

2022

全球量子精密测量产业发展报告

Global Quantum Metrology and Sensing Industry Development



前言

Foreword

量子精密测量是量子信息技术的三大分支之一，另两大分支为量子通信和量子计算。量子精密测量作为整体来看，其产业化进程较量子计算产业和量子通信产业发展最快，例如原子钟作为量子精密测量领域的产品，已非常成熟。

由于量子精密测量包含多个细分领域，与量子计算和量子通信较为集中的领域相比，显得更为分散，因此，其关注度和知悉度较量子计算和量子通信低，未受到较高的集中关注。但是，量子精密测量技术对科技进步和社会发展具有重大意义，量子精密测量的各类产品惠及基础科学研究和生产生活的方方面面。

在美国、中国、欧盟等国家和地区，量子精密测量已作为战略层面的发展政策，受到政府支持。同时，已有多家科技公司，推出适用于多个场景的量子精密测量产品，以及在全球多个实验室中，一些被证明有价值的原型机，这让量子精密测量领域值得受到更高的关注。

ICV 联合光子盒全球发布《2022 全球量子精密测量产业发展报告》，对未来中短期量子精密测量领域发展进行多方面预测和展望。本报告主要以 2021 年 1 月至 2022 年 4 月为主要观察期，追踪各主要量子精密测量技术国家的动态发展。

ICV 前沿科技咨询总监、高级副总裁：Jude Green



致谢

Acknowledgements

本报告由全球前沿科技咨询机构 ICV 与光子盒联合出品。同时，感谢 AOSense、Bruker、CAS COLD ATOM（中科酷原）、CETC（中国电科）、CIQTEK（国仪量子）、Muquans、Oxford Instruments（牛津仪器）、Quantum CTek（国盾量子）、ZWDX（中微达信）等公司给予技术和素材方面的支持。

2022 量子精密测量产业发展报告编写组

2022 年 5 月 11 日

鸣谢（以下顺序按公司英文名称首字母排列，排名不分先后）



目录

第一章	1
量子精密测量概述及最新进展	1
一、量子精密测量的由来	2
二、量子精密测量的物理实现方式	3
三、量子精密测量的学术进展概况	4
第二章	7
量子精密测量典型产品及应用	7
一、时间测量	8
二、重力测量	10
三、量子导航	11
四、磁场测量	12
五、量子探测成像	15
六、总结与观点	16
第三章	18
主要科技国量子精密测量战略规划	18
一、北美	19
二、欧洲	21
三、亚洲	24
四、总结与观点	27
第四章	29
量子精密测量产业链	29
一、量子精密测量产业生态概况	30
二、产业链主要市场参与者概况	33
三、量子精密测量典型企业简介	34
第五章	45
量子精密测量投融资及发展预测	45
一、投融资情况	46
二、市场预测	50
三、未来趋势及建议	53
关于我们	57

表目录

表 1 主要的量子传感器技术体系	3
表 2 量子精密测量近期学术进展	4
表 3 美国涉及量子精密测量的主要报告	19
表 4 美国主要量子精密测量研究机构	19
表 5 加拿大主要量子精密测量研究项目	20
表 6 加拿大主要量子精密测量研究机构	21
表 7 德国主要量子精密测量研究项目	22
表 8 法国主要量子精密测量研究项目	23
表 9 中国主要量子精密测量研究机构	25
表 10 日本 Q-LEAP 量子精密测量的旗舰项目	26
表 11 日本 Q-LEAP 量子精密测量的基础研究	27
表 12 成都天奥电子股份有限公司原子钟产品	42
表 13 量子精密测量领域涉及的公司获得资金投入情况	46

图目录

图 1 量子精密测量重要发展节点.....	2
图 2 量子精密测量过程示意图.....	3
图 3 美国 DARPA 和 NIST 芯片级时钟部件展示.....	10
图 4 M Squared 公司研发的冷原子量子加速度计.....	12
图 5 Cerca Magnetics 公司研发的可穿戴 OPM.....	14
图 6 一种用于生命科学领域的金刚石氮空位色心磁力计原型.....	15
图 7 量子精密测量产业生态.....	30
图 8 量子重力仪外观对比图.....	32
图 9 量子精密测量主要市场参与者分布.....	34
图 10 Geometrics 公司产品图.....	34
图 11 芯片级原子钟示意图.....	35
图 12 ColdQuanta 公司原子钟产品图.....	36
图 13 Quspin 公司磁力计产品图.....	36
图 14 Qnami 公司 ProteusQ 量子显微镜系统产品图.....	39
图 15 JEOL 公司 ESR 和 SEM 示意图.....	40
图 16 HAMAMATSU 公司产品示意图.....	40
图 17 国仪量子公司产品图.....	41
图 18 成都中微达信科技有限公司芯片级分子钟原型产品.....	43
图 19 2017-2022 年全球量子精密测量公司融资轮次分布.....	48
图 20 2017-2022 年不同国家量子精密测量行业融资情况.....	49
图 21 2017-2022 年全球量子精密测量细分领域的融资分布情况.....	49
图 22 全球量子精密测量市场规模预测（2019-2029E）.....	50
图 23 全球量子精密测量市场份额预测（按产品技术领域划分）.....	51
图 24 全球量子精密测量市场份额预测（按地理划分）.....	52

第一章

量子精密测量概述及最新进展

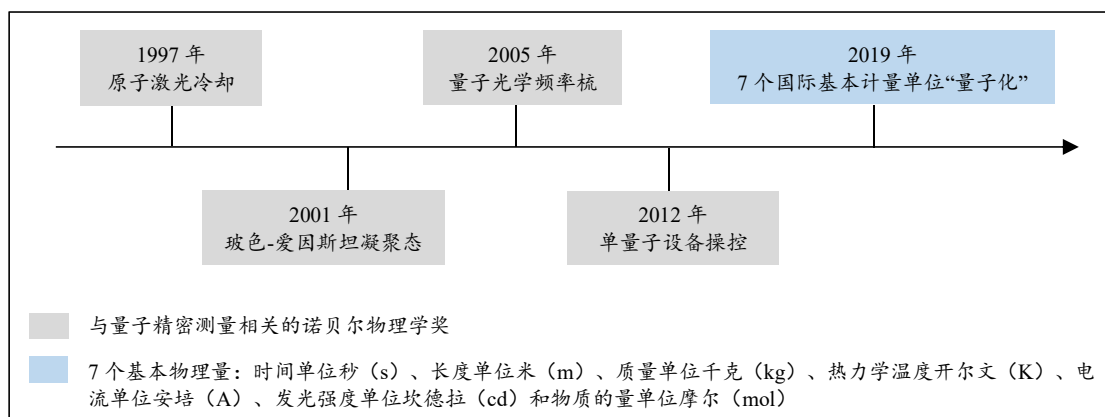
量子精密测量是量子信息科技领域全球公认的三大发展方向之一。当前各类国家政策、报告等文献中因各国技术专长领域不同、语言不同等因素,导致出现多个不同的名称,本文将以“量子精密测量”指代这一技术和应用领域。例如,美国 2022 年发布的《将量子传感器付诸实践》中,将这一领域称为“Quantum sensors and measurement devices (量子传感器和测量设备)”；英国 2020 年发布的《NQTP 计划》中,将这一领域称为“Quantum imaging, and quantum sensing and timing (量子成像、量子传感和计时)”；德国 2021 年发布的《量子系统议程 2030》中,将这一领域称为“Quantenmesstechnik und Sensorsysteme (量子测量技术和传感器系统)”。综合来说,这一领域是基于量子力学原理的新一代精密测量方式或仪器设备的统称。当前绝大多数精密测量是基于经典力学原理,仍有测不准、无法测等局限性。

本章首先简要回顾量子精密测量的由来和发展,介绍量子精密测量基本过程,将量子精密测量的物理实现方式(即技术路线)进行简单整理,最后罗列了近一年多学术领域取得的重要成果。

一、量子精密测量的由来

量子精密测量是对物理量的高精度、高灵敏度的测量方法和技术应用，目标是实现单量子水平的极限探测、精准操控和综合应用。精密测量是获取物理量信息的源头，随着量子光学、原子物理学等领域的发展，诺贝尔物理学奖成果的推动，以及国际计量单位 7 个基本物理量实现“量子化”，精密测量已经进入量子时代。

图 1 量子精密测量重要发展节点

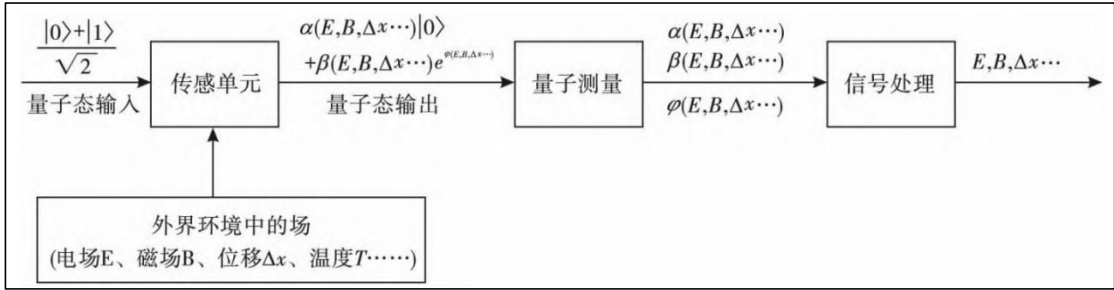


基本方法	利用量子特性，电磁场、温度、压力等外界环境直接与电子、光子、声子等体系发生相互作用并改变它们的量子状态，对这些变化后的量子态进行检测
量子特性	能级跃迁、相干叠加、量子纠缠
技术优势	与经典力学测量技术相比，达到海森堡极限，达到精度高、效率高、准确性高、抵抗一些特定噪声的干扰等
理论依据	经典测量精度极限为散粒噪声极限，量子测量精度可高于散粒噪声极限，达到海森堡极限（正比于 $1/N$ ， N 为单次测量所使用的光子或原子等的数目，而经典极限仅正比与 $1/\sqrt{N}$ ）
测量工具	原子、分子、离子、光子（单光子、纠缠光子对）
常见指标	灵敏度、动态范围、采样率、工作温度等
待测量	磁场、电场、旋转、时间、力、温度、光子计数等

量子精密测量技术要求拥有对量子态进行操控和测量的能力，利用量子态进行信息处理、传递和传感。测量过程中的几个重要环节是：通过控制信号将量子体系调控到特定的初始化状态，与待测物理量相互作用后会导致量子体系的量子

态发生变化，直接或间接测量最终的量子态，再将测量结果处理转换成传统信号输出，获取测量值。

图 2 量子精密测量过程示意图



来源：量子传感的导航应用研究现状与展望，《空军工程大学学报》，2021 年 12 月

二、量子精密测量的物理实现方式

量子精密测量的实用化产品是量子传感器。量子传感器可以产生关于电信号、磁异常和惯性导航的非常精确的信息。传感器背后的量子技术物理实现方式目前主要有以下五种。一种物理实现方式可以为不同的被测物理量提供技术支撑，例如，冷原子干涉可以用于测量磁场、惯性、时间。在实际应用中，可能需要不同的技术进行组合，达到最佳效用，例如，量子惯性导航由加速度计、陀螺仪、原子钟三种不同类型的传感器组成。

表 1 主要的量子传感器技术体系

量子系统	原理	待测量	应用举例
冷原子干涉	在极低温环境下的原子表现出类似波的行为，并对所有与其质量相互作用的力都很敏感	磁场、惯性、时间	在重力测量中，可以非常详细地绘制地球表面和地下的地图，分辨率为厘米级
离子阱	控制良好的离子阱形成具有量子化运动模式的晶体，任何干扰都可以通过这些模式之间的转换来测量	电场、磁场、惯性、时间	对于惯性导航，在一、二、三维阵列中捕获的冷原子的光学晶格技术可能提供亚厘米级的大小
金刚石氮空位（NV）色心	NV色心作为电子自旋量子比特与外部磁场耦合；使用Berry相位带负电荷的NV色心可以测量旋转	电场、磁场、旋转、温度、压力	在空间分辨率和灵敏度上具有优势；可在室温或更高温度下工作，成本低；允许同时测量磁力、加速度、速度、旋转或重力的三个待测量
超导电路	基于约瑟夫森效应的超导电路技术描述了两个超导体之间的量子隧穿	电场、磁场	需要低温环境；允许在宏观尺度上制造量子系统，并且可通过微波信号进行有效控制

	效应		
原子蒸气	自旋极化高密度原子蒸汽在外部磁场下经历状态转变,可通过光学方式测量	磁场、旋转、时间	可在室温部署;基于原子集合的原子蒸汽电池磁力计有可能优于SQUID磁力计并在室温下工作

三、量子精密测量的学术进展概况

本节进展主要关注学术领域,观察期为2021年1月至2022年4月。总结来看,学术进展类型多样化,内容涉及精度提高、新技术探寻、技术应用验证等。收录的20条学术进展中,涉及时间(原子钟、光钟、时频)的有4条;涉及生物医疗(视网膜、脑磁图、新冠病毒检测、细胞荧光标记)的有4条;涉及金刚石氮空位色心的有3条,其中1条为医疗中的新冠病毒检测;其余进展涉及海森堡极限、新方法提高灵敏度、原子探测、量子气体成像、原子蒸汽、核磁共振、重力梯度仪、光腔等。

表2 量子精密测量近期学术进展

时间	国家	研究主体	主要进展
2021.01	中国	中国科学技术大学、香港中文大学	研究人员在实验中完全消除了量子比特演化过程中三个待测参数之间的精度制衡,同时实现三个参数达到海森堡极限精度的测量,测量精度比经典方法提高了13.27dB。该研究发表在Science Advances。
2021.03	美国	美国国家标准与技术研究院	研究人员部署了一个三种原子钟组成的网络,将这些原子钟分别放置在科罗拉多州博尔德市多个点位,比较其在2017年11月至2018年6月间各自的频率比值,获得的测量精度范围可达到小数点后18位。这次报道的测量结果是频率比值不确定度首次小于小数点后17位。该研究发表在Nature。
2021.04	中国	北京量子科学研究院	研究人员通过在回音壁模式光学微腔体系中引入对向传输模式间的单向耦合,首次在实验上实现了光学模式的奇异面,并由此提高微扰传感的灵敏度。该方案利用反馈光纤波导和光隔离器,完成微球腔内顺时针传输模式到逆时针传输模式的单向非对称耦合,将系统制备于奇异面上,通过模式劈裂来探测微扰,适用于多种实验耦合情况,利用奇异面实现探测的高灵敏度。该研究发表在Laser & Photonics Reviews。
2021.04	中国	中国科学技术大学	研究人员实现长距离大损耗自由空间高精度时间频率传递实验,在大气噪声、链路损耗、传输延迟效应等多角度仿真了高轨卫星星地高精度时频传递,验证了基于中高轨卫星实现万秒E-18量级稳定度的星地时频传递的可行性,为未来空间光频标科

			学实验和洲际光钟频率传递和比对奠定了基础。该研究发表在Optics。
2021.07	中国	中国科学技术大学	研究人员运用全光激发实现了对极其稀有同位素氦-81的单原子探测,这一量子精密测量方法的突破将助力于地球与环境科学研究。该研究发表在Physical Review Letters。
2021.08	中国	中国科学院微观磁共振重点实验室	研究人员利用基于金刚石固态单自旋体系在室温大气环境下实现了突破标准量子极限的磁测量。该研究发表在Science Advances。
2021.09	中国	中科院微观磁共振重点实验室	研究人员提出并通过实验实现了一种以金刚石氮空位色心单自旋为量子传感器的电探测方法,并通过磁抑制的氮空位色心实现了金刚石近表面电噪声信息的提取,为金刚石量子传感器在电探测方向的应用提供新的途径。该研究发表在Physical Review Letters。
2021.11	多国	中国科学技术大学、德国亥姆霍兹研究所	研究人员利用气态氦和铷原子混合蒸气室,实现了新型核自旋磁传感器,用于暗物质的实验直接搜寻,实验结果比先前国际最好水平提升至少5个数量级,首次突破国际公认最强的宇宙天文学界限。该研究发表在Nature Physics。
2021.11	中国	中国科学院微观磁共振重点实验室、华中科技大学	研究人员在超辐射相变量子模拟的实验中,通过引入反压缩操作,借助于高精度的量子控制技术,首次成功地在核磁共振量子模拟器上实验实现了超越No-go定理的平衡态超辐射相变,推动了量子相变理论和量子模拟领域的发展,为量子精密测量提供了新的途径。该研究发表在Nature Communications。
2021.11	丹麦	奥胡斯大学	研究人员利用光泵磁力仪对视网膜进行诊断,有望取代纤维电极和隐形眼镜电极,提供舒适的非接触式临床视网膜扫描系统。该研究发表在NeuroImage。
2021.12	中国	南京大学现代工程与应用科学学院、之江实验室	研究人员利用量子系统具有时间对称性的双态矢量描述,对前、后选择的量子系统进行弱测量,将广义测量结果—弱值与实现后选择过程的量子精密测量算符建立对应关系,通过提取不同可观测量的弱值实现对量子精密测量直接表征,该方法被称为直接量子探测器层析(DQDT)。该研究发表在Physical Review Letters。
2021.07	俄罗斯	俄罗斯量子中心、斯科尔科沃科学技术研究所	研究人员开发出基于钇铁石榴石薄膜(YIGM)的新型磁通门脑磁图传感器,能够记录大脑中非常弱或深的电源。由于其宽动态范围,该设备需要较少的磁屏蔽,意味着硬件和整个研究基础设施的成本都较低。该研究发表在Human Brain Mapping。
2021.11	德国	汉堡大学	研究人员开创了一种新的量子气体成像方法,可以精确测量原子数量、原子之间的关联和形成图样。该研究发表在Nature。
2021.12	多国	麻省理工学院、滑铁卢大学	研究人员利用金刚石氮空位色心,设计出一种量子磁场测量传感器,有望更块、更准确地检测新型冠状病毒。该研究发表在Nano Letters。
2022.01	美国	加利福尼亚大学	研究人员建立并运行了一个包含单个捕获的镭226

		圣巴巴拉分校	离子的光学时钟。该研究发表在Physical Review Letters。
2022.02	多国	欧洲光学研究所 (ICFO)、阿尔托大学	研究人员使用仅比绝对零度高几十亿分之一度的原子检测到任何其他现有传感器技术都无法检测到的磁信号,首次实现了超过能量分辨率极限。该研究发表在PNAS。
2022.02	英国	伯明翰大学、国防科学与技术实验室、Teledyne e2v	研究人员建造了世界上第一个在实验室条件之外的量子重力梯度仪。通过实现实用的量子重力梯度传感器克服了振动噪声限制,抑制了微震和激光噪声、热和磁场变化以及仪器倾斜的影响。传感器参数适用于测绘含水层和评估对地下水位的影响、考古学、土壤特性和含水量的测定。该研究发表在Nature。
2022.02	美国	威斯康星大学麦迪逊分校	研究人员创造了多路复用光学时钟的第一个例子,铯原子可以被分成多个时钟,在同一个真空室中排列成一条线。当它们同时将激光照射在室内的两个时钟上并进行比较时,两个时钟之间具有激发电子的原子数量保持不变长达26秒,时间比激光在正常光学时钟中允许的时间长得多。这一设计使团队能够测试寻找引力波的方法,尝试探测暗物质。该研究发表在Nature。
2022.03	多国	北京量子信息科学研究院、乌尔姆大学、图尔大学、德累斯顿工业大学、马斯克普朗克研究所、俄罗斯科学院、莫斯科国立大学	研究人员通过高温高压方法制备出含高浓度SiV色心的微米、纳米金刚石颗粒,通过研磨、酸洗、有机分子涂层等步骤,制备出适合于细胞内进行荧光标记,成功观测到SiV纳米金刚石被Hela细胞吸收;还实现了单个纳米金刚石的细胞内运动轨迹追踪,并进行了零声子线光谱追踪测量。研究表明,通过测量纳米金刚石SiV色心的零声子线的光谱频移,可用于温度传感。该研究发表在Nano Letters。
2022.04	多国	奥地利科学院量子光学和量子信息研究所、因斯布鲁克大学、苏黎世联邦理工学院	研究人员利用系统的快速不稳定动力学,捕获在微观光学谐振器中的纳米粒子的运动波动可以显著降低到零点运动以下。此次研究扩展了光腔作为机械量子挤压器的新用途,并提出了超越量子基态冷却的悬浮光力学可行的新途径。微谐振器可为量子传感器的设计提供新平台,例如,可用于卫星任务、自动驾驶汽车和地震学。该研究发表在Physical Review Letters。

第二章

量子精密测量典型产品及应用

量子精密测量主要依靠量子传感器为科学、技术和工业提供精密测量。在量子科技三大领域（量子计算、量子通信、量子精密测量）中市场化进展最快的一大领域。量子传感器可以产生关于电信号、磁异常和惯性导航的非常精确的信息，改善了时序、传感和成像。

本章列举了一些量子传感器，主要涉及时间测量、重力测量、磁场测量和探测成像。通过列举这些已实用化的量子传感器和一些有望在中短期有望商业化的量子传感器，说明它们的重要性与潜力，以及其为健康、安全、商业、工业和科学用途带来的促进作用。

一、时间测量

按照原子跃迁能级谱线对应的频段，原子钟分为微波原子钟和光学原子钟（简称光钟，在光波段运行的原子钟）。微波钟的波段为 $10^9\sim 10^{10}\text{Hz}$ ，光钟的波段为 $10^{14}\sim 10^{15}\text{Hz}$ 。光波段比微波波段高 4~5 个量级，因此，光钟被认为精度高于微波钟，是下一代的高精度时钟。

1、原子钟

(1) 微波原子钟

原子钟为国际时间测量和频率标准提供依据，也为其他基本物理量测量、物理常数定义和物理定律检验提供标准。原子钟精度的提高带动基本物理量等的精度提高，促进新物理发现和科学技术进步。

微波原子钟技术已应用多年，当前主要有两个发展方向：追求更高精度、实现更小体积。例如，小型化通常以较低的频率精度为代价。当前，基于原子喷泉或热原子束的原子钟和磁状态选择原理可以达到相对的不确定性 $\sim 10^{-15}$ 至 10^{-16} ，最先进的芯片大小的原子钟具有不确定性 2×10^{-12} 。

基本原理	原子从一个能量态跃迁至低的能量态时会释放电磁波，同一种原子的电磁波特征频率是一定的，可用作一种节拍器来保持高度精确的时间
利用的金属原子	铷、铯、氢，以碱金属原子为主
应用领域	定位、导航、网络、计量

由原子钟的四大应用领域衍生的应用有卫星定位导航（GPS、Galileo、GLONASS、北斗）、国防军工（精确制导、作战指挥同步）、时间基准（信息通信、广播电视）等。以定位为例，每一颗卫星都载有多台微波段原子钟，通过对信号到达的时间做精确测量来给出用户定位信息。

(2) 光学原子钟

目前光钟有两种原子体系：囚禁冷却的中性原子团、囚禁冷却的单离子。随着光子集成、激光和微机电技术的发展，光钟可以实现较小的体积和较高的精度，有望广泛应用于对体积、质量、功耗和精度敏感的各种国防装备中。

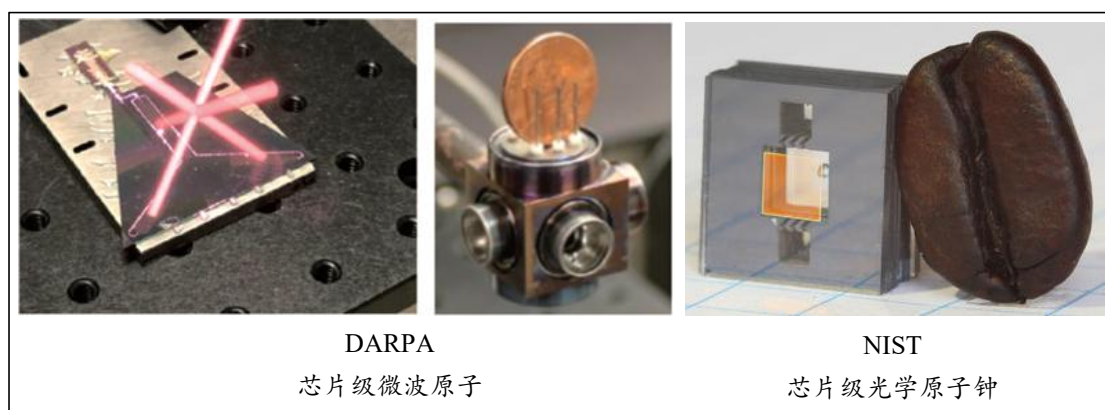
NIST 研制的锶原子光钟，在不确定度上达到 10^{-18} 量级、稳定度达到 10^{-19} 量级，相比微波原子钟进步了至少两个数量级。DARPA 在 2022 年 1 月公布其寻求将光钟从实验室转移到作战中。中国科学家发展的钙离子光钟的不确定度与稳定度均进入 10^{-18} 量级。中国预计在 2022 年 7 月将问天实验舱和梦天实验舱发射升空与空间站对接，梦天实验舱上将搭载三组冷原子钟，其由氢原子钟、铷原子钟、光钟组成，将构建时间频率实验室。

(3) 芯片级原子钟

芯片级原子钟（CSAC）是在原子钟技术成熟下，对尺寸小、重量轻、用量大的高精度时钟提出新需求。CSAC 包括芯片级微波原子钟和芯片级光学原子钟。芯片级微波原子钟与小型恒温晶振相比，体积和功耗上相近，但是长期稳定度高 3 个量级以上。小型恒温晶振的体积和功耗要比铷原子钟小近 2 个量级。芯片级光学原子钟是其工作原理与微波原子钟相似，除了跃迁频段不同之外，其频率发生器是稳频激光器而不是微波原子钟的晶体振荡器。芯片级光钟比芯片级微波钟具有更高的理论精度。芯片级原子钟的与微惯性测量组合和卫星导航技术相结合，形成微型导航定位授时单元，广泛应用于国民经济、军事领域和国家安全等方面。

2001 年，DARPA 资助科研院所、大学和企业联合研发芯片级原子钟，目前地质学、地震学、石油勘探、电网运营和金融服务行业已从芯片级微波原子钟获益。2019 年，NIST 提出芯片级光钟，其铷原子气室和两个频率梳是用与计算机芯片相同的方法微加工的，这意味着它们可以支持电子和光学的进一步集成，并且可以大规模生产，是商业上可行的紧凑光学原子钟。芯片级光钟有可能变小到可手持使用，可能会在导航系统和电信网络等应用领域取代传统的振荡器。

图 3 美国 DARPA 和 NIST 芯片级时钟部件展示



2、分子钟

分子钟特别是芯片级分子钟（CSMC）是由于原子钟、芯片级原子钟的价格昂贵，但时代发展对高精度时钟有大量需求的背景下，MIT 研究人员于 2018 年首次发明。CSMC 以极性气体分子在毫米波/太赫兹频段的旋转波谱为频率参考，通过硅基 CMOS 片上集成波谱系统 SoC，实现高稳定性、低成本、快速启动的便携式时间基准。目前芯片级分子钟正在逐步向小规模产业化推进，该技术具备取代传统小型化原子时钟和高端恒温晶振的潜力，在 5G/6G 无线接入网络时钟同步和微型定位导航授时（ μ PNT）设备中具有广阔的应用前景。

二、重力测量

重力传感器通过测量地球表面不同位置的重力加速度、重力梯度，来描绘地球内部结构、地壳构造，用以勘探矿产资源、辅助导航等。本节主要介绍基于冷原子干涉的重力传感器，该技术相对成熟，在极度温度下对其质量相互作用的力很敏感，测量精度较高。下文列举了两个最重要的量子重力传感器，分别是应用于地质勘探的原子干涉重力仪和重力梯度仪。

1、原子干涉重力仪

基于原子干涉技术路线的量子重力仪是发展最为成熟的。它可以和重力梯度仪一同使用，进行探测地下结构、车辆检查、隧道检测、地球科学研究，有望降

低土木工程和地质调查的成本,并能够作为一种基础物理应用检测的可能替代方法。

美国、法国等少数几个国家已解决了冷原子干涉系统的长期稳定性和集成问题,正着力于攻克高动态范围和微小型化等应用难题,产品进入实用化阶段。中国的华中科技大学已于 2021 年将研制的实用化高精度铷原子绝对重力仪交付中国地震局地震研究所,是首台为行业部门研制的量子重力仪,意味着中国量子重力仪研究进入国际第一梯队。

2、原子干涉重力梯度仪

基于原子干涉仪的重力梯度仪具有很高的理论测量灵敏度,并可实现低漂移和自校准。此外,它基于全常温固态器件,具备工程化的优势,因而受到广泛关注。其组成一般包括两个分开一定距离的同时运行的原子干涉仪,通过比较两个原子干涉仪对重力梯度进行测量,并且同时差分测量重力梯度具有能抑制共模噪声(例如地面振动噪声和拉曼光相位噪声)的优点。重力梯度仪在资源勘探、地球物理学、惯性导航和基础物理研究等领域具有重要作用。

三、量子导航

根据定位方式的不同,量子导航分为量子有源导航系统和量子无源导航系统(量子惯性导航系统)。目前基于传统机械和光学的惯性导航存在漂移误差。为了满足未来高精度、全地域完全自主可靠的导航需求,原子干涉技术的新型惯性器件被提出和深入研究。本节将主要介绍量子惯性导航系统的原子干涉陀螺仪和原子干涉加速度计。

1、原子干涉陀螺仪

原子干涉陀螺仪基于萨格奈克效应测量载体的旋转角速度,是一种实现高精度角速率测量的新型惯性器件,惯性导航功能通常由它与原子加速度计结合实现。例如,通过加速度计(用于测量车辆的加速度)和陀螺仪(用于测量其旋转)识别运动速度和方向,从而推断出车辆的位置。与传统的惯性测量技术相比,新技

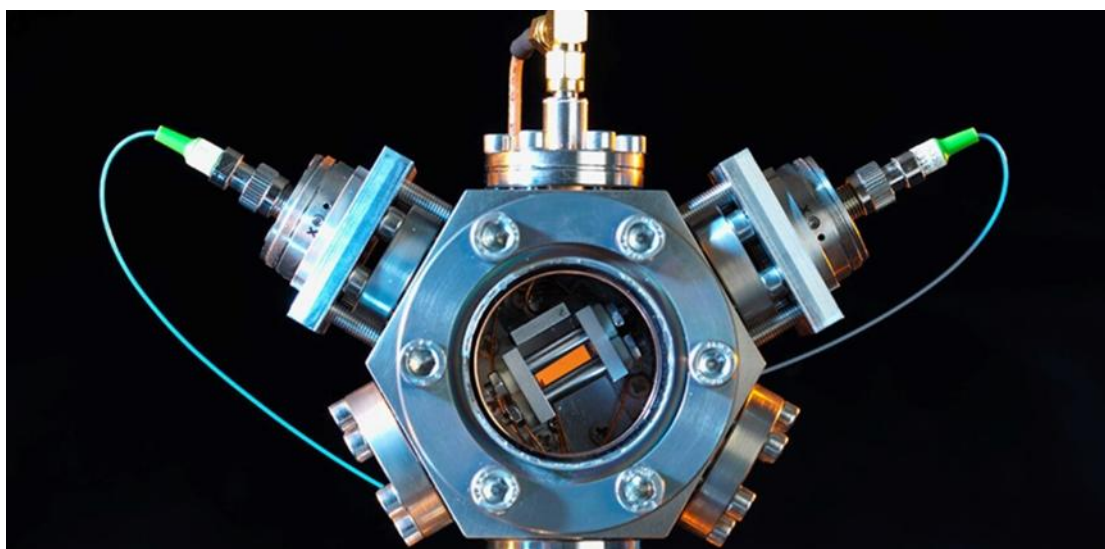
术可能会减少长期误差,并且在某些情况下最大限度地减少了对声纳或地理定位系统的需求。此外,惯性导航系统具有自主性,不受时空和外部环境限制,在国家安全等领域具有重要的应用价值。

2、原子干涉加速度计

原子干涉加速度计发展通常是伴随冷原子干涉陀螺仪。理论上,量子加速度计的精准度比传统惯性器件高几个数量级。例如,2018年英国研制出一种名为量子定位系统(QPS)的量子加速度计,在潜艇行驶中,利用传统的惯性导航系统一天偏移距离能达到1公里左右,而QPS一天的偏移距离只有一米。

冷原子干涉加速度计与原子干涉重力仪原理相近,前者通过拉曼光的传播方向定义惯性测量的方向,后者测量时原子做自由落体,拉曼光沿着重力方向传播,所以冷原子干涉加速度计的性能与重力仪相当。通过拉曼矢量的变换和原子干涉信息的空间解算,可以实现多自由度冷原子干涉惯性测量单元。

图4 M Squared 公司研发的冷原子量子加速度计



四、磁场测量

2003年,科学家们把具有飞特斯拉(10^{-15}T)量级超高灵敏磁场探测能力的磁场探测器统称为超灵敏原子磁力计。当前,量子磁力计主要有超导量子干涉器件(SQUID)和各类原子磁力计,常见的有光泵磁力计(OPM)、非线性磁光旋转(NMOR)磁力计、无自旋交换弛豫(SERF)磁力计、金刚石NV色心磁

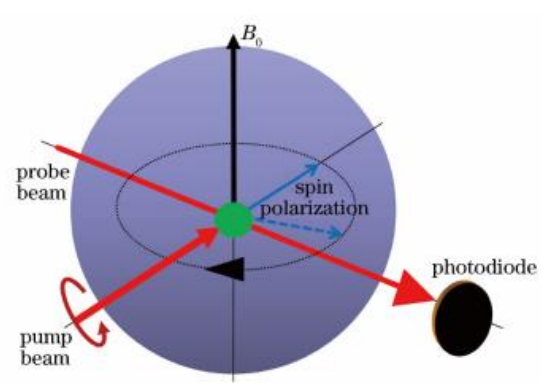
力计等。其中，SQUID 发展时间最久，商业化较为成熟。目前最受关注的磁力计技术路径为：碱金属原子蒸气磁力计（主要包括 OPM 和 SERF 磁力计）与固态体系的金刚石 NV 色心磁力计。

1、超导量子干涉器件磁力计

超导量子干涉器件 (SQUID) 磁力计的原理基于超导约瑟夫森效应和磁通量子化现象，能将磁场的微小变化转换为可测量的电压，在生物磁测量、大地测量、无损探测等方面获得了广泛的应用。目前，SQUID 磁力计在脑磁图方面商业化最为成熟，处于行业主导地位，是应用最广的量子磁力计，但该系统需要液氮对工作环境制冷，从而带来的运行成本高、装置复杂、造价昂贵，以及探头距头皮位置较远带来的测量精准度问题，限制其大范围推广应用。

2、碱金属原子蒸气磁力计

碱金属原子蒸气磁力计无须使用低温超导磁体，仅需要常温或高温的原子蒸气室和光源，是一种有效的、测量微小磁场变化的激光探测仪器。目前最灵敏的原子磁力计的灵敏度已优于 SQUID，可支持生物样品的非侵入性测试和表面科学研究，对空间分辨率自旋成像领域有很大价值。

测量原理	通过激光技术测量磁场中自旋极化原子的拉莫尔进动来实现磁场探测
测量工具	惰性气体原子（如氦和氩）或碱金属原子（如钾、铷、铯）
应用领域	地磁学、生物磁学、星载传感和非破坏性测量等领域
原子磁力计示意图	

原子磁力计目前实用化方向主要是生物医学领域，例如，神经功能研究，为了解和治疗阿尔茨海默病、帕金森病等提供了更全面的支撑。例如，当前医院使用的脑磁图（MEG）诊断方式是通过 SQUID 获得磁场数据，设备占地面积大、价格昂贵、需液氮制冷、维护成本高，不利于大规模推广应用。

SERF 和 OPM 实现了磁力测量设备的小型化。SERF 原子磁力计具有对低频信号敏感、室温运行、功耗低、小型化、可穿戴等优点，分辨率也与 SQUID 接近或超越，适合大规模推广应用。至于 OPM 磁力计，2021 年，诺丁汉大学与 Magnetic Shields 公司合作设立的 Cerca Magnetics 公司，推出了新型的可穿戴式脑磁图扫描仪（OPM+MEG）。

图 5 Cerca Magnetics 公司研发的可穿戴 OPM



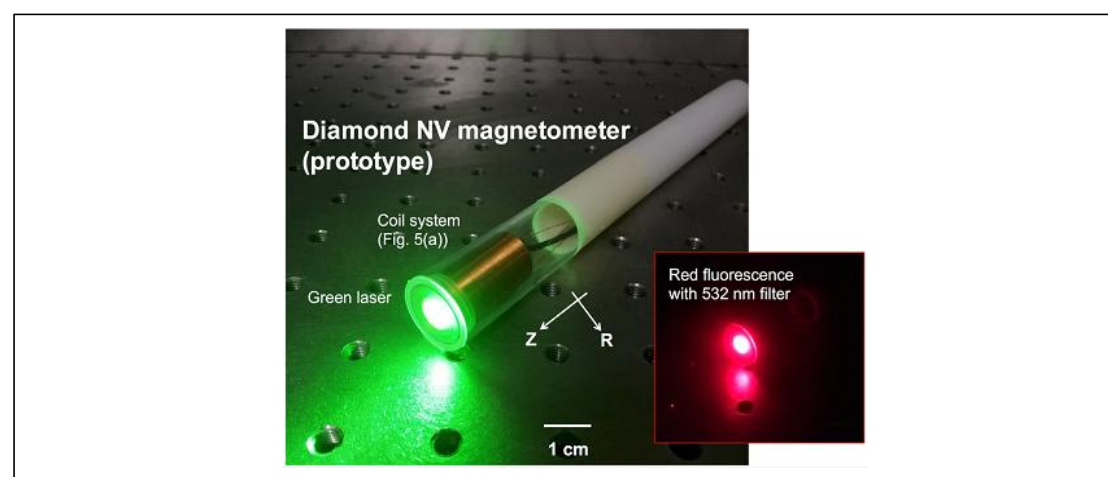
3、金刚石氮空位色心磁力计

前面所述几种原子磁力计所用媒质均为气体状态下的碱金属原子，并用玻璃泡封装做物理探头，而金刚石氮空位（diamond nitrogen-vacancy）磁力计基于固体媒质，其因具有极高的空间分辨能力而受到关注。NV 色心磁力计原理是单电子自旋比特的相干操纵，特点是无需低温冷却即可保证生物相容性和高灵敏度。

当前 NV 色心磁力计对磁场的灵敏度比 SQUID 或原子磁力计差，但该材料的生物信号成像在理论上接近光学衍射极限，有望达到微米级的空间分辨率，这是其他竞争技术无法实现的，适合生物传感的优点，被广泛应用在生物大分子和

基础物理等方面的研究中。在灵敏度指标上，已实现纳米尺度分辨率，可测得单核自旋的灵敏度。与 SQUID 和原子磁力计不同，NV 色心磁力计不需要从地球磁场屏蔽以实现最大值灵敏度，无需磁屏蔽。在应用方面，基于系综 NV 色心的磁力计已测得了蠕虫神经元产生的磁信号、涡流成像、古地磁学中的矿石检测等。

图 6 一种用于生命科学领域的金刚石氮空位色心磁力计原型



五、量子探测成像

随着量子信息技术的发展，量子成像以其探测灵敏度、成像分辨率可以突破传统相机的经典极限限制以及非局域成像、单像素成像、无透镜成像等优点，在高分辨率成像、非相干成像、恶劣条件下成像等方面具有广阔的应用前景，引起了科学家们广泛关注，目前正朝着实用化的方向迈进。

量子成像利用光子相关性，允许抑制噪声并提高想象物体的分辨率。目前技术路径有 SPAD (Single Photon Avalanche Detectors) 阵列、量子幽灵成像（也称重合成像或双光子成像）、亚散粒噪声成像、量子照明等。量子成像应用场景可能为 3D 量子相机、角落后相机 (Behind-the-corner cameras)、低亮度成像和量子雷达或激光雷达等。本节主要介绍量子探测成像的主要应用——量子雷达。

量子雷达

量子雷达作为一种新型传感器有望探测隐形平台，它可以丰富目标信息的维度、消除一些背景噪音，有优于经典雷达的性能，从而识别隐身目标（如飞机、导弹、水面舰艇）。然而隐身系统对军方尤为重要，因此量子雷达尤其受到美国、

俄罗斯和中国（该三国是隐形战机的主要国家）军方的关注，是军方提升攻击和防御能力的重要技术辅助。量子雷达的研究还处在初期阶段，存在一定局限性，例如探测范围不及传统雷达，目前还无作战价值。量子雷达工程化开发仍然存在巨大挑战，同时考虑到造价成本，未来有望部署在一些特殊地区完成任务。

基本原理	采用微波量子或光量子进行探测（量子照明），利用波粒二象性，对粒子性进行测量
测量目标	信息以量子信息的形式调制在单个光子状态上，接收机识别单个光子的能量模式
应用领域	导弹制导、海事监测、气象检测预报、地面警戒和机场交通导航等

量子雷达根据发射端和接收端工作模式的不同为三类：一是量子发射、经典接收，如单光子雷达；二是经典发射、量子接收，如量子激光雷达；三是量子发射、量子接收，如干涉量子雷达和量子照明雷达。

量子雷达的研究主要围绕量子纠缠干涉、量子照明和量子相干态接收三方面。量子雷达研究的典型代表是 2007 年美国国防部高级研究计划局启动的量子传感器项目和量子激光雷达项目。2018 年，在中国国际航空航天博览会上，中国电科展示了一种量子雷达系统。2020 年，由奥地利科学技术研究所、美国麻省理工学院、英国约克大学和意大利卡梅里诺大学人员组成的研究组展示了一种利用纠缠微波光子的量子照明探测技术，基于该技术的量子雷达受背景噪声影响小、功耗低，探测远距离的目标不会暴露，该技术在超低功耗生物医学成像和安全扫描仪方面具有潜在的应用前景。

六、总结与观点

1、OPM 磁力计、冷原子干涉和金刚石氮空位色心是当前重点发展技术

在脑磁测量领域，高灵敏的 OPM 磁力计具有比传统的 SQUID 磁力计低许多的制造和运行成本，这使得 OPM 磁力计在基础物理和实际应用研究中得到大量关注与研究，是目前国际上公认的下一代脑磁图仪器的发展方向。此外，在五个最具潜力的量子传感器物理实现方式中，冷原子干涉和金刚石氮空位色心是目

前各学术团队、各国家发展较快的技术，提及频次高，受关注度高，且已经商业化的量子传感器中，也多为这两项技术，例如冷原子干涉重力仪、量子钻石原子力显微镜等。

2、原子钟技术稳健发展，时钟向更高精度（光钟）和小型化（芯片钟）发展

时钟和时频同步关系到国防安全、社会生活、科学研究的方方面面，甚至其他一些量子精密测量应用都需要依赖原子钟，因此，时钟领域的研究始终是各国的重中之重。原子钟的发展历程最久，最早进入商业化阶段，但当前仅有极少数国家掌握了原子钟技术，这些国家主要研究方向主要为：向更高精度的微波原子钟及光钟技术推进；研究设备的小型化与冷却技术，将量子传感器集成到一个量子惯性测量单元中，用于冷却原子并同时保持相干性的激光冷却装置的小型化（抑制与嘈杂环境的相互作用）。



第三章

主要科技国量子精密测量战略规划

量子精密测量相关的研究已在全球多个国家和地区展开，主要发展地区集中在北美洲、欧洲和亚洲，本章将从这三大地区及其主要量子精密测量参与研究的国家展开，涉及美国、加拿大、英国、德国、法国、日本、中国，这些国家同时也是量子计算和量子通信的主要技术国。

上述七国在国家量子精密测量战略政策的广度、深度和国家支持力度均较为突出，但全球还有其他国家也参与了量子精密测量研究，例如荷兰、芬兰、意大利、瑞士、俄罗斯、澳大利亚、韩国、新加坡等国也有一定积累和优势。

一、北美

北美在全球各大洲中量子精密测量领域整体技术实力最强的地区，主要研究国是美国和加拿大。并且，从发表的高水平期刊文章的研究团队也可看出两国在量子精密测量领域开展了合作研究。

美国

美国自 2018 年发布国家量子倡议 (NQI) 法案以来，量子精密测量作为 NQI 的一个重要发展的领域，几乎涉及所有美国量子技术报告。

表 3 美国涉及量子精密测量的主要报告

时间	发布方	简要内容
2016.02	美国能源部 (DOE)	发布 Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science & Computing 报告，提及多个量子测量相关的前沿案例：1、广泛应用于物理和生命科学的固态量子传感器；2、量子传感器探测超出标准模型的物理；3、用于增强量子传感器的先进材料；4、用于暗扇区物理的量子传感器；5、基于原子干涉测量和光学原子钟的精密时空传感器
2018.09	美国国家科学技术量子信息科学委员会 (NSTC-SCQIS)	发布 National Strategic Overview for QIS 报告，提及用于生物技术和国防的新型传感器；用于军事和商业应用的下一代定位、导航和计时系统
2020.10	美国国家量子协调办公室 (NQCO)	发布 Quantum Frontiers 报告，提及利用量子信息技术进行精密测量
2022.04	美国国家科学技术量子信息科学委员会 (NSTC-SCQIS)	发布 Bringing Quantum Sensors to Fruition 报告，重点讲解原子钟、原子干涉仪、光泵磁力计等技术及其应用，并提出了一些发展建议

下表中提及的大学和研究机构为美国较为典型性的量子精密测量的参与方，此外，哈佛大学、西北大学和耶鲁大学等也有量子精密测量研究。

表 4 美国主要量子精密测量研究机构

研究方	简要内容
Q-SEnSE 研究所	美国国家科学基金会为推进美国 QIS 研究，展开 Quantum Leap Challenge Institute 计划，建立了 3 个研究机构，其中与量子精密测量相关的 Q-SEnSE (Quantum Systems through Entangled Science and Engineering)，由科罗拉多大学博尔德分校领导，研究议程分为三大挑战：1、具有量子优势的超精密传感器和测量；2、应用于量子信息科学的工程原理；3、用于量子传感应用的国家基础设施

芝加哥大学、加利福尼亚大学洛杉矶分校、加利福尼亚大学圣巴巴拉分校和华盛顿大学、SomaLogic	2020年，由NSF Convergence Accelerator资助的“基于量子传感的高通量蛋白质组学技术”项目展开，第一阶段拨款100万美元，联合研究团队将应用量子传感最新技术来改进蛋白质组筛选方法
下一代量子科学与工程中心（Q-NEXT）	美国能源部阿贡国家实验室领导，通过物理、材料和生命科学领域的变革性应用实现超高灵敏度的传感器，包括作为一次拾取一个光子（光粒子）的电磁信号的设备，或者以低于标准量子检测极限的精度测量它们。这是通过量子挤压（一种减少测量不确定性的方法）和纠缠（一种量子现象，其中两个信号在信息上不可分割）的现象来实现的。科学家正在基于量子科学的创新创建用于测量信号的新算法，扩展在广泛频率范围内感知光子的能力，并以创新方式将传感器集成到更大的量子系统中
（天体物理学联合实验研究所）JILA	NIST与科罗拉多大学博尔德分校共建研究所，精密测量是该研究所的一个研究领域，JILA开发的工具能够探测活细胞内的微小结构，监测化学反应的动态，并直接测量可见光的频率。JILA目前对精密测量的研究可以重新定义物理学的标准模型，实现引力的量化，探测黑洞的天文碰撞，寻找暗物质的证据，甚至可以发展我们对DNA和蛋白质的理解，以及随后的疾病从他们的错误折叠中发展而来。
亚利桑那大学	2021年9月，在NSF支持下，开展量子传感器项目，利用量子态的优点构建超高灵敏度的陀螺仪、加速度计和其他传感器
美国国防高级研究计划局（DARPA）	2022年1月，宣布了一项四年期光钟研发计划。该计划旨在开发具有低尺寸、重量和功率的时钟，可以提供比基于GPS的原子钟更好的计时精度和保持时间。如果成功，这些光钟将比现有的微波原子钟提供100倍的精度提高或计时误差减少，并展示改进的纳秒计时精度保持从几个小时到一个月

加拿大

国家研究委员会（NRC）是加拿大最大的研究和技术组织，2021年以来先后推出“量子光子传感和安全（QPSS）计划”、“物联网：量子传感挑战计划”两项与量子精密测量相关的国家科技实施计划。

表 5 加拿大主要量子精密测量研究项目

时间	发布方	简要内容
2021.09	NRC	QPSS计划侧重2个特定应用领域：用于超安全IT数据和网络的量子网络安全；用于自然资源提取和加工以及国防和安全传感的高级光学传感。目标行业：光子学、国防与安全、信息与通信技术、自然资源、能源、环境
2022.03	NRC	重点领域：量子光子学（在光子系统中创建、传输和检测量子信息）、基于芯片的量子系统（将量子系统转移到芯片上，以开辟商业化之路）、量

		子计量（为商业量子系统开发内在的、主要的测量标准以及标准和认证）
--	--	----------------------------------

表 6 加拿大主要量子精密测量研究机构

研究方	简要内容
滑铁卢大学	Institute of quantum computing（IQC，量子计算研究所）下设Quantum Sensors研究方向，通过利用量子力学定律，量子传感器在灵敏度、选择性和效率方面达到了极限。量子传感器在材料科学、神经科学、个性化医疗、改进的癌症治疗、地质勘探、国防等领域发挥着至关重要的作用
Quantum Alberta	由阿尔伯塔创新阿尔伯塔大学（理学院）、卡尔加里大学、莱斯布里奇大学和阿尔伯塔创新科技未来的资助的联合研究团队，研究方向之一为Quantum Sensing，挑战是达到并超越设备的标准量子极限，实现超灵敏传感器并展示在量子网络和量子计算中的应用。方法是以阿尔伯塔省在实验光力学、纳米光子学、单电子晶体管和相干红外激光器方面的卓越差异以及量子计量学和广义相对论的理论专业知识为基础，开发超灵敏的光机械传感器

二、欧洲

欧洲量子精密测量领域技术为实力最强的是英国、德国和法国，同事，瑞士、奥地利、丹麦等国也不同程度的参与了量子精密测量研究，以下主要为英、德、法三国量子精密测量研究情况。

英国

2014 年，英国形成了协调一致的国家量子技术计划（UK National Quantum Technologies Programme: NQTP），该计划是政府科研机构（EPSRC、STFC、IUK、Dstl）与 国家物理实验室（NPL）、商业、能源和产业战略部（BEIS）、政府通信总部（GCHQ）、国防部（MoD）和 国家网络安全中心（NCSC）一起建立发展伙伴关系的十年计划。2020 年，发布的《NQTP 策略意图》报告显示，NQTP 国家中心有 4 大分支，其中与量子精密测量相关的是 UK Quantum Technology Hub Sensors and Timing（英国量子传感和计时技术中心）和 The UK Quantum Technology Hub in Quantum Imaging（英国量子成像技术中心），参与其中的大学包括格拉斯哥大学、赫瑞瓦特大学、伯明翰大学、诺丁汉大学、南安普顿大学、帝国理工学院、布里斯托大学、艾塞克特大学、萨塞克斯大学。

德国

2021 年 3 月，德国发布《国家量子系统议程(Agenda Quantensysteme 2030)》，这是一项十年计划，其中涉及量子精密测量领域。

德国成立慕尼黑量子科技中心（MCQST），参与大学为路德维希马克西米利安大学（LMU）和慕尼黑工业大学（TUM），合作研究所为马克斯普朗克光科学研究所（MPQ）、瓦尔特·迈斯纳研究所（WMI）和德国博物馆。

表 7 德国主要量子精密测量研究项目

项目名称	项目简介	参与方
Quarate	量子雷达研究，项目期间为2021年2月-2024年1月，资助资金310万欧元，由德国联邦教育与研究部资助	德国航空航天中心（DLR）、慕尼黑工业大学（TUM）、瓦尔特·迈斯纳低温研究所（WMI）、罗德与施瓦茨
QMag-量子磁力计	弗劳恩霍夫灯塔项目（Lighthouse Project），项目期间为2019年4月-2024年3月，资助资金1000万欧元，由弗劳恩霍夫协会、巴登符腾堡州资助，主要研究金刚石氮空位色心成像扫描探针磁力计、光泵碱磁强计（OPM），及其在室温下以高分辨率和高灵敏度测量最小磁场	应用固体物理研究所（Fraunhofer IAF）
QUILT（用于高级成像解决方案的量子方法）-已完成	弗劳恩霍夫灯塔项目（Lighthouse Project），使命是通过五个出色的灯塔实验，为量子成像的三个研究领域做出原创性的科学贡献成为这一面向未来的领域的先驱者之一	Fraunhofer研究所（IOF/ILT/IMS/IOSB/IPM/ITWM）、奥地利科学院量子光学和量子信息研究所（IQOQI）、马克斯普朗克光科学研究所

法国

2021 年 1 月，法国宣布了一项主要发展量子科技上游的国家战略 PEPR（Programme et équipement prioritaire de recherche）由 CNRS（法国国家科学研究中心——法国最大的政府研究机构）、CEA（法国原子能和替代能源委员会——法国政府自主的能源、国防和安全、信息技术和衍生技术领域的研究机构）和 INRIA（法国国家信息与自动化研究所）试点，是该战略的上游研究组成部分。此外，参与量子精密测量研究的非私营机构还有 Institut Fourier（傅里叶研究所）、Institut Néel（尼尔研究所）、LPMMC（凝聚态介质物理和建模实验室）、Pheliqs

（光子电子与量子工程实验室）、SPINTEC（自旋电子实验室）、CEA-Tech（工业技术研究实验室）、UGA（格勒诺布尔-阿尔卑斯大学和波尔多大学等）。

表 8 法国主要量子精密测量研究项目

项目名称	项目简介
macQsimal	是FET Quantum Technologies Flagship的一部分，由欧盟资助的Horizon2020研究项目，项目周期为2018年10月至2021年9月，预算1020万欧元，共有14个合作伙伴。项目旨在设计、开发、小型化和集成具有出色灵敏度的先进量子传感器，以测量五个关键领域的物理可观测量：磁场、时间、回转、电磁辐射、气体浓度
QuEnG	量子工程（Quantum Engineering）项目的基本目标是培养下一代量子工程师，包括6个研究领域，量子传感是其一。项目预算820万欧元，其中量子传感项目有两大研究方向：1、开发基于约瑟夫森结阵列的新一代参量放大器，工作在量子极限，具有大带宽和高饱和功率；2、基于纳米机械谐振器中的自旋量子比特的新型量子传感器。氮空位缺陷的自旋具有超长的相干时间，因此可以用光学和微波场对其进行操纵，用于超灵敏的磁场和电场探针。纳米线振动可用作attoNewton范围内的矢量力场传感器
QuantAlps	格勒诺布尔量子科学与技术研究联合会2022年3月成立，汇集了格勒诺布尔18个实验室的200多位科学家。这个由 CNRS、CEA、Inria和UGA支持的跨学科研究联合会旨在汇集物理学、计算机科学、数学和人文科学领域的研究团队，以应对量子技术和数字技术的挑战。制定了5个统一的项目：量子计算、量子模拟、量子传感器、量子通信和由量子技术的跨功能基础知识产生的新协同作用
PEPR	2022年3月，PEPR确定了涵盖4个主题的10个主要项目，开发基于冷原子的量子比特和传感器是4个主题之一，涉及2个主要项目：QubitAF和QAFCA，QubitAF项目旨在通过增加处理的原子数量、验证结果和指定这些平台的性能来改进用于量子模拟的冷原子平台；QAFCA项目旨在开发紧凑且可移动的冷原子传感器来测量重力场，应用于气候变化分析和自然灾害预测，甚至是土木工程或CO ₂ 储存

除了法国政府支持的量子精密测量研究外，法国 Thales（泰雷兹）集团是法国在航空航天、国防、地面交通运输、安全和制造电气系统领域的供应商，每年向量子技术投资 10 亿欧元在量子传感器、量子通信和后量子密码领域。在量子传感器领域的研究为：

1、超导量子干涉器件（SQUID）。以开发微型量子天线，以检测射频频谱中很大一部分的通信信号，并提供竞争优势，特别是在低频下。这些超导装置可以在脑成像和粒子检测等领域应用。

2、固态量子传感器。例如金刚石氮空位色心，已经证明它们能够测量极其细微的磁场。这种类型的超灵敏传感器可用于多种应用，从生物传感器到磁共振成像（MRI）和金属缺陷检测。

3、利用稀土离子表征和处理射频和光信号。基于稀土离子的连续宽带射频频谱分析仪提供了一种缓解网络拥塞和优化频率利用的方法，还可应用于军事情报。

4、用于飞机的基于冷原子技术的量子惯性导航系统。一架从巴黎起飞的仅配备常规惯性导航系统的飞机可以在几公里以内的精度降落在纽约。借助新型量子传感器，飞机将能够以一米以内的精度导航和着陆。

三、亚洲

亚洲的国家中，日本在光技术、机电工程、仪器设备等领域积累深厚，为其发展量子精密测量提供了良好祭奠；中国在量子信息科技领域着力发展量子计算和量子通信并取得较好的成果，但未来潜在的高端仪器设备、传感器等领域“卡脖子”的风险依然很高，中国也逐渐加强量子精密测量领域的发展。

中国

2022 年 1 月，国务院印发《计量发展规划（2021-2035）》，提出加强计量基础和前沿技术研究。实施“量子度量衡”计划，重点研究基于量子效应和物理常数的量子计量技术及计量基准、标准装置小型化技术，突破量子传感和芯片级计量标准技术，形成核心器件研制能力。研究人工智能、生物技术、新材料、新能源、先进制造和新一代信息技术等领域精密测量技术。

2022 年 2 月，科技部发布《“十四五”国家重点研发计划“基础科研条件与重大科学仪器设备研发”重点专项 2022 年度项目申报指南（征求意见稿）》。2022 年 3 月，科技部发布《“十四五”国家重点研发计划“地球观测与导航”重点专项 2022 年度项目申报指南（征求意见稿）》。

表 9 中国主要量子精密测量研究机构

研究方	量子精密测量领域的主要研究内容
中国计量科学研究院	微波频率标准（喷泉钟）实验室、重力基准实验室、量子器件实验室、核磁共振实验室等，例如，芯片级量子计量标准与量子传感实验室研究基于微型原子气室及硅基光子学器件的芯片计量标准、基于原子分子物理的量子传感技术以及相关微纳技术及工艺。研制芯片原子钟等一系列芯片尺度、低功耗、可嵌入式计量标准和量子传感系统
中国科学院量子信息与量子科技创新研究院	量子精密测量研究部，研究原子精密测量、分子精密测量、光钟与时频传输、量子导航、光量子雷达
北京量子科学研究院	量子精密测量研究部，研究超高灵敏惯性测量、超高精度磁场测量、高精度重力测量、时间频率测量、量子导航、量子传感
合肥微尺度物质科学国家研究中心	尖端测量仪器研究部，研究方向有：热力学参数的原级光学计量、痕量同位素原子分子探测、基于原子的磁与惯性测量、基于量子霍尔效应的电阻原级测量、微纳尺度单颗粒分析、微纳结构表面处理新技术、单光子探测大气遥感和目标成像
中国科学院精密测量科学与技术创新研究院	设有15个研究部门，例如精密测量物理研究部、原子频率标准研究部、精密科学仪器研究部、测量与导航研究部、精密重力测量技术研究部、大地测量研究部等，根据不同方向展开量子精密测量相关研究
中国科学院上海光学精密机械研究所	中科院量子光学重点实验室，冷原子频标、原子频标新原理和新方法、空间原子频标、光纤时频传递、冷原子物理、量子简并气体、原子芯片及其应用、超冷极性分子的物性及调控、量子光力学、冷原子体系中的量子信息物理、超冷强耦合等离子体、主动激光强度关联成像、被动多光谱成像、X光强度关联成像、生物医学中的强度关联成像
中国科学院武汉物理与数学研究所	原子频标研究部，目前高精度铷原子频标性能达到世界先进水平，实现了在卫星工程中的应用，并研制出中国首台光频标，即钙离子光频标；波谱与原子分子物理国家重点实验室，开展冷原子物理、原子分子结构与动力学、精密谱测量的研究；中国科学院原子频标重点实验室，围绕国家重大工程应用需求和精密测量物理研究需求，针对原子频标关键科学问题和系统集成，开展应用基础研究和高技术创新研究
中国科学院微观磁共振重点实验室	研究量子精密测量，主要实验手段为核磁共振、电子顺磁共振、光探测磁共振、力探测磁共振等
之江实验室	量子传感研究中心，研究量子精密操控、敏感源制备、精密检测、极限物理量测量等技术，研发极弱力与加速度、极弱磁场、超高灵敏惯性等测量装置
中国科学技术大学	激光痕量探测与精密测量实验室，研究放射性气体同位素测年、氦原子精密光谱测量、大气分子的激光光谱与检测、量子计量、氢分子精密光谱、时间反演对称性的实验检测、原子器件
北京大学	量子电子学研究所，研究冷原子与精密测量、光钟、原子钟和精密测量、核磁共振成像；前沿交叉学科研究院-磁共振成像研究中心，研究脑成像技术在脑科学和临床医学的应用
清华大学	物理系，研究领域涉及量子物态与材料、量子计算与通信、量子精密测量、量子器件等多个方面 低维量子物理国家重点实验室，研究低维量子系统和材料的生长动力学和制造、极端条件下的精密测量、低维量子系统中的新量子现象研究、低维量子系统的理论与设计 精密测试技术及仪器国家重点实验室，研究激光及光电测试技术、传感

	及测量信息技术、微纳制造与测试技术以及制造质量控制技术
国防科学技术大学	量子信息学科交叉中心，研究量子关联成像、量子频标、激光陀螺仪、新型惯性器件等，有半导体泵浦高能激光技术国防科技联合重点实验室、高能激光技术湖南省重点实验室
北京航空航天大学	大科学装置研究院，量子精密测量与传感方向，研究基于原子自旋SERF效应的超高灵敏磁场测量、基于原子自旋SERF效应的极弱人体磁源成像、基于原子自旋SERF效应的超高灵敏惯性测量、基于金刚石色心的量子精密测量技术；惯性导航与智能导航方向，研究原子自旋陀螺仪技术、核磁共振陀螺仪技术、机载高精度POS与惯性稳定平台技术
华东师范大学	精密光谱科学与技术国家重点实验室，研究光场时频域精密控制、原子分子精密光谱与精密测量、超灵敏精密光谱与传感、超快物性精密测量与调控研究、微纳光子器件制备与集成、片上精密时频与量子测量集成
北京邮电大学	理学院设有微纳光子学方向与新型信息功能材料与器件方向，研究新型光子学材料与器件、低维纳米材料制备与光电性能、半导体低维结构中的光学性质、纳米复合材料的光电性质等方向
浙江大学	光学研究所研究冷原子物理与量子光学、激光物理及应用、光信息传输与处理。实验室以微波量子和光子为载体，建立从量子材料合成、微纳器件设计制备、全光子量子模块开发、到量子计算和模拟云平台实现的全链条实验平台
华中科技大学	引力中心发展精密扭秤、空间惯性传感器、冷原子干涉、激光测距、MEMS和超导等精密测量实验技术。研究领域和方向有引力理论和实验、引力波探测、原子分子光学与精密测量物理、精密重力测量与地球物理等
山西大学	光电研究所设量子测量和通信实验室，开展空间和时间多模非经典态光场的产生及量子精密测量研究，包括连续变量超纠缠态的产生，空间压缩纠缠态的产生，空间位移、倾斜及光束轨道角动量及空间转角精密测量，时域飞秒脉冲压缩纠缠态的产生及时间精密测量研究，波粒二象性与不确定性原理的实验证明

日本

Q-LEAP 是日本的量子科技计划，执行期是 2018 年至 2029 年，在量子精密测量领域，日本发布了 2 项旗舰项目和 7 项基础研究。

表 10 日本 Q-LEAP 量子精密测量的旗舰项目

研发项目名称	机构
通过固态量子传感器的先进控制创建创新的传感器系统	东京工业大学工程电气电子系统学部
创造量子生命技术与创新医学与生命科学	美国国立量子与放射科学与技术研究院量子生命科学研究所

其中，通过固态量子传感器的先进控制创建创新的传感器系统项目的研发目标是：开发具有高灵敏度和高空间分辨率的脑磁图（MEG）原型；开发用于监控电池和功率设备中的电流和温度的系统的原型。

表 11 日本 Q-LEAP 量子精密测量的基础研究

研发项目名称	机构
利用高灵敏度重力梯度传感器建立地震预警方法	东京大学理学研究科
创建光子数识别量子纳米光子学	东北大学电气通信研究所
双压缩量子噪声的量子原子磁力计的开发	学习院大学理学院物理系
多维量子纠缠光谱技术的发展，用于阐明复杂分子系统的光合功能	电气通信大学信息科学与工程研究生院
使用量子纠缠光子对的量子测量装置研究	京都大学工学研究科
提高量子传感灵敏度的复合缺陷材料科学	国立材料科学研究所、国立材料科学研究所
开发下一代高性能量子惯性传感器	电讯大学激光新一代研究中心

四、总结与观点

1、全球主要科技国已部署量子精密测量战略，实施计划基本明确

各主要科技国都在近些年以官方形式宣布将量子精密测量纳入重点科研计划，并上升至国家战略层面。不同国家实施细节、公布方式有所差异，可能是国家对相关技术的认知度、本国相关技术先进程度等造成的。例如，仅有美国发布了独立的量子传感器报告，并将美国过去和未来研究的量子传感器作以介绍，明确了美国量子传感器未来主要发展方向及其潜在价值。其他国家并未发布独立的量子传感器报告，与量子传感器相关的实施策略往往出现在量子科技报告（含量子计算、量子通信、量子精密测量）中。中国的“十四五”规划或其他纲领性文件中并未详细指明中国在量子精密测量里将要取得哪些重点突破。不过，从中国各主要量子精密测量科研院所和大学的研究方向中可初见端倪。英国已明确 2 大研究中心，专注一量子精密测量领域的研究。其他上述主要科技国也在官方渠道（网站、报告等）不同程度指明量子精密测量发展计划。

2、各国研究量子精密测量的细分领域、研究主体、研究方式有所差异

从各国的量子精密测量技术实施计划来看显示，不同国家支持和推进量子精密测量技术发展的方式有一定的差距，这和国家经济实力、科研机构数量、量子相关技术积累程度、科研人才数量有着密切关系。例如，德国作为工业强国，有与其他国家不同的科研技术转化组织和体系，像 Fraunhofer（弗劳恩霍夫）这样以利用科学技术创造新型产品和应用的模式，有利于新技术的推广。再比如，日本将“利用高灵敏度重力梯度传感器建立地震预警方法”作为量子战略的基础研究项目，主要原因可能还是日本是地震多发的国家，且日本当前量子重力仪领域无突出产品或技术。

3、欧美国家合作紧密程度高于亚洲国家

绝大多数国家的科技政策或量子精密测量发展政策中都表现出合作的意愿和态度。欧美国家在语言和文化上与亚洲国家还是存在较大差异，受语言、文化、地域等影响下，从发表的高水平论文作者及机构、量子技术研究联盟、量子产业生态联盟、国家量子合作签署等方面都可以看出，欧美在量子技术发展的各个领域合作频繁、涉及面较广。例如，尽管中国始终强调国际化、开放化，也有一些顶尖学府长期与国外研究团队合作，但受限于语言、文化、政治等因素，以及全球新冠肺炎疫情导致的限制出行政策，都使得在前沿技术的共研、交流、合作方面，与世界主要科技国的合作紧密程度不及欧美。

第四章

量子精密测量产业链

量子精密测量产业的形成时间比量子计算和量子通信久，已形成了原子钟、核磁共振等为代表的第一次量子革命下的产物，其产业链已较为清晰。当前，芯片级原子钟、芯片级分子钟、光钟、光泵磁力计（应用于脑磁图）的成熟度也越来越高，走出实验室，逐步展开应用。本章力求展示一个较为清晰的量子精密测量产业链生态情况，供学术界、政界、工商界参考。

另外，产业链的上游领域往往容易被忽视，尤其是材料领域，例如，提供应用于氮空色心技术的金刚石的公司、提供量子传感器芯片制作材料的公司，乃至提供稀土矿的公司，这些上游产品/技术/原材料也会一定程度上限制产业快速发展壮大。同时，工程化、工业化能力往往无法直接体现在产业链上中下游中，但这是限制产品规模化、产业化应用的一个重要关卡。在发展量子精密测量产业，打通上下游，联合各环节公司，才能最终推动产业发展。



注 1：以上公司 LOGO 仅出现 1 次，个别公司产品涉及多个领域，例如，AO Sense 提供原子钟和量子重力仪；国仪量子提供量子磁测量和量子科研仪器。

注 2：目前量子雷达已有国耀量子和中国电科涉及，但全球商业化公司极少，纳入“其他量子设备”中。

1、量子时钟时频

目前商业化的产品主要是各类微波原子钟（铷钟、氢钟、铯钟）、微波芯片级原子钟，以及时频同步类产品（协议）。正在商业化的有光钟和芯片级分子钟，例如，瑞士 Oscilloquartz 公司的光学铯原子钟解决方案已于 2022 年 4 月在日本 TOYO Corporation 部署。

全球拥有原子钟技术的国家中，美国和欧洲的商业化公司较多；其他地区商业化的公司极少，技术主要掌握在国家计量标准制定及研究相关院所。全球原子钟供应商有：氢原子钟——Symmetricom（美国）、KVARZ（俄罗斯）、T4 Science（瑞士）、上海天文台（中国）；铯原子钟——Oscilloquartz SA（瑞士）、Microchip（美国）、天奥电子（中国）、星汉时空（中国）、同相科技（中国）；铷原子钟——VREMYA-CH（俄罗斯）、Stanford Research Systems（美国）、Frequency Electronics（美国）、SpectraTime（瑞士）、AccuBeat（以色列）、航天科工（中国）。

2、量子磁测量

尽管磁测量可以应用在地理地质、生物医药等领域，但目前商业化较为成熟的是 SQUID 磁力计（脑磁、心磁、生物磁），OPM、NMOR、SERF 磁力计的研究已展开多年，OPM 的商业化也进入初期。

以中国为例，近几年招投标信息显示，脑磁图设备的采购方主要为医院、大学和研究院所，上海瑞金医院、首都医科大学附属北京天坛医院、四川大学华西医院等均引进了 MEGIN 公司的脑磁图设备，提供癫痫诊断和癫痫灶术前定位、神经外科术前脑功能区定位、精神病和心理障碍疾病诊断、缺血性脑血管病预测和诊断、外伤后大脑功能的评估鉴定、司法鉴定和测谎。中国科学院、深圳大学等高校也引进脑磁图设备。磁力计及生命健康领域磁测量仪器设备的全球供应商有：SQUID 技术——MEGIN（芬兰）、Compumedics Neuroscan（澳大利亚）、CTF MEG（加拿大）、RICOH USA（美国）、苏州卡迪默克（中国）、漫迪医

疗（中国）；OPM 技术——QuSpin（美国）、Cerca Magnetix（英国）、FieldLine（美）、昆迈医疗（中国）、未磁科技（中国）。

3、量子重力测量

量子重力测量的主要产品有冷原子干涉重力仪、冷原子陀螺仪与加速度计，但这一领域当前成熟的公司极少，目前市场中的参数较好的重力仪是超导重力仪，其原理不同于基于冷原子干涉技术的量子重力仪。原子干涉重力仪具有更好的测量精度与稳定性，且可以实现测量绝对重力值和监测相对重力变化的双重功能。目前量子重力仪供应商有 Muquans/iXblue（法国）、AOSense（美国）、Teledyne-e2v（英国）、中科酷原（中国）、微伽科技（中国）等，主要为地理地质研究、海洋研究、海上作业、惯性导航、航空器研究等相关的研究所、大学和相关政府单位、企业提供产品与技术。

图 8 量子重力仪外观对比图



4、量子科研和工业仪器

量子精密测量科学仪器设备主要为生物医药、材料、纳米技术等领域提供实验室或工业领域高端仪器设备，AFM 和 EPR/ESR 都是成熟的商业化产品。

AFM 是一种扫描探针显微镜（SPM），是研究纳米尺度样品最通用、最强大的显微镜技术，AFM 能够以原子级分辨率生成具有埃量级高精度信息的图像。AFM 的供应商较多，北美有美国和加拿大；欧洲有英国、德国、法国、瑞士、俄罗斯、奥地利、意大利、匈牙利；亚洲有日本、以色列、中国。根据 2020 年中国采购 AFM 中标情况，供应商主要选中 Bruker（美国）、Asylum Research Oxford

Instruments（英国/美国）、Park Systems（韩国）、Nanosurf（瑞士）、Shimadzu/岛津制作所（日本）、Scient Omicron（德国）、SPEC 集团（德国）、国仪量子（中国）等。

EPR 是一种通用的无损 EPR 分析技术，用于检测、分析和确定物质中不成对电子的特性，研究含自由基或过渡金属离子样品的微观结构信息和动态信息。EPR/ESR 的供应商有 Adani Systems（美国）、Active Spectrum（美国，EPR 业务被 Bruker 收购）、Magnettech GmbH（德国，EPR 业务被 Bruker 收购）、JEOL（日本）、国仪量子（中国）等。根据近些年中国采购 EPR 的中标情况，供应商主要选择 Bruker（美国）、国仪量子（中国）。

二、产业链主要市场参与者概况

根据量子精密测量产业生态图，将中游市场化的供应商进行国家/地区、技术领域标注，可以看出，全球当前主要的量子精密测量市场参与者主要分布在北美（美国 22 家、加拿大 2 家）和欧洲（25 家）；其次是亚太地区，中国（17 家）、日本（6 家）、韩国（2 家）、新加坡（1 家）、澳大利亚（3 家）。美国、欧洲、中国在时间时频、磁场测量、重力测量、科研和工业仪器等方面均有涉及。中国还在量子雷达领域拥有原型机和商业化公司，但中国。日本与韩国目前在磁场测量、科研和工业仪器方面发展比较成熟，但在时间时频与重力测量领域仍保持在实验室研究阶段，还没有企业可以提供具体产品。加拿大与澳大利亚在磁场测量、科研和工业仪器方面有所涉及。新加坡在重力测量领域有一家初创公司提供量子重力仪相关产品与服务。

Microchip Technology Incorporated

美国公司，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，用于地震研究或油气勘探的水下传感器、军事系统（包括拆卸式简易爆炸装置干扰器、拆卸式无线电、GPS 接收器和无人驾驶飞行器），2001 年由 DARPA 资助，参与者包括 NIST、桑迪亚实验室、Symmetricom（现为 Microchip, Microsemi 的母公司）、Teledyne Scientific 公司等。

图 11 芯片级原子钟示意图



AO Sense

美国公司，成立于 2004 年。公司在精密导航、时间和频率标准、重力测量领域，的创新原子光学传感器的领先开发商和制造商。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 DARPA、空军、陆军、海军、NASA、NSF、DTRA 和情报界资助的众多政府资助项目设计和建造了最先进的冷原子技术。曾经获得过美国国防部 SBIR/STTR 项目资助。

ColdQuanta

美国公司，成立于 2007 年。公司专注于冷原子量子技术，当前产品包括特高压玻璃电池、冷原子源、磁光阱、阿尔伯特：量子物质机器、俘获离子装置、原子钟、射频接。公司已为国防部、海军研究办公室开发便携式原子钟，这一新的原子钟可以实现精确计时，为基础设施提供 GPS 支持。

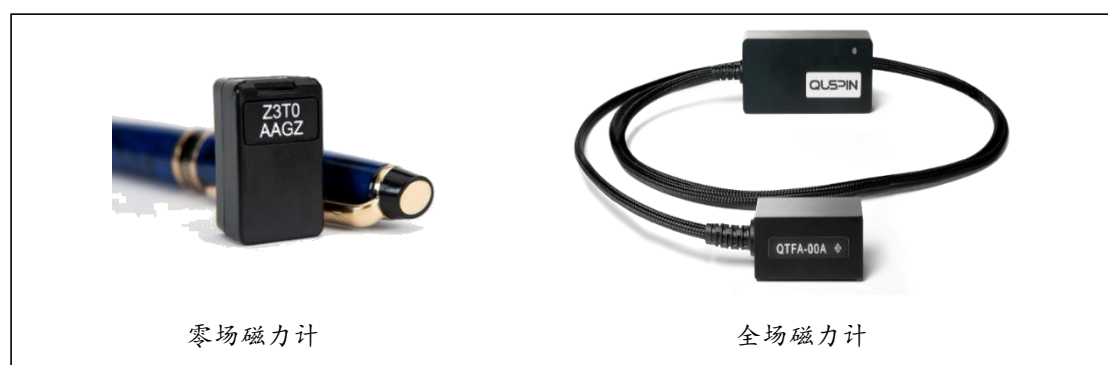
图 12 ColdQuanta 公司原子钟产品图



QuSpin

美国公司，成立于 2012 年，专注于光学原子磁力计（OPM）制造，为生物医学和地球物理应用制造光学原子磁力计。在量子精密测量领域，目前已拥有零场磁力计（QZFM）与全场磁力计（QTFM）。零场磁力计是一种超灵敏矢量磁力计，可在低场环境中工作，主要应用在脑磁图（MEG）、胎儿心磁图（fMCG）、磁松弛测量（magnetic relaxometry）等方面。全场磁力计是一种紧凑的高灵敏度标量磁力计，可以在地球的磁场中运行，可以解决非常微小的场变化，主要应用在地球物理学、空间、矿物和能源勘探、未爆弹药探测等方面。

图 13 Quspin 公司磁力计产品图



2、欧洲

Bruker

起源于德国，成立于 1960 年，在美国纳斯达克证券交易所上市，已发展为全球性企业，公司产品与解决方案分为磁共振（包括电子顺磁共振波谱仪等）、显微镜（包括原子力显微镜等）、元素分析仪、成像解决方案、半导体解决方案等 15 类产品与解决方案，应用在生命科学研究、制药、生物技术、应用市场、细胞生物学、临床研究、微生物学、体外诊断、纳米技术和材料科学研究领域。公司是磁共振波谱仪器的市场领导者，包括 NMR、时域 NMR、EPR 和临床前磁共振成像（MRI），是应用于 NMR 和 MRI 解决方案的超导磁体和超高磁场磁体的领先制造商。

TOPTICA Photonics

德国公司，成立于 2003 年，是一家光学仪器技术公司，在量子精密测量领域，公司提供可调谐二极管激光器，主要用于极限测量属性和测试理论，例如时间和频率、基本常数和基本理论检验、原子干涉仪、旋转和加速、基于激光的痕量气体分析（ATTA、RIMS）、用于 B 场测量的非线性磁光旋转、心磁图（测量心脏磁场）、脑磁图（测量大脑神经元磁场）。

M Squared Laser Ltd.

英国公司，成立于 2003 年，是一家光子学和量子技术公司，已为前沿科学、量子技术、化学传感（环境和遥感、国防和安全）、生物光子学（显微镜和疾病检测）等应用领域提供解决方案。产品分为四类：激光、显微镜、量子、仪器仪表（ICE BLOC 系列，用于实验室的激光平台）。作为量子传感器、计时和计算领域的全球领导者，M Squared 已经实现了多项英国第一台商用量子重力仪和第一台商用量子加速度计，其产品组合还包括互补的光学系统和电子产品。凭借在高端量子产品工程 and 商业化方面的强大血统，该公司正在开发基于中性原子和离子的量子计算机、用于重力、加速度和旋转的惯性传感器以及量子计时设备。

μQUANS SAS

法国公司，成立于 2011 年，专注于高性能仪器，是世界上第一家在工业规模上开发激光冷却量子操纵技术的公司，提供了基于这一突破性技术的完整解决方案，包括量子重力仪、原子钟、光纤频率传输系统和高性能激光系统。公司曾为法国国防部研制舰载量子重力仪，曾在意大利埃特纳火山部署量子重力仪。公司于 2021 年被 iXBlue 收购，同时被收购的还有 Kylia（成立于 2003 年，光学元件和仪器领域），iXBlue 旨在成为欧洲光子学和量子技术的新领导者。

Qnami AG

瑞士公司，成立于 2017 年，技术起源于瑞士巴塞尔大学物理系，已推出第一台氮空位中心技术的扫描探针量子显微镜系统 ProteusQ™，配备了最先进的电子设备和软件。它的应用包括材料表征、集成电路中的电流成像、自旋电子学、非易失性存储器、二维材料、生物系统、量子设备等。公司开发了专为纳米级成像设计的量子传感技术，实现从科学仪器到计量学和医学成像的应用。

2020 年 7 月，Qnami 和 HORIBA 公司（先进研究和工业提供测量和分析解决方案的全球领导者）宣布达成合作，主要为：继续在量子原子力显微镜方面联合研究，利用各自在近场光学和材料科学领域的互补核心竞争力：表面分析和纳米显微镜、基于金刚石的量子传感和磁力测量；HORIBA 将为 Qnami 提供原子力显微镜核心组件；HORIBA 将通过其在欧洲、中国、日本亚洲其他地区和美洲建立的分支机构网络成为 Qnami ProteusQ™的全球独家经销商。

图 14 Qnami 公司 ProteusQ 量子显微镜系统产品图

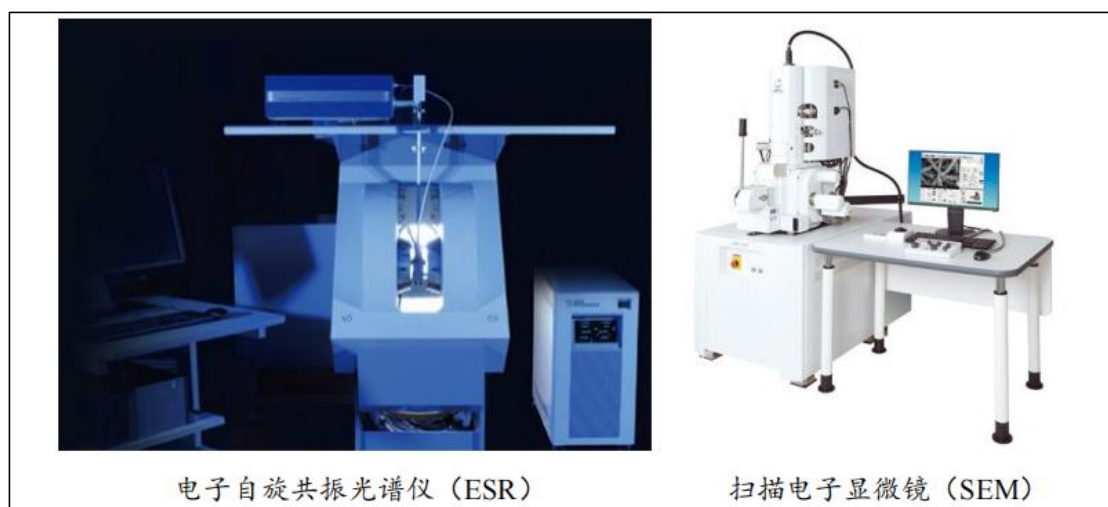


3、亚洲

JEOL

日本公司，日本电子株式会社，成立于 1949 年，在东京证券交易所上市。公司业务为科学计量仪器（电子光学仪器、分析仪器、测量仪器）、半导体设备、工业设备、医疗设备的制造、营销、开发和研究，相关产品和零部件的加工、维修和服务，以及采购和采购周边产品的销售。主要产品为透射电子显微镜（TEM）、扫描电子显微镜（SEM）、核磁共振波谱仪（NMR）、电子自旋共振光谱仪（ESR）、质谱仪（MS）、薄膜形成和材料加工工业设备等。

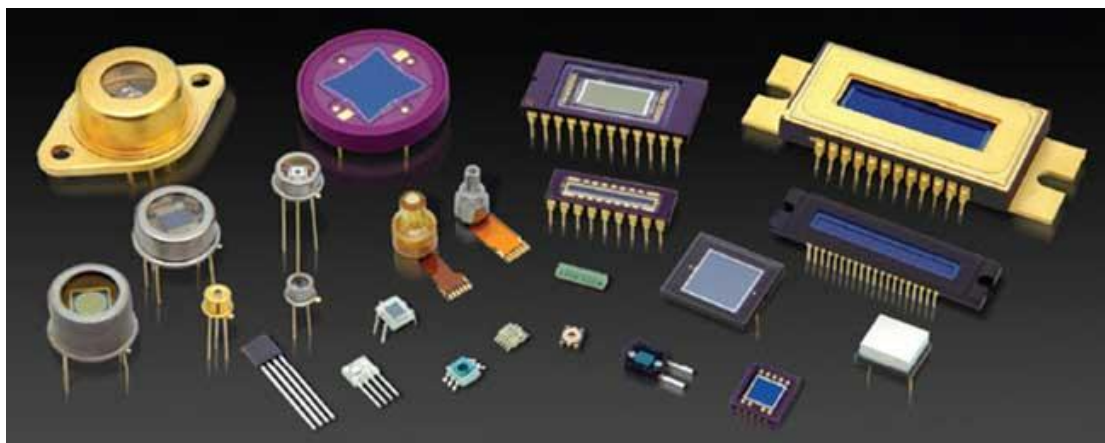
图 15 JEOL 公司 ESR 和 SEM 示意图



HAMAMATSU

日本公司，滨松光子学，成立于 1953 年，在东京证券交易所上市。主要产品线为光电倍增管、成像设备、光源、光半导体、成像和分析系统，为量子成像、量子通信、量子计算提供组件支持。以量子成像为例，公司提供提供 ORCA-Quest qCMOS 相机，能够解析光子数；提供 ImageEM X2 EM-CCD 相机，可以检测到具有足够灵敏度的单光子，使研究人员能够观察到量子纠缠等现象；提供 LCOS-SLM 反射型空间光调制器，可以通过液晶自由控制光的相位；提供高压钠灯，一种能够以高灵敏度、快速响应和低抖动检测光子的光子探测器。

图 16 HAMAMATSU 公司产品示意图



国仪量子（合肥）技术有限公司

中国公司，成立于2016年，技术源于中国科学技术大学中科院微观磁共振重点实验室。国仪量子是一家以量子精密测量为核心技术、以高端科学仪器为主要产品的国家高新技术企业，主要从事量子精密测量、量子计算和高端科学仪器等技术和相关产品的研制、生产与销售。公司拥有量子传感器加工工艺、高精度量子调控技术、量子原级基准、超越经典极限的弱信号探测等世界领先的核心技术，产品已交付到海内外数百家客户，同时致力于用量子技术赋能各行各业，在石油勘探、生命科学、先进材料、能源电力等领域实现了示范应用。公司总部位于合肥，在北京、上海、广州、无锡、重庆等全国各地设有分、子公司和业务团队，为各行各业客户提供全面的解决方案和优质高效的科研服务。

图 17 国仪量子公司产品图



中国电子科技集团有限公司

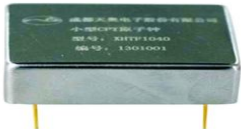
中国公司，成立于 2002 年，是中央直管企业，下设多个二级单位和上市公司，目前旗下单位在量子雷达、量子成像、量子导航等方面开展了大量前沿性基础研究和关键技术攻关。

2020 年，中电科与南京大学合作研制了超导阵列单光子探测系统，实现全天时、超衍射极限三维成像，实现了对数百公里外移动小目标的实时跟踪探测，是单光子雷达（一种量子雷达）技术的应用，这意味着未来一部分隐形战机将有望通过该系统被识别。目前中电科已具备单光子探测器探测效率、暗计数、线性度、后脉冲概率、时间抖动、死时间等相关特性参数的测试能力，具备国际领先的技术指标。

成都天奥电子股份有限公司由中电十所控股 43.3%，成立于 2004 年，于 2015 年上市（天奥电子，002935）。根据公司 2021 年度报告，产品主要分为北斗卫星用产品（2021 年营收 2335 万元）、频率系列产品（2021 年营收 6 亿元）、时间同步系列产品（2021 年营收 4 亿元）。2021 年，公司研制的 TA1000 型 1 级节点时钟，通过中华人民共和国工业和信息化部电信设备进网测试认证，率先成为中国首款获得电信设备进网许可证的 PRC（全国基准时钟）节点时钟，准许接入公用电信网使用。这标志着 TA1000 型 1 级节点时钟设备可作为全国基准时钟源，为数字同步网提供更高精度的时间频率基准，保障数字同步网的可靠运行。

表 12 成都天奥电子股份有限公司原子钟产品

产品型号	产品样图	产品简介
XHTF1021 小型铷原子钟		特点：小型化，稳态电压 12V 低电压供电、低功耗，RS-232C 串口通讯，外秒同步、输出标准秒。 用途：广泛用于航空、航天、通信、导航、电力等领域。
TA1000 激光抽运小型铯原子钟		特点：采用激光抽运和激光检测技术；高性能、高可靠、长寿命；运行状态自动监控与记录；宽工作温度范围。 用途：作为一级频率标准，可广泛应用于高精度守时与授时、时频计量等领域。

XHTF1040 CPT原子钟		特点：微型化；3.3V低电压供电、低功耗；UART串口通信；与SA.45s引脚兼容；外秒同步及1PPS输出；TOD短报文输出。 用途：卫星导航、水下导航、数字通信、网络同步、轨道交通。
--------------------	---	---

成都中微达信科技有限公司

中国公司，成立于2017年，主要致力于量子精密测控、量子传感器和基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的高效能实时计算平台的研制。在量子计算方面：公司提供应用于硅基量子比特和大规模(>100-bit)超导量子比特的常温测控系统解决方案，并在用户平台上得到了物理验证，形成了高性能、高集成度、可扩展的低噪声电压单元、任意波形产生单元、射频任意波形产生单元、量子分析单元、微波源单元等系列单元产品；公司目前正致力于低温CMOS集成电路技术研发，瞄准实现千量子比特规模的低温(液氮4K)集成量子计算测控阵列芯片，为具备实用意义的量子计算机硬件服务，已完成数轮芯片流片测试。在量子传感器方面：公司开发了全球首款芯片级分子钟，目前此产品已有非典型封装样品，正在逐步产业化；此外，公司还将开发量子温度传感器芯片、量子时频同步等创新产品。

图 18 成都中微达信科技有限公司芯片级分子钟原型产品



国耀量子雷达科技有限公司

中国公司，成立于2017年，公司核心技术包括红外量子探测技术、高灵敏混合探测技术、红外窄线宽高稳频激光器、纳米级形变自动反馈调节技术与AI智能识别实时动态示踪算法，主要产品涉及光量子芯片、测控器件、光量子雷达设备领域，包括颗粒物光量子雷达、光量子频率转换器、周期性极化铌酸锂波导

光量子芯片等。面向大气环境污染排放监控、大气气象变化监控、城市智慧交通出行、机场气象变化监控保障、国防军事应用、科研教学实验等需求，公司为用户提供网格化监测的软硬件解决方案。

中科酷原科技（武汉）有限公司

中国公司，成立于 2020 年，致力于原子重力传感器及其相关光学、电子等产品的研发和技术服务，为重力精密测量相关研究和应用提供可靠的产品和解决方案，先后研制了国内首套原子重力仪、原子重力梯度仪等量子传感器。公司由中国科学院精密测量科学与技术创新研究院（由中国科学院武汉物理与数学研究所与中国科学院测量与地球物理研究所融合组建）持股，技术源自精密测量院冷原子物理研究团队，是国内最早开始中性原子量子信息技术研究的团队之一。2010 年便研制出高精度的原子绝对重力仪实验室样机，测量精度达到了 $4\ \mu\text{Gal}$ ；2020 年团队将原子重力仪相关技术实施了科技成果的转移转化，成立了产业化公司，同时研制出了第二代集成化原子重力仪 WAG-C5-02，测量精度已达到 $2\ \mu\text{Gal}$ 的世界先进水平。

第五章

量子精密测量投融资及发展预测

量

量子精密测量领域的投融资事件相较于量子计算和量子通信是较为分散的,这是因为量子精密测量领域划分为多种不同属性的精密测量产品和技术,并且,一些公司的产品和技术无明显的针对性,在量子计算、量子通信和量子精密测量领域应用,不易表现出清晰的量子精密测量产业属性。另一方面,量子精密测量领域有诸多成立时间久的公司,在持续经营的过程中便少有外部投资情况。

近年来,一些逐渐成熟的技术陆续走出实验室,出现了多家量子精密测量领域的初创公司,它们获得了政府和社会的投资。本章第一部分呈现一些近年来获得资金投入公司的情况;第二部分对未来的市场走向和规模进行一定的预判;第三部分对未来量子精密测量领域的发展做出一些展望。

一、投融资情况

量子精密领域的公司按成立时长分为两大类：一类是成立较久的公司，发展时间长，经营稳定，量子技术伴随其设立而发展至今，例如 Geometrics（成立 53 年）；另一类是随量子科技发展热潮而新成立的初创公司，成立时间一般在 2000 年以后，例如 Muquans（成立 11 年）、国仪量子（成立 6 年）等。

表 13 量子精密测量领域涉及的公司获得资金投入情况

序号	公司名称	业务	国家	轮次	时间	金额	出资方
1	Qnami	量子传感技术 研发商	瑞士	A 轮	2021.05	400 万瑞士法郎	Runa Capital、SIT Capital、Zürcher Kantonal Bank、Verve Ventures、Quantonation、High-Tech Gründerfonds
				种子轮	2019.11	260 万瑞士法郎	Quantonation、Zürcher Kantonal Bank、Verve Ventures、High-Tech Gründerfonds
				Pre-A 轮	2019.03	未披露	Eurostar
				天使轮	2018.06	23 万瑞士法郎	Venture Kick
				种子轮	2017.08	1 万美元	Venture Kick
2	国仪量子	量子精密测量 仪器研发商	中国	C 轮	2021.12	数亿元人民币	国风投基金、中科院资本、科大国创、IDG 资本、合肥产投、松禾资本、前海母基金等
				B 轮	2021.01	数亿元人民币	高瓴创投、同创伟业、基石资本、招商证券、博时基金
				A+ 轮	2019.12	未披露	宣城火花创投
				A 轮	2018.09	未披露	科大讯飞、科讯投资、科大国创、科大控股
				股权融资	2018.03	未披露	树华科技
3	M Squared	光子学和量子 技术	英国	股权融资、债权融资	2020.10	1250 万英镑(债权融资)、2000 万英镑(股权融资)	英国桑坦德银行(债权融资)、苏格兰投资银行(股权融资)
				赠款	2019	350 万美元	Scottish Enterprise(苏格兰国家经济发展机构)
4	ColdQuanta	量子计算、传	美国	A+ 轮	2021.05	2000 万美元	Foundry Group、Global Frontier Quantum Opportunity Fund、LCP

		感、网络的冷原子技术					Quantum Partners 和 Maverick Ventures
				A 轮	2020	3200 万美元	Foundry Group、Global Frontier Investments 和 LCP Quantum Partners
				种子轮	2019.11	1000 万美元	Maverick Ventures
				种子轮	2018.07	680 万美元	Maverick Ventures、Global Frontier Investments
5	未磁科技	量子弱磁测量核心技术平台	中国	股权融资	2021.07	未披露	IDG 资本
				股权融资	2021.05	未披露	雅瑞资本、北航投资、启迪之星、东升博展投资
				天使轮	2020.10	数千万人民币	荷塘探索国际健康
6	中科启迪光电子	量子精密测量与传感技术研发商	中国	股权融资	2021.06	未披露	启迪金控
7	Q-Ctrl	量子基础设施软件（太空传感器）	澳大利亚	B 轮	2021.11	2500 万美元	Airbus Ventures、Ridgeline Partners 等
8	Siloton	光学相干断层扫描	英国	种子轮	2022.02	47 万英镑	Quantum Exponential Group PLC、Evenlode Impact
9	Zero Point Motion	光子惯性传感器芯片	英国	种子轮	2022.03	258 万英镑	Verve Ventures 和 u-blox
10	中科酷原	冷原子技术	中国	A 轮	2022.03	数千万人民币	中科创星

注 1：公开资料显示，国仪量子已获得投融资总额近 10 亿元人民币，且 B 轮与 C 轮均达到数亿元人民币，本文对 B 轮、C 轮、A+轮、A 轮以及股权融资进行估计取值分别为 4 亿元、2 亿元、2 亿元、1.5 亿元、0.5 亿元，并对国仪量子 2018 年 3 月的股权融资计划为 Pre-A 轮进行数据统计。

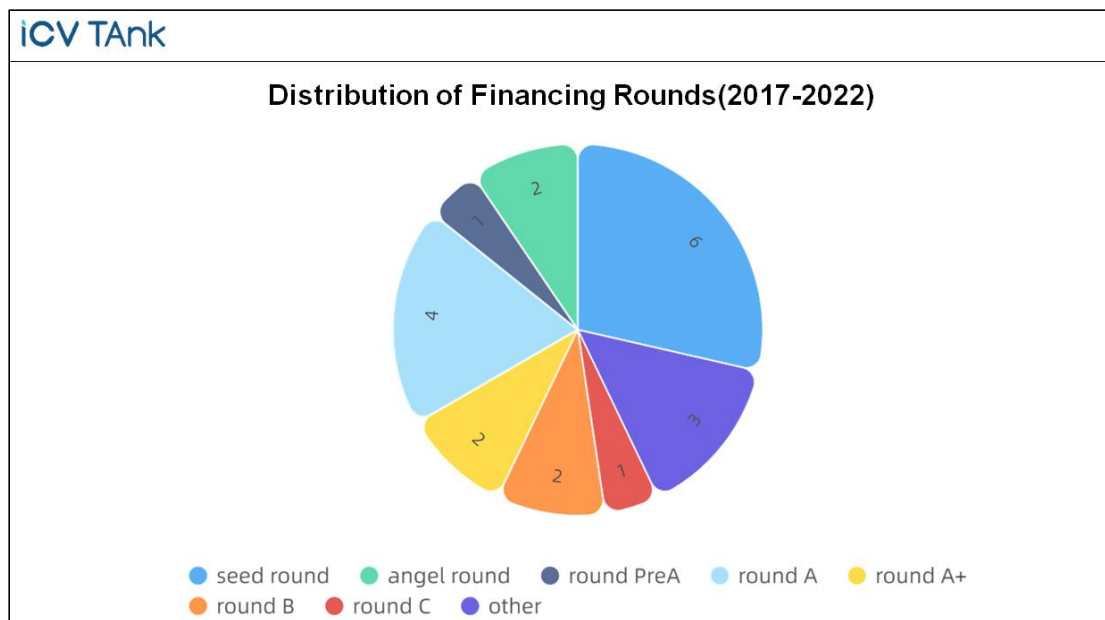
注 2：Qnami 公司 Pre-A 轮、未磁科技股权融资、中科启迪光电子股权融资均未披露具体融资金额，未纳入本次数据统计。

注 3：未磁科技天使轮和中科酷原 A 轮公开披露的融资金额均为数千万人民币，分别取值 1 千万元人民币纳入本次数据统计。

从投融资规模来看，大部分公司选择不披露或模糊投融资金额，从披露数据来看，单笔投融资最高金额为 0.32 亿美元（ColdQuanta 公司 A 轮），总投融资最高金额约为 1.5 亿美元（国仪量子）。

从投融资轮次来看，种子轮最多（6 笔），其次是 A 轮（3 笔），主要原因是量子精密测量行业内公司目前大多仍处于早期发展阶段；国仪量子的融资已经完成 C 轮，是进展最快的公司。

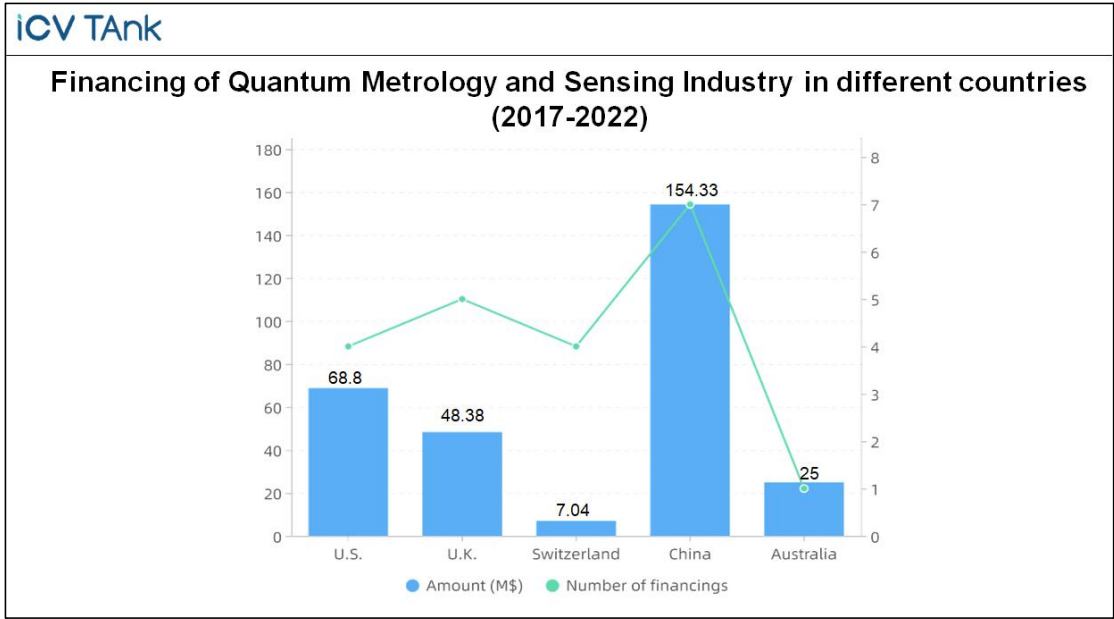
图 19 2017-2022 年全球量子精密测量公司融资轮次分布



注：other 表示未公开披露融资轮次（国仪量子除外）的企业融资活动

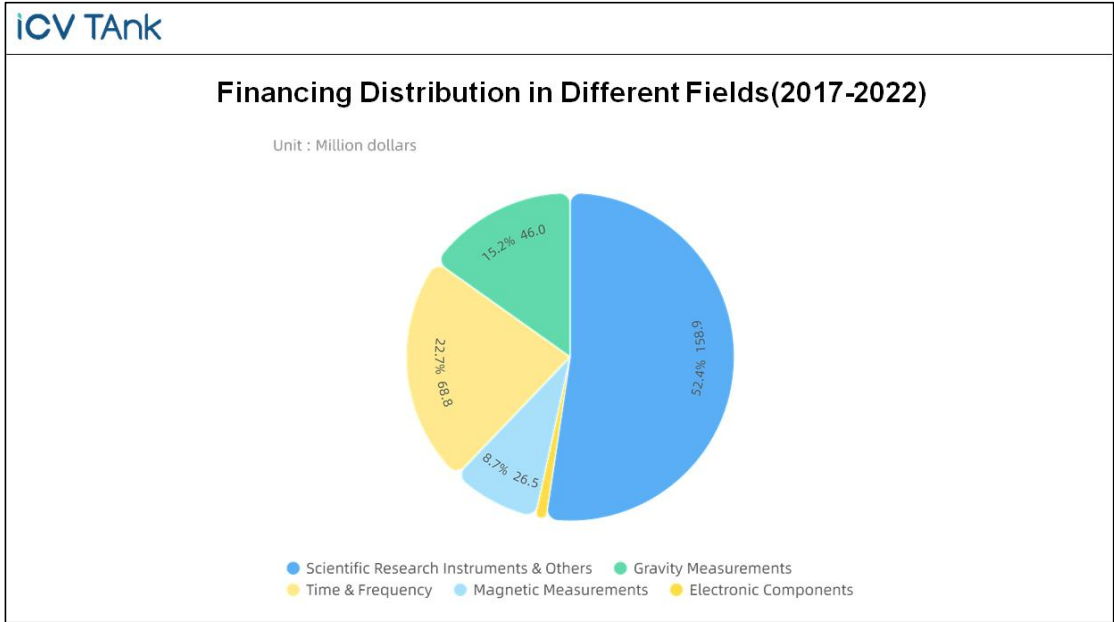
从公司所在国来看，中国的融资笔数最多（7 笔），总融资金额也最高，达 1.54 亿美元；其次是美国与英国，美国的融资笔数是 4 笔，总融资金额为 0.69 亿美元，英国的融资笔数是 5 笔，总融资金额为 0.48 亿美元；中国、美国、英国的总融资金额占全球融资金额的 89.5%。

图 20 2017-2022 年不同国家量子精密测量行业融资情况



从量子精密测量细分领域来看，量子科研和工业仪器领域融资金额最多，占总融资金额的 52.4%，其次分别是量子时钟、量子重力测量以及量子磁测量，其融资金额占比分别是 22.7%、15.2%、8.7%。

图 21 2017-2022 年全球量子精密测量细分领域的融资分布情况

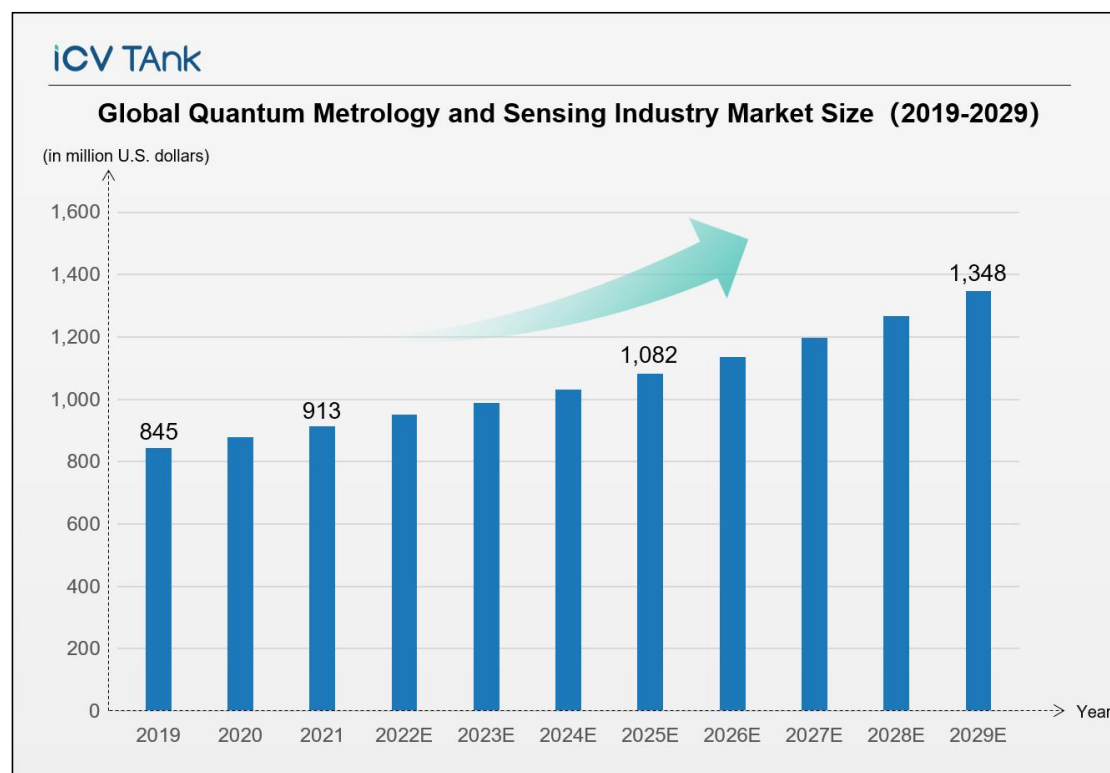


二、市场预测

整体来说,量子精密测量产品和技术主要的应用方向有国防军事(精确制导、雷达等)、航天探索(计时、定位等)、航空工业(飞行器导航定位)、计量测量、科学研究、生物检测、医学诊断、地球观测、地质勘探、工程建设、农业种植等。

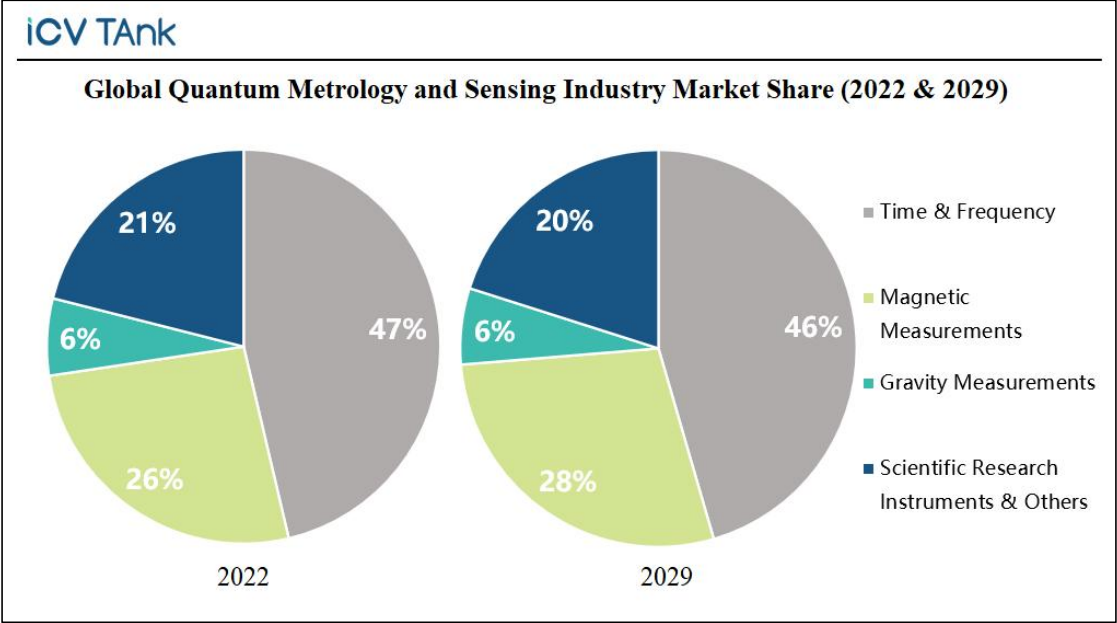
本次市场规模预测主要囊括了量子时间测量、量子磁场测量、量子重力测量和量子科研和工业仪器这些领域。根据 ICV 预测,2022 年全球量子精密测量市场规模约为 9.5 亿美元,预计到 2029 年,市场规模增长到 13.48 亿美元,2022-2029 年复合增长率约为 5.1%。

图 22 全球量子精密测量市场规模预测 (2019-2029E)



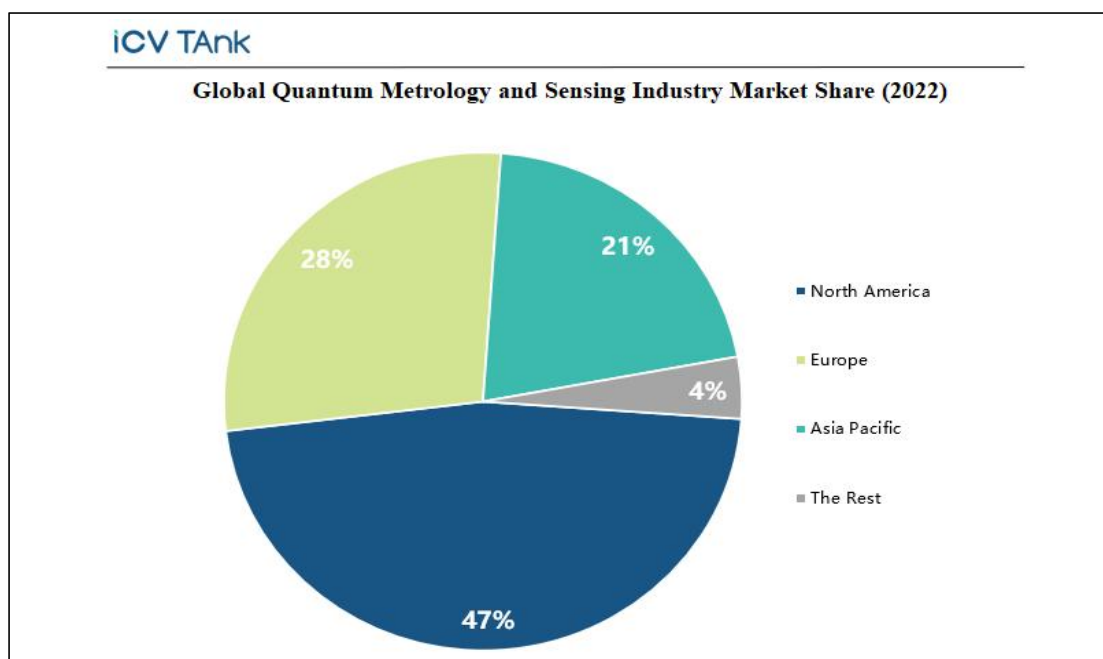
2022 年,量子时钟市场份额约为 4.4 亿美元,占比最高(46.3%),复合增长率约为 4.9%(2022-2029);其次为量子磁测量,市场份额约为 2.5 亿美元,复合增长率约为 6.2%(2022-2029);然后为量子科研和工业仪器,市场份额约为 2 亿美元,复合增长率约为 4.4%(2022-2029);最后为量子重力测量,市场份额约为 0.6 亿美元,复合增长率约为 5.4%(2022-2029)。

图 23 全球量子精密测量市场份额预测（按产品技术领域划分）



当前全球主要供应商集中在北美（主要是美国），占比约为 47%；其次是欧洲（主要是西欧国家和俄罗斯），占比约为 28%；然后是亚太（日本、韩国、中国、澳大利亚、新加坡），占比约为 21%。美国和西欧国家是主要的技术输出国，同时也是技术采购方，此外，亚太上述国家也是主要的技术采购方。由于量子精密测量领域的产品和技术大多是经济发达国家研发和采购，其余国家和地区市场占比极少。

图 24 全球量子精密测量市场份额预测（按地理划分）



量子精密测量产业的驱动因素主要有：工业互联网、自动驾驶、机器人、生命健康（物质检测、脑部及心脏疾病治疗）、信息通信等。

在国防军事能力提升中，精确制导、作战通信和保密等等都需要量子精密测量提供支持。例如，2022 年 3 月，英国皇家海军首次在军事演习中使用量子技术，在威尔士亲王航空母舰上搭载由 Teledyne e2v 公司开发的微型原子钟系统——MINAC，只有笔记本电脑大小，在全球定位系统出现故障时，为舰船复杂作战系统提供时间同步。

在自动驾驶技术发展中，在汽车中安装量子传感器有助于准确测量汽车行驶过程中的旋转、加速度、重力。同理，在轮船、火车、飞机上，安装相应的量子传感器，有助于提升自动驾驶功能，提高安全性，将自动驾驶技术尽快推向市场。此外，自动驾驶技术的推广应用依赖于更为精准、小型化、轻量化、消费级的量子精密测量产品，目前大部分量子传感器体积较大，不能满足移动使用需求。

在生命科学领域，随着技术的发展，对微观尺度的探索有了更高追求和要求，这推动了更高级的显微镜技术发展。另外，在疾病治疗领域，脑部疾病和心脏疾病是常见但仍有待提升治疗技术的领域，当前新一代脑磁图和心磁图在实验演示方面已经验证了可行性。若能在小型化、可穿戴、较低成本等方面进一步提高，此类技术有望逐步商业化。

在通信发展中，当前主流的通信为 4G 和 5G，目前 6G 技术已在发展，随着通信技术的发展，对通信网络中的时钟同步精度要求提高，并且基站数量多，对小型化、价格相对较低的精准计时设备的有更大的需求，这样才可以实际大范围应用。

三、未来趋势及建议

趋势 1：量子精密测量领域的技术实施计划将进一步清晰

除美国外的主要量子精密测量科技国（如：德国、中国、英国、日本等）尚未发布独立的量子精密测量报告，然而，美国在 2022 年 4 月发布量子传感器战略政策——Bringing Quantum Sensors Fruition（将量子传感器付诸实践），这是首次有国家将量子精密测量这一领域发布独立战略计划报告。目前，中国、英国、德国、法国等已在不同程度、不同技术领域提高对量子精密测量领域的重视度，未来，各国将有可能随着技术进步，发展路线清晰，经过审慎评估后，发布单独的计划，更加详细的指出未来战略发展方向。

趋势 2：量子精密测量初创公司有望获更多资金支持，从而推动技术快速进度

量子精密测量领域的投融资虽不及量子计算受更多人关注，但当前看来，量子精密测量商业化的潜力比量子计算更大、一部分产品和技术已有原型，并且一些产品，例如单光子探测器、小型化时钟有极为广泛的应用场景，可以赋能多个行业和产品，因此，当量子精密测量产业受到更多人知晓和关注时，拥有技术的公司有望受到一些早期投资者的青睐，并且，投融资对加快技术落地和市场化有极大地推动作用。此外，国仪量子于 2021 年 12 月宣布完成数亿元 C 轮融资，目前融资总额已近 10 亿人民币。若按此节奏和规模发展，国仪量子有望在中国大陆上市。若能成功上市，也将成为目前少有的专注于量子精密测量领域的公司。

趋势 3：量子精密测量领域的人才问题亟待解决

相关技术人才的匮乏是当前全球发展量子信息科技产业面临的一大难题，量子精密测量领域的人才一样具备交叉性，因此需要尽早展开各类培养计划。美国于 2022 年 2 月发布《QIST 劳动力发展国家战略计划》，提出量子信息科技(QIST)的劳动力发展是美国的优先事项，提出多项建议措施。未来，除大学之外的进行量子技术和量子工程教育的机会有望大量增加。例如，以研讨会、暑期学校、培训班等方式加大量子精密测量的认知、技术和应用推广。

趋势 4：传感器逐步“量子化”，将量子传感器尽快推向市场是多国未来发展目标

一方面，当前手机、汽车、飞机和航天器的经典传感器主要依赖电、磁、压阻或电容效应，虽然很精确，但理论上存在极限，而量子传感器有望向更高灵敏度、准确率和稳定性等方面提升；另一方面，某些应用需要对电磁散射不敏感的传感器。量子传感器不仅可以替代一部分传统传感器市场，还能满足新兴特殊需求。传统技术的传感器正在逐渐过渡到量子传感器，这是必然的发展趋势。目前，部分传感器已经实现“量子化”，例如，在时间测量方面，原子钟已商业化，实现了时间传感器“量子化”；重力测量方面，原子重力仪已经商业化，实现了重力传感器“量子化”。此外，例如“量子化”的磁力计，惯性传感器配置，包括陀螺仪、加速度计和惯性测量单元，这些量子传感器技术验证已展开，部分产品已有原型。未来，在没有任何外部信号的情况下进行精确导航下，惯性传感器在军事和商业应用中都将发挥重要作用。

时至今日，GPS 和 MRI 的投资回报价值已相当明显。当前有很多处在不同研发阶段的量子传感器，多国均在统一协调，缩短产品推向市场的进程，并加快技术转让，同时也不断加强本国在各自领域的领导地位。在尽可能减少对性能影像的情况下，小型化、紧凑化、降低成本是各大中上游供应商重点追求的目标。冷原子技术、金刚石氮空位色心技术、OPM+MEG 是近些年最有望商业化的量子传感器的底层技术，这些技术可能适用于不同行业和应用场景，例如，SQUID 虽然有更高的灵敏度，但是需要低温环境，这就导致使用成本较高、对应用环境

要求较高；OPM 技术、NV 色心技术虽然精准度可能不及 SQUID，但可以在常温环境下使用。

趋势 5：美欧仍继续引领一部分技术，技术成熟度评估体系亟待提升

由于量子技术的发展需要深厚祭奠，并非一蹴而就，因此，美欧依然大范围继续引领一部分技术。同时，技术成熟度评价对新技术开发和科技项目管理尤为重要，然而并非很多国家都将这一评价体系较好地应用在量子项目的管理当中。量子精密测量作为一个市场化应用相对较快的领域，推进量子传感器项目的就绪度评价标准（Technology Readiness Level, TRL），对标准化管理、科学管理、技术推进有极大地促进作用。

美国和英国于 2021 年底签署量子科技领域的合作协议。欧盟国家在量子旗舰计划下，各国沟通较多。为应对强强联合下的国际科技竞赛，中国若想在此番对抗中不掉队，甚至进入第一梯队，需要制定和采取一些行之有效手段。

美国仍是全球量子精密测量市场最大的贡献者，欧洲次之。中国是量子精密测量产品和技术的一大购买方，高校、科研机构、高科技企业均是主要买家。但随着近年来的进出口贸易管制，未来可能有更多的仪器设备和技術将无法引入中国，中国还需持续在此领域沉淀、发力。一般来说，实现原子传感器需要掌握激光和光学、真空、电子和控制硬件的复杂系统。因此，在这些方面祭奠深厚的国家、公司最有望得到快速发展。

趋势 6：磁力计领域，OPM、SERF、NV 色心技术是下一代主要发展和应用，具有替代 SQUID 市场的潜力

目前，脑磁图的市场化应用以 SQUID 技术提供探测为主。目前全球主流的脑磁图设备均为 SQUID 技术。以中国脑磁仪中标信息来看，从收集到的 2019 年至 2021 年的 7 次记录，6 次是 SQUID 技术（5 次为芬兰 MEGIN 公司供应，1 次为澳大利亚 Compumedics 公司供应），1 次是 OPM 技术（中国北京昆迈医疗科技有限公司供应）。从招标、中标、引进、培训、对外开放使用这一流程看，广大患者可以收益于脑磁图技术需要 3-4 年左右的时间，预计新一代技术 OPM

和 SERF 从实验室走向大众应用的时间预估可能还有 5 年。由于 OPM 无需液氮环境、维护运营成本低、可穿戴、儿童成人佩戴可调节度高等优势，有望在未来替代一部分 SQUID 市场份额，或打开新的小型化可穿戴领域市场。SERF 和 NV 色心在近几年技术快速演进，在 OPM 后，有望逐步进入市场。

趋势 7：量子传感器可用于新型冠状病毒的快速检测，未来可期

美国 MIT 和加拿大滑铁卢大学组成的研究团队利用金刚石 NV 色心技术，设计出一种传感器，可以快速诊断 COVID-19。这种方法是除当前最常见的 PCR 之外，另一种准确性高、速度快的方法，其准确度比抗原检测高。此前，基于量子技术的新型科研仪器设备已在生物医药领域发挥着重要作用，例如，原子力显微镜、电子顺磁共振谱仪。尽管这个新型量子传感器尚未大规模应用，但意味着，量子精密测量对时下热点的公共医疗卫生领域可以有所作为。

关于我们

About Us

iCV Tank

Technology Advisory
& Knowledgebase

作为全球前沿科技咨询机构，ICV 对新技术始终充满热情，我们专注于发布最准确客观的行业数据与观点，来帮助我们的客户做出正确的战略决策。

我们目前专注于最前沿的科技，例如智能驾驶、量子技术、人工智能和新能源等。

我们集合了全球顶尖的技术专家与行业研究团队，通过连接动态的行业与公司信息，我们的分析师将为我们的客户提供更丰富、更高度融合的视角来看待未来商业世界。

我们可以实时动态且有效的揭示新技术路线下的风险与机会，这将助力我们的客户获得最快的信息，从而更有信心地进行决策。



光子盒创立于2020年2月,名称来自于在1930年第六届索尔维会议(Solvay Conference)上,爱因斯坦在其与玻尔的争论(Bohr-Einstein debate)中提出的一项光子盒实验(photon-box experiment)。

光子盒定位为量子产业服务平台,通过推送前沿量子科技新闻、科普量子知识、解读量子技术、发布年度和专题报告等形式,致力成为中国量子科技产业最值得信赖的服务机构。截至2022年5月,光子盒已公开发布了40余份量子科技领域的专题报告,并且为10余家中国量子科技领军企业提供量子行业咨询和数据服务等。

2021年5月,光子盒作为协办方,与主办方中国电子科技集团公司电子科学研究院、社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室和中国工程科技发展战略安徽研究院,在安徽合肥成功举办了“2021中国量子科技产业‘双循环’高峰论坛”。

光子盒正在不断扩充自有量子科技产业数据库的广度与深度,建立多维量子产业数据信息,提供客观、专业、深入及具有时效性的量子行业报道与咨询服务。光子盒未来还将承办量子科技领域的论坛,提供更为丰富的主题和内容,联合量子产业科技公司、金融行业投资公司、国家/省级量子相关科研院所、政策战略研究单位等共同促进量子产业持续向好发展。

2022

全球量子精密测量产业发展报告

Global Quantum Metrology and Sensing Industry

光子盒官网



光子盒微信公众号



商务合作: zhangkoni7@gmail.com

iCV Tank
Technology Advisory
& Knowledgebase

