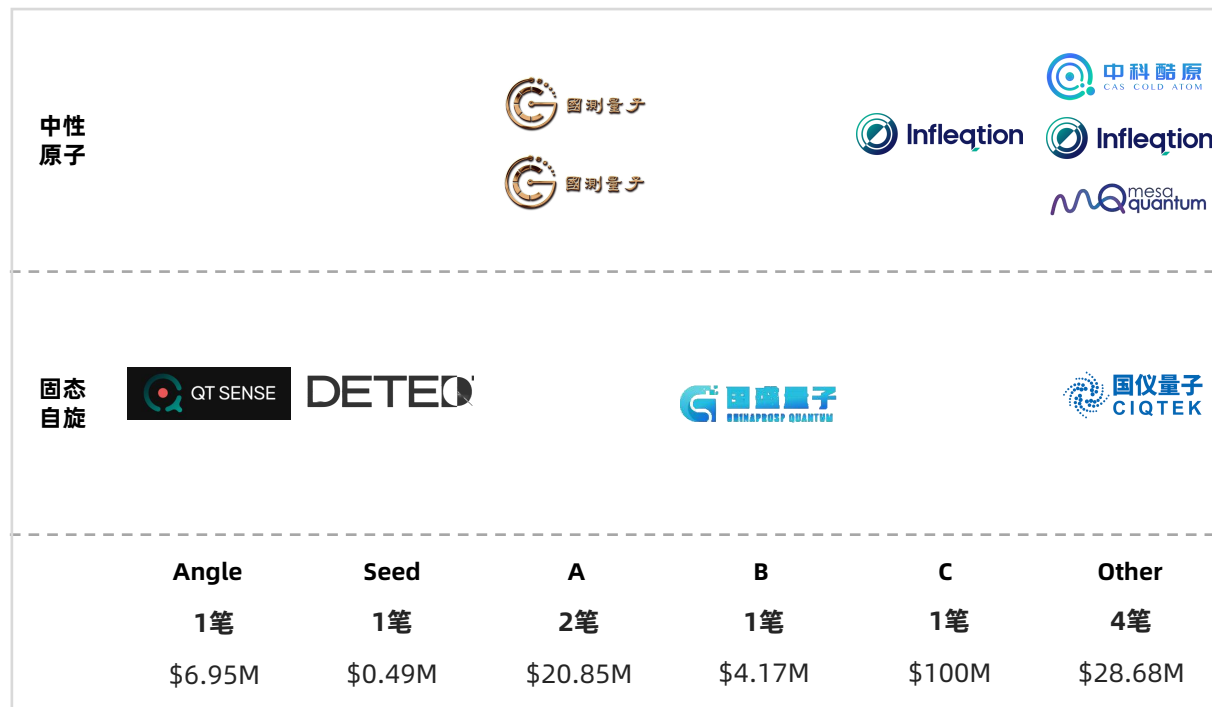
相比之下，全球其他区域仍处于单点突破状态。2025年，荷兰与澳大利亚分别在各自优势领域实现融资，其中荷兰企业融资约695万美元，澳大利亚企业融资约48.5万美元。虽然新兴区域的加入预示着技术萌芽正在向更多科技节点渗透，但整体资金规模仍难以与中美双极抗衡，全球量子精密测量领域的资金集聚效应愈发显著。

03

融资轮次向中后期推移，
大额融资占据主力

2025年量子精密测量领域获得融资企业按技术路径主要分为两大类：中性原子与固态自旋。此外，本次数据统计，将A+合并至A轮；天使轮、前种子轮合并至种子轮；Pre-IPO与风险投资等融资类别合并为其他。

 图表 2025年全球量子精密测量领域公司融资概览



iCV TA&K | 2026.2

2025年全球量子精密测量领域融资呈现显著的中后期集中趋势。从轮次分布看，种子轮及之前轮次仅2笔、约744万美元，A轮、B轮及C轮均有企业覆盖，表明资本市场已跨越早期概念孵化阶段，开始向具备工程交付能力的成长性项目倾斜。

金额分布高度集中。Infleqtion单笔1亿美元C轮融资占全年总额约62%，另有4笔其他类融资合计约0.29亿美元。这说明在理性市场环境下，资本正从试探性布局转向重仓成熟项目，资金高度集中于具备明确商业化前景的企业。

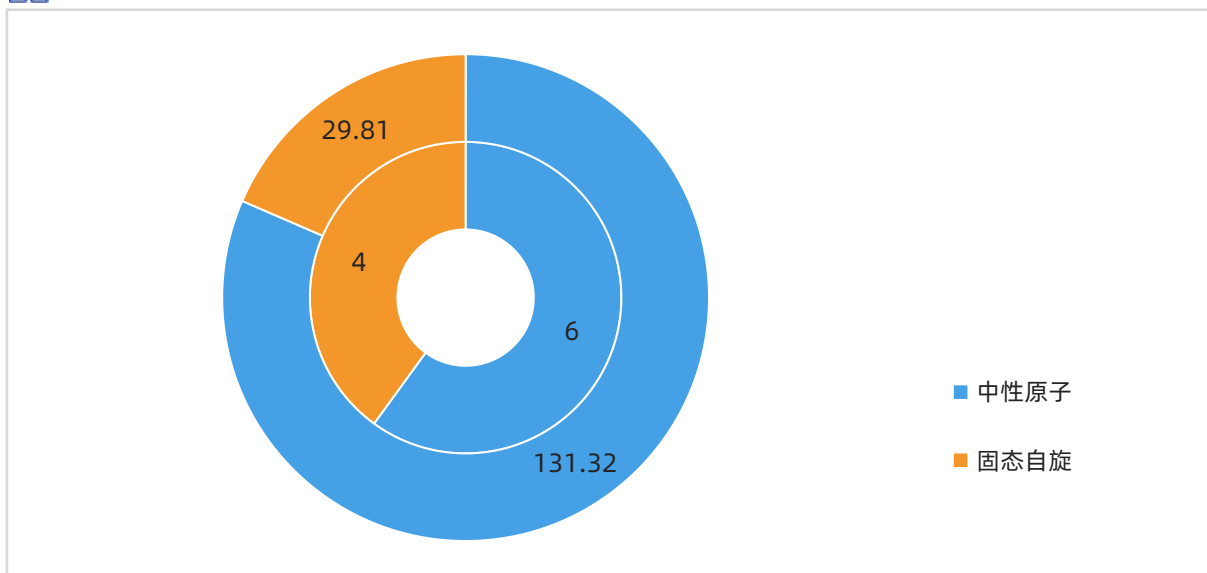
这一格局正在重塑产业生态：中小团队愈发依赖联合研发和订单维持运营，以订单替代融资成为常态；人才持续向具备工程交付能力的团队流动，供应链资源加速向核心厂商绑定。同时，并购作为技术整合通道逐步打开，2025年Vector Atomic被IonQ收购表明，部分具备技术特色但无力独立商业化的小团队，正通过被整合进入大企业生态的方式实现价值变现。

04

中性原子技术路径领跑市场，
固态自旋展现稳健潜力

在技术路径分布上，2025年的全球投融资活动主要聚焦于中性原子和固态自旋两大主流方向。

图表 2025年全球量子精密测量各技术路线融资分布（单位：百万美元，笔）



ICV TA&K | 2026.2

中性原子（冷原子、原子蒸气、里德堡原子）技术路径是当前资本市场的投入重点，在融资频次与金额上均占据领先地位。2025年共有4家相关企业获得融资，涵盖了国测量子、Inflection、中科酷原以及Mesa Quantum。该路径年度融资金额达到1.31亿美元，占据市场主要份额。授时与导航等领域的刚需属性是资本持续关注的核心驱动力，冷原子干涉与原子蒸气技术在精密计时及长时稳定传感方向展现出明确的应用前景。

固态自旋（金刚石NV色心）技术路径在产业化方面表现稳健。2025年该路径共有4家企业获得融资，包括QT Sense、DETEC、国盛量子以及国仪量子。尽管0.30亿美元的总融资规模低于中性原子路径，但两者的融资笔数相近。这种高频次、中等规模的融资特征，反映出固态自旋技术更偏向产品化迭代的演进逻辑——生物检测、材料科学等微观测量场景对传感器的小型化与集成度要求较高，商业化门槛相对较低，能够吸引更多聚焦于特定应用落地的资本。

The background features a dark, blue-toned laboratory or control room. In the center, a glowing, multi-layered cylindrical structure sits on a circular base, emitting a bright light. Surrounding it are various pieces of electronic equipment, including what appears to be a computer monitor, a control panel with buttons and a dial, and several network routers or servers with glowing lights and antennas. The overall atmosphere is high-tech and futuristic.

09

产业分析与预测

目录

09

产业分析与预测

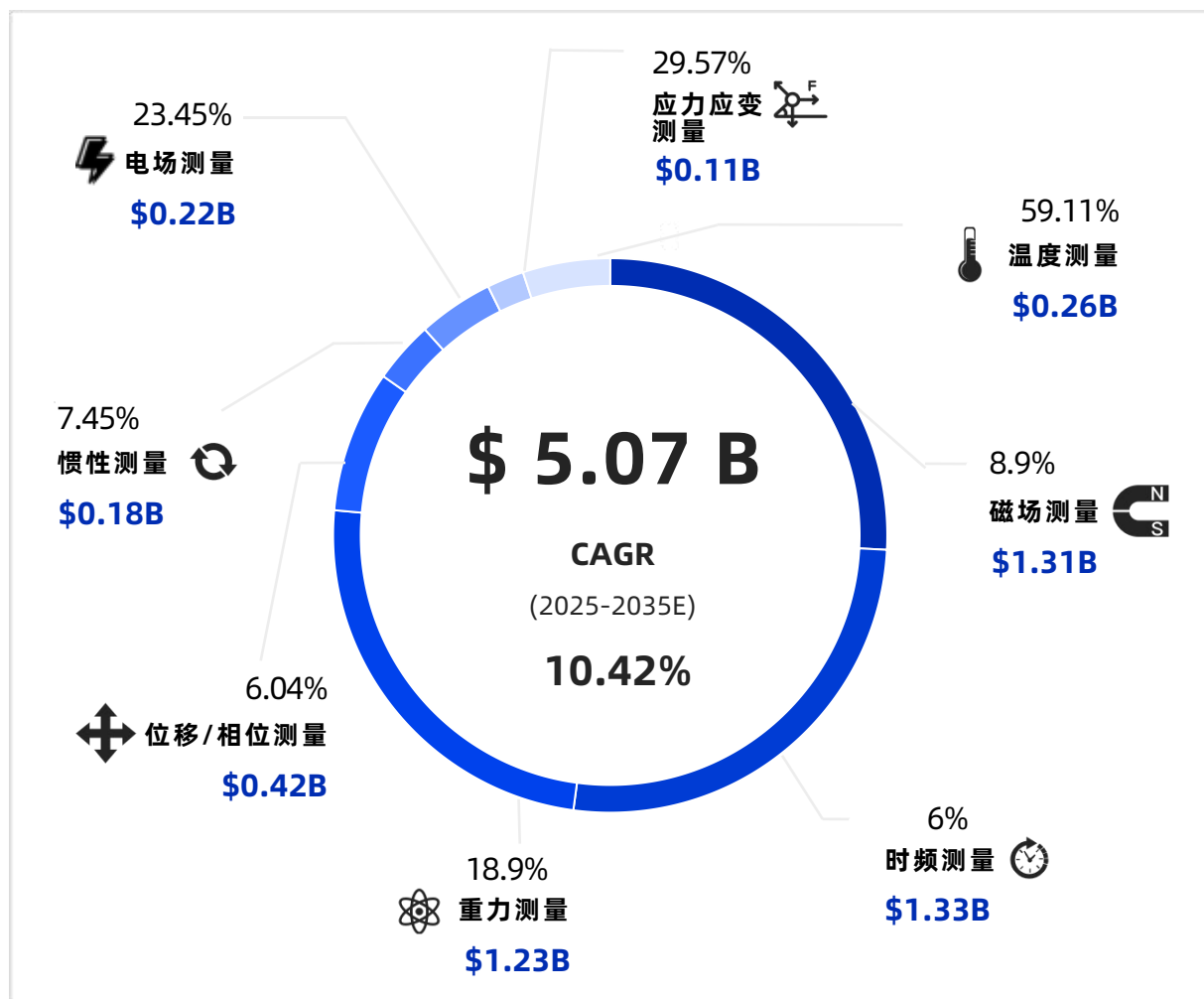
- 01 全球量子传感产业在产值结构不断优化的进程中实现整体扩容
- 02 从技术成熟到规模放量：量子传感的差异化路径
- 03 北美国防牵引维持主导，中国应用落地驱动份额跃升
- 04 民用化转型是实现规模效益的关键

01 全球量子传感产业在产值结构不断优化的进程中实现整体扩容

全球量子传感产值正处于显著的上升通道。全行业总规模预计将由2025年的18.8亿美元增长至2035年的50.7亿美元。在这十年间产值的年均复合增长率达到10.42%。数据表现出量子传感市场的增长动能正由早期少数领域支撑向全物理量覆盖转变。

时频测量与磁场测量目前的产值绝对值最高，是当前市场产出的主体。然而电场、应力应变、温度等新兴细分环节产值增长空间不可忽视。这种差异化的增速表现说明量子传感技术正在由实验室环境向工业应用深处下沉。高增长领域往往对应着传统测量手段难以解决的痛点。产值重心正随着技术成熟度的提升而不断扩散，最终驱动全产业链实现由点及面的规模化整体跨越。

图表 2035年全球量子传感产业规模预测（单位：十亿美元，%）

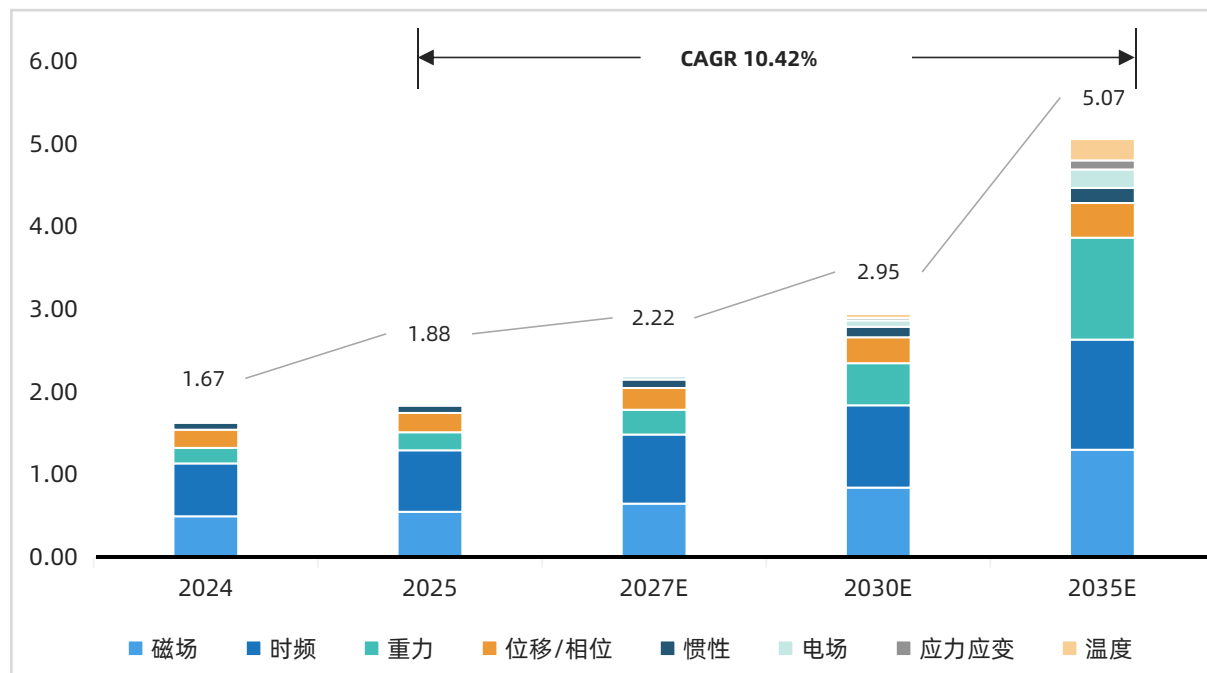


02

从技术成熟到规模放量：
量子传感的差异化路径


量子传感的各细分方向在技术成熟度上存在明显的代际差异，这种差异直接决定了各物理量测量的市场份额与增长节奏。


 图表 全球量子传感产业规模预测（2025-2035E）（单位：十亿美元）




iCV TA&K | 2026.2

量子传感的各细分方向在技术成熟度上存在明显代际差异，但技术成熟仅是放量前提，实际增长节奏还取决于成本曲线、行业标准及与现有系统的融合进度。

 时频测量作为通信同步和授时体系的基础，商用化程度较高，但受限于基础设施更换周期，增速平稳，预计2035年总产业规模达13.3亿美元。

 磁场测量在生物磁成像和国防领域应用深厚，2035年总产业规模预估为13.1亿美元。

 重力测量增长潜力强劲，预计2035年总产业规模达12.3亿美元。凭借长期无漂移和绝对测量优势，量子绝对重力仪正成为地质测量领域替代传统设备的先行者。

位移相位、惯性、电场、应力/应变及温度测量仍处于工程化验证早期阶段，当前市场规模较小。随着实验室原型向标准化工业载荷转化，这些方向有望实现数倍至数十倍增长。总体来看，未来市场放量的关键不再取决于极限性能，而在于成本控制、标准建立及系统级集成能力的突破。

03

北美国防牵引维持主导
中国应用落地驱动份额跃升

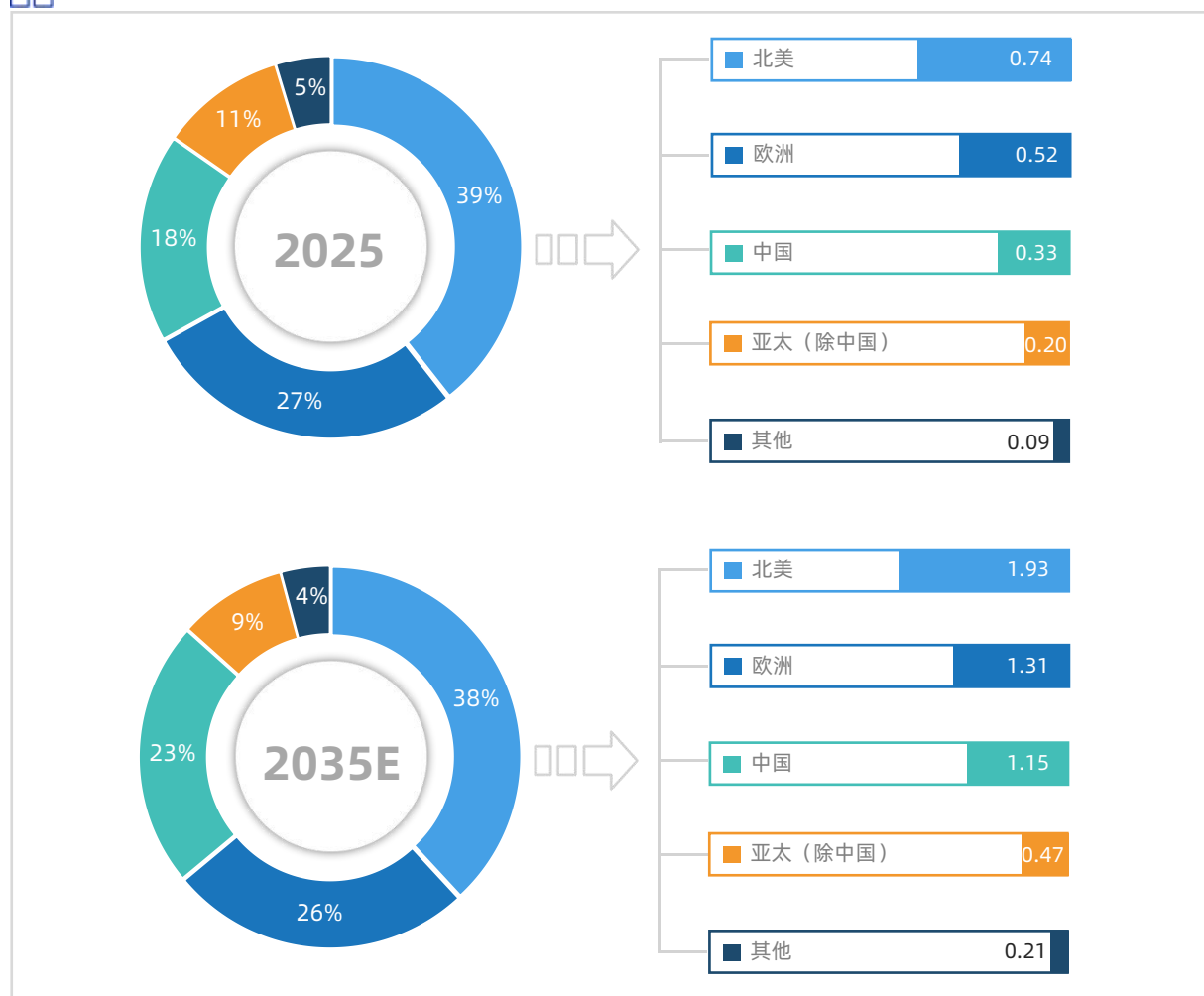
全球量子传感产业规模预计在2025年达到18.8亿美元。目前北美地区以39.42%的市场份额占据领先地位，欧洲占比为27.52%。中国市场的份额目前为17.73%，亚太其他区域和其他地区的占比分别是10.65%和4.67%。

预计到2035年全球量子传感产业规模将上升至50.7亿美元，意味着该行业在十年内的产值增幅接近2.7倍。伴随整体规模的扩张，中国市场的份额预计增长至22.68%，其扩张速度高于全球平均水平。北美地区虽然份额轻微下调至38.12%，但依然维持着全球最大的市场基数。欧洲份额也将调整为25.83%，而亚太其他地区和其他地区分别为9.21%和4.16%。

整体来看，北美侧重需求牵引与系统验证，欧洲强调科研与产业协同，中国则突出应用落地与规模推进，不同区域路径共同推动量子传感从实验室走向工程化。



图表 全球各地区量子传感产业规模（2025 & 2035E）（单位：%、十亿美元）




04

民用化转型是实现规模效益的关键

2025年量子传感的下游应用规模预计为6.7亿美元。军事国防领域以49.25%的占比占据市场主导，民用领域和科学研究分别占比26.06%和25.25%。预计到2035年下游应用规模将增长至18.5亿美元，民用领域占比将提升至32.65%，军事国防和科学研究则调整为43.21%和24.15%。

目前量子传感的市场需求高度集中于军事国防领域，典型应用包括复杂环境下的高精度自主导航。这些场景对测量精度要求极高且对成本不敏感，构成了行业早期的核心增长点。

相比之下民用市场起步较慢，整体规模受限。主要原因在于：现有传统传感器在手机导航、工业检测等大众化场景中已能提供足够精度，而量子传感目前仍面临系统体积大、价格高昂的工程瓶颈。更重要的是，民用化落地不仅取决于硬件成本，还受制于谁来集成、谁来维护、误差由谁担责等系统性问题。只有跨越成本、集成与责任边界三重门槛，量子传感才能真正融入智能驾驶、工业自动化等民用场景，释放规模化市场空间。

 图表 全球量子传感下游应用规模（2025 & 2035E）（单位：十亿美元）



ICV TA&K | 2026.2

The image features a futuristic cityscape with glowing blue buildings and a dark, high-tech background. The buildings are stylized and emit a bright blue light, contrasting with the dark, shadowy environment. The overall aesthetic is sleek and modern, suggesting advanced technology and urban development.

10

产业展望

目录

10 产业展望

- 01 产业驱动转向需求牵引与工程化落地
- 02 软件定义与算法补偿将重塑量子传感器工程路径
- 03 制造范式与供应链体系向工业化转型
- 04 技术规则演变为市场准入的核心门槛
- 05 量子导航奠定未来定位主权基础

01

产业驱动转向需求牵引与工程化落地

未来，量子传感产业的扶持方式将从以科研资助为主，转向以明确应用需求为导向的政府采购与工程化落地。

政策重点将由“支持技术研发”转向“获取可用能力”，政府更多以首位客户和最终用户身份，围绕国防安全、基础设施监测及资源勘探等场景提出明确性能要求并形成订单。

这一模式将成为企业跨越商业化“死亡谷”的关键路径。订单不仅提供初期收入与信用背书，更重要的是推动企业从实验室指标竞争转向真实环境下的工程问题，积累可靠性、环境适应性与系统集成能力，从而形成工程化壁垒。

与此同时，市场增长的核心驱动力也从单一性能提升转向工程可行性与系统能力建设，主要体现在：

1. 从性能极限转向性能-成本平衡：产业化的关键不再是极致灵敏度，而是能否在成本、功耗、可靠性与易用性上接近或优于传统高端传感器，实现规模化部署。

2. 从独立设备转向系统集成：量子传感器将逐步从独立仪器转变为系统中的关键模块，一方面嵌入量子计算与航空航天平台，另一方面融入自动驾驶、医疗影像与工业物联网等应用系统。

因此，民用高价值场景将成为工程化验证的重要阶段。这类应用对产品一致性、稳定性与总成本的要求更为严格，将反向推动技术成熟与产业链重构，进而决定量子传感市场能否实现规模化扩展。

02

软件定义与算法补偿 将重塑量子传感器工程路径

未来，量子传感器性能提升的核心驱动力，将从依赖极致的物理硬件指标，更多地向底层算法补偿与环境噪声抑制的软件能力转移。

通过机器学习与量子控制算法对动态磁场、振动及温度漂移进行实时建模与动态解耦，系统能够在非理想的工况下维持高精度测量。这种“软件定义”的范式，将有效降低传感器对物理硬件极致性能与极端环境控制裕量的依赖。

因此，量子传感器有望从高度定制化的实验室仪器，加速转化为更适应车载、船载及野外等动态复杂环境的标准工业载荷。然而，在追求极限绝对精度（如用于基础物理研究）或极端物理条件（如太空深冷、强辐射）的场景中，对硬件本征性能与受控物理环境的依赖仍不可替代。

03

制造模式与供应链体系向工业化转型

未来，量子传感产业突破成本与规模瓶颈的关键，在于从实验室小规模制造转向标准化生产与工程化体系建设，形成以规模制造与韧性供应链为基础的产业能力。

一方面，制造范式将沿着清晰路径演进：从原子气室、光子电路等关键元件的标准化量产，发展到可复用功能子系统（如原子干涉核心模块），并进一步与控制电路集成为面向不同应用的模块化整机平台。分立光学系统向集成光子芯片的转变，将显著提升一致性与可靠性并降低成本，使量子传感器逐步满足车载、无人机与工业物联网等对尺寸、功耗与成本敏感的应用需求。但对于SQUID等依赖极低温环境的系统，其制造与集成仍难完全纳入标准半导体工艺体系。

另一方面，供应链体系将由科研导向的定制模式转向具备工业韧性的成熟体系。其重点不再是单一供应替代，而是围绕关键材料替代、备件标准化以及交付与服务能力构建系统性保障。过去依赖少数技术型供应商的模式已显现脆弱性，英国M Squared在2025年进入破产管理并引发供应中断风险，促使系统集成商调整采购策略，订单逐步向具备量产能力与商业稳定性的企业集中。整体来看，供应链正从技术驱动的分散结构，转向以制造能力与长期交付能力为核心的稳固网络。

04

地缘政治重塑市场准入规则

未来，决定量子传感企业全球市场准入权的关键，将不仅是技术指标的先进性，更是在地缘政治逻辑下形成的技术标准与规则体系。国际标准、出口管制清单与多边“可信供应链”协议，正演变为比传统关税更高效的技术贸易壁垒，直接塑造全球市场的分割格局。

这一趋势已从构想步入实施阶段。2025年6月，七国集团（G7）在加拿大发布的《卡纳纳斯基斯量子技术未来共同愿景》，其核心便是在成员国间推动建立互认的技术标准、安全协议与可信供应链。这实质上构建了一个以“价值观”和“安全”为名的排他性技术联盟，将市场准入资格与地缘政治阵营深度绑定。

其结果是，全球量子产业很可能形成基于不同标准体系、供应链与互信机制的平行市场。企业，尤其是意图参与国际竞争的初创公司，将被迫在技术路线之外，更早地在战略层面做出“阵营选择”，并围绕所选市场的规则，构建技术自主、供应链可追溯的完整业务闭环。

这意味着，单纯的技术领先已不足以保障商业成功，深刻理解并适应目标市场的政治规则，将成为决定企业生存空间的核心能力。

05

量子导航奠定未来定位主权基础

面对日益复杂的地理空间安全环境，构建不依赖任何外部卫星信号的自主、高精度导航能力，已成为关乎未来国家技术主权与战略自主的核心议题。

基于量子精密测量的自主导航系统，本质上以惯性导航为核心框架，通过量子惯性测量单元（如冷原子干涉仪）提供高稳定度的加速度与角速度信息，并结合量子重力梯度仪与量子磁力计分别实现重力场指纹感知与地磁异常匹配，构建多物理量约束的导航体系，旨在形成内生于载体的绝对物理参考系。

这一技术范式不仅旨在应对信号拒止、欺骗干扰等传统威胁，其更深远的意义在于，它试图将国家关键资产（如战略核潜艇、远程航空器、核心通信网）的导航主权，从依赖脆弱的全球公共基础设施，重新锚定在国家自身可掌控的物理定律与地理信息数据库之上。

因此，量子自主导航的竞争，本质上是争夺未来战场与关键领域“位置定义权”的竞赛。率先实现并部署该体系的国家，将在深海、极地、地下等“导航盲区”获得非对称的行动优势，并为自身关键基础设施建立起一层独立、可靠且难以被剥夺的时空基准。这不仅是导航技术的升级，更是对未来安全边界与行动自由的根本性重新定义。

11

附件



目录


11
附件

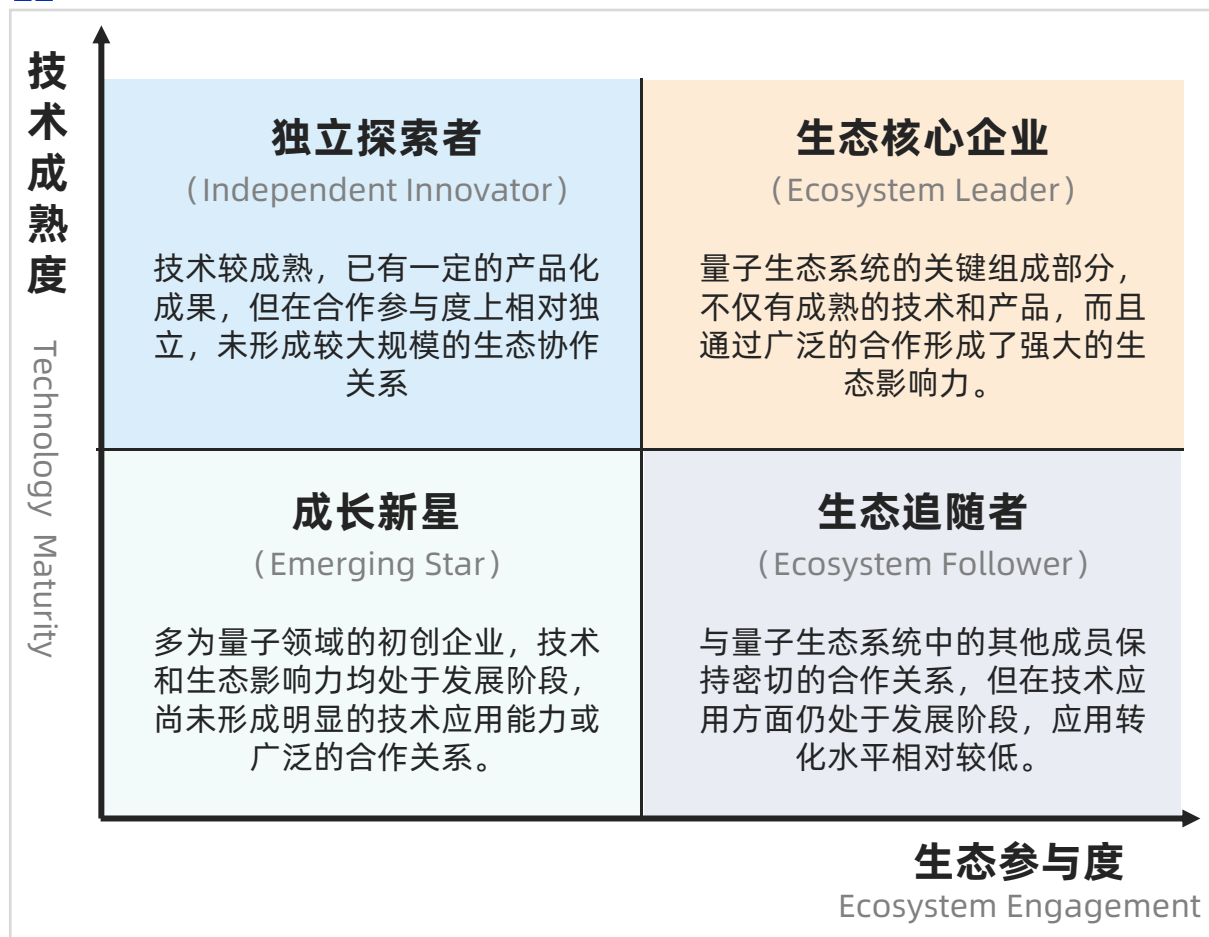
- 01 量子生态成熟度罗盘 (Q-EMC)
- 02 全球量子测量标准制定情况
- 03 参考链接

01

量子生态成熟度罗盘（Q-EMC）

本报告提出一个二维矩阵评价模型，该模型通过技术成熟度（纵轴）和生态参与度（横轴）两个维度，系统性评估量子计算领域参与者（企业、研究机构或技术路线）的综合竞争力，揭示其技术能力与生态整合能力的动态平衡关系。

 图表 量子生态成熟度罗盘（Q-EMC）



ICV TA&K | 2026.2

模型详解

横轴：生态参与度

衡量公司在量子生态系统中的合作深度和广度。高生态参与度的公司通常与其他企业、高校、研究机构甚至政府有广泛合作，积极融入产业生态，并善于整合资源、形成协作网络。低生态参与度的公司则多倾向于独立运作，或由于处于早期发展阶段而缺乏大范围合作关系。

纵轴：技术成熟度

反映公司在量子技术方面的成熟程度，包括其核心技术的研发深度、可靠性和稳定性。这一维度评估公司在技术积累上的深厚程度，以及其量子技术是否具备标准化和可扩展性。高技术成熟度的公司通常具有经过验证的技术能力，能够提供高质量的产品或服务，并为进一步的应用转化和市场化奠定坚实基础。

模型应用

- 独立探索者：可以考虑增加生态合作，借助外部资源进一步推动技术应用；
- 生态核心企业：可通过技术突破和扩展合作网络，巩固核心地位；
- 生态追随者：可以重点提升技术及其应用能力，以增强自身市场竞争力；
- 成长新星：可以选择重点发展技术应用或增加生态合作，尽快找到合适的切入点以提升市场影响力。

在《2026全球量子传感产业发展展望》报告中。技术成熟度具体权重指标包括量子传感技术路线（囚禁原子/离子、固态自旋、超导以及其他传感技术）、量子传感设备性能指标（灵敏度、分辨率、稳定性、噪声水平、响应速度等）、工程化能力（温度、湿度等）、知识产权、2025年技术进展等；生态参与度具体权重指标包括2025年合作进展情况、标准制定情况、联盟情况等。

02

全球量子传感标准制定情况

量子传感领域标准制定情况

发布时间	实施时间	发布单位	标准名称	标准号
2020.12	2021.07	TC544 (全国北斗卫星导航标准化技术委员会)	铯原子钟技术要求及测试方法	GB/T 39724-2020
2024.03	2024.10	全国量子计算与测量标准化技术委员会	量子精密测量中里德堡原子制备方法	GB/T 43735-2024
2024.03	2024.10	全国量子计算与测量标准化技术委员会	光钟性能表征及测量方法	GB/T 43785-2024
2024.03	2024.10	全国量子计算与测量标准化技术委员会	单光子源性能表征及测量方法	GB/T 43784-2024
2024.03	2024.10	全国量子计算与测量标准化技术委员会	原子重力仪性能要求和测试方法	GB/T 43740-2024
2024.03	2024.10	全国量子计算与测量标准化技术委员会	量子测量术语	GB/T 43737-2024
2024.04	2024.11	国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会	基于扫描氮-空位探针的微弱静磁场成像测量方法	GB/T 43845-2024

iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

量子传感领域在研标准

下达时间	计划号	标准名称	项目周期
2025.06	20251606-T-469	微波冷原子钟性能表征及测量方法	18个月
2025.10	20255414-T-469	量子精密测量用超高反射率光学薄膜性能表征及测量方法	18个月
2025.10	20255415-T-469	颗粒物光量子雷达技术规范	18个月
2025.11	20256261-Z-469	原子重力仪质量检测规程	12个月

iCV TA&K & 光子盒研究院 QUANTUMCHINA | 2026.2

03

参考链接

<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.111.094112>
<https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.L012020>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.044037>
<https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.111.094112>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.054079>
https://www.nature.com/articles/s41378-025-01076-1?utm_source=chatgpt.com
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/tdb3-tqfv>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/vclj-v8qx>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/x9gz-dhmr>
https://arxiv.org/abs/2510.26605?utm_source=chatgpt.com
<https://www.nature.com/articles/s42005-025-01968-8>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.034055>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.034055>
<https://www.nature.com/articles/s41377-025-01790-5>
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adw4938>
<https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/sv4y-qps6>
<https://www.nature.com/articles/s41377-025-02024-4>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/hldy-gmnn>
https://www.nature.com/articles/s41467-025-56668-2?utm_source=chatgpt.com
https://www.mems.me/mems/magnetic_sensor_202508/13575.html
<https://www.nature.com/articles/s41467-025-55956-1>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.034008>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.054019>
<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/k7nk-lrwd>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/262m-zgs8>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/y14n-44h3>
<https://academic.oup.com/nsr/article/12/4/nwaf012/7951977?login=false>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.044001>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.143601>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.183603>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/m7tr-tm4w>
<https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/dtrj-whsb>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/pv13-vgcw>
<https://www.nature.com/articles/s41598-025-19859-x>
<https://www.nature.com/articles/s41467-025-58635-3>
<https://www.nature.com/articles/s41567-025-02887-9>

<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/26vs-4t7p>

<https://www.nature.com/articles/s41598-025-92544-1>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.143601>

<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.15.011029>

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/j76m-gcp1>

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1681-7575/addc77>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/hb3c-dk28>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/6v93-whwq>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.013201>

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/2rqf-r9gw>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.113801>

<https://www.nature.com/articles/s41534-024-00947-1>

<https://www.businesswire.com/news/home/20250116354239/en/Classiq-and-Florence-Quantum-Lab-Partner-to-Advance-Sustainability-and-Food-Security-with-Quantum-Enhanced-Precision-Agriculture;>

<https://q-ctrl.com/blog/q-ctrls-new-maritime-quantum-navigation-solution-successfully-undergoes-first-defense-trials-at-sea>

<https://www.sandboxaq.com/press/sandboxaq-announces-aqnav---worlds-first-commercial-real-time-navigation-system-powered-by-ai-and-quantum-to-address-gps-jamming>

<https://www.sandboxaq.com/post/sandboxaq-and-acubed-achieve-remarkable-progress-in-magnetic-navigation>

<https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=36E3C769DD0160F8E06397BE0A0AF710>

<https://www.rydbergtechnologies.com/>

<https://mp.weixin.qq.com/s/fGHyWwRH0q-1OPPlevELmQ>

<https://qnami.ch/portfolio/proteusq/>

https://www.gfz.de/en/press/news/details/aufbau-eines-europaeischen-netzwerks-aus-quantengravimetern-1?utm_source=chatgpt.com

https://thequantuminsider.com/2025/10/03/darpa-selects-safran-federal-systems-for-quantum-sensor-development/?utm_source=chatgpt.com

https://thequantuminsider.com/2025/06/11/sussex-researchers-ability-to-detect-tiny-electric-fields-100-times-more-effectively-could-boost-quantum-computing-and-beyond/?utm_source=chatgpt.com

<https://www.congress.gov/bill/119th-congress/senate-bill/3597?q=%7B%22search%22%3A%22National+Quantum+Initiative+Act%22%7D&s=2&r=14>

https://acubed.airbus.com/blog/quantum/magnetic-navigation-at-scale-advancing-resilient-flight-through-quantum-sensing/?utm_source=chatgpt.com

https://www.sandboxaq.com/press/sandboxaq-partners-with-dows-defense-innovation-unit-to-advance-development-of-magnetic-navigation-systems?utm_source=chatgpt.com

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/k7nk-lrwd>
<https://bluefors.com/news/announcing-the-cryomech-pt205-compact-2k-cryocooler/>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.23.014004#fulltext>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/hb3c-dk28>
<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/qw53-8b8r>
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/6dl6-754w>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.134.043401>
<https://www.nature.com/articles/s41377-025-02024-4>
<https://www.nature.com/articles/s42005-025-02341-5>
<https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.7.013281>
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/clp9-xc2n>
https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-10/10/content_413125.html
<https://opg.optica.org/prj/fulltext.cfm?uri=prj-13-8-2384&id=575203>
<https://mp.weixin.qq.com/s/dvhzX6y2euFoep72J-2j5w>
https://mp.weixin.qq.com/s/LWE_s02VJDAFbqD59H_OAA
https://aiqicha.baidu.com/company_detail_27585331281437?tab=companyDevelop
<https://www.qcc.com/product/c0e9117dde98cf793dd4a6b1876d7376.html>
https://aiqicha.baidu.com/company_detail_44567079823589?tab=companyDevelop
<https://edd.newmexico.gov/pr/mesa-quantum-technologies-is-first-recipient-of-state-quantum-grant/>
<https://www.eu-startups.com/2025/02/qt-sense-raises-e6-million-to-understand-diseases-at-a-single-cell-level-with-quantum-sensing/>
<https://www.australianmanufacturing.com.au/university-of-sydney-spin-out-deteqt-lands-750k-for-quantum-sensing-innovation/>
<https://infleqtion.com/infleqtion-raises-100m-to-scale-atom-based-quantum-solutions-for-national-security-and-next-generation-intelligent-systems/>
<https://www.infleqtion.com/news/infleqtion-secures-62m-arpa-e-award-to-advance-quantum-powered-energy-grid-optimization>
<https://www.exail.com/product-range/inertial-measurement-units>
<https://vectoratomic.com/>
https://www.bosch-quantumsensing.com/technology/?utm_source=chatgpt.com
http://www.lidarq.com/p_display.php?id=30
<https://qlmtec.com/>
https://quantumcomputinginc.com/products/r-and-d-offerings/vibrometer?utm_source=chatgpt.com
<https://www.cascoldatom.com/more.php?lm=10&id=201>
<https://www.quantum-info.com/product/pone/liangzijingmiceliang/liangzijingmicel/2024/0921/821.html>

<https://aosense.com/research-and-development/geodetic-and-geophysical-sensors/>

<https://www.exail.com/product/quantum-gravimeters>

<https://www.gshqt.com/proshow/31.html>

<https://megin.com/megmaps/>

<https://www.compumedics.com.au/en/products/orionlifespanmeg/>

<https://www.ctf.com/>

<https://www.xmagtech.com/newsinfo/7558408.html>

<https://safran-navigation-timing.com/product/imaser-3000/>

<https://www.microchip.com/en-us/products/clock-and-timing/components/atomic-clocks/embedded-atomic-oscillators/ln-csac>

https://www.microchip.com/en-us/products/clock-and-timing/components/atomic-clocks/atomic-system-clocks/cesium-time/5071a?utm_source=chatgpt.com

https://www.microchip.com/en-us/products/clock-and-timing/components/atomic-clocks/atomic-system-clocks/mhm-2020-hydrogen-masers?utm_source=chatgpt.com

<https://www.sinocipher.com/archives/quan-qi-zui-jing-que-de-shi-jian-yi-we>

ICV TA&K（全称 (Technology Advisory & Knowledgebase)，中文常译为“智能与知识智库”或“ICV 前沿科技咨询”）已成为定义未来产业标准与评估体系的领军机构。

1. 机构定义：未来产业的“导航者”与“评估者”

ICV TA&K 是一家专门从事前沿技术（Frontier Tech）战略咨询、市场研究及产业评价的国际化智库。不同于传统的会计师事务所或通用型咨询公司，ICV 的核心基因在于“技术深度”。目前已将业务触角延伸至量子信息、具身智能、生物制造、低空经济、6G 通信以及脑科学等九大关键颠覆性领域。它被公认为全球“未来产业”布局的风向标，为各国政府制定产业政策及财富 500 强企业进行战略投资提供底层数据支持。

2. 核心竞争力：Q-EMC多维指标评价体系

ICV 公司最显著的贡献在于其自主研发的**Q-EMC**核心技术评估模型。这套模型不仅是您所使用的全球城市排名的基础，也是衡量一家企业或一个地区“未来竞争力”的国际标准。

数据驱动：ICV 整合了包括 WIPO（世界知识产权组织）、OECD、IEEE 以及全球主流高性能计算中心（HPC）的实时数据，确保每一份排名和指数（如 2025 全球未来城市排名）都具备严谨的科学依据和行业公信力。

3. 业务版图：从“前沿智库”到“战略加速器”

ICV 的业务模式分为三大板块，构成了其完整的知识生态系统：

前沿智库：每年发布超过 50 份深度的全球行业报告，涵盖从量子芯片制程路线图到 L5 自动驾驶责任法典等关键课题。

战略咨询与评估：协助波音、特斯拉、丰田等巨头在全球范围内进行供应链韧性评估，并为新加坡、北京、旧金山等城市的智慧城市建设提供顶层设计建议。

金融情报服务：针对风险投资（VC）和私募股权（PE），ICV 专门设立了“量子独角兽”与“具身智能明星”追踪系统，通过分析初创企业的技术专利护城河（Filing Strength）来预测其商业潜能。

我们在最广泛的资本密集型行业 and 市场中汇集了最深入的情报。通过连接不同变量的数据，我们的分析师和行业专家为我们的客户提供了一个更丰富、高度整合的世界观。

光子盒研究院是一家专注于前沿科技与未来产业发展的创新型研究机构，以"探索科技边界、赋能产业升级"为使命，致力于成为全球科技创新生态系统中不可或缺的智库力量。研究院以前沿技术演进为观察坐标，以量子科技为核心研究领域，深度布局人工智能、先进计算、未来材料等战略方向，构建起"技术前瞻-产业应用-政策研究"三位一体的研究体系。

【核心定位与研究领域】

作为量子科技领域的专业研究平台，研究院聚焦量子计算、量子通信、量子传感三大技术主航道，持续跟踪全球量子科技关键技术突破。通过建立覆盖"基础研究-技术转化-产业应用"的全链条分析框架，研究院定期发布量子计算硬件发展路线图、量子安全通信应用白皮书等权威报告，为行业提供具有前瞻性的技术评估与产业化路径建议。

【智库服务与价值创造】

研究院构建了独特的"产学研政资"协同创新网络，为政府部门提供科技创新政策制定咨询，协助构建量子科技产业园区规划；为科研机构搭建技术转化评估模型，推动实验室成果与产业需求对接；为企业客户定制技术路线选择、市场竞争策略及专利布局方案；为投资机构建立科技项目价值评估体系，甄别具有突破潜力的早期技术项目。目前已形成季度产业研究报告、年度技术趋势预测、专项政策建议书等系列知识产品。

【研究特色与竞争优势】

依托跨学科研究团队（涵盖物理学、计算机科学、产业经济学等领域专家），研究院创新性采用"技术成熟度曲线+产业生态图谱"二维分析法，结合专利大数据挖掘与全球科研动态监测，确保研究成果的客观性与时效性。通过建立量子科技企业数据库（覆盖全球600+相关机构）、搭建院士专家委员会、主办国际量子产业峰会等举措，持续强化在量子科技领域的资源整合能力与行业影响力。

光子盒研究院始终秉持"以科技洞见未来"的核心理念，通过深度行业洞察、精准趋势研判和务实解决方案，助力客户把握量子革命带来的战略机遇。在科技创新加速重构全球产业格局的当下，研究院将持续输出具有决策价值的智库成果，推动前沿科技与实体经济的深度融合，为人类科技文明进步贡献智慧力量。

Q-STAR

联系我们

iCV TA&K
Technology Advisory
& Knowledgebase

Canada

5250 Fairwind Dr.
Mississauga, Ontario,
L5R 3H4,
Canada

Singapore

101 Upper Cross Street,
#04-17,
People's Park Centre,
Singapore

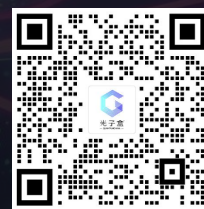
infer@icvtank.com

<https://www.icvtank.com/>

 **光子盒研究院**
QUANTUMCHINA



扫一扫
关注光子盒



扫一扫
咨询研究员

网址: <https://www.quantumchina.com/>

总部: 北京市海淀区信息路26号中关村创业大厦7层701

分部: 上海市长宁区仙霞路317号远东国际广场B栋613

分部: 成都市高新区天府软件园G区G1栋803