

德国联邦政府量子技术发展规划研究

孙浩林, 苑朋彬, 杨 帅

(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘 要:近年来,量子技术作为一种具有巨大发展和应用潜力的未来技术受到世界主要国家的普遍关注,各国纷纷开展这一技术领域的顶层规划及研究应用布局,加大研发投入,以抢抓未来发展的主动权。德国在量子技术领域的整体水平虽不及美国和中国,但同样属于技术领先型国家。德国联邦政府对这一技术领域进行了全面的发展部署,并形成了自身的特色。本文通过对德国联邦政府量子技术发展规划进行系统研究,总结出其具有四个特点:重视应用导向、兼顾全技术领域和技术路线的同时侧重量子计算、关注量子技术专业人才培养、重视量子技术的社会影响和知识普及,并由此为中国量子技术发展提出启示和建议。

关键词:德国;量子技术;发展规划;战略部署

中图分类号:G321.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3772/j.issn.1009-8623.2021.09.001

近年来,量子技术(中国通常称为量子信息技术)作为一种拥有改变人类社会未来发展方式潜力的未来技术受到各国的普遍关注。对量子态的叠加性质和量子纠缠现象的巧妙应用可以在通信、信息处理、能源、生物学等许多领域内突破传统技术的极限,以指数级的优势解决当前无法解决或很难解决的问题。可以说,一个国家拥有了量子技术的领先优势,就在一定程度上掌握了新一轮技术革命的主动权。

为了抓住量子技术的发展机遇,世界主要国家纷纷启动了国家级量子科技战略行动计划,大幅增加研发投入,同时开展顶层规划及研究应用布局^[1]。仅在2015—2021年的7年间,英国、欧盟、美国、德国、日本、俄罗斯、印度、法国、加拿大、澳大利亚等国家和地区就先后发布了量子技术相关的发展规划或其中某一技术领域的发展规划,并准备在量子技术研发方面投入巨资,短期内计划投入超过10亿美元的就有4个国家和地区(美国、印度、

欧盟、德国)^[2]。中国同样将量子信息技术视为未来科技创新的发展重点之一。2020年10月16日,中共中央政治局就量子科技研究和应用前景举行第二十四次集体学习,习近平总书记指出,加快发展量子科技,对促进高质量发展、保障国家安全具有非常重要的作用。在2021年发布的“十四五”规划中也专门提到,要瞄准人工智能、量子信息、集成电路、生命健康、脑科学、生物育种、空天科技、深地深海等前沿领域,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。

目前在量子技术领域,美国和中国毫无疑问是全球的“领头羊”,二者分别在不同的技术领域拥有一定领先优势。但若进一步观察各国的发展情况,可以发现,德国量子技术的整体水平虽不及中美,但在多个主要技术领域中的研发实力均位居全球前列,未来发展潜力巨大。此外,德国联邦政府多年来对量子技术的发展进行了全面系统的规划,为掌握这一领域的技术主权提供了充足的资金和政策保

第一作者简介:孙浩林(1992—),男,助理研究员,主要研究方向为德国科技政策和科技管理。

项目来源:中国科学技术信息研究所重点工作项目“国外科技信息跟踪与创新决策支持平台”(ZD2021-07)。

收稿日期:2021-07-12

障，并形成了自身的发展特点。因此，对德国联邦政府量子技术发展规划进行研究，从中找到值得学习的措施和做法，有利于为中国巩固量子技术的领先地位、制定更加完善的未来发展规划提供有益借鉴。

1 德国量子技术发展现状

德国在三大主要量子技术领域的科研实力位居世界前列。目前，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。通过在 Web of Science 和 Innograhpy 数据库中搜索这

三大领域近 20 年的科技论文发表和专利申请数量，可大致判断出各国在量子技术三大领域的科研实力。从论文发表数量上看（见表 1），新世纪以来，在量子计算、量子通信和量子测量领域，美国和中国的科技论文发表总量均位于全球前两位，而德国则在每一领域都位居第 3，发文量占全球总量的比例分别为 10.7%、7.4% 和 13.8%。从专利申请量上看（见表 2），德国的排名虽然逊色于在论文数量上的表现，但仍位居全球前 10，三大技术领域的排名分别为第 6、7、7 位。

表 1 2000—2020 年部分国家在量子技术三大领域的科技论文发表数量和全球排名

国家	量子计算		量子通信		量子测量	
	发文量（篇）	排名	发文量（篇）	排名	发文量（篇）	排名
美国	17 681	1	3 248	2	1 6545	1
中国（不含台湾地区）	7 963	2	4 396	1	1 0180	2
德国	6 258	3	1 089	3	8 592	3
英国	4 201	4	1 069	4	4 803	5
意大利	3 685	5	621	8	3 165	7
法国	3 554	6	577	9	4 550	6
印度	3 416	7	684	7	2 721	9
日本	3 378	8	994	5	6 082	4
加拿大	3 038	9	821	6	2 584	10
西班牙	2 329	10	410	11	2 009	14

数据来源：Web of Science 核心合集（检索时间：2021 年 5 月）。

表 2 2000—2020 年部分国家在量子技术三大领域的专利申请数量和全球排名

国家	量子计算		量子通信		量子测量	
	专利申请量（件）	排名	专利申请量（件）	排名	专利申请量（件）	排名
美国	2 906	1	371	2	126	2
中国	903	2	1 522	1	198	1
日本	489	3	271	4	27	3
加拿大	441	4	22	9	20	4
英国	195	5	276	3	13	6
德国	167	6	34	7	8	7

续表

国家	量子计算		量子通信		量子测量	
	专利申请量(件)	排名	专利申请量(件)	排名	专利申请量(件)	排名
澳大利亚	142	7	8	13	2	15
韩国	84	8	75	5	18	5
瑞士	58	9	18	10	8	8
以色列	49	10	4	17	2	10

数据来源：Innography 专利数据库（检索时间：2021 年 5 月）。

德国在量子技术领域拥有全球领先的科研力量。德国拥有众多长年进行物理基础研究以及量子效应和系统技术应用研究的优秀科研机构，如德国研究联合会、马普学会、亥姆霍兹联合会、弗朗霍夫学会等^[3]。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。如表 3 所示，全球在量子技术三大领域发文较多的科研机构基本都位于发文量排名靠前的国家，其中德国的马普学会和亥

姆霍兹联合会在量子计算和量子测量领域的发文量均位居全球前 10，马普学会在量子通信领域也排在第 8 位。此外，由于量子技术是一个多学科交叉的前沿领域，德国近年来在各地建立了综合性的量子科技研究机构，用以统筹德国各大学、研究院所不同学科主体在量子领域的研究力量，如综合量子科技中心（IQST）、汉诺威技术研究所（HITec）、光量子技术中心等。

德国在量子技术的应用研究和转化方面尚存

表 3 2000—2020 年部分科研机构在量子技术三大领域的科技论文发表数量和全球排名

机构名称（国家）	量子计算		量子通信		量子测量	
	发文量(篇)	排名	发文量(篇)	排名	发文量(篇)	排名
法国国家科学研究中心（CNRS，法国）	2 464	1	377	4	3 185	1
美国能源部（DOE，美国）	1 973	2	216	12	2 441	3
加州大学系统（美国）	1 955	3	286	6	2 077	4
中国科学院（中国）	1 849	4	915	1	2 995	2
马普学会（德国）	1 218	5	281	8	1 634	5
俄罗斯科学院（俄罗斯）	1 134	6	202	13	1 575	6
意大利国家研究理事会（CNR，意大利）	1 037	7	222	11	1 228	8
麻省理工学院（MIT，美国）	859	8	281	7	820	13
牛津大学（英国）	784	9	164	19	749	17
亥姆霍兹联合会（德国）	722	10	—	—	1 316	7

数据来源：Web of Science 核心合集（检索时间：2021 年 5 月）。

短板。德国虽然在量子物理的基础研究领域处在世界领先地位，但基础研究的成果却很少能够转化为现实应用。这主要是由于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早期发展阶段的技术了解不深，对技术

成果产业化的风险还存在诸多顾虑。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,例如德国当前没有任何一个单独的个体或科学联盟有能力承担量子计算机系统的研发任务。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。

2 联邦政府对量子技术发展规划

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这一技术领域进行了全面的发展部署,可归纳为四方面的具体举措:第一,在科技创新顶层设计上突出量子技术的重要地位;第二,为量子技术发展制定多部专项计划和战略;第三,将量子计算确定为短期的发展重点;第四,为量子技术的发展提供充足的资金保障。

2.1 在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。一是在顶层科技创新发展规划中强调量子技术的重要性。德国在研究与创新领域的顶层发展战略是“高技术战略”(HTS),联邦政府于2018年发布了该战略的最新版本《高技术战略2025》,其中在第二部分《培养德国的未来能力》中,提出要“使德国发展成为量子技术研究的领跑者”,通过在技术上实现量子效应突破现有技术限制,为数据处理、计算机模拟、测量和成像等领域带来新的突破^[4]。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年新冠疫情的爆发对德国造成了极大的消极影响,联邦政府于2020年6月紧急通过了“应对新冠疫情影响、确保繁荣、增强未来能力”经济刺激计划以抵御危机,其中一大重点就是要加强向未来技术的投入,而量子技术、氢能技术和人工智能是被特别列出的三项未来技术。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^[5]。

2.2 制定量子技术专项发展计划

面对世界主要国家争相在量子技术领域制定专项计划的趋势,德国联邦政府也在顶层科技创新

发展规划的指导下制定了量子技术专项计划,并根据发展情况对计划进行了更新。

2.2.1 研究框架计划《量子技术——从基础到市场》

2018年9月,德国联邦内阁通过了联邦政府研究框架计划《量子技术——从基础到市场》,该计划是德国在量子研究领域出台的第一个系统的研发计划^[3]。通过该计划,联邦政府希望实现如下目标:强化德国在量子物理研究领域的领先地位,并寻求技术应用之路;为新的经济潜力和市场创造良好的框架条件;为量子技术的工业领导地位奠定基础;与国际伙伴一道保证德国和欧洲在这一重要未来领域的安全和自主;在德国民间进行科普,并与民众共同开发和应用新的加密技术。

根据量子技术在德国和世界范围内的发展情况,该计划确定了四大研究重点方向,分别是量子计算机、量子通信、量子测量和量子系统的基础技术。同时,为推进这四大技术领域的共同发展,补齐德国在量子技术应用方面的短板,联邦政府集合教育与研究部(BMBF)、经济与能源部(BMWi)、内政部(BMI)和国防部(BMVG)四大相关部门的力量,在6个方面采取了相关措施:一是扩大量子技术的研究范围,着力支持相关研究主体在推进量子物理基础研究的同时开展量子技术应用研究,通过联合研究项目等方式促进量子物理公共研究成果向应用的转化。二是构建新的应用研究网络,包括建立量子技术研究网络平台;在测量学、通信和加密技术等德国的量子技术基础应用优势领域推动以企业为主体的联合研发项目;建立量子技术能力中心,为企业进行量子技术成果转化提供支持;通过政府采购促进德国成为量子实验室设备和仪器的领导市场;为德国量子技术企业提供不同领域的资助计划。三是开展工业竞争力灯塔项目,如通过量子通信竞赛、量子计算欧洲任务等方式帮助量子技术跨越从科研成果到工业应用的“死亡之谷”。四是保障安全和技术主权,加强德国和欧洲在地球观测、卫星通信、卫星导航、数据安全等关乎国家安全的领域应用量子技术的能力。五是加强量子技术应用、标准制定以及公共事务方面与欧洲和其他国家的国际合作。六是加强量子技术科普和人才培养,在基础教育、大学教育和专业教育等不同阶段推广

量子基础知识教育，扩大受众范围，同时大力吸引国外专业人才。

2.2.2 《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。由于这两个计划均将在 2021 年底到期，联邦政府于 2020 年组织来自相关学科的近 300 位专家组成“量子系统计划委员会”，着手制定德国量子系统技术的下一步发展规划。历经 10 个多月的研究和论证过程，委员会于 2021 年 3 月向联邦教育与研究部提交《量子系统议程 2030》（以下简称《议程》），确定了德国未来发展量子技术的优先研究领域和主要挑战，为德国学术界、产业界和政界在量子技术领域采取共同行动奠定了基础。

《议程》确定了 5 大重点主题，分别为量子计算和量子仿真、量子通信、量子测量和传感器系统、集成量子平台和使能技术 4 大技术领域，以及教育、培训、科普、合作和连接等配套措施^[6]，涉及从基础研究到市场应用的整条创新链。《议程》整体结构如图 1 所示。

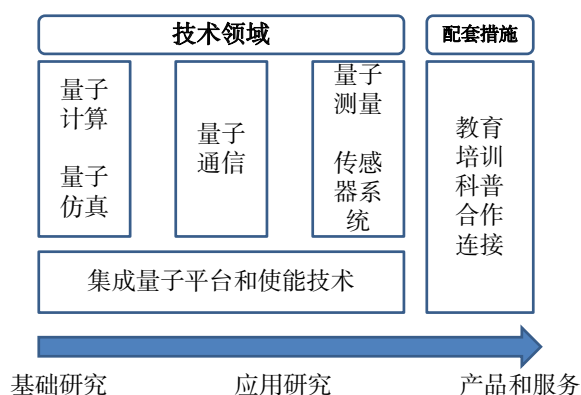


图 1 《议程》整体结构

(1) 量子计算机和量子模拟器是提升德国和欧洲竞争力的关键技术。

量子计算机能够轻松解决传统计算机无法解决或需要耗费巨大成本解决的问题，未来能够应用于新材料开发、新药设计及生产、物流、交通、能源供给等领域的流程优化，具有巨大发展潜力。而能够模拟量子计算机的量子模拟器如今已被广泛应

用于药品和材料化学特性建模等具体问题的解决过程中，且被证明大幅优于传统计算方法。

未来在量子计算和量子仿真领域应采取以下措施：第一，制定战略性长期重点资助措施，囊括多种具有未来潜力的技术平台，以清晰的应用和技术目标促进其发展，并建立起相关能力，且资助措施应尽可能促进研究和产业主体共同参与；第二，鼓励以建立衍生企业的方式促进研究成果向市场转化，加强研究界与产业界的联系；第三，使用户能够尽早安全灵活地使用有噪声中等规模量子计算机系统（NISQ）；第四，培养更多高素质专业人才。

(2) 量子通信领域的研究将为确保欧洲数字主权做出重要贡献。

量子计算机的出现将使当前所有的信息加密手段失效，因此开发量子通信方法和量子通信网络对于未来保护银行、企业、政府机构、基础设施的敏感信息具有关键意义。

《议程》为德国量子通信发展确定了短期、中期和长期目标：短期内将建立起防窃听的点对点短程连接（50~100 公里），初步实现数据中心之间及金融、卫生等安全相关领域的安全信息传输，其基础是开发和应用新一代量子光源；中期内将建立起 100 公里以上的量子通信网络；长期目标是为构建全球量子通信网络奠定基础。

为实现上述目标，《议程》认为应从研究、技术以及经济和社会三个方面采取措施。在研究方面，一是要继续推进量子密钥分发（QKD）和量子态传输领域的理论进步，同时使研究活动更具应用导向；二是要加快研究成果的实际应用，以建立研究联盟和设立产业联合项目的方式促进成果转化；三是要充分发挥协同效应，在技术研发过程中与大型网络运营商开展合作，并综合考虑量子通信与量子计算、量子存储和量子信息传输等各相关领域的需求。在技术方面，一是要在量子通信技术的整体发展目标上坚持平台和技术开放原则，特别要保证量子通信系统的鲁棒性和安全性；二是要拥有量子中继器、存储器、光源等关键技术的技术主权，以及低成本生产基础组件的能力；三是要关注量子通信系统层面的网络管理、标准化和多主体协调合作等重点问题。在经济和社会方面，一是要培训更多既懂量子技术原理又有能力进行产业应用的量子工程

师;二是要为产业界创造具有赢利潜力的市场,吸引更多最终用户;三是为更多陆地和太空的量子通信基础设施项目提供支持;四是对知识产权进行出口管控,防止高技术流失;五是提高公众和产业界对量子通信的社会认同和信任。

(3) 量子传感器是新一代测量和诊断系统的基础。

量子系统自身的特性使得基于量子技术的测量工具和传感器能够在收集物理数据时具有更高的敏感度、精确度和鲁棒性,在医学、地质学、考古学、建筑学等领域具有巨大应用潜力。

量子测量和传感器的发展需要以一系列基础技术研发为前提。这些技术包括:量子传感器的小型化和节能解决方案、基于纠缠的传感器网络、模块化的量子传感器控制软硬件、固态传感器、基于气室的传感器、量子增强成像、量子光刻、量子重力仪等。此外,学术界和产业界相关主体的紧密合作也至关重要,这包括降低相关主体使用大型基础设施进行量子技术研发的门槛、共同制定量子测量和传感器领域的标准、培训相关专业人才等。

(4) 集成量子平台和使能技术助力三大量子技术领域取得突破。

为实现上述几大技术领域的发展目标,必须首先进行一系列基础技术和使能技术开发,特别是要构建量子系统的集成平台。

未来需要在三个领域采取措施。第一,材料、组件和相应的制造技术,该领域是实现量子平台的基础,需遵循两大重要发展目标:一是技术解决方案必须做到集成、节能且具有鲁棒性,这可通过小型化设计实现;二是制造流程必须做到可靠、成本合理且可重复生产,这可通过具有扩展性的制造技术实现。第二,用于处理、探测、控制、操作和识别量子状态的组件和系统,在这一领域需要保证量子系统各功能模块间的兼容性以及模块自身的稳定性、可操作性和可扩展性。第三,用于设计、仿真、制造等环节的关键基础技术,其开发重点包括量子平台中的光电集成、最优数据处理,以及集成量子平台的建模、仿真和整体设计等。

(5) 配套措施助力搭建量子技术顺利发展的框架条件。

为促进量子技术这一新兴技术领域的发展,除了要重视技术本身的研发,也要做好教育、培训、科普、合作和连接等配套措施,这是保证量子技术领域的专业人才、社会认同和国际协调的前提和基础。

在教育、培训和科普方面,不同主体要采取各自的措施。如高校应在量子技术领域设立新的跨专业学科,并增强实践导向,增设量子工程学教职,加强与产业界在培训方面的合作等;产业界主体应为员工提供量子技术相关培训计划,与高校就自身需求和兴趣充分交换意见,为身处国外的德国量子技术人员制定归国计划,让相关专家更容易实现学术界和产业界身份的转换等;中小学需要开发适合中小学生的量子技术学习课程和材料,开展“移动实验项目”等;在科普方面,则要设计面向公众的量子技术介绍材料,加强与公众的对话,了解公众对量子技术的需求和愿景,为企业决策者开办讲座,向公众展示量子技术的实际应用场景等。

在合作方面,一是要做到基础研究与问题导向研究并重;二是要在学术机构和产业界之间建立起务实的交流机制;三是要在合作过程中不断探索合作网络的最佳运作模式。

2.3 将量子计算确定为短期发展重点

虽然德国联邦政府的量子战略将当前量子技术的几大主流技术发展方向都包括在内,但鉴于量子计算的基础性作用 and 在国际量子技术竞争中的关键地位,联邦政府将短期内的重点确定为量子计算。联邦教育与研究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^[7]。

为了系统规划针对德国量子计算发展的资助措施,联邦政府在2020年召集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。委员会于2021年1月向联邦政府提交了《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,设定了发展目标,并提出未来的行动

领域^[8]。路线图虽不能完全代表联邦政府将采取的下一步行动，但也是联邦政府制定未来政策的重要参考，具有较大意义。

基于当前现状和挑战，路线图为德国设定了短期、中期和长期三个阶段的目标：（1）短期目标，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。设定的里程碑为拥有至少包含 100 个可单独控制的量子比特并且可扩展至 500 量子比特的有国际竞争力的量子计算机。（2）中期目标，在 5~10 年内获得能够进行实际应用的量子优势，与欧洲伙伴一道成为量子计算领域的顶尖竞争者。（3）长期目标，在 10~15 年内拥有可自我纠错的量子计算机，能够解决具有指数级量子优势的通用问题。

路线图建议从两个方面促进德国量子计算的发展。

（1）构建全面完整的量子计算生态系统。

量子计算机的开发和应用是一项“登月项目”，为了成功“登月”，必须建立起一个能够囊括整条创新链和价值创造链、充分发挥德国产学研合作优势的完整生态系统。路线图建议联邦政府以建立量子计算中心和能力网络的方式逐步构建起整体的生态系统，具体计划为在 2021 年第一季度对建立中心和能力网络进行公开招标；同时成立一个顶层组织，以协助中心和能力网络的遴选过程，并监督中心在 2021 年顺利启动；在 2024 年之前建立起中心协会并巩固整体生态系统。整体生态系统结构如图 2 所示。

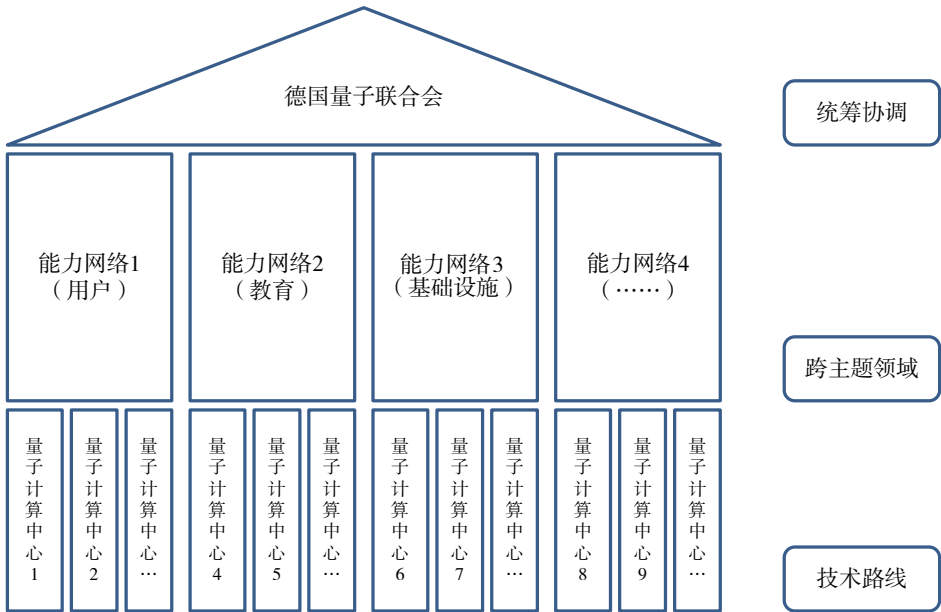


图 2 量子计算生态系统整体结构

量子计算中心是生态系统中整合分散的人才和技术资源的基层主体。每个中心至少关注一条建造和运行量子计算机系统的技术路线，为运行和使用量子计算机提供必要的软件支撑，通过云服务让用户能够使用量子计算机，同时提供系统相关的基础设施和专家培训服务。中心也可与产业界合作，成为衍生企业和初创企业的孵化器。根据实际情况，中心可建立在一个固定地点或分散在不同地点，一条技术路线也可由多个中心共同完成，只要各中心

之间有明确的关注点差别，且每个中心都能开发出一种完整的量子计算机系统。另外，每个中心需要成立一个具有战略能力的领导委员会，由来自学术界和产业界的主体担任成员。

能力网络的主要功能是关注跨主题重点领域，并整合各中心之间以及中心与产业界、外部用户和教育机构之间的活动。每个能力网络负责对一个跨中心主题领域进行协调，特别是培训、基础设施和应用等关键领域，其为不同中心寻找合作点，并为

此提供必需的财力和人力资源。此外,能力网络将协调各中心共同制定标准,并确保各中心遵守共同的质量标准。目前,德国已经初步确定了少数量子计算能力网络,如量子计算用户能力网络、量子基础设施能力网络、量子教育能力网络等。

德国量子联合会(DQG)是统筹所有量子计算中心和能力网络、执行整体战略的顶层组织。德国量子联合会由监督委员会、战略专家委员会、中心和能力网络协会以及办事处共同组成,成员包括来自政府、学术界和产业界的专家和代表。其主要功能为:为政府部门实施路线图提供咨询和支持;协调跨部门的竞争流程,为所有遴选和评估问题提供专家意见;通过战略专家委员会评估各中心和能力网络的工作进展,提出改进措施,并逐步将关注重点聚焦到少数最具发展前景的中心和技术路线上;研究建立生态系统的缺失成分;确保各中心和能力网络间的协调合作。

(2) 提升量子计算相关能力。

提升关键组件自主生产能力。目前,德国还不具备自主生产量子计算机核心组件的能力,但在长期必须拥有技术主权,这包括拥有自主设计的软硬件结合交互界面,且能够在系统关键组件方面不依赖欧洲外的制造商。为实现这一目标,需要中心/能力网络与德国量子联合会的战略专家委员会合作识别、分析系统相关组件,并将其分成系统关键组件、一般组件和非重要组件三类;在中心/能力网络中建立起系统相关组件的生产能力,并充分调动产业界和研究机构的积极性;与欧洲制造商就生产系统关键组件建立合作关系,与欧洲外制造商就生产非重要组件建立合作关系,并确定与国外制造商合作的指导方针。

提升专业人才能力。为了满足未来量子技术领域的专业人才需求,需要建立一个跨领域的培训体系,目标是使德国具备培养、吸引和留住必需人才的能力,让更多主体拥有开发量子硬件、组件以及量子信息理论和算法的能力。实现途径包括建立跨领域大学量子技术中心,提供额外的教席和专业课程,培训更多博士生和教师;通过产学研合作有目标地促进技术诀窍从学术界向产业界的转化。

提升知识产权能力。在量子计算领域的专利数量上,德国乃至欧洲已经远远落后于中美,必须加强对专利的重视。另外,量子计算机的复杂性使得德国任何单一主体都无法成功完成既定目标,一个良好的专利环境则有助于促进不同产业主体间的合作,同时产生更多新的专利。为此可以采取四方面措施:一是为初创企业制定完整的专利规则,促进专利从大学和研究机构向企业转移的标准化;二是通过中心和能力网络全面了解量子计算领域的专利情况,识别关键专利;三是促进不同专利权人间的合作,建立一个开放的专利池;四是在量子技术领域尽快建立起欧洲的标准,以在全球竞争中占据有利地位,这需要现有的标准化组织与中心和能力网络的专家进行密切合作。

2.4 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中,联邦政府就决定将在任期内(2018—2021年)共投入约6.5亿欧元用于量子技术研发,这一投资力度在近年来发布量子技术研发战略的国家和地区中位居前列(见表4)。

2021年5月,联邦教育与研究部再次宣布将

表4 近年来全球部分量子技术领域规划和投资情况^[2]

国家/地区	年份	项目规划	投资(亿美元)
英国	2014	国家量子技术计划(一期)	≈ 3.52
欧盟	2016	“量子宣言”旗舰计划	≈ 11.12
美国	2018	国家量子行动计划(NQI)立法	12.75
德国	2018	量子技术——从基础到市场	≈ 7.23
英国	2019	国家量子技术计划(二期)	≈ 3.03

续表

国家 / 地区	年份	项目规划	投资 (亿美元)
日本	2019	量子技术创新战略	≈ 2.76
俄罗斯	2019	量子技术基础与应用研究	≈ 7.90

在联邦政府的后疫情经济刺激计划中预留 20 亿欧元用于量子技术的开发^[9]，这更是使德国成为全球量子技术领域研发投资最高的国家之一。其中，联邦教育与研究部将在 2025 年(含)之前共提供 11 亿欧元，重点开展量子计算的研发和量子计算机应用等相关工作。作为初步的具体资助措施，联邦教育与研究部推出了“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资金支持。

3 联邦政府量子技术发展规划的特点

通过对德国联邦政府量子技术发展规划进行系统研究，可归纳出德国在发展量子技术方面的四大特点。

第一，重视应用导向。统观联邦政府制定的所有量子技术发展规划，量子技术成果作为产品和服务进入市场始终是其首要考虑的目标，这是因为联邦政府充分认识到德国在量子技术转化和应用方面存在较大短板。为了加快德国量子技术成果进入市场的进程，联邦政府在各技术领域的发展规划中都制定了促进产学研合作的相关措施，包括产学研联合研发项目、量子能力中心、工业竞争力灯塔项目等，将学术界的研究能力与产业界需求充分结合。例如，从 2011 年起，联邦教育与研究部已经在量子通信领域发布了超过 70 个联合研究项目，这些项目均采取产业界主体主导、学术界主体参与的方式，有效促进了量子通信技术在现实场景的应用，如 2018 年开始的 Q.Link.X 项目就第一次在德国实现了量子中继器的应用^[10]。

第二，在兼顾全技术领域和技术路线的同时侧重量子计算。德国虽然目前在量子技术方面落后于中美等国，但其并没有采取寻找某一领域集中突破的发展方式，而是在规划中覆盖量子计算、量子通信、量子测量以及使能技术等所有主流的量子技术领域，在每一个技术领域中也尽可能跟进当前所有

主要的技术路线。其目的是避免选错技术发展方向、错失发展先机，同时在未来掌握量子技术全产业链的技术主权。而联邦政府在兼顾的同时也有所侧重，将自身与美国等领先国家差距较大，但在不久的将来能够产生极大经济价值的量子计算作为短期发展重点，将制造出一台自主生产的量子计算机设定为具体的短期发展目标，有利于集中资源快速追赶头部国家，避免在未来的竞争中处于完全被动地位。

第三，关注量子技术专业人才的获取。量子技术的长远发展必须依靠充足的专业人才，联邦政府为此制定了从中小学到高校再到企业的全阶段教育培训计划，致力于培养和吸引更多人才从事量子技术研发。特别是联邦政府让量子科学这一高精尖学科的基础知识进入中小学课堂的做法，既能让中小学生对量子科学有一定了解，还能唤起部分学生对未来从事量子技术领域相关工作的兴趣，为培养更多专业人才打好基础。此外，联邦政府在培养本国人才的同时，也注重延揽国外人才，通过增加量子科学学科的大学教职、降低产业界和学术界身份转换难度、为归国的德国专业人才提供优惠政策等方式吸引全球量子技术人才来德工作。

第四，重视量子技术的社会影响和知识普及。量子技术作为一种新兴的未来技术，必然会对社会和公众造成影响，联邦政府希望通过科普的方式，加强公众对量子技术的了解和认识，争取社会认同和信任，并唤起更多人对这一新兴技术的兴趣。其中，联邦政府还设计了针对企业家和企业决策者的科普活动，有利于增进他们对于量子技术的认识和信心，降低产业界对技术成果转化的疑虑和担忧。这些措施都能够对量子技术在德国的应用和普及起到积极的推动作用。

4 对中国的启示

近年来，中国在量子技术领域不断取得新的突破，产出了一批具有重要国际影响力的成果，整

体上处在领跑、并跑、跟跑“三跑并存”的阶段。中国科学技术大学常务副校长潘建伟院士说:“总体而言,中国在量子通信的研究和应用方面处于国际领先地位,在量子计算方面与发达国家处于同一水平线,在量子精密测量方面发展迅速。”^[11]面对当前来自世界主要国家的激烈竞争,中国必须进一步加强对量子技术这一关键新兴技术的重视和投入,不断补短板、长短板,抢占全球新一轮科技革命的制高点。德国联邦政府对量子技术的发展规划可以为我国提供一些启示。

第一,出台国家层面的量子技术发展规划。我国至今尚未出台综合性的量子技术发展规划,仅在“十四五”规划等顶层战略中提出要重视量子技术的发展。而通过德国的经验可知,一部针对量子技术的专项规划能够厘清当前技术发展的优劣势,指明未来的发展方向和重点,促进产学研主体在技术研发和应用方面通力合作,对技术的整体发展有着较好的指导作用。我国可汇集量子技术领域的产学研相关力量,制定一部符合我国发展现状和需求的综合性量子技术发展规划,以保持和扩大在量子通信领域的领先优势,巩固量子计算领域的第一方阵地位,促进量子测量领域尽快达到国际先进水平。

第二,加强量子技术研发和应用方面的产学研合作。当前我国从事量子技术研发的相关主体主要来自高校和科研院所,企业的参与和投入热情不足,也存在类似德国的基础研究成果转化和应用不充分的问题。未来应采取措施加强学术界和产业界在量子技术研发方面的合作,通过设立产学研联合研发项目、建立新型研发机构、开展面向产业界的创新竞赛等方式,鼓励企业参与,使学术界的技术研发充分考虑企业的现实需求,进而促进成果转化和应用。

第三,制定不同阶段的量子科学教育和培训方案。针对量子科学的教育应尽可能覆盖从中小学到企业的全部阶段,同时针对不同阶段的主体要分别设计相应的教育和培训方式。例如,可组织专家编写通俗易懂的中小学量子科学教材,在高校设立专门的量子信息技术学科,开设针对企业管理者和员工的量子技术培训等等,进而吸引和培养更多量子技术领域的专业人才和后备力量。

第四,开展高质量的科普活动。当前量子科技这一概念在社会上的知名度越来越高,但普通民众对其科学原理和应用前景并不十分了解,容易造成对相关技术的误解或被不法分子滥用其概念。在不同群体中开展高质量的科普活动,能够让更多人认识量子科技的正确含义,唤起他们对量子科技的兴趣,并增强公众对于应用量子技术的信心,为量子技术走进千家万户做好准备。■

参考文献:

- [1] 产业信息网. 2020 年全球及中国量子信息技术总体发展态势、行业市场规模及行业发展前景分析预测 [EB/OL]. (2020-02-17) [2021-05-20]. <https://www.chyxx.com/industry/202002/834567.html>.
- [2] 中国信息通信研究院. 量子信息技术发展与应用研究报告(2020 年) [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2020.
- [3] 孙浩林. 德国发布首个量子技术框架计划 [J]. 科技中国, 2019 (1): 94-96.
- [4] BMBF. Die Hightech-Strategie 2025 [R]. Berlin: BMBF, 2018.
- [5] BMBF. Coronavirus: was tut das BMBF? [EB/OL]. [2020-05-20]. <https://www.bmbf.de/de/coronavirus-was-tut-das-bmbf-11069.html>.
- [6] VDI. Agenda Quantensysteme 2030 [R]. Düsseldorf: VDI Technologiezentrum GmbH, 2021.
- [7] BMBF. Technologisch souverän die Zukunft Gestalten - BMBF-Impulspapier zur Technologischen Souveränität [R]. Berlin: BMBF, 2021.
- [8] VDI. Roadmap Quantencomputing [R]. Düsseldorf: VDI Technologiezentrum GmbH, 2021.
- [9] BMBF. Karliczek: Mit großen Schritten zum Quantencomputer "Made in Germany" [EB/OL]. (2021-05-11) [2021-05-26]. <https://www.bmbf.de/de/karliczek-mit-grossen-schritten-zum-quantencomputer-made-in-germany-14436.html>.
- [10] BMBF. Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt [R]. Bonn: BMBF, 2018.
- [11] 陆成宽. 中国量子科技发展现状、挑战及优势 [EB/OL]. (2021-03-04) [2021-05-26]. https://www.xianjichina.com/news/details_255383.html.

(下转第18页)

Constructing a Responsible S&T Innovation System: Challenges, Foundations and Suggestions

QU Jing-jing^{1,2}, WANG Ying-chun¹

(1. Shanghai Institute for Science of Science, Shanghai 200031;

2. School of International Relations & Public Affairs, Fudan University, Shanghai 200433)

Abstract: Alongside the constant development of emerging technologies, the complexity and uncertainty of external risks cannot be ignored. In such a challenging context, the concept of “responsible innovation” has soon become a significant topic and a development direction in the S&T governance that has been approved globally. The traditional S&T innovation system now faces new challenges, and in this case, “responsible innovation” can provide valuable implications. Underpinned by Setiawan and Singh’s framework of “responsible innovation”, the present paper has systematically analyzed the challenges and foundations of China in constructing a “Responsible S&T Innovation System”. Eventually, suggestions for building a “Human-Centric Responsible S&T Innovation System” in China have been proposed.

Keywords: science and technology governance; responsible innovation; artificial intelligence; social responsibility; science and technology ethics

(上接第10页)

Research on the Development Framework of German Federal Government for Quantum Technology

SUN Hao-lin, YUAN Peng-bin, YANG Shuai

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: In recent years, the quantum technology has drawn great attentions from the main countries of the world due to its enormous development and application potentials. Many countries have carried out top-level planning as well as research and application layouts in this field, and increased R&D investment in order to seize the initiative in the future development. The overall strength of Germany in the field of quantum technology is not as good as that of the United States and China, but German is also a technology-leading country. The German federal government has carried out a comprehensive layout for this technical field and formed its own style. Through a systematical research on the development framework of German federal government for quantum technology, this paper summarizes its characteristics in 4 aspects, including application-orientation, considering all technical fields and technical routes while focusing on quantum computing, focusing on the acquisition of quantum technology professionals, and paying attention to the social impact and knowledge popularization. Finally, this paper puts forward some enlightenments and suggestions for the development of quantum technology in China.

Keywords: Germany; quantum technology; development framework; strategic layout