

我国量子通信产业化发展趋势及实践思考

蔡笑天, 杨 洋

(中国科学技术发展战略研究院, 北京 100038)

摘 要:《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》首次将量子通信研究列入重大科学计划,十八大以来,量子通信更受到政、产、学界的高度关注,取得了一系列技术研发和应用的重大突破。当前,美国、欧盟和中国在量子通信的理论和应用层面各有优势,鉴于量子通信领域对于国防安全的重要性的产业化的高风险,中、美、欧陷入是否推进产业化的“囚徒困境”中,我国将面临创新资源、技术路径选择市场规则和推广等诸多挑战。针对量子通信的领域特殊性及其产业化进程中面临的挑战,政府需要反思已有的体制机制、管理模式,并主动采取措施,持续加大公共创新资源支持力度,引导民间资本进入,同时为不同技术路径提供公平的市场竞争机会,逐步推广量子通信技术产业化发展。

关键词:量子通信; 产业化; 技术生命周期; 公共政策

中图分类号: F410 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2019.04.005

自20世纪90年代以来,量子信息科学得到迅猛发展,量子通信技术在安全、高效和抗干扰等方面突破经典信息技术的瓶颈,成为提供国家安全保障、支撑国民经济可持续发展的核心战略力量。然而量子通信的发展过程中争议从未停止,一些学者认为干扰量子通信的技术成本非常低,比如,电磁脉冲就可以改变单个光子的极化方向^[1],这使得量子通信产业化备受争议。本文在收集国内外相关资料的基础上,对量子通信产业化进行深入研究,形成报告如下。

1 量子通信产业化是大势所趋

量子通信技术是一种具备无条件安全性的物理层信息通信解决方案^[2],量子密码、量子密码编码、量子隐形传态是量子通信的主要形式,其中量子密钥分发是有望最先实现大规模应用的量子信息

技术^[3]。在量子通信技术理论上,目前美国、欧洲同属世界一流水平,在应用层面,我国量子通信产业化程度处于世界领先水平。从国内外量子通信发展进程图(图1、图2)可以看到^[4],近年来我国量子通信产业已经进入“无人区”,过去参考国际上已有的成熟技术路径通过引进、模仿、合作开发等方式获得技术要素的模式将无以为继。

应该看到,量子通信领域的产业化具有两点特殊性:一是这个领域的技术突破和产业化程度对于国防安全至关重要;二是这个领域产业化的可行性和路径选择至今在学术界仍未达成共识。基于上述两点原因,世界各国在量子通信产业化问题上大多显得摇摆不定,目前我国、美国和欧盟相对领先。从政府角度看,美国20世纪末就将量子通信列入国家战略和国防安全的研发计划,同时美国国家标准技术研究院将量子信息作为三个重点研究方向之

第一作者简介:蔡笑天(1986—),男,助理研究员,主要研究方向为企业技术创新等。

项目来源:科技创新战略研究专项“以习近平新时代中国特色社会主义思想指导我国科技创新重大问题研究”(ZLY201531),“国家创新体系发展趋势、国际经验与模式研究”(ZLY201822);北京市科技计划“北京市军民科技协同创新平台建设示范运行研究”(Z181100004118003)。

收稿日期:2019-03-11

1. 1984—1992 概念提出

- 1984年提出第一个量子密码通信方案——BB84协议。
- 1991年牛津大学的Ekert提出了E91协议。
- 1992年B92协议用两个非正交态实现量子密码通信。

2. 1993—2005 实验演示

- 量子密钥分发演示性实验实现100公里以上通信距离，但安全通信距离只有10公里量级，不具有实用价值。

3. 2006—2010 领域尝试

- 美国LosAlamos国家实验室-美国国家标准局联合实验组和奥地利的Zeilinger教授领导的欧洲联合实验室实现了安全距离超过100公里量子的密钥分发，量子通信得以从实验室演示开始走向实用化。

4. 2010至今 应用推广

- 2013年，美国Battelle公布了环美量子通信骨干网络项目，建立起连接包括谷歌、IBM、微软等公司的数据中心之间提供量子安全保障服务。

图 1 国外量子通信发展进程

1. 1984—1992 学习研究

- 1995年我国演示最早的量子密钥分发实验。
- 2000年单模光纤完成了1.1公里的量子密钥分发演示实验。

2. 1993—2005 快速发展

- 50公里光纤中量子密钥分发实验。
- 125公里光纤的量子密钥分发演示性实验。

3. 2006—2010 领域尝试

- 2006年中国科学技术大学潘建伟团队在世界上首次利用诱骗态方案实现了安全距离超过100公里的量子密钥分发实验。

4. 2010至今 应用推广

- 2011年实现了百公里量级的自由空间量子隐形传态和纠缠分发。
- 2016年“墨子号”量子科学实验卫星发射成功。
- 2017年量子通信“京沪干线”开通。

图 2 国内量子通信发展进程

一^[5]。2018年6月，美国众议院科学、太空和技术委员会一致通过了“国家量子计划法案”，提出实施十年国家量子行动计划，其重点之一就是为联邦政府的相关研究商业化。欧盟从20世纪90年代的第五研发框架计划开始，就持续对泛欧洲乃至全球的量子通信研究给予重点支持。紧接着，欧盟发布了《欧洲研究与发展框架规划》，专门提出了用

于发展量子信息技术的“欧洲量子科学技术计划”及“欧洲量子信息处理与通信计划”。从2007年至今，欧盟实现了量子漫步、太空和地球之间的信息传输，为卫星之间以及卫星与地面空间站之间进行量子通信提供可能性。我国最早在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》中将量子调控列入科学计划中，后续相关政策见表1。

从市场角度看, 美国和欧盟主要是企业行为, 代表 IDQ^③等。而我国更多是政府主导, 企业参与, 例如企业有美国的 BNN^①、MAGIQ TECH^②和瑞士的 如“墨子号”量子科学实验卫星、国家量子保密通

表 1 我国量子通信相关政策

时间	内容
2006.02	《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中重大科学计划包含了量子调控研究。
2009.06	中国科学院“十一五”知识创新工程重大项目中包含远距离量子通信实验研究。
2012.02	刘延东在出席金融信息量子通信验证网开通仪式时强调: 量子通信技术对保障国家信息安全具有重要战略意义, 金融信息量子通信验证网实现了量子通信技术在金融信息传输方面的成功应用, 将对推动量子信息技术更好服务于经济社会发展产生积极示范作用。
2013.02	《国家重大科技基础设施建设中长期规划(2012—2030)》, 在未来网络试验设施中包括了网络信息安全、量子通信网络等开放式网络试验系统。
2013.07	习近平总书记在中国科学院调研期间指出: 在铁基超导、干细胞、量子通信、中微子等基础前沿领域走在世界前列。
2015.11	习近平总书记在关于《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》的说明中指出: 从更长远的战略需求出发, 我们要坚持有所为有所不为, 在航空发动机、量子通信等领域再部署一批体现国家战略意图的重大科技项目。
2016.02	科技部发布国家重点研发计划首批重点研发专项指南, 其中包含了量子调控与量子信息。
2016.03	《国务院中国国民经济和发展第十三个五年规划纲要》: 加强前瞻布局, 着力构建量子通信和泛在安全物联网, 打造未来发展新优势。
2016.05	《国家创新驱动发展战略纲要》: 在量子通信、信息网络等领域, 充分论证, 明确重点, 再部署一批体现国家战略意图的重大科技项目和工程。
2016.07	《国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知》: 力争在量子通信与量子计算等重点方向率先突破。
2016.08	《中国科学院“十三五”发展规划纲要》: 加强核心器件的自主研发, 加强与经典网络的融合, 推动标准制定, 开展城域量子通信、城际量子通信、卫星量子通信关键技术研发, 初步形成构建空地一体广域量子通信网络体系的能力, 并在全天时卫星量子通信技术上取得突破。
2016.11	《国务院关于印发“十三五”国家战略性新兴产业发展规划的通知》: 加强关键技术和产品研发, 持续推动量子密钥技术应用。
2017.05	科技部、教育部、科学院、国家自然科学基金委员会关于印发“十三五”国家基础研究专项规划的通知: 面向多用户联网的量子通信关键技术和成套设备, 率先突破量子保密通信技术, 建设超远距离光纤量子通信网, 开展星地量子通信系统研究, 构建完整的空地一体广域量子通信网络体系, 与经典通信网络实现无缝链接。
2017.11	发改委关于组织实施 2018 年新一代信息基础设施建设工程的通知: 提出国家广域量子保密通信骨干网络建设一期工程。
2018.03	政府工作报告肯定量子通信发展成果: 将量子通信载人航天、深海探测、大飞机并列为重大创新成果。

① BNN 科技公司为雷神公司全资子公司, 擅长量子计算, 参与美国情报高级研究计划局发起的量子计算机科学项目研究。

② MAGIQ TECH 公司提供初步商用化的量子密钥分发系统器件、终端设备和整体应用解决方案, 主要用户有美国国防高级研究计划局(DARPA)、美国国家航空航天局(NASA)等。

③ IDQ 公司是量子密钥生成的世界领导者, 主要为数据中心、银行和金融机构、政府提供加密解决方案。

信“京沪干线”等。

综上，在量子通信领域产业化的问题上，我国和美国、欧盟相当于处于“囚徒困境”中：一方面以现有技术成熟度推进产业化有较大风险，另一方面如果其他国家率先推进量子通信产业化，将会失去先发优势。因此，为了确立量子通信产业的先发优势，更好地反馈国防安全体系和科技安全体系建设，促进经济高质量发展，大力推动量子通信产业化是大势所趋。

2 伴随技术快速成长，同步推进量子通信产业化

量子通信相关理论最早由 IBM 研究组的 Bennett 与加拿大蒙特利尔大学的 Brassard 于 1984 年

提出^[6]，2010 年左右，量子通信初步实现市场应用规模化，距离理论的提出尚不到 30 年^[7]。利用 Loglet lab 软件对通信领域和量子信息领域 SCIE 检索论文的效用累积量进行 S 曲线拟合^①，得出两个领域的技术生命周期（见图 3）。可以看到，量子通信技术在 1990—2013 年增长相对缓慢，处于技术生命周期中的萌芽阶段；2013 年至今，累积效用增长率不断增大，量子通信技术迅速发展，步入技术生命周期中的成长期。由于量子通信技术成熟期还未到来，可以预见未来一段时间该领域技术将保持高速发展。通信领域 2004 年进入技术生命周期中的成长期，经过十余年的快速发展，2016 年进入成熟期，可以预见未来一段时间通信领域的技术发展速率将逐步放缓，进入瓶颈阶段。

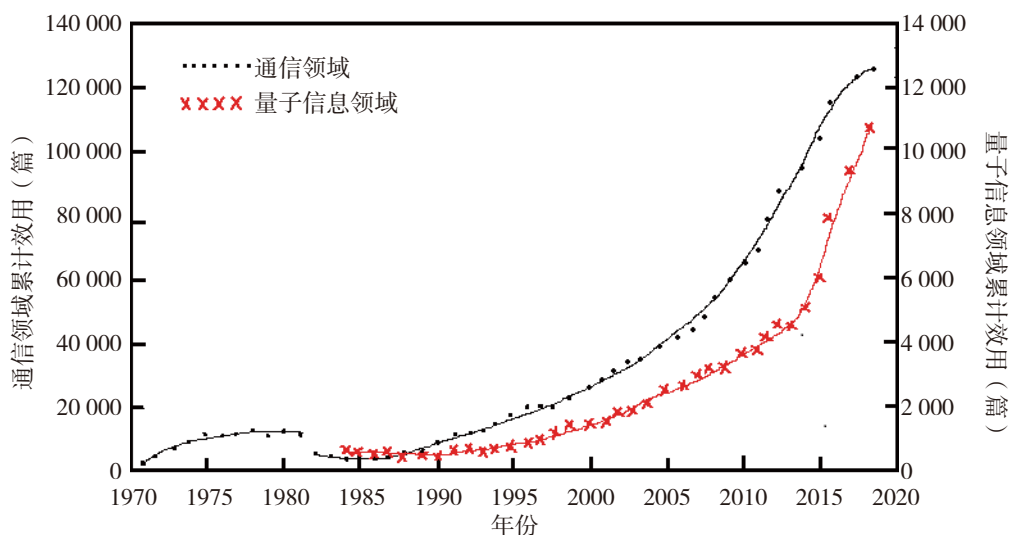


图 3 通信、量子信息领域技术生命周期

数据来源：SCIE 论文检索（Web of Science 数据库）。

一般在一个技术领域内，由于新技术的不断出现，旧技术的技术生命周期没有完结就会被替代，从而形成一条新的 S 曲线（见图 4），因此一个技术领域的生命周期是由若干单项技术生命周期叠加形成，其总体趋势与单项技术类似。随着传统通信技术发展进入瓶颈，势必会有新兴技术进入市场，从近年来的理论研究和突破来看，量子通信很可

能在未来逐渐颠覆传统通信市场。

美国和欧盟政府十分重视量子通信理论和前沿技术的突破，对于产业化的支持相对较少。我国在理论研究方面起步较晚，目前较美、欧还有一些差距，但是在推进量子通信产业化方面，我国具备以下几点优势。一是体制机制优势：我国是中央集权体制，中央政令在地方能够很好地推行和落实，

①
$$N(t) = \frac{K}{1 + \exp\left[-\frac{\ln(81)}{\Delta t}(t - t_m)\right]}$$
 K 代表饱和值， t_m 代表反曲点（技术效用增长率极大）， Δt 代表成长时间。通过上述三项参数值可以判断技术成长路径及生命周期。

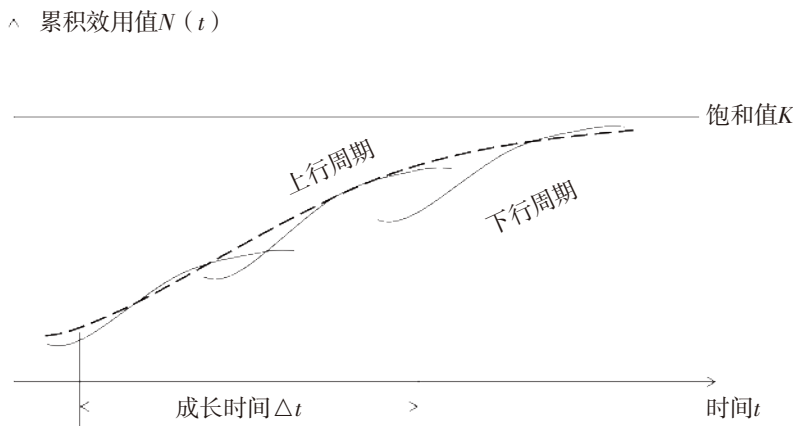


图 4 同类技术生命周期发展趋势示意图

这在美国和欧盟难以实现。二是市场规模优势：量子通信除了应用于国防体系外，在地方政务、金融、互联网等领域都有广泛的应用前景，我国这些领域对于信息安全传递有巨大需求。三是基础设施优势：“墨子号”量子科学实验卫星的成功发射和量子保密通信“京沪干线”的建成使得我国量子通信产业化的基础设施处于世界领先水平；四是产学研合作优势：我国量子通信产业的发展与其他产业有所不同，国内领先的国盾量子、科华恒盛、凯乐科技、神州量子等上市企业或是依托中国科学技术大学创办，或是中国科学技术大学研究团队技术入股，因此产学研构架已经形成。综上，我国应该在量子通

信技术快速发展阶段同步推进产业化。

3 我国量子通信产业化的现状及面临的挑战

2006年我国率先实现量子通信距离超过100千米，拉开了产业化的序幕，通过政产学研各界的共同努力，量子通信产业化过去十余年取得了一系列进展（见图5）。目前，我国量子通信产业链构架已经基本形成（见图6）。上游主要是元器件供应商；中游是量子通信的核心设备制造，包括量子制备、存储、交换等，中游的量子设备与解决方案提供环节是整个量子通信产业链的核心环节；下游主要是网络运营及具体面向国防、金融、政务等

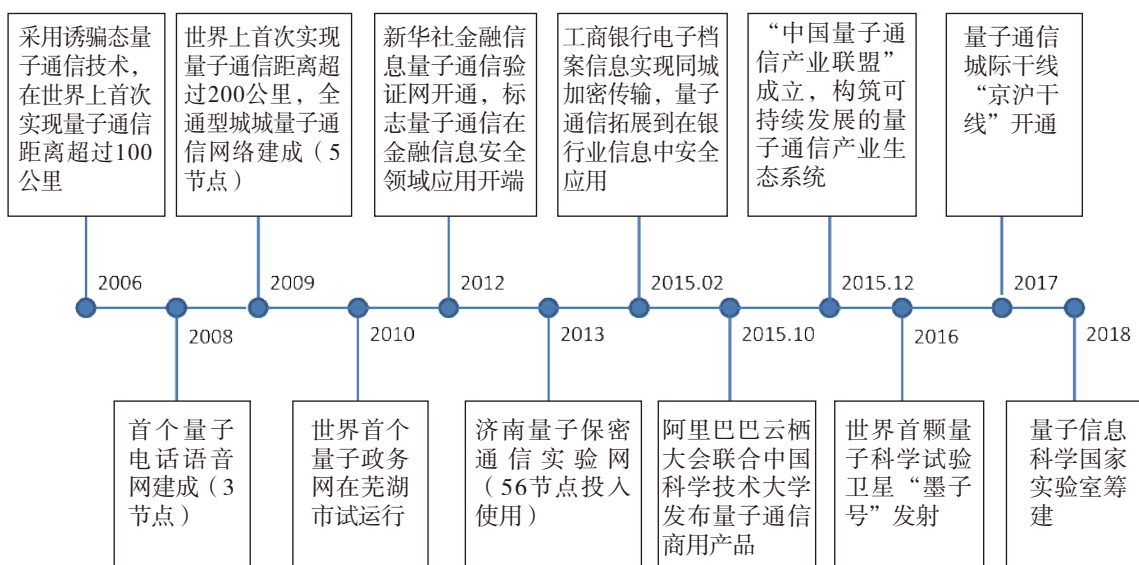


图 5 量子通信产业化大事记

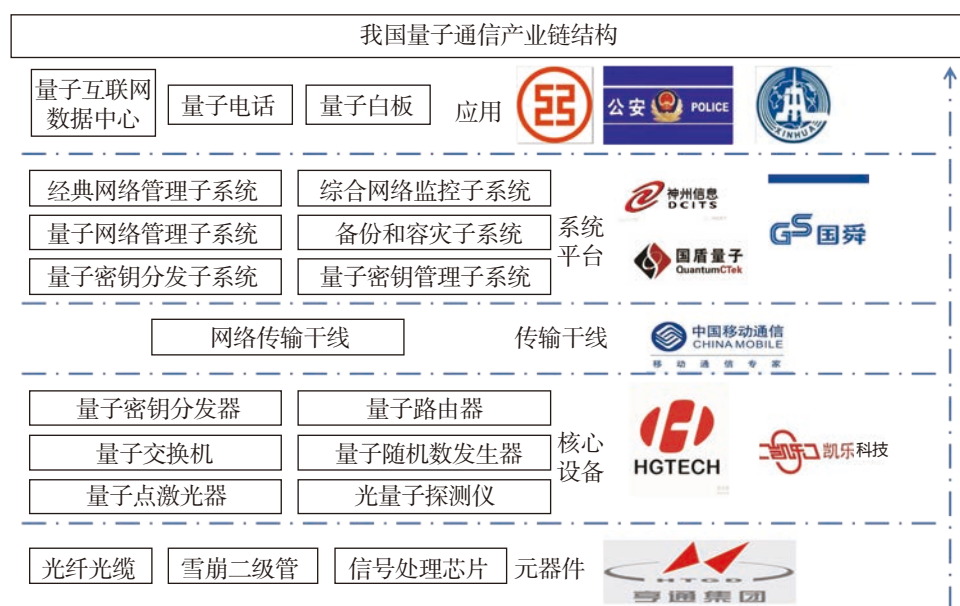


图6 我国量子通信产业链结构

行业的应用^[8]，例如阿里巴巴与中国科学技术大学合作，推出了首款商用量子加密终端。

应该看到，随着我国量子通信产业化进程加快，发展的不确定性大幅提高，将面临创新资源、技术路径选择、市场规则和普及等多方面挑战。

一是创新资源的挑战。我国量子通信产业化发展进程处于世界领先地位，但是基础理论研究较美、欧仍有差距。因此对科技要素的关注既要聚焦基础理论，又要重视工艺创新、产品开发等环节，这对人力物力的投入都提出更大需求。量子通信产业化的高风险使得民间资本多持观望态度，同时我国量子信息科学和工程领域的人才也相对匮乏。

二是技术路径选择的挑战。量子通信产业化过程中诸如系统的安全性能，光纤、评测、量子加密技术等很多环节的技术还不够完善，导致了产业化进程中技术路径多样性的特点。我国量子通信产业已经进入“无人区”，过去参考国际上已有的成熟技术路径的模式将无以为继，现有企业在技术领域选择的方法、前瞻性等方面都较为薄弱，需要政府有针对性地提供咨询、培训等公共服务。

三是市场规则的挑战。我国量子应用商业化的指标和标准缺乏，同时该领域创新产品的市场准入也没有相应的技术标准、经验、教训可以借鉴，而这些标准和指标需要建立在大量全新的市场信息和决策知识基础上。此外，在量子技术的产业化进程中将面临大

量新的市场准入、规制等问题，这需要政府加强战略思考，加强决策的科学化，勇于创新 and 变革。

四是市场推广的挑战。量子通信的传输系统造价昂贵，且在目前技术下大规模制造不能很大程度上降低成本。同时国内市场规模有限且分散，普及范围较窄，这些都需要政府在量子通信产业化初期给予产品市场推广更多支持。此外，由于量子通信技术涉及国家安全问题，国际市场的推广面临更多“保护主义”，需要加强政府间协调，搭建基本的合作框架。

4 对策与建议

针对量子通信的领域特殊性及其产业化进程中面临的挑战，政府需要反思已有的体制机制、管理模式，并主动采取措施，收缩治理边界，加强市场规制和创新产品推广，为量子通信产业化提供更多创新资源，发挥引领带动作用。

第一，持续加大公共创新资源支持力度，引导民间资本进入。一是适度增加政府对量子通信领域的创新投入，采取政府和社会资本合作模式推动建设创新中心（研究院）。组织产学研开展协同创新，开发关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术，促进量子信息技术向实体经济的扩散应用。二是完善量子通信人才的引进和培养机制，加快急需紧缺人才的培养和引进，加强高校和科研院所技术转移机构的建设和人才培养，促进知识的双向流动。三

是引导金融资本、民间投资参与产业化进程, 鼓励企业参与或牵头国家(应用)基础研究项目。

第二, 为不同技术路径提供公平的市场竞争机会, 逐步推广量子通信技术。一是考虑改革项目管理方式, 不再过多依靠专家进行技术路径的选择, 而是针对同一目标选取多个研究团队围绕不同技术路径开展“背靠背”研究。二是适度降低市场准入门槛, 允许多种技术路径在市场中试错, 健全市场退出机制^[9]。支持基础的量子信息科学和技术研究, 制定推进量子应用商业发展所必需的指标和标准。三是结合我国社会对信息传递的实际需求以及我国信息行业发展现状, 逐步推广量子通信技术, 制定稳步的推进战略和产业应用计划, 对量子通信设备的制造企业加强政策支持。四是加强量子通信行业的评测技术与相关的规章制度, 结合我国信息安全保障的紧迫需求, 进一步加强通信、密码和安全领域的研究。■

参考文献:

[1] Júnior P R S, Almeida G M A, Lyra M L, et al. Quantum

communication through chains with diluted disorder[J]. *Physics Letters A*, 2019, 383(16): 1 845-1 849.

- [2] 赖俊森. 量子通信应用现状及发展分析 [J]. *电信科学*, 2016 (1): 65-73.
- [3] 王向斌. 量子通信的前沿、理论与实践 [J]. *中国工程科学*, 2018 (6): 87-92.
- [4] 杨秀丽, 赵今明. 量子通信领域专利分析对我国发展的启示 [J]. *中国科技资源*, 2018 (6): 63-72.
- [5] 陈骞. 发达国家和地区量子通信计划动向分析 [J]. *上海信息化*, 2017 (11): 81-83.
- [6] 莫玲. 基于专利分析的欧盟量子通信技术发展现状研究 [J]. *淮北师范大学学报(自然科学版)*, 2015 (3): 102-108.
- [7] 孙柏林. 人类社会正在进入“量子技术”时代 [J]. *自动化技术与应用*, 2019 (3): 1-7.
- [8] 彭小宝, 张宇. 全球量子通信领域专利大数据竞争战略分析 [J]. *科技与法律*, 2018 (5): 62-67.
- [9] 蔡笑天, 李哲, 毕亮亮. 科技体制改革以来企业的科学技术知识配置: 回顾、趋势与展望 [J]. *科学学与科学技术管理*, 2018 (9): 37-46.

The Development Trend and Practice of Quantum Communication Industrialization in China

CAI Xiao-tian, YANG Yang

(Chinese Academy of Science and Technology Development, Beijing 100038)

Abstract: National Medium- and Long-Term Science and Technology Development Plan (2006—2020) for the first time includes quantum communication research in major scientific programs. Quantum communication has attracted a lot of attention from the political, production, and academic circles, and has made a series of major breakthroughs in technology research and application. Currently, the United States, the European Union and China have advantages in the theory and application of quantum communication. Due to the importance of the field of quantum communication for national defense security and the high risk of its industrialization, the three parties are caught in the “Prisoner’s Dilemma” of promoting industrialization. China will face many challenges such as innovation resources, technology path selection, market rules and promotion. The government of China needs to reflect on the existing institutional mechanisms and management models, continue to increase support for public innovation resources and guide private capital to enter. At the same time, it should provide fair market competition opportunities for different technology paths and gradually promote quantum communication technology.

Key words: quantum communication; industrialization; technology life cycle; public policy