

量子金融白皮书

安徽省量子计算工程研究中心（筹）

合肥本源量子计算科技有限责任公司

二〇二二年八月

前 言

量子计算作为现代科学技术探索的最前沿，在推动生产力发展和科技进步中发挥着重要的作用。近年来量子计算硬件指标不断突破，技术路线百花齐放，软件算法层出不穷，量子金融领域的实践日益增多，产业规模不断壮大，全球竞争也愈发激烈。

为全面掌握量子计算在金融领域的最新现状，把握未来量子金融的发展方向，安徽省量子计算工程研究中心组织专家力量，编撰形成了《量子金融白皮书》。在详细梳理量子金融的总体现状，围绕政策支持、技术进步、产业现状、应用现状等细分领域逐一展开分析的同时，针对量子金融发展面临的挑战、未来趋势及对策给出精准分析和建议。

国内量子金融的发展离不开政用产学研多方面的支持和积累，本书的内容积累离不开对各行业、各机构素材的收集，感谢以中科院、中科大为代表的高校为产业发展提供了核心的技术支持和人才培养，感谢以建设银行建信金科、中信银行、工商银行、华夏银行龙盈科技、光大银行、民生银行、中金公司等金融机构在量子计算技术初期做出的尝试和场景探索，同时感谢以光子盒，量子客等为代表的第三方机构为量子计算技术普及和行研做出的贡献，特此鸣谢。

白皮书虽经过研究人员的严谨思考和不断完善，但由于能力和水平所限，疏漏和不足之处在所难免，敬请广大读者和专家批评指正，我方也会积极进行材料的更新和优化。

目 录

前 言.....	1
一、量子金融的总体现状.....	1
二、量子计算的政策支持.....	2
（一）各国政府密切关注，支持政策力度加大.....	2
（二）参与国家日益增多，跨国合作不断增强.....	5
（三）政策目标多元导向，覆盖技术人才产业.....	5
三、量子计算的技术进步.....	7
（一）各种技术路线百花齐放.....	7
（二）硬件关键指标屡获突破.....	10
（三）软件配套更加丰富实用.....	12
四、量子金融的产业现状.....	20
（一）资本市场表现活跃，投融规模不断增加.....	20
（二）创业公司不断涌现，行业领军登陆纳指.....	20
（三）金融机构高度关注，强强合作成果频出.....	22
（四）产业链现融合趋势，全栈式公司成主流.....	28
五、量子金融的应用现状.....	29
（一）算法研究更加深入.....	29
（二）行业场景更加全面.....	38
（三）产品形态更加多样.....	52
六、量子金融面临的挑战.....	56
（一）硬件性能仍待提高.....	56

(二) 量子纠错亟待解决	56
(三) 金融安全面临挑战	56
(四) 产业落地尚有距离	56
(五) 量子金融人才稀缺	57
七、量子金融展望与建议	58
(一) 建设自主可控的量子计算全产业链	58
(二) 构建内外结合的量子金融科技生态	58
(三) 挖掘量子计算的实际金融应用场景	59
(四) 关注量子计算与普惠金融结合实践	59
(五) 加快量子计算与金融复合人才培养	60
参考文献	62



一、量子金融的总体现状

各国政府密切关注，支持政策日益增多。近年来，量子信息科技的全球竞争步伐日益加速，世界主要国家和地区已纷纷把发展量子科技提升到国家战略的高度。各国一方面从本国实际出发相继出台了一系列支持和促进量子科技发展的相关产业政策，另一方面不断加大对量子信息技术的资金投入以支持量子科技的研究与发展。

纵观近年来的国内外量子信息科技政策，许多国家纷纷制定了全局性、高层次的量子科技国家战略，并联合多部门多措并举促进量子科技研发与产业化落地转型。量子科技政策创新逐渐与产业发展齐头并进，量子技术、人才与产业政策三者协同发展是未来的趋势，加强技术合作是各国政策的重要方向。

硬件技术取得突破，算法软件迭代加速。目前主流的量子计算处理器硬件技术路线存在超导、离子阱、半导体量子点、光量子、中性原子以及量子拓扑等几个方向。每种路线各有其优劣势，且目前仍处并行发展和开放竞争状态，尚未出现技术路线融合收敛趋势。量子计算软件能够帮助用户轻松地执行量子计算机编程并输出结果，并且随着量子计算机硬件技术的成熟而不断发展。目前，全球范围内多种量子计算软件并举研发而且迭代活跃。

资本市场表现活跃，社会关注持续上升。国内外的金融业巨头对量子金融寄予厚望，与各高校、科研院所、量子计算公司进行了广泛密切的合作。在资本市场上，量子计算相关的软硬件公司亦获得了大量政策资金、产业资本和风险投资者等的青睐，相关的初创公司数量和融资规模不断增加，一些领先的量子计算公司也开始陆续在纳斯达克上市。

金融应用更加丰富，产品形态更加多元。量子金融的应用和产品更加丰富多元，从原始的算法验证程序，到具有相对完整功能和界面的金融产品，再到可以云端访问的云服务和面向移动端的APP，甚至升级为面向金融科技和交易从业者的专业程序开发工具。

距离实用尚有距离，技术人才还需培养。量子硬件的关键性能指标还有很大的进步空间，量子纠错仍未完全实现，量子算法的实用化仍然面临挑战。此外，量子计算人才，特别是量子金融复合人才仍然稀缺，需要培养。

二、量子计算的政策支持

（一）各国政府密切关注，支持政策力度加大

近年来，各国政府对量子信息科学特别是量子计算高度关注，量子信息科学的相关政策频繁出台。其背后的原因主要包括以下两点：

一、在科学技术层面：自量子力学诞生以来，量子信息科学经过了长期的发展和演变，基础学科的重要突破为技术的利用提供了坚实的理论基础；经过各国科学家的长期研究努力，量子计算所需要的各项工程技术也取得了长足的进步，稀释制冷机、低温超导技术、量子测控技术等的发展为量子计算机的工程化提供了可能；量子计算的相关软硬件发展来到了产生巨大社会经济价值的临界点。

二、在国际竞争层面：国际局势有所升温，大国竞争不断加剧，科技作为第一生产力也成为了大国竞争最重要的领域之一；量子信息科学作为人类科学技术的最前沿和新科技革命的最有潜力的推动性力量，受到各国政府的空前重视。

在量子信息科学飞速发展和国际竞争日益加剧的背景下，世界各个国家和地区，特别是中国和西方科技发达国家纷纷从国家战略层面高度重视量子科技发展，出台了涵盖技术发展、产业扶持、人员培养在内的相关政策。截至 2022 年 6 月的各国政策按照国别汇总如下：

1. 中国

我国高度重视科学技术的发展及其对提高生产力和满足人民日益增长的物质文化需求的重要推动作用。党和国家领导人高度重视量子信息科学的发展。2021 年 5 月 28 日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在出席中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会和中国科学技术协会第十次全国代表大会的讲话中频繁强调量子技的重要性^[1]。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^[2]。

我国政府就发展量子信息科学出台了一系列相关纲领性政策：作为指导中国各方面发展的纲领性文件，《中华人民共和国国民经济与社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要（草案）》中多次提到“量子信息”，“量子计算”和“量子科

技”^[3]；在 2021 年 10 月 20 日，中共中央、国务院印发的《国家标准化发展纲要》中也提出加强量子信息等关键技术领域标准研究，以在国际上拥有量子标准制定的话语权^[4]。

除了以上纲领性文件，国家各部委亦出台了诸多支持量子信息产业发展的配套政策，包括 2021 年 11 月 30 日工信部印发的《“十四五”软件和信息技术服务业发展规划》^[5]、2021 年 12 月 27 日中央网络安全和信息化委员会印发的《“十四五”国家信息化规划》^[6]等。相关政策重点关注技术创新、产业化落地、知识产权保护等领域。各地方政府“十四五”规划也开始关注量子科技的发展。

在资金投入方面，据国家“十三五”规划 2016 至 2019 年中国的量子科学领域的研究经费达到 3.37 亿美元。2021 年 3 月，十四五规划明确提出开展一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目中涵盖量子信息，并计划投入 1000 亿元建设量子信息科学国家实验室^[7]。

在人才培养方面，2021 年 2 月 20 日，教育部《列入普通高等学校本科专业目录的新专业名单（2021 年）》中新增了“量子信息科学”专业，中国科学技术大学成为首批开设“量子信息科学”的国家重点研究型大学，这体现了国家对量子信息科学发展前所未有的重视。

2. 美国

美国高度重视量子信息科学的发展：政府层面，2017 年美国白宫科技政策办公室首次将量子信息科学列为国家研发重点；立法层面，2018 年 12 月美国总统特朗普签署了《国家量子倡议（NQI）法案》，该法案是世界上首个确立量子科技地位的国家法案，核心在于确保美国在量子信息及其技术应用方面的领导地位^[8]。

在资金投入方面，NQI 法案承诺在五年内拨款 10 亿美元支持美国量子技术的研发，并将 12.75 亿美元的联邦研发支出分配到美国国家标准与技术研究院、美国国家科学基金会和美国能源部三个部门。

3. 英国

英国在量子信息科学方面起步较早：政府方面，2013 年英国开始实施英国国家量子技术计划，2015 年英国政府发布《量子技术国家战略——英国的一个新时代》^[9]和

《英国量子技术路线图》^[10]，从战略层面规划量子技术及其应用的发展，并提升至影响国家创新力和国际竞争力的重要战略地位。

在资金投入方面，英联邦政府投资 9300 万英镑建设英国国家量子计算中心，并计划通过英国研究与创新署（UKRI）投资 1.53 亿英镑。

4. 欧盟

在地区战略层面，欧盟制定的量子旗舰计划于 2018 年正式开始实行。该计划将历时十年且预算达 10 亿欧元，为整个欧洲的量子产业发展在宏观上奠定了战略基础。2020 年欧盟发布的《战略研究议程》计划推动建设欧洲范围的量子通信网络，完善和扩展现有数字基础设施，为未来的“量子互联网”远景奠定基础。在国家战略层面，欧盟各国也纷纷制定和发布了各自的量子战略。其中，德国于 2018 年 9 月发布了《量子技术：从基础研究到市场》^[11]，荷兰于 2019 年 9 月发布了《国家量子技术议程》^[12]，法国于 2021 年 1 月发布了《法国量子技术国家战略》^[13]，奥地利于 2021 年 11 月公布了“量子奥地利”计划等等^[14]。同时，欧盟国家之间也通过合作来发展量子技术。例如，法国和荷兰于 2021 年 8 月签署了《法荷联合声明》以促进欧洲在该技术领域的战略自主。

在资金投入方面，2021 年 1 月，德国政府出资 3 亿欧元用于量子谷项目，目标是在十年内使慕尼黑成为世界上拥有最先进量子技术的地区之一。2022 年 5 月 12 日，德国经济部和科学部表示，未来四年德国将投入约 20 亿欧元（24 亿美元）支持其第一台量子计算机和相关技术的开发。2022 年 1 月 4 日，法国宣布推出投资 1.7 亿欧元的国家量子计算平台，并在同月 21 日宣布了一项投资 18 亿欧元的量子技术国家战略计划，其中量子计算机、量子传感器、后量子加密、量子通信、低温等相关技术分别拨款约 7.8 亿欧元、2.5 亿欧元、1.5 亿欧元、3.2 亿欧元和 3 亿欧元，量子计算及低温技术占比超过一半。2022 年 3 月，法国国家科学研究中心、法国替代能源和原子能委员会和法国国家数字科学与技术研究所联合出资 1.5 亿欧元用于量子 PEPR 计划。2019 年 10 月，荷兰启动了 Quantum Delta NL 项目，每年的总预算约为 1.02 亿欧元。2021 年 1 月，奥地利联邦政府出资 1.07 亿欧元启动量子奥地利项目。

5. 其他国家

加拿大宣布制定国家量子战略巩固在全球量子技术领域的领先地位。澳大利亚政府于 2022 年 4 月发布了《国家量子战略》提出将投资 1.11 亿澳元开发国家量子战略。俄罗斯政府于 2019 年 5 月发布了《量子技术路线图》，并计划在五年内投入 7.9 亿美元研发实用化的量子计算机。日本总务省于 2020 年 7 月出资 14.4 亿日元用于“全球量子密码通信网络的联合研发项目”。韩国政府于 2019 年 2 月发布了《量子计算技术五年发展计划》，并在 2020 至 2021 年共出资 290 亿韩元用于量子密码通信基础设施试点建设项目。新加坡政府于 2019 年 10 月发布了《新加坡量子技术：为未来做好准备》，并于 2022 年 6 月出资 850 万新加坡元用于国家量子安全网络建设。以色列于 2018 年 3 月发布了“国家量子科学和技术计划”。印度科技部于 2019 年 9 月出资 8 亿卢比用于量子使能科学与技术（QuEST）研究项目，并于 2020 年 1 月发布了“量子技术和应用国家任务（NM-QTA）”^[15]。

（二）参与国家日益增多，跨国合作不断增强

目前，量子信息科技在中、美、欧的快速发展和引领下，有着更多国家及地区积极参与和跟随。同时，各国也通过国际合作交流提升本国量子计算水平，合作培育量子人才，并推动量子技术研究和产业化落地。

随着量子计算领域竞争的日益激烈，跨国合作也有所增强，并且呈现出合作领域多、形式丰富、层次多样等特点。但是这种合作主要局限于西方发达国家内部，对中国等具有一定的封闭性和限制性。例如，近年来美国相继和许多国家开展政府层面的战略合作。美国于 2019 年 12 月同日本签署了《东京量子合作声明》^[16]，2021 年 11 月同英国签署了《促进量子信息科学和技术的联合声明》^[17]、同澳大利亚签署了《美国和澳大利亚关于量子科学和技术合作的联合声明》^[18]、同加拿大发表联合声明并发起量子科学领域的研究项目合作计划^[19]，2022 年 4 月同芬兰签署《科技合作协议》^[20]、同瑞典签署《关于量子信息科学与技术合作的联合声明》^[21]，2022 年 6 月同丹麦签署《关于量子信息科学与技术合作的联合声明》^[22]。

（三）政策目标多元导向，覆盖技术人才产业

各国的量子政策目标具有多元性，除了召集多方利益相关者共同关注量子技术研

究，也开始关注量子科技人才的培养并增加人才储备，还促进量子产业生态的建立以及技术的商业化和产业化。

量子计算人才，是量子技术突破的最重要基础和中坚力量，也是一个国家量子计算产业最核心的竞争力所在；量子产业的发展，为量子技术突破确定了重要的发展方向、明确了关键的技术指标、提供了量子科技发展的造血能力和量子计算人才的良好发展环境；量子技术的进步是量子人才研究的成果，也是量子计算产业化的底层保障。

为了实现政策目标，各国采取的具体措施包括建立国家级量子科技创新中心，征集量子研究提案，举办量子科技主题竞赛，支持具有战略意义的量子科技项目，为初创企业提供风险投资等等。例如，中国在高校中开设专门的量子信息一级学科，筹备量子信息科学的国家实验室；美国建立以量子信息科学为重点的研究中心；英国政府连续举办量子技术商业化竞赛以寻找相关量子科技项目并促进其投资和商业化^[23, 24, 25]。



教源屋
ORIGIN QUANTUM

三、量子计算的技术进步

当今的量子计算硬件发展进步迅速、技术路线多样，包括超导、离子阱、半导体量子点、光量子、中性原子以及量子拓扑等。不同的物理实现方式导致其核心硬件组成部分有一定差异。

近年来，量子计算的物理实现在各条技术路线上均有硬件关键指标的突破。在比特数方面，以谷歌“悬铃木”为代表的超导量子计算机上实现了 53 比特的量子优越性，IBM 发布了 127 量子比特处理器 Eagle；在比特操纵精度方面，霍尼韦尔量子计算系统实现了 99.997% 的单量子比特操作保真度；阿里巴巴达摩院量子实验室公布采用新型量子比特 fluxonium 的 2 比特门操控精度 99.72%；由霍尼韦尔和剑桥量子合并而来的 Quantinuum 成为第一台 4096 量子体积的商用量子计算机。

（一）各种技术路线百花齐放

量子比特（量子位）是量子计算机的基本信息单位，量子计算处理器（QPU）是制备、操作和测量量子比特的物理载体，基于单比特叠加和多比特纠缠的耦合与状态演化实现高效并行计算模拟等功能，是量子计算机的研发核心。根据实现量子比特二能级体系和制备操控方案不同，目前主流的量子计算处理器硬件技术路线存在超导、离子阱、半导体量子点、光量子、中性原子以及量子拓扑等几个方向。每种路线各有其优劣势，且目前仍处并行发展和开放竞争状态，尚未出现技术路线融合收敛趋势。

1. 超导量子计算

（1）实现原理

超导量子计算线路的比特物理实现，主要包括电荷量子比特、磁通量子比特和相位量子比特等。为了减小电荷噪声的影响，延长相干时间，通常利用的传输线分流等离子体振荡等改良设计。由于超导量子比特是人造的，其在操控、测量、扩展等方面具有一定优势，利于量子比特数（对应算法规模）的增加；但是同一性较差且易受环境噪声影响出现退相干现象，不利于量子线路深度（对应算法复杂度）的增加。超导量子需要的低温超导、外电磁场操纵，集成电路工艺相对成熟，是受到科学家和产业界普遍看好的量子计算机物理实现路线之一。

(2) 采用机构

采用超导量子计算的学术团队包括加州大学圣巴巴拉分校、耶鲁大学、麻省理工学院、美国国家标准与技术研究院、加州大学伯克利分校、马里兰大学、芝加哥大学、日本理化学研究所、荷兰代尔夫特大学、瑞士苏黎世联邦理工学院、法国 CEA 研究中心、IBM 苏黎世研究所、中国科学技术大学、清华大学、浙江大学、南京大学、南方科技大学、北京量子信息科学研究院、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、中国科学院物理研究所。超导量子计算机的代表性公司包括 IBM、谷歌、Rigetti、D-Wave、英特尔、NEC、QCI、Oxford Quantum、本源量子、国盾量子、量旋科技、亚马逊。

2. 离子阱量子计算

(1) 实现原理

离子阱是利用势阱囚禁离子，并利用激光激发使其处于基态和激发态的叠加态，进而实现量子比特的物理制备和操纵。离子阱是天然量子比特，故而具有同一性好、相干时间长、制备测量较容易的特点；但是离子阱体系需要复杂的激光光路囚禁离子，限制了其比特数的扩展和量子算法的规模。离子阱量子计算至今已经发展 20 余年，且商业化进展较为领先。霍尼韦尔推出的 H1-2 是量子体积最高的商用量子计算机，IonQ 是较早实现上市的量子计算公司。

(2) 采用机构

采用离子阱的学术团队包括哈佛大学、MIT、马里兰大学、杜克大学、牛津大学、清华大学、国防科技大学、中国科学技术大学、中国人民大学、中山大学、中科院量子信息重点实验室、因斯布鲁克大学、苏塞克斯大学、美国国家标准与技术研究院、Sandia 国家实验室、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、北京量子信息科学研究院。公司主要包括霍尼韦尔、IonQ、Alpine Quantum Technologies、Universal Quantum、启科量子。

3. 半导体量子点计算

(1) 实现原理

半导体量子点又称自旋量子比特，它利用纳米尺度的半导体粒子中电子自旋的叠

加态，实现量子比特的物理制备。常见的量子点有硅量子点、锗量子点、硫化镉量子点、砷化镓和砷化镓量子点等。半导体量子点可以充分利用现有的半导体工业积累的技术，较容易实现平面结构的小型化芯片，因而受到产业界的追捧。但当前半导体量子比特的数量较少，且相干性较弱^[26,27,28]。

(2) 采用机构

采用半导体量子点的学术团队包括普林斯顿大学、荷兰代尔夫特理工大学、东京大学、北京大学、中国科学技术大学量子信息重点实验室、新南威尔士大学、澳大利亚国家量子计算与通信技术研究中心、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、RIKEN、法国 CEA-CNRS Grenoble 研究中心、比利时 IMEC 研究中心、美国 HRL Laboratories、美国 Sandia 国家实验室、日本 NTT、日本理化学研究所、威斯康星量子研究所。公司主要有英特尔、中国本源量子、澳洲 SQC 等。

4. 光量子计算

(1) 实现原理

光量子计算机是利用单光子源、线性光学系统和光子探测器实现的，利用光子偏振、路径、轨道角动量、时隙等自由度实现量子比特的编码。光子不易受外界环境干扰，光量子比特退相干时间较长，同时由于光子自由度高，可以用更少的光子数实现更多的物理比特。但是另一方面，高效的单光子源、低所耗高可扩展性的光学系统、高效率的光子探测器仍然面临挑战^[29,30,31]。

(2) 采用机构

采用光量子路径的学术团队包括牛津大学、MIT 电子研究实验室、维也纳大学量子科学与技术研究中心、布里斯托大学量子光学研究中心、昆士兰大学量子计算与量子通信技术研究中心、中国科学技术大学、南京大学、山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室、RIKEN、日本国立研究开发法人量子科学技术研究开发机构、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院。公司包括 Xanadu、PsiQuantum、惠普、图灵量子、玻色量子、法国 Quandela、英国 Tundra Systems。

5. 中性原子量子计算

(1) 实现原理

中性原子量子计算又称里德堡原子量子计算，是利用激光技术将原子囚禁在光阵列中，并利用里德堡阻塞效应实现单激发态制备量子比特。里德堡原子是天然量子比特且容易实现远距离直接耦合。中性原子量子计算比较适合用于量子系统的模拟^[32,33]。

(2) 采用机构

采用中性原子技术路径的学术团队包括哈佛大学、香港科技大学、中国科学技术大学、中科院量子信息重点实验室、清华大学、山西大学、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、中国科学院武汉物理与数学研究所。公司主要有 ColdQuanta、Atom Computing、QuEra Computing、PASQAL、中科酷原等。

6. 拓扑量子计算

(1) 实现原理

拓扑量子比特由 Alexei Kitaev 于 1997 年提出，它采用了称为任意子的二维准粒子，在三维时空中组成计算机的逻辑门。拓扑量子比特通常被认为具有更好的性质，有望获得较长的相干时间和较高的量子比特保真度^[34,35]。

(2) 采用机构

以微软为代表的公司采用拓扑量子技术路径，学术团队包括国外的荷兰代尔夫特大学和国内的清华大学、北京大学和中科院物理研究所。

(二) 硬件关键指标屡获突破

1. 量子计算硬件的性能评估

量子计算硬件的性能指标很多，从算法应用的角度看，主要包括量子比特数（对应量子线路的宽度和量子计算问题的规模）、支持的量子线路深度（对应量子线路的长度和复杂度）、量子体积等。不同技术线路的量子硬件性能指标有所差异，但是主要包括比特数（可扩展性）、比特连通性、单比特操纵保真度、双量子比特门保真度、相干时间等。直观来说，比特连通性会影响量子计算机可以执行的算法的结构，连通性越高，需要进行的比特交换越少，可以实现的算法越复杂。比特操纵保真度刻画了量子计算机对量子比特操纵的准确率，保真度越高累积错误率越低，在给定正确率情况下可以实现的量子门操作越多，实现的量子线路也越长。相干性刻画了量子计算机

对外界噪声等的抵抗能力，相干时间越长量子比特可以维持叠加态的有效计算时间越长，同样可以实现越长的量子线路。

2. 各技术路线 2021 年重要进展

(1) 超导量子计算

国内各高校大幅度缩小了在关键硬件指标上与国外最先进水平的差距，例如中国科学技术大学先后构建 62 比特可编程超导量子计算机原型机“祖冲之号”和 66 比特可编程超导量子计算机原型机“祖冲之二号”；浙江大学发布了两款超导量子芯片“莫干 1 号”和“天目 1 号”；南方科技大学在超导量子线路系统中实现快速（30ns）高保真度（0.995）的两比特量子门。在产业化方面，中国本源量子上线了工程化超导量子计算机本源悟源 2 号。

国际上，美国在产业化方面继续保持领先优势，Rigetti 推出 80 量子比特 Aspen-M 量子处理器；IBM 发布了 127 量子比特处理器 Eagle。此外，其他西方发达国家也有所进展，日本 NICT 开发出全氮化物超导量子比特；芬兰 IQM 推出该国首台 5 比特超导量子计算机 Micronova。除了比特数以外，在量子测控技术方面，美国 NIST 使用光纤测量和控制了超导量子比特；在小型化方面，美国哥伦比亚大学展示了超小尺寸的 2D 材料超导量子比特电容器。

(2) 离子阱量子计算

国内高校取得较大进步，清华大学将单量子比特相干时间从 660 秒提升至 5500 秒；并实现了对长离子链的高效协同冷却。中山大学首次利用人工智能技术对囚禁离子量子比特进行微运动控制。

国际上，美国积累较多且继续保持领先：IonQ 推出可重构多核量子架构，美国国家标准与技术研究院创下无激光方案双量子比特门保真度纪录，马里兰大学实现错误率更低的逻辑量子比特。此外，奥地利因斯布鲁克大学演示了紧凑型离子阱量子计算机。

(3) 半导体量子点计算

国内方面，作为新兴技术路线国内追赶较快：本源量子联合中国科大发现了自旋量子比特操控的各向异性，并利用微波超导谐振腔实现对半导体双量子点激发能谱的高灵敏度测量。

国际上，欧洲各国进步较多：爱尔兰 Equal1 Laboratories 利用商用硅工艺将量子比特与其他电子器件集成在同一芯片上；麦哥本哈根大学在单个量子芯片上同时操作多个自旋量子比特；日本理化研究所将硅基自旋量子比特的纠缠数从 2 个增加到 3 个。

(4) 光量子计算

国内光量子计算积累较多，多个高校取得进展：国防科技大学等研制出可编程光量子计算芯片；上海交通大学提出了首个基于光子集成芯片的光量子计算方案；中国科学技术大学研制出 113 个光子的“九章二号”，实现更大规模的量子计算优越性。

国际上，加拿大 Xanadu 较为领先，推出 X8 光量子处理器；丹麦科技大学实现了具有通用性和可扩展性的光量子计算机的完整平台；ORCA Computing 实现了变分玻色求解器的光子计算平台。

(5) 中性原子量子计算

美国 ColdQuanta 推出 100+量子比特处理器 Hilbert；Atom Computing 推出其第一代拥有 100+比特的量子计算系统 Phoenix；哈佛-麻省理工学院开发了基于中性原子的 256 比特可编程量子模拟器。

(6) 拓扑量子计算

国内方面：清华大学利用选取外延生长方法制备出新的半导体纳米线体系；清华大学提出一种实验探测手段，使得马约拉纳输运信号和其他平凡输运信号产生完全不同的标度行为和温度电压依赖关系。

国外方面：美国纽约州立大学发现了新的光诱导开关；代尔夫特理工大学和中科院在器件“马约拉纳岛”中绘制出完整的电子奇偶性相图。

整体而言，超导和离子阱这两种量子技术路线目前较为成熟，且超导的进展相对更快和更好——这一方面归功于现有先进的半导体集成电路及工艺技术，另一方面，超导路径以其非常强的可扩展性使得未来的量子计算能够与经典的计算机相融合。其他技术路线也各有优劣。

(三) 软件配套更加丰富实用

量子计算机的发展离不开量子计算机软件，各类支持量子计算的软件也跟随量子计算机的使用在不断开发，从而能够帮助用户轻松地执行量子计算机编程并输出结果。

目前，全球范围内多种量子计算软件并举研发且迭代活跃。量子计算软件由于专业门槛高仍处于初期发展中，主要趋势仍是开放和开源化。

量子计算软件从功能上大致可以分为基础运行类软件、开发工具类软件、应用服务类软件和通用系统类软件^[36]。量子基础运行类软件是量子计算机运行所需要的核心控制类软件，主要包括其中量子编译软件、量子测控软件和量子芯片设计 EDA 软件；量子计算开发类软件提供了研究量子算法、开发量子应用的工具链体系，主要包含了量子编程语言、量子编程框架和量子软件开发工具^[37]：

量子应用服务类软件提供了面向多个领域的量子云计算技术应用套件，包括解决特定问题的算法和应用程序，如量子模拟算法、量子机器学习和量子组合优化等；量子计算通用操作系统软件可实现量子资源系统化管理和自动任务调度，并能够简化量子计算操控和使用。

1. 量子计算编程框架

量子编程框架是一种功能齐全，运行高效的量子软件开发工具包，目前国内外许多量子计算公司提供了不同的编程框架版本。

(1) Q#

Quantum Development Kit (QDK) 是微软 (Microsoft) 提供的量子程序开发套件，主要包括 Q# 编程语言、编译器和一个本地量子计算模拟器。Q# 是一种用于表达量子算法的开源高级量子编程语言，其对量子计算机的相关逻辑操作进行了封装，既可以作为独立应用程序运行，也可以使用 Python 或 .NET 语言编写并和其他程序一起运行。Q# 支持在 Windows, macOS 或 Linux 上进行量子编程。此外，用户可根据不同的开发环境，执行不同的安装，以进行量子程序开发^[38]。

(2) Pyquil

Pyquil 是由美国的量子计算公司 Rigetti 开发的一个使用 Quil 进行量子编程的 Python 库，其中 Quil 是 Rigetti 开发的量子指令语言。PyQuil 的主要功能有实现基本的量子门和经典操作、使用 Quil 编译器和量子虚拟机编译 Quil 程序以及使用量子云服务在真实量子处理器上执行 Quil 程序等基础性的功能，其上手相对简单^[39]。

(3) HiQ

由华为推出的 HiQ 是一个用于量子计算的开源软件框架。它基于 ProjectQ 并与之

兼容。HiQ 旨在提供工具，促进使用经典硬件或实际量子设备的发明、实现、测试和运行量子算法^[40, 41]。

(4) Qiskit

Qiskit 是由 IBM 开发的基于 python 的开源量子计算编程框架。它通过提供与 IBM 量子系统和模拟器交互所需的全套工具来加速量子应用程序的开发。其主要包括 Terra、Aer、Ignis、Aqua 四个不同功能相互协作的模块。其中 Terra 在量子线路级别为量子程序的实施提供了基石，并针对特定设备对程序进行优化，包含了基本用户接口，以及优化，脉冲调度和后端通信层的有效处理。Aer 使用 Qiskit 软件堆栈为量子电路提供了高性能模拟器框架，包含优化的 C++ 模拟器后端，用于执行在 Terra 中编译的电路并提供噪声模拟模型。Ignis 涉及对抗噪声和错误，Aqua 则是构建量子计算机算法的模块。这些算法可用于构建量子计算应用程序。Aqua 可供化学，优化，金融和人工智能领域的专家使用，以此探索使用量子计算机作为特定计算任务的加速器的优势^[42]。

(5) Cirq

Cirq 是谷歌开发的 Python 软件库，用于编写，操作和优化量子电路，然后将这些线路在量子计算机和量子模拟器上运行。Cirq 为处理当下含噪声的中尺度量子计算机 (NISQ) 上的量子程序运行提供了有用的抽象，其中硬件的细节对于获得最先进的结果至关重要^[43]。

(6) QPanda

QPanda 是由本源量子开发的一种功能齐全，运行高效的量子软件开发工具包，可以用于构建、运行和优化量子算法，提供本地的部分振幅、单振幅、全振幅、含噪声量子虚拟机，并可直接连接到本源的量子云服务器，运行量子程序。同时，QPanda 编写的量子程序可以通过内置接口优化编译到不同量子计算平台的对应的量子语言对接不同的量子计算平台。QPanda 本身也集成了很多主流的量子算法可用来进行量子计算的学习及算法验证。QPanda 作为本源量子计算系列软件的基础库，为 OriginIR、Qurator、量子计算服务提供核心部件^[44]。

(7) ProjectQ

ProjectQ 是由 Thomas Häner 教授和苏黎世联邦理工大学的一个团队创建的免费开源量子计算软件框架，目前支持在 Python 中实现量子程序。它具有能够针对各种类型硬件的编译框架，有仿真功能的高性能量子计算机模拟器以及各种编译器插件。其主

要功能有在 IBM、IonQ 等提供的设备上运行量子程序，或在经典计算机上模拟量子程序，并可以在预言机（Oracle）的抽象级别上进行量子程序模拟，以及将量子程序导出为电路、进行运算资源估计等^[45]。

(8) SuperstaQ

SuperstaQ 是由位于美国芝加哥的量子软件初创公司 Super.tech 于 2021 年 8 月宣布推出的跨硬件的量子软件平台，可将应用程序连接到来自 IBM、IonQ 和 Rigetti 的量子计算机。SuperstaQ 通过跨越整个系统堆栈的优化来提高性能，包括一个复杂的错误缓解技术库。SuperstaQ 已通过开源 Qiskit-SuperstaQ 存储库与 IBM Qiskit 生态系统与 SuperstaQ 进行交互。

目前几种主流的量子计算编程框架对比如图 1 所示：

	全振幅虚拟机	单振幅虚拟机	部分振幅虚拟机	含噪声虚拟机	分布式计算	GPU 计算模拟	量子线路符号画	量子逻辑门优化	量子程序适配不同的量子计算平台	基于复杂判断条件的控制流量的程序	量子程序适配芯片架构	量子程序分层	量子程序资源和性能统计	云平台计算后台接入	化学模拟
Q#	√	○	○	○	○	○	○	√	○	○	√	○	√	√	√
pyquil	√	○	○	√	○	○	○	√	○	○	√	○	○	√	○
HiQ	√	○	○	○	√	○	√	○	√	○	√	○	√	√	√
qiskit	√	○	○	√	√	√	√	√	○	○	√	√	√	√	√
Cirq	√	○	○	√	√	○	√	○	○	○	√	√	√	○	√
QPanda	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

图 1. 几种主流的量子计算编程框架对比

2. 量子计算操作系统

随着超导等量子处理器技术的不断进步，高效利用量子处理器、实现量子计算机与经典计算平台的有效协作，已成为量子计算实用化发展的迫切需求。目前全球范围内的量子计算操作系统主要包括英国量子软件公司 Riverlane 的 Deltaflow.OS，奥地利量子计算公司 ParityQC 的 ParityOS 和中国本源量子的本源司南（Origin Pilot）。

(1) Deltaflow.OS

2019 年 12 月，英国量子软件公司 Riverlane 正式发布了 Deltaflow.OS 量子操作系统。Riverlane 正在将 Deltaflow.OS 构建为所有类型的量子计算机的通用操作系统，从而量子软件和系统工程的快速发展相结合，以此来使量子计算发挥更大的作用。

Deltaflow.OS 由 Riverlane 和其硬件合作伙伴合作开发，可帮助量子硬件公司更快地扩展，减少错误并实施实用的量子纠错。Deltaflow.OS 是模块化的，由四个模块组成：解码、运行、校准和控制，可无缝适应不同硬件的需求。

(2) ParityOS

2021 年 1 月成立的奥地利量子计算公司 ParityQC 开发了量子操作系统 ParityOS，它是一个自动创建编译器、优化算法和芯片布局的平台。其硬件合作伙伴是开发中性原子量子处理器的法国公司 Pasqal，未来 ParityOS 有望应用到此硬件上。ParityOS 允许用比标准门模型方法少一个数量级的门操作来编译优化问题，因而实现大型复杂优化问题的编码将比标准方法提前 3 年。

(3) 本源司南 (Origin Pilot)

2021 年 2 月，本源量子发布首款国产量子计算机操作系统——本源司南 (Origin Pilot)。该系统全面超越已有产品，实现量子资源系统化管理、量子计算任务并行化执行、量子芯片自动化校准等全新功能，助力量子计算机高效稳定运行。本源司南具备经典操作系统的基础功能，更带来了高效利用量子计算机资源的解决方案。针对任务和问题，本源司南强大的量子资源管理功能，不仅支持多量子任务的并行计算与调度，更支持对量子计算机持续不间断的校准优化。针对不同类型量子计算机的特征和用户需求，本源司南提供应用模式和研发模式的无成本兼容，使量子计算机不仅能为商业用户开发出满足特定场景的应用，也能为科研用户提供服务，用于研制更强大的量子计算机。研发模式是指支持用户基于量子计算机操作系统直接操控一体机及相关设备，以达到调试及优化量子芯片性能指标的目的；应用模式是指支持用户基于量子计算机操作系统运行编码完成的量子程序。本源司南支持多种量子计算系统，能够为用户接入具有多个量子处理器核心的量子计算机高性能工作站，包括超导量子处理器、半导体量子处理器、离子阱量子处理器，或是混合量子处理器。用户只需要通过口令，接入管理员部署的一台经典服务器即可使用全部功能。

3. 量子计算云平台

随着量子计算的快速发展，量子计算开始与云计算有机结合，产生了“量子计算云平台”，极大地克服了目前量子计算机制造成本昂贵、维护难度高、占用空间大等缺陷。量子计算云平台可以帮助从业人员在云端进行量子软件及算法的研发，进一步

的，其还会在形成良好量子生态，普及量子教育等方面发挥重要作用。

（1）量子计算云平台优势与服务

量子计算云平台是依托云计算技术为用户提供接入实体量子计算机硬件或量子计算模拟器的一种服务平台，在平台上用户可以运行算法或进行实验。量子云平台是连接量子计算机和用户之间的桥梁——用户使用经典计算机访问量子云，然后经由量子云将处理过的指令传输到后端，后端完成量子计算后经由量子云把结果输送给用户。

量子云平台提供了更多实验选择，用户可根据自身需求选择适合的服务商和不同的量子计算硬件后端。量子云平台将其具有的量子硬件、量子软件、量子算法等量子相关资源以服务的形式提供给用户，并根据用户的需求类型以及任务复杂程度进行资源分配，这种服务形式被称为量子即服务（Quantum as a Service, QaaS）。将量子资源部署在云平台上较一般的本地部署（On-Premises）具有的独特优势包括较低的购置、运维和研发成本，而且技术要求也较低。

当前各公司量子云平台的逻辑架构基本相同，与云计算分类相似。根据提供服务的类型不同将量子云平台提供的服务细分为量子基础设施即服务（Quantum Infrastructure as a Service, Q-IaaS）、量子平台即服务（Quantum Platform as a Service, Q-PaaS）和量子软件即服务（Quantum Software as a Service, Q-SaaS）三种。部分量子云平台提供的量子计算服务包括其中的两种或三种，如 D-Wave 提供的服务类型包括 Q-IaaS 和 Q-SaaS，本源量子 and IBM 包括了上述三种^[46]。

量子基础设施即服务（Q-IaaS），即提供量子计算云服务器、量子模拟器和真实量子处理器等计算及存储类基础资源；

量子平台即服务（Q-PaaS），即提供量子计算和量子机器学习算法的软件开发平台，包括量子门电路、量子汇编、量子开发套件、量子算法库、量子加速引擎等；

量子软件即服务（Q-SaaS），即根据具体行业的应用场景和需求设计量子算法，提供量子加速版本的应用服务，如生物制药、分子化学、金融科技和流体力学等。

目前，量子计算云平台主要采用 Q-PaaS 模式，来提供量子模拟及算法开发的功能。Q-IaaS 模式比重将随着量子计算硬件的不断发展与和云计算的结合逐步增多。在未来随着量子计算产业生态的发展成熟，Q-SaaS 模式将被广泛应用于各个行业及企业来进行产业赋能。

（2）量子计算云平台的发展现状

按时间顺序，国内外量子云平台的发展情况汇总如表 1 所示：

表 1. 国内外量子云平台的发展情况汇总

序号	首次发布时间	机构	云平台/模拟器
1	2013.09	布里斯托大学量子光子学中心	Qcloud 量子模拟器
2	2016.05	IBM	IBM Quantum Experience
3	2017.10	中科院量子信息与量子科技创新研究院	量子计算云平台
4	2017.10	本源量子	本源量子计算云平台
5	2017.10	清华大学	NMRCloudQ
6	2018.07	谷歌	Cirq (开源框架)
7	2018.09	Rigetti	Quantum Cloud Service
8	2018.09	QuTech	Quantum Inspire
9	2018.10	D-Wave	Leap
10	2018.10	华为	HiQ
11	2018.11	量旋科技	PCloudQ
12	2019.09	昆峰量子	昆冈量子模拟云平台
13	2019.11	微软	Azure Quantum
14	2019.12	亚马逊	Braket
15	2020.04	AQT	SCCE
16	2020.09	Xanadu	Xanadu Quantum Cloud
17	2020.09	百度	量易伏
18	2020.12	阿里巴巴达摩院量子实验室	阿里云量子开发平台、太章 2.0
19	2021.02	Strangeworks	Quantumcomputing.com
20	2021.03	Sandia 实验室	QSCOUT
21	2021.05	北京量子信息科学研究院	超导量子计算云平台
22	2021.05	中科院物理所	ScQ. Cloud

(3) 量子计算云平台的评测指标

量子计算及量子计算云平台目前仍处于发展关键时期，其对技术标准及评测指标的需求也随着产业的发展壮大日益迫切。目前，量子计算云平台服务能力可以从五大指标维度来测评，包括硬件成熟度、软件成熟度、运维成熟度、服务应用成熟度和安全成熟度^[47]。

量子云硬件成熟度，包括量子计算能力、经典计算能力、资源抽象与调度能力、量子存储能力、网络传输与数据交换能力；

量子云软件成熟度，包括量子语言处理能力、量子程序语言提供能力、量子算法能力、量子全栈能力、量子算法 API；

量子云运维成熟度，包括量子服务提供能力、平台监控能力、平台管理能力、平台计费能力；

量子云应用成熟度，包括云服务提供能力、平台监控能力、平台管理能力；

量子云安全成熟度，包括系统安全能力、网络安全能力、数据安全能力、用户隐私保护能力、物理安全能力。

(4) 2021 年全球量子计算软件进展

2021 年全球量子计算软件的重要进展如下：

1 月，中国弧光量子发布了量子程序设计与验证平台 isQ；2 月，中国本源量子发布了量子计算操作系统——本源司南，以及量子图像识别应用，并研究开发了量子卷积神经网络；3 月，美国 IBM 发布了超导量子计算机开源电子设计自动化软件 Qiskit Metal；6 月，芬兰 IQM 发布了用于自动化设计超导量子处理器的开源软件工具 KQCircuits；7 月，中国本源量子推出了量子化学应用 ChemiQ 正式版；8 月，西班牙量子计算公司 Multiverse 推出了第一款产品：可以直接用于量子投资优化的 Excel 插件——Singularity；美国 SUPER. TECH 推出了跨硬件的量子软件平台 SuperstaQ；中国京东提出全球首个以经典云平台为依托、量子计算设备为终端的量子并行处理框架 QUDIO；10 月，西班牙 aquantum 推出第一个面向高质量量子软件的量子开发和应用生命周期平台 QuantumPath 可以公开访问；英国 QUANTINUUM 发布了世界上第一个量子自然语言处理（QNLP）工具包和库；中国百度发布了全球首个云原生量子集成开发环境 YunIDE；11 月，中国本源量子发布了第一款量子计算流体力学仿真软件“本源量禹”（QriginQ QCFD）；12 月，图灵量子推出了自主研发的首款商用光量子计算模拟软件 FeynmanPAQS。

(5) 量子计算云平台市场预测

在量子计算云平台方面，随着量子云计算技术逐渐成熟，服务价格有可能随着技术进步和用户激增而在未来几年开始降价的策略，这对大型最终用户来说变得更加实惠，同时较低的门槛也会有更多的用户加入进来。在此背景下，预测 2030 年的量子计算云平台的全球市场规模约为 13.6 亿美元，年复合增长率约为 46.62%（2020-2030 年）。其中 Q-SaaS 占比逐年缓慢下降，Q-PaaS 占比逐年提高，Q-IaaS 占比基本维持不变^[48, 49]。

四、量子金融的产业现状

金融能够不但能够维护国家利益和促进经济增长，而且在服务国民和实体经济方面也起到了重要的作用。作为传统的技术、人才、资本密集型行业，科学技术对金融业的发展至关重要，也面临着诸多技术层面的瓶颈：金融行业涉及海量的数据和复杂的模型，需要解决大规模优化、智能化、安全加密等计算问题，这对于经典计算机的算力构成了极大的挑战。量子计算作为基于量子信息原理的革新技术，可以提供强大算力解决大规模分析、计算、模拟等问题，进而诸方面、多层次地改变金融行业的整体面貌，对于金融机构以及国家都具有重大的战略意义。

量子计算在金融行业较早地取得了进展，并且有望率先实现应用产业化。量子金融涉及的主要金融机构包括券商、交易所、银行、保险公司等，涵盖了金融风险控制、投资组合优化、金融衍生品定价、量化交易等在内的重要应用领域，在许多实际问题取得了重要的理论和算法研究进展，并进行了相应的物理和数值模拟实验验证。

从产业发展角度，量子计算和量子金融公司不断涌现，融资规模迅速增加，头部企业规模不断壮大；并且受到了国内外各大金融机构的高度关注。相关的合作成果也不断涌现；随着竞争的加剧，开始出现产业链融合的趋势。

（一）资本市场表现活跃，投融规模不断增加

国内外的金融业巨头对量子金融寄予厚望，与各个高校、科研院所、量子计算公司进行了广泛密切的合作。在资本市场上，量子计算相关的软硬件公司亦获得了大量政策资金、产业资本和风险投资者等的青睐，相关的初创公司数量和融资规模不断增加，且投融资进展涵盖了产业链的各个环节以及各个技术路线。仅以 2022 年 5 月以来的融资情况为例，全球量子公司融资情况如下：

（1）英国 Aegiq 公司获 40 万英镑融资。5 月 4 日，Quantum Exponential Group 向英国量子光学公司 Aegiq 投资了 406,050 英镑。作为谢菲尔德大学的衍生公司，Aegiq 开发了突破性的量子光子平台技术^[50]。

（2）量子人工智能公司 Sandbox AQ 获得 In-Q-Tel 和 Paladin Capital Group 的融资。Sandbox AQ 获得了来自美国中央情报局投资机构 In-Q-Tel 和 Paladin Capital Group 的第一轮融资^[51]。

(3) 量子软件开发公司 Classiq 成功融资 3600 万美元。5 月 16 日, 量子软件开发公司 Classiq 的 B 轮本轮融资达到了 3600 万美元, 融资总额达到 5100 万美元^[52]。

(4) 离子阱量子计算公司 Universal Quantum 获得 45 万英镑融资。专注于投资量子技术的公司 Quantum Exponential Group plc 宣布, 它已向英国萨塞克斯大学衍生的离子阱量子计算公司 Universal Quantum Limited 投资 45 万英镑, 这也是 Quantum Exponential 在英国大学的衍生项目中进行的第三次投资^[53]。

(5) 加拿大量子计算公司 Xanadu 完成 1 亿美元的新一轮融资。5 月 20 日, 加拿大最大的成长型股权投资公司 Georgian Partners 已经同意牵头向多伦多量子计算初创公司 Xanadu 提供 1 亿美元的融资^[54]。

(6) ORCA Computing 完成 1500 万美元 A 轮融资。ORCA Computing 完成了 1500 万美元的 A 轮融资。由 Octopus Ventures 领投, 其他投资者包括 Verve Ventures、Quantonation、Oxford Science Enterprises 和 Innovate UK^[55]。

(7) 法国量子药物发现公司种子轮融资 1600 万欧元。基于量子物理学的药物发现公司 Qubit Pharmaceuticals 专门为计算药物发现寻找有效的解决方案, 已获得 1600 万欧元种子轮融资, 融资总额超过 2300 万欧元^[56]。

(8) 量子计算公司 SQC 启动 1.3 亿美元的 A 轮融资。6 月 14 日, 量子计算公司 Silicon Quantum Computing (SQC) 宣布启动 1.3 亿美元的 A 轮融资^[57]。

(9) 中性原子量子计算公司 Planq 获得 460 万欧元融资。德国量子计算初创公司 planq 获得了 UVC Partners 和 Speedinvest 等投资机构的 460 万欧元融资^[58]。

(10) 以色列量子计算公司 Quantum Source 获得了 1500 万美元种子轮融资。以色列量子计算公司 Quantum Source 获得了包括 Grove Ventures、Pitango First 和 Eclipse 等在内的 1500 万美元种子轮融资^[59]。

(11) 英国 OQC 创造英国最大一笔量子计算 A 轮融资 3800 万英镑。7 月 5 日, 英国超导量子计算公司 OQC 在 A 轮投资的第一笔交易中融资 3800 万英镑, 这是英国目前最大的量子计算 A 轮投资^[60]。

(12) 光量子计算公司 QuiX 种子轮融资 550 万欧元。光量子计算硬件公司 QuiX Quantum 宣布已获得 550 万欧元的种子资金, 种子轮投资由集成光子产业加速器 PhotonDelta、荷兰风险投资公司 Forward.one 和区域发展机构 Oost.nl 牵头^[61]。

(13) 量子计算公司 BosonQ Psi 获得 52.5 万美元种子轮融资。量子计算初创公

司 BosonQ Psi 已在种子轮融资中筹集到了 52.5 万美元。本轮融资由 3T01 Capital 领投，印度和美国天使投资人参与^[62]。

(14) **本源量子融资近 10 亿元**。7 月 22 日，合肥本源量子计算科技有限责任公司注册资本由 627.3767 万元人民币增加至 720.2284 万元，这意味着本源量子已完成新一轮股权融资。据透露，本轮融资近 10 亿元人民币。

(15) **量子计算机开发商 Atlantic Quantum 种子轮融资 900 万美元**。7 月 21 日，可扩展量子计算机开发商 Atlantic Quantum 获得了由 The Engine 领投的 900 万美元种子轮融资^[63]。

(16) **IQM 完成欧洲最大一笔量子计算融资 1.28 亿欧元**。7 月 22 日，欧洲超导量子计算领导者 IQM Quantum Computers (IQM) 完成了 1.28 亿欧元的 A2 轮融资，这是目前欧洲量子计算公司最大的一笔融资^[64]。

(17) **光量子计算公司 iPronics 融资 370 万欧元以加速可编程光子芯片的采用**。光子计算公司 iPronics 于 7 月 27 日宣布获得 370 万欧元投资，由 Amadeus Capital Partners 领投，Caixa Capital Risc 也参与其中。此前的战略天使投资人包括来自谷歌、Facebook、Carto、Freshly、Endeavor、甲骨文、德勤、Ferrovial 和 Clicars 等公司的科技高管和企业家^[65]。

(18) **剑桥大学衍生公司 CamGraPhIC 为量子计算等融资 120 万英镑**。英国剑桥大学的衍生公司 CamGraPhIC 筹集了 126 万英镑，本轮融资由 Frontier IP 和 Wealth Club 领投，继 2021 年 9 月获得 160 万英镑的融资之后，该公司的估值达 720 万英镑^[66]。

(19) **D-Wave 量子计算公司再获 1.5 亿美元融资**。8 月 9 日，量子计算公司 D-Wave Quantum 上市第一天就上涨了 24%。同时，该公司据称将在未来三年内不定期地购买高达 1.5 亿美元的 D-Wave Quantum 普通股期权^[67]。

(二) 创业公司不断涌现，行业领军登陆纳指

近两年来，量子计算创业公司不断涌现，其中一些领先的量子计算公司也开始陆续在纳斯达克上市，例如 IonQ、Rigetti Computing 和 D-Wave 等。

2021 年 10 月，IonQ 成为首家上市的纯量子计算初创企业。IonQ 公司于 2015 年成立，是量子计算领域的领导者之一。该公司在创新和部署方面表现较为出色，也是目前唯一一家可以通过亚马逊 Braket、微软 Azure 及通过直接 API 访问其量子系统的公

司。

2022年3月，混合量子经典计算先驱 Rigetti Computing 与特殊用途收购公司 Supernova 完成业务合并，并获得了约 2.6175 亿美元的总收益。交易完成后，Rigetti 的普通股和认股权证也开始在纳斯达克资本市场交易。Rigetti 作为行业先驱，取得了多项行业第一，包括第一个用于可扩展量子计算系统的多芯片量子处理器，以及今年推出的 80 量子比特商用多芯片量子处理器 Aspen-M，这是世界上第二大基于门模型的量子计算机，也是目前在 Amazon Bracket 最大的门模型量子计算机。

2022年8月，D-Wave 量子计算公司敲响纽约证券交易所开市钟。此前，上市的特殊目的收购公司 DPCM Capital, Inc. 和 D-Wave Systems Inc. 已经合并为 D-Wave Quantum Inc.。D-Wave Quantum 的上市代表着商业量子计算进入公开市场。

（三）金融机构高度关注，强强合作成果频出

1. 国际金融机构合作动态

量子技术作为未来可行的前沿技术，其发展势必将对金融行业产生巨大的冲击和变革，正是因为量子计算潜在的颠覆性和革命性的影响力，也吸引了国际上知名金融机构的争相布局。目前正在探索量子计算应用的大型金融机构主要如表 2 所示：

表 2. 探索量子计算应用的大型金融机构

金融机构	合作机构	研究方向
摩根大通	IBM、Chicago Quantum Exchange 等	投资组合优化、交易策略、资产定价和风险分析
BBVA	Multiverse、埃森哲、富士通等	套利、信用评分、蒙特卡罗模拟
渣打银行	NASA、USRA、Rigetti 等	投资组合优化
汇丰银行	欧洲 NEASQC 项目合作	药物发现、碳捕获、基础设施风险评估
巴黎银行	C12 Quantum Electronics	量子加速器、处理器
花旗银行	1QBit、QC Ware 等	交易算法、欺诈检测、投资组合优化和风险管理
富国银行	IBM、麻省理工学院	人工智能、探索量子计算实际应用
巴克莱银行	IBM	优化批量证券交易等
高盛集团	D-Wave、QC Ware	风险评估、模拟定价

澳大利亚联邦银行	Rigetti Computing	投资组合再平衡
毕马威事务所	微软、Azure Quantum	量子算法、量子生态系统
德意志交易所	JoS Quantum	量子算法类研究
丰业银行	Xanadu	交易产品组合定价
摩根士丹利	IonQ	量子计算、量子通信
CaixaBank	IBM	风险评估、机器学习
NatWest	1QBit、富士通	流动资产投资组合

(1) 摩根大通

摩根大通早在 2017 年就加入了 IBM Q 网络合作计划，并且组建自己的量子科研团队，其目的就是与 IBM 合作探究量子计算如何应用于投资组合优化、风险分析、交易策略、资产定价等领域。摩根大通目前在理论上证明量子计算可以从根本上加速某些金融模型。IBM 与摩根大通利用量子计算机预测期权价格和期权组合。

(2) 高盛集团

高盛集团同样很早就开始布局量子计算技术，不仅在 2014 年投资了加拿大的量子计算公司 D-Wave，并且一直在紧密跟踪该领域的发展。高盛近年来一直与 QC Ware 合作研究量子算法在金融中的应用。2021 年 9 月 21 日，高盛、量子算法公司 QC Ware 和量子硬件公司 IonQ 宣布，量子计算在金融服务业的现实应用向前迈出了重要一步。QC Ware 和高盛为蒙特卡罗模拟理论化的量子算法现在已经在最新的 IonQ 量子计算机上得到实践演示。

(3) 加拿大蒙特利尔和丰业银行

2019 年 8 月份，加拿大 BMO 金融集团、丰业银行技术部和 Xanadu 公司共同发布了一项合作成果——应用于金融领域的新型量子算法，用于提升金融交易产品的计算效率。BMO 金融集团和丰业银行已经开始使用量子蒙特卡罗来算法来加速交易产品的计算。

(4) 英国 NatWest 银行

英国 NatWest 银行从 2018 年便开始使用量子计算解决银行面临的一些问题。测试中使用的硬件是富士通量子开发的量子退火芯片，而量子软件则由 1QBit 提供。

NatWest 和母公司苏格兰皇家银行（RBS）尝试使用量子计算实验投资组合优化，获得了相比于经典计算更快的运行时间。

(5) 摩根士丹利

摩根士丹利对于量子计算行业发展趋势的研究一直都在进行，同时也在一直积极向客户介绍量子计算技术对于各行各业影响并提供应对建议。除了对量子计算行业发展的关注和研究之外，摩根士丹利也在进行量子计算金融应用的研究和探索，例如测试了量子计算机帮助投资经理解决难题的功能。

(6) 澳大利亚联邦银行

澳大利亚联邦银行还和量子计算创业公司 QxBranch 合作建造量子模拟器软件系统，使用户能够开始开发用于关键财务运营的应用程序。

(7) 西班牙 CaixaBank 银行

西班牙银行 CaixaBank 的研发部门在真实数据的基础上构建了两个虚拟的投资组合——抵押贷款组合和国债组合。其目的是验证量子算法在度量投资组合风险和改善风险评估过程时的效果，结果表明量子计算的速度更快。

(8) 西班牙 BBVA 银行

2019 年，西班牙第二大银行 BBVA 与西班牙高级科学研究委员会成立了联合工作组，并与 Zapata Computing 和 Multiverse、富士通和咨询公司埃森哲合作，启动了六项概念验证和金融用例，包括量子算法研发、静态投资组合优化、动态投资组合优化、信用评级流程优化、货币套利优化以及衍生工具估值和调整。

(9) 渣打银行

渣打银行一直密切关注量子计算可能给金融服务带来的进步，并于 2017 年与美国大学空间研究协会开展了联合项目。该项目使用了位于加州 NASA 艾姆斯研究中心的量子计算硬件，并把量子计算应用在一个包含 60 个资产的组合优化上，节省了一半的计算时间。2020 年 9 月，渣打银行宣布与 Rigetti、牛津仪器、软件初创公司 Phasecraft 和爱丁堡大学科学家团队共同打造英国第一台商用量子计算机。

(10) 巴克莱银行

巴克莱银行早在 2017 年就加入了 IBM Q 网络，并开始研究金融行业的潜在用例。巴克莱银行与 IBM 合作研究了一种优化交易结算的简单算法，即银行通过第三方清算所进行股票交易的过程。此外，巴克莱还继续评估量子计算机可能破解现有经典密码的长期威胁。

(11) 汇丰银行控股公司

英国跨国银行和金融服务机构汇丰银行十分重视量子计算在金融领域的风险分析、

机器学习和网络安全等方面的重要性。因此，积极参与同其他量子计算公司和研究实验室的合作，研究这种最先进技术的潜力。

(12) 俄罗斯联邦储蓄银行

俄罗斯联邦储蓄银行和俄罗斯国家原子能公司子公司 Quantum Technologies 也在量子技术研究开发方面开展了合作。

(13) 美国富国银行

美国富国银行早在 2019 年就与 IBM 和麻省理工学院开展了量子计算和人工智能技术方面的合作，并开始了量子计算风险投资。

(14) 日本邮政银行

2019 年，日本邮政银行选择由专门从事量子计算机软件开发技术的初创公司 A*Quantum 项目来优化卡车调度以实现运输交付。此外，日本邮政银行还与富士通实验室进行合作，使用数字退火器优化运输网络。

(15) 花旗银行

花旗集团将量子计算列为 2019 年值得关注的五项技术趋势之一，而且投资了 1QBit 和 QC Ware 等量子计算软件初创公司。

(16) 法国巴黎银行

法国巴黎银行通过其风险投资部门在今年 6 月参与了量子计算领域机构 C12 Quantum Electronics 的 1000 万美元种子轮融资。

(17) 法国农业信贷银行

量子初创公司 QuantFi 加入法国农业信贷银行创业加速器计划标志着该银行开始涉足量子技术领域。

(18) 德意志银行

2020 年 7 月，德意志银行同谷歌就改进现金流预测、风险分析和账户安全等方面展开了密切的合作。2021 年 7 月中旬，德意志银行披露了其一系列创新和目标，计划把自己的绝大部分数据迁移到谷歌云上，并在机器学习、人工智能以及量子金融服务等方面展开深层次合作，给客户带来全新的体验。

2. 国内金融机构合作动态

近年来，量子科技发展突飞猛进，已成为新一轮科技革命和产业变革的前沿领域。

在此背景下，国内的银行业等金融机构纷纷加快与量子科技企业、互联网企业及金融同业的携手合作，联合展开了量子科技在金融领域的研究应用。

(1) 量子金融行业应用生态联盟

2021年4月，量子金融行业应用生态联盟签约由本源量子与中国科学技术大学国际金融研究院、中国建设银行联合主办，合肥大数据资产运营有限公司协办，建银国际、东方证券、中金资本、银联商务4家企业正式加入量子金融行业应用生态联盟。该联盟宗旨是共建平台、共同发展、协同创新，汇聚国内金融行业的合作伙伴，利益共享、合作共赢。

(2) 中国国际金融股份有限公司

2022年5月，中国国际金融股份有限公司与本源量子联合申报了中国证券业协会2022年重点课题《量子计算机在期权定价的应用研究》，并在此方向上进行持续性投入。

(3) 建信金科

2020年9月，中国建设银行旗下金融科技子公司建信金科与国内量子计算龙头企业本源量子达成战略合作，共建量子金融应用实验室。2021年2月，实验室正式揭牌，并以建信基金应用场景为依托，联合发布了共同研发的业内首批量子金融应用算法，包括“量子期权定价算法”与“量子风险价值计量算法”，重点聚焦金融市场与风险管理，实现了国内金融领域对量子计算指数级加速能力的首次验证。

(4) 工商银行

工行联合中国科技大学先后于2015年、2017年同业中率先实现基于量子通信技术的同城和异地数据加密传输，在电子档案、网上银行等领域落地试点。2019年，工行在银行业中率先完成了量子随机数的场景试点。

(5) 中信银行

2021年9月中信银行股份有限公司合肥分行与本源量子达成战略合作，加入本源量子计算金融行业应用生态联盟。根据协议，双方将基于本源量子的量子计算硬件、软件等技术生态平台，共同开展量子计算机原型、量子软件和量子算法等业务的研究开拓工作，充分发挥各自技术优势，在量子计算领域开展全方位、长期、逐步推进式的合作。

(6) 华夏银行

2021年12月29日，华夏银行与量旋科技合作项目《量子计算机与量子AI算法在银行业务领域的应用研究与实践》荣获“2020年度中国人民银行金融科技发展奖”一等奖^[68]；与玻色量子、中国人民银行丹东市中心支行、龙盈智达（北京）科技有限公司共同在银行家杂志发表《聚焦于量子近似优化算法在我国股票市场的应用研究》；在数字化观察杂志等发表多篇论文^[69]。

（7）民生银行

2021年6月，由安徽银保监局、省地方金融监管局、省科技厅、合肥市人民政府联合主办的2021年科技创新金融服务合肥专场对接会在安徽创新馆全球路演中心顺利举行。合肥本源量子计算科技有限责任公司与中国民生银行顺利签约，签约金额达5亿元。

（8）光大银行

2022年3月，光大科技与玻色量子、北京量子信息科学研究院联合发布了量子计算投资组合产品，天工经世量子计算量化策略平台。

（9）新华财经

2021年1月，由本源量子联合新华社旗下中国经济信息社新华财经共同发布的“量子金融应用”正式在新华财经App上线。这是我国量子金融应用首次接入传统手机端并与主流金融信息平台合作，也是国内量子金融应用与真实量子计算机结合后首次面向大众提供应用服务，是量子计算应用落地民用化的重要一步^[70]。

（四）产业链现融合趋势，全栈式公司成主流

量子计算在金融领域的初步进展将持续到2024年左右，随着技术的成熟和商业可行性的提高，量子计算惠及的银行及金融机构将迅速增加。未来，量子计算将与大数据和人工智能深度融合；并且，随着金融行业应用场景的增多、复杂度的增大以及处理问题的算力要求提升，量子计算在金融行业的优势将会愈发明显。

随着量子计算行业的竞争日益激烈，为了获得竞争优势，一些量子公司开始选择合并，全栈式量子计算公司渐成主流。2021年底，霍尼韦尔国际的量子计算部门（Honeywell Quantum Solutions）与剑桥量子计算公司（Cambridge Quantum Computing）共同宣布完成了合并，并成立名为Quantinuum的新公司。随着交易的完成，Quantinuum成为了全球最大的独立量子计算企业，而霍尼韦尔则成为了

Quantinuum 的供应商，支持该公司专有离子阱的制造过程。Quantinuum 的成立标志着量子计算行业的一个重要里程碑——客户能够访问世界上第一个量子操作系统、应用程序和与硬件无关的应用程序堆栈。霍尼韦尔和剑桥量子的合并实质上创建了完整的硬件、软件和应用程序堆栈。

此外，量子计算的产业链也呈现出融合的趋势，量子计算公司也开始纷纷和产业链上下游公司展开合作。例如，量子计算领域的领先企业 Quantinuum 与汽车、化工、制药和能源领域的工业伙伴积极开展合作。2022 年 7 月，Quantinuum 与材料创新领域的全球领先企业 JSR Corporation 联合开展了材料研究。研究团队使用最先进的计算量子化学软件平台 InQuanto 探索使用量子计算机模拟金属复合物和过渡金属氧化物等半导体材料的方法。基于量子计算的新建模方法预期能够准确预测这些材料的物理特性，以便在未来实现加速识别新的候选分子和材料^[71]。

五、量子金融的应用现状

量子金融应用近年来取得了十分长足的进步：首先，算法研究屡获突破，更加深入实际问题；其次，量子金融应用覆盖的行业和场景更加全面，涵盖了银行、保险、证券、期货等行业和风控、反欺诈、资产定价等诸多场景；最后，金融产品的形态也在不断更迭，从原始的算法验证程序进化到落地的金融产品，再演进到云服务平台和手机移动端，进而升级为面向金融科技工作者和交易员的专业金融程序开发软件。同时也应注意，量子金融应用目前尚缺乏相关的安全规范、通信规范和信息管理规范。

（一）算法研究更加深入

量子计算在金融领域的应用范围很广，并且仍在不断拓展。量子金融算法研究主要包括模拟、组合优化和机器学习三大方向。

模拟算法可以解决复杂的金融衍生品定价和金融风险分析类问题。对于长期和复杂的模拟而言，经典蒙特卡罗方法计算量大。量子蒙特卡罗模拟用更少的存储和计算资源，加速采样和模拟的过程，进而解决此类基于复杂金融和统计模型的定价与风险管理问题。此外，可以将特定金融问题映射到薛定谔方程或者哈密顿量上，利用哈密顿模拟进行问题的求解。

组合优化方法在金融中有多种用途，包括投资组合分配和再平衡、资本分配、ATM网络中的现金管理、金融套利和收益率曲线拟合。对于经典计算机而言，某些类型的优化问题搜索空间巨大，求解困难甚至不可能解决。经典优化方法经常由于计算时间太长而崩溃，或者收敛于局部最优无法达到全局最优，而成熟的量子计算机能够在短时间内完成更精确的优化。

机器学习已经被金融机构广泛采用，以改善众多业务流程，但现有的机器学习技术仍存在许多问题。随着维数的增加，在经典计算机上训练机器学习算法所需的成本和时间呈指数增长。量子计算可以更有效地处理复杂的数据分析并加速现有的机器学习技术，广泛应用于信用评级、预测分析、损益归因以及检测洗钱和欺诈行为等。

1. 模拟算法

(1) 量子蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法利用抽样来逼近难以用解析方法或数值方法解决的高维问题求解。经典蒙特卡罗方法已被用于推理、积分和优化。在金融应用中，蒙特卡罗积分 (MCI) 在风险和定价预测等金融应用中十分重要。蒙特卡罗积分通常用于估计一个未知的金融量 (例如金融衍生品或者期权价格) 的期望，这是其他不定变量 (例如市场状态) 的函数。

量子蒙特卡罗模拟利用量子的并行性，使得量子比特处于叠加态，并利用振幅估计 (AE) 算法实现平方级加速，从而大大降低了时间复杂度。经典蒙特卡罗模拟的运行可能需要数天或数周才能完成，而量子蒙特卡罗模拟可以实时进行。量子蒙特卡罗积分主要应用于衍生品定价和风险分析两大场景。

在许多金融应用中实现量子优势的一个关键步骤是有效地制备输入概率分布。量子生成对抗网络 (QGAN) ^[72, 73] 和量子波恩机 ^[74, 75] 都已经被用来学习和制备概率分布。在收敛时，量子电路作为基础分布的有效表示，可用于振幅估计以执行例如衍生品定价等任务 ^[76]，与经典蒙特卡罗模拟相比，具有理论上的平方加速。此外，研究人员探索了用于连续分布的一般创建的其他技术 ^[77, 78]，包括 Rattew 等人关于正态分布制备的工作 ^[79]。

(2) 哈密顿模拟

除了蒙特卡罗模拟算法，另外一种常用的是利用哈密顿模拟算法解决金融问题。

通过将金融问题映射为相应的薛定谔方程或者哈密顿量，可以设计特别的量子线路对此类复杂金融问题进行模拟，实现包括期权定价等在内的问题的求解。

2. 组合优化

投资组合优化是指根据一些预定义的目标，从正在考虑的资产池中选择最佳的资产集及其数量的过程。目标可能会根据投资者对财务风险和预期回报的偏好而有所不同。现代投资组合理论关注风险和回报之间的权衡，以产生所谓的有效投资组合，在给予一定风险的情况下使预期回报最大化。这种权衡关系用一条被称为有效边界的曲线来表示。在投资组合优化中，每个资产类别，如股票、债券、期货和期权，都被赋予一个权重。此外，该类别内的所有资产都会根据其各自的风险、回报、到期时间和流动性在投资组合中进行分配。

很多优化问题的本质都是二次无约束二值优化问题（QUBO），或者说可以被转化为 QUBO 问题，而 QUBO 问题可以利用目前已有的大量量子算法进行解决，例如量子退火、反转量子退火、量子近似优化算法（QAOA）、变分量子虚时间演化、变分量子本征求解器（VQE）、Grover 自适应性搜索算法（GAS）等等。

（1）量子退火算法

Edward 等人提出了一种基于绝热演化的量子优化算法。量子态的演化由时间相关的哈密顿量控制，该哈密顿量在初始哈密顿量（其基态易于构建）和最终哈密顿量（其基态编码令人满意的分配）之间进行插值。为了确保系统演化到所需的最终基态，演化时间必须足够大。所需时间取决于插值哈密顿量的两个最低状态之间的最小能量差，但一般无法估计这个差距。该算法给出了可满足性问题的一些特殊对称情况，能够实现差距的估计，并且可以在多项式时间内运行^[80]。

Angad 等人探索了商用量子硬件和算法如何解决现实世界的金融问题，然后将量子解决方案与经典解决方案进行比较。具体地，使用 D-Wave 量子退火计算机（D-Wave 2000Q）来解决金融投资组合管理中的资产相关性识别问题。用于表示资产相关性的自然框架上的图形模型。图也自然地映射到 D-Wave 开发的量子退火硬件架构。该方案探讨了如何在 D-Wave 2000Q 机器上实现图形算法来聚类资产相关性，从而识别各种金融投资组合，为未来的研究指明了高潜力方向^[81]。

（2）反转量子退火算法

James 等人利用遗传算法模仿进化过程来解决优化问题，通过使用强大的半局部搜索算法作为变异算子来增强。反向量子退火是一类量子演化，可用于从经典状态开始执行准局部或准非局部搜索族，作为新的突变来源。反向退火能够开发使用量子涨落进行突变和经典机制进行交叉的遗传算法——量子辅助遗传算法（QAGAs）。该算法在 D-Wave 2000Q 量子退火处理器上进行了实验。结果发现，标准（正向）量子退火很快就能找到好的解决方案，但很难找到全局最优解；相比之下，QAGA 在为这些输入找到全局最优值方面证明是有效的。非局部经典和量子涨落的这种成功相互作用可以为嘈杂中尺度量子（NISQ）设备的启发式离散优化的实际应用提供一个有希望的步骤^[82]。

(3) 量子近似优化算法 (Quantum Approximate Optimization Algorithm)

Edward 等人提出了一种量子算法，可以为组合优化问题产生近似解。该算法依赖于一个正整数 p ，并且近似的质量随着 p 的增加而提高。实现该算法的量子电路由单一门组成，其局部性至多是寻求最优的目标函数的局部性。电路的深度随着约束数量的 p 倍（最坏情况下）线性增长。如果 p 是固定的，即与输入大小无关，则该算法会利用有效的经典预处理。如果 p 随着输入大小而增长，则会提出不同的策略^[83]。

Mark 等人研究了与金融服务行业相关的离散投资组合优化问题在量子计算门模型上的实验性能。在门模型量子计算机的理想化模拟器上实施和评估投资组合再平衡用例，包括离散手数交易、非线性交易成本和投资约束。Mark 等人为 Quantum Alternating Operator Ansatz 设计了一种新颖的问题编码和硬约束混合器，并与其前身 Quantum Approximate Optimization Algorithm 进行了比较。实验分析证明了该应用程序在嘈杂的中级量子（NISQ）硬件上的潜在可处理性^[84]。

Slate 等人提出了一种高效的量子算法，用于针对近期嘈杂的中等规模量子计算机的投资组合优化，并探索了混合量子经典算法在金融投资组合再平衡问题中的潜在应用。Slate 等人使用 Quantum Approximate Optimization Algorithm 和 Quantum Alternating Operator Ansatz 处理投资组合优化问题，并展示了使用新开发的 Quantum Walk 优化算法在寻找投资组合优化问题的高质量解决方案方面能够显著提高性能^[85]。

(4) 变分量子虚时间演化

Benjamin 等人完成了一般实虚时间演化的变分量子模拟理论，适用于近期量子硬件，并展示了如何通过考虑全局相位对齐的校正项将结果简化为纯状态情况。对于假

想时间演化的变分模拟，还将其扩展到混合状态场景并讨论变分吉布斯状态准备。最后进一步详细阐述了与后选择测量兼容的 ansatz 的设计以及具有量子电路的广义变分算法的实现^[86]。

(5) 变分量子本征求解器

对于物理维度呈指数增长的量子系统，找到某些算子的特征值是一个棘手的问题。量子相位估计算法有效地找到给定特征向量的特征值，但需要完全相干演化。Alberto 等人提出了一种替代方法，该方法大大降低了对相干进化的要求，并将该方法与基于拟设和经典优化的状态准备新方法相结合。通过将高度可重构的光子量子处理器与传统计算机相结合来实现该算法。该方法大大降低了相干时间要求，提高了当今和不久的将来可用的量子资源的潜力^[87]。

(6) Grover 自适应性搜索

Gilliam 等人探讨了约束多项式二元优化 (CPBO) 问题的 Grover 自适应搜索 (GAS)，特别是作为特例的二次无约束二元优化 (QUBO) 问题。与蛮力搜索相比，GAS 可以为组合优化问题提供平方加速。然而，该算法需要开发出有效的预言机来表示需要满足的特定搜索条件和标志状态。一般来说，可以使用量子算术算法来实现这样的功能，但是其中 Toffoli 门以及所需的辅助量子比特需要较为昂贵的资源，导致在短期内可能会无法在量子计算机上完全实现。因此，Gilliam 等人开发了一种使用 GAS 算法构建高效预言机来解决 CPBO 问题的方法，展示了这种方法以及投资组合优化问题的潜在加速（即 QUBO），使用在真实量子硬件上获得的模拟和实验结果。然而，该方法适用于更高次多项式目标函数以及约束优化问题^[88]。

此外，Rosenberg 等人^[89]使用 D-Wave Systems 的量子退火器解决了多周期投资组合优化问题；Mugel 等人^[90]使用量子处理器 IBM-Q 和受量子启发的张量网络解决了动态投资组合优化的问题。

3. 量子机器学习

量子机器学习领域仍处于起步阶段，许多令人兴奋的发展正在进行。目前，高效的机器学习算法经过不断发展，已经可以支持不同的数据类型并扩展到更大的数据集。考虑到所涉及算法的复杂性和所分析数据的大小，机器学习已经被确定为量子计算应用的最重要领域之一。而且随着新的线性代数量子算法的产生，这一点变得更加明显，

这些算法提供了在量子计算机上比相应的经典算法更有效、更精确地执行线性代数计算的潜力。在某些条件下，量子加速甚至可以是指数级的。

虽然目前还没有发现指数级加速的量子机器学习的端到端应用，但是已经出现了若干有希望的方向。与此同时，大量的研究和工程工作已经成功地致力于实现量子算法，在其数据处理子程序中（除了数据加载和输出提取）具有显著的多项式加速^[91]。

（1）量子回归算法

监督学习的中心任务是回归，即训练一个简单模型来逼近实值函数的问题。从计算上看，这是对捕捉训练数据拟合质量的损失函数的最小化。量子回归算法利用 HHL 算法，对训练速度具有指数加速效果。

（2）量子分类算法

在机器学习中分类的目标是使用一个由标记数据集拟合的模型来预测新数据点的标签。传统分类算法包括线性分类、最近质心和支撑向量机。除此之外，基于神经网络的方法也取得了巨大的成功。经验证，神经网络比传统方法具有更好的性能，尤其是在大型数据集上。但是另一方面，在决策或执行涉及处理敏感信息的任务时，神经网络在透明度和可解释性方面存在不足。

对于线性分类，常用算法是感知器方法，量子算法已被证明能够为其提供加速。对于训练具有不变裕度的分类器的最佳经典算法，相应的最佳量子分类算法可以带来平方加速^[92, 93, 94, 95]。

对于基于距离的分类，主要包括最近质心和 k 最近邻 (k-NN) 分类器。QC Ware 公司的 Johri 等人^[96]在 2020 年将最近质心算法的量子版本用于对 MNIST 手写数字数据集进行分类，该实验是在离子阱量子计算机上进行的。此外，研究人员也提出了几种用于 k-NN 的量子方法。例如，利用一种算法计算叠加的汉明距离^[97]，并利用量子最小查找法^[98]查找到样本汉明距离最小的邻居。此外还有量子神经网络方法^[99]。在另一项研究中，研究人员将两个状态之间的保真度编码到一个量子寄存器中，允许使用量子算法来寻找 k-最小值^[100]。

对于支撑向量机 (SVM)，它可以解决凸二次优化问题，以找到导致两类数据之间最大裕度的超平面。2021 年，I. Kerenidis 等人提出了一种量子算法，以维度 d 来加速这些方法。虽然量子运行时间取决于难以直接绑定的项，但对于随机情况，量子算法确实可以提供加速^[101]。量子支撑向量机 (QSVM) 可以用来预测奇异期权的结果。例

如，双边不触碰期权（DNT）是一种二元期权，具有固定的期权费，并且当且仅当标的资产价格在到期前保持在预定义的下限和上限之间时才能获得。因此，可以使用支持向量机来分离对应于二元期权结果的两类。因为这些类不是线性可分的，这类奇异期权通常用于外汇交易。选择用于训练模型的特征可以是平均方向指数（ADX）和已实现波动率与隐含波动率之间的比率。

（3）量子聚类算法

聚类包括根据特定的度量标准识别彼此接近的数据点组。数据编码的特征空间和分组度量是数据点实际相似性和差异的代理。受量子力学的启发，量子聚类（Quantum Clustering, QC）适用于高维数据，属于基于密度的聚类算法，其中聚类由数据点密度较高的区域定义。QC 的基本思想是将每个数据点映射到以该样本为中心的高斯分布。

动态量子聚类（DQC）是 QC 的一种改进^[102]，采用含时薛定谔方程来研究与数据点相关的量子态的演化和势能函数的结构。由于这种方法与数据无关，DQC 可以应用于金融领域，例如标准普尔 500 指数数据^[103]。

受经典算法启发的量子聚类技术也被提出，包括量子 k-means 聚类和量子光谱聚类。经典聚类算法 k-means 可以识别所有数据点中最重要的聚类及其代表性的质心。Kerenidis 等人^[104]受 k-means 算法的启发，量子 q-means 算法提供了与经典 δ -k-means 算法相同的针对某种噪声水平 δ 的鲁棒性保证。其时间复杂度在数据集大小上是多对数的，并且可以使用距离估计和量子矩阵乘法来实现。还提出了一种用于表示为图的数据的量子谱聚类算法。Kerenidis 等人^[105]还提出了一种以图表示数据的量子光谱聚类算法。为了克服将大型数据集加载到量子设备上可能带来的巨大时间和空间开销，Teague 等人^[106]提出了核心集。核心集是结合权重函数的小数据集，以充分总结原始数据集。如果 Coreset 足够小并且仍然是原始数据集的表示，则能够在 NISQ 计算机上执行。

量子 K-means 算法是将量子特有的性质与传统 K-means 算法相结合，并对聚类精度有较大提升的一种量子机器学习算法。2012 年，叶安新等人提出了一种量子粒子群算法的聚类方法，在一定程度上解决了聚类效果对初始质心敏感的问题；2013 年，Lloyd 等人提出了量子版本的最近中心算法，该算法为量子 K-means 算法的子过程，利用 swap-test 将量子态内积转为对振幅的测量，进而计算出量子态之间的相似度；2015 年，潘建伟团队在光量子计算机上首次实现该算法；2017 年，刘雪娟等人通过量

子并行方案和量子搜索算法来提高该算法的效率；2021年，李玥等人利用量子粒子群优化算法的全局搜索能力强、收敛速度快等优势，提出了改进量子粒子群的 K-means 聚类算法，该算法在精度、速度和稳定性上都有显著提升，同时也在一定程度上解决了聚类效果对初始质心敏感的问题。

(4) 量子强化学习

强化学习和量子技术领域最近开始在一个新的领域融合，称为量子强化学习 (QRL)。Daoyi 等人^[107]提出了利用量子系统进行强化学习的开创性建议。该算法采用了一种类似 Grover 的搜索算法，与传统计算机相比，该算法在学习过程中提供了平方级别的加速。Paparó 等人^[108]提出了一种用于强化学习的量子算法，其中具有量子处理器的量子代理可以与经典环境耦合，从中获得经典信息。这种情况下的加速将来自经典信息的量子处理，这可以比经典计算机更快地完成。这也是基于 Grover 搜索，具有相应的平方加速。

(5) 量子自然语言处理

量子自然语言处理 (QNLP) 利用量子信息科学的数学理论和物理实验方法来建模并解决自然语言处理 (NLP) 领域问题的研究工作。量子语言处理利用量子计算中的密度矩阵等编码单词间的不确定性关系，可以节约储存成本，加快计算速度。

在金融业务场景方面，量子自然语言处理还可以用于财务分析、风险评估、贷款精准投放分析等。在技术层面，量子自然语言处理技术的应用主要包括量子信息检索和量子语言建模。

(6) 量子生成建模

生成模型用于学习数据的概率分布。在有监督学习中，模型作为一组输入/标签对被提供，模型学习即输入和标签的联合概率分布；在无监督学习中，这些模型可以用来生成仅给定样本的新数据。因为测量量子态自然会导致结果的概率分布，因此研究量子计算是否可以用于生成建模是有意义的。量子生成建模技术在金融领域中也存在着很多的用例。

量子生成对抗网络 (QGAN) 与生成对抗异常检测框架 AnoGAN^[109]相结合。生成器为参数化量子线路，来自每个量子比特上的泡利 Z 算符的期望的连续输出被反馈到经典的仿射放大层，以获得完整的输入特征维数。生成器的目标是对非欺诈性交易的分布进行建模。

(7) 量子辅助特征提取

特征提取指的是用于识别数据集属性的一组技术，这些属性可能有助于机器学习任务，如分类和回归。量子算法可以通过计算经典计算机无法识别或需要很长时间才能识别的数据集的属性来帮助进行特征提取。通过将数据编码到量子态，可以降低维经典数据映射到希尔伯特空间中的更高维。量子表示的扩展维度可用于识别经典算法不可见的特征^[110]。

从高维数据中提取低维特征的一种广泛使用的算法是主成分分析（PCA）。在 PCA 中，通过分析较大的特征空间来识别方差最大的属性。经典的主成分分析所花费的时间在原始数据集中的维数或特征数上是多项式的。如果将此类经典数据映射到量子密度矩阵，则该算法的量子版本可以以指数速度执行 PCA，即在时间多项式中以维数的对数执行^[111]。

2014 年，Lloyd 等人^[112]描述了一种量子 PCA，它比经典 PCA 具有指数加速。这种理论上的加速在某些条件下是可以实现的，因为它是基于 HHL 的。该算法可用于金融领域，以简化模型调整：随着市场条件的变化，需要调整模型，以使隐含波动率（由模型估计的波动率）与市场波动率相匹配。通过使用 PCA，可以减少组件的数量，从而减少参数的数量，最终简化模型调整。例如，在基于外汇的产品中，输入参数多种多样，范围从全球市场数据（如无风险利率）到资产具体参数（如现货价格）。因此，由于大量输入，模型调整在计算上变得昂贵。然而，由于前三个主成分通常可以解释 95% 以上的输出变化，因此只使用这三个成分可以更快、更准确地调整模型。量子主成分分析的一种变体已经在硬件^[113]上实现，通过降低 Heath-Jarrow-Morton 模型^[114]的波动因子维度来估计远期利率。

在金融领域，特征提取可用于检测交易中的异常情况。一个典型例子是，图论工具用于研究招投标市场，以识别串通的社区或企业^[115]。量子辅助图核方法^[116]已被提出用于检测图中的非平凡特征，例如网络社区^[117]，其可表示频繁相互交易的金融网络。

(8) 量子深度神经网络

部署深度学习方法的最大挑战是，与经典方法所要求的简单参数校准相比，训练复杂的神经网络通常是一个计算量大得多的过程。参数化量子线路（PQC）在表达性、训练复杂性和预测性能方面可能优于经典的变分回归模型。2020 年剑桥大学 Bausch^[118]的研究已经描述了使用 PQC 来形成递归量子神经网络（RQNN），鲁克海文国家实验室

的 Samuel 等人^[119]则研究提出了量子长短期记忆神经网络 (QLSTM) 模型的建议。尽管对资产定价等金融问题的适用性还有待研究, 但这两种方法都显示出对特定功能的经典神经网络的潜在改进。

(二) 行业场景更加全面

从行业场景层面来说, 量子金融算法应用所覆盖的行业趋于全面, 涉及的金融场景日益丰富, 包括银行存贷款业务、证券交易业务、金融衍生品业务、投资组合管理、风险控制与分析、反欺诈检测、ATM 业务智能化、精算与风险建模、加密货币支付、财务分析、固定收益、资产定价分析、金融危机预测等。随着量子计算研究人员的不懈努力和专业金融机构的积极介入, 量子金融在覆盖面和实际化方面取得了长足的进步。

1. 银行存贷款

量子计算技术在银行风控的诸多方面都有着潜在的应用, 包括债务违约及反欺诈检测、自动贷款的信用评分、贷款精准投放分析、异常交易数据及银行流水识别等等。

(1) 自动贷款的信用评分

信用评分是评估贷款申请信用风险的方法, 帮助判断申请人是否具备信用。与大公司相比, 中小企业的信用评级一直是一个挑战。中小企业的大数据越来越多, 针对这些大量数据, 可以通过技术分析帮助提高公司违约可能性的准确性。信用评分模型效率的提高能显著降低贷款融资方的风险。可以应用量子机器学习 (QML) 来改进预测模型, 利用量子计算的优势来解决二元分类的常见问题。同时在贷款组合的评估问题上也可以尝试进行量子加速。

(2) 异常交易数据及银行流水识别

量子支持向量机 (QSVM)、量子神经网络 (QNN) 等量子机器学习算法建立在经典计算机中研究最广泛的机器学习算法之上, 可以用来预测、识别和分类观察是否与特定类别相匹配。因此, 这些可以采用量子机器学习方法来识别和分类给定交易数据、以及银行流水数据集中的某种特征类, 进而能够应用于智能反洗钱。此外, QSVM 等量子智算应用还可以用于信贷坏账预判以及智能风控的一系列贯穿贷前、贷中、贷后领域的信用风险, 构建各类解决方案, 为全面识别、防范和化解风险提供有力支撑。

(3) 信贷风险评估

量子机器学习可以应用在金融信贷风险评估的场景中，例如贷款逾期的检测与高违约率群体识别。由于金融数据具有复杂、高维度、低价值纯度的特点，加上金融行业特有的强监管性，银行对用于在此类场景应用的机器学习模型要求深度的可解释性。但是，深度学习在可解释性上难以满足监管的要求，而传统的评分卡模型侧重于变量的线性计量，模型复杂度不高，当应对庞大的数据量和复杂的模型结构，运算效率面临瓶颈。探索新型的金融风控机器学习算法具有较为重要的意义。

(4) 信誉识别

信誉识别是金融学中的一个重要问题。由于在全球范围内有大量的贷款，因此能够确定对请求者的信誉有影响的关键独立特征是很重要的。而组合优化也可用于统计模型或机器学习模型中的特征选择，金融中可能从这种优化中获益的一个用例是信用评分。信用评分采用统计分析来确定个人的信用度。这一过程由贷款机构和金融机构负责进行。信用评分受支付历史、欠款账户、信用历史长度、新信用和信用组合的影响。这些信息可以从历史业务数据、公开文件和付款信息中收集。目前，信用评分通常使用经典回归模型或机器学习算法进行预测。为了得到更准确的结果，机器学习算法可以训练更多的数据。但这个过程是漫长的，而使用量子优化方法可以找到关键的特征来确定客户的信誉。

在信用评分和分类中，特征选择用于减少输入到分类器的变量数量。这可以通过二次无约束二元优化（QUBO）模型来完成，该模型试图选择独立且有影响的特征。二次优化随特征数量呈指数增长，但量子退火器上的 QUBO 实现有可能比经典求解器更快。Milne 等人使用来自 UC Irvine 的德国信用数据进行了测试，并将结果与文献中报道的结果进行了比较。与许多递归特征消除（RFE）技术相比，QUBO 特征选择产生了更小的特征子集，而不会损失准确性。

(5) 基于量子自然语言处理的贷款精准投放分析

银行可以根据信用风险评估来量化成功偿还贷款的概率。通常，偿还能力是根据以前的偿还模式和过去的贷款偿还历史来计算的。但是这些信息并不总是可用的，尤其是对于银行存款不足的申请人。量子自然语言处理（QNLP）技术可以通过使用多个数据点来评估信用风险，从而解决这一问题。例如，QNLP 可以衡量商业贷款中的态度和思维。同样，它也可以指出不一致的数据，并对其进行更多的审查。更重要的是，在一些微妙的事情方面，例如贷款过程中贷款人和借款人的情绪，可以在 QNLP 的帮助

下结合起来。

2. 证券交易

股票等证券的交易业务，是二级市场关心的核心问题。量子计算对于证券交易等的研究应用也开始起步，出现了包括股票振幅预测、多因子选股等在内的许多金融应用。

(1) 股票振幅预测

股票的振幅是用来形容股票日波动情况的一种量化指标，该指标反映了股票的活性，和涨跌情况无关。振幅的大小用最高价减去最低价的差值除以最低价得到的数值来表示，若该数值超过以往振幅的平均水平就归类为大振幅，反之为小振幅，从而将振幅预测转化为一个二分类问题。

本源量子团队将量子支持向量机运用到股票的振幅预测的实际场景并完成算法验证，发现量子支持向量机（QSVM）相较经典支持向量机（SVM）有指数级加速效果，同时经测试发现该应用分类预测效果也非常优秀。使用 QSVM 的目的就是预测未来一日股票振幅的大小。准确预测振幅将为股票在未来的走势以及投资风险领域提供重要参考，可以为相关的金融机构提供套利的机会，这在实际生活中有着重要的应用。在实验中，本源团队使用了 6 个指标作为学习特征，振幅的大小作为训练和预测的类别。其中特征为股票前一日振幅、股票历史波动率等股价变化历史信息。使用的 QSVM 算法可以给 SVM 计算过程提供指数级的加速。

(2) 多因子选股模型

在股票市场中，由股票本身会受各种各样繁乱复杂的因素影响，再加之人为的干预，因此准确预测所有股票涨跌情况的可能性变得微乎其微。在量化研究之前，人们通常采用主观的感受来判断股票是否值得买入或者及时卖出，偏差较大，并且门槛非常高，需要有经验的人才能够做出相对准确的判断。而对于一般情况来说，需要使用固定的模型来建立已有数据与股票涨跌之间的联系，来进行量化选股。多因子选股模型即人为选取多个因子（因子是指对股票未来涨幅趋势有明显影响的数据），从而预测未来股票的涨跌情况。

本源量子团队将量子支持向量机运用到多因子选股模型的实际场景并完成算法验证，发现量子支持向量机（QSVM）相较经典支持向量机（SVM）有指数级加速效果，同

时经测试发现该应用分类预测效果也非常优秀。在试验中进行多因子选股时并未做主成分分析，而是直接使用上一年财务指标等共 8 个指标输入，来预测下一季度的股票涨跌情况，最终得到了 70% 的准确率。该准确率相对于 SVM 提升了约 17%^[120]。

(3) 基于量子强化学习的算法交易

在有限或无人干预的情况下，通过考虑市场变量系统地执行金融工具交易的过程称为算法或自动交易。一般来说，算法交易是通过有监督的方式进行预测，然后在与相应预测和市场波动相关的不确定性下获得最佳交易决策。强化学习 (RL) 通过将算法交易转化为一个顺序决策问题绕过了对预测的需求。在该问题中，交易决策直接获得，从而在有限的时间范围内最大化累积收益。强化学习已被证明在算法交易方面的巨大适用性。这种用于自动交易的 RL 方法在某些强假设下运行，并且可能受益于量子机器学习技术，从而改善时间和模型复杂度。

算法交易可以归结为一个多期投资组合选择问题，包括在每个阶段重新平衡投资于选定资产的资本部分。Rosenberg 等人尝试使用量子退火设备解决这一多阶段优化问题，以获得最优交易轨迹^[121]。然而，该方法不采用任何基于策略或值函数近似的 RL 技术。由于当前量子设备的硬件限制，量子 RL 方法尚未直接应用于自动交易。然而，算法交易的组件肯定可以从量子 RL 提供的量子优势中获益。例如，用作 q 值估计器的 LSTM 神经网络结构^[122]可能被量子 LSTM^[123]取代，以提高性能。此外，变分量子电路^[124]可以用于不同的 DRL 组件，应用于算法交易的决策。

(4) 基于量子聚类分析的选股策略

量子聚类分析也可以被投资者用来实现利润最大化和损失最小化。受地理和宏观经济影响，一个地区的股票回报率可能相似。通过识别股票聚类，可以跟踪那些收益相似但风险不同的股票。一旦通过聚类分析对股票进行分组，知情的投资者就可以使用结果作为指导。例如，寻找同样回报的股票、然后选择最小化风险；或者，选择一组风险相同、回报率较高的股票。

(5) 基于量子优化算法的最优套利

当人们在不同市场上买卖类似的金融资产中获利时，就会出现套利机会。套利是由于缺乏市场均衡，利用套利机会可能会使市场重新回到均衡。因此，能够尽可能快速和有效地识别这些机会对自己有利。量子优化算法同样可以应用在套利决策中。Soon 和 Ye^[125]将识别最优货币套利机会的任务表述为一个二元线性规划问题。由于这个

问题是 NP 困难的，Rosenberg 将 Soon 和 Ye 的约束二元线性规划转换为无约束问题（QUBO），并使用量子退火加以解决^[126]。此外，Rosenberg 还提供了允许重新考虑相同资产的套利决策模型。

（6）基于量子强化学习的做市商问题

做市商在金融市场中发挥着重要作用，因为它们增加了交易所的流动性，从而促进了交易和投资。做市商负责维护一组不同数量和价格的卖出订单（询价）和买入订单（投标）。做市商通过利用最低出价和最高出价之间的价差获利。量子强化学习方法可以应用在做市问题中。

量子强化学习适用于做市商问题，可以用代理状态建模，考虑库存和风险承受能力等属性，以及代理仅具有部分信息（不一定是马尔可夫信息）的环境状态^[127]。

3. 金融衍生品

衍生品定价一直是金融市场研究的焦点。通常解法是通过简化场景来处理，例如，传统欧式期权可使用 Black-Scholes-Merton (B-S-M) 模型直接得到解析解，或是通过蒙特卡罗 (Monte Carlo) 抽样得到期望数值解。鉴于只有少量金融衍生产品可以直接求得解析解，大多数产品往往是通过在不确定性分布（如正态或对数正态分布）中重复多次随机抽样来进行数值求解，因此蒙特卡罗模拟被广泛应用。但随着衍生品复杂度越来越高，传统定价方法消耗的资源不断增多，运用量子算法进行定价逐渐成为学界和业界关注的新方向。目前，国际上量子计算在衍生品定价方面的算法研究很多，应用也非常广，主要包括期权定价和债务抵押债券。

（1）期权定价

期权定价的目标是根据潜在资产价格和其他市场变量未来波动的不确定性来源，确定期权的当前公允价值。为了对公允价值进行数值估计，生成了大量的市场变量样本，并在此基础上应用蒙特卡罗积分计算收益函数的期望值，这恰好可以利用量子蒙特卡罗积分平方级加速的优势。

Stamatopoulos 等人提出了一种在基于门的量子计算机上利用振幅估计对期权和期权组合进行定价的方法，该算法相对经典蒙特卡罗方法具有平方加速的效果。该方法涉及的期权包括普通期权、多资产期权和路径依赖期权（如障碍期权），主要通过构建输入状态所需的量子电路和振幅估计所需的算子来实现对不同期权类型的定价，并

在 IBM Q Tokyo 的量子器件上验证了该期权定价电路的性能^[128]。

Patrick Rebentrost 等人提出了一种用于金融衍生品的蒙特卡罗定价的量子算法。该算法展示了如何在量子叠加中制备相关的概率分布，如何通过量子电路实现支付函数，以及如何通过量子测量提取金融衍生品的价格。同时也展示了如何通过幅值估计算法来实现以高置信度获得价格估计和二次量子加速，为量子计算与金融的进一步研究提供了一个新的起点^[129]。

Miyamoto 等人使用量子计算机通过切比雪夫插值法，使用量子振幅估计的插值节点上的值，对百慕大期权定价的关键部分连续值进行近似，实现了百慕大期权的量子定价过程^[130]。

Martin 等人提出了几种随机动力学来模拟瞬时利率或瞬时远期利率，利用 5 量子位计算机 IBMQX2 对 2×2 和 3×3 互相关矩阵的主成分进行了实验估计。结果表明，量子计算机在金融领域的实际应用将在不久的将来能够大规模实现^[131]。

(2) 债务抵押债券 (CDO)

债务抵押债券 (CDO) 是一种由贷款池和其他资产支持的衍生品，如果贷款违约，这些资产将作为抵押品。债务抵押债券一直是最常用的结构性金融产品之一，在量化金融领域得到了深入研究。通过将资产池划分为不同档次，有效地计算和重新分配信用风险和收益，以满足不同档次投资者的风险偏好。CDO 定价通常使用各种 copula 模型，需要通过蒙特卡罗模拟来获得其数值解，因此也可以利用量子蒙特卡罗方法的优势。

Tang 等人实现了两种典型的债务抵押债券 (CDO) 模型，单因子高斯关联模型和正逆高斯关联模型，并利用条件独立的方法，将每种分布模型加载到量子电路中。然后，应用量子振幅估计作为替代蒙特卡罗模拟 CDO 定价，并使用 IBM Qiskit 演示了量子计算结果^[132]。

4. 投资组合管理

常见的量子组合优化算法和量子机器学习算法，都可以被用于资产的投资组合管理。算法的主要进步方向在于更高效的优化方法和更贴合实际的优化条件，例如持仓位的组合优化。

(1) 投资组合优化

2021 年底，国内的本源量子研究团队在金融领域中投资组合优化方向的研究工作取得新进展，并在本源量子云平台上线了基于该研究进展的量子金融应用——投资组合优化应用。该研究成果基于 Grover 搜索算法的量子优化算法 Grover 适应性搜索算法（Grover Adaptive Search，简称 GAS 算法），可快速从所有投资组合中找到给定风险偏好下的最佳收益组合，将进一步拓宽量子计算在金融领域的使用场景。GAS 算法可以为组合优化问题提供接近平方加速，从而为 NP 困难的二次无约束二值优化问题 QUBO 提供加速并应用于投资组合优化，实现平方级的加速效果。同时，使用 GAS 算法解决该问题的过程，也涉及到开发 QUBO 问题的量子门表示线路，对于未来各种基于 QUBO 的现实应用都有非常基础的开发意义。

在应用展示中，本源团队使用了 2021 年 9 月之前深沪 A 股的历史股价数据，用户可以自行选定股票组合、投资风险偏好，便可通过量子算法得到最优投资组合；同时应用也对基于 GAS 算法量子计算和经典计算在初级资产规模下的搜索次数对比，使用量子算法能够极大降低搜索次数，加速寻找最优组合。可以预见，随着资产规模的扩大，量子计算的加速优势将被不断放大^[133]。

（2）股票组合配置

鉴于金融市场中存在着大量的资产组合配置、投资组合构建等优化问题，QAOA 算法在金融市场表现出巨大的应用潜力。以基于 QAOA 算法的股票组合优化为例：股票的期望收益可通过各只股票的收盘价进行计算；波动可以通过所选股票之间收盘价的协方差矩阵进行计算。借鉴 QAOA 算法解决最大分割问题的思想，可以找到一种特定的组合，使得在达到期望收益目标的前提下，使得组合内股票间的相关性尽可能小，从而起到降低风险、优化组合表现的效果。华夏银行团队在对基于量子近似优化算法（QAOA）的股票组合配置实证研究中，针对收益率（Return，RET）、累计收益（Accumulated Return，ACC）、夏普比率（Sharp Ratio）和索提诺比率（Sortino Ratio）四个维度，将量子 QAOA 算法与对照组进行对比。结果显示，除风险厌恶环境下量子 QAOA 算法组合的夏普比率略低于对照组外，量子 QAOA 算法所构造的组合在其余各指标表现均优于对照组。华夏研究团队所使用的量子算法，不仅可以作为经典大类资产配置中的一个步骤，快速筛选出一篮子资产作为资产池，未来也有望探索成为一种资产配置方法的分支，考虑持有量子算法筛选后的具体资产用于直接投资^[134]。

（3）基于量子聚类算法的对冲基金分类

由于对冲基金和投资策略的多样性，投资者很难对此类投资工具进行分类。此外，对冲基金往往比其他类型的基金披露更少的信息。要对对冲基金进行分类，预先定义的类将无法正确管理对冲基金未来的类。因此，聚类方法，如 k-means 已被用来克服这个问题。它考虑的特征基于对冲基金的可用特征，如资产类别、规模、费用、杠杆和流动性。量子聚类可以实现对经典 k-means 单个步骤的加速。该算法有望为 FOF 或个人基金组合提供分析建议。

5. 风险控制与分析

金融资产风险价值 (Value at Risk, VaR) 是指在一定的持有期和给定的置信水平下，利率、汇率、股票价格和商品价格等市场风险要素发生变化时可能对产品头寸或组合造成的潜在最大损失。VaR 值是对未来损失风险的事前预测，考虑不同的风险因素、不同投资组合之间风险分散化效应，具有传统计量方法不具备的特性和优势，已经成为业界和监管部门计量监控市场风险的主要手段。VaR 值的局限性包括无法预测尾部极端损失情况、单边市场走势极端情况、市场非流动性因素。VaR 值计算也可以用量子振幅估计 (QAE) 相关算法来实现平方级别的量子加速^[135]。

Egger 等人提出并分析了一种量子算法，能够比经典蒙特卡罗模拟更有效地估计信用风险。更准确地说，估计经济资本要求、即风险价值与给定损失分布的预期价值之间的差异。经济资本要求 (ECR) 是一个重要的风险指标，因为它总结了在给定的置信水平下保持偿付能力所需的资本数量。Egger 等人模拟演示了平方加速估计 ECR 的量子算法，并分析了在未来量子计算机上合理假设下现实问题规模的缩放和预期运行时间。此外，该研究结果也适用于更复杂的不确定性模型或其他目标、如 CVaR，而没有太多额外的开销。虽然在硬件开发方面还有很长的路要走，但这意味着量子计算在信用风险分析方面的巨大潜力。对算法的进一步研究有助于减少所需的量子比特数和预期电路深度^[136]。Stefan 等人提出了一种量子蒙特卡罗模拟算法，采用量子幅度估计来为证券定价，并在基于门的量子计算机上评估风险度量，例如风险价值和条件风险价值，此外还展示了如何实现该算法以及如何权衡算法的收敛速度和电路深度^[137]。

(1) 风险价值 (VaR) 计算

VaR 值计算算法应用了量子振幅估计相关的算法来实现对经典蒙特卡罗方法的平方级别的量子加速，最后获得一个稳定的 VaR 值计算值。为了验证算法的正确性，研究

团队同样也使用参数法作为对照查看量子蒙特卡罗法的收敛情况。研发团队使用了2021年深沪A股的历史股价数据，用户可以自行设定手中持有的股票、总资产以及要估计的时间，之后便可通过量子算法得到不同预设统计模型下资产的VaR值。使用量子算法会较快收敛得到和参数法较为相似的结果，这表明量子VaR值计算应用将在未来的金融风险管理中发挥重要作用。

建信金科和本源量子研究团队在研究中，利用正态分布和T分布两种常见的拟合模型以及经典算法中的历史模拟法的VaR值计算数值。其中正态分布模型和T分布模型的结果是通过量子蒙特卡罗法进行求解的。

(2) 隐含波动率估计

隐含波动率 (Implied Volatility) 指标反映了金融市场对给定证券价格变化可能性的看法。波动性分析对于风险管理、投资组合对冲和期权定价至关重要，因此需要准确了解市场对波动性的预期。投资组合对波动性变化很敏感，例如明隐含波动性对股票的回报有影响。深度量子神经网络是一种很有前途的技术，可以有效地解决隐含波动率预测这类的数值问题。

Sakuma^[138]提出了一种学习隐含波动率的深度量子神经网络的方法，这使用了Beer等人^[139]首次引入的深度量子神经网络。给定期权，输入数据为其执行价格，输出数据为隐含波动率。

6. 反欺诈检测

金融领域的欺诈行为，可以被认为是数据中的异常值，以往的经典检测方法一般是构建有监督的分类模型来进行分析。而目前在量子反欺诈算法方面国际上的研究尚属初期。反欺诈的核心就在于异常检测，反欺诈算法的开发将量子优势应用于异常检测算法并为反欺诈领域提供所需要的分析加速。

(1) 基于量子 One-Class SVM 的欺诈检测

量子 One-class SVM (QOCSVM) 是经典的异常检测算法。其算法原理的核心是在特征空间中找到一个超平面，使它既可以最大化从超平面到特征空间原点的距离，又使数据点和超平面之间的距离最小化。量子单类支持向量机算法可以使用量子态维数上的资源对数来实现异常检测。其中，首先在计算所需要的核函数时可以通过量子 swap-test 方法使用训练集特征维度的对数个量子比特计算出不同特征数据之间的内积，而

这一计算资源在经典上是随特征维度线性增长。其次，通过量子线路计算度量函数得到被测数据点到支持向量机的超平面的接近度量来判断其是否异常。这个过程中可以将训练集量子态编码，使用 HHL 算法对单类支持向量机超平面的参数进行求解，而 HHL 算法在理论上可以保证在训练集规模指数级增加时量子线路所需要的计算资源仍为线性增加，即在算法理论层面给超平面参数的计算带来指数级加速。

本源量子研发团队使用量子线路加速，将无监督的单类支持向量机异常检测算法 (QOCSVM) 应用于金融风控领域中企业异常行为的检测。该异常检测算法可以利用量子计算的并行性，在训练数据量和特征维度上的计算复杂度分别进行指数级加速。在实际业务应用中，本源量子研究人员收集了过去几年中同一板块下的 30 家企业的财报数据，包括资产负债率、流动比率、速动比率等常见财务指标，然后选择了其中 6 个指标进行欺诈检测，在虚拟机上使用量子单类支持向量机对这些企业的欺诈风险系数进行了判断，最终发现有两家企业风险系数较为异常。经过验证发现这两家确实在近年来出现了债务违约状况。对于银行等金融机构来说，这种欺诈风险的早期预警是十分重要的。

(2) 基于量子机器学习的欺诈检测

玻尔兹曼机器的量子版本已用于生成学习和辨别学习任务^[140,141]。特别是对于欺诈检测，变分 ITE 玻尔兹曼机方法已被用于分类异常信用卡交易^[142]。系统哈密顿量由泡利字符串的和表示，泡利字符串的系数是训练参数和输入特征的函数。如前所述，该公式不限于玻尔兹曼机通常使用的伊辛哈密顿量。预测是通过从单个可见量子比特采样来执行的，该量子比特指示交易是否出现欺诈。

7. ATM 业务智能化决策

(1) ATM 智能预测

商业银行 ATM 机具的使用率因受到移动支付的冲击而出现了大量的撤机现象，全国范围内 ATM 机具减少了 4 万余台。在此背景下，商业银行需要精准地筛选出效能差、使用率低的机具设备，并进行撤机，以缩减成本。华夏银行团队通过构建量子神经网络算法模型对 ATM 机具进行有效识别，识别结果作为 ATM 机具裁撤的重要依据，为商业银行金融服务和金融管理提供智能化、量子化的决策支持，同时为量子科技在商业银行领域的应用实践进行有益探索。

(2) 智能柜台布局优化

银行智能柜台设备管理的难点在于其分布范围广、数量多，所在地区客户和环境情况复杂等。为解决智能设备高效运营、精准布放的问题，可借助 K-means 聚类无监督学习方法，缩小对网点智柜设备业务的关注范围，直接聚焦到表现优异的网点集群和表现不理想的网点集群，有助于定期评估和掌握各网点智柜设备的运营管理情况，为进一步调整资源配置提供决策依据。华夏研究团队针对银行运营管理中的智能柜台布局优化场景，运用前沿的量子 K-means 算法模型，给出聚类分析结果和资源配置优化建议方案，为商业银行运营管理数字化转型提供了科学的决策依据，符合数字经济时代商业银行数字化转型的整体战略要求。

8. 精算与风险建模

精算与风险建模，这两者都属于资源密集型计算。保险公司往往通过复杂数学模型的计算识别潜在风险，进而对保险产品进行准确的定价，并确定保险准备金率的水平以保障偿付能力避免挤兑发生。随着新的偿付能力和国际财务报告准则等的出台，保险公司需要更高频率运行、校准、优化模型。复杂多变的国际局势、极端的自然环境、互联网及其他新技术都对风险建模及其模拟计算能力提出了更高的要求。

量子计算可以更快计算出更准确的结果。例如，保险经纪和解决方案公司 Willis Towers Watson (WTW) 长期利用复杂的数学模型为客户提供解决方案。但是，量化风险的建模需要大量的算力，有些问题使用经典计算无法解决，因此 WTW 与微软合作探索量子计算在保险、金融服务和投资领域的应用。

银行可以根据信用风险评估来量化成功偿还贷款的概率。通常，偿还能力是根据以前的偿还模式和过去的贷款偿还历史来计算的。但是这些信息并不总是可用的，尤其是对于银行存款不足的申请人。量子自然语言处理 (QNLP) 技术可以通过使用多个数据点来评估信用风险，从而解决这一问题。例如，QNLP 可以衡量商业贷款中的态度和创业思维。同样，它也可以指出不一致的数据，并对其进行更多的审查。更重要的是，在一些微妙的事情方面，例如贷款过程中贷款人和借款人的情绪，可以在 QNLP 的帮助下结合起来^[143,144]。

9. 财务分析

量子计算同样开始被用于财务分析，除了利用量子自然语言处理（QNLP）对财报进行分析、解读，还可以通过舆情分析、新闻捕捉等技术，识别财报中的潜在风险。

（1）财务预测

财务预测基于许多宏观经济因素，这些因素是非结构化的，分散在不同的来源，这就是 QNLP 技术被频繁使用的原因^[145]。例如，QNLP 建议从财务角度将新闻文章分类为重要或非重要^[146]。此外，情绪分析在交易者的决策中起着重要作用，也可以在 QNLP 技术的帮助下进行^[147]。

（2）会计与审计

会计、审计和财务领域经常提出旨在传达各种信息的文本文件，包括但不限于公司财务业绩、管理层对当前和未来公司业绩的评估、分析师对公司业绩的评估、领域标准和法规以及符合相关标准和法规的证据。量子自然语言处理（QNLP）能够应用于会计和审计，其目标是通过评估会计系统、监控内部控制、评估欺诈风险以及解释财务数据的异常趋势来发现和预防欺诈。NLP 已被提议用于为财务会计准则创建语义知识库或树。此外，审计师还可以通过应用 QNLP 技术检测财务报表中的异常情况。

10. 固定收益及其衍生品

固定收益是一类以国债、债券等为主的交易标的。固定收益及其衍生品的分析中，可以使用量子优化算法进行清算，或者量子机器学习方法进行债券评价或者债务违约检测。

（1）掉期清算

掉期是指双方同意为一个特定期限的定期交换现金流的合同。常见的掉期类型是信用违约掉期、外汇货币掉期和利率掉期。最简单的例子是固定利率到浮动利率掉期，其中双方根据一种称为名义价值的本金来交换支付固定利率和浮动利率支付的责任^[148]。

签订这类合同的潜在原因可能是为了对冲或利用对方的比较优势。一旦双方达成协议，清算所将双方之间的协议转换为与清算所的两个独立协议。该清算所可能会与多方进行多次互换。在多个现金流取消的情况下，清算所希望将所有取消的合同，只计入净流量。这是为了减少与拥有多个合同相关的风险暴露。

通过清算所清算的掉期交易可以相互抵消。通过这样做，清算所降低了其风险敞口，交易对手重新使用了之前被捆绑在保证金账户中的资金。最简单的净额结算形式

是取消完全相互抵消的交易。但是，也有可能净交易或交易链，总和非常小的残差。找到新的可净资产组合的能力可以带来新的资本效率。基于量子计算的交换净额结算解决方案利用量子退火器来识别此类组合，并将它们作为净额结算提议呈现。候选互换是基于不相容函数选择的，该函数以灵活的方式结合了经济术语的差异。Rosenberg 等人证明了可以使用量子退火器解决掉期网络问题，对名义利率和固定利率不同的掉期进行净额结算^[149]。

(2) 债券违约风险因子优化

本源量子团队开发出量子 mRMR 算法 (QmRMR)，加速分析识别金融风控领域企业债务违约行为。在筛选预警模型中有效指标时，团队利用量子近似优化算法 (QAOA) 对全局最优指标的选取进行平方级加速，改进了最大相关最小冗余 (mRMR) 算法，这一方法大大减少了债务监测中的冗余分析指标，成功降低预测债券违约模型中的过拟合风险。

(3) 债务违约及反欺诈检测

在金融风控中，债务违约及反欺诈检测十分重要。因为，企业债务的违约往往会造成很多负面影响，首当其冲的便是提供融资的金融机构，造成贷款损失，甚至影响与其关联的上下游企业，产生严重的连锁反应。

针对金融风控领域企业债务违约行为，传统的检测方法一般有两类。一是有监督的分类模型分析，这类方法只能识别历史数据中已经存在的诈骗手段，而新的企业债务违约信息由于不在历史数据中故难以识别；另一类是一种无监督的异常检测方法，只需样本点的特征，无需确定样本点的所属类别，对历史数据的依赖性大大减小，这特别适用于金融风控领域中企业债务违约行为的识别。然而训练大量高维的历史数据是经典计算的一大难点，采用量子计算可以加快风险分析计算速度，甚至能考虑到大量变量和约束，快速处理复杂计算^[150]。

此外，玻尔兹曼机的量子版本和量子线路波恩机已用于生成学习和辨别学习任务。特别是对于欺诈检测，变分 ITE 玻尔兹曼机方法已被用于分类异常信用卡交易。

11. 资产定价分析

资产定价主要是为各类金融工具（如股票、债券和衍生品）进行定价。有几种经济模型用于根据一系列瞬时（或现货）价格来分配这些价格，包括一般均衡定价和无

套利定价。

预测这些现货价格的常用方法是将其建模为简单的基本随机过程的函数，如布朗运动或几何布朗运动。然后历史财务数据可以用来确定这些随机模型的参数。一般来说，预测现货价格（以及许多其他随时间变化的金融权益）可以建模为一个时间序列学习问题。具体来说，即给定一系列历史价格，对未来的价格做出准确预测，将其建模为有监督回归问题。深度循环神经网络（RNN）在时间序列预测方面越来越成功，尤其是那些利用 LSTM（长短期记忆人工神经网络）的方法，这使得研究人员考虑将这些通用算法用于资产定价。

（1）基于量子回归算法的多资产趋势跟踪策略

回归模型可以用于预测多资产类别投资组合的单日回报。每个金融资产类别（例如股票、债券、现金或商品）可能具有不同的内部动态。然而，回归模型可能会涵盖全局动态。采用量子差分私有（QDP）稀疏回归学习方法不但能保证隐私，而且比最优经典和量子非私有拉索回归更快。Hsieh 等人^[151]设计了一种高效的量子差分私有（QDP）拉索估计方法来解决稀疏回归任务，并讨论了在具有优势的近期量子芯片上实现的可能性。研究机构表明，该方法在保证隐私的同时，能够比最优经典和量子非私有 LASSO 回归更快。

（2）基于量子神经网络的资产价格预测

各类金融资产的价格变幻莫测，受到诸如需求、供应、国际形势、经济预期、资金供给等多方因素影响，而预测资产价格是金融机构进行资产投资的重要工作。可以考虑搭建量子神经网络（QNN）模型，提升模型对资产价格预测的准确度。

12. 金融危机预测

金融崩溃的预测最近被证明是一个计算上难以处理的（NP-hard）问题。金融崩溃本质上是难以预测的，即使对于拥有完整金融体系信息的监管机构来说也是如此。在金融市场中，一个金融网络可以被看作是一个实体的集合，其估值与网络中其他成员的估值相互关联。因此，对金融网络的分析对于能够预测危机非常重要。而预测系统同样可以映射到 QUBO 问题，从而利用量子计算在解决优化问题上的优势。

Orús 等人^[152]展示了如何用量子退火处理这个问题。更具体地说，将金融网络的平衡条件映射到二次无约束二元优化（QUBO）问题，然后在绝热量子计算机上实施，从

而提供了一种可能更有效的方法来评估金融平衡和预测金融崩溃。

Fellner 等人^[153]则是利用 QAOA 来解决以上的 QUBO 问题，提出了量子近似优化算法 (QAOA) 的奇偶变换基准，并分析了为现实世界场景实施单个 QAOA 周期所需的量子门资源。特别是考虑了具有高阶项的随机自旋模型，以及预测金融崩溃和找到电子结构哈密顿量的基态的问题。对于所研究的自旋模型，奇偶映射与标准门模型相比具有显著优势。

(三) 产品形态更加多样

从量子金融应用的产品形态方面而言，量子金融产品从早期的示例代码、研究课题，逐渐向产品化、云端化、移动端和专业程序开发软件四个方向演变，具有更加多样的产品形态和更加贴合实际应用的服务。

1. 量子金融产品

国内已有包括建信金科、华夏银行、光大银行、本源量子、玻色量子、量旋科技、图灵量子等在内的金融机构和量子计算公司先后推出了适用于各类业务场景的多种金融产品。相对于论文或者示例代码，金融产品具有完整的 UI 界面，考虑了更为实际的金融数据、金融需求、分析与展示效果，是量子金融走向金融界从业人员的重要实践步骤。

从量子金融产品的发展来看，其功能在不断丰富，也越来越贴近实际金融场景。以量子期权定价为例：2020 年底建信金科和本源量子联合开发完成并在 2021 年初发布国内首批量子金融应用，可以用于基础的欧式期权定价；随后，本源量子拓展了面向期权组合的量子策略应用并上线云平台 and 新华财经手机移动客户端；2022 年，本源团队继续拓展应用的标的范围，使其可以用于包含复杂的奇异期权（亚式期权、一篮子期权以及障碍期权）及希腊字母等更贴近金融工程实际需求的专业金融产品。

2. 量子应用云平台

目前，对于大多数量子计算的潜在用户来说，使用量子云平台比购买量子计算机更为方便和有效。量子云平台为特定客户提供更为便捷、经济的量子算力，在量子计

计算机硬件相关产业没有巨大的技术突破前，量子云平台都将长期保持量子计算的行业主导地位。各国政府同时也在努力推动量子云平台发展，助力本国量子软件与算法研发，为未来的量子计算竞争提高自身的“量子软实力”。近年来，国内包括建信金科、本源量子、量旋科技、玻色量子、中科院量子信息与量子科技创新研究院、图灵量子等在内的研究机构和量子计算公司也陆续推出了各自的云平台。量子应用云平台自出现以来，也取得了长足的进步和发展，主要包括以下三大趋势：

(1) 与专业金融机构云平台、量化交易平台融合

建设银行基于多年的金融系统研发能力，依托金融云原生底座，自主研发了量子金融云平台，目前已经进入内部测试阶段。该平台具备量子线路图和在线 Notebook 等多种量子算法研发模式，底层算力可兼容量子模拟器与量子物理机，将为国内金融行业量子信息技术的发展提供有力的支撑。2022 年 3 月，光大科技与北京量子信息科学研究院、北京玻色量子科技有限公司联合发布了量子计算投资组合产品——天工经世量子计算量化策略平台。2022 年 8 月，图灵量子推出业内首个基于量子机器学习的量子计算量化策略平台，平台首次支持了回测系统等功能^[154]。

(2) 量子计算与模拟资源不断升级

2017 年 10 月，本源量子联合中科院量子信息重点实验室推出“本源量子计算云平台”，公众通过互联网远程登录，可使用我国自主研发的 2 量子比特半导体芯片以及最大支持 30 量子比特的量子模拟器来实现应用。2018 年 4 月，本源量子计算云平台推出 64 量子比特的量子计算模拟器。2020 年 9 月，本源完全自主开发的超导量子计算云平台正式向全球用户开放，该平台提供对本源量子自主研发的超导量子计算机——本源悟源（搭载 6 比特超导量子处理器夸父 KFC6-130）的访问。

2017 年 10 月，阿里云和中科院联合发布量子计算云平台。2018 年 2 月，中科院量子信息与量子科技创新研究院与阿里云共同发布 11 比特的云接入超导量子计算服务。2021 年 4 月，量子计算云平台进行了系统切换，量子创新研究院联合济南量子技术研究院和科大国盾等对网站页面和功能进行了重新设计，超导量子计算原型机升级至 12 比特^[155]。

深圳量旋科技有限公司与深圳量子科学与工程研究院、南方科技大学物理系合作，在 2018 年 11 月联合发布了世界上首台开放控制层的核磁共振云平台 PCloudQ 平台（简称 PCQ），具有 4 个量子比特。2020 年 10 月，量旋科技发布了新一代通用量子计

算云平台“金牛座”。该云平台可链接多种量子计算物理体系，其搭载的超导核磁共振体系可以实现多达 6 量子比特的量子计算，同时还搭载有 2 量子比特的桌面型核磁共振量子计算机（双子座）^[156, 157]。

(3) 向一般开发者提供应用发布渠道，建立开发者社区

本源量子发布的量子计算应用工厂是专门为量子计算应用开发者提供的一个可以在线自助发布量子计算应用的平台。该平台依托主流 DevOps 思想，开发者在平台上可自助发布应用服务，平台会提供标准的结果输出和图形化界面配置展示。在该平台上，无需过多开发介入，开发者仅需关注应用本身的出入参数配置，即可完成量子应用的集成并对外提供服务，实现量子计算应用推广^[158]。

3. 量子金融应用移动端 App

随着量子金融的发展，专业的基于移动端的量子金融 App 成为现实需求。它具有使用更为方便、易于宣传推广、体验效果好的优势。

2022 年 1 月 26 日，由本源量子联合新华社旗下中国经济信息社新华财经共同发布的“量子金融应用”正式在新华财经 App 上线。这是我国量子金融应用首次接入传统手机端并与主流金融信息平台合作，也是国内量子金融应用与真实量子计算机结合后首次面向大众提供应用服务，更是量子计算应用落地民用化的重要一步。

该“量子金融”应用合辑通过“本源司南”量子计算机操作系统，实现了经典计算机与量子计算机的有机结合，现阶段采用国内首批工程量子计算真机“本源悟源”，未来还将直接与本源新一代超导量子计算机和半导体量子计算机对接。“新华财经 App 量子金融应用”主要涵盖量子计算在投资组合优化、衍生品定价以及风险分析等方面，用户可登录新华财经 App，访问“集市”中的“量子金融”，即可抢先一步体验量子计算的魅力。

4. 专业金融程序开发软件

随着金融界专业人士对量子金融的了解，面向量化交易、金融电子化等实际需求的，更为专业的量子金融程序开发软件迫在眉睫。基于此，国内量子计算公司开始研发面向专业投资者、金融科技从业人员、金融机构和高校研究任意的量子金融程序开发软件。

“本源金融衍生品定价库”是国内首个面向程序开发者和金融专业人士的专业量子金融算法库，它是专门适用于分析期权等金融衍生品定价的开发者工具，包含复杂的奇异期权（亚式期权、一篮子期权以及障碍期权）。同时发布了衍生品定价 API、衍生品定价 SDK 以及衍生品定价前端应用。

相较于之前各量子计算公司发布的量子金融产品，该算法库提供了 API 和 SDK 功能：用户可以使用 HTTP API，提供 API 调用的 web 界面支持，允许最终用户和外部组件、内部应用与外部应用之间的相互通讯，允许用户查询和操作衍生品定价库中 API 对象的状态；提供衍生品定价库的开发者工具套件（SDK），用户可以本地快速使用衍生品定价库。可以预见，此类面向专业金融科技从业者和量子金融研究人员的专业计算软件，会成为未来量子金融实用化的一个重要方向。



本源量子
ORIGIN QUANTUM

六、量子金融面临的挑战

（一）硬件性能仍待提高

量子比特的硬件实现主要分为两类：以超导、半导体为代表的人造量子比特不满足全同性且容易与外部物理体系发生相互作用（退相干），失去叠加态所携带的信息；以光量子为代表的天然量子比特虽然相干时间长，但因此与外界物理体系难以发生相互作用，影响了其操控性能；除了相干性，量子比特的扩展性也有限制：离子阱等需要搭建复杂的光路对量子比特进行控制，不利于体系的扩展。

量子比特的扩展性问题限制了可以实现的量子算法的规模，量子比特面临的退相干、比特翻转、门操作保真度等问题又限制了量子线路的深度和算法复杂度。量子硬件的性能仍需要提高以满足量子金融的要求。

（二）量子纠错尚需解决

量子计算机的物理实现依赖于量子比特的相干性，这种特性容易受到外界环境的干扰而失效。因而，需要通过量子纠错算法等降低各类错误对结果的影响，否则计算结果会淹没在噪声之中。量子纠错往往需要通过多个物理比特编码一个量子比特，通过一定的测量手段和编码解码方案实现纠错。由于物理比特的性能等现实问题的制约，量子纠错尚需解决。

（三）金融安全面临挑战

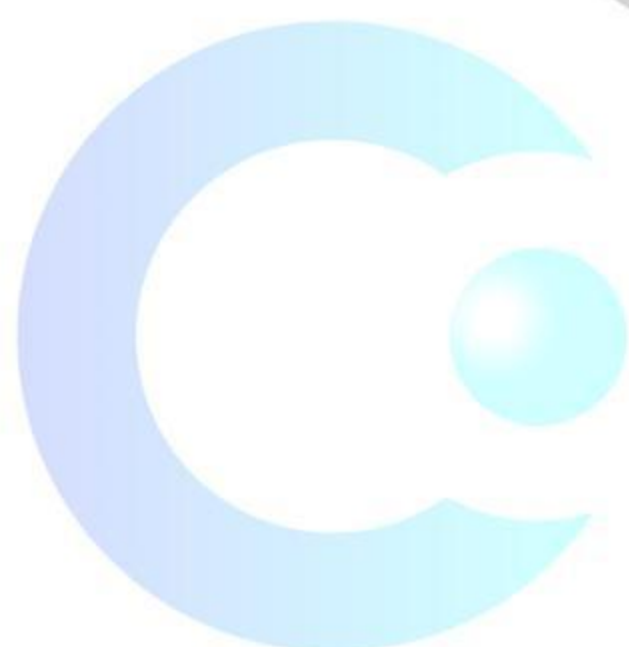
量子计算可求解困难金融问题，也可利用诸如 Shor 算法等快速分解质因数，破解诸如 RSA 公共密钥系统等加密算法。金融安全面临着诸多方面的挑战，在技术上，抗量子密码还在研究中，量子加密手段也并不成熟，缺乏可行性强、安全系数高的后量子时代加密手段；在制度上，量子金融时代新的金融安全规范尚未建立健全，如何防范和应对后量子时代的金融安全威胁，仍待研究。

（四）产业落地尚有距离

量子计算行业目前处于早期探索阶段。虽然国内外量子计算产业链初具雏形，但在硬件方面，国内外多数公司的量子芯片制造都依托于高校或者科研机构的量子芯片实验室，而且由于量子芯片和半导体芯片在制备工艺上存在不同，即使相对成熟的半导体工艺也很难对量子芯片的制造提供直接的帮助；软件方面，国际上已有超过 100 家量子计算的软件公司且涵盖金融、医药、流体力学等诸多领域，但中国的专业量子计算软件公司起步较晚、相对较少；金融产品方面，目前仍处于探索阶段，距离产业落地尚有一定距离。因为量子计算的硬件仍然在快速进步中，而且金融机构量子计算相关的技术标准尚未完全确定，管理规范也仍在探索中。

（五）量子金融人才稀缺

当前量子金融复合人才十分稀缺，首先是因为量子计算作为高新技术具有很高的学习壁垒，其次是金融科技涉及的面非常广泛、专业性高，并且国内尚缺乏此类复合人才的成熟选拔、培养机制，培养周期长、培养难度大。最后，量子金融产业规模日益壮大，也造成了大量人才缺口。



七、量子金融展望与建议

可以预见的是，随着国家各项支持政策的出台和落实，以及量子计算软硬件的持续进步，量子金融必将具有广阔的发展前景，对金融和科技产生深远的影响。量子计算的国际合作日益密切，随之而来竞争也必将更加激烈。不远的将来，覆盖更多行业和场景的量子金融算法将会面世，更加贴合普惠金融、稳定安全、节能高效的实用化的量子金融应用将会落地。量子计算和量子金融相关的产业规模将进一步壮大，涌现一批科研能力强、技术水平高、实践经验丰富、能够产生社会影响好、经济价值高的上市企业和科技创业公司。

（一）建设自主可控的量子计算全产业链

建设自主可控的量子计算全产业链，面临严峻的外部形势：量子计算是全球各国重点关注、竞争激烈的高新前沿技术；金融是关系国家社会稳定和人民福祉的重要方面。当今的国际社会竞争加剧，中国在芯片等高新技术领域面临诸多限制和围堵。

建设自主可控的量子计算全产业链，也有强烈的内部需要：独立自主是中华民族精神之魂，是立党立国的重要原则。自主可控的量子计算全产业链的建设，对于我国的独立自主、金融安全、科技发展都具有非常重要的意义；对于产业升级、经济发展、民生就业都具有十分重要的促进作用。

因此，所有的量子计算和量子金融从业者、量子计算产业链上下游企业应当不懈攻关，不畏困难，共建自主可控的量子计算全产业链。

（二）构建内外结合的量子金融科技生态

金融机构需要对持续跟踪量子金融新进展，既要关注量子计算技术对金融业的巨大应用潜力，也要防范量子计算技术对金融生态和安全的冲击挑战。目前，量子计算在金融行业的应用场景已经涵盖了银行存贷业务、证券交易业务、金融衍生品业务、投资组合管理、风险控制与分析、反欺诈检测、智能化业务决策、精算与风险建模、加密货币支付、财务分析、固收及衍生品、资产定价、金融危机预测等等。此外，量子优越性对于高频交易、信息加密等领域也会产生比较大的冲击。

金融机构对于量子金融的关注和参与，主要可以通过内部研究、外部合作、联盟等方式进行。由于金融数据在保密性和安全性方面具有较高要求，大的金融机构必须建立自己内部的量子金融人才队伍；同时，也应该和量子计算公司进行合作以保证在技术、信息等方面的领先性；此外，构造量子金融联盟有助于发挥合作作用、突破西方技术封锁，建立中国的量子金融标准，提高在国际量子金融领域的话语权。目前国内已有中国计算机学会（CCF）量子计算专业组、中国通信学会（CIC）量子计算委员会、本源量子计算产业联盟（OQIA）等成熟组织^[159]。

（三）挖掘量子计算的实际金融应用场景

量子金融不是无米之炊、无源之水，量子金融行业的发展离不开实际金融业务场景的需要。量子金融的研究和发展方向，是利用量子计算技术解决实际场景中的金融问题面临的海量数据、复杂模型、困难问题的优化和求解。挖掘实际金融应用场景，需要各个金融机构以自身业务为导向，以量子算法为基础，广泛调研、深入思考。一方面，金融机构和量子计算公司应该加强交流、合作，另一方面，金融机构也应该逐步培养自身的量子金融人才梯队。

（四）关注量子计算与普惠金融结合实践

《国务院关于印发推进普惠金融发展规划（2016—2020年）的通知》指出：大力发展普惠金融，是我国全面建成小康社会的必然要求，有利于促进金融业可持续均衡发展，推动大众创业、万众创新，助推经济发展方式转型升级，增进社会公平和社会和谐。2022年4月8日，银保监会发布《关于2022年进一步强化金融支持小微企业发展工作的通知》，《通知》提出银行业金融机构总体继续实现普惠型小微企业贷款“两增”目标。目前国家仍在不断推出新的政策，进一步推动普惠金融服务的发展。普惠金融鼓励金融创新，丰富金融市场产品，帮助老百姓摆脱“融资难、融资贵”的困境。

量子金融，更需要与普惠金融结合实践。一方面，金融创新需要和普惠金融相结合，而量子金融作为金融科技创新的前沿，只有通过普惠金融的结合实践，才能更好地发挥高科技对国计民生的助力作用，承担科学技术发展对建设和谐社会的重要责

任。另一方面，发展普惠金融还应树立风险防范意识，提升风险防范能力，利用量子金融避免不必要的损失，才能让普惠金融模式实现可持续发展。

因此，倡议所有的量子金融从业人员，关注量子计算与普惠金融的结合实践，在例如小微企业贷款发放、扶贫资金和贷款的精准发放、贷款违约风险预测等各个方面，积极开展量子金融与普惠金融结合的研究与实践。

（五）加快量子计算与金融复合人才培养

量子金融的发展需要人才作为支撑，尤其是掌握量子计算和金融知识的复合型人才，但目前我国现有的此类人才较为稀缺，只有加快这类人才的培养才能够在量子计算技术的飞速发展中保持竞争力。量子计算人才和量子金融复合人才的培养，具体措施如下：

1. 建立量子金融人才培养机制

量子金融人才具有高度的专业性和背景的复合性，一方面需要过硬的数学、物理、计算机专业知识，另一方面还需要广泛的金融知识和丰富的金融从业经验。目前国内尚缺乏此类完善的量子金融人才培养机制。

量子金融人才培养需要校、研、企多方合作：学校开始量子信息专业培养学生较高的数理基础素养，科研团队提供量子算法等专业知识，金融机构和量子计算公司提供切实的金融实践机会。

另外，也可以对具备较好数理素养和丰富金融经验的人才进行培养，使其了解量子信息和量子计算的基本原理、熟悉相关算法思想。此方面可以参考“本源量子金融赛道班”等专业培训方式^[160]，对优秀的金融专业人才进行量子计算和金融应用培训，使得能够全面、快速了解量子金融的基本面貌，具备一定的算法研究开发能力，最终建立金融机构自己的人才造血机制。

2. 拓宽量子金融人才选拔机制

作为新兴的交叉领域，量子金融人才的培养具有长期性和滞后性的特点，这需要金融机构和量子计算公司拓宽量子金融人才的选拔机制，广开门户纳良驹，不拘一格用人才。相关企业可以参考CCF“司南杯”量子计算编程挑战赛^[161]，举办量子计算和量子金融比赛，选拔发现来自高校、科研院所、企业等单位的量子金融人才，鼓励引导这些人才投身量子金融产业。

3. 构建量子金融人才良好生态

量子金融人才的孕育和成长，离不开良好的量子金融生态。这要求各金融机构、高校、科研院所、量子计算公司合作共建良好生态，比如制定完善的量子金融行业标准、明确量子金融人才的标准、提供更好的量子金融人才发展渠道和生涯规划等。



参考文献

- [1] https://www.ccps.gov.cn/xsxxk/zyls/202105/t20210529_148977.shtml
- [2] <http://cpc.people.com.cn/shipin/n1/2020/1019/c243247-31897875.html>
- [3] http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm
- [4] http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/10/content_5641727.htm
- [5] http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/01/content_5655205.htm
- [6] http://www.cac.gov.cn/2021-12/27/c_1642205314518676.htm
- [7] http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm
- [8] <https://www.quantum.gov>
- [9] <https://www.gov.uk/government/news/quantum-technologies-a-new-era-for-the-uk>
- [10] <https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/news/quantum-technologies-roadmap>
- [11] <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Federal-Government-Framework-Programme-Quantum-technologies-2018-bf-C1.pdf>
- [12] <https://qutech.nl/wp-content/uploads/2019/09/NAQT-2019-EN.pdf>
- [13] https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/01/dossier_de_presse_quantique_vfinale.pdf
- [14] <https://www.ffg.at/en/quantum-austria>
- [15] 高芳, & 徐峰. (2017). 全球量子信息技术最新进展及对中国的启示. 中国科技论坛(6), 7.
- [16] <https://www.state.gov/tokyo-statement-on-quantum-cooperation>
- [17] <https://www.state.gov/cooperation-in-quantum-information-sciences-and-technologies-uk>
- [18] <https://www.state.gov/cooperation-in-quantum-science-and-technology-aus>
- [19] <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2021/11/18/joint-statement-to-leaders-from-the-united-states-director-of-the-white-house-office-of-science-technology-policy-and-canadas-minister-of-innovation-science-and-industry-2>
- [20] <https://www.state.gov/joint-statement-of-the-united-states-and-finland-on-cooperation-in-quantum-information-science-and-technology>
- [21] <https://www.state.gov/joint-statement-of-the-united-states-of-america-and-sweden-on-cooperation-in-quantum-information-science-and-technology>
- [22] <https://www.quantum.gov/the-united-states-and-denmark-take-steps-to-strengthen-quantum-cooperation>
- [23] <https://www.gov.uk/government/publications/funding-competition-commercialisation-of-quantum-technologies>
- [24] <https://ktn-uk.org/opportunities/commercialising-quantum-technologies-crd-tech-round-2>
- [25] <https://www.eenewseurope.com/en/uk-opens-up-6m-quantum-technology-competition>
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_dot
- [27] <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/semiconductor-quantum-dot>
- [28] [1] Li, Y., Voskoboynikov, O., Lee, C. P., & Sze, S. M.. (2001). Computer simulation of electron energy levels for different shape inas/gaas semiconductor quantum dots. *Computer Physics Communications*, 141(1), 66-72.
- [29] Kok, P., Nemoto, K., Ralph, T. C, Dowling, J. P., & Milburn, G. J.. (2007).
- [30] Linear optical quantum computing with photonic qubits. *Reviews of Modern Physics*, 79(1), 135-135.

- [31] Slussarenko, S., & Pryde, G. J.. (2019). Photonic quantum information processing: a concise review. *Applied Physics Reviews*, 6(4), 041303.
- [32] Saffman, M., Walker, T. G., & Mølmer, K.. (2010). Quantum information with rydberg atoms. *American Physical Society*(3).
- [33] Wurtz, J., Lopes, P., Gemelke, N., Keesling, A., & Wang, S. (2022). Industry applications of neutral-atom quantum computing solving independent set problems. *arXiv preprint arXiv:2205.08500*.
- [34] https://en.wikipedia.org/wiki/Topological_quantum_computer
- [35] Lahtinen, V., & Pachos, J. K.. (2017). A short introduction to topological quantum computation. *Introduction to Topological Quantum Computation*, 40(1), 31-38.
- [36] 光子盒研究院《量子计算云平台——量子时代的必然趋势》，2022年8月。
- [37] 赵勇杰, & 吴伟. (2020). 量子软件与量子云. *电信网技术*, 000(007), 49-57.
- [38] <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/quantum/user-guide>
- [39] <https://github.com/rigetti/pyquil>
- [40] <http://www.projectq.ch>
- [41] <https://github.com/Huawei-HiQ/HiQsimulator>
- [42] https://qiskit-test.readthedocs.io/en/latest/the_elements.html
- [43] <https://quantumai.google/cirq>
- [44] https://originqc.com.cn/zh/quantum_soft.html?type=qpanda&lv2id=43&lv3id=72
- [45] <https://github.com/Huawei-HiQ/ProjectQ>
- [46] 崔子崑, 王维语, & 翁文康. (2020). 量子云计算平台的现状与发展. *信息通信技术与政策*(7), 6.
- [47] 中国信息通信研究院技术与标准研究所《量子云计算发展态势研究报告(2021年)》，2021年9月。
- [48] iCV TANK | 光子盒《全球量子计算产业发展报告》，2022年。
- [49] 光子盒研究院《金融中的量子计算——我们的现状与未来》，2021年7月。
- [50] <https://thequantuminsider.com/2022/05/04/quantum-exponential-backs-quantum-technology-firm-aegiq>
- [51] https://finance.yahoo.com/news/google-spinoff-sandbox-aq-gets-120000457.html?fr=sycsrp_catchall
- [52] <https://www.classiq.io/insights/series-b-second-closing>
- [53] <https://quantumexp.co.uk/wp-content/uploads/2022/05/Universal-Quantum-Investment-RNS.pdf>
- [54] <https://www.theglobeandmail.com/business/article-toronto-startup-xanadu-quantum-tech-financing>
- [55] <https://thequantuminsider.com/2022/06/09/orca-computing-provides-uk-ministry-of-defence-with-first-quantum-computer>
- [56] <https://qubit-pharmaceuticals.com/communiquede-presse-qubit-pharmaceuticals-leve-16-me-pour-deployer-sa-plateforme-de-decouverte-de-nouveaux-medicaments-basee-sur-la-physique-quantique-2>
- [57] <http://sqc.com.au/2022/06/14/130-million-series-a-capital-raising>
- [58] <https://www.uvcpartners.com/blog/max-planck-scientists-found-planqc-to-build-highlyscalable-quantum-computer>
- [59] <https://www.businesswire.com/news/home/20220701005139/en/Quantum-Source-Goes-Out-of-Stealth-to-Enable-Useful-Photonic-Quantum-Computers-with-Millions-of-Qubits>
- [60] <https://oxfordquantumcircuits.com/oqc-series-a-38-million>
- [61] <https://www.computable.nl/artikel/nieuws/digital-innovation/7381058/250449/quix-quantum-krijgt-55-mln-voor-fotonische-superchip.html>
- [62] <https://analyticsindiamag.com/quantum-computing-startup-bosonq-psi-raises-usd-525k>
- [63] <https://www.quantumchina.com/newsinfo/3126252.html?templateId=520429>

- [64] <https://meetiqm.com/articles/press-releases/european-leader-in-quantum-computing-iqm-raises-128m-led-by-world-fund>
- [65] <https://ipronics.com/ipronics-raises-e3-7-million-to-accelerate-the-adoption-of-programmable-photonics-chips>
- [66] <https://www.eenewseurope.com/en/cambridge-graphene-startup-raises-1-2m-for-6g-quantum>
- [67] <https://thequantuminsider.com/2022/08/09/d-wave-quantum-up-in-trading-secures-150-million-in-long-term-funding>
- [68] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1724885224961307906&wfr=spider&for=pc>
- [69] <https://new.qq.com/rain/a/20211027A079FN00>
- [70] http://yдах.china.com.cn/2022-01/28/content_41866506.html
- [71] http://www.semiinsights.com/s/electronic_components/23/46094.shtml
- [72] Zoufal, Christa, Aurélien Lucchi, and Stefan Woerner. "Quantum generative adversarial networks for learning and loading random distributions." *npj Quantum Information* 5.1 (2019): 1-9.
- [73] Situ, H., He, Z., Wang, Y., Li, L., & Zheng, S. (2020). Quantum generative adversarial network for generating discrete distribution. *Information Sciences*, 538, 193-208.
- [74] Cheng, S., Chen, J., & Wang, L. (2018). Information perspective to probabilistic modeling: Boltzmann machines versus born machines. *Entropy*, 20(8), 583.
- [75] Coyle, B., Mills, D., Danos, V., & Kashefi, E. (2020). The Born supremacy: quantum advantage and training of an Ising Born machine. *npj Quantum Information*, 6(1), 1-11.
- [76] Stamatopoulos, N., Egger, D. J., Sun, Y., Zoufal, C., Iten, R., Shen, N., & Woerner, S. (2020). Option pricing using quantum computers. *Quantum*, 4, 291.
- [77] Häner, T., Roetteler, M., & Svore, K. M. (2018). Optimizing quantum circuits for arithmetic. *arXiv preprint arXiv:1805.12445*.
- [78] Grover, L., & Rudolph, T. (2002). Creating superpositions that correspond to efficiently integrable probability distributions. *arXiv preprint quant-ph/0208112*.
- [79] Rattew, A. G., Sun, Y., Minssen, P., & Pistoia, M. (2021). The efficient preparation of normal distributions in quantum registers. *Quantum*, 5, 609.
- [80] Farhi, E., Goldstone, J., Gutmann, S., & Sipser, M. (2000). Quantum computation by adiabatic evolution. *arXiv preprint quant-ph/0001106*.
- [81] Kalra, A., Qureshi, F., & Tisi, M. (2018). Portfolio asset identification using graph algorithms on a quantum annealer. *Available at SSRN 3333537*.
- [82] King, J., Mohseni, M., Bernoudy, W., Fréchette, A., Sadeghi, H., Isakov, S. V., . & Amin, M. H. (2019). Quantum-assisted genetic algorithm. *arXiv preprint arXiv:1907.00707*.
- [83] Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2014). A quantum approximate optimization algorithm. *arXiv preprint arXiv:1411.4028*.
- [84] Hodson, M., Ruck, B., Ong, H., Garvin, D., & Dulman, S. (2019). Portfolio rebalancing experiments using the quantum alternating operator ansatz. *arXiv preprint arXiv:1911.05296*.
- [85] Slate, N., Matwiejew, E., Marsh, S., & Wang, J. B. (2021). Quantum walk-based portfolio optimisation. *Quantum*, 5, 513.

- [86] Yuan, X., Endo, S., Zhao, Q., Li, Y., & Benjamin, S. C. (2019). Theory of variational quantum simulation. *Quantum*, 3, 191.
- [87] Peruzzo, A., McClean, J., Shadbolt, P., Yung, M. H., Zhou, X. Q., Love, P. J., & O'Brien, J. L. (2014). A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. *Nature communications*, 5(1), 1-7.
- [88] Gilliam, A., Woerner, S., & Gonciulea, C. (2021). Grover adaptive search for constrained polynomial binary optimization. *Quantum*, 5, 428.
- [89] Rosenberg, G., Haghnegahdar, P., Goddard, P., Carr, P., Wu, K., & De Prado, M. L. (2016). Solving the optimal trading trajectory problem using a quantum annealer. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10(6), 1053-1060.
- [90] Mugel, S., Kuchkovsky, C., Sanchez, E., Fernandez-Lorenzo, S., Luis-Hita, J., Lizaso, E., & Orus, R. (2022). Dynamic portfolio optimization with real datasets using quantum processors and quantum-inspired tensor networks. *Physical Review Research*, 4(1), 013006.
- [91] Pistoia, M., Ahmad, S. F., Ajagekar, A., Buts, A., Chakrabarti, S., Herman, D., & Yalovetzky, R. (2021, November). Quantum Machine Learning for Finance ICCAD Special Session Paper. In *2021 IEEE/ACM International Conference On Computer Aided Design (ICCAD)* (pp. 1-9). IEEE.
- [92] Lloyd, S. (2021). Quantum machine learning for data classification. *Physics*, 14, 79.
- [93] Kapoor, A., Wiebe, N., & Svore, K. (2016). Quantum perceptron models. *Advances in neural information processing systems*, 29.
- [94] Clarkson, K. L., Hazan, E., & Woodruff, D. P. (2012). Sublinear optimization for machine learning. *Journal of the ACM (JACM)*, 59(5), 1-49.
- [95] Li, T., Chakrabarti, S., & Wu, X. (2019, May). Sublinear quantum algorithms for training linear and kernel-based classifiers. In *International Conference on Machine Learning* (pp. 3815-3824). PMLR.
- [96] Johri, S., Debnath, S., Mocherla, A., Singk, A., Prakash, A., Kim, J., & Kerenidis, I. (2021). Nearest centroid classification on a trapped ion quantum computer. *npj Quantum Information*, 7(1), 1-11.
- [97] Li, J., Lin, S., Yu, K., & Guo, G. (2022). Quantum K-nearest neighbor classification algorithm based on Hamming distance. *Quantum Information Processing*, 21(1), 1-17.
- [98] Durr, C., & Hoyer, P. (1996). A quantum algorithm for finding the minimum. *arXiv preprint quant-ph/9607014*.
- [99] Basheer, A., Afham, A., & Goyal, S. K. (2020). Quantum k-nearest neighbors algorithm. *arXiv preprint arXiv:2003.09187*.
- [100] Miyamoto, K., Iwamura, M., & Kise, K. (2019). A Quantum Algorithm for Finding k-Minima. *arXiv preprint arXiv:1907.03315*.
- [101] Kerenidis, I., & Landman, J. (2021). Quantum spectral clustering. *Physical Review A*, 103(4), 042415.
- [102] Weinstein, M., & Horn, D. (2009). Dynamic quantum clustering: a method for visual exploration of structures in data. *Physical Review E*, 80(6), 066117.
- [103] Weinstein, M., Meirer, F., Hume, A., Sciau, P., Shaked, G., Hofstetter, R., & Horn, D. (2013). Analyzing big data with dynamic quantum clustering. *arXiv preprint arXiv:1310.2700*.

- [104] Kerenidis, I., Landman, J., Luongo, A., & Prakash, A. (2019). q-means: A quantum algorithm for unsupervised machine learning. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 32.
- [105] Kerenidis, I., Prakash, A., & Szilágyi, D. (2021). Quantum algorithms for second-order cone programming and support vector machines. *Quantum*, 5, 427.
- [106] Tomesh, T., Gokhale, P., Anschuetz, E. R., & Chong, F. T. (2021). Coreset clustering on small quantum computers. *Electronics*, 10(14), 1690.
- [107] Dong, D., Chen, C., Li, H., & Tarn, T. J. (2008). Quantum reinforcement learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 38(5), 1207-1220.
- [108] Paparo, G. D., Dunjko, V., Makmal, A., Martin-Delgado, M. A., & Briegel, H. J. (2014). Quantum speedup for active learning agents. *Physical Review X*, 4(3), 031002.
- [109] Herr, D., Obert, B., & Rosenkranz, M. (2021). Anomaly detection with variational quantum generative adversarial networks. *Quantum Science and Technology*, 6(4), 045004.
- [110] Schuld, M., Brádler, K., Israel, R., Su, D., & Gupt, B. (2019). A quantum hardware-induced graph kernel based on gaussian boson sampling. *arXiv preprint arXiv:1905.12646*.
- [111] Yu, C. H., Gao, F., Lin, S., & Wang, J. (2019). Quantum data compression by principal component analysis. *Quantum Information Processing*, 18(8), 1-20.
- [112] Lloyd, S., Mohseni, M., & Rebentrost, P. (2014). Quantum principal component analysis. *Nature Physics*, 10(9), 631-633.
- [113] Martin, A., Candelas, B., Rodríguez-Rozas, Á., Martín-Guerrero, J. D., Chen, X., Lamata, L., . & Sanz, M. (2021). Toward pricing financial derivatives with an ibm quantum computer. *Physical Review Research*, 3(1), 013167.
- [114] Heath, D., Jarrow, R., & Morton, A. (1992). Bond pricing and the term structure of interest rates: A new methodology for contingent claims valuation. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 77-105.
- [115] Wachs, J., & Kertész, J. (2019). A network approach to cartel detection in public auction markets. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.
- [116] Bai, L., Rossi, L., Cui, L., Zhang, Z., Ren, P., Bai, X., & Hancock, E. (2017). Quantum kernels for unattributed graphs using discrete-time quantum walks. *Pattern Recognition Letters*, 87, 96-103.
- [117] Shaydulin, R., Ushijima - Mwesigwa, H., Safro, I., Mniszewski, S., & Alexeev, Y. (2019). Network community detection on small quantum computers. *Advanced Quantum Technologies*, 2(9), 1900029.
- [118] Bausch, J. (2020). Recurrent quantum neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 33, 1368-1379.
- [119] Chen, S. Y. C., Yoo, S., & Fang, Y. L. L. (2022, May). Quantum long short-term memory. In *ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 8622-8626). IEEE.
- [120] https://it.sohu.com/a/545122577_120100110
- [121] Rosenberg, G., Haghnegahdar, P., Goddard, P., Carr, P., Wu, K., & De Prado, M. L. (2016). Solving the optimal trading trajectory problem using a quantum annealer. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10(6), 1053-1060.

- [122] Li, Y., Zheng, W., & Zheng, Z. (2019). Deep robust reinforcement learning for practical algorithmic trading. *IEEE Access*, 7, 108014-108022.
- [123] Fösel, T., Tighineanu, P., Weiss, T., & Marquardt, F. (2018). Reinforcement learning with neural networks for quantum feedback. *Physical Review X*, 8(3), 031084.
- [124] Wu, S., Jin, S., Wen, D., & Wang, X. (2020). Quantum reinforcement learning in continuous action space. *arXiv preprint arXiv:2012.10711*.
- [125] Soon, W., & Ye, H. Q. (2011). Currency arbitrage detection using a binary integer programming model. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 42(3), 369-376.
- [126] Rosenberg, G. (2016). Finding optimal arbitrage opportunities using a quantum annealer. *1QB Information Technologies Write Paper*, 1-7.
- [127] Spooner, T., Fearnley, J., Savani, R., & Koukorinis, A. (2018). Market making via reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1804.04216*.
- [128] Stamatopoulos, N., Egger, D. J., Sun, Y., Zoufal, C., Iten, R., Shen, N., & Woerner, S. (2020). Option pricing using quantum computers. *Quantum*, 4, 291.
- [129] Reberstrost, P., Gupt, B., & Bromley, T. R. (2018). Quantum computational finance: Monte Carlo pricing of financial derivatives. *Physical Review A*, 98(2), 022321.
- [130] Miyamoto, K. (2022). Bermudan option pricing by quantum amplitude estimation and Chebyshev interpolation. *EPJ Quantum Technology*, 9(1), 1-27.
- [131] Martin, A., Candelas, B., Rodríguez-Rozas, Á., Martín-Guerrero, J. D., Chen, X., Lamata, L., . & Sanz, M. (2021). Toward pricing financial derivatives with an ibm quantum computer. *Physical Review Research*, 3(1), 013167.
- [132] Tang, H., Pal, A., Wang, T. Y., Qiao, L. F., Gao, J., & Jin, X. M. (2021). Quantum computation for pricing the collateralized debt obligations. *Quantum Engineering*, 3(4), e84.
- [133] <https://finance.sina.com.cn/jjxw/2021-12-23/doc-ikyarmz0689082.shtml>
- [134] <https://www.zhonghongwang.com/show-140-220535-1.html>
- [135] 孙志强. (2013). 论我国商业银行市场风险量化管理与监督. (Doctoral dissertation, 对外经济贸易大学).
- [136] Egger, D. J., Gutiérrez, R. G., Mestre, J. C., & Woerner, S. (2020). Credit risk analysis using quantum computers. *IEEE Transactions on Computers*, 70(12), 2136-2145.
- [137] Woerner, S., & Egger, D. J. (2019). Quantum risk analysis. *npj Quantum Information*, 5(1), 1-8.
- [138] Sakuma, T. (2020). Application of deep quantum neural networks to finance. *arXiv preprint arXiv:2011.07319*.
- [139] Beer, K., Bondarenko, D., Farrelly, T., Osborne, T. J., Salzmann, R., Scheiermann, D., & Wolf, R. (2020). Training deep quantum neural networks. *Nature communications*, 11(1), 1-6.
- [140] Amin, M. H., Andriyash, E., Rolfe, J., Kulchitsky, B., & Melko, R. (2018). Quantum boltzmann machine. *Physical Review X*, 8(2), 021050.
- [141] Dixit, V., Selvarajan, R., Alam, M. A., Humble, T. S., & Kais, S. (2021). Training restricted boltzmann machines with a d-wave quantum annealer. *Front. Phys.* 9: 589626. doi: 10.3389/fphy.
- [142] Zoufal, C., Lucchi, A., & Woerner, S. (2021). Variational quantum Boltzmann machines. *Quantum Machine Intelligence*, 3(1), 1-15.

- [143] Purda, L., & Skillicorn, D. (2015). Accounting variables, deception, and a bag of words: Assessing the tools of fraud detection. *Contemporary Accounting Research*, 32(3), 1193-1223.
- [144] Fisher, I. E., Garnsey, M. R., & Hughes, M. E. (2016). Natural language processing in accounting, auditing and finance: A synthesis of the literature with a roadmap for future research. *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, 23(3), 157-214.
- [145] Xing, F. Z., Cambria, E., & Welsch, R. E. (2018). Natural language based financial forecasting: a survey. *Artificial Intelligence Review*, 50(1), 49-73.
- [146] Yıldırım, S., Jothimani, D., Kavaklıoğlu, C., & Başar, A. (2018, December). Classification of "hot news" for financial forecast using NLP techniques. In *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 4719-4722). IEEE.
- [147] Mishev, K., Gjorgjevikj, A., Vodenska, I., Chitkushev, L. T., & Trajanov, D. (2020). Evaluation of sentiment analysis in finance: from lexicons to transformers. *IEEE access*, 8, 131662-131682.
- [148] 韩娟. (2008). *利率互换及其在我国的应用*. (Doctoral dissertation, 西南财经大学).
- [149] G. Rosenberg, C. Adolphs, A. Milne, and A. Lee. (2016). Swap netting using a quantum annealer. *White Paper 1Qbit*.
- [150] <http://news.ahwang.cn/zhengwu/20220119/2332541.html>
- [151] Du, Y., Hsieh, M. H., Liu, T., You, S., & Tao, D. (2022). Quantum differentially private sparse regression learning. *IEEE Transactions on Information Theory*.
- [152] Orús, R., Mugel, S., & Lizaso, E. (2019). Forecasting financial crashes with quantum computing. *Physical Review A*, 99(6), 060301.
- [153] Fellner, M., Ender, K., ter Hoeven, R., & Lechner, W. (2021). Parity Quantum Optimization: Benchmarks. *arXiv preprint arXiv:2105.06240*.
- [154] https://www.sohu.com/a/531444840_120181749
- [155] <http://quantumcas.ac.cn/2021/0420/c20522a481291/page.htm>
- [156] <https://phy.sustech.edu.cn/news/detail/873.html>
- [157] https://www.sznews.com/news/content/2022-01/24/content_24897561.htm
- [158] <https://m.elecfans.com/d/comp-5382274-136407785672253784064.html>
- [159] <https://originqc.com.cn/zh/union.html>
- [160] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1697625587975344478&wfr=spider&for=pc>
- [161] <https://mp.weixin.qq.com/s/KSWkS-35vqkBx5Md5nRPGw>