

量子信息科学最新发展态势及美国应对举措

乔 健

(中国科学技术部, 北京 100862)

摘 要: 量子信息科学是未来最具颠覆性的新兴科技之一, 世界各国对此均高度关注并在重点领域加大投入。本文简述了量子计算、量子测量与传感、量子通信等量子信息技术领域的发展趋势, 并重点分析了美国联邦政府及企业界的研发布局。美国为应对该领域未来的技术发展提出了加强技术转化、多技术路线并举、加强国家统筹等政策建议, 对我国量子信息科学发展具有一定的借鉴参考意义。

关键词: 美国; 量子信息科学; 研发政策; 颠覆性技术

中图分类号: G327.712 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2017.11-12.004

量子信息科学建立在量子物理特有的原理与现象(如量子叠加、纠缠等)之上, 通过物质和能量的量子特性来实现对信息的获取与处理, 是计算机科学、数学、物理学等学科的综合。量子物理自 20 世纪初问世以来先后孕育出半导体、激光等新技术, 量子信息科学是它带来的又一场革命。目前, 量子信息科学的发展正处于转折点。量子信息科学将改变基础科学和工程的研究方法, 催生新型计算体系结构和技术, 实现全新的基于量子科学的传感、成像、建模和仿真工具, 使通信更加安全可靠。未来, 量子信息科学将催生一系列新兴产业, 对经济社会发展乃至国家安全都将产生重大影响。

美国科技政策研究所 2017 年 8 月出台报告^[1]认为, 美国目前仍是量子信息技术的领导者, 特别是在量子计算领域, 基础研究实力雄厚, 并拥有 IBM、谷歌、微软等科技巨头以及众多活跃的初创企业。但其他国家的进步也十分迅速, 全球竞争激烈。特别是中国在该领域的科研人才与论文发表数量迅速增长, 尤其在量子通信领域成就斐然。世界其他国家和地区也纷纷积极布局: 2016 年, 欧盟宣布了 10 亿欧元的“量子技术旗舰计划”(为期 10 年), 重点在通信、计算、传感和模拟 4 个量子技术领域

加大投入; 英国正在筹建 4 个量子信息研发中心, 在大学和企业之间形成紧密的合作关系, 每年投入超过 2 亿英镑; 加拿大旨在使滑铁卢市成为“量子硅谷”, 2016 年 9 月向滑铁卢大学的量子技术项目投入了 7 600 万美元; 澳大利亚 2016 年国家创新和科学议程投入 5 300 万美元建立公私合作伙伴关系, 推进量子计算的商业应用; 韩国政府与该国最大的通信运营商 SK 电信在全国 5 个研发中心建立了量子密钥分发测试平台, 推进量子通信, 等等。

2017 年 10 月, 美国国会众议院就量子信息科学发展专门举行听证会, 美国著名智库哈得逊研究所也举行论坛, 邀请各界专家探讨量子信息科学发展对科技政策与国家安全的影响。本文综合近期美国各界对量子信息科学发展的关注, 梳理美国联邦政府及企业的研发布局和政策走向, 试图对我国量子信息科学发展起到一定的参考借鉴作用。

1 量子信息科学领域概述

1.1 量子计算

微软高级顾问和前首席研究与战略官克雷格·蒙迪(Craig Mundie)谈到量子计算时称: “这是 70 年来我们首次试图建立一个完全不同的计算系

作者简介: 乔健(1984—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为科技政策及国际科技合作。

收稿日期: 2017-11-02

统，它不是渐进的调整或改善，而是质的不同。”^[2]量子计算利用“量子比特”可处于量子叠加态的特性，对数据进行并行处理，区别于传统计算机必须进行二进制的确定编码。利用量子计算特性编写的量子算法可实现传统计算机无法实现的功能，如Shor算法可快速实现大数的质因数分解，从而攻破目前计算机网络所广泛依赖的RSA加密系统，对全球信息安全带来巨大冲击。

量子计算在模拟分子特性和化学合成方面具有传统计算机无法企及的优势，能够准确地分析大分子的电子结构，而传统计算机对此无能为力。利用量子模拟，科学家可以更有效率地对化合物进行建模和研究，而不必像目前一样依靠反复试验，从而使新材料、制药等领域取得长足进步。量子计算的另一个优势是复杂条件下的最优化。例如，同时考虑到载重、油耗、时间、天气和路况等变量的条

件下，实时确定5 000辆货运卡车的最佳路线对于传统计算机而言是不可能完成的任务，但量子计算机可很快解决这个问题。这一特性对于机器学习算法与人工智能应用将是重要的优势。

量子比特有不同的技术实现路径，目前比较主流的方案如表1^[3]所示。不同的技术方案各有优缺点，均有研究机构或企业在尝试。目前量子计算尚处于研发初期，新的技术路线不断涌现，未来量子比特的最佳实现途径还无法明确，或将根据不同的应用场景采用不同的技术路线。

目前量子计算在理论上已经基本完备，但需要克服环境噪声带来的退相干（De-coherence），并加强纠错能力。量子比特在计算中容易产生错误，因此纠错算法对于量子计算至关重要，而纠错算法需要更多的量子比特。以目前的纠错技术水平，至少需要数万到数百万量子比特的量子处理器才能够

表 1 主流的量子比特技术实现路径

量子比特类型	状态变量	实现材料	操作方法
离子阱	离子自旋	真空电磁场中的原子	激光或振动介导
量子点	电子自旋或能级	低温下的半导体	激光或电场作用
光学电路	光子偏振态或位置	光波导	分光器及光子探测器
超导电路（逻辑门）	磁通量、电荷或电流相	低温超导约瑟夫逊结	电场作用
超导电路（绝热计算）	磁通量	低温超导约瑟夫逊结	电场控制的耦合对

执行重要的任务，显现出比传统计算机明显的优势。

未来，量子计算机将会与传统计算机形成互补，而并不是将其取代。量子计算主要用于处理特定类型的问题，而传统计算机将继续进行大量数据的逻辑运算和控制，量子计算与传统计算的混合体将是最强大的计算系统。

1.2 量子测量与传感

量子测量与传感是量子信息科学中发展最早、最成熟的领域，且与量子计算在技术上有密切的关联。几乎所有为量子计算开发的量子比特材料都可以看作是一种量子传感器。例如，基于氮空位中心（NV Center）可以构建超灵敏磁力仪，基于超导材料可以构建单光子探测器等。

量子测量和传感拥有众多的商业化产品，包括

原子钟、重力计、惯性运动单元、原子磁力计，核磁扫描仪、电子显微镜和量子核自旋成像装置等。许多产品种类已经问世数十年，但量子测量和传感技术为其提供了更高的精确度。量子传感器的灵敏度理论上可以达到量子噪声水平，从而进行极灵敏的测量，如用于地下材料及成分（洞穴、矿物、地下基础设施等）遥感和重力成像，在生物医学中感测近端磁场，在无导航卫星环境中依靠原子钟进行惯性导航等，具有非常重要的应用前景。

1.3 量子通信

光子的量子特性与目前遍布全球的光纤网络决定了光是远距离量子通信的理想选择。量子密钥分发（QKD）通过光量子不可复制的物理原理，来生成和分发加密密钥，从而保护通信网络的安全性，

引起世界各国的高度关注。量子通信还可以采用非量子手段所不可能做到的方法实现新的通信协议，如对量子计算机进行远程安全访问、多方量子通信以进行决策最优化等。

除量子密钥分发外，在量子密码学领域，量子随机数产生器（QRNGs）是基于物理特性实现的一种真正的随机数产生器。与经典的数学方法生成的伪随机数相比，它的随机性得到了物理规律的保障，在密码学及通信领域有许多重要的应用。

2 美国联邦政府的研发布局

美国联邦政府很早就通过多个研发项目支持量子信息科学的基础研究，目前每年资助规模约为2亿美元。2014年10月，美国国家科学技术委员会（NSTC）成立了量子信息科学跨部门工作组，目的是加强对不同部门研发项目的统筹协调。该工作组目前由美国能源部（DOE）、国家标准与技术研究院（NIST）和国家科学基金会（NSF）共同主持，成员还包括国防部、国家情报总监办公室、白宫科技政策办公室等。

2016年，该工作组发布报告《推进量子信息科学：国家的挑战与机遇》^[4]，强调量子科学研究的重要意义，重点布局量子传感与计量、量子通信、量子模拟与计算等重要技术领域，并总结了现存的挑战。美国承担量子信息科学研发的政府机构主要为国家标准与技术研究院、国家科学基金会和能源部，研发计划各有特色。

2.1 国家标准与技术研究院

国家标准与技术研究院在量子信息科学领域的研究始于20世纪90年代早期，开始主要集中于原子钟的研究。因原子钟与量子比特具有很强的相关性，国家标准与技术研究院逐渐扩大研究范围，并于2000年前后正式发起了量子信息研究计划。国家标准与技术研究院在该领域的研究专长主要集中在操纵物质和能量的量子态及其交互，从而制造出超精确的传感与测量工具。因量子测量和传感与量子计算的底层技术密切相关，国家标准与技术研究院在量子逻辑门、量子控制和纠错方法、量子处理器等领域也开展了大量基础研究。

目前，国家标准与技术研究院在原子钟领域的研究仍处于世界前沿，2017年10月国家标准与技

术研究院开发出世界首台精确度可达到 10^{-18} 级别的原子钟，在测量与基于受控量子系统的许多技术领域都有重要应用。国家标准与技术研究院在低温超导材料领域的研究也处于世界先进水平，低温超导材料可进行精确的单光子测量，也可作为实现量子比特的一种方式。2017年1月，国家标准与技术研究院的研究人员将纳米铝振动膜冷却至低于1/5个能量量子的温度，可使传感器更加灵敏，量子比特保存信息更久^[5]。

国家标准与技术研究院的后量子时代密码学研究（PQC）项目是美国在量子信息理论方面的核心计划，重点解决量子计算机对目前广泛应用的RSA非对称加密算法实现破解后面临的安全挑战。据预测，到2031年公用加密算法遭到量子计算破解的可能性将达到50%。自2012年起，国家标准与技术研究院开始进行后量子时代密码学研究领域的研究，并于2016年发布了第一份报告^[6]。2017年，国家标准与技术研究院开始就后量子时代的加密算法进行相关标准制定工作。

国家标准与技术研究院与高校密切合作，建立了多所联合研究中心。国家标准与技术研究院与科罗拉多大学博尔德分校联合成立的美国天体物理联合实验室（JILA）成立于1962年，一直从事量子物理和原子钟的研究，并正在向量子信息科学发展。国家标准与技术研究院与马里兰大学联合成立了两所量子研究中心：联合量子研究所（JQI）于2006年成立，重点从事原子物理、凝聚态物理和量子信息的跨学科研究，从而为量子相干与纠缠的复杂系统工程奠定基础；量子信息与计算机科学联合中心（QICS）成立于2014年，通过量子系统处理、传输和存储信息的研究，补充联合量子研究所的实验和理论工作。

2.2 国家科学基金会

国家科学基金会于2000年前后开始资助各高校与研究机构开展量子信息领域的研究。2005年，国家科学基金会在数学与物理科学学部（MPS）下成立了量子信息科学（QIS）计划，与工程学部（ENG）和计算机与信息科学学部（CISE）合作，支持该领域的跨学科基础研究。2016年共资助项目14项，投资630万美元。此外，2016财年国家科学基金会还通过工程学部的研究与创新前沿

(EFRI) 计划中的先进量子通信信息研究与工程 (ACQUIRE) 项目, 投入了 1 200 万美元用于量子安全通信相关技术的研发。

国家科学基金会在量子信息科学领域的投入主要集中于以下 4 个方面:

一是量子基础, 即在广泛条件下增进对独特量子现象与经典物理系统之间联系的基本理解。该领域的研究包括产生和控制量子纠缠态并对其进行测量、理解并控制量子退相干、系统地研究量子算法的应用范围及其能提供的指数级加速优势、分析和理解量子多体状态 (Quantum Many-body States of Matter) 的基本性质等。

二是量子元素, 即加强科学家在单粒子和多粒子量子系统中测量、建模、控制和利用粒子量子特性的能力。该领域的研究旨在将控制量子现象的能力转化为构建量子系统组件的相关技术, 包括在测量中利用量子叠加 / 纠缠 / 压缩、表征量子噪声并将其最小化、实现量子纠错并进行量化、开发高效的方法来生成和控制量子比特等。

三是量子系统, 即设计和开发可控且可扩展的量子信息处理系统所需的硬件、软件和底层算法。该领域的研究包括明确量子与经典器件的优点和局限性、开发稳定可控与低错误率的可扩展量子电路与系统、为量子传感计算和通信提供编程范例、为量子计算提供可快速原型设计和优化的测试平台、实现跨量子物理与经典物理边界的信息交换、深入研究量子算法的计算复杂性和可计算性等。

四是量子人才, 即大力培养新一代的量子信息科学家、工程师和教育工作者, 形成一支具有全球竞争力的跨学科工作队伍。

2.3 能源部

美国能源部科学办公室是联邦政府开展基础科学研究的重要部门。能源部科学办公室包括先进科学计算 (ASCR)、基础能源科学 (BES)、生物与环境研究 (BER)、聚变能科学 (FES)、高能物理 (HEP) 和核物理 (NP) 共 6 个项目部门, 量子信息科学与每一个部门都息息相关。量子传感、计算、模拟等技术带来的新工具将极大地拓展能源部的基础研究能力。而能源部下属的知名国家实验室所拥有的前沿计算、量子材料、控制系统、同位素和低温技术等方面的基础设施与专业能力也为量

子信息科学的理论建模、原型测试等相关研究提供了独特的平台。

量子信息科学取得进展的关键之一在于量子材料合成, 需要理解在各种平台上合成复杂材料的总体规则, 并掌握量子材料在热力学及动力学方面的稳定特性, 从而有可能在接近室温的环境下形成超导或建立稳定的纠缠态, 以及实现无损耗电荷及自旋输运, 这些研究对于量子计算的最终实现至关重要。上述材料合成和加工的研究大部分在基础能源科学项目部门的研究范围内。特别是基础能源科学部门的纳米科学研究中心 (NSRC) 相关用户设施, 非常适合进行潜在量子比特系统关键材料的制造和测试, 如离子阱、量子点、氮空位复合物、拓扑绝缘体和二维电子气系统等。此外, 核物理项目部门负责的能源部同位素项目正在开发生产千克量级稳定同位素的能力, 这对于新材料的合成及固态量子比特系统的研发 also 具有重要意义。

能源部科学办公室各个项目部门都认识到量子传感与测量在科研中的重要性。例如, 生物与环境研究项目部门正在利用量子计量与成像技术开发更精确的传感器, 应用在大气辐射测量设备中的激光雷达上; 生物与环境研究项目部门还在开发高精度的量子传感器, 实现生物分子的单分子核磁共振。对于高能物理项目部门而言, 为量子计算开发的一些技术也可用于粒子物理实验中的复杂传感器, 高能物理项目部门还使用原子干涉测量和纠缠来发现超越标准模型的未知物理现象。核物理项目部门在实验中使用高效量子点传感器进行光收集以搜索核衰变中的轻子数违规, 以及利用量子效应来精确测量原子核的电偶极矩, 从而寻找违反自然基本对称性的物理现象。

能源部科学办公室在量子纠缠的理论与建模方面开展了深入的基础研究。高能物理项目部门已经阐明了量子场和信息纠缠之间的关系, 并建立了张量网络为理解场、粒子及其相互作用提供了新模型, 在量子色动力学 (QCD) 分析中引入散射动力学的新量子算法。通过理论上的努力, 纠缠系统中的退相干现象有望得以理解。先进科学计算项目部门计划与其他项目部门合作开发用于建模和仿真的工具和算法, 用来理解不同系统中的量子纠缠。2017 年 4 月, 先进科学计算项目部门的研究人员

在劳伦斯伯克利国家实验室的国家能源研究计算中心（NERSC）成功运行了有史以来最大（45 量子比特）的量子计算机仿真。

能源部在量子算法研究领域也进行了相关部署。先进科学计算项目部门于 2017 年 5 月面向能源部各国家实验室发布了量子算法团队（QATs）项目计划，通过关注科学办公室共同感兴趣的研究领域相关问题，提出量子计算的解决方案，发展关于量子模拟和量子机器学习算法的早期研究。2017 财年，由劳伦斯伯克利国家实验室、橡树岭国家实验室和桑迪亚国家实验室分别领导的 3 个跨学科团队获得资助。

2017 年 5 月，能源部先进科学计算项目部门面向各国家实验室发起一项量子测试床计划，通过共同设计开发适合于量子计算的硬件及软件应用平台，建立标准化的测试环境，以评估相干性保持、纠缠程度和其他量子计算的关键标准。除了对单个设备进行基准测试外，量子测试床还可以在不同设备之间进行比对，有助于加快量子计算架构和高质量软件的开发。最终，劳伦斯伯克利国家实验室和橡树岭国家实验室领衔的两个团队获得资助。

能源部还与其他联邦机构在量子信息科学领域进行着密切的交流与合作。能源部科学办公室先进科学计算项目部门与国防部、情报高级研究项目局（IARPA）等机构在量子计算领域进行了深入合作，重点利用能源部先进的高性能计算资源及解决特定计算问题的能力，与国家科学基金会的自由探索式基础研究形成互补。高能物理项目部门也同国防部、国家标准与技术研究院等机构在基础量子信息、纠缠与传感等领域开展协调与合作。

3 企业界技术发展现状

因为量子计算巨大的潜在应用价值，包括 IBM、谷歌、微软、英特尔、霍尼韦尔、休斯和诺斯罗普·格鲁曼等公司在内的美国科技与军工巨头纷纷在此领域大举投入。商用量子计算采用不同的技术路线，大多数企业重点研发基于逻辑门的量子计算，目前已取得了一些阶段性成果，但距离功能强大的通用量子计算仍相距甚远。其中 IBM 基于低温超导电路开发量子比特，微软采用拓扑量子计算路线努力提高容错率，英特尔专注于硅量子点技

术。而以 D-Wave 为代表的公司已在量子退火等专用计算领域推出了较为成熟的产品与应用。

IBM 是量子计算商业化的领先企业。2016 年 5 月，IBM 公司基于低温超导技术率先在业界推出可商用的通用量子计算机 IBM Q，并通过云计算向公众提供服务。IBM Q 最初只能实现 5 量子比特，但 2017 年 11 月宣布已经发展到 20 量子比特，并开发出 50 量子比特的原型机^[7]。与 10 年前相比，IBM 已使量子比特相干时间延长 100 余倍，达到 90 微秒，并在检测量子计算机的两种误差（比特翻转和相位翻转）方面取得了突破。量子纠错是构建实用可靠的大型量子计算机的关键，否则单纯增加量子比特是无法大幅提高计算能力的。IBM 认为，全球企业界几年内就将体验到量子计算带来的卓越性能。

D-Wave 公司于 1999 年在加拿大温哥华成立，是全球首家量子计算公司，专长在于使用量子退火算法处理最优化、机器学习、蒙特卡罗采样、材料科学模拟等问题，在专用量子计算领域取得了突出成绩。量子退火算法（名称来源于经典计算机的退火算法）不需量子纠缠，也不能运行通用量子算法，但可利用量子隧穿效应进行快速最优化求解，是一种专用量子计算方法。D-Wave 公司在美国设立了众多研发中心，目前拥有全球专利 200 余项，客户包括洛克希德·马丁、谷歌、美国国家航空航天局埃姆斯实验室、能源部洛斯阿拉莫斯国家实验室、橡树岭国家实验室等知名公司与机构。2013 年，谷歌和美国国家航空航天局合建的量子人工智能实验室采用的就是 D-Wave 量子计算机。2017 年初，D-Wave 公司推出 2 000 量子比特的计算系统^[8]，计算能力得到了大幅提升。

4 思考与启示

美国虽然在量子信息科学领域占据领先优势，但仍面临着一些挑战，如跨部门研发项目协作不足、教育与劳动力培训欠缺、技术从实验室到市场的转移不畅、国家对量子信息科学的支持不够稳定等。对此，美国政策与学术界围绕以下问题进行了讨论。

（1）加强量子信息科学的商业化应用。量子信息科学最终必须依靠企业的力量才能广泛应用，

而企业研发团队往往来自政府支持的高校科研。如加州大学圣巴巴拉分校（UCSB）的物理学教授约翰·马丁尼斯（John Martinis）自2005年起受国家科学基金会资助开展量子计算研究，2014年9月，其整个研究团队被谷歌聘用，为量子人工智能实验室做出了突出贡献。

但目前量子信息技术在美国公共研发部门和企业之间的转化存在许多障碍：学术机构和政府实验室往往缺乏系统工程和产品开发领域的经验，而私营企业中受过专门培训的量子工程人员甚为稀缺。此外，由于量子信息技术尚未得到大量应用，创新生态系统没有形成，中小企业创新者难以在未开发的市场上生存。政府应通过各种方式加强人员交流与合作，培育量子创新生态系统，并加强技术转化。

（2）多技术路线并举。量子信息科学的物理基础涉及若干种实现方式及技术路线，如光子、原子、固体晶格杂质和超导电路等。这些技术路线中的每一种都有其适合于某种特定应用的优点，但同时也存在若干缺陷。因此，目前应考虑多条技术路线并行的不确定性，同时发展每个技术平台所必须的技术工具，如芯片上光波导电路的制造、超导电路集成、超高真空环境和超低温器件等，避免提前锁定单一的技术路线，造成技术误判。

（3）加强国家统筹。美国是世界上量子信息技术的领军国家，政府通过多种渠道资助基础研究，私营公司大力介入推动新兴技术商业化，与此同时，全球其他国家也日益重视量子信息领域，并纷纷出台国家计划大举投资。在这种情况下，美国不断有人呼吁出台国家量子计划，以统筹协调各部门的现有资源，并调动全社会的力量；但也有人担心不当的政策制定可能对私营部门的研发投入形成挤出效应。目前，美国各界对于进一步在量子信息科学领域加强研发投入的讨论十分热烈，很可能形成新的国家级科技战略。

近年来，我国高度重视量子信息科学的研发投入，在量子通信等部分学科领域取得了突出成果，对发达国家形成了赶超之势，但仍面临着发展不充分、不平衡的问题。在本次全球性的量子信息革命浪潮中，我国应在战略上保持高度重视，密切关注

美国等发达国家的科技动态与政策走势，优化研发布局，加强国际交流与合作，争取在新兴的量子信息国际竞争中占据先机。■

参考文献：

- [1] Science and Technology Policy Institute. Assessment of the Future Economic Impact of Quantum Information Science[R/OL]. [2017-10-14]. <https://www.ida.org/idamedia/Corporate/Files/Publications/STPIPubs/2017/P-8567.ashx?la=en&hash=39F1209EEC67E58226D6744EEE37703E94CA08A9>.
- [2] Shirley Siluk. Microsoft unveils programming language for quantum computing[EB/OL]. [2017-10-14]. https://www.cio-today.com/article/index.php?story_id=12000AP7WDEO.
- [3] Rodney Van Meter, Clare Horsman. A blueprint for building a quantum computer[EB/OL]. [2017-10-14]. <https://cacm.acm.org/magazines/2013/10/168172-a-blueprint-for-building-a-quantum-computer/fulltext>.
- [4] NSTC. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities[R/OL]. [2017-10-14]. https://www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Quantum_Info_Sci_Report_2016_07_22%20final.pdf.
- [5] Laura Ost. NIST physicists "Squeeze" light to cool microscopic drum below quantum limit[EB/OL]. [2017-10-14]. <https://www.nist.gov/news-events/news/2017/01/nist-physicists-squeeze-light-cool-microscopic-drum-below-quantum-limit>.
- [6] NIST. Report on Post-Quantum Cryptography[R/OL]. [2017-10-14]. https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/nistir/8105/final/documents/nistir_8105_draft.pdf.
- [7] Will Knight. IBM raises the bar with a 50-qubit quantum computer[EB/OL]. [2017-10-14]. <https://www.technologyreview.com/s/609451/ibm-raises-the-bar-with-a-50-qubit-quantum-computer/>.
- [8] D-Wave Systems Inc. D-Wave announces D-Wave 2000Q quantum computer and first system order[EB/OL]. [2017-10-14]. <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave%20announces%20d-wave-2000q-quantum-computer-and-first-system-order>.

（下转第24页）

- [5] Twago. Über twago[EB/OL]. [2017-09-10]. <https://www.twago.de/blog/ueber-twago/>. iK7o1gIVhDTCh2cpwsIEAAYASAAEgIFwPD_BwE.
- [6] Jovoto. Here's how it works[EB/OL]. [2017-09-10]. <https://www.jovoto.com/how-it-works/#1458124890937-edf3952a-6493>. [8] Innosabi. Das schreibt die Presse über uns[EB/OL]. [2017-09-10]. <https://innosabi.com/unternehmen/crowdsourcing-presse/presse-ueber-innosabi>.
- [7] Mylittlejob. So funktioniert's[EB/OL]. [2017-09-10]. <https://www.mylittlejob.com/?gclid=EAIaIQobChMI19L4> [9] Clickworker. Das Clickworker-Prinzip[EB/OL]. [2017-09-10]. <https://www.clickworker.de/so-funktioniert/>.

Development and Trend of Crowdsourcing Platform in Germany

WANG Jin-hua

(Beijing Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Beijing 100036)

Abstract: Germany is a later starter in developing crowdsourcing platform than the United States. Although Germany still does not have a specific crowdsourcing platforms for the scientific and technological tasks, some crowdsourcing platforms including the scientific research are developing rapidly. Platforms like clickworker, twago and jovoto provide flexible and diverse crowdsourcing solutions to business, social, scientific, and technical problems and are becoming much useful complements for German innovation. Main operational modes, characteristics, development trends and some management challenges of German crowdsourcing platforms are outlined in this paper, respectively, which are expected to be used for reference in China.

Key words: Germany; crowdsourcing platform; scientific research crowdsourcing; operational mode

(上接第20页)

The Status of Quantum Information Science in America and Its Response Measures

QIAO Jian

(Ministry of Science and Technology of China, Beijing 100862)

Abstract: Quantum Information Science (QIS) is one of the most disruptive emerging science and technology fields in the future, to which countries around the world pay great attention and make heavy investment. This paper describes the trends of QIS, such as quantum computing, quantum measurement and sensing, quantum communication, and focuses on the R&D layout of the U.S. federal government and the business sectors. The United States has proposed some policy suggestions on strengthening the technology transfer, simultaneously promoting multi-technology routes and enhancing national coordination in response to the future technological development, which could shed some lights on the development of quantum information science in China.

Key words: U.S.; Quantum Information Science; R&D policy; disruptive technology