光子盒
QUANTUMCHINA

2024

全球量子产业发展现状及展望



2024/08

量子信息年度系列报告

序言

引领量子时代，共铸产业未来

在2023年里，我们见证了全球量子领域取得的多方面的进展和突破，这些成就正在引领人类进入一个前所未有的量子时代。

在量子计算方面，中美仍为全球第一梯队，占据了全球过半的产业份额。同时，欧洲与亚太地区（除中国）正不断加大对量子计算的投入、制定相关政策，以缩小与中美之间的差距。另一方面，多元发展成为产业竞争的关键动力，尤其是中性原子量子计算的迅猛发展令其成为通用量子计算机的强有力候选者。量子云平台的日益成熟，逐步降低量子计算的使用门槛和成本，令更多行业能够充分利用量子计算的能力，推动其应用范围和影响力的不断扩大。

在量子通信与安全方面，中国与欧美分别引领量子密钥分发与后量子加密。随着两者以及量子随机数生成器的发展，通信制造业与电信运营商、银行、券商等领域将纷纷入局，通信与安全行业势必迎来翻天覆地的变化。

在量子精密测量方面，中国仍与欧美存在一定差距，但部分指标已达到国际一流水准。预计未来十年，中国部分种类的量子传感器将赶超欧美，获得更大的产业份额。瑞士、德国等欧洲国家在量子精密测量领域与美国同处第一梯队，未来也仍将保持这一优势。

然而，我们也不得不面对2023年量子行业融资活动相对降温的现实。宏观经济情况不佳，融资交易减少，国际竞争在量子领域日趋激烈，等等。但好在寒冬已过，2024年上半年的表现令人欣慰。

这份报告主要从国家和地区的视角出发，重点关注2023年各国家地区在投融资、政策、进展的表现，并对各国家的量子产业规模及其在全球中的占比进行预测，方便读者更加直观地看出各国家地区发展近况及趋势。

最后，站在这个充满挑战和机遇的时刻，我们对2024年量子产业发展充满信心和期待。让我们携手共进，共同见证量子产业的蓬勃发展。

光子盒研究院 院长



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2023年度内全球范围内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2023年1月1日至2023年12月31日间量子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2023年发生的重要事件。

04 本报告版权归光子盒所有，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（2024全球量子产业发展展望 [R]. 光子盒. 2024.08）。
本报告最终解释权归光子盒所有。

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，不够成投资建议，请谨慎参考。

目录

引言

声明

第一章 2023量子产业发展概览

一、量子计算发展情况综述

01 量子计算芯片与软件算法蓬勃发展

02 高性能计算与量子计算的融合已成为现实

03 各大电信运营商竞相布局量子计算

04 研究活跃科研成果频出

05 硬件发展路线图不断更新

06 产业链相关企业逐年增多

07 生态建设日趋完善

08 产业发展即将进入快速成长周期

二、量子通信发展情况综述

01 量子通信与安全生态蓬勃发展

02 产业链相对成熟

03 量子通信与安全产业链上游

04 量子通信与安全产业链中游

05 量子通信与安全产业链下游

06 网络建设（陆地部分）：QKD网络建设

07 网络建设（太空部分）：卫星通信建设

三、量子精密测量发展情况综述

01 产业已进入多元化发展周期

02 产业链相关企业逐年增多

03 产品丰富且市场初具规模

04 下游应用市场前景广阔

目录

第二章 各地区政策及进展

一、美国

二、中国

三、欧洲

四、英国

五、德国

六、法国

七、加拿大

八、澳大利亚

九、日本

十、韩国

第三章 投融资

一、融资金额大幅下降

二、融资主体地理分布分散

三、融资轮次普遍较少

第四章 量子产业规模

一、总体产业规模

二、各领域产业规模

01 全球量子计算产业规模

02 全球量子通信产业规模

03 全球量子精密测量产业规模

三、各地区产业规模

01 各地区量子计算产业规模

02 各地区量子通信产业规模

03 各地区量子精密测量产业规模

目录

第五章 产业展望

一、量子生态位日趋明确

01 中美各有所长稳坐量子第一梯队

02 欧洲寻求量子产业链上游自主可控

03 亚太多国积极融入欧美量子生态圈

二、量子技术不断突破

01 机群技术与云平台联手推动量子计算

02 PQC与QKD的未来发展呈现并驾齐驱之势

03 量子精密测量六大方向各有明确突破目标

第一章

2023量子产业发展概览

目录

第一章
2023量子产业发展情况综述

一、量子计算发展情况综述

01 量子计算芯片与软件算法蓬勃发展
02 高性能计算与量子计算的融合已成为现实
03 各大电信运营商竞相布局量子计算
04 研究活跃科研成果频出
05 硬件发展路线图不断更新
06 产业链相关企业逐年增多
07 生态建设日趋完善
08 产业发展即将进入快速成长周期

二、量子通信与安全发展情况综述

01 量子通信与安全生态蓬勃发展
02 产业链相对成熟
03 量子通信与安全产业链上游
04 量子通信与安全产业链中游
05 量子通信与安全产业链下游
06 网络建设（陆地部分）：QKD网络建设
07 网络建设（太空部分）：卫星通信建设

三、量子精密测量发展情况综述

01 产业已进入多元化发展周期
02 产业链相关企业逐年增多
03 产品丰富且市场初具规模
04 下游应用市场前景广阔

一、量子计算发展情况综述

01 量子计算芯片与软件算法蓬勃发展

本部分根据技术创新、实际效益以及科研引领等评价标准，选取了2023年量子计算领域的十项最重要进展，包括首次成功应用、有效实验验证、新颖架构设计、参数最值、实际效用提升、采用方案者数量及影响力，以及是否有重大科研突破和广泛报道。总体进展按照量子计算芯片以及软件算法云平台两个大方向展示。

图表 2023年全球量子计算十项重要进展

量子计算芯片

量子比特数量与量子体积	相干时间	量子芯片架构	传输与存储	量子纠错
Quantinuum的H-Series量子计算机连续创下了三个量子体积（QV）的新纪录：2^{17}、2^{18}和2^{19}，为目前报道最高的量子体积记录。 IBM发布了首款超过1000量子比特的量子计算处理器Condor，其拥有1,121量子比特，基于其上一代旗舰产品Eagle芯片架构。	马里兰大学在蓝宝石芯片上成功创建了磁通量量子比特，其相干时间为1.48毫秒，是目前最高纪录，并且保真度达到了99.991%。	IBM推出模块化量子计算机，结合可扩展低温基础设施和经典服务器，实现了计算的超级计算架构。基于此架构，IBM发布了133量子比特可扩展芯片Heron。	苏萨塞克斯大学与Universal Quantum合作，实现了微芯片模块之间的快速和可靠的传输，成功率高达99.999993%，连接速度为每秒2424次，是目前最高纪录。	深圳量子研究院、清华大学、福州大学以及南方科技大学4家研究团队利用具有定制频率梳的脉冲来操控辅助量子比特，提高了量子纠错的效率，超过了纠错盈亏平衡点约16%。 QuEra实现了48个逻辑量子比特，能够检测和纠正纠缠逻辑门操作过程中出现的任意错误。

软件、算法、云平台

混合计算与大模型	容错算法	量子云平台
英伟达发布了DGX Quantum系统，结合了CUDA Quantum和H100 NVL等技术，为GPT等生成式AI大模型提供了量子经典混合计算的加速平台。	Quantinuum使用逻辑量子比特在其H1量子计算机上实现了容错算法，通过“随机量子相位估计”计算了氢分子的基态能量。	Q-CTRL的错误抑制技术（名为Q-CTRL Embedded）已被集成到IBM云量子服务中，现在用户只需轻按开关，就能降低错误率。

02 高性能计算与量子计算的融合已成为现实

2023年，全球发生了诸多量子计算与超算融合的事件，量超融合已经从理论转向初步实践，还呈现出深化发展之势。量超融合主要依托云平台向外提供算力，成为超算中心的一种新型计算形式的补充，提供多样、灵活、高效的计算资源，为不同行业领域提供更强大的算力，可供更广泛地探索量子计算的潜在价值。目前量子计算与超算融合仍然面临着硬件稳定性和算法优化等挑战，量超融合的实现，接下来需要在多个维度进行尝试与探索，包括兼容性与集成（接口设计、系统集成）、软件与算法（量子编程语言与工具、算法适配与优化）、资源管理与调度等。随着技术演进和国际合作的深化，量子计算融入超算体系将是必然的一步。

图表 2023量超融合进展事件

德国启动Euro-Q-Exa量子计算机招标，系统该系统将由莱布尼茨超级计算中心 (LRZ)托管和运营，并集成到超级计算机SuperMUC-NG中

欧盟高性能计算联合计划(EuroHPC JU)下的高性能计算和量子模拟(HPCQS)项目，其用户已经能够通过各成员国的节点，验证他们的HPC-QC融合应用

在法国混合量子计划（HQI）在，法国国家大型计算中心（GENCI）购入Pasqal的100比特量子计算机



本源量子与上海超级计算中心合作成立长三角量超协同创新中心；9月，发布“量超融合”平台实现了经典与量子任务统一调度和‘经典+量子’算法的混合编程，并对公众开放

英伟达与德国于利希超算中心(JSC)、ParTec建立实验室开发经典-量子混合超级计算机

中国电信发布“天衍”量子计算云平台，基于超量混合云架构，实现了“天翼云”超算能力和176量子比特超导量子计算能力的融合

魁北克数字和量子创新平台PINQ²落成IBM Q System One，在舍布鲁克设立的高性能计算中心将使PINQ²能够提供混合计算方法

理化学研究所计划在 2025 年左右通过与富岳超级计算机的集成

澳大利亚Pawsey超级计算研究中心与加拿大Xanadu公司签署谅解备忘录，将为研究人员提供最先进的混合计算

图表 全球现有量子计算机与经典计算机相融合的计算中心及相关实验室

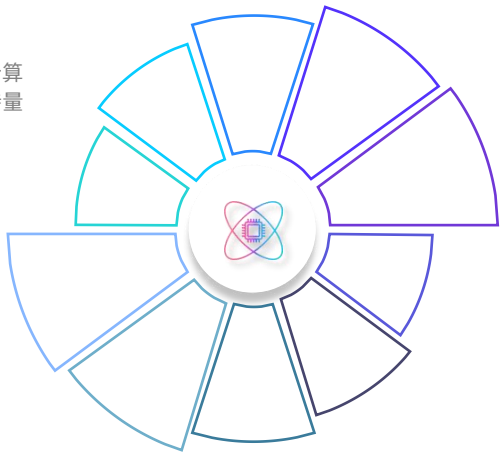
法国原子能委员会与国家超大型计算中心
应用Atos量子学习机（QLM）将量子计算能力整合到超级计算机Joliot Curie当中

芬兰IT科学中心
VTT的5量子比特超导量子计算机HELMI（“Pearl”）与欧洲超级计算机LUMI（“Snow”）连接；使用了英伟达CUDA Quantum平台

德国于利希超级计算中心
基于模块化超级计算架构概念的最紧密集成

德国莱布尼茨超级计算中心
与Atos和HQS合作研究HPC与QC之间的整合

西班牙加利西亚超级计算中心
在“PRIMEHPC FX700”超级计算机上构建基于富士通34量子比特量子计算模拟器的集群系统



中国安徽省量子计算工程研究中心
将计算任务在量子计算机和超级计算机之间进行分解、调度和分配

中国国家超级计算郑州中心与中国上海超级计算中心
和本源量子以及中移（苏州）软件共同打造量超融合先进计算平台，提供量超云融合服务

美国国家超级计算应用中心
集成英伟达CUDA Quantum

美国橡树岭国家实验室
应用Atos量子学习机（QLM）；参与CUDA Quantum测试计划

美国阿贡国家实验室
应用Atos量子学习机（QLM）

日本国家高级产业科学技术研究院
英伟达的合作伙伴，将CUDA Quantum集成到其超算平台

日本理化学研究所
富士通公司的量子计算机与“富岳”超级计算机集成

巴西SENAI-CIMATEC
应用Atos量子学习机（QLM）将量子计算能力整合到超级计算机当中

印度高级计算发展中心
与Atos达成合作协议，共享量子学习机（QLM）成果

澳大利亚帕西超级计算中心
将量子加速器与HPE Cray Ex超级计算机Setonix配对，展示和测试量子和经典计算的混合模型

iCV TA&K | 2024年2月版

全球超算中心与量子计算机的融合正在加速推进。各种类型和规模的超算中心，无论是大型的国家级研究机构还是小型的企业级实验室，都在积极探索与量子计算机的集成。这种集成不仅提升了计算能力和效率，还拓宽了应用领域。例如，生物信息学、物理模拟、金融工程等领域的复杂问题，通过超算和量子计算的结合，可以得到更精确、更高效的解决方案。此外，这种融合还推动了新的算法和应用的发展，如量子机器学习、量子优化等，显示出超算和量子计算相结合的巨大潜力。

HPC+QC线下机群模式是未来高性能计算的重要发展方向。这种模式通过整合传统超级计算机和量子计算资源，使得高性能计算更加灵活、高效。在这种模式下，可以实现更复杂、高精度的运算和模拟，从而推动科学研究、工程技术和产业创新的发展。这种模式的优势在于，它可以充分利用传统超级计算机在处理经典问题上的强大能力，同时利用量子计算机在处理量子问题上的独特优势。未来，超级计算机和量子计算机能够无缝集成，实现互补优势，为解决复杂问题提供强大的计算支持。随着技术的进步和应用的拓展，我们可以预见，HPC+QC线下机群模式将在未来的计算领域发挥越来越重要的作用。

03 各大电信运营商竞相布局量子计算领域

2023年，全球主要电信运营商积极加大对量子计算领域的投资和研究力度。它们在超导、离子阱等多种量子计算机类型上进行了深入研究，反映出电信运营商对于量子技术在提升网络性能、加强安全通信等方面的潜在价值的认可。此外，这些电信运营商在量子计算领域的布局不仅仅停留在研究层面，更在积极寻求技术合作和商业合作。例如，与IBM、IonQ等企业和科研机构建立战略合作伙伴关系，共同推动量子计算技术在实际应用中的验证和商业化进程。

图表 全球主要电信运营商在量子计算机领域的布局

国家	公司	基本情况
中国	中国电信 CHINA TELECOM	发布具备“量子优越性”能力的超量融合量子计算云平台“天衍”*
	中国移动 China Mobile	携手中国电科发布目前中国最大规模的量子计算云平台。发布“五岳”量子计算云平台*
日本	NTT	联合日本理化学研究所、富士通等研究合作伙伴，成功开发出日本第一台超导量子计算机*
	SoftBank	加入由东京大学运营的量子创新倡议联盟，并使用IBM 量子计算机验证电信用例*
韩国	LG U+	与与韩国科学技术院（KAIST）和 Qunova 计算公司合作，使用D-Wave量子计算机优化6G低轨卫星网络*
澳大利亚	Telstra	目前已对量子计算领域进行投资（SQC），但未独立开展研究*
德国	Deutsche Telekom	DT全资子公司推出其量子即服务产品，提供量子计算专业知识和对IBM量子计算资源的访问*
英国	BT	探索量子计算机如何为电路交换、数据包路由、信号处理和天线波束控制等应用带来好处*
	vodafone	与IBM联手探索量子计算技术和量子安全密码学，帮助验证和推进电信领域潜在的量子用例
意大利	TIM GRUPPO TIM	利用量子计算来优化无线电单元的规划，在D-Wave量子计算机上执行二次无约束二进制优化算法

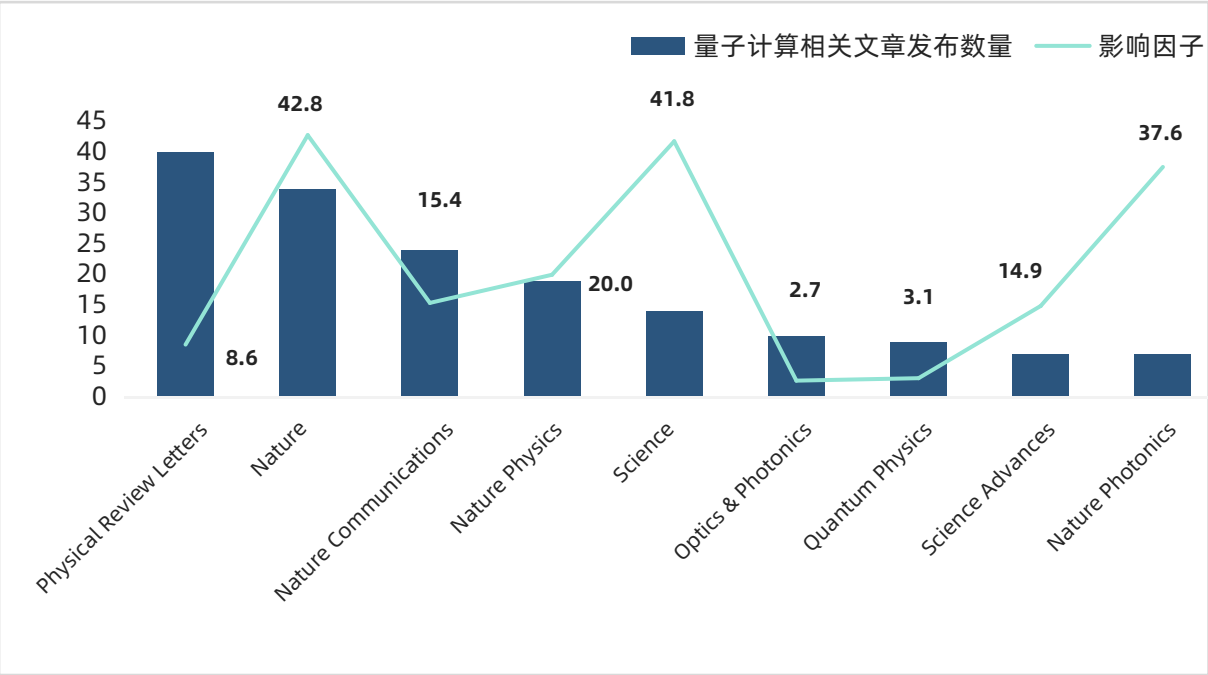
iCV TA&K | 2024年2月版

注：*表示2023年的进展

全球电信运营商在量子计算领域的布局表现出一种跨界合作、开放共享的趋势，力图在未来科技竞争中保持领先地位。目前，全球电信运营商正在构建量子计算生态系统，通过开放云平台、吸引爱好者参与等方式，推动量子领域从业人员和爱好者的积极参与。这种开放性和生态系统建设有助于推动整个量子计算领域的进一步发展，同时也预示着量子计算技术有望在电信领域发挥越来越重要的角色，为网络性能、通信安全等方面带来全新的突破。

04 研究活跃科研成果频出

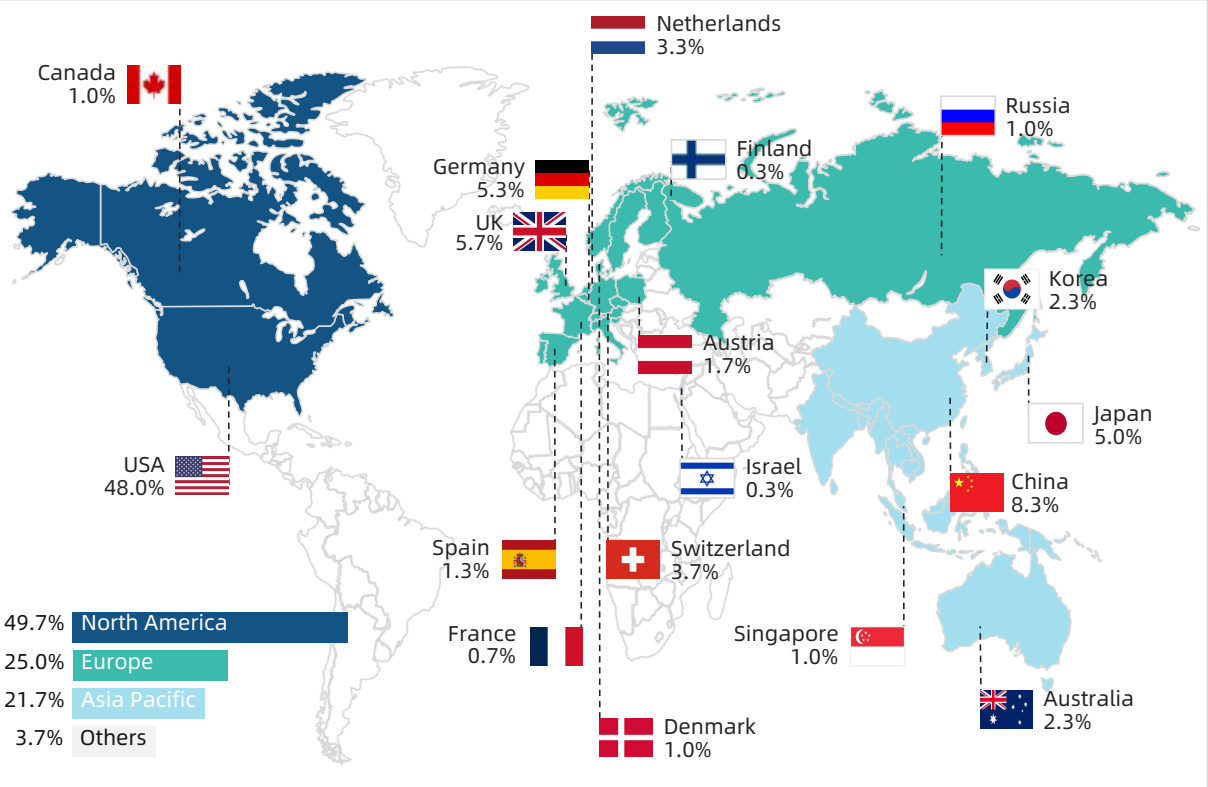
图表 2023年量子计算相关顶级期刊发文情况



iCV TA&K | 2024年2月版

注：此处仅呈现发文数量前十的期刊情况，详见附件

图表 2023年量子计算相关顶级期刊发文的通讯作者所在国家



iCV TA&K | 2024年2月版

注：图中所引量子计算领域发文数据来自Nature、Science、Physical Review Letter等顶级期刊，详见附件

图表展示了2023年上半年主要期刊上与量子计算相关的文章发布数量和其对应的影响因子（数据来自2023年最新的SCI影响因子）。通过分析比对这些数据，可以对这些期刊在量子计算领域的学术贡献和影响力进行评估，为科研人员选择适合发表研究成果的期刊提供参考。

量子计算领域的文章发布数量和影响因子之间存在一定的关系，但并非绝对。有些期刊发布数量较多，同时影响因子也较高，这表明该期刊在该领域具有较高的学术贡献和广泛的影响力。例如，Nature和Science这类综合性期刊发布数量和影响因子都较高，这主要归因于它们的学术声誉、严格的同行评审流程以及跨学科的研究覆盖范围。

有些期刊发布数量较少，但影响因子仍然较高。例如，PRX Quantum是一个专注于量子物理学的高质量期刊，其发布数量虽然较少，但其影响因子仍然相对较高。另一方面，有些期刊发布数量较多，但影响因子相对较低。这可能是因为该期刊的研究领域较为特定，受众群体较小，或者在同行评审和学术质量方面存在一定的问题。

2023年在顶级期刊上发布的量子计算相关文章的通讯作者所在地区数据则提供了关于不同国家和地区在量子计算研究中的参与度和影响力的重要线索。

从通讯作者所在发文机构所属国家来看，美国以144篇的总数遥遥领先，约占总发文数量的48%。这反映了美国在量子计算技术的绝大多数方面处于国际领导地位，其长期积累的科研实力和政府对量子计算技术的重视，造就了美国在量子计算领域的国际地位。中国以25篇的发文总数位列第二，约占8%，显示了中国在基础科学研究和前沿技术领域奋起直追，至今已取得了多项量子计算技术的重要成果，中国科研机构在国际期刊中的发文数量的增长，展现出中国在国际舞台的影响力逐渐增强。其他国家如日本、德国、英国等也有较多论文发布，表明它们在全球量子计算研究较为活跃，在某些专一领域有较高的国际影响力。

从通讯作者所在机构的地理位置来看，美州地区位居第一，占据约1/2的比例，反映了美国在该地区的领导地位以及加拿大在量子计算领域的贡献。欧洲紧随其后在该领域的科研活动占据了25%。这显示了欧洲在量子计算研究中的重要地位和活跃度。亚太地区占据了21.7%，显示了该地区在量子计算研究中的快速发展和重要性。而其他地区的贡献相对较少。

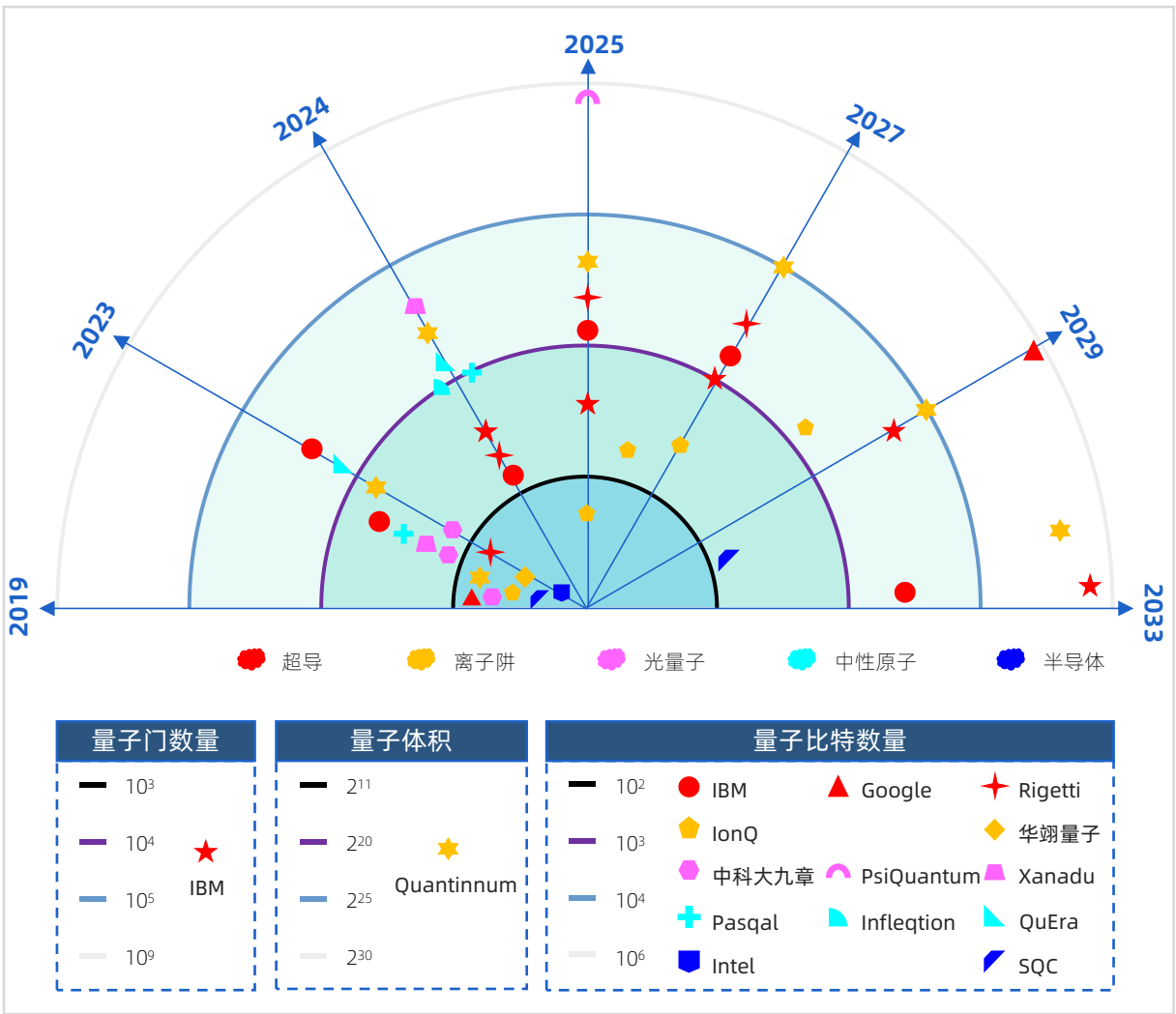
全球范围内的国际合作对于推动量子计算的研究和应用至关重要。通过合作共享资源和知识，各国和地区可以加快技术进步和应用创新。因此，加强国际间的合作交流将是未来量子计算发展的重要趋势。

05 硬件发展路线图不断更新

量子电路具有三种常见的度量：电路大小、电路深度和量子比特数。其中，电路大小对应“量子电路中量子门的个数”，电路深度对应“执行量子电路的并行运行时间”，量子比特数对应“量子电路的空间成本”。这三者一般不能同时达到最优，尤其是深度（时间）和比特数（空间）之间往往是此消彼长的。

目前，多条技术路线仍未收敛，也未有公认的换算标准。光子盒以时间、核心指标（量子门数量、量子体积、量子比特数量）、组织三大维度，呈现量子计算技术发展趋势图。

图表 量子计算发展阶段及其硬件趋势图（单位：量子比特数量）



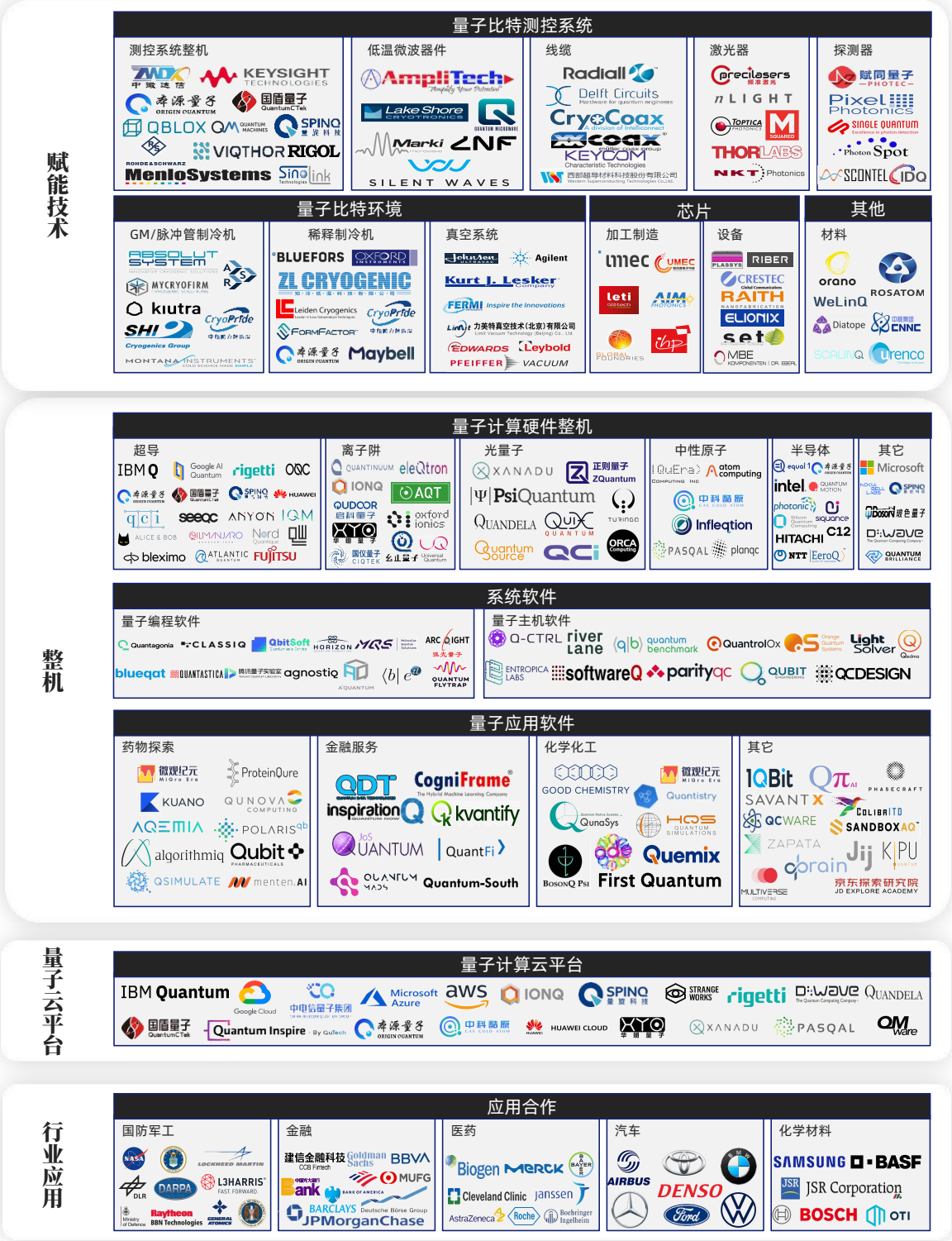
iCV TA&K | 2024年2月版

例如，从量子门数量的维度上来看，IBM在2024年在从内向外的第二个扇形区域内，也就是10^4，预计为5000门，预计2033年将达到最大扇形区域，即10亿量子门；从量子比特数量上来看，IBM落在从内向外的第三个扇形区域，预计有2000量子比特。从量子体积上的维度上来看，Quantinnum在2023年为2^19，位于从内向外的第二个扇形区域内，而到了2029年，其量子体积将有望达到2^25。

06 产业链相关企业逐年增多

较此前发布的量子计算产业生态图谱，本次新增若干企业logo，在分类与结构方面做出调整。

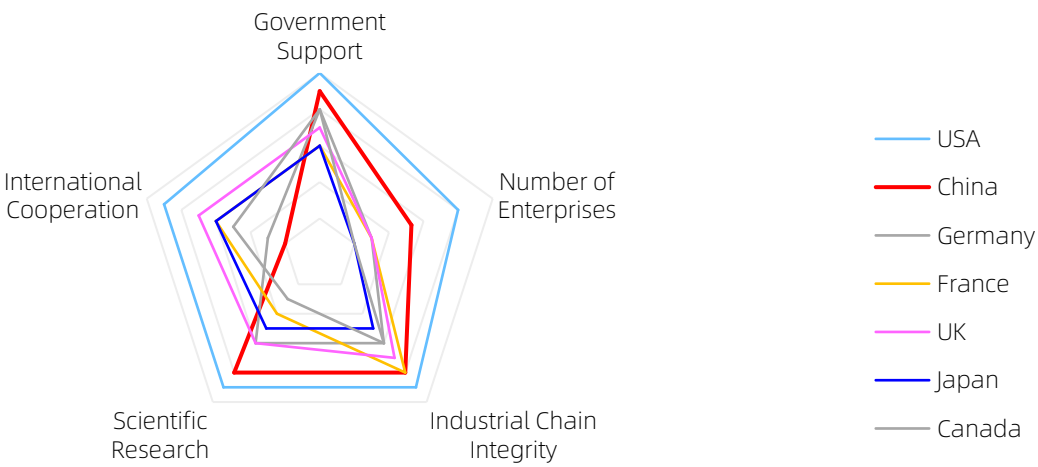
图表 量子计算产业生态图谱



注：部分整机企业为全栈量子计算机企业，其标识不出现在软件算法相关部分。研究所和大学不在企业生态考虑范围之内。

07 生态建设日趋完善

图表 2023全球主要科技国量子计算生态建设情况



iCV TA&K | 2024年2月版

美国在量子计算产业链上具有明显优势，政府对量子计算的高度重视和大力支持推动了企业数量的增长，其中涵盖了各类型的企业，包括IBM、谷歌、微软、亚马逊等代表性企业。美国在超导、离子阱、光量子等多个领域都保持领先地位，其科研创新和合作活跃，技术水平和引领能力处于全球前列。

中国在量子计算领域崛起迅猛，政府对该领域的高度支持和资金投入推动了企业数量的增加，其中包括腾讯、华为等具有代表性的大型互联网企业。近些年，中国在光量子计算机等方面取得了显著优势，技术水平和挑战能力迅速提升，然而在中美竞争日益加剧的背景下，尤其是在量子芯片和超低温设备等方面，中国与美国相比仍存在较大差距。

德国、法国等欧洲国家在量子计算生态建设上表现出积极态势。德国政府通过量子技术行动计划，旨在成为全球量子技术领导者，投入资金并制定战略框架。德国量子计算企业数量在全球中位于前列，技术水平较高，特别在离子阱、中性原子等方向领先。但相对于美国，技术上还存在差距，与欧盟协调整合问题亦需解决。法国通过《量子技术国家战略》等文件大力支持量子计算。然而，相较美中，投入和产出仍有差距，与德国相比在硬件和软件能力上稍显不足。

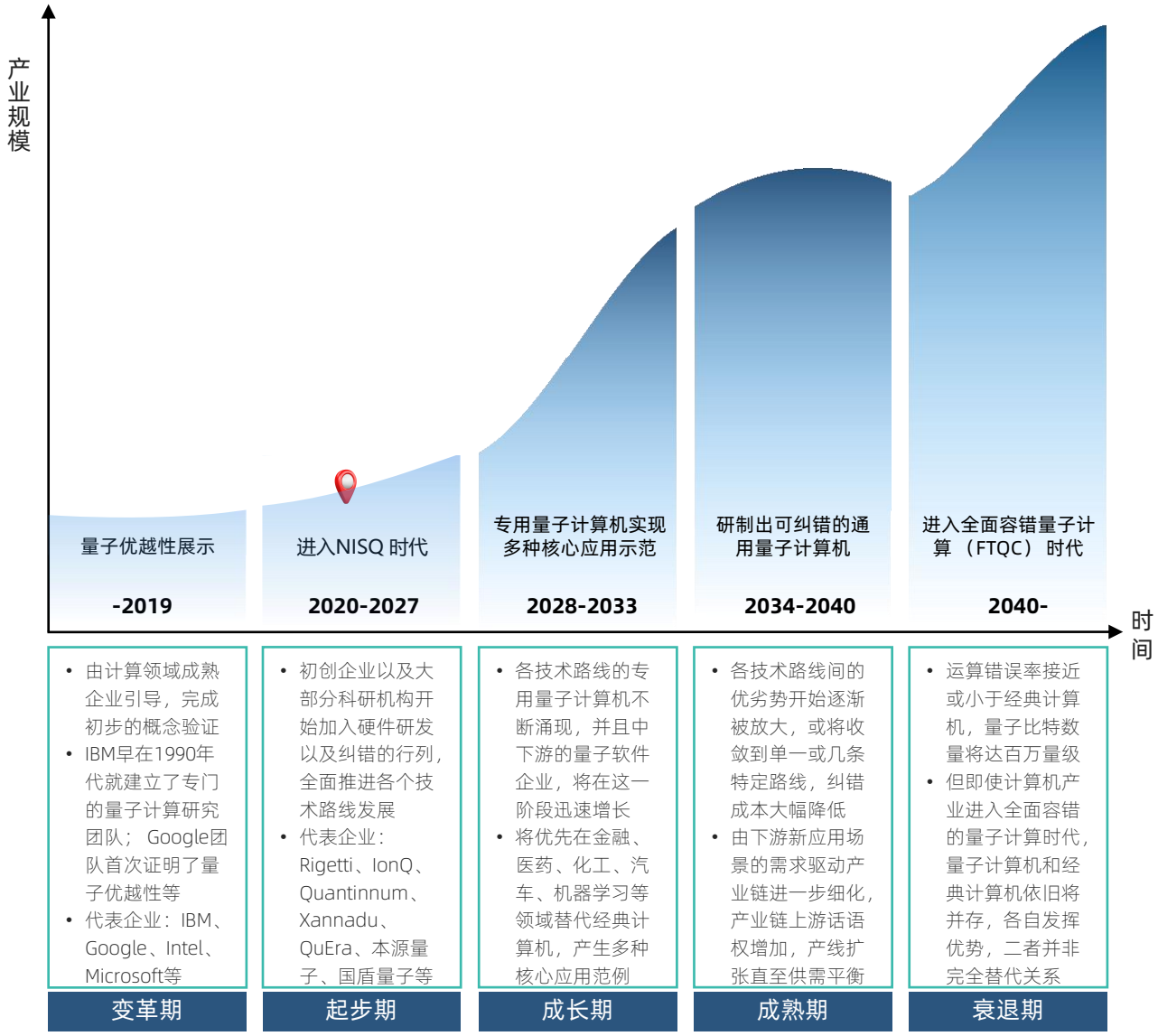
英国、日本、加拿大等国也在量子计算领域有所建设。英国政府发布《科学和技术框架》及《国家量子战略》，致力于巩固科技超级大国地位，但在与美中的竞争中，量子计算机规模和类型方面仍有不足。日本通过量子未来产业创新战略，强调实用化与产业化，在量子软件和服务方面仍有一定劣势。加拿大也启动了国家量子战略，政府支持力度大，尤其是光量子技术路线全球领先，但与美国相比，其在硬件和软件方面稍显不足。

16

08 产业发展即将进入快速成长周期

目前，量子计算正处于迅速发展的阶段。虽然当前仍然存在一些挑战，如测控系统优化、量子比特数量与质量、量子比特间的相互干扰等，但在各自得技术路线上，已经有了不少可观的突破，为产业的进一步发展奠定了基础。例如，IBM推出得可扩展Quantum System 2架构以及对应的Heron芯片，使得超导技术路线继续领跑全球；“九章三号”的成功构建则标志着量子比特的稳定性和纠缠性质的控制已经取得了显著的进展，使得量子计算机在解决某些特定问题上表现出色等。

图表 量子计算发展生命周期示意图



iCV TA&K | 2024年2月版

量子计算产业将进入快速成长周期。即随着量子计算机硬件的不断升级和算法的不断优化，更多的软硬件企业将投身于量子计算领域，并推动量子计算在不同行业的广泛应用。量子计算将在金融、医疗、材料科学等领域最先发挥作用，为下游行业带来颠覆性的创新。与此同时，产业链上的合作与竞争也将更加激烈，投资和创新以及庞大的市场需求将成为推动产业前进的关键驱动力。政府和企业也将共同合作，加大研发投入，以争取在全球量子计算领域的竞争优势。

量子计算云平台竞争格局

目前，云平台的主力用户是大学、科研院所、企业里的软件算法开发与验证人员，同行云平台的开发者，以及在校学生和想要从事相关领域的受训者；潜在用户是量子计算所赋能行业的研发机构。对于大部分使用者来说，付费使用量子云平台比采购和搭建量子计算机更为经济、方便、易实施。

量子计算云平台的竞争优势包括平台的先进的硬件接入、长期使用稳定、软件工具丰富、混合计算能力、用户操作友好、强生态支撑、用户隐私安全和细分行业应用解决方案等方面。此外，量子计算云平台的后端还连接量子计算模拟器，它是通过经典计算机编程模拟量子特性，依靠模拟的“量子”进行相应计算。由于运算必然会占用一定的存储和算力资源，因此，大多数公司提供的免费量子计算云平台是量子模拟器。物理形态的硬件算力支持则更多情况下需要付费，因为支撑云平台持续运营需要大量资金投入。

全球量子计算云平台的竞争格局呈现出激烈的多元化特征。欧美如IBM、Google、Microsoft、Amazon、AQT等公司涵盖了多种量子计算技术路线，包括超导、离子阱、中性原子、光子。中国如华为、本源量子、国盾量子、中电信量子集团等公司也崭露头角，主要采用超导技术路线。

发展趋势上，未来全球量子计算云平台将朝着技术融合、计算效率提高、深度融合其他领域以及标准化规范化等方向发展。多技术路线的融合和互操作将为用户提供更多选择和灵活性，实现量子计算与经典计算的无缝集成将提高计算效率和降低成本，与人工智能、大数据、云计算等领域深度融合将拓展应用场景，标准化规范化将提高整体安全性和可靠性。这一竞争格局和发展趋势表明，全球量子计算云平台正处于一个快速演进的阶段，各方将致力于不断创新和提升综合实力，以争夺全球领导地位。

图表 全球量子计算云平台地理分布情况



二、量子通信与安全发展情况综述

01 量子通信与安全生态蓬勃发展

PQC与QKD的发展呈现并驾齐驱之势

量子通信与安全领域的两大关键技术——量子密钥分发（QKD）和后量子密码学（PQC）——正展现出协同发展的态势。近年来，尽管QKD起初获得更多关注，但PQC的关注度在2022和2023年迅速增长，使得两者在投融资、政策支持、研究热度和商业潜力等方面呈现出并驾齐驱的发展趋势。

QKD技术的全球布局正在扩大，超过30个国家正在建设相关基础设施。同时，QKD等技术的基础研究继续是未来发展的重点，以提高系统安全与效率，并解决实际应用中的挑战，如光子损耗和噪声干扰。

PQC技术正迈向成长期，受益于标准化和政策支持，其商业化和应用探索在即。PQC技术正在迭代升级，以满足不同应用场景的需求。同时，PQC商业化和迁移计划正在启动，企业和组织正积极探索将现有加密算法迁移至PQC体系，以评估其商业潜力和成本效益。政府机构的参与和NIST的标准化文件为PQC的迁移提供了指导，推动了相关解决方案的发展，以增强通信和数据安全，防范算法破解风险。

产业生态建设不断完善

全球量子政策的支持推动着量子通信与安全领域将持续向好发展。在国家政策层面，2023年见证了多个国家首次或更新发布国家量子战略，为量子通信的长期发展注入动力。此外，多国政府在科研层面提供资金支持。

尽管存在一定的阻碍，但量子通信与安全领域的跨国合作在增加。多国签署在量子科学与技术方面的合作备忘录以及一些国家合作以加强在PQC迁移方面的突破。

量子通信领域的公司与量子计算、量子精密测量领域的公司常常相互合作，发现新机遇。2023年，这种跨领域合作趋势愈发明显，表现为量子计算与量子通信的紧密结合。预计未来跨学科合作将更加普遍，推动量子生态系统的完善，增强量子通信的安全性。

下游应用场景逐渐增多

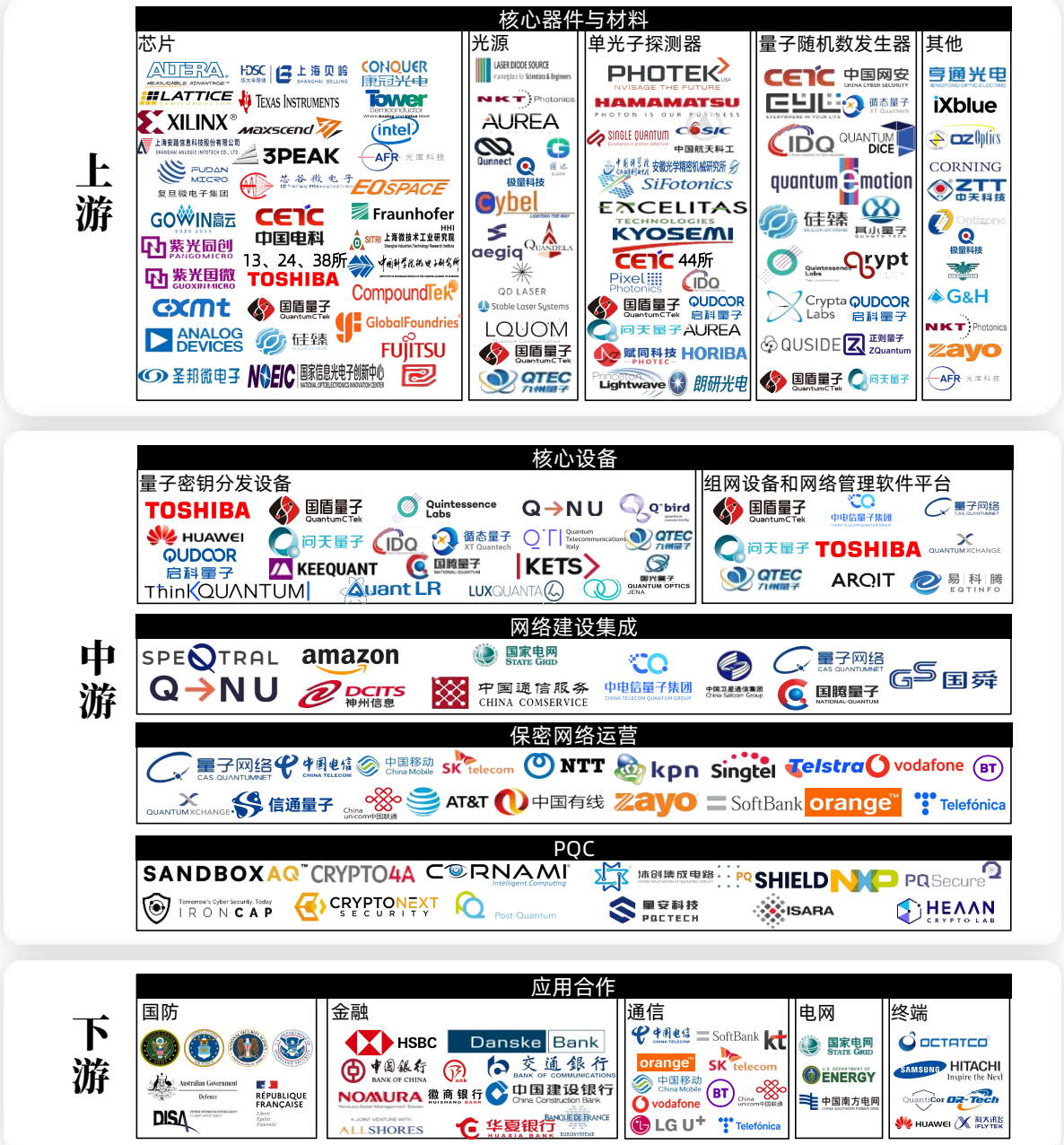
量子安全需求推动了QRNG技术在多个领域的应用，特别是在提升汽车、移动设备和物联网的安全性能方面。同时，QKD技术在金融、政务和国防等行业的应用正不断拓展，显示出量子通信基础设施的广泛潜力。此外，通信领域的企业正在开发利用PQC技术的加密解决方案，全球范围内的政府和军事机构也越来越重视与私营部门的合作，以加速获取先进的量子安全技术，从而确保通信和数据传输的安全。

02 产业链相对成熟

量子通信与安全产业链发展至今，已相对成熟，产业链分工更为细分。随着产业链结构进一步明晰，本次对产业链结构进行了调整，试图呈现出当前产业生态现状。

产业链上游的核心器件与材料划分为芯片、光源、单光子探测器、量子随机数发生器以及其他。产业链中游划分为设备层、网络建设层和运营层。此外，这一版还将PQC纳入产业生态图谱。产业链下游仍以主要应用行业进行划分。

图表 量子通信与安全产业链



注：部分公司的LOGO出现多次，旨在显示该公司在不同的版块均有业务涉及。

03 量子通信与安全产业链上游

在量子通信与安全产业链上游，核心器件与材料的涵盖囊括了关键的技术组成部分。首要的是先进的量子芯片技术，作为整个产业链的基础，包括数据处理类芯片、电学芯片和光学芯片。光源则成为量子通信不可或缺的关键组件，作为载体，经过对其量子状态的调制操作后，可携带量子信息在不同通信节点间中进行信息传输和共享。在通信接收端，单光子探测器发挥着至关重要的作用，确保对量子信息的精准检测。量子随机数发生器是保障通信不可预测性的关键工具。此外，其他核心器件如PPLN（周期极化铌酸锂）晶体、PPLN（周期极化铌酸锂）波导、光纤光缆等元件同样在上游产业链中发挥着关键作用。这些核心器件和材料为量子通信与安全产业链的上游提供了创新动力，为实现更安全、更高效的量子通信系统奠定了坚实基础。

图表 量子通信与安全上游

技术	基本情况	部分公司
芯片	数据处理芯片为FPGA（现场可编程门阵列）芯片通过编程，可以成为实现任意功能的器件。电子学芯片在量子通信中也有所使用，包括模拟信号处理芯片、数模/模数转换芯片（DAC/ADC）、射频芯片、存储芯片等。光学芯片通常指集成了光学功能的芯片，如光波导、光学传感器等。	XILINX、LATTICE SEMICONDUCTOR、ALTERA、国盾量子 QuantumCTek
光源	光源是产生光子的器件或设备，是实现基于量子物理的安全通信的基本元素。不同技术路线下对光源可能有不同的需求，激光器是一种常见的光源的设备。	QD LASER、QUANDELA、国盾量子 QuantumCTek、aegiq
单光子探测器	单光子探测器可以检测单个光子的信号强度，并将光信号转换放大为电信号。在量子通信中，主要探测可见光到近红外光波长范围的光信号，探测范围一般在400纳米到1310纳米之间。半导体探测器和超导探测器是两种常见的单光子探测器类型。	Princeton Lightwave、国盾量子 QuantumCTek、PHOTEK、QUDOOR 启科量子
量子随机数发生器	量子随机数发生器（QRNG）已成为商业产品，是QKD设备中的核心部件。产品成熟度不断提升，从成本角度来看，已可具备了替代经典随机数产品的能力。	IDQ、国盾量子 QuantumCTek、QUDOOR 启科量子、quantum emotion
其他	晶体：主要用于生成和调制用于传输量子信息的光子。 光纤光缆：光纤光缆是量子通信中所使用的一种传输介质，低损耗光纤可有效提升量子通信的通信距离和通信速率。	iXblue、极量科技、NKT Photonics、亨通光电 HENGTONG OPTIC-ELECTRIC

注：本图表中行业参与者仅展示部分，更多行业参与者请参考量子通信与安全产业链以及实际情况。

04 量子通信与安全产业链中游

在量子通信与安全产业链中游，划分为核心设备、网络建设集成、保密网络运营以及PQC。核心设备涉及到关键的量子通信设备，如QKD设备、组网设备和网络管理软件平台，这些设备确保信息的安全传输。网络建设集成用于构建高效、安全的量子通信网络，例如中国的国家骨干网、省骨干网以及城域网。保密网络运营则包括各运营商参与其中，推动量子通信技术的日常运行与维护。同时，产业链中游还加入了PQC领域，包括新一代的加密算法、安全协议、芯片等。这部分的发展使得产业链更为全面，更加关注未来密码学的演进。整个中游通过设备、网络建设和运营的协同作用，为量子通信与安全的发展提供支撑，为实现更安全、高效的通信提供了关键保障。

图表 量子通信与安全中游

技术	基本情况	部分公司
核心设备	主要包括量子密钥分发（QKD）设备、组网设备和网络管理软件平台。QKD设备的商业化产品当前主要为DV-QKD（离散变量量子密钥分发）和CV-QKD（连续变量量子密钥分发）两大类。组网设备和网络管理软件平台包括信道交换类、数据处理类及网络管理软件平台。	IDQ、国盾量子 QuantumCTek、问天量子、TOSHIBA、QUDOOR 启科量子、ThinkQUANTUM
网络建设集成	全球大部分QKD网络建设依托现有光纤通信网络，通过选择一些合适的点位，在机房中布设QKD发送端和接收端设备。	中电信量子集团 CHINA TELECOM QUANTUM GROUP、SPEQTRAL、量子网络 QUANTUMNET、QUANTUMXCHANGE
保密网络运营	运营层主要负责管理和协调整个量子网络的运作。这包括监控网络状态、调度量子信号的传输、维护网络安全性和稳定性。在运营层，重要的工作还包括处理密钥管理和分发、优化网络资源分配以及故障检测和响应。	中国电信 CHINA TELECOM、中国移动 China Mobile、China unicom 中国联通、SK telecom、orange、Telstra
PQC	一切可以抵抗量子计算攻击的新算法均可成为PQC，作为一种基于数学算法，通过芯片和配套软件系统实现的方案，在成本上和使用铺盖效率上较QKD有优势。	CRYPTO4A、量安科技 PQCTECH、PQSHIELD、SANDBOXAQ

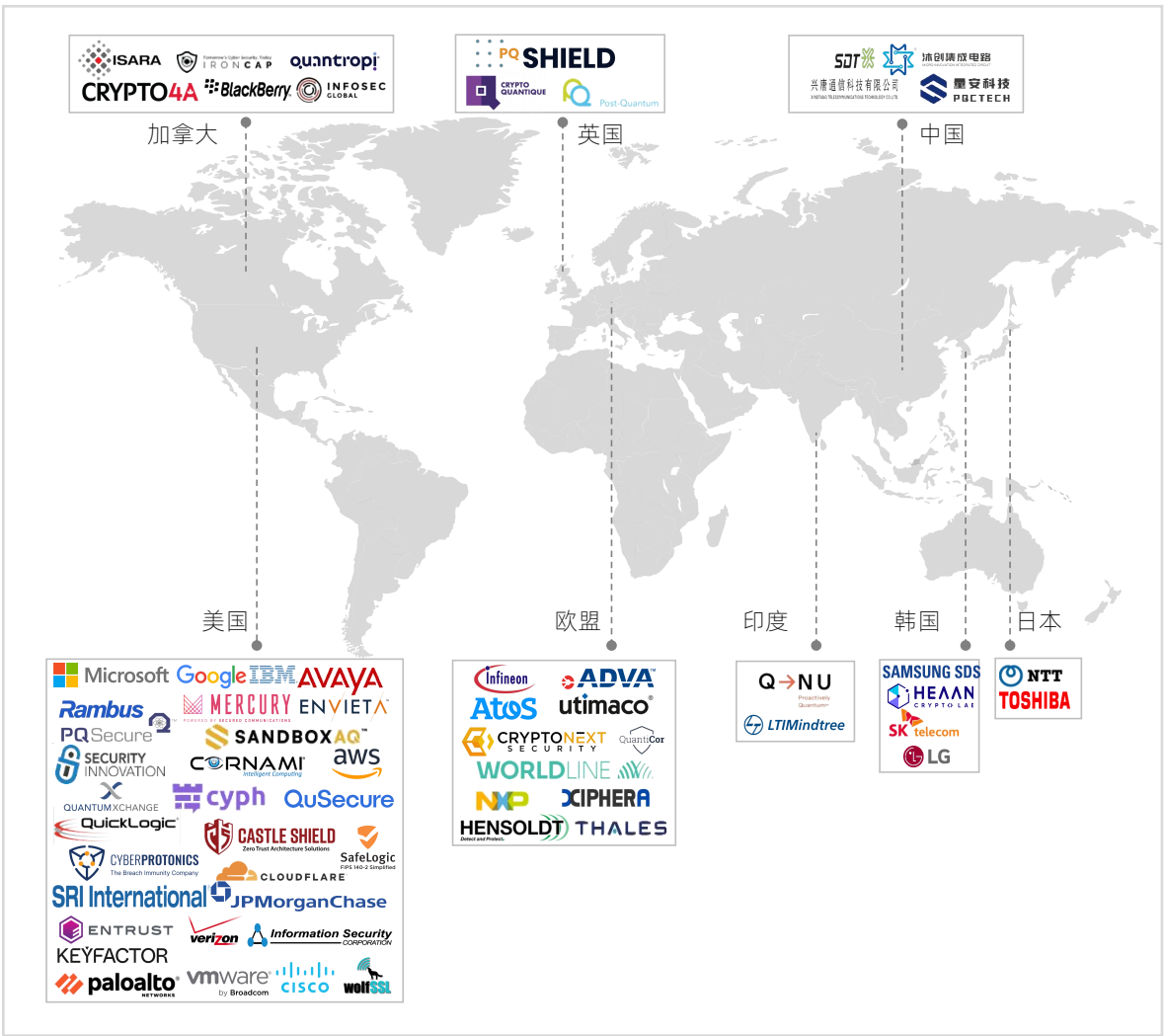
iCV TA&K | 2024年2月版

注：本图表中行业参与者仅展示部分，更多行业参与者请参考量子通信与安全产业链以及实际情况。

中游PQC参与者分布

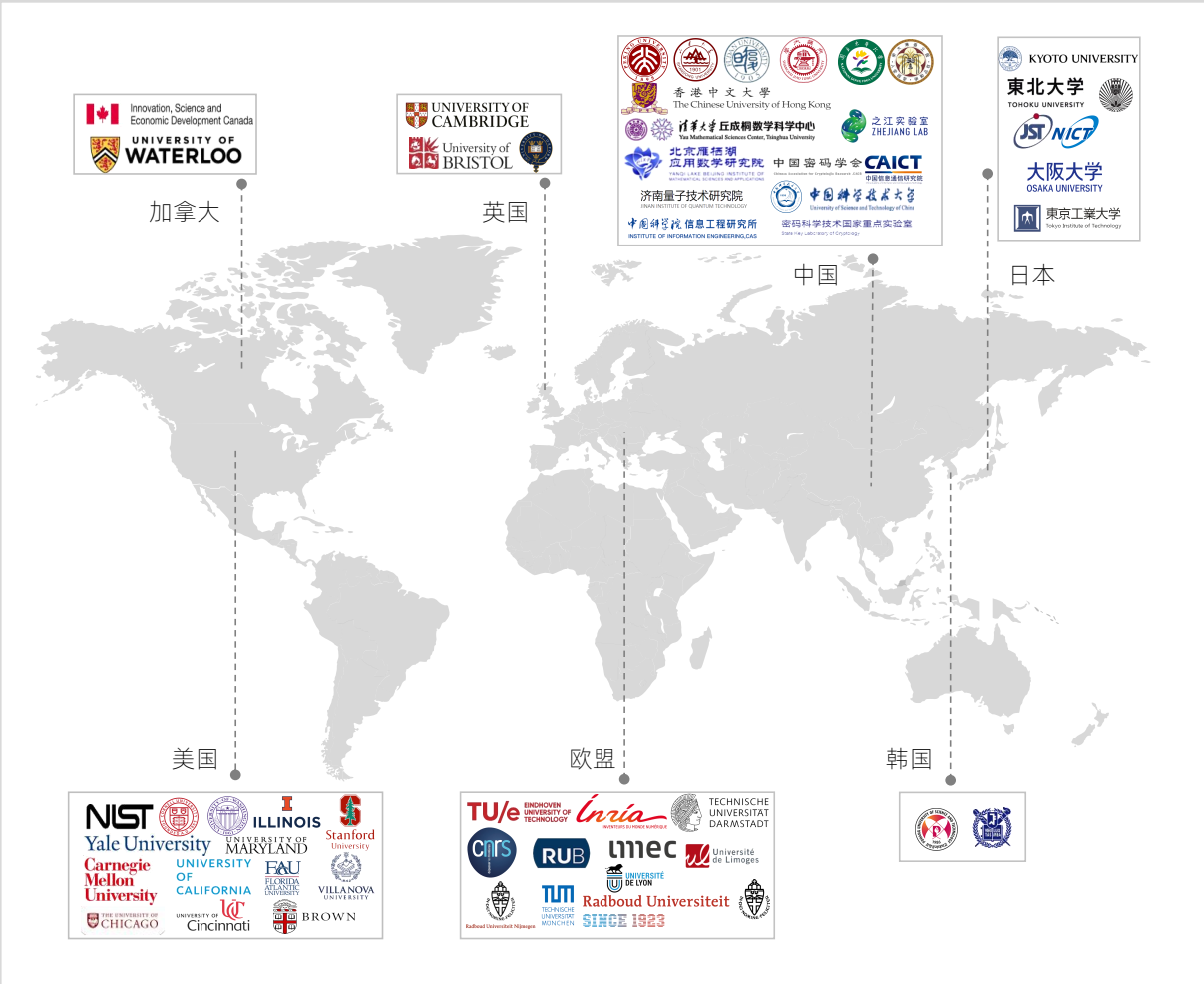
从PQC公司总部地理分布来看，美国、欧盟、中国的公司分布较为密集。此外，加拿大、英国、日本、韩国、印度等国家也有公司参与PQC研究，并提供PQC产品或服务。从企业业务来看，美国IBM、Microsoft、Google等全球科技巨头将公司业务拓展至PQC领域，其中Google已应用PQC算法保护其旗下Chrome浏览器网络安全。印度QNu Labs公司以NIST的PQC标准工作为参考，开发基于格的PQC算法，提供Hodos产品服务。

图表 全球PQC研究公司分布



全球PQC科研机构以高校为主。中国参与PQC领域的科研机构较多，但实现商业化转型的机构仍然有限。主导PQC标准化的NIST机构位于美国，基于此优势，美国多个科研机构孵化出PQC初创公司，转型商业化。此外，欧盟、英国、加拿大、日本等国家也有较多PQC科研机构。

图表 全球PQC科研机构分布



全球PQC研究工作推进情况

PQC研究应用工作重要性在于要确保不同厂商PQC方案之间的互操作性和安全性，推动PQC技术的商业化应用和广泛采用，完成从经典密码体系向PQC的过渡。美国是诸国中，标准化进程走得最快的。除了美国，英国、德国、法国、中国、日本和韩国等国家在PQC领域也相当重视，开展了PQC相关工作。

在国际机构方面，互联网工程任务组（IETF）成立了后量子加密工作组（PQUIP），旨在协调加密协议的使用。IETF批准英国网络安全公司Post-Quantum提出和设计的量子安全虚拟专用网络（VPN）的新标准。此标准规定了VPN如何在量子时代安全地交换通信，VPN新标准将互操作性放在首位，允许使用不同公钥加密算法的各方相互通信，使多种PQC和经典加密算法被纳入VPN成为可能。9月，PQC技术人员、研究人员和专家从业者为推动美国NIST推行的PQC标准化算法理解及采用发起了PQC联盟（PQC Coalition）。创始联盟成员包括美国公司IBM Quantum、Microsoft、MITRE、SandboxAQ，英国PQShield以及加拿大滑铁卢大学。

美国

美国发布《2023 年国家网络安全战略》，提出政府应增加对 PQC 迁移的有关投资，广泛更换容易被量子计算破坏的硬件、软件和服务。 美国CISA、NSA与NIST于8 月联合发布《量子准备：向后量子密码迁移》指南。9月，NIST下属的国家网络安全中心（NCCoE）发布《向后量子密码学迁移》项目情况说明书，概述了向PQC迁移项目的背景、目标、挑战、好处和工作流程。此外，NCCoE还列出了参与该项目的28家技术供应商名单，包括IBM、Amazon、Microsoft、SandboxAQ等量子主要参与公司。

英国

英国国家网络安全中心（NCSC）发布白皮书，帮助商业企业、公共部门组织和关键国家基础设施提供商的系统和风险所有者思考如何为向PQC迁移做好准备。

德国

德国联邦信息安全办公室（BSI）与罗德与施瓦茨网络安全有限公司开展了“通用密码库的安全实施”项目。该项目建设了Botan密码库，到2023年，Botan密码库已发展到3.0版本。

法国

第九届ETSI/IQC量子安全密码学活动于2023年2月在法国ETSI总部召开，此次会议汇聚了工业界、学术界和政府相关的量子密码学人才，并声明ETSI将继续向量子安全标准化历程努力。

中国

中国信息安全标准化技术委员会召开后量子密码技术与创新实践研讨会，围绕PQC领域前沿技术、研究动态及发展趋势等方面进行探讨，推动了PQC标准化设立以及应用实施。

清华大学丘成桐数学科学中心、北京雁栖湖应用数学研究院主办的第三届雁栖湖国际后量子密码标准化与应用研讨会暨后量子技术成果发布会在北京召开，共同商讨国际PQC标准化进展与面向行业领域的PQC迁移工作。

中国抗量子密码战略与政策法律工作组成立与专家聘任仪式在第十三届中国信息安全法律大会主论坛上举行。工作组将对抗量子密码技术、产业、业务的现状和相关国内外政策、法律法规进行研究，以公开或定向方式发表抗量子密码相关蓝皮书、要报、专题研究报告等成果，推动形成中国抗量子密码共识和行动方案。

日本

日本信息通信研究机构（NICT）发布消息称，NICT与日本凸版印刷株式会社正在合作研究PQC。双方在NICT运营的试验床——医疗保健长期完整性和保密性保护系统（H-LINCOS）中，建立了一个兼容PQC的私有证书颁发机构，通过增加电子签名和数字证书签发功能，以及与凸版印刷和NICT开发的“PQC CARD”联动，验证篡改检测功能的有效性。

韩国

韩国国家情报院和科学技术信息通信部发布一项总体规划指出，韩国将在2035年之前将国家密码系统转变为后量子密码学。这两个组织与国防部、内务安全部、国家安全技术研究院、韩国互联网振兴院、韩国地方信息振兴院等成立了工作委员会，并与韩国地方信息振兴院共同制定了总体规划。时间跨度长达十余年的总体规划路线图旨在保护韩国免受量子计算威胁，并加强韩国的国家网络安全。

05 量子通信与安全产业链下游

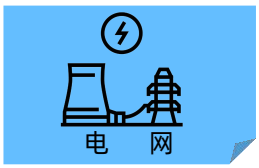
量子通信与安全产业链下游涵盖了广泛的应用领域，包括国防、金融、电网以及终端等。在国防领域，量子通信技术应用于高度机密的军事通信，确保敏感信息的安全传输，有效防范窃听和网络攻击。金融行业通过量子通信技术实现更安全可靠的数据传输，提高对金融交易和客户信息的保护水平。在电网领域，量子通信可应用于保障电力系统中实时数据的安全传输，预防网络攻击和数据篡改，确保电网运行的稳定性。



- 美国陆军授予QuSecure公司一份小型企业创新研究第二阶段合同，为陆军用户开发基于PQC的加密技术和解决方案，并确定如何在战术边缘使用量子技术。
- SandboxAQ企业获得美国国防信息系统局提供的合同，提供端到端的PQC管理解决方案。



- 汇丰银行与Quantinuum签署一系列探索性项目，此次合作的目标是利用量子计算的力量来增强加密密钥，同时将其与PQC算法相集成。
- 汇丰银行使用QKD的加密形式保护了其专有平台HSBC AI Markets上的一笔交易，将3000万欧元兑换成了美元。



- 中国国网武汉供电公司在武汉经开区供电环网内的配电自动化终端实现了量子加密通信。新安装的量子加密通信线路，配电箱里添置了一个量子加密通信模块，加装在每个配电设备上，通过与电网通信链路连通实现量子加密通信。
- 浙江省首座量子+变电站35千伏稽山变在绍兴老城区投运，该变电站由原35千伏城关变经过“无线公网＋量子通信”技术改造，将变电站的有线通信变为无线通信，贯通了现有配网量子开关与主网量子+变电站之间的电力信息数据，具备主配网一键联动功能。此次”量子变电站“由国盾量子及参股公司浙江国盾量子电力提供设备及技术支持。



- 法国Thales在其移动安全应用和5G SIM卡中采用混合加密技术，引入了PQC算法通信。
- 美国QuSecure推出具有量子弹性的实时端到端卫星加密通信链路。
- 谷歌Chrome在其最新版本（版本116）中推出了一个量子混合密钥协商机制，添加了抗量子攻击的X25519Kyber768算法。
- 国盾量子推出安全邮件产品——国盾密邮，采用“一次一密”的密钥分发技术，结合高强度国密算法，为用户提供端到端的邮件安全收发服务。



- 中国电信与华为合作发布的Mate60 Pro手机终端提供量子密话定制功能。
- 中国电信与三星推出三星W24 | W24 Flip两款引入中国电信量子密话功能的手机。
- 中国电信发布支持量子密话的天翼铂顿10和天翼铂顿S9手机终端，其中天翼铂顿S9是搭载天通卫星通信芯片的5G卫星双模手机。
- 韩国SKT与IDQ、三星电子合作发布Galaxy Quantum 4量子通信手机，该手机搭载QRNG芯片。

06 网络建设（陆地部分）：QKD网络建设

2023年，美国、中国、新加坡、加拿大、法国、爱尔兰、比利时、西班牙等国的陆地QKD基础设施网络建设均有进一步发展。相关发展情况如下：

美国
开展量子网络链路测试，推动量子通信发展



纽约大学量子信息物理学中心（CQIP）和量子安全网络技术公司Qunnect合作，使用Qunnect的量子安全网络技术，通过纽约市的标准电信光纤发送量子信息，成功测试了布鲁克林海军造船厂和纽约大学曼哈顿校区之间10英里（16公里）量子网络链路。在10英里的光纤中，Qunnect和CQIP实现了以每秒15000对的速度传输高度纠缠的量子比特通过光缆，测试过程中链路正常运行时间达到99%。此次实验打开了纽约都市区的金融服务、关键基础设施和电信公司试点量子网络技术的大门。

中国
长三角区域量子保密通信骨干网建设成果发布，全长2860公里



由国科量子建设和运营的长三角区域量子保密通信骨干网建设成果于2023年6月在第五届长三角一体化发展高层论坛上正式发布。长三角量子网络线路总里程约2860公里，形成了以合肥、上海为核心节点，链接南京、杭州、无锡、金华、芜湖等城市的环网，通过量子业务运营支撑系统及量子卫星调度系统，为星地一体量子保密通信网络提供全方位保障。

新加坡
首个全国性NQSN+量子安全网络开始建设，提供商业数据保护



新加坡首个国家量子安全网络（National Quantum-Safe Network Plus，NQSN+）开始建设，该项目由新加坡国家研究基金会支持，是一项为期三年的量子工程计划。NQSN+首先进行QKD技术的部署，并结合对PQC的探索，建立QKD/PQC混合体系架构、量子密钥即服务和面向服务的QKD网络，实现从“点对点”到“多点互联”的转变，建成后将成为一个具有量子加密功能的互操作网络。11月，新加坡信息通信媒体发展局任命新加坡数字服务提供商SPTel和新加坡量子通信公司SpeQtral联合建设NQSN+项目。SpeQtral表示将与日本东芝加强在量子通信方面的合作，利用东芝基于光纤的QKD和量子密钥管理系统产品套件，为“NQSN+”的建设提供支持。IDQ、EvolutionQ、Thales等公司均会参与此项目建设。

加拿大
加大投资，建设未来全国量子通信网络基石



加拿大政府与魁北克省政府分别提供360万加元和400万加元的资金用来建设加拿大第一个量子通信测试平台。该项目是测试量子通信技术的必要基础设施，并有可能成为加拿大未来量子通信网络的基石。目前，此测试平台的第一个节点已建设于加拿大舍布鲁克市。

欧盟
EuroQCI项目陆续开展，预计2027年投入使用

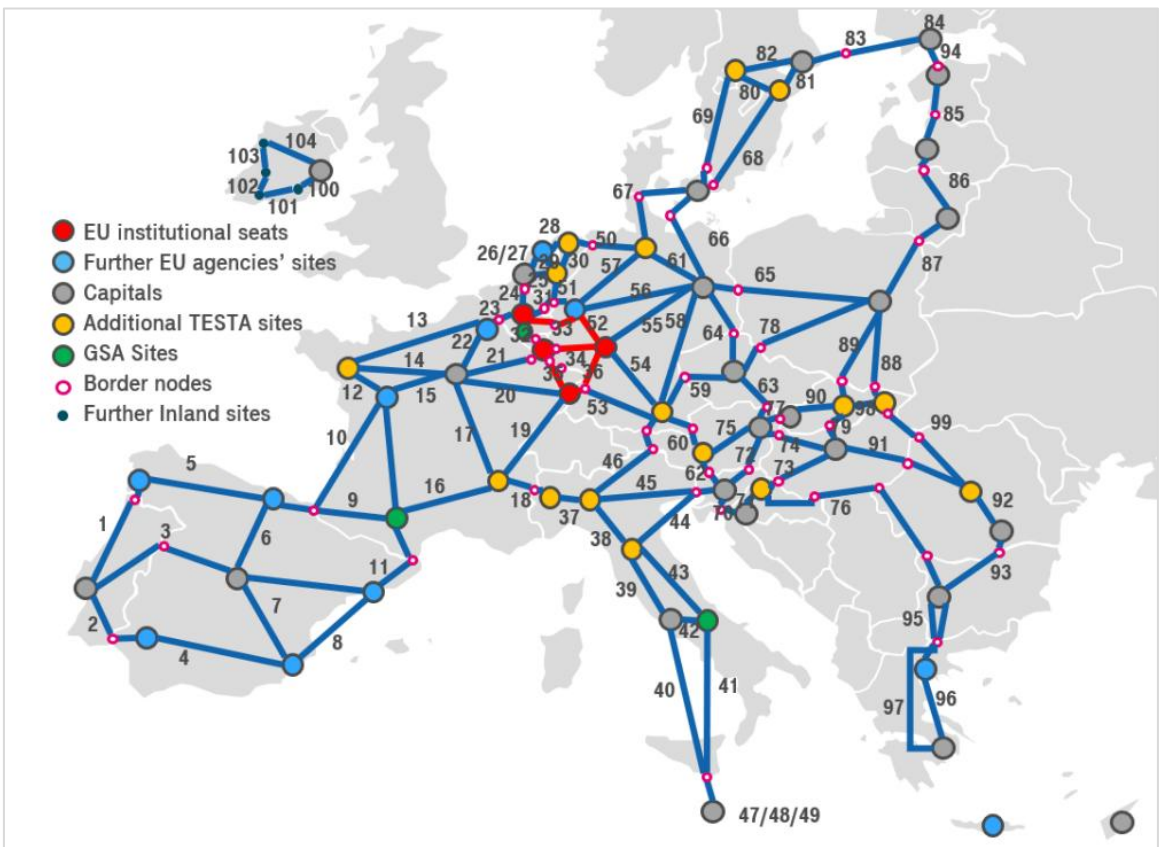
欧洲量子通信基础设施（EuroQCI）是一个覆盖整个欧盟及其海外领土的量子通信与安全基础设施。欧盟委员会与所有27个欧盟成员国以及欧洲空间局（ESA）合作，设计、开发和部署由地面部分和空间部分组成的EuroQCI。地面部分依赖于连接国家和跨境战略站点的光纤通信网络，而太空部分基于卫星进行建设。EuroQCI于2019年6月发布EuroQCI宣言，最初有七个成员国（比利时、德国、意大利、卢森堡、马耳他、荷兰和西班牙）签署了EuroQCI宣言。2021年7月，随着第27个成员国爱尔兰的加入，所有成员国都加入了该倡议。

EuroQCI项目的陆地部分由欧盟成员国实施，太空部分由ESA实施。EuroQCI的第一个实施阶段于2023年1月开始，项目预计持续30个月，将于2025年6月完成。EuroQCI地面部分重点关注以下领域：

- 一系列工业项目，旨在开发EuroQCI的关键技术构建块，以发展欧洲的量子通信生态系统和产业。
- 国家项目允许成员国设计和建设国家量子通信网络，该网络将构成地面部分的基础，通过测试不同的技术和协议使其适应每个国家的具体需求。
- PETRUS作为所有项目之间的纽带，负责协调和支持此行动，并确定标准化需求。

EuroQCI空间部分主要为欧盟委员会与ESA合作，基于已有的第一颗原型卫星Eagle-1的基础上制定EuroQCI第一代卫星星座的规格，预计该卫星于2025年底或2026年初发射。

图表 欧盟EuroQCI项目地面部分潜在选址



来源：Jean-François Buggenhout “EU Quantum Technologies Flagship and the quantum internet” ENISA TELECOM SECURITY FORUM, 29 June 2022

EuroQCI项目的规划和建设涵盖了多个关键方面，从EuroQCI项目参与国已公开的信息显示，项目建设主要围绕四大方面：

第一，战略层面，欧洲技术主权建设，为此后发展技术做储备和铺垫。通过该项目，欧洲国家将建立起对量子通信技术的独立掌控力，确保欧洲在量子领域的技术竞争力；

第二，基建层面，建设各国自己的地面QKD线路建设，部分国家涉及空间QKD线路建设，以及跨国线路建设。

第三，用例示范，产业生态建设，标准建设。通过展示量子通信技术在实际应用中的效能，推动产业链的发展。同时，标准的建设将为整个欧洲的量子通信生态系统提供一致性和可比性，促进技术的广泛应用。

第四，培训层面，对政府、应用方等利益相关者进行技术教育，教育学生，向公众传播量子技术知识。不仅包括量子技术专业人员的培训，还涵盖了对政策制定者和决策者的培养。此外，项目还注重教育学生，培养下一代量子通信领域的专业人才。

图表 欧盟EuroQCI项目开展情况

序号	国家	项目名称	建设内容
1	比利时	BeQCI	基建内容：在全国各地的不同节点（布鲁塞尔地区、鲁汶、根特、哈瑟尔特、雷杜）之间和不同的拓扑中实现沿专用光纤的多个量子链路，并选择不同的QKD系统。探索与空间量子通信网络的潜在接口以及与邻近成员国卢森堡和荷兰建立（长距离）QCI链接的可能性。 实现三个主题：确保整个通信链的安全、降低QKD系统的成本、增加链路长度。在硬件方面，目标是开发和集成接收器（用于CV-QKD）、芯片级发射器（用于MDI-QKD）和频率转换器（用于与金刚石中的固体自旋量子位态连接）等组件。在软件方面，目标是设计用于身份验证的新型QKD协议和经典（后量子）加密协议，并改进安全分析。培训和传播：对行政、工业和政府部门的潜在用户进行QKD教育。对学生进行量子技术（包括QKD）教育。开展几项外展活动，向广大公众介绍量子世界的奇迹。
2	保加利亚	BG QCI	协调单位为国家量子通信中心（QUASAR），该中心是保加利亚科学院机器人研究所的一部分基建内容：建造两条试点量子轨道。第一条线路位于索非亚市境内，将包括内政部、国防部和交通部的信息阵列；第二条线路长280公里，通过将量子网络带到库拉塔过境点，连接索非亚与希腊。
3	克罗地亚	CroQCI	建设基于光纤的QKD地面网络；准备好与邻近欧盟成员国的量子通信基础设施连接。
4	塞浦路斯	CYQCI	拟建的量子通信网络跨越塞浦路斯的三个城市，利用当前部署的光通信网络，部署至少6个用例和11个终端用户，用于保护公共组织、关键基础设施、学术机构和工业服务。此外，将采用光学地面站与近地轨道卫星进行通信，连接塞浦路斯与欧盟其他国家。最后，建立一个量子通信能力中心，提供研究、教育和培训课程。
5	捷克	CZQCI	量子通信网络基础设施建设包括：(1)建设第一个长距离量子通信网络连接布拉格、布尔诺和俄斯特拉发等城市的骨干网；(2)连接公共机构并测试场景用例和场景的大都市分支；(3)提供包含多种代表性QKD技术的实验室，以测试和研究基础设施技术。

序号	国家	项目名称	建设内容
6	爱沙尼亚	EstQCI	(1)为未来QKD网络和服务部署建立相关的知识和能力；(2)测试欧盟27国量子通信基础设施设备情况，了解是否适合爱沙尼亚的条件和需求；(3)在长途量子网络之间进行网络测试；(4)与邻国合作，准备与芬兰、拉脱维亚和瑞典建立跨境连接。
7	西班牙	EuroQCI-SPAIN	(1)设计EuroQCI在西班牙的初步国家架构，从西班牙最大城市马德里（MAD）和巴塞罗那（BCN）节点开始，逐步扩展到更多地点。部署QKD加密系统，并在马德里和巴塞罗那节点现场演示QKD系统功能。(2)向公共机构提供量子网络并展示用例，开发基于国家的量子通信生态系统，未来扩展到私营部门。(3)评估与EuroQCI架构、城内和城际兼容的自由空间和长距离量子通信网络（包括可信节点和量子中继器演示器）的可行性，研究QCI空间和地面段之间的接口。
8	法国	FranceQCI	地面部分：利用巴黎（ParisRegionQCI）和尼斯（Quantum@UCA/Nice）地区的现有基础设施，推进QKD服务的运营。 空间部分：量子网络将在图卢兹（DGAC/DSNA/DTI实验室）实施，为法国民航局测试真实的最终用户服务，包括交换由QKD保护的模拟运行空中交通管制数据。
9	希腊	HellasQCI	利用QKD、地面光纤和卫星技术将希腊的战略地点（雅典、塞萨洛尼基和伊拉克利翁、克里特岛）与三个光学地面站（切尔莫斯、霍洛蒙塔和斯金卡）连接起来。
10	爱尔兰	IrelandQCI	(1)使用与现有经典光纤系统集成的暗光纤，沿着从都柏林经沃特福德到科克的主要网络骨干建立QKD基础设施。此外，还包括2个城市网络将连接公共、行业和学术组织；(2)与主要相关方一起测试16个量子安全技术高级用例，收集提供支持40多个爱尔兰用例的服务的要求；（3）打造创新的量子技术生态系统。包括为公共、工业界和学术界建立测试和工程设施，开发和测试量子网络中的设备，并与欧洲集成光子学试验线连接；(4)为主要相关方、公众提供量子通信教育，并培育量子劳动力。
11	拉脱维亚	LATQN	开发国家级实验性QKD网络，并与项目合作伙伴现有通信网络集成。实验性QKD网络将由基础设施QKD主干（公共部分和封闭部分）组成，其中将集成量子加密解决方案。
12	卢森堡	Lux4QCI	设计、开发、采购和部署第一个实验性量子通信基础设施网络，专注于政府通信和安全数据中心连接。
13	芬兰	NaQCI.fi	测试芬兰城域和长途链路的QKD技术；部署与邻国爱沙尼亚和瑞典的跨境链接以及未来可能实施的卫星链接。
14	瑞典	NQCIS	部署和测试适合瑞典特定需求的QKD系统，测试不同的实施方案，确定安全通信的最有效解决方案。包括城域网络、长途网络、地面到卫星链路和海底链路等符合瑞典地理特征的实施方案。
15	波兰	PIONIER-Q	开发并与现有光和数据传输技术集成的量子通信网络设施；部署国家、骨干和城域量子网络；与公共用户一起部署和测试用例；提供量子培训环境。

序号	国家	项目名称	建设内容
16	马耳他	PRISM	在横跨马耳他的Melita光纤网络上建立一个约20个链接组成的网络，并通过Melita海底光缆直达西西里岛。在2025年启动的欧盟范围计划的第二阶段中，马耳他网络将连接到邻近欧盟国家的类似量子网络。第三阶段涉及覆盖所有欧盟国家的量子卫星。
17	葡萄牙	PTQCI	在现有的光纤基础设施中部署一个弹性网络，连接里斯本的不同公共机构，以及涉及学术和私营相关方的测试网络，并准备扩展网络至葡萄牙更远的地域，评估地面到空间部分的基础设施。
18	德国	Q-net-Q	提供柏林和法兰克福之间的长途QKD链路，通过可信中继配置中的QKD点对点连接链实现。每个单独链路生成的QKD密钥由密钥管理系统层以加密方式组合，并在柏林和法兰克福的远程端点之间生成最终密钥。QKD节点将安装在光纤路线沿线的安全位置，相距约80公里。
19	奥地利	QCI-CAT	利用维也纳市和格拉茨市的现有光纤基础设施部署QKD测试设施，将易于适应和实施的方式将最先进的现代加密技术（例如PQC）与QKD协议相结合，保护奥地利不同机构、医院和大学之间传播敏感信息。利用格拉茨和维也纳之间的链路，实施可信节点等顶级安全功能，并测试量子中继器。
20	丹麦	QCI.DK	在5个丹麦公共机构和哥本哈根地区的2个相关数据中心之间建立一个量子安全网络，该基础设施还包括一条200公里长的长途链路，通过城域网络连接三所参与的大学合作伙伴。此外，还将在一个网络中结合三种不同的QKD技术，进行测试和应用。
21	匈牙利	QCIHungary	将首都布达佩斯与三个不同方向的三个城市（杰尔、瑙吉考尼撒、塞格德）连接起来，未来还可能与奥地利、斯洛伐克、斯洛文尼亚、克罗地亚和罗马尼亚进行跨境连接。在现有研究基础上，开发连续变量以及基于光纤纠缠的QKD系统。除了地面光纤QKD系统外，还计划通过开发自由空间量子链路和安装具有量子能力的地面站，为未来基于卫星的QKD链路做准备。
22	荷兰	QCINed	部署量子系统和网络以测试量子通信技术并将其与现有通信网络集成；分别在3个地区（乌得勒支地区、阿姆斯特丹-海牙地区、埃因霍温地区）部署三个不同的先进实验QKD网络。
23	意大利	QUID	开发城域量子通信网络（QMAN）中的节点，并通过意大利量子骨干网互连，该基础设施使用商用光纤分发时间和频率标准信号并将覆盖意大利领土；此外，还将连接重要站点，以接通光纤通信与欧洲QCI的空间部分；开发密钥速率更高的QKD技术以及新型光纤。
24	罗马尼亚	RoNaQCI	部署1500公里以上的QCI网络，包括布加勒斯特、雅西、克卢日纳波卡、蒂米什瓦拉、克拉约瓦和康斯坦察等城市的6个都市网络，其中36条QKD链路横跨罗马尼亚，连接10所大学、5个研究机构、5个公共机构、3个国家和地区。
25	斯洛文尼亚	SiQUID	在节点之间建立QKD链路，并基于纠缠分配协议在卢布尔雅那的研究机构测试量子网络，以实现量子通信协议；此外，还将测试设备无关的QKD和远程纠缠等先进的量子通信协议，以进一步提高QKD实施的安全性。
26	斯洛伐克	skQCI	使用相同的硬件和技术来实施各种基于纠缠的QKD协议，以便在第一阶段填充斯洛伐克各地的6-12个节点，从而创建一个国家量子网络。

以下为EuroQCI项目中部分参与国家在量子通信基础设施建设方面的最新进展。由于各国在规划、设计、建设目标以及开展时间等方面存在差异，因此各国的建设进度呈现有所不同。

拉脱维亚
集成量子通信基础设施，连接关键合作机构



拉脱维亚国家广播电视中心正在与互联网服务提供商Tet、拉脱维亚电子通信办公室以及拉脱维亚大学数学和计算机科学研究所合作，于10月开始组建国家量子通信基础设施系统和网络。该项目打算在三个合作伙伴之间创建一个有效的量子密钥分发网络，使用这些技术及其在现有基础设施中的集成，同时还可以升级技能并开发新服务。

法国
开展量子通信基础设施项目，保护用户数据



法国于4月开展FranceQCI项目，测试量子通信技术并将其集成到法国现有的通信网络中。利用巴黎和尼斯地区的现有基础设施，推进QKD服务的运营。量子网络还将在图卢兹实施，为法国民航局测试真实的最终用户服务，包括交换由 QKD 保护的模拟运行空中交通管制数据。该项目由空中客车公司、CNRS、Cryptonext Security、Direction Générale de l'Aviation Civile、Orange、索邦大学、巴黎电信、泰雷兹、泰雷兹阿莱尼亚航天公司、蔚蓝海岸大学、Veriqloud 和 Welinq 等共同推进。

丹麦
启动量子通信基础设施项目，测试不同QKD技术



丹麦在3月正式启动建设量子通信基础设施项目（QCI.DK），该项目在5个丹麦公共机构和哥本哈根地区的2个相关数据中心之间建立一个量子安全网络。此外，该基础设施还包括一条200公里长的长途链路，通过城域网络连接三所参与的大学合作伙伴。QCI.DK将在一个网络中结合三种不同的 QKD 技术，从而实现广泛的测试和应用。

马耳他
利用海底光缆量子通信，组建安全网络



马耳他公共基础设施物理安全（PRISM）项目于4月启动，PRISM将在横跨马耳他的 Melita 光纤网络上建立一个由约20个安全连接组成的网络，并通过Melita海底光缆直达西西里岛。在计划于2025年启动的欧盟范围计划的第二阶段中，马耳他网络将连接到邻近欧盟国家的类似量子网络。第三阶段将涉及覆盖所有欧盟国家的量子卫星。

爱尔兰
开展量子通信基础设施建设，升级现有网络



爱尔兰量子通信基础设施计划（IrelandQCI ）计划创建一个量子技术生态系统，研究人员共同将量子设备和系统集成到爱尔兰的通信基础设施中。IrelandQCI团队使用与现有经典光纤系统集成的量子通道，从都柏林经沃特福德（Waterford）到科克的主要网络主干线建立QKD基础设施。

比利时
引入量子通信，部署量子通信网络



比利时量子通信基础设施（BeQCI）项目已于2023年1月启动，在比利时各地的不同节点（布鲁塞尔地区、鲁汶、根特、哈瑟尔特、Redu）之间和不同的拓扑中实现沿专用光纤的多个量子链路，并选择不同的QKD系统。此外，BeQCI还将探索与空间量子通信网络的潜在接口以及与邻近成员国卢森堡和荷兰进行（长距离）QCI链接的可能性。

保加利亚
建设第一个量子通信基础设施，保护敏感数据和关键基础设施



保加利亚第一个量子通信网络的建设于2月正式启动，基础设施的建设将由国家量子通信中心QUASAR协调，该中心是保加利亚科学院机器人研究所的一部分。在接下来的三十个月内，该中心的专家将建造两条试点量子轨道。其中之一位于索非亚市境内，将包括内政部、国防部和交通部的信息阵列。第二条路线将是一条长280公里的线路，通过将量子网络带到库拉塔过境点，将索非亚与希腊连接起来。

07 网络建设（太空部分）：卫星通信建设

2023年，在卫星通信建设方面，美国、中国、新加坡、加拿大等国家均有进一步发展。相关发展情况如下：

美国
嵌入PQC技术确保卫星通信安全



QuSecure推出首个具有量子弹性的实时端到端卫星加密通信链路，这一里程碑标志着美国卫星数据传输首次采用PQC来抵御经典和量子解密攻击，以保护卫星数据通信的安全性。QuSecure的量子弹性加密通信链路可以使任何联邦政府和商业组织都能够通过太空进行实时、安全、经典和量子安全的通信和数据传输。在星链网络上的安全卫星通信测试中，QuSecure成功地将量子弹性数据从Quark服务器通过科罗拉多州Rearden Logic的实验室发送到星链终端。然后通过上行链路将信号发送到Starlink卫星，再通过下行链路传回地球。所有这些通信均受到QuSecure的量子安全层（Quantum Secure Layer, QSL）的保护，通过PQC网络安全保护传输中的所有数据。

同月，QuSecure宣布已与爱尔兰埃森哲（Accenture）公司合作开发并测试PQC保护的多轨道量子弹性卫星通信能力，这有效地结合了低地球轨道卫星和地球同步赤道轨道卫星的优势，实现了数据在太空和地球之间的传输。

美国纳米卫星服务提供商Sky and Space（SAS）宣布与CyberProtonics建立合作伙伴关系。CyberProtonics将为SAS公司的纳米卫星和地面终端机群嵌入PQC技术，为2024年初的发射做准备。这一合作将确保卫星通信的安全性，为未来的卫星网络提供了更强的数据保护。

中国
布局高轨和近地轨道相结合的广域量子通信网络



中国科学院科学家、第十四届全国政协委员潘建伟在接受媒体采访时表示：“我们正在与国家航天科学中心合作研制一颗中高地球轨道卫星。未来，高轨卫星与近地轨道卫星相结合，将构建广域量子通信网络。将有3-5颗专注于QKD的小卫星，产生纠缠粒子用作量子密钥，且质量在100公斤以下。低地球轨道卫星将提供城市之间的联系，而更高轨道的卫星将允许创建一个全球性、全天的量子通信网络。该网络将使用量子力学的元素来加密和安全传输信息。中国还一直在为该网络建设地面站，目前，已经实现了“墨子号”卫星与北京、济南、威海、丽江和漠河等城市之间的量子通信演示。

新加坡
建设QKD卫星，打造未来商用QKD服务



新加坡量子通信公司SpeQtral宣布与纳米航空电子公司NanoAvionics和卫星光子学公司Mbryonics合作建造SpeQtral-1卫星。SpeQtral-1是SpeQtral项目的第二颗QKD卫星，将作为商业探路者来定义未来的QKD服务。该任务还将与SpeQtre项目一起作为欧洲航天局INT-UQKD计划的一部分，探索QKD的国际用例。

加拿大
准备卫星任务架构，布局量子通信网络



HyperSpace是加拿大和欧洲启动的一项为期三年的合作项目，此次合作的目标是证明跨大西洋量子卫星链路的可行性，该链路能够在加拿大和欧洲的量子地面站之间分配以多种方式纠缠的光子。团队将重点研究集成量子光子学和光空间通信，包括新颖的协议和量子链路技术。HyperSpace卫星的用例之一是通过QKD在两个量子地面站之间创建加密链路。

以色列
发射第一颗纳米卫星，向量子通信迈进



纳米卫星TAU-SAT3卫星从佛罗里达州卡纳维拉尔角太空部队站SpaceX猎鹰9号火箭发射升空，此卫星由以色列特拉维夫大学（TAU）研究人员开发。TAU-SAT3卫星将在550公里的高空，预计绕地球运行约五年，执行多项科学任务。TAU-SAT3是一颗20厘米的纳米卫星，是以色列第一颗为推进太空光学和量子通信研究而建造的卫星。

印度
完成量子通信链路演示实验，为基于卫星的量子通信铺路



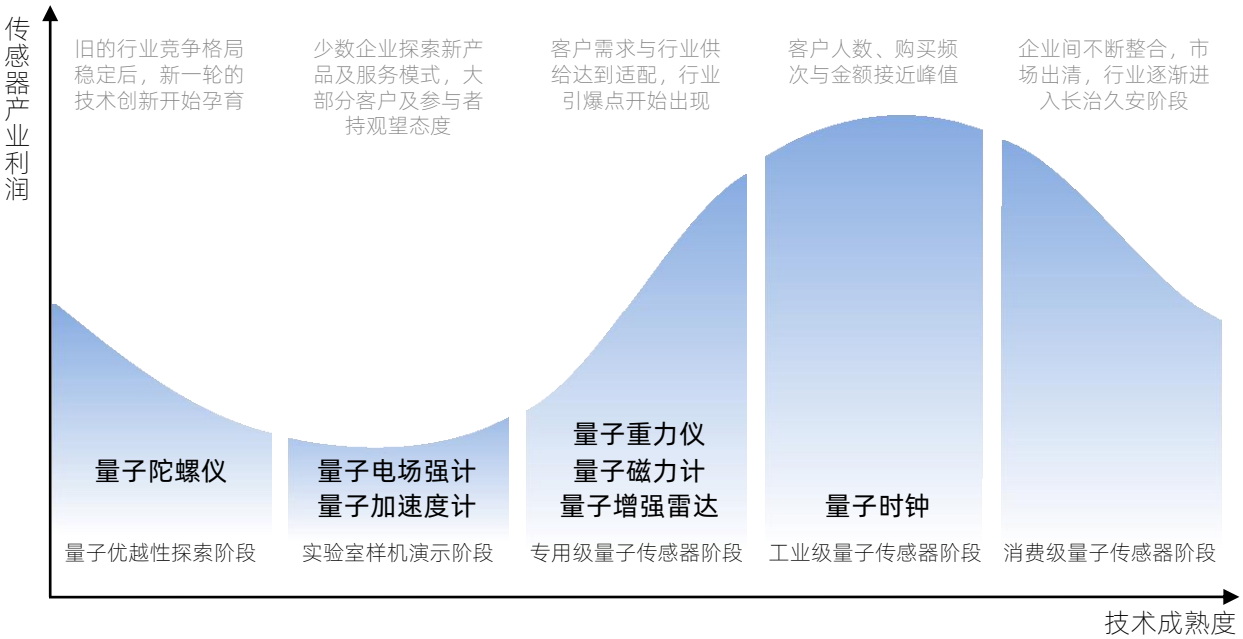
拉曼研究所（RRI）发现了一种安全的量子通信链路，该链路将帮助印度设计和开发安全的通信通道，特别是用于国防和战略目的。RRI使用QKD成功在固定源和移动接收器之间建立了安全通信，可以为未来基于地面到卫星的安全量子通信铺平道路，该研究所表示这是印度的首次此类演示。这项研究是利用卫星技术进行量子实验（QuEST）项目的一部分，自 2017 年以来，RRI一直与印度空间研究组织（ISRO）的UR Rao卫星中心合作。

三、量子精密测量发展情况综述

01 产业已进入多元化发展周期

2023年，量子精密测量领域呈现多样性和分散性。各领域发展路线多元，从量子陀螺仪到量子电场强计、再到量子加速度计，各自处于不同阶段，反映了科研进展和应用需求的多元化。不同物理量的量子传感器成熟度存在差异，量子陀螺仪尚未展现优势，量子电场强计相对成熟，差距反映了技术挑战和商业应用的不同情况。

图表 2023年量子精密测量产业发展周期示意图



变革期	起步期	成长期	成熟期	衰退期
• 由传感器领域成熟企业与初创企业共同引导，完成初步概念验证 • 相比于MEMS等经典陀螺仪，量子陀螺仪在实际应用中尚未展现出量子优势 • 代表企业： North Groumman、Twinleaf、AOSense	• 初创企业及大量科研机构开始加入硬件研发行列，样机尺寸、功率超过经典传感器 • 量子电场强计技术较为成熟，仅缺乏相关标准制定；量子加速度计已有工程样机 • 代表企业：M Squared、清远天之衡	• 各技术路线的专用量子传感器不断涌现，并且在某些参数指标上对比经典传感器有较大的优势 • 该阶段产品具有高动态可靠性；高精度；高成像分辨率；抗干扰能力强等优势 • 代表企业：国盛量子、微伽量子、中科酷原	• 传感器开始小型化、集成化，并且参数指标上对比经典传感器有数量级的优势 • 主要由下游新应用场景的需求驱动产业链进一步细化，产业链上游话语权增加，产线扩张直至供需平衡 • 代表企业：天奥电子、Microchip	• 全系统集成的新测量方案，可搭配经典系统使用，适配量子传感器网络，设备芯片化、可手持，参数比经典传感器好3个数量级以上 • 在成本可控的前提下，量子传感器与经典传感器多为替代关系，少部分将与经典传感器互补共存

iCV TA&K | 2024年2月版

未来，不同量子传感器之间的成熟度差异将逐步缩小，技术创新将成为推动产业发展的主要动力，跨领域合作将进一步加强，解决特定领域的技术难题，推动整个产业向成熟和商业化迈进。未来量子精密测量将进一步以技术创新、标准完善和市场扩展为主导，合作推动技术实用化，标准制定提高可比性，量子传感器逐渐小型化和集成化推动产业链向前发展。各领域发展趋向协同，形成更完善的生态系统。技术突破将主导整体趋势，跨领域合作解决技术难题，推动产业向成熟和商业化迈进，取得显著成果。

02 产业链相关企业逐年增多

新版产业生态概览图较此前光子盒发布版本，新增若干企业logo，在结构上也做了新的调整。

图表 量子精密测量产业生态概览



03 产品丰富且市场初具规模

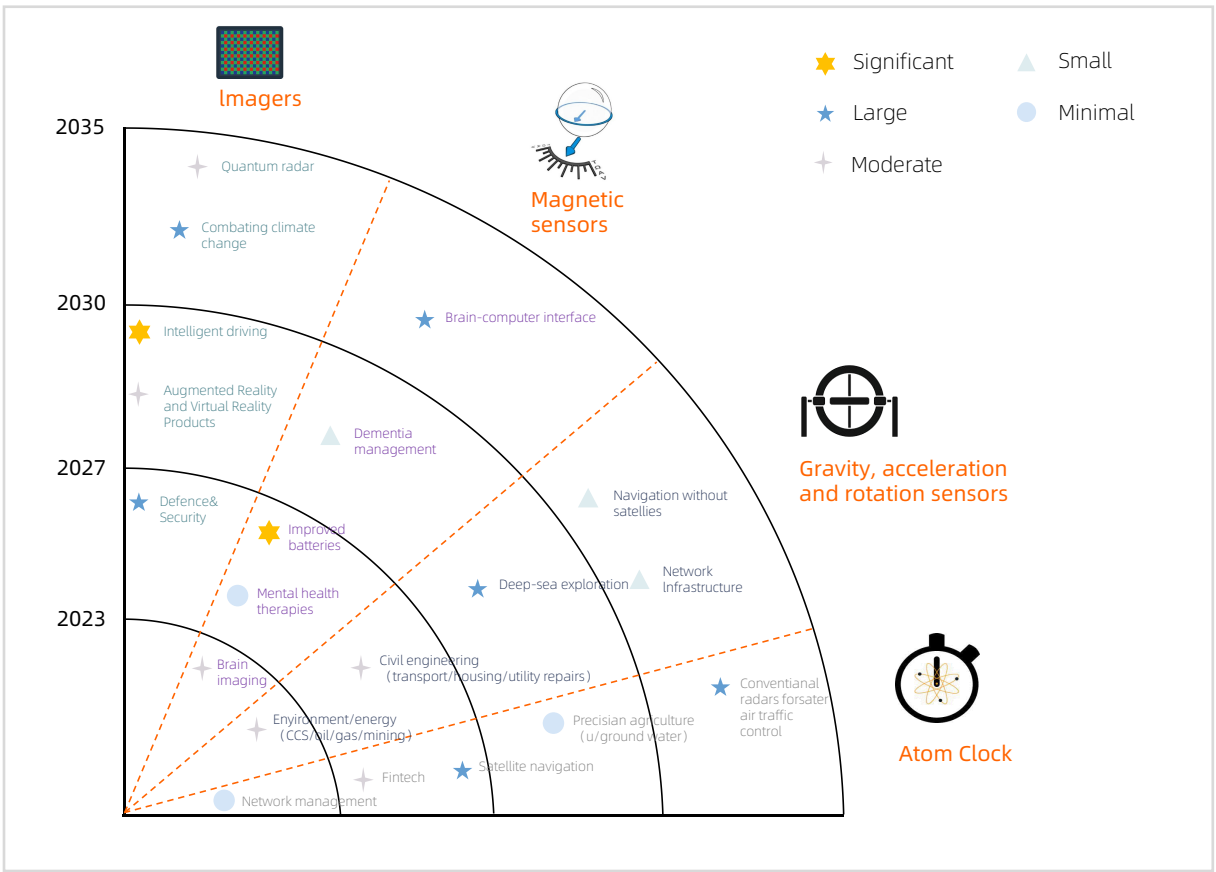
量子精密测量技术在各领域的下游应用市场展现出广阔的前景。从2023年到2035年，不同领域对于量子精密测量的需求逐渐增长，呈现出多元化的应用场景。

首先，对于一些低市场规模的应用，如网络时频管理、心理健康治疗等，虽然市场规模相对较小，但量子精密测量的高精度和灵敏度为这些领域带来了更为精准的数据和解决方案，为技术的逐步商业化提供了契机。特别是在老年痴呆症治疗、气候变化对抗等领域，量子精密测量的精确诊断和数据采集能力将成为未来关键技术，推动这些领域的创新和发展。

其次，随着技术的不断成熟，大规模商业化的领域也将在未来几年逐渐崛起。例如，航空交通管制雷达、无卫星导航、卫星导航等领域对于高精度测量的需求逐渐增大，量子精密测量技术将在这些领域发挥更为重要的作用。而在深海探测、电池改良、智能驾驶等领域，量子精密测量的高灵敏度和高精度将成为技术突破的助推器，为产业的不断升级提供动力。

最后，2023年至2030年之间，量子雷达技术的应用也将逐渐拓展。量子雷达的高分辨率和高灵敏度使其在国防安全、环境/能源监测、航空交通管理雷达等领域具有独特优势。预计随着技术的进一步发展，量子雷达将在未来成为下一代雷达技术的重要组成部分。

图表 精密测量产业应用时间及市场规模概览



各技术路线概况

铷、铯钟是目前最成熟和最广泛应用的原子钟技术，主要应用于卫星导航、军事、通信等领域，市场规模较大，但由于其频率稳定性和准确度受到物理极限的限制，难以满足未来更高的计时需求。光钟是目前最先进和最高精度的原子钟技术，主要应用于科学研究、国家授时、量子信息等领域，市场规模较小，但由于其频率稳定性和准确度远高于铷、铯原子钟，有望成为未来重新定义秒的基础。

图表 量子时钟产业化发展现状

类型	实验室稳定度*	技术优劣势	代表公司举例	产品参数	产品样图
铷钟	$9x10^{-14}$（梅刚华，中科院精测院，2024）	成熟的技术基础；频率稳定性相对较低，体积大	AccuBeat 以色列	型号：AR133-3 稳定度：$5X10^{-11}$	
铯钟	$7x10^{-15}$（Xuan He，北京大学，2021）	成熟的技术基础；频率稳定性相对较低，体积大	MICROCHIP 美国	型号：5071B 稳定度：$8.5X10^{-13}$	
氢钟	$6.69x10^{-16}$（Alexandr A. Belyaev，俄罗斯Vremya-CH，2019）	成熟的技术基础；频率稳定性相对较低，体积大	T4Science 瑞士	型号：iMaser3000™ 稳定度：$2X10^{-16}$	
冷原子钟	$1x10^{-16}$（王新文，中国科学院上海光学精密机械研究所，2019）	高频率稳定性、减少了相干失谐；复杂低温环境	AOSense 美国	型号：AOS-CAFS-1-X 稳定度：$2x10^{-14}$	
光钟	$4x10^{-19}$（潘建伟，中科大，2022）	极高精度；构建和维护相对复杂，成本较高	RIKEN 日本	型号：可搬运Sr光晶格原子钟 稳定度：$5.5X10^{-18}$	
CPT原子钟	$2x10^{-13}$（张首刚,中国科学院国家授时中心，2021）	小型化、低功耗；长期精度方面较低	天奥电子 ELECSPN 中国	型号：XHTF1045 稳定度：$3X10^{-11}$	

iCV TA&K | 2024年2月版

注：*为实验室条件下的稳定度，来源论文见参考文献。

目前原子钟市场的发展方向主要受到多个因素的综合影响，其中技术创新是推动市场发展的主要动力。在技术创新方面，原子钟技术不断取得突破，体现在以下几个关键方面。

首先，提高原子钟的频率稳定性和准确度是技术创新的一个核心目标。通过不断突破物理极限，原子钟能够满足更高精度的计时需求，使其在各个领域得到更广泛的应用。

其次，降低原子钟的体积、功耗和成本是另一个重要的技术创新方向。实现原子钟的微型化、集成化和商业化将拓展其应用领域，使其更适用于便携式、手持式设备等多样化场景，同时提高市场规模。

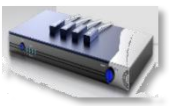
同时，开发新型原子钟也是技术创新的重要方向。其中包括芯片级光学原子钟、分子钟等的研发，探索新的物理原理和技术途径。这些新型原子钟有望为未来原子钟的发展提供全新的可能性，推动市场不断向前发展。

各技术路线概况

在当前量子磁力计市场中，技术多样性是显著的特点。各种技术，包括质子磁力计、SQUID磁力计、OPM磁力计、SERF磁力计、NV色心磁力计等，都在不同的应用场景中发挥独特优势。这使得市场在技术上呈现出多元化和广泛的选择。

应用广泛且多样化，包括军事国防、科研、医学、工业检测、导航等领域。企业涉足的领域多样，如军事国防、生物医学、地球物理勘探、导航系统等，体现了量子磁力计在不同领域的重要性和适应性。

图表 量子磁力计产业化发展现状

类型	实验室灵敏度*	技术优劣势	代表公司举例	产品参数	产品样图
SQUID	$3x10^{-3}$ pT/√Hz（Antonio Vettoliere，意大利应用科学与智能系统研究所，2023）	较高的温度磁场范围、灵敏度较高；需要低温制冷，体积较大	Quantum Design NORTH AMERICA 美国	型号：MPMS3 灵敏度：10^{-2} pT/√Hz 动态范围：$1x10^{-5}$ nT~ $8x10^{-5}$ nT	
OPM	$1x10^{-2}$ pT/√Hz（Orang Alem，美国科罗拉多大学，2023）	无零点漂移，响应快速，精度较高；受到光强和气压等环境的影响	QUSPIN 美国	型号：QTFM Gen-2 灵敏度：3 pT/√Hz 动态范围：1000 nT~150,000 nT	
SERF	$8.9x10^{-5}$ pT/√Hz（北航、华东师范，2020）	灵敏度极高，易于小型化； 需要高温和低磁场的条件	未磁科技 X-MAGTECH 中国	型号：SERF Magnetometer 灵敏度：10^{-2} pT/√Hz 动态范围：±5nT	
NV色心	8.9 pT/√Hz（杜江峰团队，中科大、浙江大学 2022）	高频率稳定性、减少了相干失谐；复杂低温环境	国盛量子 CHINAPROSP QUANTUM 中国	型号：量子磁强计 灵敏度：4.2pT/√Hz 动态范围：10nT ~ 50mT	

iCV TA&K | 2024年2月版

注：*为实验室条件下的灵敏度，来源论文见参考文献。

由于不同应用场景对精度、稳定性、重量和价格的差异化需求，未来将推动量子磁力计市场进一步多样化，逐步替代经典磁力计，并且满足更多层次用户的需求。

未来的发展将聚焦于技术创新，以提高磁力计的灵敏度、分辨率，并增加多模态整合能力，以满足更广泛的应用需求。便携性和实用性将是未来的趋势，磁力计设备将更加便携，方便在医疗、导航等领域实现实时监测和移动诊断。

随着人工智能技术的不断发展，未来的磁力计设备将更加注重智能分析模型的研发，以提高数据处理效率和诊断准确度。引入新型材料，如碳化硅等，将提高磁力计的性能，从而拓展在量子传感领域的应用。医学应用将迎来更深入的发展，量子磁力计有望在神经科学、心血管疾病等领域取得更多的突破。

预计SERF磁力计和NV色心磁力计将逐渐获得更多市场份额，逐步取代SQUID磁力计，成为主流技术路线。磁力计市场将沿各技术路线继续细分，以满足不同应用场景的需求，产生更专业化、差异化的产品和解决方案。这种多元化的市场细分将推动量子磁力计技术更全面、更深入地渗透到各个行业。

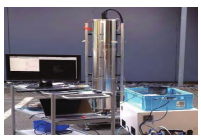
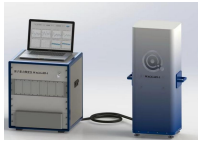
各技术路线概况

随着技术的进一步成熟，量子重力仪正朝着小型化和可移动化的方向发展，为各种应用提供更广泛的可能性。而目前高精度动态冷原子重力梯度仪的研制仍面临一系列技术难题。通过布拉格衍射、布洛赫振荡等大动量转移技术提高标度因子，利用光导引型干涉技术解决原子横向抖动问题，这些技术难题需要不断攻克，以实现更高水平的性能。

通过微纳加工和集成电路技术，实现更紧凑、低功耗、高精度和稳定的量子重力传感器。针对外场动态测量技术的挑战，未来将致力于解决原子干涉仪在高动态范围下的性能问题，以提高带宽和扩展动态测量范围。在系统化集成方案与工艺探索方面，未来将进一步完善系统集成方案，探索微纳工艺的创新，以实现更紧凑、更稳定的便捷式高性能激光系统。

技术水平方面，未来将继续提升在自旋噪声机理、磁屏蔽技术、长弛豫时间原子气室制备技术、原子极化及稳定控制技术等方面的研究水平。同时，加强与微小型高性能原子气室制备、微小型磁屏蔽制备、高性能半导体激光研制等领域的基础研究。

图表 量子重力仪产业化发展现状

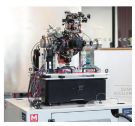
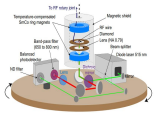
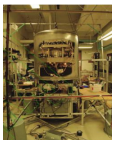
类型	实验室参数*	技术优劣势	代表公司举例	产品参数	产品样图
量子绝对重力仪	灵敏度：4.2 μGal/√Hz 稳定性：3μGal （XU Y Y，华中科技大学，2022）	高精度、无漂移、可长期连续工作、适用于静态与动态场景； 准确度、和可重复性与经典*相比无优势	mugaltech 中国	型号：MGAG-LH 灵敏度（Sensitivity）：优于25μGal/√Hz 长期稳定性*（Long-term stability）：≤1 μGal 准确度（Accuracy）：5-10μGal	
			μQUANS iXblue 法国*	型号：Absolute Quantum Gravimeter 灵敏度（Sensitivity）：50μGal/√Hz 长期稳定性（Long-term stability）：2μGal 准确度（Accuracy）：≤10 μGal	
			中科酷原 CAS COLD ATOM 中国	型号：WAG-H5-2 灵敏度（Sensitivity）：＜15μGal/√Hz 长期稳定性（Long-term stability）：<1μGal 准确度（Accuracy）：<10 μGal	
量子重力梯度仪	灵敏度：28E /√Hz 分辨率：7E （BIEDERMANN G，斯坦福大学，2015）	高精度、无偏差、低漂移、自校准； 价格昂贵、无法全张量测量	iXblue 法国	型号：量子重力梯度仪样机 重力梯度分辨率：0.15E 灵敏度：50E /√Hz	
			中科酷原 CAS COLD ATOM 中国	型号：WAGG-H5-1 重力梯度分辨率：3.3E 灵敏度：350E/√Hz	

注：*为实验室条件下灵敏度，来源见参考文献；Muquans于2021年5月被iXblue收购；由于冷原子技术实现较复杂，发展时间短且方案多样，整体准确度和重复性不及经典的FG5X等仪器。FG5X在经典仪器中处于领先地位；1E= 10^{-9} s^{-2}

各技术路线概况

近年来，随着量子精密测量技术的快速发展,以原子陀螺仪和原子加速度计为代表的量子惯性传感器可以提供对角速度和加速度更高灵敏度和长期稳定性的绝对测量。通过替代传统惯性传感器，长时间内可以保证INS的定位精度,而无需频繁进行重新校准。另外，在长距离航行时，还可以利用安装在载体上的高精度原子重力仪或原子重力梯度仪来实现重力场匹配导航的复合式惯导方案，限制INS误差随时间积累，延长系统的重调周期。

图表 量子加速度计&陀螺仪产业化发展现状

类型	理论精度*	技术优劣势	代表机构举例	机构产品/样机参数	样图
原子干涉加速度计	10^{-8} g	灵敏度高、稳定性好、抗干扰能力强；体积大、功耗高、成本高	M SQUARED 英国	形态：工程样机 精度：10^{-8}g	
核磁共振陀螺仪	10^{-2} °/h	发展较早，动态范围大，已进入芯片化产品研发阶段；需要外加磁场	NORTHROP GRUMMAN 美国	形态：工程样机 零篇稳定性：10^{-2} °/h	
NV色心陀螺仪	10^{3} °/h	体积小，启动快；需要高质量的金刚石样品和精确的纳米加工	Berkeley UNIVERSITY OF CALIFORNIA 美国	形态：学术研究 零篇稳定性：0.4 °/s	
SERF陀螺仪	10^{-4} °/h	高精度、带宽较小；技术难度大，处于实验室样机阶段	Twinleaf 美国	形态：实验室样机 零篇稳定性：10^{-3} °/h	
原子干涉陀螺仪	10^{-5} °/h	极高精度，稳定性好、抗干扰能力强；体积大、功耗高、成本高	AOSense 美国	形态：实验室样机 零篇稳定性：10^{-4} °/h	

iCV TA&K | 2024年2月版

注：*为理论条件下的精度，来源论文见参考文献。

相比经典惯性传感器，理论上量子陀螺仪和加速度计具有更高的精度、更低的漂移、更强的抗干扰能力等优势。但这些优势能否在实际工程化应用中得到体现，会受到众多因素影响，包括设备的设计、制造工艺、使用环境等，现阶段由于产品大多处于样机阶段，面临体积大、成本高、稳定性不足等挑战，优越性还未得到体现。

目前量子惯性领域的研发由高校主导，欧美顶尖团队有斯坦福、普林斯顿、巴黎天文台、Sandia国家实验室等，中国团队如北航、东南大学、中科院精密测量院等也在推进研究，但目前产品整体性能指标比国际先进水平低约2-3个数量级。各类型产品中，核磁共振陀螺仪是短期内最有望推广应用的产品，冷原子干涉加速度计和陀螺仪展现了极高的精度，具有很大的应用前景，可能在未来成为高精度惯性导航领域的主流技术。

量子雷达产品概况

量子雷达技术将在不远的将来实现复杂噪声背景下的远程目标探测、高分辨成像，并在军事和民用领域得到广泛应用。全球合作和持续创新将推动量子雷达技术向前发展，为未来提供更为精准、高效的目标探测与识别解决方案。接收端增强量子雷达通过加入压缩光和相位敏感放大器，降低接收端标准量子噪声，对信号进行无噪声放大，以提高量子雷达的信噪比，是近年来备受关注的发展方向

图表 量子雷达产业化发展现状

类型	应用领域*	技术优劣势	代表公司举例	产品参数	产品样图
基于单光子探测器	大气风场与艉流测量	径向信噪比高、近红外光波段；需要低温环境、成本较高	国耀量子 中国	型号：高分辨测风激光雷达 风速测量精度：垂直＜0.3m/s@3km 风速范围：±50m/s	
	温室气体泄露检测	连续、实时监控、小型、低功耗；需要保持相干性，抑制噪声	QLM 英国	型号：Quantum Gas 探测距离：200 米 可探测甲烷泄漏率：0.012 g/s	
	远程监控检测	远程精确识别材料固有频率、保真度高、功耗低；部分性能指标仍在测试当中	QCi 美国	型号：Quantum Photonic Vibrometer 精度：110 nm 频率范围：直流至 4 kHz	
基于原子天线	无线电通讯	高灵敏度，宽带宽；体积大、激光系统复杂	天之衡量子科技 TZH Quantum Tech 中国	型号：原子无线电接收机 响应频率：100kHz~40GHz 分辨率：0.1~1mm	

iCV TA&K | 2024年2月版

注：*量子雷达产品可涉及多种应用场景，并且许多公司产品线也涉及多款量子雷达，因此本部分仅选取一类典型产品及应用做分析。

目前量子雷达技术正面临着多样性目标的探测难题，不同目标的尺寸和结构特征的多样性给探测带来了巨大挑战。为解决这一问题，近年来，干涉式量子雷达技术成为优化设计远距离空中目标探测系统的重要手段。通过结合量子纠缠态与干涉仪，这一技术提高了干涉条纹的可见度，实现了超灵敏的探测和高分辨率的目标识别。同时，通过气动外形和电磁吸收材料等技术手段，将电磁波的后向散射最小化，从而减小系统的能量损耗，提高了采集时间或传输功率。

未来的发展趋势将更加重视全面考虑雷达动态范围、灵敏度和带宽等综合因素，以确保系统在各种环境条件下的应用效果。量子雷达系统将逐步采用“经典 - 量子双通道”的系统形态，实现量子通道与经典雷达的有机结合。这种结合可以在保持当前经典雷达应用场景和技术能力条件下，充分发挥量子通道的高精度和高灵敏度特性，提升整体雷达性能。在中短期内，这种双通道系统形态将成为主流，更好地应对各种复杂环境和极端天气条件。

04 下游应用市场前景广阔

国防军工

在量子精密测量类型方面，涵盖了时间、测量、重力、惯性、目标识别等多个方面，反映了量子精密测量技术在军工领域的广泛应用，从全球导航卫星系统和全球定位系统到磁异常导航和近地观测，为军事任务提供了全方位的支持。基于军工应用对于国家安全重要性，在其实际应用中，各国更侧重于在军工领域的研发，导致各国更倾向于保持相对封闭的研发环境。

以下图表主要选取2023年，量子精密测量在国防军工领域中的代表性进展进行论述与分析，选择标准为量子精密测量中游企业与国防军工领域知名企业或机构间的合作，并且优先以产生实际或定量结果为主，少量为合作探索。

图表 量子精密测量在国防军工领域的进展举例

	合作方	技术路线	应用方向	核心进展
时间	美国	冷原子钟	全球导航卫星系统和全球定位系统	进行下一代量子原子钟、量子传感器和组件技术的研发。这项工作对于创造更好的时钟、高性能传感器和相关技术是必要的，这些技术在空间领域更具弹性
磁场	SANDBOXAQ 美国	光泵磁力计	磁异常导航，即在GPS无法使用或故意拒绝或欺骗的情况下提供不间断的导航	公司的量子导航原型机安装在一架美国空军C-17 Globe Master III军用运输机上，并在地面和多次飞行测试中成功接收了地磁导航数据
重力	Q-CTRL 澳大利亚	冷原子绝对重力仪	基于低成本卫星的近地观测	公司已经得到合作研究中心项目的支持，未来将交付用于空天的量子重力仪，预测甚至预防干旱或采矿活动对水资源和农业影响
惯性	英国	冷原子加速度计	无 GPS 的惯性导航系统	使用超冷原子进行加速度的测量，有潜力在无全球定位系统（GPS）和全球导航卫星系统（GNSS）的环境中提供高精度的位置数据
目标识别	QCi NASA 美国	量子增强雷达	用于星载和机载任务，测试监测气候变化的量子传感解决方案	支持NASA测试其专有的量子光子系统，该系统用于远程感应应用，以监测气候变化,如测量不同类型积雪的物理特性，包括密度、颗粒大小和深度等

iCV TA&K | 2024年2月版

未来，提高技术性能、拓宽应用领域以及强化国际合作将成为三个主要发展趋势。首先，通过进行下一代量子传感器及其核心组件技术的研发，能够创造更优越的高性能传感器，满足军工领域更为复杂的任务需求。其次，各国将量子技术应用于除无GPS的惯性导航系统、监测气候变化、测试磁异常导航等应用方向，继续拓宽应用领域。最后，强化国际合作将是未来发展的关键，促使各国共同应对国防军工领域的复杂需求，共享科技成果，将进一步推动整个领域的进步。

医疗健康

全球范围内的量子精密测量在医疗健康领域的应用呈现出明显的国际合作趋势。美国、中国、德国、瑞士、芬兰等国均为全球医疗健康领域提供了先进的量子磁力测量解决方案。

以下图表主要选取2023年，量子精密测量在医疗健康领域中的代表性进展进行论述与分析，选择标准为量子精密测量中游企业与医疗健康领域知名企业或机构间的合作，并且优先以产生实际或定量结果为主，少量为合作探索。

图表 量子精密测量在医疗健康领域的进展举例

	合作方	技术路线	应用方向	核心进展
磁场	MEGIN、campus biotech、Fondation Campus Biotech Geneva 芬兰、瑞士	SQUID	非侵入性方式检测和测量大脑活动、脑机接口、神经反馈研究	最新一代配备氦气回收和最新一代磁传感器的MEG 系统在瑞士日内瓦交付，安装调试后被用于提供大脑活动精确且完整的图像
	Genetesis、The Christ Hospital Health Network 美国	OPM	冠状动脉微血管疾病非侵入诊断	公司心电磁图设备（CardioFlux MCG）获得突破性设备认证，可用于以识别可能患有冠状微血管疾病的患者中的心肌缺血
	未磁科技 X-MAGTECH、安贞医院 ANZHEN HOSPITAL 中国	SERF	心磁图仪	公司64通道无液氦心磁图仪落地北京安贞医院，并举行了中国医学装备协会“心磁图装备技术与临床应用培训基地”挂牌揭幕仪式及签约仪式
	Universität Stuttgart、BACEI 德国、中国	NV色心	磁尿图和肌磁图	演示通过设置使用肌肉模型进行模拟动作电位信号检测，以及NV磁力计在非屏蔽生物磁场测量磁尿图和肌磁图中的潜在应用

iCV TA&K | 2024年2月版

在医疗健康领域，量子精密测量主要应用于心脏磁图（MCG）和脑磁图（MEG）等细分领域，量子磁力计以其无创、无辐射、无造影剂、抗电磁干扰等优势，使其成为医疗诊断中的重要工具。

随着技术的进步，量子精密测量技术将进一步扩展到医学的多个领域。除了已经涉足的心脏和脑科学领域，未来可能会看到在癌症诊断、神经疾病治疗和其他医学应用方面的创新。量子精密测量有望为医疗诊断提供更全面、准确的数据，帮助医生更好地理解和治疗疾病。此外个性化医疗将成为一个关键趋势。通过更精准的测量数据，医生可以为每位患者制定个性化的治疗方案，提高治疗效果，减少不必要的药物和治疗过程。量子磁力测量技术的创新将推动医学研究和治疗方法的革新，这样的技术创新有望改善患者的生活质量，并为新型疾病治疗方法的发展打开大门。

设备方面，未来的发展将集中于提高测量精确性、降低成本、提高设备的便携性和易用性。这将促使更多的医疗机构和临床实验室采用量子精密测量技术，推动其在医疗领域的广泛应用。此外，如果SERF磁力计在性能、灵敏度和成本方面取得进一步突破，它可能成为未来医学领域磁力测量技术的主导工具。这可能会带来更加精确和经济高效的磁力测量解决方案，推动医学磁力学领域的快速发展

能源环保

目前在能源环保领域，欧美国家是主要的推动者，亚太地区在该领域相对有所欠缺。从技术路线上来看，通过提供高精度的同步解决方案、重力梯度测量、气象监测和射频传感，量子精密测量技术为智能电网的高效运行、气候变化的监测和理解、环保决策的制定以及大气层动态变化的理解提供了重要支持。这些技术的应用有助于推动能源环保领域的创新和发展。

以下图表主要选取2023年，量子精密测量在能源环保领域中的代表性进展进行论述与分析，选择标准为量子精密测量中游企业与能源环保领域知名企业或机构间的合作，并且优先以产生实际或定量结果为主，少量为合作探索。

图表 量子精密测量在能源环保领域的进展举例

	合作方	技术路线	应用方向	核心进展
时间	OSCILLOQUARTZ An ADVA Optical Networking Company；OCP ACCEPTED；美国、瑞士	铷原子钟	智能电网	采用卫星时间和定位 技术的新同步解决方案，以解决 GPS 和其他 GNSS 系统日益受到干扰和欺骗攻击的漏洞，可服务于智能电网等行业
重力	TEXAS The University of Texas at Austin；NASA；美国	冷原子绝对重力仪	重要气候因素的读数：海平面上升、冰融化速度、陆地水资源变化和海洋储热变化	开发光子集成电路（PIC），以探测来自太空的地球引力的微小变化。该设备使用许多激光和光学器件来冷却和捕获原子，以极高的灵敏度测量重力梯度。
目标识别	REPSOL；QLM；英国	量子增强雷达	基于低成本卫星的近地观测	试验的图像尽管没有出现甲烷浓度的热点，但敞口污水箱的扩散排放仍能够量化其精确流量
	WORLD VIEW.；Infleqtion；美国	里德堡原子天线	平流层气球系统	从近地到大气边缘的操作相关环境中测试推动量子和平流层探索领域的下一代射频传感技术

iCV TA&K | 2024年2月版

未来，量子精密测量技术将广泛渗透于能源环保领域，展现出多样化的应用场景。智能电网的优化将通过量子同步解决方案实现时空同步的精度提升，从而优化电力系统的运行效率，减少能源浪费，提高能源利用率。同时，气候监测与应对将得益于量子增强雷达系统的高灵敏度监测，实现对关键气候因素的准确监测，为更有针对性的环保举措提供支持。冷原子绝对重力仪在地球引力变化研究中的应用，则有望为地质学、地球物理学等领域提供精确的数据，推动对地球内部结构和运动的深入认识。

在技术创新方面，未来的发展将不断追求提高测量精度、拓展适用领域和降低成本的目标。新型传感器的设计将聚焦于灵敏性、紧凑性和可靠性，以适应各种环境和应用场景，提高测量的准确性。高效数据处理算法的制定将使量子测量数据更为有效地处理，提高实时性和准确性。先进实验装置的设计和制造则将确保在各种条件下进行可靠的量子精密测量。

同步通信

在同步通信领域，量子精密测量技术在全球范围内得到了广泛的应用和合作，尤其以欧美国家为主导。这一领域的技术路线主要涉及原子钟及其细分技术路线产品。这些企业通过铷原子钟、铯原子钟、光钟以及冷原子钟等技术路线产品的研发和应用，推动了如同步飞机和控制塔之间的关键通信、5G基站和数据中心、铁路移动通信系统等应用方向的发展。

以下图表主要选取2023年，量子精密测量在同步通信领域中的代表性进展进行论述与分析，选择标准为量子精密测量中游企业与同步通信领域知名企业或机构间的合作，并且优先以产生实际或定量结果为主，少量为合作探索。

图表 量子精密测量在同步通信领域的进展举例

时间

合作方	技术路线	应用方向	核心进展
MICROCHIP 美国	铯原子钟	同步飞机和控制塔之间的关键通信	新一代铯原子钟可帮助美国的空中交通管制利用广播自动相关监视 和广域多点定位 来精确定位飞机在全国空域的位置
OSCILLOQUARTZ / USA Communications 美国、瑞士	铷原子钟	5G 基站和数据中心	利用低地球轨道 卫星作为独特的时间源，不仅提供了 GNSS 的有效替代方案，而且还增强了 GNSS 的可靠性和安全性。这种双源方法符合零信任原则
OSCILLOQUARTZ / DB 德国、瑞士	光学原子钟	铁路移动通信系统	德铁利用公司的光学铯原子钟技术为其全国铁路网络带来精确计时。增强型主参考时钟解决方案将使德国铁路能够在整个网络中实施预测性维护和其他技术进步
Infleqtion 2023 Military+Aerospace Electronics Innovators Awards 美国	冷原子钟	无线宽带、网络同步、无人驾驶车辆、传感器网络	公司的Tiqker冷原子钟产品在 2023 年军事 + 航空航天电子 （MAE） 创新者奖中获得了白金奖

iCV TA&K | 2024年2月版

未来，芯片级原子钟有望替代5G基站中现有的晶振技术。芯片级原子钟的小型化设计使其更容易嵌入到通信设备中，提供更高的频率稳定性和时间同步性能，有助于提升通信系统的效率和性能。这对于移动通信基站等场景，尤其是对于需要高度精确时间同步的5G网络，具有重要的推动作用。

光钟技术将成为同步通信领域的关键技术之一。光钟以其出色的频率稳定性和准确性，将成为金融交易和网络通信等领域的理想选择。未来，随着光学技术的不断进步，光钟的性能有望进一步提高，从而满足对于时间同步极高要求的场景，推动同步通信系统实现更为精准的数据传输和处理。

在钟组中，一般采用多次测量取平均值是一种常见的策略，通过集成不同模态的测量技术，可以更好地抵御外部干扰，提高测量的准确性和稳定性。这对于同步通信系统的可靠性和鲁棒性具有积极的影响。未来的发展将更加注重量子精密测量技术的多模态集成，即将不同类型的测量技术融合在一起，以提供更为全面和全方位的测量解决方案。

科学研究

在科研领域，量子精密测量技术展现出了广而深的应用前景。从国家地区的角度来看，欧美国家在推动量子精密测量技术在科研领域的发展上扮演着重要角色。在全球合作中，德国、瑞士、印度等国与科研机构合作，共同推动了量子精密测量技术的创新。

以下图表主要选取2023年，量子精密测量在科研领域中的代表性进展进行论述与分析，选择标准为量子精密测量中游企业与科研领域知名机构间的合作，并且优先以产生实际或定量结果为主，少量为合作探索。

图表 量子精密测量在科学研究领域的进展举例

	合作方	技术路线	应用方向	核心进展
时间	OSCILLOQUARTZ / PTB 德国、瑞士	铯原子钟	天文研究	对其公司最新的OSA 3300-HP 高性能光学铯原子钟进行了为期三个月的评估，结果其性能远远超出了产品规格。该技术对于天文研究将产生重要作用
磁场	ZABRE 瑞士、印度	金刚石NV色心	基于自旋和光子的量子技术研究	可以提供表面磁场、电流和电场的定量数据，具有纳米分辨率和高灵敏度。目前该设备已安装到Vidya Praveen Bhallamudi 教授的实验室中
重力	iXblue CARIOQA-PMP 欧盟*	冷原子绝对重力仪	用于量子加速测量的冷原子铷干涉仪在轨 - 探路者任务准备	用于研究基于卫星的地球质量分布变化观测，例如冰川融化或地下水流失，可以实现基于量子传感器的太空任务的独立开发和操作，协助完成一系列相关实验
目标识别	QCi 美国	量子增强雷达	地雷探测与验证	模拟全球排雷工作所经历的条件与环境中验证包含 143 种不同物品的综合领域，包括地雷、子弹、未爆炸弹药和简易爆炸装置等

iCV TA&K | 2024年2月版

注：*量子加速测量的冷原子铷干涉仪在轨 - 探路者任务准备为欧盟整体项目，并且iXblue也为法国公司，因此此处国家位置仅列出“欧盟”。

未来，量子精密测量技术在科研领域的替代性将更为凸显。量子精密测量技术不仅提供了更高的精度，还在科研实验中展现了更为卓越的性能。此外，量子精密测量技术在科研中的广泛应用也体现在对表面磁场、电流和电场的定量数据提供上。这些量子传感器的纳米分辨率和高灵敏度使其在实验室环境中成为必不可少的工具，有助于科学家们深入研究微小尺度的物理现象。

最后，量子精密测量技术在模拟全球排雷工作中的应用也凸显了其在科研领域的实际意义。这种技术不仅能在实验室中验证综合领域的条件与环境，还能应用于卫星观测，协助完成一系列相关实验，推动科研领域对复杂问题的深刻理解。在科研领域，量子精密测量技术正通过不断创新，为科学家们提供更为强大的工具，推动科学研究不断取得新的突破。

第二章

各地区政策及进展

目录

第二章
全球各地区产业发展现状

一、美国

二、中国

三、欧洲

四、英国

五、德国

六、法国

七、加拿大

八、澳大利亚

九、日本

十、韩国

一、美国

本节聚焦美国政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了美国在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

美国是最早制定量子政策的国家，也是目前制作最多量子政策的国家。这些政策极大地推动了量子产业的发展，帮助量子企业更好地募集资金。除了政策以外，美国政府及其下属机构还设立了为数众多的、提供可观资金的量子项目，这在一定程度上帮助美国量子初创公司避免过早因资金链断裂而夭折，同时也满足了美国政府发展量子产业、保持自身量子技术领先的诉求。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
量子准备：迁移到后量子密码学	Migration to Post-Quantum Cryptography	美国国家网络安全中心（NCCoE）	制定了量子就绪路线图的建议、准备加密清单的步骤、了解和评估供应链的注意事项、组织应如何与其技术供应商讨论后量子密码，并明确了技术供应商的责任。
迁移到后量子密码学量子准备：密码学发现	Migration to Post-Quantum Cryptography Quantum Readiness: Cryptographic Discovery	美国国家标准技术研究所（NIST）	概述了功能测试计划，描述了用例场景，表明了支持PQC迁移第一步是确定在企业中使用公钥加密的位置和目的，然后识别并准备可迁移的资产清单。
迁移到后量子密码学量子准备：测试标准	Migration to Post-Quantum Cryptography Quantum Readiness: Testing Draft Standards	美国国家标准技术研究所（NIST）	强调了如何协调量子弹性算法与现有网络基础设施，并提供了受控的非生产环境中兼容性问题的解决方案，以及PQC算法与现有基础设施的协调融合问题并提供了兼容性的解决方案。
关键和新兴技术国家标准战略	National Standards Strategy for Critical and Emerging Technology	拜登政府	特别指出了量子技术将在加强美国创新生态系统和全球竞争力方面发挥的关键作用。
量子信息科学与工程能力扩展项目	Expanding Capacity in Quantum Information Science and Engineering (ExpandQISE) program	美国国家科学基金会（NSF）	NSF将投资3800万美元扩大对量子信息科学与工程（QISE）的支持。
关于处理美国在有关国家投资某些国家安全技术和产品的行政命令	Executive Order on Addressing United States Investments in Certain National Security Technologies and Products in Countries of Concern	拜登政府	拜登政府授权美国财政部部长禁止或限制美国对中国半导体和微电子、量子信息技术以及人工智能三个领域的某些投资。

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
芯片和科学法案	the CHIPS Act	美国商务部	将限制接受者与受关注的国家实体进行某些联合研究或技术许可工作。其中，用于量子计算的芯片将受到更严格的限制。
国家量子倡议再授权法案	The National Quantum Initiative Reauthorization Act	美国众议院科学、空间与技术委员会	确保美国能够继续加速量子科学的突破，加强量子生态系统，在未来几十年保持竞争力。
关于美国和意大利科技合作的联合声明	Joint Statement on U.S.-Italy Science and Technology Cooperation	美国政府、意大利政府	双方支持继续开展研究合作，包括加强物理学和天体物理学合作的机会；地球科学、应用和观测；健康和生命科学；气候变化和减缓；先进材料；量子信息科学；数字化转型和人工智能；能源转型。
美印提升战略关系暨关键和新兴技术倡议	United States and India Elevate Strategic Partnership with the initiative on Critical and Emerging Technology (iCET)	美国国家安全顾问、印度国家安全顾问	美印基于共同民主价值观，将要推动两国包括量子技术在内的前沿和重要科技领域的合作，并进一步完善未来两国科技合作的制度框架。
关于量子信息科学与技术合作的联合声明	Joint Statement on Cooperation in Quantum Information Science and Technology (QIST)	美国政府、荷兰政府	内容包括量子计算机、量子网络和量子传感器等设备在气候、能源、医疗和数据安全等领域具有潜在优势。美荷各自启动了国家计划，通过各自的国家量子计划和量子Delta NL计划加速QIST。
拜登总统和特鲁多总理的联合声明	Joint Statement by President Biden and Prime Minister Trudeau	美国总统拜登、加拿大总理特鲁多	在关键矿产和半导体供应链方面，双方同意增加对相关产业的投资，并打算就量子信息科学与技术的共同优先事项深化合作。
美荷两国关于量子信息科技合作的联合声明	Joint Statement of the United States of America and the Netherlands on Cooperation in Quantum Information Science and Technology	美国驻荷兰大使馆、荷兰经济事务和气候政策部	强调了在新兴技术方面稳固的双边关系，促进 QIST，包括但不限于量子计算、量子网络和量子传感，这支撑社会和产业的发展。并初步提出了具体的合作方式。
美印联合声明	Joint Statement from the United States and India	美国政府、印度政府	为促进工业界、学术界和政府之间的合作，将建立印美联合量子协调机制。
印美联合声明	Joint Statement from India and the United States	美国政府、印度政府	美国重申致力于与印度在量子领域开展双边合作。

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
美国-新加坡关键和新兴技术对话	The U.S.-Singapore Critical and Emerging Technology (CET) Dialogue	美国政府、新加坡政府	将深化美国商务部国家标准与技术研究院、国土安全部、新加坡国家量子办公室和通信与信息部之间关于后量子密码学迁移的信息共享。
量子视野： 量子科学研究与创新为核科学服务	Quantum Horizons: Qis Research And Innovation For Nuclear Science	美国能源部（DoE）	美国能源部将拨款910万美元用于推进量子信息科学和核物理研究。
扩大量子信息科学与工程能力	Expanding Capacity in Quantum Information Science and Engineering (ExpandQISE)	美国国家科学基金会 (NSF) 、美国能源部（DoE）	旨在增加研究能力并扩大对量子信息科学与工程 (QISE) 的参与。

iCV TA&K | 2024年2月版

进展

Google Quantum AI 谷歌量子AI团队采用了表面码纠错技术，通过将多个量子比特组合成一个逻辑量子比特，实现了量子纠错的盈亏平衡点，并证明了这种方法可以显著降低容错率，达到实现通用计所需的逻辑错误率。

PsiQuantum Psiquantum研究团队提出了一种基于光子量子计算机的主动体积编译技术，通过光学元件和光学干涉来实现量子比特和量子门的纠错，能够将运行量子算法的时间和成本降低50倍，并可自动优化网络结构和资源分配。

IBM Q IBM通过“错误缓解”方法，在127量子比特的处理器上准确获得复杂量子线路运行结果，并可在不进行纠错的情况下超越经典计算机。

IBM Q IBM发布超过1000量子比特的量子计算处理器Condor，其拥有1121量子比特。IBM还推出模块化量子计算机，结合可扩展低温基础设施和经典服务器，实现了计算的超级计算架构。IBM发布了133量子比特可扩展芯Heron。

PsiQuantum PsiQuantum与英国科学和技术设施委员会 （STFC） 合作，共同开发下一代高功率低温模块。不仅如此PsiQuantum还与SkyWater Technology合作开发光量子芯片。

QUANTINUUM Quantinuum在其H1-1量子处理器上实现了524288 （2^19） 的量子体积，并在H2上展示了非阿贝尔拓扑有序状态的新物质状态。

美国伯克利实验室与AQT公司开发了Fluxonium量子比特，性能优于目前广泛使用的超导量子比特。

联手开发三代离子阱量子处理器，利用MAGIC技术提供高计算能力的QPU，并通过共同设计策略实现基于离子阱的量子计算机功能不断增强，未来将通过云端访问提供给工业和科学用户。

宣布将于2024年推出的第二代中性原子量子计算机:已经在其量子计算平台中创建了一个1225个站点的原子阵列,目前填充了1180个量子比特。

实现了48个逻辑量子比特，能够检测和纠正纠缠逻辑门操作过程中出现的任意错误。

谷歌与卢森堡大学以及BIFOLD合作，共同开发机器学习算法以处理复杂的量子系统。

Rigetti与Moody's以及伦敦帝国学院合作，使用量子增强的数据转换和经典特征核方法相结合的机器学习技术，提出了解决经济衰退预测问题的新方法。

Quantinuum发布了量子自然语言处理工具λambeq的更新版本0.3.0，通过与PennyLane的集成，增强了功能和用户体验。

Ionq计划优化离子阱技术，增加量子比特数量和密度，并预测将在2024年实现量子机器学习的量子优势。

英伟达的DGX Quantum利用CUDA Quantum和H100 NVL可以利用针对语言大模型的加速解决方案来加速GPT的训练和部署。

德克萨斯大学奥斯汀分校验证了拓扑绝缘体中的反常霍尔效应，为探索新型物理现象和新型物质提供了理论和实验支持。

芝加哥大学普利兹克分子工程学院研究人员开发了一种新工具用于帮助解释设计材料中的电子态起源，这意味着利用材料用于未来量子技术的应用又迈进一步。

纽约哥伦比亚大学的一个研究小组偶然发现了一种名为Re6Se8Cl2（由铼、硒和氯元素组成）的超原子材料，它是迄今为止最快、最高效的半导体，让实验中的电子在不到纳秒的时间内移动几微米。

收购公司用于研发下一代网络量子计算机架构和全栈量子编译器；为AWS提供新的（Aria系统，25个算法量子比特）后端支持；与美国空军研究实验室（AFRL）签订了2550万美元的合同。

和宝马集团共同发起了一项名为 “量子交通探索”的全球量子计算挑战赛，以应对航空和汽车领域最紧迫的挑战。

将CUDA Quantum集成到其平台的新的合作伙伴，包括量子硬件公司Anyon Systems、Atom Computing、IonQ、ORCA Computing、Oxford Quantum Circuits和QuEra；量子软件公司Agnostiq和QMware；以及几家超算中心合计120+企业，大举切入量子业务。

与Microsoft Azure Quantum、KPMG、福特汽车、汇丰银行等众多领域展开合作，包括在量子算法开发、电动汽车电池材料模拟、银行领域潜在收益研究、全新实验室揭幕、量子化学模拟、可持续交通研究、量子蒙特卡罗集成引擎发布等方面的合作项目。

升级云服务平台服务能力；已形成250+机构的生态网络社群；与Moderna合作利用量子计算和人工智能研究mRNA疫苗，以加速新型信使RNA疫苗和疗法的发现；与安永展开战略合作，安永成为IBM Quantum Network成员，可通过访问IBM的量子计算系统解决复杂业务问题。

ColdQuanta新的公司品牌和名称，标志着公司从研究和开发量子技术转向了将其用于商业用途。2023年，公司成功地与多个合作伙伴，包括日本量子登月计划、Riverlane公司以及L3Harris等进行了合作。

与NVIDIA、NOVONIX、安永等领军企业展开战略合作，致力于推动药物研发、电池设计、清洁能源等领域的创新应用。同时，通过建立战略伙伴关系，如与大学和教育机构的合作，推动人才培养和推广量子和STEM教育。Sandbox AQ在推进人工智能和量子技术生态系统的可持续发展，促进创新和就业增长方面取得实质性进展。

IBM宣布，将与芝加哥大学、庆应义塾大学、东京大学、延世大学和首尔国立大学合作，共同支持日本、韩国和美国的量子教育活动。

Infleqtion公司推出了mini MOT V2，这款用于中性原子研究和量子应用开发的紧凑型真空系统，提供了控制量子态的能力，可用于学术研究和物理教育。

与 30 多所大学、企业和教育组织合作，扩大AI和量子培训。这些机构与公司开展正式或非正式的合作，以扩展其人工智能、量子和 STEM 课程。



与 HQS Quantum Simulations 宣布，已在该公司的全栈量子计算系统 SEEQC System Red 上成功运行了一种算法，该系统显示出在短期内实现商业上有用的量子优势的巨大潜力。



提出了新颖的张量网络算法，旨在优化绝热量子计算的关键组成部分（量子线路）。研究小组通过对固定深度的参数化量子线路进行经典优化,在多个时间步长内同时封装绝热时间演化和反绝热驱动。



实现首次让量子计算和经典计算能够在云中无缝集成。研究人员现在可以通过它开发将经典代码和量子代码混合在一起的应用程序，这些混合量子应用目前可在Azure Quantum云平台上Quantinuum公司的量子机器中运行。这是微软在具有AI、HPC和量子计算的超大规模云计算道路上迈出的重要一步。



上线了具有433量子比特的Osprey量子处理器，并于12月上线了具有模块化可扩展性能的133量子比特Heron量子处理器。将Q-CTRL的错误抑制技术（Q-CTRL Embedded）集成到IBM云量子服务中，用户只需轻按开关，就能降低错误率。



新的高级计算云平台正式上市，新平台增加了新的经典与量子启发式解决方案，还打算向该平台引入利用了人工智能技术的新工具，并即将推出测试版给用户使用。IBM的127量子比特Eagle处理器上线Strangework云平台，并作为现收现付系统的方式来提供。



IBM、Quantinuum因其在量子计算领域取得的瞩目成就往往被视为专注于量子计算的公司。然而，这些公司当前研发和业务布局已不局限于量子计算领域，已发布量子通信与安全领域的发展路线图或者推出了相关产品和解决方案。IBM于5月发布了量子安全路线图，该路线图包括组织/公司可以采取实施的量子通信与安全步骤。同时，IBM还发布了一套端到端的解决方案IBM Quantum Safe以支持量子安全路线的实施。IBM Quantum Safe包含IBM Quantum Safe Explorer、IBM Quantum Safe Advisor及IBM Quantum Safe Remediator。此技术由三个关键操作组成：发现（确定加密使用情况，分析依赖关系，并生成加密物料清单）、观察（分析漏洞的加密态势，并根据风险确定补救措施的优先级）、变换（通过加密敏捷性和内置自动化进行修复和缓解）。IBM在2022年就表示，将在2025 年推出名为“Kookaburra”的量子处理器。Kookaburra是一个具有量子通信链路的1386量子比特多芯片处理器。IBM将三个Kookaburra芯片连接成一个通过量子通信连接的4158量子比特系统。

Quantinuum推出Quantum Origin Onboard是一个能够提供量子计算强化密钥增强的商用企业软件解决方案。它可以直接安装在设备上，并用于提供基础级保护，无需额外的硬件升级即可直接集成到连接的设备中。这种独特的方法确保了任何环境中的设备，无论是在线还是离线，都可以生成量子计算强化密钥，以不断最大限度地提高保护设备的加密措施的强度。

美国量子计算公司QCI在4月开始拓展其商业产品线，推出可重新编程和不可重复的QRNG。

关键基础设施的安全保障对于提升网络防御能力，确保数据和系统的安全尤为重要。例如，Honeywell利用Quantinuum的Quantum Origin技术，通过量子计算增强的随机性生成密钥，使其真正不可预测，保护智能电表用户数据和关键基础设施免受高级网络安全威胁，帮助正在数字化转型中的公用事业部门提高可靠性和信任度。

由美国宽带服务提供商EPB联合量子公司Qubitekk和Aliro Quantum推出的EPB Quantum Network已向顾客开放。EPB Quantum Network是美国首个可配置商用量子网络的，专为量子技术公司和研究人员而设计，为量子开发人员消除商业化的障碍。

EPB Quantum Network是一种量子即服务产品，为量子技术人员提供光纤基础设施和软件，以加快将量子技术和应用推向市场的进程。客户可以使用最新的基础量子设备通过EPB Quantum Network的专用光缆生成、分发和测量量子位。现已向客户开放，允许用户为他们需要的一系列网络配置指定参数，可以使用由Aliro Quantum设计和制造的AliroNet TM来构建、测试、验证、表征和运行其产品，进行控制和配置。

上线了具有433量子比特的Osprey量子处理器，并于12月上线了具有模块化可扩展性能的133量子比特Heron量子处理器。将Q-CTRL的错误抑制技术（Q-CTRL Embedded）集成到IBM云量子服务中，用户只需轻按开关，就能降低错误率。

基于实时、端到端量子弹性加密通信卫星太空链路进行卫星数据传输。此卫星链路由QuSecure与埃森哲合作完成，使用PQC保护的多轨道数据通信，从地球到低地球轨道卫星的加密量子弹性通道，同时可以通过切换到地球同步卫星，并再次传回地球，以模拟在单个轨道中卫星受到威胁故障或遭受攻击时的冗余备份方案。整个传输使用传统网络安全和QuSecure的QuProtectTM平台的量子弹性网络安全进行保护。

进行下一代量子原子钟、量子传感器和组件技术的研发。这项工作对于创造更好的时钟、高性能传感器和相关技术是必要的，这些技术在空间领域更具弹性。

公司的量子导航原型机安装在一架美国空军C-17 Globe Master III军用运输机上，并在地面和多次飞行测试中成功接收了地磁导航数据。

推出用于星载和机载任务，测试监测气候变化的量子传感解决方案，支持NASA测试其专有的量子光子系统，该系统用于远程感应应用，以监测气候变化,如测量不同类型积雪的物理特性，包括密度、颗粒大小和深度等。

开发光子集成电路（PIC），以探测来自太空的地球引力的微小变化。该设备使用许多激光和光学器件来冷却和捕获原子，以极高的灵敏度测量重力梯度。

新一代铯原子钟可帮助美国的空中交通管制利用广播自动相关监视 和广域多点定位 来精确定位飞机在全国空域的位置。

Tiqker冷原子钟产品在 2023 年军事 + 航空航天电子 （MAE） 创新者奖中获得了白金奖。

模拟全球排雷工作所经历的条件与环境中验证包含 143 种不同物品的综合领域，包括地雷、子弹、未爆炸弹药和简易爆炸装置等。

二、中国

本节聚焦中国政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了中国在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

中国作为量子大国，少不了政策的推动与资金的支持。2023年，中国制定了一系列的量子政策，包括设立量子信息科学专业、标准制定、园区建设等。《国家自然科学基金“十四五”发展规划》明确指出，围绕量子计算、量子通信、量子传感、量子精密测量等重要领域，重点研究量子计算、量子模拟与量子算法，量子通信实用化技术及其科学基础，量子存储和量子中继，量子导航、量子感知和高灵敏探测，高精度光钟、时频传递的新原理与方法，空域-时域精密谱学及量子态动力学测量技术，为量子科技领域提供人才储备和科技支撑。

未来，中国中央及各级政府将继续在量子领域加强政策制定、加大资金投入，推动中国量子产业蓬勃发展。

政策

政策名称	发布机构	政策内容
《质量强国建设纲要》	中共中央 、国务院	提到实施质量基础设施能力提升行动，突破量子化计量及扁平化量值传递关键技术等。
《十四届全国人大一次会议作政府工作报告》	国务院	政府工作报告中指出：一些关键核心技术攻关取得新突破，载人航天、探月探火、深海深地探测、超级计算机、卫星导航、量子信息、核电技术、大飞机制造、人工智能等领域创新成果不断涌现。
《横琴粤澳深度合作区鼓励类产业目录》	国家发展与改革委员会	科技研发与高端制造产业包括：量子通信技术，量子、类脑等新机理计算机系统开发等。
《2022年度普通高等学校本科专业备案和审批结果》	教育部	西南大学、北京理工大学、安徽大学、郑州轻工业大学、湖北大学5所学校将新增“量子信息科学”专业。
《第二代量子体系的构筑和操控重大研究计划2023年度项目指南》	国家自然科学基金委员会	旨在通过对展示纠缠/叠加量子态等量子行为的第二代量子体系进行构筑和操控，开展量子信息科学方面的前瞻性和基础性的研究，推动数理、信息、工程与材料、化学等多学科交叉研究，为实现量子计算机等量子技术奠定物理基础。
《新产业标准化领航工程实施方案（2023—2035年）》	工业和信息化部、科技部、国家能源局、国家标准委	加快研制量子信息术语定义、功能模型、参考架构、基准测评等基础共性标准。
《河套深港科技创新合作区深圳园区发展规划》	国务院	面向信息科学与技术、材料科学与技术、生命科学与技术等重点方向，聚焦网络与通信、区块链与量子信息、细胞与基因等前沿交叉领域，支持深港联合国内外高校、科研院所在深圳园区共建卓越研究中心、前沿交叉研究平台、人工智能应用示范平台、数字经济与金融超级计算集群、“量子谷”，促进粤港澳大湾区科技资源深度融合。协同香港引进国际顶尖研发型企业，设立联合研发中心，推动深港及粤港澳大湾区应用基础研究能力跃升。

政策名称	发布机构	政策内容
《元宇宙产业创新发展三年行动计划（2023 - 2025年）》	工业和信息化部办公厅、教育部办公厅 文化和旅游部办公厅、国务院国资委办公厅、广电总局办公厅	将推动5G-A/6G、千兆光网/万兆光网、FTTR、高速无线局域网、卫星互联网、云网融合等新型网络技术创新，加快高性能计算、异构计算、智能计算、量子计算、类脑计算等突破，推动云网、算网协同发展。
《关键数字技术专利分类体系（2023）》	国家知识产权局	面向国家重大需求，瞄准新兴数字产业和前沿技术领域，重点选取人工智能、 高端芯片、量子信息、物联网、区块链、工业互联网和元宇宙等七类关键数字技术，明确技术边界并划分技术分支，构建技术分支与国际专利分类的参照关系。
《国家自然科学基金“十四五”发展规划》	国家自然科学基金委员会	公布了完整的115项“十四五”优先发展领域，其中包括量子材料与器件、量子信息、量子精密测量等领域。
《前海深港现代服务业合作区总体发展规划》	国家发展与改革委员会	超前布局第六代移动通信（ 6G)、量子通信等前沿技术，构建新一代高速通信网络体系。
《产业结构调整指导目录（2024年本）》	国家发展与改革委员会	包含量子、类脑等新机理计算机系统的研究与制造；量子通信设备，宽带数字集群设备、采用时分双工（TDD）方式载波聚合的230MHz频段宽带无线数据传输设备等下一代专网通信设备，基于 LTE-V2X 无线通信技术的车联网直连通信设备等车联网无线通信设备。

进展

南方科技大学、深圳量子研究院、福州大学和清华大学利用具有定制频率梳的脉冲应用于辅助量子比特，超过纠错盈亏平衡点约16%。

中国科学技术大学与北京大学合作，成功实现了51个超导量子比特簇态制备和验证，刷新了所有量子系统中真纠缠比特数目的世界纪录，并首次实现了基于测量的变分量子算法的演示。

华翊量子发布离子阱量子计算第一代商业化原型机HYQ-A37，实现可编程的通用量子逻辑门集合与绝热量子计算。最高水平可维持包含92个镱-171离子的一维离子晶体长达数小时不发生雾化。

本源量子与中科大团队合作，实现硅基量子计算自旋量子比特的超快调控。双方还发展并验证了一种可适用于不同耦合强度和多量子比特系统的响应理论方法。此外，双方还通过调控微波驱动频率、幅值等参数，实现任意能级结构，进而实现高速、抗噪声的量子比特操控。

中科大团队成功构建了255个光子的量子计算原型机“九章三号”。该原型机由255个光子构成，在解决高斯玻色取样数学问题方面比全球最快的超级计算机快一亿亿倍，再度刷新了光量子信息技术的世界纪录。

启科量子与中山大学合作开展PT对称性量子比特的研究，实现了量子速度极限，并在50比特离子阱量子计算工程机上实践应用。

与平安银行达成战略合作，探索量子计算与金融科技应用新场景；全线业务升级，发布发布超导量子芯片、量子芯片EDA软件、超导量子测控系统、量子软件编程框架及云平台；成功向一家中东科研机构交付超导量子芯片，这是中国首枚向海外出口的超导量子计算芯片。

发布模块化离子阱量子计算工程机，与中国移动研究院在移动通信和算力网络等多个领域开展深入合作；与上海计算机软件技术开发中心成立上海量子软件技术研究与验证中心；作为创始成员，参与中国首个量子计算产业知识产权联盟的创立；签约入驻粤港澳大湾区算力调度平台。

与平安银行合作，共同开展金融欺诈领域的量子金融算法研究与落地，通过量子计算机真机验证实现量子算法在金融业务中的应用，有望提升反欺诈和反洗钱业务的计算速度，显著提高银行金融服务的智能化水平。

发布新一代便携式核磁量子计算机旗舰产品双子座Mini Pro和三角座Mini；举办第二届“量旋杯”量子计算挑战营；在深圳中学、桂林首附中学落地量子计算教育解决方案；向印尼万隆理工学院、墨西哥国立自治大学交付教育级量子计算机。

国盾量子与合肥一中以及合肥十中合作，共同筹建了量子科学探究实验室和量子信息创新实验室，以满足学生对量子科技的理论学习和实验需求，并通过科普讲座等形式探索量子信息技术在高中阶段的培养模式。

与中国地质大学（武汉）数学与物理学院签订校企合作协议，并举行实习实践基地授牌仪式。

开发专为高校科普教育设计的VR教学系统，帮助用户深入了解量子技术、认知量子比特状态演化，并通过搭建超导量子计算机进行实践；公司还举办了”司南杯“量子计算编程挑战赛，助力高校、企业量子计算人才培养。

与国仪量子在量子算法和融合计算平台等领域合作；9月，与阿法纳生物发布了“MiQro RNA药物设计平台”，这是国内首个基于量子计算和生物医药的药物设计平台。

推出更强劲的量子模拟器mqvector，新发布GPU模拟器mqvector_gpu，支持更多量子门，方便用户开发新量子算法。

发布量子化学pyChemiQ软件；7月，上线新一代量子计算操作系统本源司南PilotOS，支持量子计算任务批量处理，支持量超协同计算，用户可以直接进行本地量子计算编程，不需要联网使用，实现对软件的“打开即用”。

启科量子与上海软件中心提出了一个量子模拟器软件的质量评估框架，该框架从功能性和性能效率等七个指标上来评估模拟器的性能。为验证有效性，分别在代表性的量子模拟器平台上实现了这一基准测试，并在不同算法范式上比较了它们的模拟能力，从而验证了框架的有效性

研究了如何设计量子电路以制备特定的量子态，以及如何改进酉矩阵合成的量子电路。通过引入辅助量子比特，在各类不同的量子比特连接性约束下，实现了高效的量子电路，在量子态制备、受控量子态制备和酉矩阵合成的量子电路复杂性方面得到了渐近最优的深度和大小。

和北京大学团队在固定节点DMC中应用了基于神经网络的试验波函数，它可以准确计算具有不同电子特性的各种原子和分子系统。

通过“关系树”的方式，可以对最大割问题的主要贪婪算法进行分类，并且通过对不同类型的图进行数值性能研究，发现Prim类算法在一般密集图上表现更好，而Kruskal类算法在图比较稀疏时表现更好。

发布新一代量子计算云平台“QUAFU”，可访问包含136个、18个和10个量子比特的超导量子计算芯片。

与中科院软件所、中电科十六所、弧光量子等合作，推出量子计算云平台，将“祖冲之号”同款176量子比特（66量子比特，110耦合比特）量子计算机上云，配备图形及编程两种实验方式，引入多款国产编程语言，面向全球开放。

发布“天衍”量子计算云平台。该平台融合了“天翼云”超算及176量子比特超导量子计算能力，构建混合计算框架体系，支持量子算法与量子模拟计算等系列量子程序应用。

在基于光纤传输的TF-QKD（双场量子密钥分发系统）线路距离方面，于2023年首次突破1000公里，达到1002公里，这一成果是迈向未来大规模量子网络的关键一步。此次突破通过实验证明了在长距离光纤上使用发送或不发送（SNS）协议的TF-QKD的可行性。

利用光频梳技术开发的量子密钥分发开放式新架构，成功实现615公里光纤量子密钥分发通信实验。此次实验是基于相干边带稳相与异地激光源频率校准技术研制的开放式架构、无需服务光纤的新型TF-QKD完成。达到低损耗光纤四百公里级、五百公里级、六百公里级的安全成码，并且打破无中继QKD的码率界限，成功演示了臂长差为百公里的量子密钥分发实验。

通过发展高保真度集成光子学量子态调控、高计数率超导单光子探测等关键技术，可实现百兆比特率（115.8 Mbs）的实时量子密钥分发，此实验结果将先前的成码率纪录提升一个数量级。

最新一项具有全天时工作和抗强背景噪声特性的混合链路QKD技术成功完成演示。这项技术采用了空间链路和光纤链路相结合的方法，以实现Hong-Ou-Mandel（HOM）干涉。在传统的BB84协议无法正常工作的链路条件下，该技术仍能够有效进行多维干涉量子密钥分发（MDI-QKD）。此外，研究人员还深入研究了基于卫星的HOM干涉的可行性，为构建天地一体的混合通信网络奠定了重要基础。

模式匹配量子密钥分发（MP-QKD）协议，利用极大似然估计的数据后处理方法精确地估算出两个独立激光器的频率差用于参数估计，实现了实验室标准光纤百公里级、两百公里级、三百公里级以及超低损光纤四百公里级的安全成码，相较于之前的原始MDI实验，成码率有明显提升，并且在三百公里和四百公里距离上较之前实验成码率提升了3个数量级。

“异步匹配”技术应用于量子通信，可大大提高了密钥率，且集中了“双场”协议与“测量设备无关”协议的优势，以更简单的量子通信架构，实现了尽可能长的量子通信距离。使用异步配对符合的策略改进了测量设备无关（MDI）量子密钥分发方案，使之既具有双场协议打破成码率-传输损耗限制关系的特点，又具有结构简化的优点。在成码率方面成功实现57kbps@201km、5kbps@306km、590bps@413km、42.64bps@508km。

通过将量子非局域性、量子安全算法和零知识证明三个领域相结合，首次实现了一套以器件无关量子随机数发生器作为熵源，以后量子密码作为身份认证的随机数信标公共服务，将其应用到零知识证明（ZKP）领域中，消除了非交互式零知识证明（NIZKP）中实现真随机数的困难所带来的安全隐患，提高了NIZKP的安全性。

利用雪崩光电二极管电子隧穿效应实现的离散型QRNG在常温常压下能以100 Mbps的速率输出原始随机序列，8,000,000 bits统计最小熵达到0.9944 bits/bit，NIST SP 800-90B认证最小熵达到0.9872 bits/bit。使得实现长时间连续输出无任何后处理的高随机性随机数的量子随机数发生器成为可能。此外，此次研究的QRNG输出的原始数据在长时间连续稳定保持高随机性方面也获得进展，系统11,744 s连续输出1,174 Gbits原始数据，以每8 Mbits作为基本单元得到统计最小熵分布，其平均值为0.9892 bits/bit。

中国国网武汉供电公司在武汉经开区供电环网内的配电自动化终端实现了量子加密通信——这是湖北首例电网量子加密技术的成功应用。新安装的量子加密通信线路，配电箱里添置了一个量子加密通信模块，加装在每个配电设备上，通过与电网通信链路连通实现量子加密通信。

公司64通道无液氦心磁图仪落地北京安贞医院，并举行了中国医学装备协会“心磁图装备技术与临床应用培训基地”挂牌揭幕仪式及签约仪式。

三、欧洲

本节聚焦欧洲整体在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了欧洲（除英德法）在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

尽管欧洲有44个国家，但是欧盟、欧洲安全与合作组织、欧洲经济区、欧洲自由贸易协会、欧洲委员会等组织的存在，令欧洲在众多方面能够协同运作。例如，2023年，欧盟颁发了多项涉及所有成员国的量子政策，这无疑将推动欧洲地区量子科技共同发展，保障欧洲的量子上游产业链独立自主。目前，欧洲量子研发仍以老牌欧洲发达国家为主，比如英德法。因此，本章除了列出英德法这三个占据欧洲过半市场份额的国家，还单独给出一节展示面向欧洲整体量子发展的政策。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
欧洲量子通信基础设施倡议	The European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative	欧盟委员会	EuroQCI将通过将基于量子的系统集成到现有通信基础设施中来保护敏感数据和关键基础设施，提供基于量子物理学的额外安全层。
欧洲芯片法案	European Chips Act	欧盟委员会	该倡议将得到33亿欧元的欧盟资金支持，并将支持诸如建立先进的预商业生产线以加速创新和技术开发、开发基于云的设计平台、建立能力中心、开发量子芯片以及创建芯片基金以促进获得债务融资和股权等活动。
欧洲创新委员会2024工作规划	European Innovation Council (EIC) 2024 work programme	欧洲创新理事会	将为战略技术和扩大公司规模提供了价值超过 12 亿欧元的融资机会，大部分致力于中小企业和初创企业，包括量子企业。
欧洲量子技术宣言	European Declaration on Quantum Technologies	欧盟委员会	欧盟签署成员国承诺合作在整个欧洲发展世界级的量子技术生态系统，最终目标是使欧洲成为世界的“量子谷”，成为全球量子卓越和创新的领先地区。
2030年数字指南针：数字十年的欧洲方式	2030 Digital Compass: the European way for the Digital Decade	欧盟委员会	到2025年，欧洲将拥有第一台量子加速计算机，为欧洲到2030年成为量子能力的前沿铺平道路。
欧洲高性能计算联合承诺	EuroHPC Joint Undertaking	欧盟委员会	将有助于欧盟开发、部署、扩展和维护集成了世界一流超级计算与量子计算的基础设施，以及开发、支持高度竞争和创新的高性能计算（HPC）生态系统。与量子计算相关的预算为6300万欧元。

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
数字欧洲工作计划2023-2024	Digital Europe Work Programme 2023-2024	欧盟委员会	提到对量子技术进行投资；把获取与EuroHPC相连接的超级计算机和量子计算机、开发和部署超安全的量子和天基通信基础设施作为未来计划。
量子技术的标准化路线图	Standardization Roadmap on Quantum Technologies	欧洲标准化委员会、欧洲电工标准化委员会	该文件全面阐述了欧洲对量子计算、量子通信和量子计量学的标准化需求。
欧洲量子通信基础设施倡议	The European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative	欧盟委员会	EuroQCI将通过将基于量子的系统集成到现有通信基础设施中来保护敏感数据和关键基础设施，提供基于量子物理学的额外安全层。
欧洲量子技术能力框架	The European Competence Framework for Quantum Technologies	欧洲委员会	新版本的欧洲量子技术能力框架，其中纳入了反馈并扩展了具有熟练水平和关键技能的框架，以准备、映射和比较量子技术的教育计划。
量子旗舰计划	Quantum Flagship initiative	欧盟委员会	新增多项量子研究项目，包括空间系统的量子通信技术、量子空间重力学阶段-A研究、量子光子集成电路技术、投资替代量子计算和模拟平台技术 、下一代量子传感和计量技术、开发大规模量子计算平台技术的框架合作协议、跳上设施、量子空间重力B期研究和技术成熟、用于市场吸收的量子传感和量子计量学、促进下一代量子技术的跨国研发。
欧洲创新理事会加速器项目	EIC Accelerator program	欧洲创新理事会	旨在为初创企业和中小企业提供支持。
欧洲量子技术实验生产能力	Experimental production capabilities for quantum technologies in Europe (Qu-Pilot)	欧盟委员会	旨在开发和提供首个联合欧洲量子技术制造（生产）能力，建立并连接欧洲现有的基础设施。

进展

代尔夫特理工大学的量子物理学家首次证明使用超导体控制和操纵芯片上的自旋波是可能的。磁铁中的这些微小的波可能会在未来提供电子产品的替代品。

宣布加入 IBM Quantum Network，旨在进一步探索量子计算如何为毕马威专业人士和客户带来未来机遇。

瑞典查尔姆斯理工大学开发的免费开源软件，通过对量子组件进行高级模拟和分析，实现该领域的新发现。

新的传输记录建立在QKD加密新理论之上，该理论解除了量子安全通信中先前对距离和数据传输速率的限制。利用传统光纤和光放大器的方法可实现在光纤电缆上发送了超过1032公里的量子安全通信，数据传输速率（密钥速率）明显高于之前的记录。

利用量子真空态生成随机数通常在速度上存在限制。因此，研究人员通过利用粒子和反粒子对的行为来创建量子随机数发生器，发现其速度比传统系统快200倍，在实验中达到了每秒100 Gbit的生成速率，将基于真空的量子随机数产生速度记录提高了一个数量级。

新的神经网络训练方法“递归学习”（Recursive Learning）可以通过周期性循环旋转信息，实现对NIST公布的四种PQC算法中Crystals-Kyber算法的最高5阶掩码的侧信道攻击，以高于99%的概率从中恢复了信息位（message bit）。这一发现表明使用神经网络即可破解NIST的PQC算法，突显了PQC算法安全性评估的重要性。

量子隐形传态（QT）是量子网络的一项基本功能，允许在不直接交换量子信息的情况下传输量子比特。此次实验展示了远距离进行量子传输的方法，从波长为通信波段的光子比特到存储在固态量子存储中的物质量子比特，多路复用量子存储器实现从光子到固态量子比特的量子隐形传态的传输距离超过1公里。这一系统采用主动前馈方案，通过对从存储中检索的量子比特进行条件相移，满足了协议要求。其独特之处在于采用了时分复用的方法，不仅提高了传输速率，而且直接与已部署的电信网络兼容。这些关键特征使得这一技术在长距离量子通信的发展中具有潜在的可扩展性和实际实施的可能性。

瑞士WISeKey的子公司SEALSQ在2023年6月开发了基于人工智能的PQC量子解决方案，利用NIST公布的Kyber和Dilithium CRYSTAL算法保证通信安全，创建了第一个抗量子USB演示器。

最新一代配备氦气回收和最新一代磁传感器的MEG 系统在瑞士日内瓦交付，安装调试后被用于提供大脑活动精确且完整的图像。

欧盟委员会与27个欧盟成员国和欧洲航天局（ESA）合作，共同设计、开发和部署欧洲量子通信基础设施（EuroQCI）项目。EuroQCI项目由两部分组成，第一是连接国家和跨境战略站点的光纤通信网络的地面部分，第二个是基于卫星的空间部分。EuroQCI于2019年发布EuroQCI宣言，最初由七个成员国签署，随着2021年7月爱尔兰完成签署EuroQCI，所有27个欧盟国均已加入EuroQCI。EuroQCI计划在整个欧盟及其海外领土部署量子通信基础设施，到2027年投入使用。此项目由协调组织方PETRUS进行协作支持，PETRUS成员单位包括DT（德国电信）、Airbus（法国空客）、Thales（法国泰雷兹）和AIT（奥地利理工学院）。

在地面建设部分，EuroQCI的首个实施阶段已于2023年1月开始，预计持续30个月，将于2025年6月完成。目前，马耳他、爱尔兰、西班牙、法国、丹麦、保加利亚等多个国家纷纷启动量子通信基础设施建设。

在太空领域，欧盟委员会目前正在与欧洲航天局（ESA）合作制定第一代EuroQCI卫星星座的规格。这颗卫星是由ESA和一个工业联盟在第一颗原型卫星Eagle-1的基础上开发的，预计于2025年底或2026年初发射。2023年11月，由欧洲卫星公司SES牵头负责开发量子安全天基EAGLE-1系统，并与ESA密切合作，TNO和Airbus加入为该任务设计和建造光学地面站。

利用量子真空态生成随机数通常在速度上存在限制。因此，研究人员通过利用粒子和反粒子对的行为来创建量子随机数发生器，发现其速度比传统系统快200倍，在实验中达到了每秒100 Gbit的生成速率，将基于真空的量子随机数产生速度记录提高了一个数量级。

采用卫星时间和定位 技术的新同步解决方案，以解决 GPS 和其他 GNSS 系统日益受到干扰和欺骗攻击的漏洞，可服务于智能电网等行业。

利用低地球轨道 卫星作为时间源，不仅提供了 GNSS 的有效替代方案，而且还增强了 GNSS 的可靠性和安全性。这种双源方法符合零信任原则。

德铁利用公司的光学铯原子钟技术为其全国铁路网络带来精确计时。增强型主参考时钟解决方案将使德国铁路能够在整个网络中实施预测性维护和其他技术进步。

对其公司最新的OSA 3300-HP 高性能光学铯原子钟进行了为期三个月的评估，结果其性能远远超出了产品规格。该技术对于天文研究将产生重要作用。

可以提供表面磁场、电流和电场的定量数据，具有纳米分辨率和高灵敏度。目前该设备已安装到Vidya Praveen Bhallamudi 教授的实验室中。

用于研究基于卫星的地球质量分布变化观测，例如冰川融化或地下水流失，可以实现基于量子传感器的太空任务的独立开发和操作，协助完成一系列相关实验。

四、英国

本节聚焦英国政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了英国在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
国家量子战略	National Quantum Strategy	英国科学、创新与技术部	提出了英国量子领域的十年愿景和计划，承诺在此期间投入25亿英镑用于研究、创新、技能和其他活动，并承诺在未来两年内，将额外8000万英镑用于关键活动。
创新英国变革性技术基金	Innovate UK Transformative Technologies Funding	Innovate UK	启动了一项2000万英镑基金，资助的行业包括半导体、未来通信、人工智能、工程生物学、量子科技和可持续材料与制造。
科学与技术框架	Science and Technology Framework	英国科学、创新与技术部	将提供超过3.7亿英镑的新政府资金支持，技术涉及人工智能、量子技术、生物工程。
英国国际技术战略	The UK's International Technology Strategy	英国科学、创新与技术部	将量子技术列为优先技术之一，实施以国家量子技术计划的世界领先优势为基础的国家量子战略；开展量子方面的国际合作；继续参与全球领先的多边研究伙伴关系；领导量子风险和机遇的全球定义，并与国际合作伙伴合作制定负责任和安全的量子开发和部署的共同原则。
国家半导体战略	National semiconductor strategy	英国科学、创新与技术部	将在未来十年投资10亿英镑，以推动英国半导体产业的发展。
小型企业资助计划竞赛：量子催化剂基金，第一阶段和第二阶段	Small Business Research Initiative (SBRI): Quantum Catalyst Fund, phase 1 and phase 2	英国科学、创新与技术部	由英国科学、创新和技术部（DSIT）和英国创新组织（IUK）资助的小企业研究计划竞赛分两阶段，第一阶段的总预算为200万英镑，将持续3个月；第二阶段的总预算高达1300万英镑，将持续15个月。
小型企业资助计划竞赛：量子计算测试平台的开发和交付	Small Business Research Initiative (SBRI): Development and Delivery of Quantum Computing Testbeds	英国创新署	英国创新署为国家量子计算中心（NQCC）举办的小型企业研究计划（SBRI）竞赛提供了3000万英镑的资金，该比赛旨在开发量子计算机硬件测试平台，以加速英国的量子计算技术供应链、技术基础和基础设施的发展。

进展

QuantrolOx 宣布推出其首款产品 Quantum Edge，该产品可自动调整和优化超导量子计算机。

LTIMindtree公司在伦敦启动了量子安全虚拟专用网（VPN）链接。该量子安全VPN由LTIMindtree、Quantum Xchange、Fortinet合作实现，使用基于量子的密钥生成和带外密钥传输，并由PQC算法提供安全保护，以增强加密数据的安全性和完整性。

英国Quantum Dice公司和新加坡量子通信技术公司SpeQtral推出使用Zenith的QRNG，此设备为专为太空设计的产品，可在为计划在SpeQtral-1卫星任务中实现安全量子通信技术提供支持。
Zenith QRNG是Quantum Dice的首款太空产品，提供高速率、稳健且低尺寸、重量和功耗 (SWaP) 解决方案，采用Quantum Dice专有的DISC TM协议，拥有200至1000 Mbps数据速率。此前，Quantum Dice推出的DISC™ QRNG系列具有7.5 Gbps随机数生成速率。

使用超冷原子进行加速度的测量，有潜力在无全球定位系统（GPS）和全球导航卫星系统（GNSS）的环境中提供高精度的位置数据。

试验的图像尽管没有出现甲烷浓度的热点，但敞口污水箱的扩散排放仍能够量化其精确流量。

从近地到大气边缘的操作相关环境中测试推动量子和平流层探索领域的下一代射频传感技术。

五、德国

本节聚焦德国政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了德国在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
量子技术行动计划	Quantum Technology Action Plan	德国联邦政府	德国将在2026年前投资30亿欧元用于量子技术发展，并成立了跨部门的协调机构——量子技术工作组。
2023-2025年专题领域的任务和目标	Aufgaben und Ziele der Themenbereiche für 2023-2025	德国国家计量局	制定了 2023 年至 2025 年的具体任务和目标。
基于芯片的量子随机数器件项目	Chip Based Quantum Random Number Devices	德国联邦教育和研究部	资助基于芯片的量子随机数器件（CBQD）项目，用以研究量子安全高速通信。

iCV TA&K | 2024年2月版

进展

与PASQAL达成为期两年的研发协议，以优化量子算法功能、提升企业的量子效益。该公司创造了首个“算法压缩技术”，减少了量子算法的长度。

演示通过设置使用肌肉模型进行模拟动作电位信号检测，以及NV磁力计在非屏蔽生物磁场测量磁尿图和肌磁图中的潜在应用。

六、法国

本节聚焦法国政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了法国在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
创新和可持续发展协议	A Pact for Innovation and Sustainable Growth	法国政府、荷兰政府	两国围绕数字和可持续双转型以及欧盟战略自主的关键经济领域，围绕具体项目开展结构性对话并加强公私合作。

iCV TA&K | 2024年2月版

进展

QUANDELA 成功在欧洲OVHcloud数据中心安装了其首台量子计算机MosaiQ，标志着欧洲领先的光子量子计算公司向工业客户提供量子平台的重要里程碑。

Atos EVIDEN Atos的Eviden推出了量子计算产品Qaptiva，以使用同类最佳的量子计算技术实现现实世界的应用程序开发和使用。

PASQAL 推出中性原子量子计算探索平台 Quantum Discovery，包括访问 量子仿真器和 100 量子比特量子处理单元。

七、加拿大

本节聚焦加拿大政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了加拿大在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

2023年，加拿大重磅发布三项量子政策/规划，意图确保加拿大走在量子创新和领导的道路上。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
加拿大国家量子战略	Canada's National Quantum Strategy	创新、科学和经济发展部	规定了三个关键任务，以确保加拿大始终走在量子创新和领导的道路上。
量子2030	Quantum 2030	加拿大国防部、武装部队	该计划确定了四项具有国防与安全应用前景的量子技术，分别是：量子增强雷达、量子增强型光探测和测距（激光雷达）、用于国防和安全的量子算法、量子网络。
量子2030-量子科学和技术战略实施计划	Quantum 2030-Quantum Science & Technology Strategy Implementation Plan	国防部和武装部队	该计划是确保DND/CAF为未来七年量子技术在国防和安全方面的颠覆性潜力做好更好准备的路线图。

iCV TA&K | 2024年2月版

进展

XANADU

Xanadu与加拿大金斯顿女王大学签署了备忘录，致力于开发量子计算教育工具并提供教育计划，为学生在量子领域的职业生涯做好准备。

D-Wave The Quantum Computing Company™

D-Wave 在 5000 多个量子比特上展示了有史以来第一个相干量子自旋玻璃动力学。

D-Wave The Quantum Computing Company™

D-Wave 在 Advantage2™ 原型上展示了误差缓解功能，将相干退火范围扩展了一个数量级。

八、澳大利亚

本节聚焦澳大利亚政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了澳大利亚在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
国家量子战略	National Quantum Strategy	澳大利亚政府	该战略确定了五个优先领域：投资研发和商业化、保护基础设施和材料、培养熟练劳动力、支持国家利益以及促进可信、合乎道德、包容的生态系统。
培养澳大利亚世界级的量子技术毕业生	Training Australia's world class quantum technology graduates	澳大利亚政府、工业和科学部	总计460万美元的赠款将促进该国量子领域的教育和合作。

iCV TA&K | 2024年2月版

进展

Q-CTRL宣布其嵌入式软件已作为选件集成到IBM Quantum的“现收现付计划”（Pay-As-You-Go Plan）中，以提高量子计算的实用性和性能。

将软件开发工具包Qristal SDK，以及高性能的模拟器Qristal Emulator整合到HPC数据中心内的量子加速器。

与牛津量子电路公司（OQC）合作，在运行复杂算法时展示了量子硬件性能的巨大提升。Q-CTRL 的误差抑制软件能减少硬件误差和不稳定性，使用户在运行量子算法时从硬件中获得最佳结果。

为了克服连续可变量子隐形传态在保真度和传输距离上存在的限制，通过无噪声线性放大来克服这些限制的预测量子传输器，使用适度量子纠缠的相干态传输的高保真度达到了92%。我们的传输器原则上允许几乎完全消除由于在不完美的量子通道中传输的输入态而引起的损失。此外，还进一步演示了位移热态的纯化，这是传统确定性放大或传输方法无法实现的。高保真度的相干态传输与对热化输入态的纯化相结合，使得量子态能够在相当长的距离上进行传输。此次实验克服了通往高效连续变量量子传输的长期障碍，同时为将传输应用于从热噪声中纯化量子系统提供了新的启示。

九、日本

本节聚焦日本政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了日本在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
量子未来产业创新战略	量子未来産業創出戦略	日本内阁府综合创新战略推进会	在“量子未来社会愿景”中提出通过使用量子技术实现可持续社会、经济和环境的愿景，并设定了三个目标。
确保云程序的稳定供应	クラドプログラムの安定供給の確保）	日本经济产业省	支持提供利用下一代高速计算机“量子计算机”的云服务的东京大学。经经济产业省认定后，东京大学将获得约42亿日元的补助。经济产业省希望扩大使用计算机的机会，同时也让风险企业参与进来。
日韩量子技术研发合作框架	Collaborative Framework for Research and Development in Quantum Technologies	韩国政府、日本政府	韩国政府、日本政府发起一项量子技术研发合作框架，两国的国家研究机构——日本国立产业技术综合研究所和韩国标准科学研究院，将签署一份谅解备忘录。

进展

理化学研究所

3月27日，日本理化学研究所等研发的日本首台国产量子计算机正式投入使用，大学等机构的研究人员可通过云端利用这台量子计算机。

FUJITSU

10月5日，富士通宣布成功与日本理化学研究所等单位开发了日本的第二台量子计算机，这是继去年推出第一台量子计算机后的又一重大突破。这台量子计算机拥有64个量子比特，是量子计算机性能的重要指标。它将与一个40个量子比特的量子计算机模拟器集成，以提高运算的准确性和稳定性。

大阪大学 OSAKA UNIVERSITY

12月22日，日本第3台国产超导量子计算机在大阪大学正式投入使用，共有42家联合研发机构获得算力优先使用权，主要用于新药物、新材料研发及量子计算相关领域研究。这台量子计算机共有64个量子比特，采用大阪大学研发的量子纠错算法，并将低噪声电源、低温放大器、磁屏蔽装置等重要组件替换为日本国产元件。

十、韩国

本节聚焦韩国政府在量子领域的政策制定和实施，包括对量子信息产业的关注与支持，以及国家战略中的位置。此外，本节汇总了美国在量子计算、量子通信与安全、量子精密测量三大领域上中下游的重要进展。

政策

政策名称（中文）	政策名称（原文）	发布机构	概述
韩国量子科技战略	South Korea's Quantum Science and Technology Strategy	韩国科技信息通信部	到2035年，韩国将向量子科学技术投入超过3万亿韩元（23亿美元），目标是成为该领域的全球第四大强国。
通过培养10万人工智能和软件核心人才，为量子转型时代做准备	인공지능·소프트웨어 핵심인재 10만명 양성으로 디지털 대전환 대비	韩国国家情报局、韩国科技信息通信部	将在2035年之前将其国家密码系统转变为PQC。
量子信息科学与技术合作联合声明	Joint Statement on Cooperation in Quantum Information Science and Technology (QIST)	美国政府、韩国政府	加强公共和私人合作，以保护和促进关键和新兴技术，包括量子技术，并申明积极支持量子技术领域专家之间的人文交流。

iCV TA&K | 2024年2月版

进展

韩国互联网服务提供商SK Broadband推出韩国首个支持QKD和PQC在线安全方法的专线服务，客户可以根据具体情况选择和使用QKD或PQC，这一服务获得了韩国密码模块验证计划（KCMVP）的认证。在此专线服务中，客户可以自主选择QKD和PQC的使用。SK Broadband表明，专用的QKD线路在安全性上表现出色，适用于政府、公共机构、医疗中心和金融机构等大型客户。而对于中小型企业，则可以选择无需安装单独设备的PQC。当然，也可以灵活地将两种方法结合运用。以银行的生物特征认证安全性为例，可在银行内部数据中心采用QKD技术，同时在客户的智能手机和认证服务器之间采用PQC技术，以保护生物特征信息。这种综合运用的方式既发挥了QKD在专用场景的优势，又充分利用了PQC在中小型企业中的便捷性。



第三章

投融资

目录 第三章 投融资

一、融资金额大幅下降

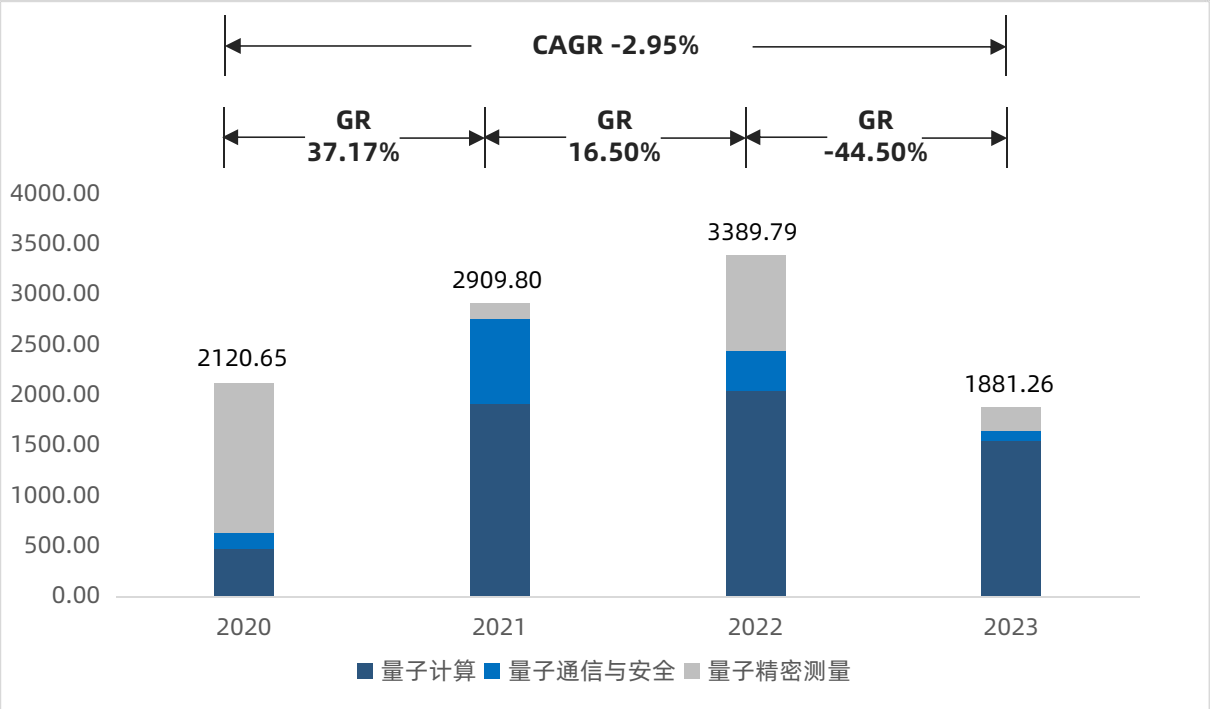
二、融资主体地理分布分散

三、融资轮次普遍较少

一、融资金额大幅下降

光子盒统计了2020年至2023年全球主要量子计算企业的融资情况，具体如下：

图表 2020-2023年全球三大量子产业融资总额（单位：百万美元）



iCV TA&K | 2024年2月版

全球量子计算领域的投资规模在过去的四年中呈现出快速增长的态势。从2020年至2023年，全球量子计算总融资金额高达59.8亿美元，年复合增长率（CAGR）达34.53%。然而，2023年的投资情况出现了一些变化。尽管总体融资金额仍然可观，但较去年略有下降，仅为去年的75%左右。这表明全球对量子计算的投资热情出现了短暂的回落，未能延续前几年的动能。

这种投资回落背后有多重原因。首先是大环境的影响，经济衰退、利率上升或市场波动增加导致用于新兴技术如量子计算的风险资本减少。其次，量子计算领域内部可能出现投资焦点的转移，比如从硬件转向软件，或从广泛的量子计算平台转向更专业化的应用。这种转变可能反映了行业的自然演化，但会暂时减少整体投资水平，直到新的焦点领域成熟。另外，2023年量子计算初创公司成立数量较2022年有所下降。这表明在全球经济下行的大背景下，创业者采取了更加谨慎的态度，等待更清晰的实用、可扩展的量子优势证据出现后再进行针对性的融资。投资者越来越重视商业可行性的证明和明确的盈利路径。尚处于技术开发早期阶段的量子计算公司可能发现在没有展示实际应用和潜在市场需求的情况下，难以获得资金支持。

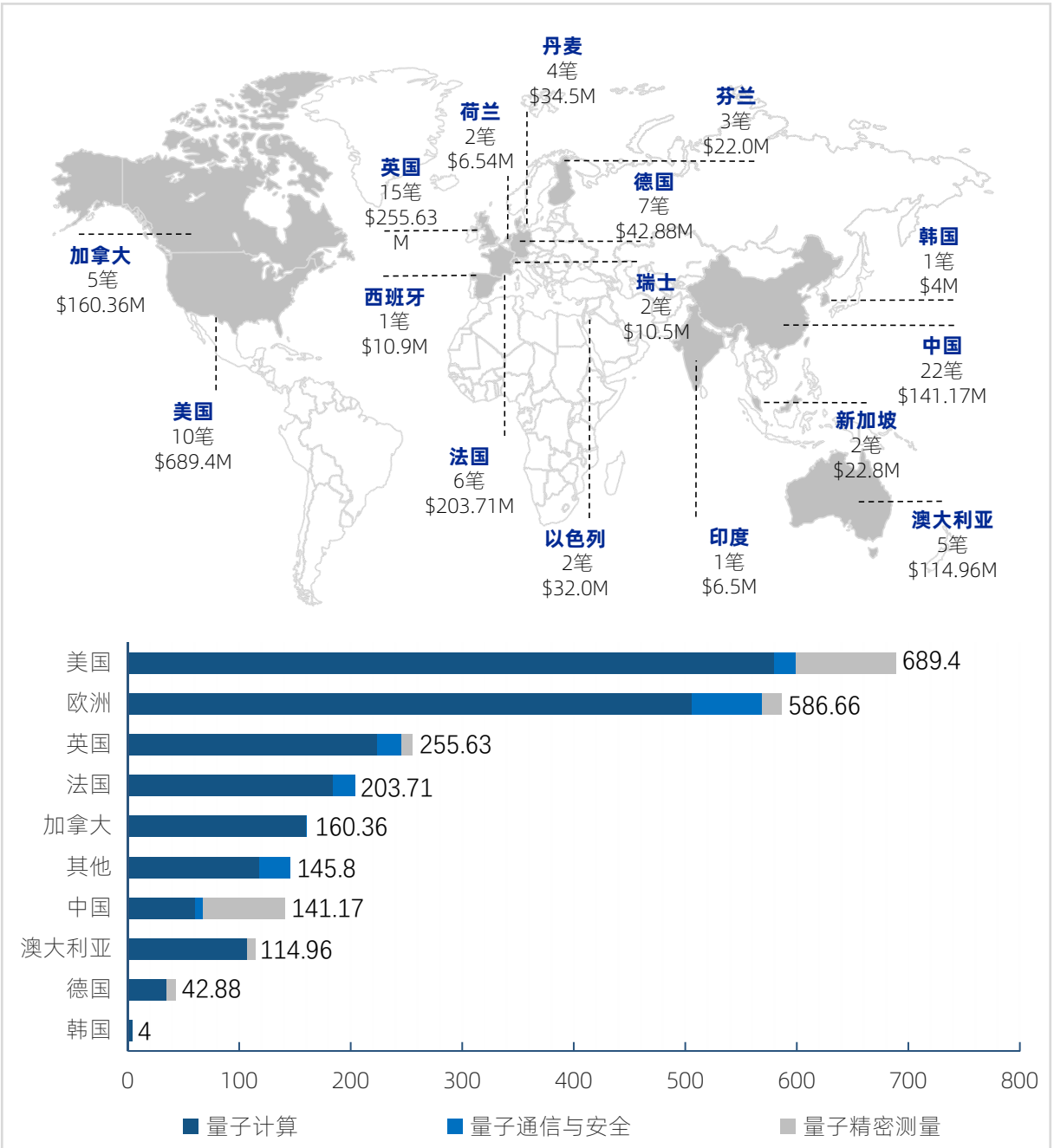
此外，技术挑战仍是量子计算面临的重要问题，如量子比特相干时间、错误率和可扩展性等。这些挑战可能导致投资者重新评估实现商业可行量子计算机的时间线，从而影响投资流动。除了技术挑战，其他技术的竞争也在分散投资者对量子计算的关注和资源，如高级经典计算方法、机器学习优化等新兴技术。

二、融资主体地理分布分散

2023年，各国量子投融资依旧保持多元化与地区分散化。总体来说，美国在量子领域的投资规模和水平仍然遥遥领先，欧洲多国在量子领域的投资活跃度和水平较高，中国在量子风险投资的规模上距离欧美国家还差距较大。

全球主要国家和地区的三大量子产业投融资情况

图表 2023主要国家和地区的三大量子产业投融资情况（单位：百万美元）



iCV TA&K | 2024年2月版

注：日本、韩国、俄罗斯信息不够公开，导致日本、俄罗斯数据空缺，以及韩国数据可能存在较大偏差。

国家/地区按三大量子产业融资总额从高到低排序，量子计算、量子通信与安全、量子精密测量的融资数额分别为美国579.4M、20M、90M，欧洲505.74M、63.08M、17.84M，英国223.7M、22.17M、9.76M，法国184.2M、19.51M、0M，加拿大159.4M、0.66M、0M，除美英法加中澳德韩日九国以外的其他国家384.64M、28.56M、7.56M，中国60.6M、6.75M、73.82M，澳大利亚107.4M、0M、0M，德国34.8M、0M、8.08M，韩国4M、0M、0M。

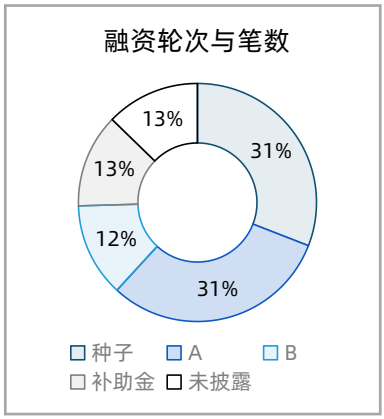
从总融资规模来看，在美、英、法、加、中、澳、德、韩八国中，美国以6.89亿美元的总融资规模位居首位，远超其他国家和地区。这表明美国在量子计算领域的投资热度和实力，以及其在量子计算技术和市场上的领先地位。其次是英国的2.24亿美元和法国的1.84亿美元，分别位居第二和第三位，显示了欧洲在量子计算领域的整体发展水平和活跃度。尽管中国的0.60亿美元总融资规模在亚洲国家中位居首位，但与美国相比仍有数量级的差距。其他亚太国家的投资规模与欧美、中国相比，存在较大差距。

三、融资轮次普遍较少

后疫情时代经济环境低迷仍在持续，在高通胀率等诸多因素的冲击下，这对量子信息科技等前沿技术领域的投资产生不利影响。在量子计算领域，融资金额均较2022年相比有所下降，但融资数量上略有上升 。2023年，量子领域共发生89轮次融资事件， 种子轮/天使轮最多（21轮），其次为A轮（29轮）、B轮（8轮）与非股权形式的政府资助（13笔），其它轮次的情况为18轮。

获得融资的公司，主营业务是多元化的，包括不同的技术路线，以及核心硬件、软件等。较2022年的融资领域分布，已有更多超出整机层面外的硬件，以及符合轻资产模型的量子软件企业。

图表 2023年全球量子计算公司融资概览



Seed/ Angel	A	B	Grant	Other
21笔	29笔	8笔	13笔	18笔
$165M	$399M	$407M	$180M	$772M

全球量子公司的融资轮次情况

融资轮次	量子计算	量子通信与安全	量子精密测量
Seed	么正量子 NanoQT QuantrolOx HAIQU memoq QUANSCIENT KUANO quobly Sparrow Quantum agnostiq MQS Quantagonia Quantum Source QUOHERENT QCDESIGN KIPU quantum	Weling	SOPHOTON Delta.g QUANTUM DIAMONDS
A	华翊量子 QUANTUM Silicon Quantum Computing 微观纪元 HORIZON oxford ionics QUANTUM BRILLIANCE 机数量子 ENTROPICA LABS STRANGE WORKS PHASECRAFT 么正量子 BOSON 玻色量子 九章量子 瀚海量子 QUNOVA COMPUTING algorithmiq	Q→NU Aliro QUANTUM CRYPTONEXT SECURITY 量安科技 PQCTECH QUANTUM	NVISION NOMAD 国科量子 国盾激光 GLIGHT Skylark Lasers RAYZ SOPHOTON
B	OQC QUANTUM MACHINES QUANTUM MOTION Q-CTRL QUANDELA PASQAL Q-CTRL		ORI CHIP
C			adaps
D	SANDBOXAQ		NVISION source PHOTONICS
Grant	oxford ionics XANADU SemiQon kvantify PsiQuantum Orange Quantum Systems ⟨b|e⟩	QUSIDE CRYPTO QUANTIQUE QUANTUM DICE Quantum Bridge	Skylark Lasers
Other	photonic QUANTier HQS QUANTUM SIMULATIONS NanoQT QSIMULATE OQC	硅臻 Terra Quantum QUANTUM RESISTANT CRYPTOGRAPHY VeriQloud	量汉时空 Benewake

第四章

量子产业规模

目录 第四章 量子产业规模

一、总体产业规模

二、各领域产业规模

01 全球量子计算产业规模

02 全球量子通信产业规模

03 全球量子精密测量产业规模

三、各地区产业规模

01 各地区量子计算产业规模

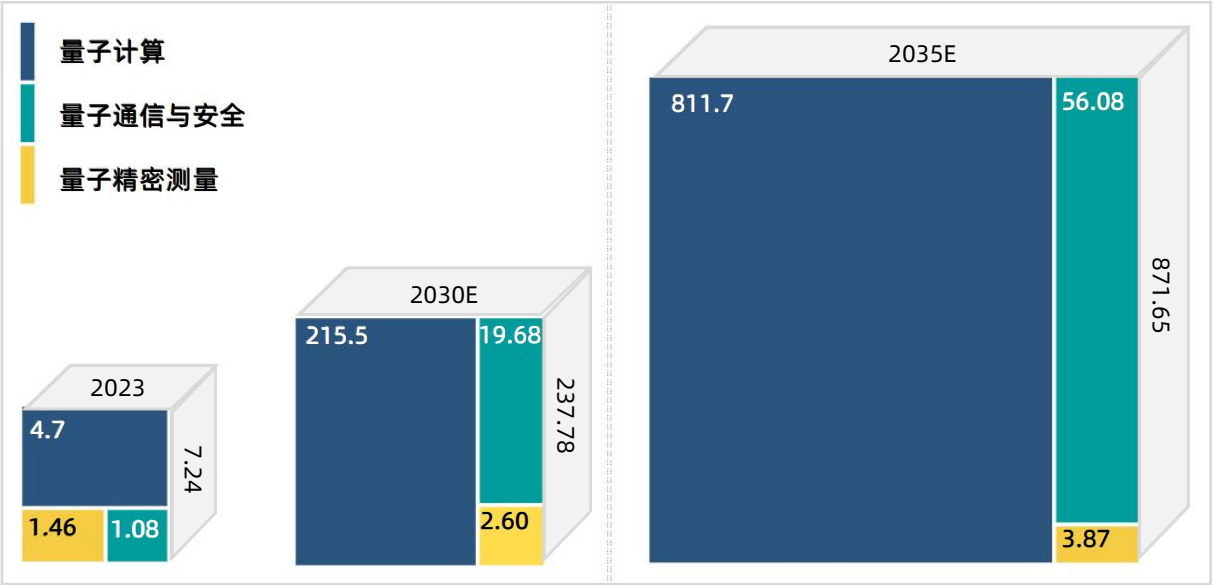
02 各地区量子通信产业规模

03 各地区量子精密测量产业规模

一、总体产业规模

2023-2035年，量子产业呈现出稳步增长趋势，产业规模从2023年的72.4亿美元增长到2030年的2377.8亿美元，7年间的年复合增长率（CAGR）达到64.68%；再到2035年的8716.5亿美元，5年间的年复合增长率（CAGR）达到29.67%。

图表 全球量子产业规模（2023～2035E，单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2024年2月版

目前，量子计算的技术成熟度相对较低，部分技术路线还处于实验室探索阶段。随着上游部件的不断改进、更多中游技术路线走出实验室以及更多下游应用场景的出现，量子计算行业将迎来更快的增速，产业规模有望超出预期。

在量子通信与安全领域，现阶段只有QKD、PQC、QRNG的技术相对成熟，预测产业规模时只考虑了这三者。未来，量子隐形传态、量子直接通信等技术或将取得突破，但这些技术与QKD之间存在替代关系，因此量子通信与安全领域产业规模预计不会出现重大变动。

尽管量子精密测量的应用场景众多，但经典传感器足以满足多数民用场景，且其技术成熟度相对较高，因此增长率相对较低。

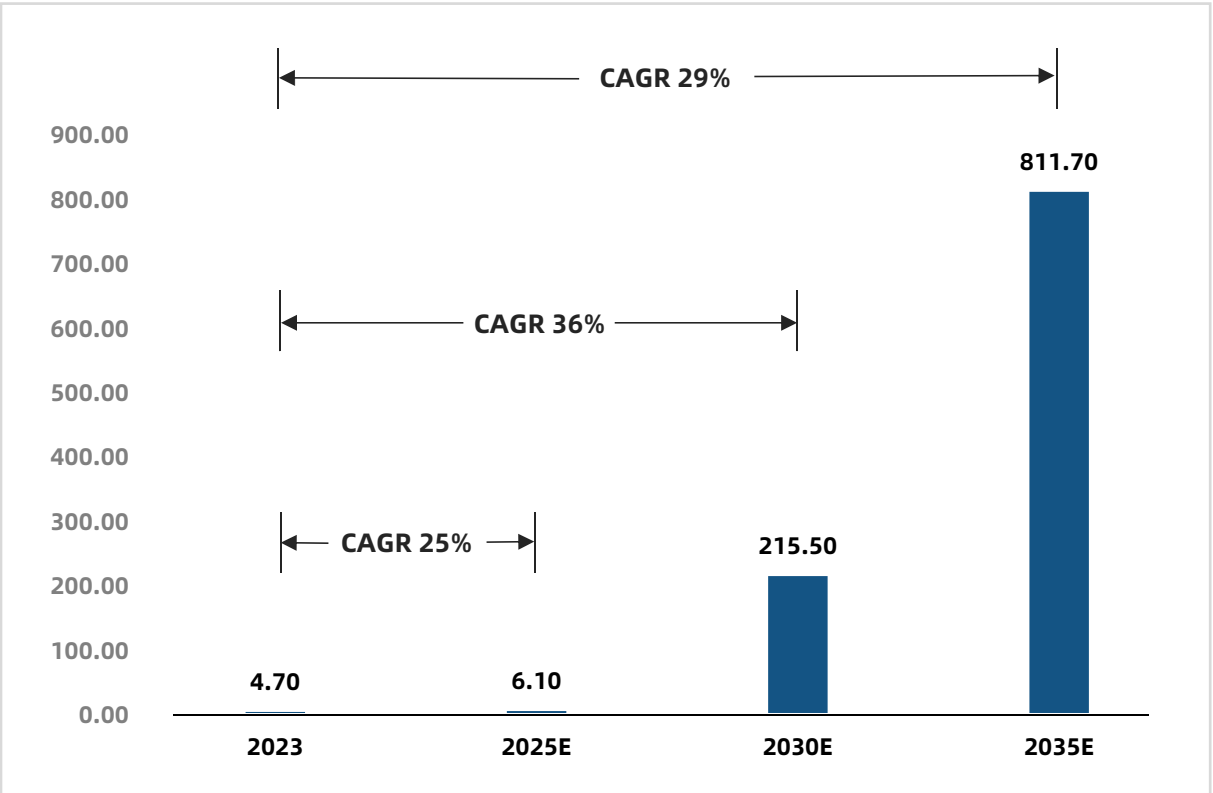
一、各领域产业规模

01 全球量子计算产业规模

光子盒仍然认为2027年末至2028年初会是全行业一个重要的时间点，专用量子计算机将逐渐解决特定问题，如组合优化、量子化学、机器学习，引导材料设计和药物开发。

相比去年，本报告量子计算产业规模预期上调的主要原因有两方面。首先，参考了IBM最新发布的技术路线图，预计到2028年，量子门数量、以及纠错等计算技术将达到较为成熟阶段，为实际的商业化应用奠定坚实基础。其次，随着量子计算技术的不断演进，以及人工智能（AI）技术等领域的快速发展，量子计算的应用边界被不断拓展，从而使量子计算的商业潜力更加广泛和深远。

图表 全球量子计算产业规模（2021～2035E）（单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2024年2月版

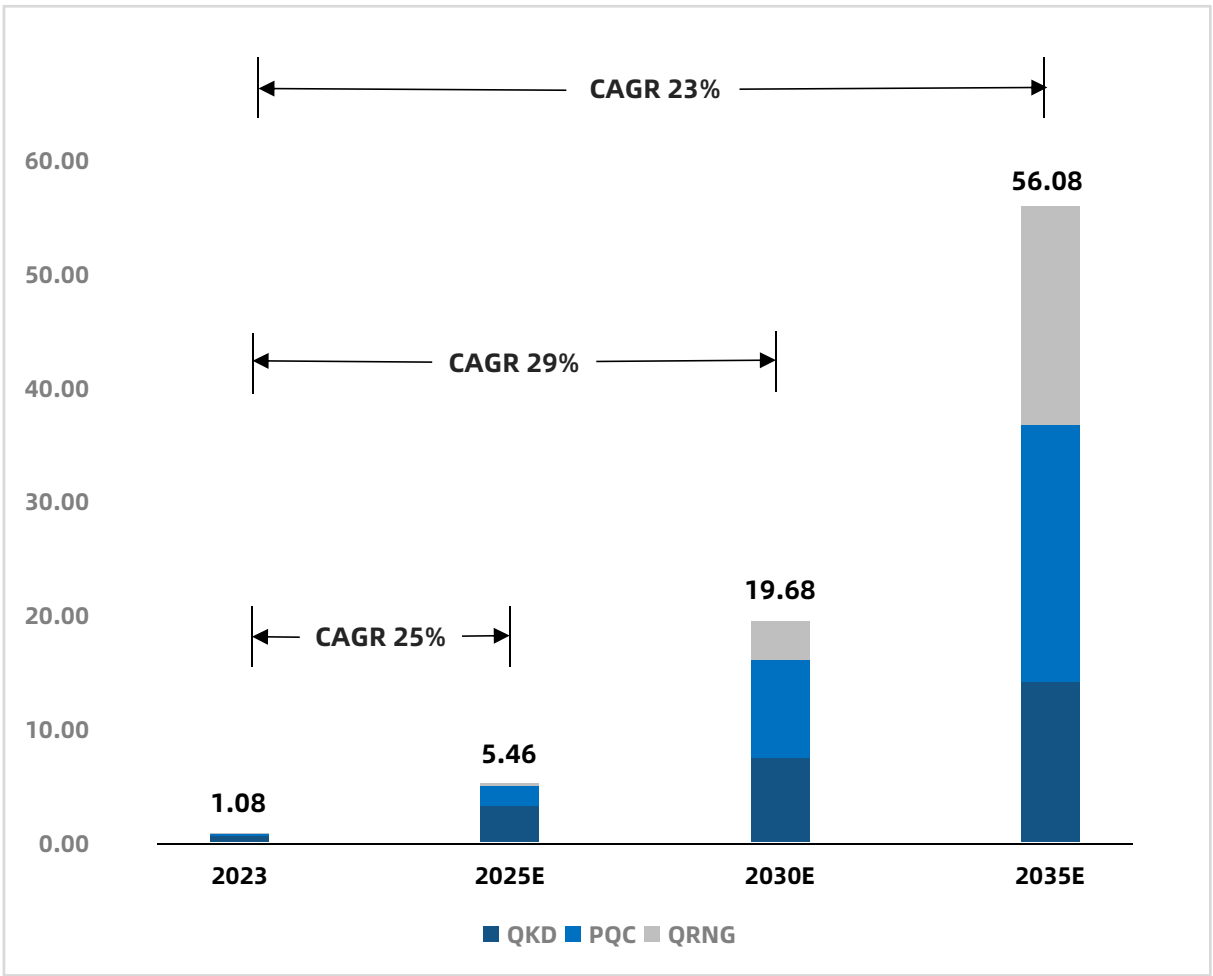
2023年，全球量子计算产业规模达到47亿美元，2023至2030年的年平均增长率（CAGR）达到36%，规模达到2155亿美元，基本符合行业发展规律。2027年，专用量子计算机预计将实现性能突破，带动整体产业规模快速发展。在2028年至2035年，产业规模将继续迅速扩大，受益于通用量子计算机的技术进步和专用量子计算机在特定领域的广泛应用，到2035年总产业规模有望达到8117亿美元。这一接近万亿级别的产业规模标志着量子计算会在此进入全面成熟和商业化的关键阶段，预示着未来量子计算将在各个领域带来深远而持久的影响。

02 全球量子通信产业规模

量子通信与安全领域的产品及技术服务主要归属于网络安全领域，是庞大的网络安全产业中的一个较为核心和根本的子产业，可向下扩展至涉及多个行业的安全产品。

量子通信与安全产业从目前已经发展的形态来看，主要是由量子物理加密产品与技术（例如QKD）、PQC、QRNG等带来的产业价值。

图表 全球量子通信产业规模预测（2023～2035E, 单位: 十亿美元）



iCV TA&K | 2024年2月版

2023年，全球量子通信与安全产业规模达到10.8亿美元，2023至2030年的年平均增长率（CAGR）达到29%，2030至2035年的年平均增长率达到23%，基本符合行业发展规律。一方面，预计PQC将于2025年实现突破，同时QRNG也将逐渐应用至更多设备，从而带动整体市场快速发展。另一方面，根据现有QKD市场发展状况判断，QKD市场发展速度相对缓慢，并且欧美国家对QKD的热情相对较低。综合这两方面，预计到2030年，总产业规模有望达到196.8亿美元；到2035年，总产业规模有望达到560.8亿美元。随着量子通信与安全的发展，未来将会有更多电信运营商的加入，这将反过来推动量子通信与安全的发展。

QKD

QKD产品技术发展已较为成熟，目前主要集中在产品的升级迭代，以提升性能、优化价格应用竞争力、缩小整机尺寸、用户友好性和产品的可扩展性等方面。QKD产品是网络安全领域中一种补充和增强的手段。QKD产品的发展方向将更多地关注于不同领域的深度融合，为安全通信提供更为全面和创新的解决方案。随着技术的不断成熟和市场对高度安全性的需求增加，QKD作为一种补充手段将在网络安全领域发挥越来越重要的作用。

2023年全球QKD产业规模约为9亿美元。随着全球经济的逐步恢复，QKD的应用场景逐渐清晰与增多等驱动引苏，未来几年将是QKD行业快速增长阶段，到2030年，预计产业规模将达到76.8亿美元；到2035年，预计产业规模将达到143.5亿美元。

PQC

PQC是对当前密码体系进行升级和强化的一项措施。在量子计算技术尚未成熟时，对现有安全产业的影响有限。随着量子计算能力以及数据安全需求的不断提升，未来必然会出现新的安全软件或安全芯片。随着PQC技术的成熟和市场认知的提高，PQC将逐渐渗透到各个领域。

PQC产品的两大主要形式，即软件和硬件，为应对不同领域和应用场景的安全需求提供了多样化的选择。软件类产品，包括先进的PQC算法，将能够在各种软件系统中实现更高层次的安全性，尤其是在浏览器等网络通信环境中发挥关键作用。硬件类产品，如模块化设备和嵌入芯片，将为下游行业的硬件系统提供更加可靠和强大的安全解决方案。

PQC市场增长与PQC标准化进程及量子计算机的实用化有较大关联。2023年，PQC产业规模仍处在初期成长阶段，约为1亿美元。根据NIST的PQC标准化工作预计完成的时间点（2024年），预计2024年后，行业将迎来小幅加速发展；预计到2030年，全球PQC产业规模将达到86亿美元；到2035年，全球PQC产业规模将达到225.1亿美元。

QRNG

由于对安全通信和数据保护的需求不断增加，QRNG应用场景也在不断增加。目前，QRNG在各个领域都有应用，包括汽车、手机、物联网以及其他市场。在汽车行业，QRNG芯片用于安全通信和加密，增强车辆网络安全。手机也受益于QRNG芯片，可确保安全交易并保护用户敏感数据。在物联网和边缘设备领域，QRNG为通过互连设备传输的关键信息提供安全保障。

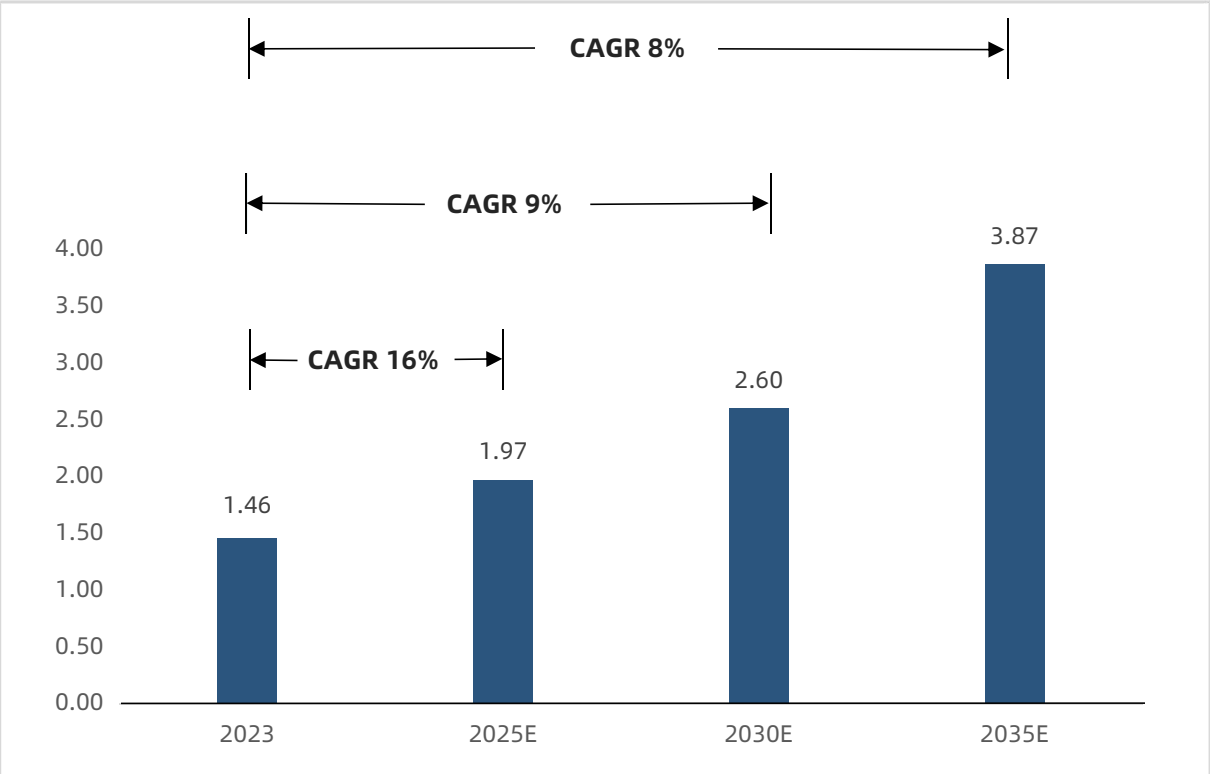
未来，QRNG将会在金融服务、医疗保健和国防等多个行业中不断整合，在这些领域中对安全通信、数据存储和数字交易的需求将为QRNG产业发展创造丰富的机会，推动QRNG市场规模增长。

2023年，全球QRNG产业规模约为8000万美元。随着QRNG芯片技术趋于成熟，以及各方对其认知度的提高和下游应用普及，预计到2030年，QRNG产业规模将达到34亿美元；到2035年，QRNG产业规模将达到192.2亿美元。

03 全球量子精密测量产业规模

2023-2035年，全球量子精密测量产业呈现出稳步增长趋势，产业规模从2023年的14.6亿美元增长到2035年的38.7亿美元，年复合增长率（CAGR）达到8%。

图表 全球量子精密测量产业规模（2023～2035E，单位：十亿美元）



iCV TA&K | 2024年2月版

量子精密测量作为高精度测量时间、重力、电场、磁场等的重要工具，在各个领域的应用需求正在不断增加。例如：

随着通信技术，尤其是5G等新兴技术的发展，对高精度同步和时间标准的需求也在逐渐增强。量子时钟在通信领域为数据传输和网络同步提供了关键支持。全球卫星导航系统等导航和定位系统对高精度时间测量的依赖性也在增加，量子时钟的稳定性和准确性使其成为这些系统中的关键组件。

量子重力仪和量子重力梯度仪具有更高的灵敏度和抗干扰能力，使其在复杂地质环境中更具优势。

量子磁力计的高精度和灵敏度使其成为新材料研发领域的重要工具。在新能源材料、磁性材料等领域，科学家们需要准确测量磁场特性，以促进新材料的创新和开发。而随着新材料需求的增加，量子磁力计将在这一领域获得更多关注。

未来，随着全球产业链的不断完善，量子传感器有望在更广泛的领域得到应用。随着市场认知的提高和成本的降低，量子传感器将在未来几年内持续发挥其不可替代的作用，为全球科技进步和产业升级做出积极贡献。

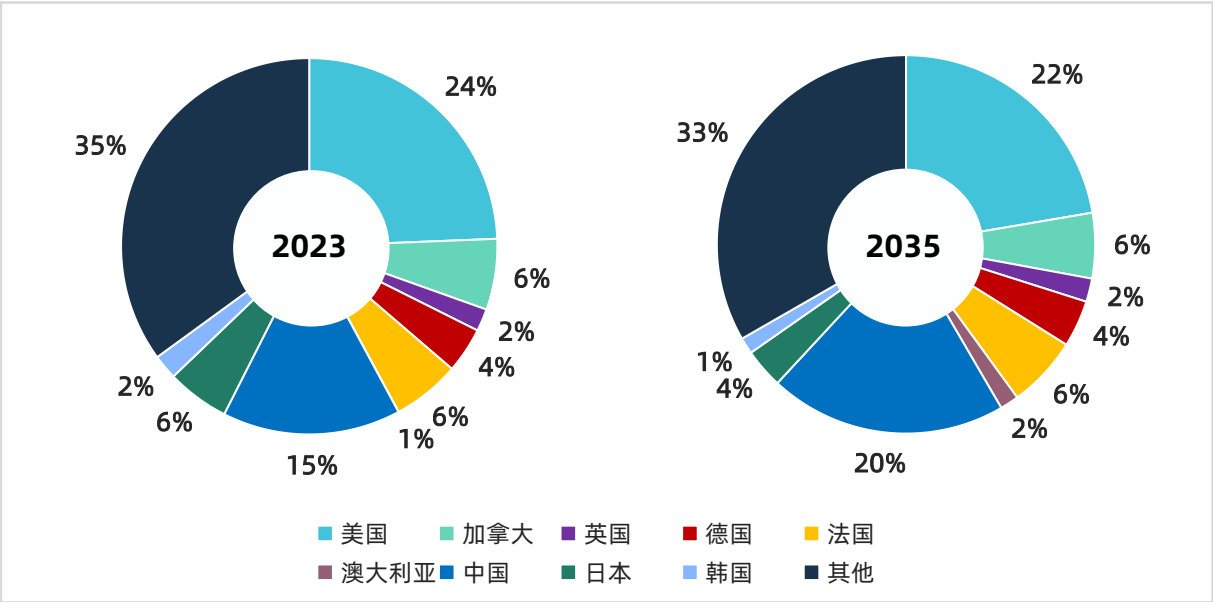
二、各地区产业规模

01 各地区量子计算产业规模

全球量子计算产业呈现出动态变化的趋势。2023年，全球量子计算产业规模达到47亿美元，占比分别为美国24%、加拿大6%、英国2%、德国4%、法国6%、澳大利亚1%、中国15%、日本6%、韩国2%、其他地区35%。受益于其深厚的研发基础、科研机构的活跃以及政策支持等因素，美国占比最大，反映了当前美国在量子计算领域的较为显著的影响力。

2035年，随着量子计算产业的不断成熟和发展，全球产业规模飙升至8117亿美元。在这一时期，中国的产业份额显著增加到20%，显示出中国在全球产业中的崛起。美、日、韩、其他地区略微下降，欧洲产业份额基本保持不变。

图表 全球量子计算各地区产业规模（2023 & 2035E）



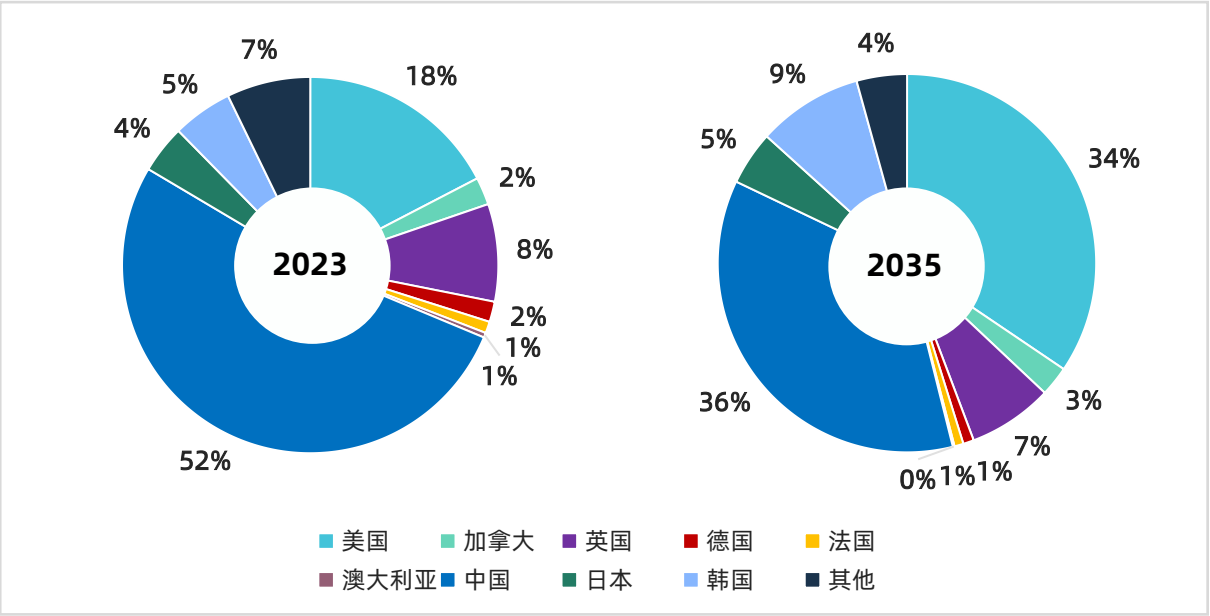
iCV TA&K | 2024年2月版

02 各地区量子通信产业规模

全球量子通信产业呈现出动态变化的趋势。2023年，全球量子通信与安全产业规模达到54.6亿美元，占比分别为美国18%、加拿大2%、英国8%、德国2%、法国1%、澳大利亚1%、中国52%、日本4%、韩国5%、其他地区7%。受益于其在量子通信（主要为QKD）深厚的研发基础、科研机构的活跃以及政策支持等因素，中国占比最大，反映了当前中国在量子通信与安全领域的较为显著的影响力。

2035年，随着量子通信产业（尤其是PQC）的不断成熟和发展，全球产业规模飙升至560.8亿美元。在这一时期，随着QKD产业份额下降、PQC产业份额大幅增加，中国的产业份额显著下降到36%。美欧日韩等国家地区因主要研究PQC而占据了更多产业份额。

图表 全球量子通信各地区产业规模（2023 & 2035E）



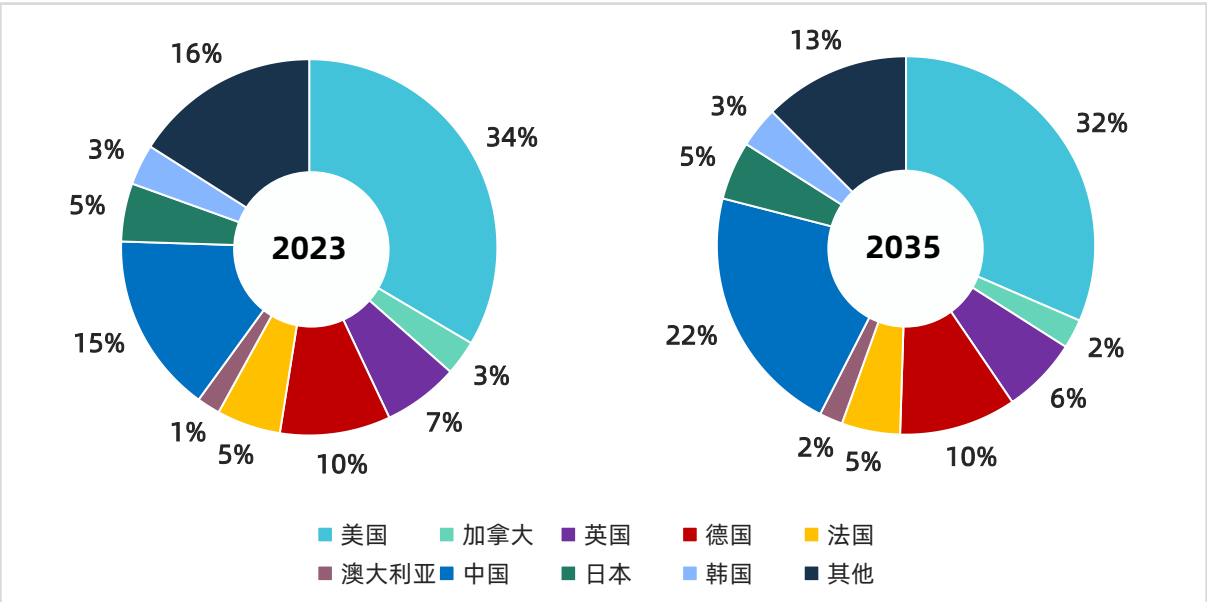
iCV TA&K | 2024年2月版

03 各地区量子精密测量产业规模

全球量子精密测量产业呈现出动态变化的趋势。2023年，全球量子精密测量产业规模达到14.6亿美元，占比分别为美国34%、加拿大3%、英国7%、德国10%、法国5%、澳大利亚1%、中国15%、日本5%、韩国3%、其他地区16%。受益于其在量子精密测量深厚的研发基础、科研机构的活跃以及政策支持等因素，美国占比最大，反映了当前美国国在量子精密测量领域的较为显著的影响力。

2035年，随着量子精密测量产业的不断成熟和发展，全球产业规模提升至38.7亿美元。但量子精密测量作为一个相对成熟的产业，变化不大。在这一时期，中国的产业份额显著增加到22%。原因有三，一是中国在基础科研、工业设施等方面具有较为深厚的积淀，二是中国奉行产业链独立自主的方针，不畏国外技术卡脖子，三是优势技术先行、多技术路线同步发展。因此，中国企业能够在量子精密测量这一相对成熟的领域以较短时间逐步缩小与欧美之间的差距，占据更多的产业份额。

图表 全球量子精密测量各地区产业规模（2023 & 2035E）



iCV TA&K | 2024年2月版

第五章

产业展望

目录 第五章 产业展望

一、量子生态位日趋明确

01 中美各有所长稳坐量子第一梯队

02 欧洲寻求量子产业链上游自主可控

03 亚太多国积极融入欧美量子生态圈

二、量子技术不断突破

01 机群技术与云平台联手推动量子计算

02 PQC与QKD的未来发展呈现并驾齐驱之势

03 量子精密测量六大方向各有明确突破目标

一、量子生态位日趋明确

01 中美各有所长稳坐量子第一梯队

中美两国在量子技术领域无疑处于全球领先地位，各有所长，形成了第一梯队。

美国率先实现量子优势

美国在量子技术领域的领先地位主要得益于其强大的科研基础、大量的政策推动、丰富的资金支持以及活跃的私营企业参与。根据2018年颁布的《国家量子倡议法案》，美国政府计划在未来十年内投资12.75亿美元用于量子研发。此外，IBM、谷歌、微软等科技巨头在量子计算技术和应用方面投入了大量资源和人力。例如，IBM升级云服务平台服务能力；形成了250+机构的生态网络社群。在投融资方面，美国量子技术的投融资活跃，风险投资和政府资助均表现出显著增长。2023年，美国的量子技术领域共获得约6.9亿美元的投资，涵盖了量子计算、通信和精密测量三大领域，其中量子计算占据了美国投融资总额的84%。美国的量子产业生态系统非常成熟，企业与研究机构之间的合作紧密。随着这些领域的持续研究，美国或将在这些前沿技术上取得更多突破，推动整个产业向前发展。

中国展现后发优势，力破技术封锁

2023年，中国政府颁布的《质量强国建设纲要》、《十四届全国人大一次会议作政府工作报告》、《国家自然科学基金“十四五”发展规划》等文件均提及量子信息产业。除了政府投入，还有来自私营部门和风投资本的支持，然而2023年融资规模相对往年较少，仅1.4亿多美元。中国的量子技术发展得益于国家实验室和量子院等科研单位的主导作用。这些单位在QKD、量子加速度计、陀螺仪等细分领域的应用上取得了显著进展。例如北京量子院研究团队利用光频梳技术开发的QKD开放式新架构，成功实现615公里光纤量子密钥分发通信实验。此外，中国因国外的各种封锁政策，正谋求在上中下游整个产业链做到独立自主。因此，中国的科研院所和企业除了持续推进中游整机的研发、不断攻坚关键部件之外，同时还在大力建设整个量子生态，尤其是量子计算的生态，包括算法、云平台、下游应用等。尽管如此，中国仍应尝试开展国际合作，促进量子技术交流与共享，推动产品出海。

中美各有所长，未来胜负难辨

虽然中美两国在量子技术领域均处于领先地位，但各自的优势和特点有所不同。美国在量子计算方面的技术积累和产业化进程较为领先，尤其是在量子计算机的研发和应用上，谷歌、IBM等企业已经取得了显著的成果。美国的科研机构和企业之间的合作也非常紧密，形成了一个成熟的产业生态系统。中国则在量子通信领域表现突出，与美国主要走的PQC路线不同的是，中国主要探索QKD，并已取得了显著成就。此外，中国在量子传感领域也有显著的进展，尤其是在国防应用上。

未来几年，中美两国在量子技术领域的竞争会更加激烈。美国将继续在量子计算领域保持领先地位，推动量子计算的商业化应用。由于目前量子计算与通信的各技术路线并未收敛，中国除在量子通信领域优势的QKD方面继续发力外，还将致力于推动量子计算多个技术路线的产业化和应用。两国将继续在量子三大领域展开激烈竞争，在竞争中寻求技术收敛，以此来不断推动全球量子技术的发展。

02 欧洲寻求量子产业链上游自主可控

当前，全球经济正面临多重挑战。尽管全球经济在2024年和2025年预计将以3.2%的速度增长，但这一增速仍处于几十年来的最低水平，全球通胀压力依然存在。然而，地缘政治紧张局势、贸易碎片化、长期高利率以及气候相关灾害等因素，给全球经济带来了巨大不确定性。在这种背景下，各国纷纷寻求通过技术创新和产业升级来提升自身竞争力，量子技术作为前沿科技，成为各国争相投入的重点领域。而欧洲则面临着独特的挑战。首先，欧洲各国经济增长乏力，增速低于全球平均水平。其次，欧洲在高科技领域的竞争力相对较弱，尤其是在与美国和中国的竞争中，欧洲在技术创新和产业化方面存在明显差距。此外，欧洲还面临着人才短缺、资金不足以及政策协调不力等问题，这些因素都制约了欧洲在高科技领域的发展。

欧洲力求量子产业上游自主可控

在这样的背景下，欧洲各国意识到，必须在量子产业上游实现自主可控，以确保在全球科技竞争中不落后。欧洲选择主攻量子计算的上游产业链，主要是基于其在技术、产业和政策方面的优势。欧洲在量子计算的基础研究方面具有深厚的积累，拥有众多世界领先的研究机构和大学，如德国的于利希研究中心和奥地利的维也纳大学量子光学与量子信息研究所。此外，欧洲还拥有一批在量子技术领域具有竞争力的企业，如IQM、HQS Quantum Simulations、ParityQC和ID Quantique，这些企业在量子计算硬件、软件和应用方面都有显著的优势。政策方面，欧洲各国政府和欧盟层面都出台了多项政策，支持量子技术的发展。例如，欧盟的量子旗舰计划和QuantERA计划，通过大规模的资金投入和国际合作，推动量子技术的研究和应用。具体举措包括法国、德国、荷兰等国纷纷制定国家量子技术战略，投入大量资金支持量子技术的研发和产业化。法国的Atos公司、德国的Fraunhofer研究所、芬兰的IQM公司、荷兰的QuTech研究所等在量子计算和量子通信领域表现突出。

欧洲逐步加大资金投入

2023年，欧盟的量子技术投资总额为8亿欧元，其中政府资助占5亿欧元，企业投资占3亿欧元。量子计算、量子通信和量子传感三大领域均有显著的投资，预计到2025年，欧盟量子技术产业规模将达到约15亿欧元。在资助旗舰项目和QuantERA（支持31个欧洲国家的量子研究）方面，欧盟自2016年以来为欧洲量子研究提供了超过1.75亿欧元的资金。科研方面，所有参与量子技术旗舰计划的1654名科学家和236个组织通过合作，发表了1313篇科学论文（包括223篇在审论文）。量子技术的商业应用方面，成立了25家初创公司，申请了105项专利，其中64项已经获得授权。

总的来说，欧洲各国在量子产业上游寻求自主可控，是应对全球经济挑战、提升国际竞争力和确保战略安全的必然选择。减少对外依赖，提升战略安全，推动技术创新，提升国际竞争力，促进产业升级，推动经济增长，是欧洲在量子技术领域的目标。通过加强政策协调、推动技术创新和促进产业升级，欧洲有望在量子技术领域取得更多突破，推动整个产业向前发展。

03 亚太多国积极融入欧美量子生态圈

亚太地区（除中国）因量子产业起步相对较晚、政策支持相对较少，导致投融资规模较小，且当下主要集中于日本、韩国、新加坡、澳大利亚、以色列等相对发达的国家。亚太地区其他国家在量子产业投入较少，随着量子产业的发展与成熟，未来将吸引更多亚太地区的国家发展、投资量子信息产业。

效仿中美欧进行政策制定与资金投入

目前，亚太地区其他国家正在不断制定与量子相关的政策，推动量子产业的发展。比如，澳大利亚发布了《国家量子战略》、《培养澳大利亚世界级的量子技术毕业生》，日本颁布了《量子未来产业创新战略》、《确保云程序的稳定供应》、《日韩量子技术研发合作框架》等政策，韩国也出台了《韩国量子科技战略》、《通过培养10万人工智能和软件核心人才，为量子转型时代做准备》、《量子信息科学与技术合作联合声明》等文件。这些政策势必培养出更多的量子劳动力，推动本国量子产业发展，保障算力供应与信息安全。

与此同时，亚太地区其他国家也在不断加大量子信息产业的融资，例如，在2023年，澳大利亚融资规模达到了1.4亿美元，新加坡也达到了0.2亿美元。但是，与欧美、中国相比，存在显著差距。随着亚太各国的政策推动，亚太地区其他国家的高校、科研院所和量子企业将获得更多的政府资助、风险投资，促进量子产业的发展。

融入欧美量子生态圈，形成量子产业护城河

为使本国量子产业快速发展、缩小与欧美国家的差距、融入欧美量子生态圈，日本、韩国、新加坡、澳大利亚、以色列等国家纷纷选择与欧美国家建立合作关系，包括上游部件的供应、中游整机的研发以及下游应用的开展。目前，全球量子生态圈已经初步成型。例如，澳大利亚Q-CTRL公司与美国IBM公司合作，将其错误抑制技术（Q-CTRL Embedded）集成到IBM云量子服务中。再比如，日本的量子革命战略产业联盟（Q-STAR）与美国的量子经济发展联盟（QED-C）、欧洲的量子产业联盟（QuIC）和加拿大量子产业联盟（QIC）共同签署了一份谅解备忘录，四大量子产业联盟正式成立国际量子产业协会理事会，旨在加强参与财团之间在量子技术发展目标和应用方法方面的沟通和协作。

上述亚太地区国家体量相对欧美、中国较小，难以建立完整且独立的量子生态，所以它们往往选择参与全球产业链分工，成为其中的重要环节。而未来几年，美国将继续在量子领域保持优势，推动量子计算机、量子通信与安全产品、量子传感器的商业化应用。因此，这些亚太国家必将继续紧跟欧美的脚步，开展研发及商业活动，并与欧美建立更加密切的合作伙伴关系，旨在通过与欧美量子产业链深度绑定，成为欧美量子生态不可或缺的一环，进而形成其量子产业护城河，保障其量子产业稳定与安全。

二、量子技术不断突破

01 机群技术与云平台联手推动量子计算

机群技术或将突破量子计算机性能瓶颈

随着量子计算机的发展，单个量子芯片上的量子比特数量和质量成为了性能瓶颈。为了克服这一限制，引入了机群技术，即将多个量子处理器通过网络连接在一起，形成一个更大的量子系统，这不仅提高了量子计算机的性能，而且为量子计算与超算的融合创造了新的可能性。将量子计算机与超算集成，可以充分利用超级计算机在大规模数据处理和经典计算方面的优势，以及量子计算机在特定问题上的指数级优势。例如，IBM推出的Quantum System 2是第一台模块化量子计算机，内含3块拥有133个量子比特的Heron芯片，结合了可扩展的低温基础设施、第三代控制电子设备和经典计算机。这种模块化设计不仅提高了量子计算机的性能，而且使得系统更具灵活性。根据计算需求，可以方便地增加或减少模块数量，从而实现对计算资源的灵活配置。

此外，线下机群形式的量子计算机还带来了其他一系列优势。首先，它有效地解决了单个处理器上量子比特数量受限的问题，通过集成多个处理器，整体的量子比特数量得到了显著提升。其次，模块化设计提高了量子计算机的可维护性和可升级性，降低了总体成本。随着技术的不断发展和完善，线下机群形式的量子计算机有望成为未来的主流趋势。这将推动量子计算领域的进一步发展，为解决复杂和重要的问题提供更为强大的计算能力。这种趋势还将激发更多的创新应用和解决方案，推动量子计算技术在各个领域的广泛应用。

云平台助力量子计算扩大影响普及应用

多个企业和科研机构推出了自己的量子云计算平台，提供了方便快捷的量子计算服务，降低了量子计算的门槛和成本，扩大了量子计算的应用范围和影响力。云平台技术可使用户通过互联网提供量子计算的服务，使用户无需购买量子硬件就可以通过远程访问和控制量子计算机，进行量子算法的设计、量子线路的编译、量子程序的运行等操作。云平台有效解决了量子计算中的高成本、高门槛、低普及等问题，为量子计算的发展和应用提供了便利。预计在未来，随着互联网技术的发展和用户需求的增长，云平台技术将会有更多的创新和优化，提供更多的功能和服务，满足更多的场景和问题。

此外，将量子计算机集成到超级计算机机群中，目前也需要依托云平台实现远程链接。这一集成方式既可降低量子计算机的部署成本和维护难度，又可扩大用户访问范围，形成一种灵活高效的计算资源共享架构。例如，欧洲多个超级计算中心已经在通过云服务将量子计算机与超级计算机相连接，为用户提供全面的量子计算能力。同样的，以机群形式呈现的量子计算机能够实现强大且稳定的计算能力，可实现更为紧密和高效的量子-经典协同计算。

中国发布的量子计算机和超级计算机协同运算方案，充分彰显了这种集成方式的优势。通过将量子计算机作为超级计算机的加速器，成功缩小了经典计算机在特定问题上的计算范围，极大提升了整个系统的处理速度。这一趋势有望在未来推动量子计算领域更为深入和广泛的发展，为解决更为复杂和重要的问题提供更为先进的计算工具。

02 PQC与QKD的未来发展呈现并驾齐驱之势

QKD布局范围不断扩大

全球范围内已有超过30个国家正在部署或已经实施QKD基础设施建设，包括中国、欧盟成员国、加拿大、英国、韩国、新加坡等。在这些国家的推动下，QKD在地面和空间的基建工作和应用场景均有不同程度拓展。

在地面和空间网络布局方面， 2023年1月起，欧盟EuroQCI项目已有大多数个国家进入动工阶段，政策、资金方面的不断支持正积极推动量子通信基础设施的建设。欧盟全部成员国（共26个国家）在QKD基础设施建设方面还展开了跨国合作，通过合作，整合各国的资源，加速QKD网络的布局建设，促进标准的制定和互操作性的提高。此外，中国在QKD基础设施建设方面也在不断扩大骨干网络覆盖范围，2023年已完成长三角区域量子保密通信骨干网的建设工作。

在应用领域布局方面，金融、政务、国防、通信、电网等不同行业的应用布局，推动了QKD的行业应用，促使QKD基础设施网络在更广泛的范围内有更多的业务尝试。例如，汇丰银行测试QKD技术应用到外汇交易系统的安全性，并成功完成了一笔3000万欧元兑换成美元的交易。在QKD卫星建设方面，新加坡SpeQtral公司将与NanoAvionics和Mbryonics合作建设QKD卫星，探索未来的应用方案。

PQC发展即将迎来成长期

随着美国NIST在PQC领域的标准化工作推进，以及美国、加拿大及韩国多项有关PQC文件的发布，PQC技术即将走出起步期，迎来成长期。标准化工作的推进及各类政策文件的发布将为PQC技术发展扫清政策门槛，使得对PQC的认知可以得到更大范围的扩散，对这一新技术的发展起到促进作用。

首先，以美国NIST主导的PQC标准化工作历时八年即将完成第一阶段PQC标准草案的制定，意味着PQC技术也将迎来商业化与潜在应用探索阶段。虽然已获NIST提名的PQC算法仍存在安全性漏洞，但对网络信息的安全需求和对量子计算破译能力的担忧是PQC技术不断升级的动力源。随着PQC算法的迭代与升级，PQC技术将逐步优化，有望应对不同领域、不同规模的实际应用场景。

其次，未来将有更多公司在PQC技术领域试水或崭露头角，争相研发和提供PQC解决方案，以应对量子计算带来的“先存储，后解密”的挑战。PQC公司的涌现将深入推动PQC领域的业务发展，PQC领域产业链也将趋于完善。

最后，PQC领域的投融资规模有望提升。在全球经济下行的大背景下，以往较受关注的QKD、QRNG等细分领域较前两年有所下降，但PQC领域的投资却呈现逐年上升的趋势。随着PQC技术研究与应用的不断探索，已经逐渐在实际应用中嵌入，展现其商业潜力，未来或将有更多的资金流入这一领域，迎来更大的投融资规模推动PQC领域发展。

PQC迁移计划与商业化逐步开启

PQC商业化的推进使得更多企业和组织寻求将现有加密算法迁移到PQC体系。而PQC的迁移也会带动商业化发展，更加关注PQC技术的商业实际性、成本效益等。美国陆军与QuSecure公司、美国国防信息系统局与SandboxAQ公司均于2023年6月签署合同，要求科技公司提供PQC加密技术与解决方案。政府单位在PQC应用方面的参与起到示范带头作用，推动了PQC研究的商业化应用以及迁移计划。

在PQC迁移方面，美国NIST在2023年12月发布《迁移到后量子密码学 量子准备：密码学发现》以及《迁移到后量子密码学 量子准备：测试标准草案》，概述了迁移到PQC时可能出现的问题以及可能的解决方案。前者描述了PQC功能测试计划以及用例场景，后者则强调了PQC与现有网络的的协调问题，并提供解决方案。此前，美国国家网络安全中心还发布了《向后量子密码学迁移》，针对PQC迁移的背景、目标、挑战、好处和工作流程进行了说明。一系列文件的发布，使PQC迁移进入了更为系统和标准的阶段，也展示出PQC时代来临的确定性。

在商业化方面，多家企业发布和迭代PQC软硬件及解决方案，如WISeKey、QuSecure、Quantum Xchange等，支撑着这种新的方式来保证通信安全与数据安全。随着PQC的商业化与迁移计划的推进，越来越多的企业能够利用PQC技术建立安全防线，保护企业及个人重要信息免受当前算法被破解所带来的威胁。

PQC与QKD的未来发展呈现并驾齐驱之势

QKD和PQC是当前量子通信与安全领域的两大关键且实用的技术分支，早些年QKD的发展进程和社会认知度明显高于PQC，近两年，PQC的关注度迅速上升。当前QKD与PQC从投融资情况、相关政策、研究热度和商业期待度等方面发展来看，两者发展劲头基本相当。

从投资金额方面看，2023年QKD和PQC都吸引了大量的资金投入。发展较早的QKD技术由于其基础牢固，一直备受青睐，得到了一定资金支持。而随着对PQC认识的不断深入，PQC也逐渐成为投资者关注的焦点。2023年的融资数据显示，QKD和PQC在融资金额上存在一定的竞争，PQC融资金额约为2700万美元，而QKD约为1260万美元。

从政策层面看，多个国家在2023年发布了支持量子技术发展的政策，虽然不同国家对QKD与PQC的侧重点有所不同，但大部分国家对两类技术都秉持支持其发展的态度，这两方面均获得了政策利好带来的技术研发和商业化的助力。

最后，不同国家层面对QKD与PQC的发展侧重点不同。例如，美国更加关注PQC技术的发展与迁移，而中国和欧盟则将更多资源放到QKD技术，实施基础设施建设。未来这两大技术谁将占据主到地位，或者是相互支持、融合，当前还是未知的。在技术和市场格局定型的这些年，QKD和PQC将在全球范围内存在一定的竞争关系，各自发挥特长，促进技术的不断进步，迎接量子时代的全面来临。

03 量子精密测量六大方向各有明确突破目标

光钟或将取代原子钟进行量子时频测量

原子钟技术已在实验室和商业应用中积累了丰富的使用场景，未来的发展趋势一方面是进一步提高频率稳定性和延长保持时间，以满足不同领域对更高精度和更长时间同步的需求。另一方面，在面对全球导航卫星系统（GNSS）漏洞和网络攻击的时候，原子钟技术的自主可靠性和安全性将成为关键的发展方向。

铷、铯钟是目前最常用的原子钟技术，它们利用原子的微波跃迁频率来计量时间。但是，微波跃迁频率受到外界环境的干扰，导致原子钟的精度和稳定性有限。光钟是利用频率在光学波段的原子跃迁，它比微波跃迁频率高4到5个数量级，因此可以达到比微波钟更高的精度和稳定性。

量子磁力计持续多技术路线发展

目前，原子（SERF等）、固态自旋（金刚石NV色心等）、超导（SQUID等）体系在不同领域均展示出了自己独特的优势，适用于不同的应用场景。例如超导量子传感器，其在测量极弱磁场方面表现出色，被广泛应用于地质勘探、医学诊断等领域。金刚石NV色心磁力计的特点是无需低温冷却即可保证高灵敏度以及良好的生物相容性，其生物信号成像在理论上接近光学衍射极限，具有极优的空间分辨率且具有工作温度范围广、分辨率高等优点， 因此被广泛应用在心磁图、脑磁图以及对生物大分子的科学研究中。金刚石NV色心传感器近些年发展较快，正在更多领域中得到应用。

当下，基于单 NV 色心的磁测量技术在灵敏度指标上已经实现了纳米尺度分辨率，以及可测得单核自旋的灵敏度。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。量子磁力计将继续保持多元化的发展趋势，为不同行业与场景提供定制化解决方案。

重力仪趋于小型化、低成本、更用户友好

随着技术的不断进步，未来量子重力仪有望实现更小型化，使得其更加适用于不同领域和应用场景，从而拓宽其应用范围。并且通过小型化，量子重力仪可以更灵活地集成到各类设备中，实现更广泛的动态测量需求，例如在工业自动化、建筑监测等移动场景中的应用。法国iXblue在CARIOQA-PMP项目中利用原子冷却激光系统开发用于空间应用的量子传感器，可用于监测地球质量分布变化等气候变化相关的重要信息，为科学家和决策者提供了更准确的数据支持。

降低成本也是未来重力仪发展的重要方向。澳大利亚Q-CTRL公司展示最新的量子重力仪原型机。公司建立一种通过重力和磁力观察地球的全新方式，利用小型低成本卫星开发持久的近地观测能力。这将进一步推动重力仪在市场上的普及和应用，为更多行业提供高质量的动态测量解决方案。

此外，通过简化仪器的操作界面、提供用户友好的软件接口等方式，量子重力仪将更容易被推广，进一步推动量子重力仪在更多实际场景下的应用拓展。

冷原子干涉技术或成下一代惯性导航的核心

针对冷原子干涉加速度计，未来的发展方向之一是解决"死时间"问题，即在快速加速或急剧变化的情况下，仪器可能出现无法响应的情况。提高设备可用性将成为重要目标，确保在各种实际应用场景中保持高效、准确的感知和输出。

冷原子干涉陀螺仪将更加注重实现对三轴加速度的测量。这不仅可以提高导航系统对运动状态的感知，还有助于更全面地理解加速度场的变化，提升整体系统性能。

未来的发展方向还包括提高整体系统性能，通过优化仪器的各个组成部分，整合先进的控制算法，提高抗干扰能力和稳定性，从而满足不同应用场景下对高精度和高稳定性的需求。

量子雷达将以经典－量子双通道形式出现

在保持当前经典雷达的应用场景和技术能力条件下，利用量子通道的高精度和高灵敏度特性，提高雷达性能。双通道系统形态使得量子雷达能够更好地适应各种复杂环境和极端天气条件。通过经典雷达提供的稳健性和量子雷达的高灵敏度，系统在恶劣条件下依然能够保持高效稳定的性能。双通道系统形态的采用将允许雷达系统在综合考虑雷达动态范围、灵敏度和带宽等综合因素的基础上，实现更为全面的性能提升。这将有助于解决量子雷达技术在探测多样性目标时面临的挑战。

电场强计两条技术路线有待各破各局

在量子电场测量领域，目前里德堡原子已经展现了其可重复、精确和稳定的优势。里德堡原子场强计的高灵敏度和分辨率将有助于科学家们深入研究电场对物质的微观影响，推动科学研究在电场调控下的新突破。这将在材料科学、量子信息等领域带来更为深入的认识。未来的研究将更加侧重于这些领域，在高频电场测量中取得更为精确的结果，为科研和应用提供更全面的信息，推动其在实验室环境中成为研究微小尺度物理现象的不可或缺的工具。

随着量子电场测量技术的不断进步，制定相关标准将变得至关重要。里德堡原子电场强计的发展将强调标准制定的必要性，以确保不同实验室和研究团队之间的测量结果具有可比性和可信度。国际标准化组织（ISO）等机构可能需要参与制定这些标准，促进该技术在各领域的广泛应用。

金刚石NV色心作为电场测量中的关键技术，展现了在10纳米级电场成像和电荷态精确调控方面的优越性。未来的研究将致力于提高金刚石NV色心场强计的测量稳定性和分辨率。通过优化实验条件和技术参数，可望实现更为准确的电场测量，特别是在微小电场强度下的高灵敏度检测，使其在未来电场测量中更为广泛地应用于实际场景，如通信、医学、环境监测等领域。

未来的发展将着重于提高其对复杂环境的适应性，确保在实际应用中能够提供可靠的测量解决方案。这包括对不同物质的适应性以及在复杂电场背景下的性能稳定性。此外，金刚石NV色心的生物友好性将成为该技术在医学影像等应用中的竞争优势。未来应更加注重金刚石NV色心电场强计的生物友好性，使其能够广泛应用于医学等领域。



光子盒创立于2020年2月，作为中国量子科技产业服务平台，光子盒通过推送前沿量子科技新闻、科普量子知识、举办量子活动、链接产业化资源、开展量子产业研究等形式，致力成为中国量子科技产业最值得信赖的服务机构。

光子盒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。

未来，光子盒将继续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。



联系我们

光子盒
QUANTUMCHINA