

# 科技发展研究

第 10 期

(总第 683 期)

上海科技发展研究中心

2024 年 05 月 16 日

**编者按：**量子技术具有广阔的发展前景和塑造新的全球产业价值链的潜力。全球越来越多的企业正致力于开发利用量子力学的解决方案。今年 1 月，欧洲量子产业联盟<sup>1</sup>（QuIC）发布了战略产业路线图（SIR）报告，阐述了 175 多个成员对未来十年欧洲量子产业的集体愿景。本期专报对报告主要内容进行总结提炼，并对报告全文进行了编译（见附本）。供参考。

## 《欧洲量子产业联盟战略产业路线图》报告

报告指出，量子技术将通过重塑信息处理和通信方式，甚至重塑我们与地球和深空环境互动的方式，对全球经济社会产生广泛影响。北美是全球量子技术市场的领导者，拥有全球近 40% 的参与者和超过 60% 的初创企业融资。12 家最大的硬件厂商中有 10 家位于北美。而中国在量子通信方面具有最广泛的商业应用。报告呈现了未来 10 年欧洲量子产业的集体愿景，以最大限度促进泛欧（欧盟国家以及以色列、挪威、瑞士、土耳其和英国等地）量子产业的商业成功。主要内容包括 5 大技术领域的技术路线，具体如下：

<sup>1</sup> 欧洲量子产业联盟（European Quantum Industry Consortium, QuIC）成立于 2021 年 4 月 14 日，负责倡导、促进和推动欧洲量子产业面向所有量子技术利益相关方实现共同利益。

## **一、量子计算：预计量子硬件、中间件和软件的持续进步将导致通用量子优势机器在 2030-2035 年左右问世**

战略产业路线图中强调了量子计算发展过程中软硬件相互协同发展的重要性，以及量子算法和应用所发挥的关键作用，并指出了提高量子比特、降低错误率、实现量子优越性、开发实用算法等仍是量子计算领域所面临的重要挑战。量子计算主要采用 6 条技术路线：**超导、半导体量子点、离子阱、中性原子、光量子**和**金刚石氮空位中心（NV 中心）**，并为各路线制定了技术路线图（见附表 1）。

## **二、量子模拟：主要用于建模物理问题，中性原子量子模拟硬件将在 2035 年拥有 1000 个量子比特的量子处理器以模拟模式工作**

量子模拟是指代模拟特定量子系统的设备，通过参数调解进行编程和控制，可以作为加速器与经典计算机结合使用，运行量子-经典混合算法，其中计算的特定部分在量子计算机上运行，其他部分在经典计算机上运行，通过结合了经典计算机和量子计算机的优点，降低对量子硬件的技术要求，从而更早地感受量子优越性。在**超导路线**上，D-Wave 退火量子计算机以 5000 个量子比特和 35000 个耦合器得到业界认可；西班牙 Qilimanjaro 的全栈模拟量子计算机架构基于高质量的超导量子比特，可提供更高的相干性。在**中性原子路线**上，因量子比特数量具有良好扩展性，预计发展前景广阔。在**半导体量子点、离子阱、光量子、NV 中心路线**上，由于缺乏企业支撑，产业化进展缓慢（见附表 2）。

## **三、量子传感：基于固态物理和原子气体的量子传感器将在 2030-2035 年实现大规模市场普及**

量子传感是利用自然界的量子特性、量子现象、量子态的普适性和内在可重复性、相关物理量的量子化。与传统传感器相比，量子传感器具有更高的灵敏度，但由于**测量退相干性**也限制了测量相互作用时间。量子传感可被应用于众多领域，尤其在仪器领域有着大量应用，如 Qnami 和 QZabre 的 NV 扫描显微镜已经达到技术就绪度（Technology Readiness Level, TRL）9 并已大规模商业化。

量子传感系统主要分为 3 类：固态、气态和光量子态，都有特定的性质，对不同的物理量很敏感，这使它们适合于特定的应用，例如重力学的冷原子、用于高分辨率磁强计的金刚石或碳化硅缺陷等。在固态传感系统中，基于金刚石氮空位中心的大多数平台已达到 TRL3，超导量子干涉波滤波器处于 TRL 5，空间烧孔效应技术处于 TRL 5。在气态传感系统中，蒸汽传感器处于 TRL 3，原子钟处于 TRL 4-5。光量子态传感系统，主要用于引力波探测器等大型仪器设备，目前市场上产品数量较少，包括基于冷原子的地基量子重力计和基于 NV 钻石扫描探头的纳米分辨率显微镜（见附表 3）。

#### **四、使能技术：低温技术、光子技术和电子控制技术是量子产业重要支柱，预计量子供应链中的组件和系统的需求将迅速增长**

使能技术是指开发量子基础应用程序的物理组件。低温技术中，欧洲拥有较为完整的供应链与龙头企业，包括低温制冷机的开发和集成公司 Absolut System（法国）、4K 以下两级循环制冷公司 TransMIT（英国）、10K 以下 GM 制冷机公司 Oxford Cryosystems（英国）等，在制造与销售低温设备方面有巨大市场潜力，但仍存在关键零部件与原材料的供应问题。光子技术中，共焦激光扫描显微镜用于研究光学活性量子比特正在开发中，预计在 6 年内达到 TRL

9; 基于光学传感器扫描阵列的微腔扫描平台和显微镜目前正在开发中,通过光学微腔内的增强光-物质相互作用,预计在3年内达到TRL 7,但由于缺少用于构建单通道频率转换器的非线性晶体等关键零部件,使得欧洲在光子技术的发展中存在外部依赖并导致行业脆弱性。电子控制技术中, Thales (法国) 在低噪声射频电子设备方面成果显著, 拥有 Qblox (荷兰)、Zurich Instruments (瑞士) 等室温电子设备企业, 高技术成熟度企业的支持使高量子比特数的控制堆栈成为可能 (见附表4)。

## **五、量子通信：2035年将有可能将位于同一地区的量子计算机连接成具有合并计算能力远远超过单个设备总和的网络**

此外, 报告也对量子通信的路线图做了展示。随着量子技术的不断发展将对现有保密技术产生威胁, 安全通信的潜在风险愈加凸显。量子密钥分发 (QKD) 和后量子密码学 (PQC) 被视作应对挑战的主要策略, 地面段量子通信网络 (Terrestrial Segment)、空间段量子通信网络 (Space Segment)、量子随机数生成领域 (QRNG) 是量子科技网络安全的重要组成部分。

**编 译: 李航祺 (上海市科学学研究所)**

**编 辑: 刘 琰**

---

责任编辑: 汤天波      编 辑: 姚景怡      联系电话: 53300825      传真: 64315005  
地 址: 淮海中路1634号101室      邮政编码: 200031      电子邮件: [fzzx@stcsm.sh.gov.cn](mailto:fzzx@stcsm.sh.gov.cn)

附表 1：量子计算产业路线图与代表企业（QuIC 会员）

技术路线	超导	半导体量子点	离子阱	中性原子	光子	金刚石氮空位中心 (NV 中心)
近期 (2025-2027) 路线图	<ol style="list-style-type: none"> <li>使用 3D 架构提高量子比特的质量（保真度）和规模（数量）；</li> <li>开发更高效的低温装置；</li> <li>开发工业规模的制造设施；</li> <li>研究材料、制造技术和加工方法。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>没有可预见的障碍，但仍有工程难点需攻克；</li> <li>研究实现包括半导体量子点量子比特性能、1K 低温硅技术、3D 设计和封装、低功耗电子设计、纠错算法和适应架构的软件编译器等核心关键；</li> <li>优化晶体管等硬件设备制造工艺；</li> <li>引入及优化高介电常数材料、工程和设计设备；</li> <li>从平面 CMOS 到 FinFETs 再到纳米 FET 架构；</li> <li>改良硅基半导体设计、材料、工艺等过程模块；</li> <li>促进研究机构的学术合作，放松管控协议。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>在全新、高集成、可扩展的离子阱架构中支持百级个量子比特，并在电子和光学领域引入量子比特控制解决方案；</li> <li>实现首个大规模量子比特纠错；</li> <li>开发全自动校准和资源管理软件，目标是全天候运行，建立与高性能计算资源集成。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>数字量子处理器可用；</li> <li>高水平并行门；</li> <li>探索容错架构；</li> <li>开发 QRAM 设计。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>在完全可重构的集成电路平台上组装 50 个数字量子位的光学量子计算平台。提供 200 个模式下，用于专用算法的可重构光学电路；</li> <li>将确定性单光子源性能从当前 50% 提高到 &gt;70%；</li> <li>将单光子纯度从 95% 提高到 98%；</li> <li>将三光子簇态的保真度提高到 &gt;95%；</li> <li>进一步发展光子路由器（主动时空分集器）；</li> <li>以 ~1dB 的光损耗，在芯片模式下开发并交付高达 200 个可重构电路；</li> <li>开发互相兼容波长的集成电路和光源，包括 telecommunications(C-band) 和适用于固态光源的 935nm；</li> <li>开发和集成快速、低损耗的开关。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>耦合多个 NV 中心，增加量子比特数量至几百个；</li> <li>提高读取效率和门保真度；</li> <li>减小系统尺寸；</li> <li>实施适当的 QEC 编码。</li> </ol>
中期 (2028-2029) 路线图					<ol style="list-style-type: none"> <li>将光子量子计算平台量子比特数量增加到 1000 个；</li> <li>进一步提高确定性单光子源性能，达到 &gt;80% 的效率和接近 100% 单光子纯度；</li> <li>从 1 个设备生成的集群态增加到 10 个光子，保真度 &gt;95%；</li> <li>改进半导体技术，以便制造出几十个相同发射器；</li> <li>拥有多个相同的单光子发射器和路由器，可以在每个具有数百个模式的集成电路</li> </ol>	

					<p>中分发多达 1000 个单光子；</p> <p>6. 开发和部署具有 1000 个模式模块化的集成电路；</p> <p>7. 通过快速电子设备在模块之间实施前馈控制；</p> <p>8. 使用 1000 个物理光学模式在少量逻辑量子比特上部署错误校正，展示通用量子计算机原型；</p> <p>9. 在芯片上完全集成光源、电路和探测器。</p>	
<b>远期 (2030-2035) 路线图</b>		<p>1. 将工艺优化纳入硅晶圆工艺中，以适应半导体量子点比特；</p> <p>2. 尺寸更小的光刻节点将带来性能更高的量子比特，并减轻当前技术固有的布线密度挑战。</p>	<p>1. 实现可靠、工业可行和可扩展的互连（或分段）阱；</p> <p>2. QPU 支持量子比特数增加到 1000 个以上，并有望扩展至数十万个量子比特；</p> <p>3. 构建分布式量子计算机并优化硬件。</p>		<p>1. 通过光学链路和纠缠分发，将数十万个量子比特光量子处理器相互连接；</p> <p>2. 光量子平台将在基于测量的模型下运行，包括前馈协议和错误校正编码；</p> <p>3. 通过外部模块高效生成大型 (&gt;10,000) 纠缠光子簇，并直接从确定光源生成；</p> <p>4. 从检测到量子比特生成开发前馈控制；</p> <p>5. 部署具有极有利的逻辑到物理比特比的非局部纠错码；</p> <p>6. 通过可互连的模块展示通用量子计算任意扩展。</p>	<p>1. 将 NV 技术与 CMOS 控制集成；</p> <p>2. 将物理量子比特数量增加至几千到一百万范围；</p> <p>3. 将逻辑量子比特数量增加到几百个。</p>
<b>量子计算硬件企业</b>	IQM（芬兰）、Alice&Bob（法国）、Qilimanjaro（西班牙）、QUANTWARE（荷兰）	QUANTUM MOTION（英国）、TNO（荷兰）、QuTech（荷兰）、Equal1（爱尔兰）、SemiQon（芬兰）	AQT（奥地利）、eleQtron（德国）	PASQAL（法国）	QuiX Quantum（荷兰）、QUANDELA（法国）	SaxonQ（德国）

附表 2：量子模拟产业路线图与代表企业（QuIC 会员）

技术路线	超导	半导体量子点	离子阱	中性原子	光子	金刚石氮空位中心 (NV 中心)
量子模拟 2035 路线图	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 将量子比特相干时间提高 10 倍，达到数百微秒；</li> <li>2. 改进架构，实现更好的量子比特互连性，并最小化编码开销；</li> <li>3. 实现可调谐的非斯托奎斯耦合，模拟超越伊辛模型的问题；</li> <li>4. 寻找超越 QUBO 的编码方式；</li> <li>5. 开发退火通用量子计算机；</li> <li>6. 每年将量子比特数量翻倍；</li> <li>7. 设计和实施基准测试；</li> <li>8. 为特定专用应用开发量子芯片。</li> </ol>	利用半导体量子点地解决量子模拟问题。	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 优化退火协议集中在利用微波控制离子的复杂连接；</li> <li>2. 从几十个量子比特的小规模量子处理器过渡到更大、更强大的量子处理器；</li> <li>3. 基于离子阱量子计算机实施简化 VQE 模型，进行产业化应用的探索。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 量子比特相干时间和量子操作保真度得到大幅提高；</li> <li>2. 开发容错中性原子量子计算机。</li> </ol>	/	/
量子模拟企业	Qilimanjaro (西班牙)	/	eleQtron (德国)	PASQAL (法国)	/	/

附表 3：量子传感产业路线图

时间	量子传感
<p><b>近期 (2025-2027) 路线图</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 实现原子蒸汽电池在磁心电图等应用中的高 TRL；</li> <li>2. 实现基于 NV 中心在钻石/SiC、SHB、SQIF 或其他技术上检测磁场、射频场等的固态传感器的中 TRL。目标应用领域包括医疗行业、仪器仪表、生物学和射频检测。</li> <li>3. 在冷原子或原子蒸汽电池基础上，实现原子钟（包括高稳定性微波钟和光钟）的中等技术成熟度（TRL）；</li> <li>4. 在冷原子或 NV 中心等基础上实现定位传感器的中等 TRL；</li> <li>5. 在量子霍尔效应（QHE）和约瑟夫森结合标准的组合中，实现中等 TRL；</li> <li>6. 通过量子测量和/或纠缠，提高雷达信噪比的中等 TRL 目标；</li> <li>7. 针对射频感应的 Rydberg 原子，设定中等 TRL 目标。</li> </ol>
<p><b>中期 (2028-2029) 路线图</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 基于钻石/SiC 和原子蒸汽电池的大多数量子传感器，在半导体工业、生物学、医学诊断等领域实现高 TRL 和商业化；</li> <li>2. 基于 NV 中心、SHB 或 SQIF，实现射频传感器和频谱分析仪的高 TRL；</li> <li>3. 实现光学原子钟的高 TRL；</li> <li>4. 实现 QHE 和 Josephson 结构标准在计量学中的高 TRL；</li> <li>5. 实现基于 RF 感测的 Rydberg 原子的中等 TRL；</li> <li>6. 实现可移动的原子钟的中等 TRL；</li> <li>7. 实现基于冷原子系统的惯性测量单元和多种部署模式（如陆地/海洋/空中）的量子惯性导航系统的中等 TRL；</li> <li>8. 实现空间重力测量先导技术的中等 TRL；</li> <li>9. 通过使用量子测量和/或纠缠实现雷达中信噪比的提高的中等 TRL；</li> <li>10. 总体上，实现量子传感器在仪器仪表领域的商业化。</li> </ol>
<p><b>远期 (2030-2035) 路线图</b></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 实现基于固态物理和原子气体的所有量子传感器的大规模市场普及。应用领域包括仪器仪表、生物学、RF 感测和处理、雷达应用、时间/频率测量和导航、重力测量、计量学等，其中量子技术可以提供比经典传感器更高的灵敏度和新功能。</li> <li>2. 将量子传感器整合到更大系统中，作为整体系统性能的关键要素，充分利用这些量子传感器的附加价值；</li> <li>3. 在太空等恶劣环境中使用量子传感器；</li> <li>4. 将量子传感器用于消费者应用。</li> </ol>



附表 4：使能技术产业路线图

时间	低温技术	光子技术	电子控制技术
近期 (2025-2029)路线图	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 扩大低温解决方案(冷冻罐和冷却器)规模和冷却功率;</li> <li>2. 接口多种冷却技术,提高冷却功率;</li> <li>3. 提高低温系统电效率;</li> <li>4. 开发紧凑且优化的低温系统;</li> <li>5. 为量子技术研发更快速和易于使用的测试解决方案。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 机架式激光器达到从紫外到红外范围频率;</li> <li>2. 分析和优化不同激光器类型中的稳定性和相位噪声等关键参数;</li> <li>3. 朝着连续波激光器、脉冲激光器、腔稳定、频率组合的更高技术成熟度迈进;</li> <li>4. 提高 SPD 的性能;</li> <li>5. 修复最终效率差距,实现 1550 纳米&gt;99%效率探测器;</li> <li>6. 针对不同波长进行优化;</li> <li>7. 增加探测器尺寸以用于空间量子密钥分发,当与望远镜耦合时,最小光斑尺寸约为 500 微米;</li> <li>8. 建立中型生产设施以改善芯片制造;</li> <li>9. 开发适用于大规模光子集成电路的低温兼容光子封装技术;</li> <li>10. 降低总体损耗;</li> <li>11. 实现大规模先进探测器(如 SNSPDs)的光子集成;</li> <li>12. 商业化标准波长的离子和原子相互作用的集成构建模块;</li> <li>13. 可扩展的芯片上单光子产生和压缩态光源;</li> <li>14. 开发低损耗的光调制器和开关。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 扩展量子系统到 1000+量子比特兼容的控制电子方面取得进展;</li> <li>2. 更高密度控制通道;</li> <li>3. 改善控制和读取量子状态的电子设备的噪声性能,提高量子比特的寿命;</li> <li>4. 与量子网络和高性能计算资源集成;</li> <li>5. 提高环境电子设备的技术成熟度,降低控制电子设备的复杂性和能耗:低温、与量子比特密切接近的集成低温电子设备。</li> </ol>
远期 (2030-2035)路线图	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 扩大固态量子芯片的集成低温架构和系统;</li> <li>2. 为云量子服务开发工业低温架构;</li> <li>3. 减少量子芯片布线所产生的热负荷,用于控制和读取。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 朝着按需光频率合成的方向发展;</li> <li>2. 高功率、低相位噪声激光器,在所有频率上具有高平均故障时间;</li> <li>3. 激光器、腔稳定激光器和光频梳微型化真实的光子数分辨探测器;</li> <li>4. 计数速率在数十 GHz;</li> <li>5. 超低时间抖动;</li> <li>6. 在高端晶圆厂集成制造工艺;</li> <li>7. 建立低温封装的光集成电路装配线。</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 开发数千个量子比特的电子设备:室温、低温;</li> <li>2. 开发专用量子控制的 ASIC 芯片;</li> <li>3. 扩大对反馈操作和实时量子纠错的支持。</li> </ol>