德国量子科技发展战略和趋势研究

桂潇璐
（上海科技馆，上海 200127）

摘 要：量子技术作为未来产业关键技术，已成为全球各国科技战略布局的关注焦点。德国在量子技术领域的发展总体处于世界前列，但仍落后于中国和美国。鉴于量子技术对德国未来发展的重要意义，德国联邦政府近年来出台了一系列有针对性的研发战略和行动计划，旨在实现量子领域的技术新突破，保持德国经济和技术竞争力，确保欧洲的技术主权。重点介绍德国政府在量子技术领域进行全面部署的具体举措，以期为中国相关领域的发展提供参考。

关键词：德国；量子技术；量子系统；战略计划
中图分类号：G323/327；O413 **文献标识码**：A DOI：10.3772/j.issn.1009-8623.2024.03.001

作为世界前沿科技，量子技术正日益受到各国重视。量子计算、量子通信和量子测量是各国在发展量子技术时普遍关注的三大领域。德国在三大主要量子技术领域的科研实力均位居世界前列。从论文发表数量看，2000 年以来，德国在量子计算、量子通信和量子测量领域的科技论文发表总量均跻身全球前 3 位，仅次于美国和中国，3 个研究领域的发文量占全球总量的比例分别为 10.7%、7.4% 和 13.8%[1]。德国科研机构如马普学会和亥姆霍兹联合会等均开展长期的物理基础研究以及量子效应和系统技术应用研究。在实现量子技术应用的必要技术领域，如微电子、纳米技术和超导技术等，德国的科研机构和企业也具有雄厚的实力。企业的研发帮助德国在量子计算机硬件、量子通信以及量子加密等方面取得了重要突破。

近年来，德国加大了在量子技术领域的战略部署，德国联邦政府自 2018 年启动“量子技术——从基础到市场”研究计划之后，2019 年开展了“量子增强网络 QuNET ”大型量子通信旗舰项目，2020 年制定《量子计算路线图》，2021 年出台《量子系统 2023 议程》，2022 年启动量子系统研究计划，并于 2023 年公布量子技术行动计划。此外，德国政府近年来在各地新设立了多个综合性量子科技研究机构，以统筹德国大学、研究院所不同学科主体跨学科的前沿研究力量，如综合量子科技中心（IQST）、汉诺威技术研究所（HITec）等。鉴于量子技术对德国未来发展的重要意义，德国联邦政府近年来对量子技术领域进行了全面的发展部署，可归纳为 4 项具体举措：一是在科技创新顶层设计上突出量子技术的重要地位；二是为量子技术发展制订有针对性的专项计划和战略；第三是将量子计算确定为短期的发展重点；四是为量子技术的发展提供充足的资金保障。

1 在科技创新顶层设计上突出量子技术的重要地位

德国联邦政府将量子技术视为关乎德国未来的技术基础之一。在 2018 年发布的《高技术战略 2025》中，提出要“使德国发展成为量子技术研究的领跑者”[2]，通过在技术上实现量子效应突破现

作者简介：桂潇璐（1984—），女，本科，出版中级，主要研究方向为科学与技术教育、德国科研体系创新。
收稿日期：2024-01-05

有技术限制，为数据处理、计算机模拟、测量和成像等领域带来新的突破。二是将量子技术确定为后疫情时代需要重点发展的未来技术之一。2020 年新冠疫情的暴发对德国造成了极大的消极影响，德国联邦政府于 2020 年 6 月紧急通过了经济刺激计划以抵御危机，其中重点之一就是要加强对未来技术的投入，而量子技术、氢能技术和人工智能是被特别列出的 3 项未来技术。在量子技术方面，德国的目标是在关键技术领域，包括量子计算、量子通信、量子传感器等方面保持经济和技术竞争力，促进德国量子技术研发和生产，在软硬件方面构建新的产业支柱。

2023 年 2 月，德国联邦内阁通过了由联邦教研部牵头制定的《研究和创新未来战略》，取代了之前的《高科技战略 2025》。在《研究和创新未来战略》中，德国联邦政府认为本国在量子技术特别是量子物理领域处于全球领先地位，其正在推进量子计算机、量子传感器和量子成像技术的发展，计划未来 10 年，使德国在量子计算和量子传感器技术方面成为世界领先者，并扩大德国在量子系统方面的竞争力 [3]。在量子通信等与未来安全相关性较强的领域，力争缩小与其他国家的技术差距，加大后量子密码学的研究，以确保未来量子计算机时代的高水平数据安全。此外，德国希望在量子技术领域进一步加大从基础研究到工业应用转变的投资，并与欧盟伙伴国共同扩大该领域的技术主权。

2 制订有针对性的量子技术专项发展计划和战略

面对世界主要国家争相在量子技术领域制订专项计划的趋势，德国政府也在顶层科技创新发展规划的指导下制订了量子技术专项计划，分别强调了战略性和研究性，并根据该领域的实际发展情况对计划进行了更新和完善。

2.1 《量子系统议程 2030》

鉴于量子技术与光学技术的相关性，2018 年德国联邦政府将这两种未来技术合并称为“量子系统”技术，并通过《德国光学研究》和《量子技术：从基础到市场》两个专项计划分别予以支持。由于这两个计划均在 2021 年末到期，德国联邦政府于 2020 年开始着手制定德国量子系统技术的下一步发展规划。2021 年 3 月，来自马克斯·普朗克量子光学研究所、慕尼黑大学以及德国企业等近 300 位专家组成的“德国量子系统议程委员会”向德国联邦教研部提交了德国《量子系统议程 2030》（Agenda Quantensysteme 2030），该议程涵盖德国在量子研究领域取得的主要成果以及如何加强和进一步发展德国及欧洲面向未来的重要量子技术和光子学领域的建议。《量子系统议程 2030》主要包括以下 5 个方面的内容：德国在量子研究方面的位置；量子计算机与仿真；量子通信；基于量子的测量技术；量子系统走向技术应用之路 [4]。《量子系统议程 2030》的编订工作耗时 10 个月，从战略上推动了德国量子技术的发展，明确量子研究的现状和目标，确定了德国在未来 10 年内量子系统领域的研究重点和挑战，并规定了商业、科学和政府共同行动的指导方针，该议程也是德国联邦教研部于 2022 年启动的“量子系统研究计划”（Fachprogramm Quantensystemen）的基础。德国联邦政府在执政期内提供总计 6.5 亿欧元用于量子技术的研究。

2.2 量子系统研究计划

2022 年 6 月，德国联邦教研部宣布了新的量子系统研究计划（Forschungsprogramm Quantensysteme），其目的是在未来 10 年将德国带入欧洲量子计算和量子传感器领域的发展前列，并提高德国在量子系统方面的竞争力。具体目标如表 1 所示 [5]。

通过制定上述三大技术领域的具体发展目标，德国政府确定了量子系统研究计划的中心任务：一是要确保本国量子系统的技术主权；二是充分利用技术变革给经济和社会带来的机遇；三是利用量子系统促进经济和社会的可持续性发展。从这些使命和任务出发，德国政府进一步明确了在未来几年内对量子系统发展最具战略意义的挑战领域 [5]。

（1）推进技术边界，加强量子系统的研发。为了充分利用量子系统给经济和社会带来的机遇，必须克服科学和技术障碍，既要掌握重要的基础技术，又要为实用量子系统实现经济价值创造新方法。

（2）加强量子系统向应用的转化。量子系统的发展能够为解决经济和社会挑战提供全新的技术，这些技术包括从互联网技术到用于未来生产或疾病检测和治疗的光子学，以及资源可持续利用和气候保护的解决方案。

表 1　德国量子系统研究计划为未来 10 年量子技术领域发展定锚

技术领域	目标
量子计算	到 2026 年开发具有国际竞争力的量子计算机，至少有 100 个可单独控制的量子比特，可扩展到 500 个量子比特
	到 2026 年实现德国初创企业数量翻两倍（达到至少 20 家）；德国的终端用户超过 60 家，包括企业、学术界和民间团体
	到 2032 年至少在德国的两个实际应用中展示量子优势
	到 2032 年在出版物方面保持世界领先地位，在专利方面追赶前 5 名
量子传感器技术	到 2026 年有 5 种新产品投放市场
	到 2032 年至少 60 家公司参与市场，其中包括 10 家新创公司
	到 2032 年在出版物方面保持世界领先地位，在专利方面追赶前 5 名
光子学	到 2026 年至少 30 家从事量子技术的光子学公司
	到 2032 年为德国光电子行业开发的一个新的、研究密集型的主导市场

（3）塑造生态系统，吸引创新人才。量子系统包含创新和价值链所有阶段的技术。德国量子系统的发展，需要建立在本国特殊优势的基础上，及时弥补创新链中的差距，加强在整个创新链上的国内和国际合作，并通过政策和措施的制定吸引各学科最优秀的科研人才以及技术工人进入量子系统。

2.3　量子技术行动计划

2023 年 4 月，量子技术行动计划公布，该计划成为德国联邦政府从 2023—2026 年在量子技术战略方面的行动框架。德国计划投入 30 亿欧元支持量子技术发展，其中 22 亿欧元由联邦各部委承担，其中大部分（13.7 亿欧元）由德国联邦教研部负责，另外 8 亿欧元由国家资助的大型研究机构承担 [6]。德国量子技术行动计划框定 3 个重点行动领域包括：一是将量子技术推向应用，例如，在原材料勘探、建筑地基勘察中运用量子传感技术；二是有针对性地促进技术发展，例如，开发用于传感器、卫星导航和通信的太空光子和光电关键部件，实现技术突破；三是创造强大的量子技术生态，例如，为中小型和初创企业的技术创新提供更多便利，吸引专业人才。

量子技术行动计划提出，到 2036 年，德国将通过发展具有技术自主性的量子技术及其产品和应用，使其跻身世界十大最具创新的经济体之列，并为德国乃至欧盟的经济社会发展奠定基础。为此德国联邦政府还成立了跨部门的协调机构——量子技术工作组，工作组人员构成包括德国联邦教研部、联邦经济与气候保护部、联邦财政部、联邦内政部、联邦国防部、联邦卫生部和联邦数字交通部。

通过新的量子技术行动计划，德国政府希望确保到 2026 年本国拥有强大的通用量子计算机，在该领域向美国和中国等“国际领先水平看齐”。德国政府认为，量子技术“对德国的技术主权至关重要”，该行动计划的目的就是确保德国获得这一关键技术并在技术主权方面处于世界领先地位 [7]。

3　将量子计算确定为短期的发展重点

德国联邦政府的量子战略虽然涵盖了当前量子技术的主流技术发展方向，但鉴于量子计算的基础性作用和在国际量子技术竞争中的关键地位，德国联邦政府将短期内的发展重点确定为量子计算。德国联邦教研部还专门在其发布的“技术主权促进文件”中将“欧洲制造”的量子计算机列为需要确保德国和欧洲拥有技术主权的关键领域之一 [1]。

德国联邦总理府在 2020 年委托 16 位来自学术界和产业界的专家学者组成了一个“量子计算”专家委员会。该委员会于 2021 年 1 月向德国联邦政府提交了《量子计算路线图》，全面分析了德国量子计算的发展现状和挑战。根据《量子计算路线图》，德国将建立多个量子计算能力中心，开发量

子计算机，通过“跨部门的顶层架构”协调工作并确保有效实施总体战略[8]。该路线图为德国设定了短期、中期和长期3个阶段的目标。短期目标：解决当前量子计算遇到的技术难点，掌握当前量子计算领域的关键技术，并在5年内建立起一个全面的生态系统和重点突出的发展结构，以开发、构建和运行具有量子应用的完整量子计算机系统。中期目标：在5～10年内通过研制的量子计算机展示“第二代量子技术”相对于传统计算机的计算优势，能够与欧洲伙伴国共同制造和运行具有国际竞争力和应用能力的量子计算机。长期目标，在10～15年内拥有可自我纠错的量子计算机系统，能够解决具有指数级量子优势的通用问题，与欧洲伙伴国一起实现战略自主。

2021年6月，包括宝马、大众和西门子在内的10家公司宣布联合成立量子技术和应用联盟（QUTAC）。该联盟致力于建立和推进量子计算生态系统，支持德国政府的战略目标和各项研究计划。量子技术和应用联盟的重点是工业应用，在其立场文件中设定了三大目标：一是揭示德国工业对量子计算的需求；二是为跨行业应用打好基础；三是联合实施应用并促进超越本联盟的合作。同年11月，德国联邦教研部启动Q-Exa联盟，旨在传统高性能计算（HPC）的帮助下加速欧洲量子计算技术发展。该项目汇集了来自学术界和工业界的专家，计划2024年之前在莱布尼茨超级计算中心部署1台20量子比特的量子计算机。2023年莱布尼茨超级计算中心（LRZ）已与芬兰量子计算公司（IQM）、欧洲领先的高性能计算和量子系统供应商（Atos）以及德国领先的量子计算应用创新公司（HQS）展开合作，集成IQM的量子计算系统到德国的HPC（高性能计算）超级计算机中，为未来的科学研究创造加速器。该项目资助金额为4 000万欧元，计划运行3年。

2022年3月，德国联邦教研部又宣布了3个投资合计近1.5亿欧元的资助项目。一是尤利希研究中心领导的Q-Solid项目，用以开发下一代超导量子处理器；二是弗劳恩霍夫应用固体物理研究所领导的自旋光量子计算机（Spinning）项目，用以研发基于金刚石自旋量子计算；三是量子初创公司Q.ANT领导的PhoQuant项目，主要方向为光量子计算。

2022年9月，德国联邦经济部宣布投入1 400万欧元用于基于光子系统开发的量子处理器原型。其承诺在整个量子计算方面将投资7.4亿欧元。同年11月，德国联邦经济部启动了对由软件公司QMWare、云专业公司IONOS以及斯图加特大学和弗劳恩霍夫开放通信系统研究所的联合项目SeQenC的资助。该项目为期3年，是德国联邦经济部“商业数字技术”支持项目的一部分，旨在为德国工业建构量子计算应用平台。在该项目运行的3年中，将邀请来自工业和更广泛的经济体作为选定的合作伙伴公司，测试在电信、物流、金融、汽车和能源等领域的应用。

2023年9月，德国联邦经济部宣布“欧洲百万兆级-HPC量子计算”项目（Euro-Q-Extra）启动，其为该项目提供1 350万欧元资助。Euro-Q-Extra是基于量子计算机工业发展的重要里程碑，通过该项目，可将最先进的量子计算机集成到位于德国加兴的莱布尼茨数据中心的高性能计算环境中，莱布尼茨数据中心将与其他5个选定地点密切合作，组成第一台欧洲工业级量子计算机。其目的是进一步发展欧洲现有的量子计算技能，并联通基础研究和工业应用。

4 为量子技术的发展提供充足的资金保障

除了对量子技术的发展路线和促进措施进行系统规划，德国联邦政府也为其提供了充足的资金保障。在2018年发布的第一份量子技术研发框架计划《量子技术：从基础到市场》中，德国联邦政府决定在任期内（2018—2021年）投入约6.5亿欧元用于量子技术研发，重点研究量子卫星、量子计算和高性能高安全数据网络的测量技术等领域。2021年5月，作为德国1 300亿欧元经济刺激一揽子计划的一部分，德国“20亿欧元量子计划”正式实施。计划到2025年，德国联邦教研部将投入11亿欧元支持德国第一台量子计算机和相关技术的开发。作为初步的具体资助措施，德国联邦教研部推出了“量子计算机——展示机型”和“量子计算应用网络”两项资助计划，将为相关领域具有发展前景的研发项目提供充足的资金支持。德国联邦经济部将投入8.78亿欧元支持实际应用 。德国航

空航天中心（DLR）将获得大部分资金（约 7.4 亿欧元），与工业企业、中型企业和初创企业建立紧密合作 [9]。根据 2023 年 4 月公布的最新量子技术行动计划，德国联邦政府和科学组织机构计划在 2023—2026 年继续为德国量子技术的发展提供约 30 亿欧元的资金支持，其中 22 亿欧元由德国联邦政府各部委负责，大型研究机构的预算约有 8 亿欧元。

5 结论与启示

对德国联邦政府量子技术发展战略和趋势研究可以发现，德国虽然在量子物理的基础研究领域处在世界领先地位，出版物数量排名也跻身世界前列，但其基础研究的成果转化为现实应用的较少。这导致德国丰富的量子技术研究资源并没有与产业界主体很好地统筹起来,研发活动与产业需求脱节。同时产业界对于量子技术这一还处在发展阶段的技术了解不足，对技术成果产业化还存在诸多风险方面的顾虑，这些因素导致德国在量子技术领域难以形成大量能够进入市场的成果。这一现状使得德国在量子技术竞争上落后于美国和中国，在关键技术的知识产权和标准制定方面也处在劣势。

德国政府目前已经意识到本国在发展量子技术的过程中存在的不利因素，并制订了有针对性的研发战略计划，特别是在多项计划中都提出重点关注量子技术对经济和社会产生的影响，加快向应用的转化。由德国物理技术研究院 、汉诺威大学、布伦瑞克理工大学组成的研发团队在德国下萨克森州的“量子谷”对德国量子技术有关的计划或项目进行协调，并进一步对国家战略规划提出修改建议 [4]。然而德国当前还没有个体或科学联盟有能力承担量子计算机系统的研发统筹和协调任务。

结合德国联邦政府对量子技术的发展规划以及目前存在的问题，可以为中国量子技术发展提供以下启示。

第一，出台国家和专业层面的量子技术发展规划。量子技术特别是量子计算、量子通信和量子测量三大技术领域在当今前沿技术中具有重要地位，在未来有可能带来巨大的社会变革和经济效益。因此，建议中国相关政府部门以实现高水平科技自立自强为引领，做好量子技术领域的顶层规划设计和前瞻布局。有针对性地制定相关领域中长期发展规划，紧跟全球技术发展动向，及时对战略规划进行更新和完善，继续加大针对量子技术领域的研发投入，加强科研单位、高校和企业在相关领域的基础研究，以保持中国在量子技术领域的技术地位和知识产权优势，并力争尽快取得关键技术难点突破。

第二，加强量子技术研发和应用方面的产学研合作。目前量子技术的应用前景尚不清晰，因此包括德国在内，都面临研发成果从“实验室”走向“产业链”难的困境。建议中国政府部门积极推动量子技术领域产业集群的培育，打通研究机构、高校、国家实验室与产业界创新资源的联系渠道，促进技术、人才、产品和市场等要素的有效沟通。例如，可以在高校和科研院所建立开放式的面向产业需求的研发平台，推动产学研结对共建，或者建立量子技术创新联盟，推动产学研主体的资源整合。

第三，从根本上解决专业人才问题。重大发明创造、技术创新关键在人才。要加大量子科技领域人才培养力度，着力培养量子科技领域的高精尖人才。然而，量子技术人才存在培养周期长、学术门槛高等问题，建议政府部门制订适合量子科技人才发展的专门培养计划,打造一支高水平的人才队伍。针对量子技术早期教育，需要有完整的量子教育规划，加强各级科学、技术、工程和数学（STEM）教育，为量子技术培养未来行业的人才库。针对青年研究员，设置相关领域的奖学金计划或激励机制，在全球范围内吸引量子科技专业人才，同时鼓励本国青年研究员积极参与国际合作。针对顶尖科学家要给予更多的科研自由，赋予他们充分的人财物自主权和技术路线决定权，制定高端人才引进和补助政策。■

参考文献：

[1] 孙浩林 , 苑朋彬 , 杨帅 . 德国联邦政府量子技术发展规划研究 [J]. 全球科技经济瞭望 , 2021, 36(9): 1-10, 18.

[2] Bundesministerium für Bildung und Forschung. Die hightech-strategie 2025[EB/OL]. [2023-12-30]. https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/leitfaden-fuer-die-zukunft.html.

[3] Bundesministerium für Bildung und Forschung. Zukunftsstrategie forschung und innovation[EB/OL].

[2023-12-30]. https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/zukunftsstrategie/zukunftsstrategie_node.html.

[4] 中华人民共和国驻德意志联邦共和国大使馆 . 德国科技创新简报 总第 40 期 [EB/OL]. [2023-12-30]. http://de.china-embassy.gov.cn/chn/kjcx/dgkjcxjb/202104/t20210409_9046618.htm.

[5] Bundesministerium für Bildung und Forschung. Forschungsprogramm quantensysteme[EB/OL]. [2023-12-30]. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/31714_Forschungsprogramm_Quantensysteme.html.

[6] Bundesministerium für Bildung und Forschung. Das handlungskonzept quantentechnologien[EB/OL]. [2023-12-30]. https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.html.

[7] 中华人民共和国驻德意志联邦共和国大使馆 . 德国科技创新简报 总第 64 期 [EB/OL]. [2023-12-30]. http://de.china-embassy.gov.cn/kjcx/dgkjcxjb/202305/t20230503_11069887.htm.

[8] Bundesministerium für Bildung und Forschung. Roadmap Quantencomputing[EB/OL]. [2023-12-30]. https://app.handelsblatt.com/downloads/26796228/3/roadmap-quantencomputing.pdf?ticket=ST-68285-KsfhoxB1Od9uFKaWJzP0-ap5.

[9] Science Business. Germany to invest €2B in quantum technologies[EB/OL]. [2023-12-30]. https://sciencebusiness.net/news/germany-invest-eu2b-quantum-technologies.

Strategies and Trends in the Development of Quantum Technology in Germany

GUI Xiaolu

(Shanghai Science & Technology Museum, Shanghai 200127)

Abstract: As a industrial key-technology of the future, quantum technology has become the focus of attention in the strategic layout of science and technology in countries around the world. The development in the field of quantum technology in Germany is generally at the forefront of the world, but still lags behind China and the United States. In view of the significance of quantum technology to Germany's future development, the German federal government has introduced a series of targeted R&D strategies and action plans to catch up in recent years, aiming at realizing new technological breakthroughs in the field of quantum technology, maintaining the competitiveness of Germany's economy and technology, and ensuring the technological sovereignty of Europe. This paper focuses on the German federal government's specific initiatives for comprehensive deployment in the field of quantum technology, with a view to providing reference for the development of related fields in China.

Keywords: Germany; quantum technology; quantum systems; strategic plan