

6-4-2020

Development and Future Trend of Computer Simulation and Quantum Computer Simulation

Wenhui Fan

1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; ;

Jiahui Wu

2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Development and Future Trend of Computer Simulation and Quantum Computer Simulation

Abstract

Abstract: The development status of computer simulation in America and the development status of computer simulation in China were summarized; On the base of the comprehensive analysis of the development of quantum computing, *the quantum computer based simulation (QCBS) was proposed, and the research fields of quantum computer based simulation were given including simulation modeling theory, simulation system and simulation application of QCBS*; The application prospects of QCBS, such as applying in intelligent simulation, virtual simulation, parallel simulation and cloud computation based simulation, were proposed.

Keywords

computer simulation, quantum computer simulation, quantum computer, quantum computation

Recommended Citation

Fan Wenhui, Wu Jiahui. Development and Future Trend of Computer Simulation and Quantum Computer Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(6): 1161-1167.

计算机仿真发展现状及未来的量子计算机仿真

范文慧¹, 吴佳惠²

(1. 清华大学自动化系, 北京 100084; 2. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: 综合分析了美国基于仿真的工程与科学的三个战略报告与我国的仿真科学与技术学科发展报告, 指出了我国计算机仿真技术方面存在的不足与差距; 分析了量子计算的优缺点, 提出了将对电子计算机仿真产生根本改变的基于量子计算机的仿真即量子计算机仿真, 给出了量子计算机仿真的三个研究方向, 即基于量子计算机仿真的仿真实论、仿真系统与仿真工程; 展望了量子计算机仿真在智能仿真、虚拟仿真、平行仿真与云仿真方面的应用前景。

关键词: 计算机仿真; 量子计算机仿真; 量子计算; 量子计算机

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 06-1161-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201706001

Development and Future Trend of Computer Simulation and Quantum Computer Simulation

Fan Wenhui¹, Wu Jiahui²

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumchi 830047, China)

Abstract: The development status of computer simulation in America and the development status of computer simulation in China were summarized; On the base of the comprehensive analysis of the development of quantum computing, the quantum computer based simulation (QCBS) was proposed, and the research fields of quantum computer based simulation were given including simulation modeling theory, simulation system and simulation application of QCBS; The application prospects of QCBS, such as applying in intelligent simulation, virtual simulation, parallel simulation and cloud computation based simulation, were proposed.

Keywords: computer simulation; quantum computer simulation; quantum computer; quantum computation

引言

计算机仿真伴随着新一代信息技术的发展而飞速发展, 如分布式仿真、云仿真、嵌入式仿真、高性能仿真、普适仿真、服务仿真等。计算机仿真已经成为像数学一样的通用工具, 也是解决某些重

大疑难问题无法替代的方法。美国已经提出仿真科学与工程, 计算机仿真正向独立学科方向发展; 中国已经提出仿真科学与技术, 也正向独立一级学科大踏步前进。随着量子计算技术的发展, 以及量子计算机的逐步实现与实用化, 量子计算机仿真时代一定会到来。

1 计算机仿真发展现状

1.1 美国计算机仿真发展现状

2004年4月美国自然科学基金委员会发布了



收稿日期: 2017-02-08 修回日期: 2017-02-13
基金项目: 国家自然科学基金(51575469);
作者简介: 范文慧(1966-), 男, 吉林松原, 博士, 教授, 研究方向为复杂系统建模与仿真; 吴佳惠(1994-), 女, 河南安阳, 本科生, 研究方向为计算机仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1161 •

《基于仿真工程科学》(Simulation based Engineering Science)报告^[1], 指出现代计算机仿真方法取得了巨大的成功, 在提高仿真效用、保真和可靠性方面有着巨大的潜力, 已经逐步形成了一个新的学科即仿真工程科学(Simulation based Engineering Science, SBE&S), 给出了五个潜在的基于仿真工程科学的应用领域, 包括医药、国土安全、能源与环境、微小传感器与设备。

2006 年 5 月美国自然科学基金委员会发布了《基于仿真工程科学-通过仿真实现工程科学革命》(Simulation Based Engineering Science Revolutionizing Engineering Science through Simulation)报告^[2], 指出计算机仿真是解决我国面临的大量科学与技术问题的一个不可或缺的工具, 以及计算机仿真面临的机会和挑战。

美国世界技术评估中心(World Technology Evaluation Center, WTEC)联合美国国家自然科学基金委员会等六家单位, 历时两年, 调研了欧洲、亚洲、美国近 60 家与仿真科学与工程相关的研究和开发企业和机构(大学), 于 2009 年 4 月发布了《基于仿真的工程科学的研究与开发国际评估报告》(International Assessment of Research and Development In Simulation based Engineering and Science)^[3], 报告的目标是分析欧洲、亚洲、美国仿真科学与工程研究机构与企业的仿真研究与开发现状, 确定美国计算机仿真技术是否仍然处在主导地位。

WTEC 评估报告^[3]给出了 SBE&S 的定义, 是建立工程或自然系统的计算机虚拟模型并求解为此而建立的数学模型的一门跨学科的工程科学; SBE&S 是传统的理论和实验、观察支柱的坚实补充; 今天计算机仿真在人类历史比其他任何时候都更普遍、更有影响; 在许多科学研究与研发领域已经离不开计算机仿真的支持。报告也指出, 由于其他国家对计算机仿真技术非常重视甚至作为国家战略, 而美国一贯对 SBE&S 重视不够, 政府没有大力支持, 可能会导致美国计算机仿真技术落后于

其他国家, 从而影响美国在全球的竞争力。美国担心欧洲、日本、印度和中国在仿真科学与工程方面超过美国, 可能影响他们在仿真领域的地位。

WTEC 评估报告^[3]给出了计算机仿真未来发展方向: 先进计算机仿真硬件、高性能仿真算法、白领仿真软件(如在集群计算机上的高端应用)、蓝领仿真软件(由普通科研开发人员使用); 仿真数据一致性; 仿真校验、验证与不确定量化分析; 多尺度(多粒度)仿真; 大数据驱动的仿真等。

2010 年 4 月美国 WTEC 发布了《通过科学、工程与医药领域的创新与发现创造一个新美国-未来十年基于仿真的工程科学研究与开发展望》(Inventing a new America Through Discovery and Innovation In Science, Engineering and Medicine-A Vision for Research and Development in Simulation based Engineering and Science in the Next Decade)^[4], 目标是在美国工业界广泛采用 SBE&S, 建立可持续仿真软件的创新、动态开发和管理的基础设施。报告建议美国政府采取多层次国家级的投资决策, 包括提供长期(每个 5 年以上)单个和小群体资助、创立长期资助跨学科(领域的科学家、计算科学家和数学家)协作团队、构建大规模虚拟研究所/中心负责开发特定的 SBE&S 领域共享代码、提供 10 个长期(每个 10 年)大挑战的公私合作的项目资助、建立杠杆项目促进学术界和行业合作、建立 20 多个 SBE&S 跨学科研究所(数据与软件)、40 多个 SBE&S 跨学科研究中心等。

1.2 我国计算机仿真发展现状

SBE&S 是用计算机建立客观对象或人造系统的虚拟模型并通过求解该模型进行系统分析与研究的一门交叉工程科学, 是科研人员与工程师的必不可少的计算工具^[5]。

2007 年开始中国仿真学会提出了仿真科学与技术学科, 并进行了大量研究; 于 2010 年 4 月发表了《2009-2010 仿真科学与技术学科发展》报告^[6], 报告给出了仿真科学与技术的定义, 通过分析可

知, 计算机仿真科学与技术是以计算理论为基础, 建立并利用数学模型, 以计算机为工具, 对系统进行分析与研究的一门综合性、交叉性学科; 指出了随着科学研究和社会发展所面临的问题复杂程度的加深, 计算机仿真具有其他学科难以替代的求解高度复杂的科学与工程问题的能力; 报告明确提出仿真与高性能计算一起, 正成为与理论研究、实验研究并列的第三种科学研究手段^[6]。

学科发展报告总结指出我国计算机仿真技术发展很快, 在理论与实际应用方面都取得了很大进展。在基于 agent 的智能仿真和基于 HLA 的分布式网络仿真等方面取得了大量的成果, 复杂大系统建模与仿真得到了高度重视, 尤其是高性能计算仿真、分布网络化仿真算法、并行离散事件仿真算法等方面取得了可喜的成绩; 在国防、科技、经济等应用方面做出了重要贡献。报告指出我国仿真科学与工程将迎来新的发展战略机遇和挑战, 将向数字仿真、虚拟仿真、网络仿真、智能仿真、服务仿真、普适仿真化方向发展。

1.3 与美国计算机仿真研究与开发进展比较

通过比较我国仿真科学与工程与美国仿真科学与工程进展, 可以看出, 在仿真实论、方法、算法的研究方面, 我国研究的主要领域与方向与美国一样, 几乎没有差别; 在关键技术与核心技术上, 我国自主创新成果远没有美国多和显著; 我国复杂大系统或巨系统仿真理论研究水平不落后美国, 甚至在某些点上超过了美国。我国计算机仿真系统与支撑技术研究成果基本达到了美国先进水平, 但我国极其缺乏原创性的仿真软件尤其是在关键工程上应用的大型高端计算机仿真软件。由于实际需求较大, 所以分布式仿真尤其是网络化仿真技术在我国得到了较大发展, 在提出新的体系结构基础上已经研究开发了多个分布式网络化仿真平台。我国虚拟现实(Virtual Reality, VR)与增强现实(Augmented Reality, AR)技术与美国的研究内容没有差别, 但VR&AR技术应用成果较多, 自主创新的成果与美

国仍有较大差距。我国自主提出了云仿真技术, 在这方面的研究已经超过美国同类技术。但是, 云仿真标准和规范还需要进一步完善。在仿真应用工程方面, 仿真科学与工程已经广泛应用于高新技术领域以及众多领域系统研究与开发, 取得了显著的成效。但与美国计算机仿真应用相比, 我国仍然需要扩大应用范围, 加强计算机仿真应用的深度, 同时, 做好培训与教育工作, 让计算机仿真科学与工程得到社会广泛认可。

2 国内外量子计算的研究发展

2.1 国内外量子计算发展战略

美国政府十分重视量子计算, 2016 年 2 月美国能源部(DOE)发布了《量子传感器-基础科学、量子信息科学和计算的交叉点(Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science, and Computing)》报告^[7]; 2016 年 6 月美国国家科学和技术委员会发布了《先进量子信息科学: 国家挑战与机遇(Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities)》报告^[8]; 2016 年 7 月美国白宫科技政策办公室(OSTP)正式发布了《国家战略计算计划战略规划(National Strategic Computing Initiative (NSCI) Strategic Plan)》^[9]。

英国未来 5 年内投入 2.7 亿英镑资助量子技术研究, 重点支持英国国内一流的量子研究, 特别是量子计算研究的实用化。量子模拟的相关技术被列入欧盟地平线 2020 计划中。日本也有类似的集中攻关计划^[10]。

近年来, “超级 973”的国家重大科学研究计划重大科学目标导向项目中列入了固态量子芯片研究, 给予了重点支持, 将会推动量子计算与量子计算机技术在我国的大力发展^[11]; 量子通信已被列入我国“十三五”规划部署的一批体现国家战略意图的重大科技项目中; 量子调控与量子信息也被列入科技部发布的国家重点研发计划首批重点研发专项中^[12]。

2.2 国内外量子计算研究进展

512 量子比特(qubit)“D-Wave Two”量子计算机已被加拿大的世界第一家商业化的量子计算公司 D-Wave Systems 公司开发成功,且已被美国购买并在美国国家航空航天局(NASA)建立了量子计算机实验室^[13]。求解线性方程组的量子算法已被麻省理工学院教授塞斯·罗伊德等提出,利用 GHz 时钟频率的量子计算机求解该线性方程组将只需要 10s^[14]。

美国《自然》(Nature)期刊于 2017 年 1 月发表了一篇综述性文章,说明了 2016 年量子计算机有关进展,并对 2017 年量子计算机方面可能取得的突破进行了预测,预计 2017 年量子计算机将从实验室走进现实^[15];美国《自然》(Nature)期刊于 2016 年 8 月发表了一篇文章,介绍了一款由美国马里兰大学量子信息和计算机科学联合研究所(JQI)研究的可编程小型量子计算机^[16];美国《科学》(Science)期刊于 2013 年 3 月发表一篇文章,阐述了量子计算机离实际应用已为期不远^[17]。

哈佛大学研究人员于 2012 年 8 月使用 D-Wave 解决了蛋白质空间折叠的问题; Google 公司在 2013 年购买了量子计算机进行研究; Google 同加州大学圣芭芭拉分校以及西班牙的高校合作,于 2016 年 6 月开发了一种使用 9 个量子位和超过 1000 个逻辑门的量子计算机; IBM 公司于 2016 年已经公开了量子计算成果,可以在量子计算机上进行实验;微软于 2016 年 11 月宣布将大力开展量子计算机软件与硬件研究与开发,且将研发出可扩展量子计算机^[18]。

我国的中国科技大学、清华大学、国防科技大学、南京大学等单位都开展了大量的量子计算方面的研究工作,中国科技大学潘建伟院士在量子计算机求解线性方程组方面取得了突破性成果。目前,潘建伟院士团队已经实现了十光子纠缠^[19]。但是,我国在量子计算与量子计算机研究与开发方面,与发达国家差距较大,尤其是自主创新成果还很少。

3 量子计算机仿真

3.1 量子计算机仿真的提出

传统的计算机仿真已发展形成了一个像数学一样的通用型综合性学科体系,并正向数字仿真、虚拟仿真、网络仿真、智能仿真、服务仿真、普适仿真方向发展^[6]。目前,连续系统仿真、离散事件系统仿真、复杂系统仿真、并行分布式仿真、云仿真等计算机仿真都是基于传统的经典计算机实现的,包括个人计算机、工作站、集群计算机等,到目前为止速度最快的是基于集群计算机的并行分布式仿真,即高性能计算与仿真。但是,经典计算机是以 0 或 1 作为信息单位,一个比特(bit)只能存储 0 和 1 一个状态,运行时对 bit 的操作,通过逻辑门从一串二进制数变成另一串二进制数,是串行计算模式。而量子计算使用基本单元量子比特(也称量子位, Qbit)来实现并行计算,其不同之处在于它拥有叠加态与纠缠态^[20]。一个量子比特同时可以表示 0 和 1 两个状态,2 个量子比特就可以同时表示 4 个状态,N 个量子位可同时存储 2 的 N 次方个数据,数据量随着 N 呈指数增长。同时,量子计算机操作一次可同时对 2 的 N 次方个数据实现变换,这种并行计算能力等于电子计算机要进行 2 的 N 次方个操作,量子计算是真正的并行运算模式^[21]。电子计算机出现时,算盘是主要的计算工具,计算速度非常慢;在量子计算机面前,经典计算机就是今天的算盘,必将被淘汰^[21]。由于量子计算具有超级运算能力,可以解决经典计算机无法解决的难题,因此,本文提出了基于量子计算机的仿真,解决以往电子计算机仿真无法解决的大量工程和科学研究中的难题。

计算机仿真技术的快速发展,一是受到广泛应用需求的牵引,二是得益于信息技术等相关领域的技术进步对仿真实现手段的有力支持,量子计算与量子计算机必将实用化,计算机仿真技术也必将发生翻天覆地的质变。

3.2 量子计算机仿真的定义及其研究方向

量子计算机仿真是以量子信息理论为基础, 以量子计算机为工具, 根据研究目标, 建立并运行量子计算模型, 并对系统进行认识与改造的过程。量子计算机仿真主要包括量子计算机仿真实论、仿真系统和仿真工程三部分。

(1) 量子计算机仿真实论

量子计算机仿真实论包括量子仿真建模理论、量子仿真算法、量子仿真输出分析理论等。量子计算机仿真是基于量子计算机完成的, 所以, 只有基于经典计算机的建模理论、算法以及输出分析理论得到突破后, 才能发挥量子计算机的优势, 才能真正实现量子计算机仿真的并行计算。

(2) 量子计算机仿真系统

量子计算机仿真系统包括量子计算机仿真软件、量子计算机仿真工具、以及量子计算机仿真资源等。目前有两个开源的量子计算机编程工具 Qbsolv 和 Qasm, 以及两个编程语言, 即命令式编程的 QCL 和函数式编程的 Quipper^[24]。但是, 量子计算机仿真不是直接把量子计算机简单的拿来用, 而是会产生新的量子计算机仿真编程语言、量子计算机仿真专用软件和量子计算机仿真软件平台, 编程模式和仿真软件会发生根本变化。量子计算机仿真系统包括量子计算机仿真系统一般理论、量子计算机仿真系统领域理论、构建量子计算机仿真系统的支撑技术与工具等三个层次的内容。当然, 由于量子计算机还没有实用化, 其计算成本目前难以预计; 所以, 量子计算机仿真的成本也无法估计, 但是, 量子计算机作为革命性的技术, 可以解决经典计算机无法解决的某些重大国家战略问题, 作用将是巨大的, 而且也是无法替代的。

(3) 量子计算机仿真工程

量子计算机仿真工程是应用量子计算机仿真解决实际问题的量子计算机仿真试验运行、可视化、结果分析和评估活动。它包含量子计算机仿真的可信性理论、量子计算机仿真试验设计原理与方法、量子计算机仿真的可视化原理与方法、量子计

算机仿真结果综合分析和评估的理论与方法等。

3.3 量子计算机仿真应用前景

我国仿真科学与工程也将迎来新的发展战略机遇和挑战, 将向数字仿真、高效仿真、网络仿真、智能仿真、服务仿真、普适仿真方向发展, 值得特别关注 10 个方向为网络化仿真、复杂环境仿真、复杂系统仿真、虚拟现实与增强现实、高性能计算与仿真、嵌入式仿真、智能仿真、普适仿真、数据驱动的仿真、虚拟样机与数字化工厂^[6]。本文选择智能仿真、虚拟仿真、平行(嵌入式)仿真、云(网络化)仿真四个研究方向展望了量子仿真的应用前景。

1. 智能仿真

很多大型的科研与工程难题通过经典的计算机进行复杂计算解决需要耗费大量的时间和资源, 甚至上万年都无法完成^[22], 而量子计算机仿真解决此类问题可能只需要短短几秒钟的时间; 传统计算机仿真可能无法解决智能仿真中的数据库搜索 NP 问题, 而量子计算机仿真轻松完成加速搜索。因此, 量子计算机仿真将是未来智能化仿真技术突破的核心技术, 将应用于智能交通、智能制造、智慧城市、人脑仿真等领域。

2. 虚拟仿真

传统计算机无法计算出来的数学模型, 量子计算机却可以用超级速度、以高级计算精度来实现求解, 为解决科学研究和工程实际应用难题问题提供了有力的工具^[22], 因此, 可以利用量子计算机仿真创造一个与客观物理世界一致的虚拟世界, 解决在持续研究虚拟环境可信度以及虚拟模型的精确性、完整性中, 遇到计算与信息呈现的实时性瓶颈问题, 可以应用于分子动力学蛋白质折叠仿真, 天气预报、药物研发、探索太空、核仿真等。

3. 平行仿真

平行仿真(在线仿真、共生仿真、嵌入式仿真)是将虚拟仿真系统嵌入到真实系统中, 通过与真实系统中各子系统的交互完成实时运行监控、信息可视化、调度、管理、辅助决策、训练、测试和评估等功能^[6]。平行仿真系统需要高速进行仿真解算,

才能实时分析、预测、诊断被控制对象的运行状态。量子计算机仿真可以在短时间内分析大量的数据，快速解算，可用于无人驾驶飞行器、无人驾驶汽车、人工社会、军事仿真等领域。

4. 云仿真

量子计算机的计算速度将比目前世界上最快的超级计算机快数十亿倍，其并行机制与云计算并行计算机理完全不同，其计算速度也将是云计算的数亿倍^[23]。云仿真是李伯虎院士提出的一种通过网络、云计算平台，按用户需求组织网上仿真资源(仿真云)，为用户提供各类仿真服务的一种新的仿真方法^[6]。量子计算机仿真与云仿真结合将会是计算机仿真领域内一种颠覆性的革命。

4 结论

计算机仿真具有其他学科难以替代的求解高度复杂的科学与工程问题的能力，计算机仿真已经成为与理论、实验同等重要的科学研究方法^[6]，仿真科学与工程学科已经形成，计算机仿真未来的发展将向着智能化、虚拟化、平行化和网络化方向发展。

量子计算研究尚在理论研究阶段，量子计算机要想实用仍有很长的路要走，但是，量子计算机一旦应用于实际，将给科学研究与工程开发带来革命性的变革^[23]。量子计算机已有各种原型机出现，从经典计算过渡到量子计算是计算机科学与技术发展的必然趋势。

量子计算机仿真是以量子信息理论为基础，不是以电子信息理论为基础；是以量子计算机为工具，不是以电子计算机为工具；是建立量子计算模型，不是电子计算模型。量子计算机仿真将在智能仿真、虚拟仿真、平行仿真和云仿真等方面得到广泛应用。

量子计算机仿真一旦实现将是真正的并行仿真，将极大的减少仿真时间并提高仿真的精确性，将是对计算机仿真经典理论、技术与方法的彻底挑战，也是一场根本性的革命。

参考文献:

- [1] National Science Foundation of America. Simulation Based Engineering Science [R]// A Report on a Workshop Held Under the Auspices of the National Science Foundation. USA: National Science Foundation of America, 2004.
- [2] National Science Foundation of America. Simulation Based Engineering Science-Revolutionizing Engineering Science through Simulation [R]// Report of the National Science Foundation Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science. USA: National Science Foundation of America, 2006.
- [3] World Technology Evaluation Center. International Assessment of Research and Development in Simulation based Engineering and Science [R]// World Technology Evaluation Center (WTEC), Inc. Panel Report. USA: World Technology Evaluation Center, 2009.
- [4] World Technology Evaluation Center. Inventing a New America through Discovery and Innovation in Science, Engineering and Medicine-A Vision for Research and Development in Simulation based Engineering and Science in the Next Decade [R]// World Technology Evaluation Center (WTEC), Inc. Report. USA: World Technology Evaluation Center, 2010.
- [5] 庄茁. 适应全球化的基于仿真的工程与科学 [J]. 中国制造业信息化, 2009, 12(24): 58-60. (Zhuang Zhuo. Engineering and Science based on Simulation for the World [J]. China Manufacturing Informatization, 2009, 12(24): 58-60.)
- [6] 中国仿真学会. 2009-2010 仿真科学与技术学科发展报告 [R]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010. (China Simulation Federation. 2009-2010 Simulation Science and Technology Development Report [R]. Beijing, China: China Science and Technology Press, 2010.)
- [7] Department of Energy (DOE) Office of Science (SC). Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science, and Computing [R]// Report of the DOE Roundtable. USA: Department of Energy Office, 2016.
- [8] Interagency Working Group on Quantum Information Science of the Subcommittee on Physical Sciences. Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities [R]// A Joint Report of The Committee on Science and Committee on Homeland and National Security of the National Science and Technology Council. USA: Committee on Science and Committee on Homeland and National Security, 2016.

- [9] White House Science and Technology Policy Office (OSTP). National Strategic Computing Initiative Strategic Plan [R]// National Strategic Computing Initiative Executive Council. USA: White House Science and Technology Policy Office, 2016.
- [10] 陈平形, 吴伟, 吴春旺, 等. 量子计算的研究现状和发展动向 [J]. 国防科技, 2014, 35(6): 3-6. (Chen Pingxing, Wu Wei, Wu Chunwang, et al. Research Status and Development Trend of Quantum Computation [J]. National Defense Science and Technology, 2014, 35(6): 3-6.)
- [11] 郭光灿. 量子计算机: 决胜 21 世纪的利器 [N]. 8 版. 人民日报海外版, 2012. (Guo Guangcan. Quantum Computer: The Tool to Win in the 21st Century [N]. Version 8. People's Daily Overseas Edition, 2012.)
- [12] 周慧. 量子信息跻身国家战略性项目 [N]. 21 世纪经济报道, 2016. (Zhou Hui. Quantum Information among the National Strategic Projects [N]. 21st Economics Report, 2016.)
- [13] 陈骞. 美国量子计算研发动向 [J]. 上海信息化, 2016 (1): 83-85. (Chen Qian. Trends in Quantum Computing Research and Development [J]. Shanghai Informatization, 2016 (1): 83-85.)
- [14] 杰拉德·密尔本. 费曼处理器: 量子计算机简介 [M]. 郭光灿, 等译. 南昌: 江西教育出版社, 1999. (Steven Gerrard. Feynman Processor: Introduction of Quantum Computer [M]. Guo Guangcan, et al translated. Nanchang, China: Jiangxi Education Press, 1999.)
- [15] Davide Castelvecchi. Quantum computers ready to leap out of the lab [J]. Nature (S0028-0836), 2017, 541(1): 9-10.
- [16] S Debnath, N M Linke, C Figgatt. Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits [J]. Nature (S0028-0836), 2016, 356(4): 63-67.
- [17] Ady Stern, Netanel H Lindner. Topological Quantum Computation from Basic Concepts to First Experiments [J]. Science (S0036-8075), 2013, 339(3): 1179-1184.
- [18] Everett. 谷歌采购首款量子计算机 [N]. 腾讯科技, 2013. (Everett. Google Procurement of First Quantum Computer [N]. TENGXUN Technology, 2013.)
- [19] 喻思彦. 中国量子计算机突破: 10 秒匹敌超级计算机几百年 [N]. 人民日报, 2013. (Yu Siluan. China Quantum Computer Breakthrough: 10 Seconds are equal to Hundreds of Years Supercomputer [N]. People's Daily, 2013.)
- [20] 张文科. 量子计算的魅力 [J]. 中国经济报告, 2016(2): 116-117. (Zhang Wenzhuo. Charm of Quantum Computing [J]. China Economic Report, 2016(2): 116-117.)
- [21] 梁敏. 量子计算为 HPC 带来突破 [N]. 13 版. 电脑报, 2013. (Liang Min. Quantum Calculations Bring Breakthrough to HPC [N]. Version 13. Computer News, 2013.)
- [22] 陈洪光, 沈振康. 量子计算及量子计算机 [J]. 光电子技术与信息, 2003, 16(2): 5-8. (Chen Hongguang, Shen Zhenkang. Quantum Computation and q Quantum Computer [J]. Photoelectron Technology and Information, 2003, 16(2): 5-8.)
- [23] 彭新华. 破解量子计算科学之美 [J]. 科技导报, 2016, 34(11):99-99. (Peng Xinhua. Discovering the beauty of Quantum Computing Science [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(11): 99-99.)
- [24] 麻省理工科技评论. D-Wave 开源量子编程软件, 无需掌握量子物理就可编程 [N]. 搜狐科技, 2017. (MIT Technology Review. D-Wave Open Source Quantum Programming Software, Programmable without Quantum Physics [N]. Sohu Science & Technology, 2017.)