

量子计算金融应用白皮书

量子信息网络产业联盟

2023年5月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议等，均不构成投资或法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归量子信息网络产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

量子信息网络产业联盟


联系电话：010-62300592

邮箱：qia@caict.ac.cn

编制说明

白皮书编写单位：建信金融科技有限责任公司、中国信息通信研究院、本源量子计算科技（合肥）股份有限公司、国开启科量子技术（北京）有限公司、北京玻色量子科技有限公司、国科量子通信网络有限公司、九州量子信息技术股份有限公司、中兴通讯股份有限公司、四川元匠科技有限公司、电子科技大学、成都信息工程大学、中山大学、成都光子盒科技有限公司。

编写组成员 吴磊、赖俊森、李鑫、庄希宁、袁野为、葛志斌、周卓俊、陈敬伟、文凯、马寅、袁为、缪亚军、李明翰、李飞龙、胡辉、张文科、林越、张军、缪贵海、王琦、吴昊、卢明静、李晓瑜、朱钦圣、张仕斌、昌燕、罗乐、顾成建、王素妍



前 言

经典计算机已经无法满足人类日益增长的特殊算力需求。算力更强大的量子计算机成为各国竞争的焦点之一。

量子技术具备颠覆当前信息技术竞争格局的潜力，加强量子科技投入，掌握关键核心技术，推进量子产业链培育，已成为世界大国的普遍共识。美国的“国家量子行动NQI”、欧盟的“量子旗舰计划”、以及我国的“十四五规划”，均将量子技术作为国家核心战略科技来推进。国内外金融机构纷纷与量子科技公司进行合作，开展量子技术在金融行业的应用研究。

量子计算金融应用值此发展热潮，编制相应的白皮书有利于总结当前发展成果，梳理技术发展脉络，点明未来研究的方向。

量子计算金融应用白皮书将主要分为五个部分，从量子计算的背景与发展、量子计算与金融业、量子计算金融应用领域、量子计算金融应用探索进展以及量子计算金融应用发展五个维度对量子计算金融应用进行分析讨论。力求覆盖量子计算金融应用相关主题，成为量子计算金融应用从业者的重要参考资料，推动构建量子计算金融应用生态，并助力金融产业和量子技术协同发展。

目 录

一 . 量子计算的背景与发展	1
(一) 量子计算的背景	1
(二) 量子计算的发展	3
(三) 量子计算的优势	8
二 . 量子计算与金融业	10
(一) 量子计算赋能金融业	10
(二) 量子计算金融应用价值	13
三 . 量子计算金融应用领域	15
(一) 量子组合优化	15
(二) 量子机器学习	21
(三) 量子模拟算法	27
四 . 量子计算金融应用探索进展	30
(一) 北美应用探索	30
(二) 欧洲应用探索	35
(三) 亚太应用探索	41
五 . 量子计算金融应用发展	47
(一) 量子计算金融应用发展趋势	47
(二) 量子计算金融应用发展建议	50

图 目 录

图 1 经典比特与量子比特对比	4
图 2 量子计算用例分析	11
图 3 量子计算金融发展趋势预测	49

表 目 录

表 1 量子计算机工程化时期重要事件列举	5
表 2 量子计算在不同阶段对金融的预期影响	11
表 3 国际前十名超级计算机能耗表	15
表 4 部分量子计算金融应用领域	29
表 5 欧美量子计算金融应用探索	41

一、量子计算的背景与发展

(一) 量子计算的背景

量子技术作为 20 世纪最伟大的科学发现之一¹，它自 1920 年问世以来就催生了核磁共振、激光等新技术成果。自第一次量子技术革命开始，量子科技在宏观世界逐渐普及应用，人类在系统性观测与调控微观粒子方面能力大幅提升，量子技术在信息采集、处理和传输领域应用的可能性正在成为现实。几个世纪以来，人类探索微观粒子的进程从未停歇，从“探测时代”到“调控时代”，随着人类对微观粒子探究的逐渐深入，量子技术的发展也进入快车道。本世纪以来，量子技术迎来了对微观量子操控的第二次革命浪潮，以量子计算、量子通信和量子精密测量为代表的科技成果进展日新月异，在信息获取、传输和处理方面都体现出巨大的应用价值潜力，并已经应用在能源、国防、航天、通信、生命科学等领域，为人类生活质量及科技发展带来诸多正面影响。

在第二次量子技术革命中，量子计算、量子通信和量子精密测量等领域的技术突破成为当前量子信息技术破局的关键。其中，量子通信产业化进程相对较快，目前已经在基于卫星或光纤网络的长距离传

1 Dowling J P, Milburn G J. Quantum technology: the second quantum revolution[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 361:1809-1655-1674.

输和广域组网应用上取得重要进展。2016年8月，“墨子号”量子科学实验卫星在酒泉卫星发射中心成功发射，标志着中国在量子通信研究领域在世界范围内率先取得重大突破。2017年9月，全长2000公里量子保密通信干线——“京沪干线”正式开通，2021年1月，我国实现4600公里星地量子密钥分发，初步构建天地一体化广域量子通信网雏形。同时，在量子精密测量研究领域，国内外科学研究与技术应用齐头并进、各具优势。2019年，美国和加拿大的科学家利用光子纠缠和自适应反馈技术，实现了超越标准量子极限的光场相位测量，为光学传感和量子信息处理提供了新的可能。2020年，中国和美国的科学家利用金刚石氮-空位（NV）色心的量子特性，实现了纳米核磁共振二维谱的加速探测，为单分子结构解析和生物医学诊断提供了新的手段。与之相较，量子计算领域技术攻关难度较大，但近几年受到了越来越多的关注。过去十年，IBM、谷歌等科技巨头在量子计算领域的深入布局，使得量子计算机的可用量子比特数量迅速增加，目前已经进入了“含噪声的中型量子”（NISQ）时代，并在多条技术路线取得了显著的突破，其中，超导量子比特数量已经达到了百位量级，离子阱技术也突破了上千量子体积的里程碑。同时，量子计算的应用也正在积极拓展，在该领域中美两国在全球范围内领跑，融资规模已经超过过去十年总和。目前，中国在量子计算、量子通信和量子精密测量三

大领域均位于世界第一梯队。²

(二) 量子计算的发展

20 世纪 20 年代初，量子力学的诞生为经典物理学带来了全新的视角和范式。量子计算是一门由物理学、信息科学、计算科学和光电技术等学科交叉融合而形成的新兴学科，其基础是量子力学。量子计算利用量子比特和量子态的叠加和纠缠等特性，在特定的经典问题上实现有效地解决或加速求解过程。

经典计算机的基本信息单位是比特（bit），用 0 或 1 来表示和存储，二者只能取其一。而量子比特（qubit）是量子计算机的最小信息储存单位，通常以量子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ ，或二者的叠加态来表示。与传统的经典比特不同，一个量子比特能够以叠加态的形式存在，一次运算就能同时处理两个状态的信息，从而让一个量子比特具有更强大的信息表示和存储能力。进一步推广，经典计算机对 2^n 比特的数据执行相同计算过程需要 2^n 次操作，而量子计算机只需要对 n 个量子比特进行一次操作即可，其在数据存储能力和数据处理能力上都超越了经典计算机。

² <https://www.quantumchina.com/lzjs>

	传统二进制比特	量子比特
操作性质	确定性	非确定性
运行方式	进位制	针对整个系统进行大量并行运算
状态	二进制码“0”和“1”	“0”和“1”两个状态的叠加态
运算速率	慢	极快
涉及领域	大数据、人工智能、金融、信息安全、互联网等	
危及领域	-	区块链、加密技术

图 1 经典比特与量子比特对比

根据量子计算机的研究发展和关注点进行细分，截至目前量子计算机的发展已经经历了三个时期：理论探索、算法研究和工程化。

量子计算机理论探索时期（20 世纪 90 年代以前）。量子计算理论的起源最早可追溯到 20 世纪 70 年代，当时物理学家们开始思考如何利用量子力学来模拟自然界的复杂现象；并在 20 世纪 80 年代完成其概念和基础理论体系。1982 年，Paul Benioff 提出量子图灵机的概念。同年，Feynman 对 Benioff 的理论进行了丰富完善，提出采用量子系统进行信息处理的概念，这可以看作是量子计算机最早期的思想。1985 年，David Deutsch 发表论文，详细阐述了量子理论与通用量子计算机的相容关系，同时验证了量子算法的并行性，为量子计算的理论奠定了基础。

量子计算机算法研究时期（20 世纪 90 年代）。在前人对量子计算机基础理论的积极探索基础上，量子计算机在 20 世纪 90 年代迎来

了新的突破，一系列具有重要意义的量子算法被提出。1994年，Peter Shor 提出了一个能够高效地分解大整数的量子算法，这个算法对当时广泛使用的 RSA 公钥密码系统构成了威胁，引起了广泛的关注和讨论。1996年，Lov Grover 提出了一个能够加速无序数据库搜索的量子算法，这个算法对一些特定问题具有平方根级别的加速比。这些算法展示了量子计算在某些问题上相对于经典计算的优势和潜力。

量子计算机工程化时期（21 世纪初至今）。在这个阶段中，可操作的工程化量子计算机被制造出来并被逐步应用于各个领域。基于超导、离子阱、光子、中性原子和半导体等技术路线的量子计算原型机用于实验验证量子优势。随着技术的不断成熟和发展，量子计算机的性能将会持续提升，并有望在未来 10~15 年内实现商用。

表 1 量子计算机工程化时期重要事件列举

分类	年份	重要事件例举
理论研究	2000 年	理论物理学家 DiVincenzo 提出构造量子计算机物理实现必须要满足的七个条件。
量子退火	2007 年	位于加拿大的 D-Wave 公司构造了商业专用量子计算机“Orion”，率先实现专用量子计算机商业化。
超导方面	2018 年	Google 推出了 72 量子位超导量子计算处理器芯片。
	2019 年	IBM 推出 IBM Q System One 量子计算机，并提出了量子体积这一概念，作为测量量子计算的性能指标，并由此引申提出了量子性能的“摩尔定律”，即量子计算机的量子体积大约每隔一年便会增加一倍。 谷歌宣布使用 54 个量子比特的量子芯片便可在 200 秒内完成超算 summit 需要 1 万年才能完成的任务，宣称实现“量子霸权”。
	2020 年	IBM 发布 65 个量子比特系统“蜂鸟”，并发布量子计算路线图计划
	2021 年	中国科学技术大学研究团队构建了 66 量子比特的量子计算原型机“祖冲之号”，在“量子随机线路取样”难题上实现了量子计算优越性，求解速度远超超算，计算复杂度比 Google 公开发布的“悬铃木”量子计算原型机高出了 6 个数量级；

量子计算金融应用白皮书

		Rigetti 公司推出基于特定的模块化结构多芯片量子处理器； IBM 推出了 127 个量子比特的处理器 Eagle，突破“100 位大关”的全球量子比特数最多的超导量子处理器。
	2022 年	IBM 推出量子计算机“鱼鹰”(Osprey)，内含的“鱼鹰”芯片(Osprey chip) 支持 433 量子比特位。
离子阱方面	2019 年	IonQ 制造了一台由 13 个铯离子组成的 11 个量子位完全连接的可编程量子计算机，他们证明了他们的量子计算机的平均单量子位门控保真度为 99.5%，平均双量子位门控保真度为 97.5%，态制备和测量的误差为 0.7%。
	2021 年	AQT 基于线性 Paul 阱中的钙离子囚禁制作了一台 19 英寸机架集成量子计算机。 Honeywell 提出了离子阱中的量子实时纠错方案，他们设计了一个动态保护的逻辑量子比特存储器，他们使用的是一台 10 量子比特的 QCCD 离子阱量子计算机来编码一个逻辑量子比特，利用编码电路将逻辑量子比特初始化为三个相互无偏基的本征态，并对编码的量子比特执行多种症状测量，使用实时解码器来确定任何必要的修正。 Innsbruck 推出了 51 量子纠缠的多离子量子模拟的装置。 Quantinuum 发布了第二代 H1 量子计算机——H1-2，其使用了与 Honeywell H1-1 相同的离子阱架构、控制系统设计、集成光学器件和光子学，
	2022 年	4 月，H1-2 测得的量子体积为 4096，成为有史以来在量子计算机上测得的最高量子体积。
中性原子方面	2021 年	哈佛-MIT 开发了 256 量子比特基于中性原子的量子模拟器。
	2022 年	ColdQuanta 和 AtomComputing 推出了 100+量子比特量子计算机。
光量子方面	2021 年	中国科学技术大学研究团队研制的九章二号，实现“量子优越性”验证，在高斯玻色采样问题上，其处理速度比超级计算机快亿亿倍（10 的 24 次方）。
半导体方面	2022 年	在加拿大魁北克举行的 2022 年硅量子电子研讨会，英特尔实验室展示了业界最高的硅自旋量子比特芯片（12 量子比特），这些芯片是在英特尔的晶体管研发设施开发的。

目前的量子计算发展仍然处于验证阶段，还无法实现大规模实际应用及商业落地。而对于规模化、实用性的量子计算研究，可以根据对量子计算机的应用水平分为三个阶段：实现量子优越性、在某些特定领域实现实用价值、实现可编程能容错的通用量子计算机。

第一阶段在于实现量子优越性。针对一些特定的数学难题，当前

的超级计算机已经无法在有效时间内求解，而研制 50 到 100 个量子比特的专用量子计算机，在此类问题上能够实现高效求解，从而展示其“量子优越性”。

第二阶段在某些特定领域实现实用价值。在第一阶段的基础上，通过对 50 到 100 个量子比特的专用量子计算机的规模化应用，可以超越经典计算机，并在更多的研究领域拓展应用，例如量子化学、材料科学、医药研发和金融科技等。从而，量子计算机也进入早期工业阶段，行业内称为 NISQ（含噪声中型量子）计算机阶段。在 NISQ 阶段，如何在较高“噪音”的水平下运行成为量子计算机所面临的难题。美国物理学会(American Physical Society, 简称 APS)认为，这将成为量子计算机规模拓展路上的主要障碍。囿于当前的量子硬件设备，暂时没有出现用于解决纠正和减轻错误的综合方案，能够适应通用场景下的容错量子计算机还没有研制成功。

第三阶段在于研制可编程的通用量子计算机。在第二阶段的基础上，可编程的量子计算机能够在多个应用场景下使用，并且量子比特的操纵精度、集成数量和容错能力都将被大幅提升。

然而，目前的行业普遍认为全球范围内的量子计算机研究仍处于第一阶段。虽然光量子计算机和超导量子计算机已经实现第一阶段，并且正在迈入第二个阶段。但整体而言，量子计算技术仍处于第一阶

段，距离实现局部应用落地还需要大约 5 年的时间³。

(三) 量子计算的优势

量子计算是一种利用量子力学规律进行高速运算、存储和处理信息的新型计算方式。与传统计算机相比，量子计算机具有天然的量子并行计算能力、强大的存储能力和快速的运算速度，这将为现有计算能力带来质的飞跃。近年来，量子计算技术与产业呈现出加速发展的态势，而有关量子计算技术的突破多与三个因素有关，即量子比特能够维持量子态的时间长度、量子系统中连接在一起的量子比特的数量和量子门的保真度。

量子比特能够维持量子态的时间长度，被称为量子比特的相干时间。相干时间越长，量子计算机能够处理的程序步骤就越多，从而能够进行更复杂的计算。例如，IBM 的 Eagle 量子计算机已经将量子比特的相干时间提高到了 130 微秒。当量子比特相干时间达到毫秒级时，就足以支持实现计算优越性的量子计算机。⁴

从量子系统中连接的量子比特数量的突破来看，2019 年 10 月，谷歌公司在《Nature》期刊上宣布使用 54 个量子位处理器 Sycamore 实现了量子优越性。具体而言，Sycamore 能够在 200 秒内完成规定操作，而相同的运算量在超级计算机 Summit 上需要 1 万年才能完成。

³ <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1719649077511612898&wfr=spider&for=pc>

⁴ <https://www.bilibili.com/read/cv11379606/>

这项工作在实验环境中验证了量子优越性，被认为在量子计算的历史上具有里程碑意义。

量子门是构成量子计算的基本算术单元，一般包括单量子比特门和双量子比特门。量子门的精度（保真度）很容易受到来自外部环境和工作噪声的影响，这在很大程度上阻碍了量子计算机的发展。双量子比特门的保真度是构造所需量子纠缠的必要保障，目前量子计算机系统的双量子比特逻辑门的保真度都保证在 99% 以上。

量子计算机具有高精度模拟自然界过程的能力，这是经典计算机难以或无法模拟的。这一特性可能会加速金融领域衍生品定价、药物发现、电池设计、肥料设计、流体动力学和天气预报等领域的研究进展。此外，量子计算机还可以用于在一组可行选项中寻找最佳解决方案，从而进一步解决投资组合优化、供应链物流、能源网络管理或交通控制等问题。

另外，量子计算机同样会对信息安全领域产生深远影响。当前主流的非对称加密算法的安全性主要依赖于所选择的数学难题难以破解，例如 RSA 算法基于大数质因子分解难题，其破解难度随着密钥长度 n 的增加呈指数级增加。然而，1994 年提出的 Shor 算法将这一破解时间复杂度降低为 $O(\text{poly}(n))$ ，从而对传统非对称加密算法构成潜在威胁。因此，研究抵御量子破解威胁的相关信息安全技术变得至关重要。事实上，各国也正在积极推进量子密钥分发和后量子密码算

法等技术的研究，以应对这一挑战。

二、量子计算与金融业

(一) 量子计算赋能金融业

近年来，随着移动互联网等技术的普及，金融领域数据量呈现爆炸式增长，推动了金融大数据时代的来临。金融业与各行业、各部门的生产经营密切相连，同时也与千家万户和社会成员的生活息息相关。金融业作为典型的信息密集型行业，在错综复杂的资金链、产业链和供应链中，海量的数据信息被记录和存储。金融领域的数据具有大体量、历史数据关联度高和可量化等特点，因此利用人工智能算法分析并挖掘有价值的金融知识，已经成为推动金融领域信息和技术革新的主要趋势。然而，金融领域数据的海量、复杂和高维度等特点，对处理金融大数据的算法准确性、高效性、安全性和鲁棒性都带来了巨大的挑战。

量子计算对金融行业的赋能主要表现在两个层面：

(1) 量子计算的强大算力可以解决经典计算机无法高效解决的一些金融问题，例如大规模的金融风险管理、预测和优化等问题。

(2) 量子计算将影响对金融和经济模式的思考方式，即改变对问题的形成、结构和建模方式的思考视角，例如经济学作为一门社会科学在发展中受到热力学理论的影响，经济学中的一般均衡理论借鉴了热力学概念。

麦肯锡 2022 年的研究报告《量子技术监测》(Quantum Technology Monitor)指出,为了实现量子技术的承诺,公共和私人资金持续增加。制药、化工、汽车和金融这四个行业有望成为“量子优势”的第一批受益者,如图 1 所示,2035 年有望实现近 7000 亿美元的价值⁵。

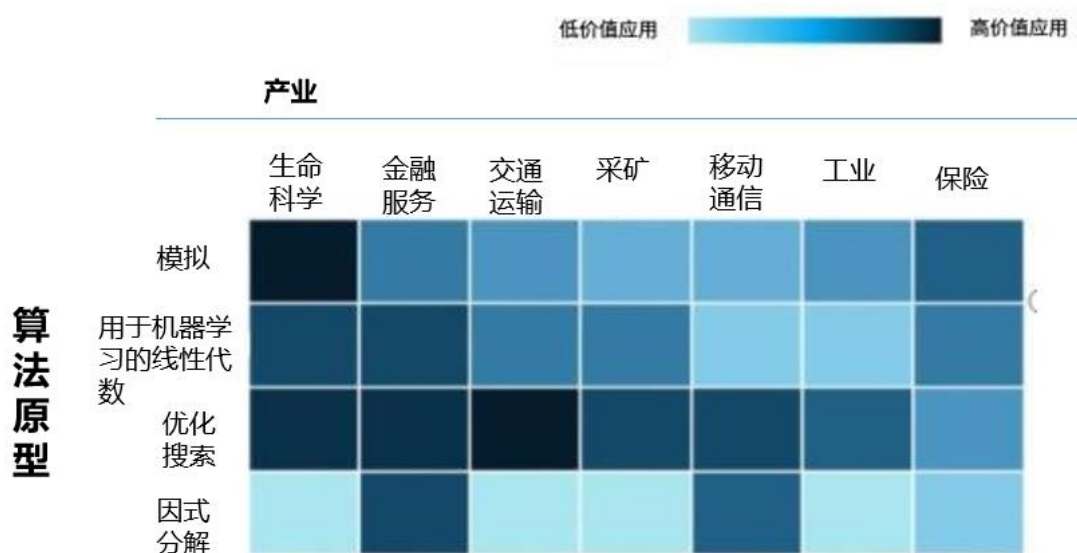


图 2 量子计算用例分析⁶

根据波士顿咨询公司的预测,未来 3-5 年内将有第一批应用用于优化领域,而在未来 5-10 年内,浅层量子近似优化算法有望面世。而凸优化器和全尺寸量子算法则预计需要等待 10-20 年才能成熟,如表 2 所示。

表 2 量子计算在不同阶段对金融的预期影响

阶段	第一个 5 年	第二个 5 年	第三个 5 年

⁵<https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-funding-remains-strong-but-talent-gap-raises-concern>

⁶ Quantum computing talent not on pace with funding | McKinsey

量子计算金融应用白皮书

技术现状	NISQ 时代的含噪机器，大多数仍然是 100 量子比特和低量子体积。量子启发算法可以在经典计算机上运行。部分经典、部分量子的混合解决方案。量子退火机有较长相干时间。	数以千计的量子比特允许部分纠错。大多数云服务提供商提供对量子计算的访问，“量子即服务”。	具有万个量子比特的大型机器。全尺寸容错（因为退相干是通过量子纠错控制的）提供了广泛的量子优势。但全世界只有 2,000-5,000 台可运行的机器。
新的金融应用	基于退火的投资组合优化算法在经典计算机或量子计算机上运行。	改进的预测和风险评估可以更好地预测黑天鹅事件。后量子密码的新标准会取代当前的加密技术。	接近实时的风险评估，例如量化对冲基金。基于后量子密码的安全性。
金融业的影响	量子计算成为竞争优势。投资组合优化带来的收益高达 5 亿美元。	投资组合优化和风险分析带来的收益超过 50 亿美元。	来自所有量子应用的银行和其他金融服务的运营收入为 400 亿至 700 亿美元。

虽然受限于早期量子计算机硬件的现状，许多量子算法仍然在 CPU 而非 QPU（量子芯片）上运行，但这并不影响目前量子计算在多种金融业务场景中进行研究和应用探索。

在金融交易策略模型方面，量子计算的强大求解能力可以提升模型的效果。目前，大多涉及机器学习和人工智能模型的算法都有对应的量子版本，理论上能够更快和更精确地得到训练结果。此外，还存在着应用于投资组合优化和定价模型等金融场景的量子解决方案，其中一些算法也能很好的应用于金融时序问题。

在金融资本市场方面，量子计算可以用于分析关键的金融模型，并通过使用量子纠缠对不同层次的市场数据进行关联，从而为金融行业提供系统性的财务事件预测分析，以便对重大金融事件进行及时响应，例如市场崩盘预测、交易和投资趋势等问题。

在信用评级和欺诈识别方面，通常需要对大量历史交易数据进行分析，从而得到有效的评估机制。量子计算可以通过分析交易对手大量的历史行为信息，提供合理的信用评级并检测出难以发现的交易异常或市场异常。此外，量子计算还可以辅助传统评分模型的改进，例如优化评分因素的选取和重要性参数。

量子计算具有超强的并行计算能力和指数级存储容量等优势，在金融服务领域具有巨大的潜力，并能够助力金融行业的发展。2022年1月4日，中国人民银行印发的《金融科技发展规划(2022-2025年)》中提出“探索运用量子技术突破现有算力约束、算法瓶颈，提升金融服务并发处理能力和智能运算效率，节省能源消耗和设备空间，逐步培育一批有价值、可落地的金融应用场景。”金融行业作为量子计算的一个重要应用领域，借助量子计算能够突破算力瓶颈、提升智能水平，这对金融行业具有重要的战略意义。

(二) 量子计算金融应用价值

量子计算对金融业的发展具有重要的理论研究价值和实际经济社会价值，是智能金融领域与量子技术融合的发展趋势和研究热点。由于集成电路技术在工艺等方面越来越逼近物理极限，摩尔定律日渐趋缓，传统计算技术的发展面临体系性困局，而量子计算技术则是对目前硬件算力的突破。同时，受到“碳达峰”、“碳中和”和“可持续发展”等对各行各业的内在驱动，经典计算机在运行过程中所产生的能耗与

日俱增，而量子计算理论上可以降低能耗，能够更好地应对双碳目标。具体而言，量子计算对金融业的发展有以下几方面的意义：

第一，量子计算将显著提升金融投资的智能水平。目前的智能金融仍处于早期发展阶段，智能风控、智能营销、智能信贷和智能监管等应用尚未形成深度融合，原因之一是缺乏强大的计算能力支持，导致数据挖掘不充分。在可预见的未来，随着数据体量的快速增长，金融业在智能金融方面将面临更加严峻的算力约束，量子计算升级智能水平的算力优势也将更加明显。

第二，量子计算将显著提升金融服务的智能化响应速度。反欺诈、反洗钱、授信审批和支付清算等金融业务对时滞水平有很高要求，这直接关系到金融资金安全、客户体验和声誉风险等。5G 和万物互联时代将产生更多碎片化的海量数据，相对于经典计算，量子计算具有强大的并行计算能力，能够实现指数级的计算加速，在金融领域具有十分重要的应用价值。

第三，量子计算将节省大量能耗和设备空间。量子计算能够有效地应对经典计算在处理金融大数据时产生的能耗问题，以及经典计算算力提升所需的大规模硬件设备（单机计算能力趋于瓶颈）而带来的硬件购置及维护成本问题。单台量子计算机所具备的强大计算能力足以媲美经典计算集群，量子么正变换又具备可逆计算能力，解决了经典计算的能耗问题，如表 3 所示。同时研发量子混合计算技术融合现

有算力，可以充分利用已有经典计算算力进行性能提升。

表 3 国际前十名超级计算机能耗表

排名	名称	国家	能耗(kW)	能源利用率 (GFlops/Watts)
1	Fugaku(富岳)	日本	29,899.23	14.78
2	Summit(顶点)	美国	10,096.00	14.72
3	Sierra	美国	7,438.28	12.72
4	神威·太湖之光	中国	15,371.00	6.05
5	Perlmutter	美国	2,528.00	25.55
6	Selene	美国	2,646.00	23.98
7	天河二号	中国	18,482.00	3.32
8	JUWELS Booster Module	美国	1,764.22	25.01
9	HPC5	美国	2,252.17	15.74
10	Frontera	美国	官方未提供	
一台 64 比特超导量子计算机			能耗约为超算 1/25000	
一台拥有千万亿次级计算能力的计算机每年消耗的能源和一座平均规模的煤矿的产能量大致相当，足够支撑 40 万人的城市一年的电力消耗。				

三、量子计算金融应用领域

(一) 量子组合优化

1. 量子组合优化算法

量子优化是量子计算领域颇受关注的一个研究分支,主要研究如何利用量子计算加速优化问题的求解。很多优化问题都可以被转化为二次无约束二值优化 (Quadratic Unconstrained Binary Optimization, QUBO) 问题, 虽然该问题采用经典算法解决比较困难, 但是可以利用量子算法进行有效解决, 例如量子退火算法、量子近似优化算法、变分量子虚时间演化算法、变分量子本征求解器、Grover 自适应性搜索算法等等。

1) 量子退火算法

量子退火 (QA) 算法是在 1989 年由 Apolloni 等三位学者提出, 也称量子随机优化⁷。量子退火算法通过使用量子涨落过程在给定的 一组候选解中找到给定目标函数的全局最小值, 主要用于离散搜索空间以及有许多局部最小值的组合优化问题。量子退火算法中使用隧道场强度作为经典模拟退火法的温度参数, 由于量子隧穿效应的存在, 使得量子退火算法更容易跳出局部最优解, 从而体现出超越经典模拟退火的优势⁸。

D-Wave 公司生产的专用量子计算机就是运行量子退火算法。例如, D-Wave 2000Q 用来解决金融投资组合管理中的资产相关性识别问题, 实现图论算法来聚类资产相关性, 以识别各种金融投资组合, 为未来的研究指明了高潜力方向⁹。

2) 量子近似优化算法

量子近似优化算法 (QAOA) 是一种经典计算与量子计算的混合算法, 可用于解决组合优化问题、最大分割问题等难题。该算法在解决某些 NP-Hard 问题时有明显的加速效果。量子近似优化算法 (QAOA) 的核心原理在于利用量子叠加性来并行计算解空间内所有

7 Apolloni B, Carvalho C, Falco D D. Quantum stochastic optimization[J]. Stochastic Processes and their Applications, 1989, 33(2):233-244.

8 何键浩, 李绿周. 量子优化算法综述[J]. 计算机研究与发展, 2021, 58(09):1823-1834.

9 Angad Kalra, Faisal Qureshi, and Michael Tisi. Portfolio asset identification using graph algorithms on a quantum annealer. Available at SSRN 3333537, 2018.

解的值，并将其编码至量子态的相位上。通过量子干涉，QAOA 能够将更优的解所对应的概率变得更高。从底层来看，QAOA 可以被视为量子绝热退火算法路径的一种离散化表达，但其参数选取比量子绝热退火算法具有更高的自由度。

3) 变分量子虚时演化算法

变分量子虚时演化 (VarQITE) 算法作为一种量子-经典混合算法，可以近似求解任意一个给定哈密顿量的系统，得到其基态向量，即哈密顿量的最小特征值所对应的特征向量。在国内，北京大学等在 2019 年完成了一般实虚时间演化的变分量子模拟理论，且使之能够适用于近期量子设备，同时进一步详细阐述了如何选择测量兼容的 Ansatz 的设计以及具有量子电路的广义变分算法实现¹⁰。

4) 变分量子本征求解器

变分量子本征求解器 (VQE) 指利用经典优化器训练一个含参量子线路，用于求解矩阵本征值和本征矢。变分量子本征求解器作为一种变分量子算法，多用于求解量子体系的基态和低激发态，它通过一系列参数化量子电路的变分优化过程迭代地逼近目标哈密顿量的最低能量本征值。在其他变分算法中，这已成为使用近期量子设备实现量子优势并加速多个科学和技术领域进展的领先策略。

¹⁰ Xiao Yuan, Suguru Endo, Qi Zhao, Ying Li, and Simon C. Benjamin. Theory of variational quantum simulation. Quantum, 3:191, Oct 2019. ISSN 2521-327X.

5) Grover 自适应性搜索

Grover 算法是在 1996 年被 LK Grover 提出的用于搜索无序数据库的量子算法¹¹,其方法是通过迭代使用一个可识别搜索目标的黑盒来提高搜索目标在量子叠加态中的振幅,从而提高测量获得搜索目标的概率。经过对算法的进一步发展延伸, Grover 自适应性搜索算法 (GAS) 被提出并用于解决二次无约束二元优化 QUBO 问题¹²。相比单纯的 Grover 搜索算法, GAS 算法是通过迭代搜索解决优化问题。与蛮力搜索相比, GAS 算法可以为组合优化问题提供二次加速。

2.量子组合优化应用场景

量子组合优化方法可以应用于投资组合优化、掉期清算、最优套利、信誉识别、金融危机预测等金融业务场景。

1) 投资组合优化

投资组合优化是根据某个优化目标从正在考虑的所有投资组合中选择最佳投资组合(资产分配)的过程。该目标通常最大化预期回报等因素,并最小化财务风险等成本,从而最大化投资组合中每增加一个风险单位对应的回报。优化目标可能会因为投资者对财务风险和预期回报的偏好不同而有所不同。

使用量子优化算法可以快速找到一种特定的组合,使得在达到期

11 Grover L K . A fast quantum mechanical algorithm for database search[J]. 1996.

12 Austin Gilliam, Stefan Woerner, and Constantin Gionis. Grover adaptive search for constrained polynomial binary optimization. Quantum, 5:428, April 2021. ISSN 2521-327X.

望收益目标的前提下，同时确保组合内股票间的相关性尽可能小，从而起到降低风险、优化组合收益表现的效果。

2) 掉期清算

掉期是指交易双方同意在一个特定期限内定期交换现金流的合同。例如常见的固定利率到浮动利率掉期，双方会根据名义本金来交换支付固定利率和浮动利率下产生的利息。通过签订这类合同可以对冲风险或利用对方的相对优势。清算所可以将双方之间的协议转换为双方分别与清算所进行的两个独立协议，在与多方进行多次互换后会形成一个掉期网络。清算所可以抵消网络中尽可能多的掉期合同并只计入净流量，从而减少与拥有多个合同相关的风险暴露。因此，找到新的可净资产组合的能力可以带来更高的效率，这本质上是一个优化问题。Rosenberg 等人证明了可以使用量子退火器解决交换网络问题，对名义利率和固定利率不同的掉期进行净额结算¹³。

3) 信用评级

信用评级是基于个人支付历史、欠款账户、历史信用等关键特征进行统计分析后的结果，可以用来代表个人或企业等借贷方的信用度。这一过程由贷款机构和金融机构负责进行。银行和信用卡公司等贷方使用信用评级来评估向消费者放贷所带来的风险，从而减轻因坏账造

¹³ G. Rosenberg, C. Adolphs, A. Milne, and A. Lee. Swap netting using a quantum annealer. White Paper 1Qbit, 2016.

成的损失，其中确定对借款方信誉有影响的关键独立特征非常重要。

组合优化方法可用于统计模型或机器学习模型中的特征选择。对全部特征组合进行训练选择的过程在经典算法中是比较耗时的，使用量子优化方法可快速找到最关键若干特征来确定客户信誉。

4) 金融危机预测

在金融市场中，一个金融网络可以被看作是各个金融机构的集合，网络中每个成员处于相互关联的状态。因此，在对金融网络的分析中，能够预测金融危机是十分重要的，但要完成准确的金融危机预测是相对困难的。金融危机的预测同样可以映射到 NP 困难的 QUBO 问题，该问题求解可利用量子计算在解决优化问题的优势。

5) 投资策略融合

在资产管理中，大致分为主动投资管理和被动投资管理两类方法，还有一类介于主动投资和被动投资之间，比如全天候策略。将 **alpha**、**beta**、**all-weather** 等经典策略加以融合，可以实现多元化的投资组合。通过对特定资产增加杠杆后该资产波动率的变化，再利用风险平价模型优化投资策略，此时问题变成了一个凸优化问题，利用牛顿下降法可以得到资产比例的最优解。上述过程是针对特定资产增加特定杠杆倍数的情况，如果逐渐增加杠杆倍数，通过循环迭代，在达到预期收益或者杠杆上限时停止迭代。而这个过程中的双重循环迭代可以通过 VQE 或 QAOA 算法进行加速求解。这类问题可以为投资策略的多元

化投资组合方案提供量子计算的二次加速效果，形成多类资产管理的快速决策依据。

(二) 量子机器学习

1. 量子机器学习算法

机器学习也是具有潜在量子优势的领域。机器学习可以建立数据间的关系，并通过这些关系建立假设，进而对未来事件进行预测、对现有数据进行分类以及异常检测。金融领域的这些问题都很重要，涉及资产的价格以及风险未来演变的不确定性。量子算法在原有经典算法解决问题能力的基础上赋予了更有效、更精确的计算潜力，甚至可以达到指数级的加速。

1) 量子回归算法

回归是监督学习中的一种，即训练一个简单模型来逼近实值函数。在训练过程中需要求得一组合适的参数向量，使表示数据拟合质量的损失函数最小化。近些年来，量子线性回归、量子岭回归、量子逻辑回归等算法相继被提出，这些量子算法在合理的假设条件下，使用 HHL 算法等利用量子并行性在多个状态中同时运算，相比经典算法有指数加速效果，并展现出了量子计算的独特优势。¹⁴

2) 量子分类算法

¹⁴ 高飞,潘世杰,刘海玲,秦素娟,温巧燕.量子回归算法综述[J].北京电子科技学院学报,2019(4):1-13

分类是将对象放置到预定义组中的过程，而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。分类算法主要包括线性分类方法、最近质心方法、支持向量机方法、基于神经网络的方法等。在高维空间下，量子机器学习算法可以更好地处理复杂的数据结构和关系，因此可能能有更好的分类效果。此外这些方法中使用的 HHL 等利用量子纠缠并行性的量子算法可以帮助实现平方级与指数级加速。

3) 量子聚类算法

聚类是根据特定的度量标准把样本数据分割成不同的类别，使得同一个类内的数据相似性尽可能大且不在同一个类中的数据差异性也尽可能大。量子聚类算法在经典聚类算法的基础上进行构造，其核心思想仍然是比较量子态之间的距离，同时能够通过量子算法进行初始质心的优化。量子聚类算法能够解决经典聚类算法在处理高维度大数据时速度慢的问题并带来指数级的加速。

4) 量子强化学习

强化学习(Reinforcement Learning, RL)是机器学习的方法之一，用于描述和解决智能体在与环境的交互过程中通过学习策略以达成回报最大化或实现特定目标的问题。算法自动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¹⁵。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。

5) 量子生成建模

生成模型(Generative Model)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，并学习输入和分类标签之间的联合概率分布；在无监督学习中，这些模型可以用来生成给定样本的新数据。量子态的概率结果是可以天然对应到需要学习数据的概率分布情况，同时量子纠缠也可以很好地表示不同因子间的相关性，所以量子计算在生成模型中有着天然优势。

6) 量子特征提取

特征提取 (Feature Extraction) 是用于识别、提取数据集属性的技术，对于特征的优化选择有助于机器学习任务。量子算法可以通过计算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，可以将低维经典数据映射到高维希尔伯特空间中，并用于识别经典算法不可见的特征¹⁶。

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 是从高维数据

¹⁵ G. Rosenberg, P. Haghnegahdar, P. Goddard, P. Carr, K. Wu, and M. L. De Prado, "Solving the optimal trading trajectory problem using a quantum annealer," IEEE JSTSP, 2016.

¹⁶ M. Schuld, K. Br'adler, R. Israel, D. Su, and B. Gupta, "A quantum hardware-induced graph kernel based on gaussian boson sampling," arXiv:1905.12646, 2019.

中提取低维特征的一种广泛使用的算法。经典的主成分分析算法复杂度对于原始数据集的维数或特征数上是多项式级别的。如果将此类经典数据映射到量子密度矩阵，则对应的量子 PCA 算法可以以指数级速度执行¹⁷。

2. 量子机器学习应用场景

1) 序列预测

预测金融资产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，通过给定一系列历史价格，对未来的价格做出准确预测。每个金融资产类别如股票、债券、现金或商品可能具有不同的内部动态，而通过量子计算机加速的回归、预测模型可以很好地处理相互关联的大量因子，并用于预测多资产类别投资组合的单日回报，如金融资产定价。

深度学习算法的递归神经网络（Recurrent Neural Network, RNN）在时间序列预测方面越来越有效，其中利用长短期记忆人工神经网络（LSTM）的方法尤其受欢迎，这些通用算法也逐步被用于金融资产定价。Pelger 等人¹⁸进一步表明，基于 LSTM 预测的改进模型可以实现比原始深度学习预测以及经典方法（包括 Fama-French 五因子模型）大得多的样本外年化夏普比率。然而，与经典方法所要求的简单参数

¹⁷ S. Lloyd, M. Mohseni, and P. Rebentrost, “Quantum principal component analysis,” *Nature Physics*, 2014.

¹⁸ L. Chen, M. Pelger, and J. Zhu, “Deep learning in asset pricing,” arXiv:1904.00745, 2021.

校准相比，训练复杂的神经网络通常是一个计算量剧增的过程。参数化量子电路（Parameterized Quantum Circuit, 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模型。2020 年剑桥大学 Bausch¹⁹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²⁰则研究提出了量子长短期记忆神经网络（QLSTM）模型的改进方案。尽管对资产定价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价值。

2) 数据分类

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，预先定义的类无法正确管理对冲基金未来的类别。因此，聚类方法如 **k-means** 已被用来克服这个问题，并基于对冲基金的可用特征，如资产类别、规模、费用、杠杆、流动性等。

3) 异常检测

在金融风控中，债务违约及欺诈检测十分重要。债务的违约会直接造成提供融资的金融机构贷款损失，并影响与其关联的上下游企业，产生严重的连锁反应。通常，借贷方偿还能力是根据历史偿还模式来计算的，而提取及利用这些信息需要合理的信用评级模型，这一点可

¹⁹ J. Bausch, "Recurrent quantum neural networks," in NeurIPS, 2020.

²⁰ S. Y.-C. Chen, S. Yoo, and Y.-L. L. Fang, "Quantum long short-term memory," arXiv:2009.01783, 2020.

以借助辅助特征提取的相关量子算法的计算优势。

借贷过程中，量子自然语言处理（Quantum Natural Language Processing, QNLP）技术可以通过使用多个数据点来评估信用风险。例如，QNLP 可以衡量商业贷款中的借款人的态度和创业思维，也可以指出借款人一些异常的数据，并对其进行更多的审查，甚至可以帮助分析贷款过程中借款人的情绪²¹⁻²²。

此外，借助量子单类支持向量机等量子异常检测算法可以直接通过训练大量历史数据判别新数据是否处于异常状态，在训练所用的贷款数据量大的情况下，量子算法的指数级加速能力具有优势。相比传统的评分模型及有监督学习分类，这种方法虽然缺乏解释性，但减小了对历史违约情况的依赖程度，并对现实中可能会产生的各种新型欺诈表现同样较为敏感。量子波尔兹曼机、量子生成对抗网络等生成判别模型也被证明可以用于欺诈检测，其中，变分量子波尔兹曼机方法已被用于分类异常信用卡交易。

除了贷款的信用风险评估，量子机器学习也可用于异常交易数据及银行流水识别。量子支持向量机、量子神经网络等量子机器学习算法可以用来预测、识别和分类观察是否与特定类别相匹配。因此，这

²¹ L. Purda and D. Skillicorn, “Accounting variables, deception, and a bag of words: Assessing the tools of fraud detection,” *Contemporary Accounting Research*, 2015.

²² I. E. Fisher, M. R. Garnsey, and M. E. Hughes, “Natural language processing in accounting, auditing and finance: A synthesis of the literature with a roadmap for future research,” *ISAFM*, 2016.

些可以拓展到完全不同的架构下进行训练以识别给定交易数据或银行流水识别数据集中的某种特征类别。

(三) 量子模拟算法

1. 量子模拟算法

1) 量子蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 算法利用抽样方法来逼近求解难以用解析方法或数值方法解决的高维问题。经典蒙特卡罗方法已被用于推理、积分和优化场景中。量子蒙特卡罗方法利用量子叠加态的并行性，通过振幅估计 (Amplitude Estimation, AE) 算法实现平方级加速效果，从而降低算法时间复杂度。

金融衍生产品的定价通常涉及到复杂的数学模型和随机变量的计算，而这些计算往往无法得到精确的解析解，只能采用数值方法计算近似解。另外，金融衍生产品的种类繁多，涉及到的金融工具、市场组合和交易策略也各不相同，使得定价模型需要根据实际情况进行不断改进和调整。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，蒙特卡罗方法被广泛应用。

2) 哈密顿量模拟

哈密顿量是与量子系统总能量有关的运算符。根据薛定谔方程可知,通过操作哈密顿量可以实现量子态的演化。在部分量子优化算法

中,矩阵被编码成哈密顿量的形式,进而作用到量子态上。

哈密顿量模拟 (Hamiltonian Simulation) 就是寻找能高效逼近目标哈密顿演化的酉演化过程,从而在有效时间内完成演化目标。通过将金融问题映射为相应的薛定谔方程或者哈密顿量,并设计特别的量子线路对此类复杂金融问题进行模拟,从而实现包括期权定价等在内的问题的求解。

2.量子模拟应用场景

量子模拟可以模拟给定的随机微分方程,主要应用于衍生品定价和风险分析两大场景。

1) 衍生品定价

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。

期权定价 (Option Pricing) 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。同时,构造相应过程的哈密顿量也可以对期权价格随时间的演化进行模拟。

债务抵押债券 (Collateralized Debt Obligation, 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。CDO 定价通常使用各种连接函数 (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计算加速优势。

2) 风险分析

风险价值 (Value at Risk, VaR) 是衡量投资损失风险的统计量指标, 用于量化特定时间范围内某一金融资产或证券组合价值的可能损失程度。VaR 值作为风险度量指标目前已经被广泛应用于风险管理、财务分析以及估算风险性资本等。通过对多个市场因素变量进行分布及相关性建模, 可以得到资产组合随这些因素变化的改变量进而得到 VaR 值。这一过程通常可以通过分布建模配合蒙特卡罗法实现。因此, VaR 值计算也可以利用量子蒙特卡罗模拟相关算法来进行分布加载, 并实现平方级别的量子加速, 从而应对更高维的资产组合风险分析。

表 4 部分量子计算金融应用领域

应用领域	算法列举	场景例举
量子组合优化算法	量子退火算法	投资组合优化 掉期清算 信用评级 金融危机预测 投资策略融合
	量子近似优化算法	
	变分量子虚时演化算法	
	变分量子本征求解器	
	Grover 自适应性搜索	
量子机器学习算法	量子回归算法	序列预测 数据分类 异常检测
	量子分类算法	
	量子聚类算法	
	量子强化学习	
	量子生成建模	
	量子特征提取	
量子模拟算法	量子蒙特卡罗模拟	衍生品定价 风险分析
	哈密顿量模拟	

四、量子计算金融应用探索进展

(一) 北美应用探索

1. 美国

1) 摩根大通

在金融机构中，摩根大通的量子工程团队对量子计算的研究处于领先地位。2020年5月，摩根大通的研发主管 Marco Pistoia 曾表示，“摩根大通期待与 Honeywell 在信用风险评级和欺诈侦测算法上的合作”²³。2022年摩根大通在 Honeywell 的 H1-2 离子阱芯片上实现了使用量子芝诺动力学来解决具有多个任意约束的优化问题，从而帮助解决投资组合优化问题²⁴。

此外，摩根大通还与另一家离子阱公司 IonQ 有合作，尝试解决约束性优化问题。摩根大通和 IonQ 合作实现了迄今为止最大的量子硬件约束优化演示，演示结果可以在包括金融在内的许多行业中得到应用²⁵。

2) 高盛集团

高盛集团同样很早就开始布局量子计算技术，并且是 AWS 云计

²³ Swayne, Matt, “JP Morgan Chase Unleashes Honeywell’s Quantum Computer on Tough Fintech Problems,” The Quantum Daily, Jul. 2, 2020,

²⁴ Herman D, Shaydulin R, Sun Y, et al. Portfolio Optimization via Quantum Zeno Dynamics on a Quantum Processor[J]. arXiv preprint arXiv:2209.15024, 2022.

²⁵ Niroula P, Shaydulin R, Yalovetzky R, et al. Constrained quantum optimization for extractive summarization on a trapped-ion quantum computer[J]. Scientific Reports, 2022, 121: 1-14.

算服务及其量子运算服务 Amazon Braket 使用商，借助量子计算用来处理海量交易和数据分析。同时，高盛于 2014 年就成立了专注于量子计算研究的团队，并且在持续开展量子计算金融应用研究工作。高盛几年来一直与硅谷初创公司 QC Ware 合作研究量子算法在金融中的应用，比如探索如何利用量子蒙特卡洛算法来评估各种金融工具的风险和模拟价格²⁶。

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。其中，IonQ 新一代采用玻璃阱技术的量子处理器与前几代相比，在保真度和吞吐量方面的性能提高了一个数量级。QC Ware 和高盛为蒙特卡罗模拟量子化的算法已经在 IonQ 量子计算机上得到演示，旨在让企业以比现在快得多的速度评估金融风险并模拟各种金融工具的价格，从而可能改变全球金融市场的运行方式²⁷。

3) 摩根士丹利

摩根士丹利持续投入对量子计算行业发展趋势，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的影响并提供应对的建议。摩根士丹利认为在未来十年内，量子计算将对石油天然气、公用事业、

²⁶ Castellanos, Sara, “Goldman Taps Startup to Explore Quantum Computing,” The Wall Street Journal, Dec. 10, 2019

²⁷<https://thequantuminsider.com/2021/06/23/11-global-banks-probing-the-wonderful-world-of-quantum-technologies/>

医药、金融、航空航天、国防、AI 和大数据等多个行业产生深远影响。

除了对量子计算行业发展的关注和研究之外，摩根士丹利也同时对量子计算金融应用的研究和探索进行进一步的研究。前摩根士丹利董事总经理 **Peter Carr**——现在任职纽约大学金融和风险工程系主任和合作研究人员在一篇论文中提及，他们测试了量子计算机在帮助投资经理解决难题的任务中的潜力，通过多个步骤在一段时间里押注一系列资产，投资经理必须在每一步决定投资多少资产，同时将交易与市场影响的成本考虑其中²⁸。

4) 富国银行

富国银行是一家美国跨国金融服务公司，公司总部位于加利福尼亚州旧金山，运营总部位于曼哈顿。2019 年，富国银行的技术主管 **Saul Van Beurden** 就通过与 IBM 和麻省理工学院 MIT 签署协议，在量子计算和人工智能技术方面进行合作，开始了该银行的量子计算风险投资。他对量子技术的态度很明确，作为与 IBM 和 MIT 交易的一部分，富国银行加入了 IBM 的量子网络，这是一个由财富 500 强公司、初创企业、学术机构和研究实验室组成的社区，致力于推进量子计算和探索实际应用²⁹。

²⁸ Rosenberg G, Haghnegahdar P, Goddard P, et al. Solving the optimal trading trajectory problem using a quantum annealer[C]//Proceedings of the 8th Workshop on High Performance Computational Finance. 2015: 1-7.

²⁹ <https://thequantuminsider.com/2021/06/23/11-global-banks-probing-the-wonderful-world-of-quantum-technologies/>

5) 花旗银行

花旗集团是一家总部位于纽约市的美国跨国投资银行和金融服务公司。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，因为“量子计算可以通过改进交易算法、减少欺诈、优化投资组合和管理风险来帮助彻底改变金融服务。”

该银行还投资了 IQBit 和 QC Ware 等量子计算软件初创公司，花旗集团董事总经理 William Hartnett 甚至表示，量子技术将改变金融业的风险评估和交易，并评论说：“银行现在需要开始学习如何利用量子计算。³⁰”

6) GE Research

通用电气旗下的通用电气公司的中央创新中心-通用电气研究所 (GER) 也参与到量子计算金融应用的研究当中。在 IonQ 的帮助下，GER 利用量子玻恩机有效地训练量子线路来学习四个指数之间的相关性。从量子计算得出的预测结果在某些情况下优于经典建模方法，证实了量子相关性分析有可能在商业应用中带来更智能的数据驱动分析和决策³¹。此外，新提出的优化方法有可能解决量子机器学习实践中常见的局部最小值和梯度消失等问题，使模型得以扩展。这种改

³⁰ <https://thequantuminsider.com/2021/06/23/11-global-banks-probing-the-wonderful-world-of-quantum-technologies/>

³¹ Zhu D, Shen W, Giani A, et al. Copula-based Risk Aggregation with Trapped Ion Quantum Computers[J]. arXiv preprint arXiv:2206.11937, 2022.

进展示了一种更快、更准确地进行多变量分析的方法，GER 的研究员希望这能带来新的、更好的方法来评估主要制造过程的风险，如产品设计、工厂运营和供应链管理。

IonQ 首席执行官兼总裁 Peter Chapman 表示：“与 GE Research 一起，IonQ 正在推动量子计算目前可能实现的目标。当必须以高精度对多个变量进行建模时，虽然经典训练方法面临效率低下的问题，但在我们的共同努力之下，已经确定了一种新的训练策略，它在系统扩展时也能够实现优化量子计算结果。³²”

2. 加拿大

2019 年 8 月份，BMO 金融集团和丰业银行发布了与加拿大一家量子计算和人工智能创业公司 Xanadu 的合作成果——一款应用于金融领域的量子蒙特卡罗算法，该量子算法有助于加速金融交易产品计算。Xanadu 在自己的量子模拟器上测试了该量子算法，仿真结果表明，当算法在量子计算机上运行时，计算速度可以加快一百或数千倍。根据 Xanadu 项目负责人 Tom Bromley 博士的说法，量子蒙特卡罗足以证明量子计算技术可以对金融领域产生巨大影响。此项研究成果使相关人员能够预测未来几年内的衍生品定价，并可以为实时定价和大幅降低算力的电能消耗开辟道路³³。

³² <https://ionq.com/news/june-23-2022-ionq-ge-research-risk-aggregation>

³³ “BMO Financial Group and Scotiabank Partner with Xanadu on Quantum Computing Speedups for Trading

(二) 欧洲应用探索

1. 英国

1) 英国 NatWest 银行

从 2018 年开始，英国 NatWest 银行开始对量子计算能力进行测试，以解决银行面临的一些效率需求问题。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 IQBit 提供，NatWest 同时也是 IQBit 的投资者和董事会观察员³⁴。

该银行表示，它正在使用量子赋能的计算能力，以传统计算机速度的 300 倍执行任务。这种计算模式可用于帮助投资组合经理决定该银行 1200 亿英镑优质流动性资产（HQLA）投资组合方案。NatWest 和母公司苏格兰皇家银行（RBS）尝试使用量子计算进行投资组合优化并获得了短于经典计算的运行时间。NatWest 银行认为，量子技术也可用于优化银行的其他投资组合和领域，如异常检测，人工智能和软件验证等等³⁵。

2) 渣打银行

渣打银行一直在密切关注这一技术可能给金融服务带来的进步。

Products,” Xanadu press release, Newswire Canada, Aug. 20, 2019

³⁴ <https://iqbit.com/news/natwest-works-iqbit-fujitsu-develop-new-method-deciding-portfolio-composition/>

³⁵ White Paper – The Case for Quantum and Quantum-Inspired Computing in Financial Services, Fujitsu, <https://sp.ts.fujitsu.com/dmsp/Publications/public/wp-da-financialsector-ww-en.pdf>

2017 年与美国大学空间研究协会 USRA 开展了一个联合项目³⁶。这个项目使用了位于加州 NASA 艾姆斯研究中心的量子计算硬件，把量子计算应用在一个包含 60 个资产的组合优化上，相比经典计算节省了一半的计算时间。

3) 巴克莱银行

巴克莱银行早在 2017 年就加入 IBM Q 网络，并开始研究金融行业的潜在用例³⁷。他们设立了一个量子计算内部工作组，探索当今银行业存在的几类不同的优化问题，以找出量子计算可能面临的一些具体实战。

作为第一步，巴克莱的量子研究者将每个优化问题转换为简单的抽象描述，以便对问题的算法性质进行分类。随后检查解决相关问题的量子算法是否已发布，确定可能构成更复杂的计算基础的有用算法³⁸。

下一步，尝试构建每个问题的简化版本，使得这些问题可能在量子处理器上运行。这些具体问题涉及财富管理中的投资组合优化以及改进资本市场交易完成结算效率。IBM 与巴克莱银行合作，研究了一

³⁶ Walker, Owen, "Nasa says quantum computing is the future for funds," The Financial Times, Oct. 20, 2019, <https://www.ft.com/content/195ce103-2419-30e4-a19d-96e8cb8a3c9b>.

³⁷ Braine, Lee, Daniel J. Egger, Jennifer Glick, and Stefan Woerner. "Quantum algorithms for mixed binary optimization applied to transaction settlement." arXiv preprint arXiv:1910.05788, 2019, <https://arxiv.org/pdf/1910.05788v1.pdf>.

³⁸ Crosman, Penny, "Why Banks like Barclays Are Testing Quantum Computing." American Banker 183 136:1, 2018.

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³⁹。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。这是一个日趋严重的问题，因此，银行可能不得不采用可以对抗量子破解的更强大的加密技术⁴⁰。

4) 汇丰银行控股

汇丰银行是英国的一家跨国银行和金融服务机构。与其他机构一样，汇丰银行敏锐意识到未来几年量子计算在风险分析、机器学习和网络安全等领域对金融业的重要性。因此，汇丰银行积极与其他公司和研究实验室合作，研究这种先进技术的潜力。

汇丰银行与欧洲 NEASQC 量子计算的下一代应用项目合作，在药物发现、乳腺癌检测、碳捕获和能源基础设施风险评估等多个领域开发实际用例⁴¹。该项目为期四年，项目预算为 470 万欧元，由欧盟的地平线 2020 研究和创新计划全额资助⁴²。

2. 德国

2020 年 7 月，德意志银行宣布即将与谷歌签署一份多年期的合

³⁹ Saran, Cliff, “Barclays demonstrates proof-of-concept quantum clearing algorithm,” Computer Weekly, Oct. 17, 2019

⁴⁰ <https://thequantuminsider.com/2021/06/23/11-global-banks-probing-the-wonderful-world-of-quantum-technologies/>

⁴¹ <https://www.neasqc.eu/about-the-project/>

⁴² “HSBC joins European quantum consortium, Finextra, Oct. 6, 2020, <https://www.finextra.com/newsarticle/36686/hsbc-joins-european-quantum-consortium>.

同，双方就改进现金流预测、风险分析和账户安全等方面展开密切的合作。2021年7月中旬，双方合作一年后，德意志银行披露了一系列创新和目标，作为其与谷歌云10年转型协议的一部分。技术负责人 **Leukert** 在接受采访时表示，在未来几个月或者几年内，德意志银行将会把自己的绝大部分数据迁移到谷歌云上，并且双方会在机器学习、人工智能以及量子计算金融服务等方面展开深层次合作，给客户带来全新的体验⁴³。

3. 法国

1) 法国巴黎银行

法国巴黎银行是一家跨国银行集团，总部位于法国。此前，该银行曾通过其风险投资部门，在2022年6月参与了量子计算公司 **C12 Quantum Electronics** 的1000万美元种子轮融资。这说明，法国巴黎银行已经意识到了量子计算对其业务的潜在影响，并且正在寻求尽早深入研究这项技术⁴⁴。

2) 法国农业信贷银行

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。尽管同期加入这一计划的还有多家

⁴³ <https://www.infoworld.com/article/3633195/will-google-cloud-ever-win-over-enterprises.html>

⁴⁴ <https://thequantuminsider.com/2021/06/23/11-global-banks-probing-the-wonderful-world-of-quantum-technologies/>

初创企业，但是 QuantFi 是其中唯一的量子技术公司⁴⁵。

4. 西班牙

1) 西班牙银行

西班牙银行 (CaixaBank) 以创新著称，被《全球金融》(Global Finance) 杂志评为 2019 年最具创新性的银行之一。为了保持技术的领先地位，CaixaBank 联合 IBM 在两个具体的金融案例中验证量子计算的作用。

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，包括抵押贷款组合和国债组合。该项研究的目的是验证使用量子计算机运行量子算法来度量这些投资组合的风险，是否会改善风险评估过程。结果表明，同样的结果用量子计算可以更快地得到。从长远来看，使用量子计算有可能将计算时间从几天减少到几分钟⁴⁶。

2) 西班牙 BBVA 银行

西班牙第二大银行 BBVA 全球研究和专利主管 Carlos Kuchkovky 团队于 2018 年开始探索量子技术，作为未来几年可能对金融业产生重大影响的颠覆性技术的一部分。他们建立了一个由量子技术专家组成的内部多学科团队，这些专家已经开始与银行的不同业务领域密切

⁴⁵ <https://thequantuminsider.com/2021/06/23/11-global-banks-probing-the-wonderful-world-of-quantum-technologies/>

⁴⁶ https://www.caixabank.com/comunicacion/noticia/caixabank-group-d-wave-collaborate-on-innovative-new-quantum-applications-for-finance-industry_en.html?id=43342#

合作。

2019年，BBVA与西班牙高级科学研究委员会CSIC达成了战略联盟，并成立了一个联合工作组，同时还与初创公司Zapata Computing和Multiverse、科技公司富士通和咨询公司埃森哲合作，启动了六项概念验证，研究了五个金融用例⁴⁷，其目的是分析这些技术是否带来好处，需要哪些计算资源来实现改进，以及如何根据问题的维度来调整结果⁴⁸。

5. 俄罗斯

俄罗斯联邦储蓄银行Sberbank和俄罗斯国家原子能公司ROSATOM子公司Quantum Technologies将在量子技术开发方面开展合作。根据声明，这两家公司将探索多种方式共同开发量子技术，成立联合专家组以及举办研讨会等。

2017年，Sberbank和俄罗斯量子中心RQC在莫斯科的两家分行之间开通了一条安全的量子通信线路⁴⁹。2020年8月，俄罗斯政府批准了由ROSATOM和俄罗斯量子中心制定的量子计算路线图，这是俄罗斯第一份量子路线图⁵⁰。

⁴⁷ <https://www.fintechfutures.com/2020/07/bbva-collaborates-with-fujitsu-on-quantum-tech-proof-of-concept/>

⁴⁸ <https://www.bbva.com/en/bbva-pursues-the-financial-sectors-quantum-advantage/>

⁴⁹ Duplinskiy A V, Kiktenko E O, Pozhar N O, et al. Quantum-secured data transmission in urban fiber-optics communication lines[J]. Journal of Russian Laser Research, 2018, 392: 113-119.

⁵⁰ <https://www.ans.org/news/article-339/russia-builds-lab-for-developing-quantum-artificial-intelligence/>

表 5 欧美量子计算金融应用探索

区域	金融机构	合作对象	合作方向
美国	摩根大通	Honeywell、IonQ	信用风险评级、欺诈侦测、投资组合优化
	高盛集团	AWS、QC Ware、IonQ	海量交易、数据分析、金融工具风险、模拟价格
	摩根士丹利		投资组合优化
	富国银行	IBM、MIT	风险投资
	花旗集团	1QBit、QC Ware	风险评估、交易
	GER	IonQ	优化
加拿大	BMO 金融集团	Xanadu	量子蒙特卡罗
英国	NatWest 银行	1QBit	投资组合优化、异常检测，人工智能和软件验证
	渣打银行	USRA	组合优化
	巴克莱银行	IBM	优化交易结算、抗量子破解
	汇丰银行	NEASQC	风险分析、机器学习、网络安全
德国	德意志银行	谷歌	现金流预测、风险分析、账户安全
法国	法国巴黎银行	C12 Quantum Electronics	
	法国农业信贷银行	QuantFi	
西班牙	CaixaBank	IBM	抵押贷款组合、国债组合
	BBVA 银行	CSIC、Zapata Computing	计算资源改进
俄罗斯	联邦储蓄银行 Sberbank	俄罗斯国家原子能公司 ROSATOM	量子通信

(三) 亚太应用探索

1. 中国

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，国内的银行等金融机构纷纷加快与量子科技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) 量子计算金融行业应用生态联盟

2021年4月，本源量子牵头成立了量子计算金融联盟，现已签约入盟单位包括建信金科、中金公司、东方证券、银联商务、建银国际、中国民生银行、中信银行、太平洋财险、华安期货、易钧科技等十余家银行、证券、保险、金融科技公司。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⁵¹。

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⁵²。

3) 建信金科

2020年6月，中国建设银行旗下建信金融科技有限责任公司（简称“建信金科”）正式设立量子金融应用实验室。目前，建信金科已在量子计算和量子安全等领域取得了初步进展，在建行金融场景中探索后量子密码算法应用潜力，牵头起草国内首个后量子密码应用金融行业标准，并联合本源量子、建信基金等合作伙伴发布业内首批量子计算金融应用算法，包括“量子期权定价算法”与“量子风险价值计量算

⁵¹ http://ah.anhuinews.com/kjyww/202104/t20210420_5236194.html

⁵² <http://www.hfgxjt.com/info/2/26/12438.html>

法”，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尝试，填补了国内在该领域的研究空白⁵³。同时，建信金科已成功研发“量子贝叶斯网络算法”、“量子投资组合优化算法”等算法，积极推进量子计算金融云平台研制。

4) 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和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⁵⁴。

5) 民生银行

2021年6月，由安徽银保监局、省地方金融监管局、省科技厅和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⁵⁵。

6) 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

⁵³ <https://new.qq.com/rain/a/20210414A0CKU900>

⁵⁴ http://yдах.china.com.cn/2021-09/14/content_41673395.html

⁵⁵ http://union.china.com.cn/zhuanti/txt/2021-06/22/content_41599551.html

财经共同发布的“量子金融应用”正式在新华财经 App 上线，接入传统手机端并与主流金融信息平台合作，也是国内量子计算金融应用与真实量子计算机结合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⁵⁶。

7) 本源量子

本源量子是同时掌握超导与半导体双体系量子计算机全栈式开发的科研公司。本源量子在量子计算金融应用层面不断探索与开发，相继发布用于金融概率预测、网络监控和故障溯因的量子贝叶斯算法应用，通过优化因子选择帮助识别金融风控领域企业债务违约行为的量子 mRMR 算法 QmRMR，专门适用于分析期权等金融衍生品定价的开发者工具，且包含亚式期权、一篮子期权以及障碍期权等奇异期权定价功能以及衍生品定价 API、衍生品定价 SDK 以及衍生品定价的本源量子期权计算器⁵⁷。与此同时，本源量子与建信金科、中信银行等金融团队深度合作，共同探索量子计算在资产和风险管理、高频交易和欺诈检测等方面的深度应用。

8) 图灵量子

图灵量子是同时掌握光量子芯片和光量子计算核心技术的科研公司。图灵量子把量子计算赋能金融科技作为一个核心应用方向，紧

⁵⁶ https://www.cnfin.com/hb-lb/detail/20220130/3528024_1.html

⁵⁷ <http://www.hfgxjt.com/info/2/26/12438.html>

密围绕“降低系统性金融风险、发展普惠金融”的行业目标，在一系列金融场景中展示量子计算的应用。例如量子算法带来更准确的衍生品定价，量子优化更高效地解决汇率套利、交易清算、投资组合管理等各种金融优化问题，量子机器学习更快速准确地实现信用违约、欺诈等风险预测。目前，图灵量子已与中国银行、招商银行等多家银行达成战略合作，共同推进量子计算在金融中的深度应用，提供一系列量子计算应用模块产品和商用服务，为金融稳定发展保驾护航⁵⁸。

9) 启科量子

启科量子在传统金融领域和新兴金融科技领域都有着自己独特的技术和多项应用⁵⁹。在传统金融领域，利用量子优化算法和量子机器学习对投资策略、期权定价、投资组合优化、风险预估和时序预测等方面都有实际应用，尤其在投资策略上开发了独有的量子二次加速算法，能融合 **alpha** 策略、**beta** 策略和 **all-weather** 等经典策略的多元化的投资组合，提升了资产管理的效率，目前在 **x86** 架构上期权定价能比传统计算快 **5%**。未来，启科量子还将在国产架构上实现量子优化算法，推动量子算法及量子计算金融应用在信创产业落地应用，保障自主可控的信创战略。

10) 玻色量子

⁵⁸ <https://www.sh.chinanews.com.cn/kjyy/2022-06-17/100455.shtml>

⁵⁹ https://page.om.qq.com/page/OvWs6tbmY4ff7T4X-9YpucQ0?source=cp_1009

玻色量子专注于光量子计算，致力于推进可扩展、可编程的光量子计算平台研发和量子计算应用落地。玻色量子与华夏银行等公司共同对量子计算在金融领域内的应用原理与场景进行了研发和探索，并验证量子 QAOA 算法优越性。玻色量子与光大科技、北京量子信息科学研究院联合发布了“天工经世量子计算量化策略平台”，该平台基于玻色量子的相干量子计算（CIM）技术，高速解决了投资组合配比的优化问题，并与光大科技联合研究了量子计算在信用评级场景应用，改进金融数据预处理方式。

2. 日本

1) 日本邮政银行

日本邮政银行股份有限公司是一家总部位于东京的日本银行。2019 年，日本邮政与专注于化学技术工业产品的东丽工业公司和从事量子计算机软件开发技术的初创公司 A*Quantum 合作，在项目中优化卡车调度以实现运输交付。日本邮政还与富士通实验室合作进行示范实验，并使用数字退火器优化运输网络⁶⁰。

2) 三菱日联金融集团

为了在快速发展的金融服务行业中保持竞争力，三菱日联银行（MUFG）于 2018 年启动了三菱日联金融重新构想战略，旨在通过

⁶⁰ <https://thequantuminsider.com/2021/06/23/11-global-banks-probing-the-wonderful-world-of-quantum-technologies/>

使用数字技术实现业务转型，最终 MUFG 找到了 IBM 进行数字化合作。IBM 和东京大学已经启动了量子创新计划联盟（QIIC），三菱日联金融集团和日本银行瑞穗银行与东芝、日立、丰田和三菱化学一起加入了这一联盟。

3. 澳大利亚

2017 年，澳大利亚联邦银行、Telstra、联邦政府、新南威尔士州政府和悉尼大学共同参与了澳大利亚第一家量子计算创业公司 Silicon Quantum Computing（SQC）总额 8300 万美元的风险投资。SQC 是利用硅进行量子计算硬件开发的公司，致力于商业化新南威尔士大学量子计算和通信技术卓越中心研究成果。同时，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。这套量子模拟器使用户能够开发用于关键财务运营的应用程序，包括风险管理、交易、投资组合管理、分析和安全性等内容，几乎涉及金融业务的所有领域⁶¹。

五、量子计算金融应用趋势与建议

（一）量子计算金融应用趋势

量子计算在金融领域的发展已经进入含噪声中型量子计算应用探索示范阶段，随着量子技术的不断成熟，量子计算在金融领域的商

⁶¹ <https://www.zdnet.com/article/commonwealth-bank-prepares-for-quantum-computing-with-launch-of-qxbranch-simulator/>

业可能性将进一步提高，量子计算还将带来更多在银行和金融领域应用的机会。

在数字化、信息化、网络化和智能化的未来时代，量子计算将与大数据处理、机器学习、人工智能及云服务深度融合。量子计算解决算力问题；大数据处理、机器学习、人工智能解决金融算法的高效性和准确性问题；云平台提供“量子金融”远程服务模式。随着金融行业应用场景多样性的增加、复杂性的增高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。

可以预见的是，随着国家各项支持政策的出台和落实，以及量子计算机软硬件的持续进步，量子计算将对金融行业和科技发展产生深远的影响，量子计算金融也必将呈现广阔的发展前景。基于量子计算的国际合作日益密切，随之而来的国际竞争也必将更加激烈。随着覆盖更多场景的量子计算金融应用算法的不断面世，具有普惠性、稳定安全性、节能高效性等特点的实用化的量子计算金融应用会逐渐落地。一批科研能力强、技术水平高、实践经验丰富、社会影响好、经济价值高的量子计算金融上市企业和科技创业公司将会涌现，推动量子计算和量子计算金融相关产业规模不断壮大。

总之，含噪声中型量子计算目前已经在金融领域进入了应用探索示范阶段。相信随着量子技术的不断成熟，量子计算在金融领域的商用可能性将进一步提高，量子计算可惠及银行及金融机构的潜力也会

迅速增加。

伴随量子计算研究的三个阶段，量子计算金融整体市场发展也预计呈现出三个趋势，如图 3 所示。



图 3 量子计算金融发展趋势预测

第一个趋势是在含噪声中型量子计算(NISQ)环境下探索量子计算金融应用，采用经典与量子混合计算的方式，实现实用化的量子计算金融应用落地。在此趋势下金融机构应积极推动量子计算布局与合作，研究热点方向是投资组合优化等问题。

第二个趋势是在千位量子比特数和完备量子云服务环境下探索量子计算金融应用，由于此时量子计算机软硬件已经发展并达到一定的高度，该阶段金融领域的量子优势显现，热点研究方向将包括风险预测和评估等。

第三个趋势是在上万位量子比特数环境下探索量子计算金融应用，该阶段金融领域的量子优势将广泛凸显，由此带来的巨大经济效益和社会价值将迅速推动量子计算覆盖整个金融领域。

(二) 量子计算金融应用建议

加快量子计算在金融领域的应用探索 and 实际部署，需要在量子计算产业生态建设、量子计算金融科技生态培育、量子计算金融应用场景挖掘和量子计算与金融复合型人才培养等方面进一步推动。

1. 建设金融领域高效安全的量子计算产业生态

金融业是关系社会稳定和人民福祉的重要领域，也是国际社会展开全方位竞争的技术高地。在当前的世界局势下，中国在芯片等高新技术领域面临诸多挑战，利用量子技术建设更高效更安全的金融系统，是国家金融安全的重要保障。

开展金融领域量子计算全产业链的建设，对于我国的独立自主和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。量子计算和量子计算金融从业者、量子计算产业链上下游企业应当不懈攻关，不畏困难，共建高效安全健康的量子计算产业生态。

2. 构建内外结合的量子计算金融科技生态

金融机构需要持续跟踪量子计算金融新进展，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业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、反欺诈检测等领域。实用化量子计算机可能威胁到

现代密码技术，这对金融稳定和隐私安全有着深远的影响。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。

金融机构可以通过内部研究、外部合作、联盟等方式开展量子计算金融工作。由于金融数据在保密性和安全性方面具有较高要求，大型金融机构可以考虑建立自己的量子计算金融人才队伍，和专业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，积极推动量子计算金融联盟有助于建立中国的量子计算金融标准，提高在国际量子计算金融领域的话语权。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）、北京金融科技产业联盟（BFIA）量子技术专业委员会等组织。

3.挖掘量子计算的实际金融应用场景

量子计算金融不是无米之炊、无源之水，量子计算金融行业的发展离不开实际金融业务场景的需要。量子计算金融是利用量子计算技术处理和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瓶颈。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，广泛调研与深入思考，找到合适的具体落地应用，以促进金融领域健康发展。

4.加快量子计算与金融复合人才培养

量子计算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，加快人才培养才能在量子计算技术的飞速发展中保持竞争力。

量子计算金融人才培养需要校、研、企多方合作，学校开设量子信息专业培养学生必备的数理基础素养，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。

作为新兴的交叉领域，量子计算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计算金融人才的选拔机制，不拘一格选拔人才。

量子计算金融人才的孕育和成长，离不开良好的量子计算金融生态。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，制定完善的量子计算金融行业标准，明确量子计算金融人才的评价标准，提供更好的量子计算金融人才发展规划。