

# 量子计算与经典计算混合架构的性能优化与算法适配研究

卢莹莹

阜新高等专科学校, 辽宁 阜新 123000

**摘要:** 量子计算因其并行性、叠加性和纠缠性, 展现出在解决某些复杂问题上的显著优势。然而, 受限于当前量子计算硬件的性能, 量子计算机在实践中无法完全取代经典计算机。混合量子-经典计算架构通过结合两种计算模式的优势, 为解决复杂科学问题提供了一种全新的解决方案。本文围绕混合架构的性能优化与算法适配展开研究, 首先探讨其体系结构的关键组成和优化方向; 随后结合典型应用场景分析现有的混合算法; 最后提出了未来的发展建议, 本次研究为推动量子-经典计算协作在实际中的落地提供了新视角。

**关键词:** 量子计算; 经典计算; 混合架构

## Research on Performance Optimization and Algorithm Adaptation of Hybrid Architecture of Quantum Computing and Classical Computing

Lu, Yingying

Fuxin Higher Vocational College, Fuxin, Liaoning, 523808, China

**Abstract:** Quantum computing has obvious advantages in solving some complex problems because of its parallelism, superposition and entanglement. However, due to the performance of current quantum computing hardware, quantum computers cannot completely replace classical computers in practice. Hybrid quantum-classical computing architecture provides a brand-new solution for solving complex scientific problems by combining the advantages of two computing modes. In this paper, the performance optimization and algorithm adaptation of hybrid architecture are studied. Firstly, the key components and optimization direction of its architecture are discussed. Then, the existing hybrid algorithms are analyzed with typical application scenarios. Finally, some suggestions for future development are put forward. This study provides a new perspective for promoting the cooperation between quantum and classical computing in practice.

**Keywords:** Quantum computing; Classical calculation; Hybrid architecture

DOI: 10.62639/ssps33.20250202

随着量子计算技术的快速发展, 其在某些特定问题上的潜在计算优势已被广泛认可。然而, 量子计算机的规模和稳定性目前受到量子比特数量、纠错能力和硬件成熟度的限制。这使得纯量子计算在现阶段难以应对实际问题的多样化需求。而经典计算机虽然在通用性和稳定性上有显著优势, 但在某些高复杂度计算任务(如量子化学、优化问题)中却面临性能瓶颈。在此背景下, 量子-经典混合计算架构(Hybrid Quantum-Classical Computing, HQCC)应运而生。这种架构充分利用了经典计算机的稳定性和量子计算机的并行性, 将问题分解为适合经典和量子系统分别处理的子问题。通过这种协同计算方式, 不仅可以突破量子硬件的当前限制, 还能为科学计算、人工智能和优化问题提供高效解决方案。本文的核心是探讨如何在混合架构下优化计算性能, 以及如何通过算法适配提升整体系统的计算能力。

### 一、混合量子-经典架构的关键组成

混合量子-经典计算架构是量子计算在现阶段应用的核心解决方案, 利用量子计算和经典计

算的优势协同处理复杂问题<sup>[1]</sup>。其组成涵盖硬件、软件和算法三个层面, 彼此协作, 共同提升架构的整体性能和适用性。

#### (一) 硬件架构

硬件层面是混合架构的基础, 其性能直接决定了系统的计算能力和任务处理效率。混合量子-经典架构的硬件部分通常包括量子处理单元(Quantum Processing Unit, QPU)和经典处理单元(如 CPU、GPU), 两者通过高速互联实现数据的高效传递。

##### 1. 硬件互联

在硬件层面, 架构由量子处理单元(QPU)和经典处理单元(CPU/GPU)组成, 依托高速互联实现低延迟的数据传输, 典型如 PCIe 总线支持的亚毫秒级通信。英伟达的 DGX Quantum 结合量子与 GPU 资源, 实现了 QPU 与 GPU 之间的高效协作。为提高计算精度, 优化量子比特的控制和测量尤为重要, 例如, 通过提升控制信号精度和减小噪声干扰, IBM 显著增强了其超导量子处理器的稳定性<sup>[2]</sup>。此外, 分布式计算通过任务管理系统将经典与量子单元高效协同, 适用于复杂任务的并行化处理, 例如长三角量超协同平台实现的量子-经典资源动态调度。

(稿件编号: IS-25-2-1037)

**作者简介:** 卢莹莹(1980-), 性别: 女, 汉族, 籍贯: 吉林省四平市, 学历: 大学本科, 职称: 副教授, 研究方向: 计算机。

## 2. 量子控制与测量优化

软件架构是硬件与算法协作的桥梁。量子编程框架(如 Qiskit、PennyLane)简化了量子电路的开发与调试。PennyLane 通过无缝集成经典优化器和量子计算任务,使得变分量子算法(VQA)实现更高效的运行。在任务调度上,工具如 CUDA Quantum 统一管理 CPU、GPU 和 QPU 任务,高效分配资源,特别适用于复杂场景下的动态任务调度。

## 3. 分布式计算

算法设计是混合计算的核心,其重点在于任务分解与协同优化。例如,变分量子本征求解器(VQE)通过量子电路计算目标函数,再用经典优化器调整参数,形成量子与经典协作的循环迭代。量子近似优化算法(QAOA)则专注于组合优化问题,通过浅层量子电路处理核心任务,同时利用经典优化器更新参数。为进一步提高效率,研究者优化了参数初始化和电路深度设计,使混合算法在收敛速度和适配性上显著提升。

### (二) 软件架构

在混合计算中,编程框架和编译工具起到了承上启下的作用。常用的软件工具包括:

#### 1. 量子编程框架

软件架构在混合量子-经典计算中起到承上启下的关键作用,为任务定义、资源分配和执行提供全面支撑。量子编程框架如 Qiskit、Cirq 和 PennyLane,简化了量子电路的开发和调试,屏蔽底层硬件细节。尤其是 PennyLane,凭借其专用 API,将经典优化器直接嵌入量子算法中,实现了混合任务的无缝衔接。

#### 2. 经典优化器

经典优化器是变分量子算法(VQA)的核心部分,用于调整量子电路参数并优化目标函数。梯度下降和牛顿法等优化算法已被广泛应用,而结合二阶优化信息的量子自然梯度优化器则显著提高了效率<sup>[3]</sup>。当前研究的重点在于减少迭代次数并加快收敛,为混合算法的高效执行提供支持。

#### 3. 任务调度工具

任务调度工具进一步提升了混合架构的整体效率。工具如 CUDA Quantum 框架统一管理 CPU、GPU 和 QPU 任务,动态分配计算资源。在 VQA 的迭代过程中,经典计算单元根据实时结果决定后续量子操作,增强了系统的灵活性与鲁棒性,为复杂任务的高效完成奠定基础。

### (三) 算法设计

#### 1. 变分量子本征求解器(VQE)

VQE 是混合量子-经典算法的典范,其核心是通过量子电路计算目标函数,并利用经典优化器调整参数实现收敛。在化学领域,VQE 被广泛用于分子基态能量的计算。具体而言,VQE 将分子哈密顿量  $H$  分解为量子可观测量  $\langle \psi(\theta) | H | \psi(\theta) \rangle$ ,通过量子电路  $U(\theta)$  准备态  $|\psi(\theta)\rangle$ ,计算期望值后将结果反馈给经典优化器。利用 VQE 计算  $H_2O$  分子的基态能量时,可以通过缩减电路深度和精确调整参数优化路径,显著提高

效率。

## 2. 量子近似优化算法(QAOA)

QAOA 是组合优化问题的代表性混合算法,其通过参数化量子电路和经典优化器结合,求解如最大割问题、旅行商问题等。具体过程包括两步:量子部分使用哈密顿量  $H_C$  和  $H_B$  构造优化电路  $U_p(\gamma, \beta) = e^{-i\beta_p H_B} e^{-i\gamma_p H_C}$ ,生成优化态;经典部分用优化算法(如共轭梯度法或进化算法)调整参数  $(\gamma, \beta)$ 。一个经典应用是最大割问题:将问题图的边权值作为输入,量子电路生成候选解,经典优化器调整电路参数以接近最大割结果。通过启发式参数初始化和电路深度优化,研究者已将 QAOA 在 100 量子比特的图优化问题中应用,显著减少了迭代次数并提高了精度。

## 3. 变分量子分类器(VQC)

VQC 是机器学习中基于量子计算的算法,用于分类问题。量子部分通过量子电路对输入数据进行量子态编码,例如通过振幅编码或参数化单比特门实现特征转换。经典部分则利用损失函数和优化器(调整电路参数)。一个实际案例是对手写数字数据集 MNIST 的分类,通过浅层量子电路对输入数据进行特征变换,再用经典优化器更新量子电路的参数。在仅使用 10 量子比特的情况下,VQC 已经在小型数据集上展现了可比于经典神经网络的分类能力。

## 二、混合算法的性能优化方法

在混合量子-经典计算架构中,性能优化是一个复杂且多维的任务,涉及任务调度、算法改进以及资源利用效率提升等核心环节。任何一个环节的改进都可能为整个系统带来显著的性能改进。然而,这也意味着每一个环节都需要细致入微的考量和针对性解决方案。以下将从三个关键维度对优化策略进行详细探讨,并提出具体建议。

### (一) 任务调度机制的优化

任务调度在混合架构中至关重要,它决定了经典计算单元和量子计算单元之间的工作协调程度。一个高效的调度机制不仅能够减轻硬件负载,还能减少因资源等待而浪费的时间。异构并行调度是目前的主要研究方向之一,通过在 QPU 和 CPU/GPU 间划分任务,两个计算单元可以同时工作,充分发挥各自优势。这种并行模式的实施需要低延迟的通信协议来支持,如量子-经典控制接口,然而现有通信协议仍存在时延和带宽不足的问题。为此,建议开发更轻量级的通信协议,并为任务调度加入优先级模型,特别是在大规模计算任务中,分配高优先级任务给低延迟路径能显著提升整体效率。此外,基于反馈的动态调度机制可以更好地适应量子计算中的不确定性,例如在中间态测量之后动态调整经典计算的步骤。这一机制需要增强经典调度器的预测能力,例如通过机器学习模型预测可能的量子态变化,从而进一步减少量子任务中冗余操作的可能性。

## (二) 算法适配与改进

混合算法在设计时需要深度契合当前硬件的特性, 特别是在量子硬件仍受限于量子比特数和操作深度的 NISQ 时代。变分量子算法 (VQA) 作为混合架构中应用最广的算法之一, 虽然其框架灵活, 但经典优化器的收敛速度往往制约了整体效率。在传统的一阶优化方法之外, 结合二阶优化信息 (如牛顿法或拟牛顿法) 的优化器能够更快找到全局最优解。然而, 这些方法的计算开销较高, 因此建议在二阶优化中加入近似计算策略, 例如仅在参数变化显著时计算二阶梯度。此外, 电路深度的减少也是当前优化的焦点, 设计低深度量子电路不仅能够缓解硬件对量子比特相干性的要求, 还能显著降低硬件噪声带来的影响。另一方面, 量子近似优化算法 (QAOA) 虽然在组合优化领域表现出色, 但其参数调整过程依赖大量的迭代搜索, 这对资源受限的量子硬件来说是不小的挑战。为此, 可以借助经典启发式算法生成初始参数, 例如通过模拟退火或遗传算法为 QAOA 提供初始值, 不仅可以减少参数搜索的次数, 还能加快模型收敛速度。

## (三) 资源利用效率的提升

在资源有限的条件下, 如何高效利用现有的量子硬件成为关键议题。量子比特复用是一种行之有效的办法, 通过在电路设计中引入动态比特分配和多态复用技术, 可以在相同的量子比特数下完成更复杂的计算任务。举例而言, 在变分量子算法中, 可以设计紧凑的参数化电路, 将不必要的操作整合或省略, 从而节省量子比特资源。除了量子电路优化, 经典预处理与后处理也是重要的提升方向。许多复杂的计算任务在进入量子阶段前, 可以借助经典计算完成数据的降维、筛选或归一化, 减少量子电路的计算复杂度。类似地, 量子计算完成后, 经典处理可以进一步分析和整合结果, 从而减轻 QPU 的负担。这种“预处理-核心计算-后处理”的模式不仅能提升资源利用率, 还为算法开发者提供了更大的设计自由度。结合实际案例, 在优化量子化学计算时, 经典预处理可以利用分块算法简化分子哈密顿量, 而后处理则能通过快速傅里叶变换将量子态结果转化为分子能级的直观表示。

## 三、混合计算的应用场景与实践

混合量子-经典架构在多个领域的初步实践展现了其强大的潜力, 尤其是在处理高复杂度计算任务时显得尤为突出。量子化学和金融优化是其中两个最具代表性的应用场景, 这些领域中的问题往往因变量规模庞大或计算复杂度高而难以用单一的经典或量子方法高效解决。混合架构通过将任务分解为适合不同计算单元处理的部分, 在理论与实践为这些问题提供了有效的解决方案。

### (一) 量子化学中的基态能量计算

量子化学是混合量子计算应用的标志性领域之一, 尤其在分子基态能量的计算中展现出极大

价值。传统方法 (如密度泛函理论或耦合簇理论) 虽然能够为分子体系提供高精度结果, 但其计算复杂度随分子规模呈指数增长, 难以应对更大的分子或更复杂的化学环境。混合量子算法中的变分量子本征求解器 (VQE) 为解决这一难题提供了创新途径。VQE 的工作机制可以理解成一种双层优化结构, 其中经典计算负责优化参数, 而量子电路则用于计算哈密顿量的期望值。在具体应用中, 分子的哈密顿量被拆解为经典可解部分 (如对称性分析或部分矩阵分解) 和需要量子求解的部分 (如电子相关能量的近似)。这种分解方式不仅降低了量子电路的深度要求, 还减少了硬件噪声对计算结果的影响, 从而在现阶段 NISQ 设备的限制下实现了较高精度的分子能量计算。

### (二) 金融优化中的组合问题求解

金融优化是另一个充分展现混合架构潜能的应用场景, 尤其是在解决复杂的组合优化问题 (如投资组合优化和资产配置) 时。此类问题的核心挑战在于变量之间的非线性关联和解空间的指数级增长, 传统经典算法 (如蒙特卡罗模拟或梯度优化方法) 在处理规模更大的问题时可能面临时间和精度的双重瓶颈。量子近似优化算法 (QAOA) 因其在离散优化问题中的高效表现而被引入这一领域。在实践中, QAOA 首先利用经典算法 (如启发式搜索或模拟退火) 生成初始解, 然后结合量子电路对局部解进行优化。量子部分的核心在于其并行搜索能力和对解空间中局部最优解的快速收敛能力, 而经典计算部分则负责对量子结果进行验证和进一步调整。近年来的研究表明, 合理设计的混合框架能够有效平衡量子与经典计算的资源利用, 从而在计算精度和时间效率之间取得最佳折中。结合实际案例分析, 利用混合架构优化股票投资组合, 经典计算预处理阶段缩减了问题规模, 而量子电路的快速搜索则提高了最终解的收益预期, 这一过程对提升金融决策的准确性具有深远意义。

## 四、结语

混合量子-经典计算架构通过结合量子计算的潜在优势和经典计算的成熟技术, 为解决复杂科学问题提供了一条全新的路径。本文通过分析其架构组成、性能优化方法和应用实践, 展示了其在科学计算和实际应用中的潜力。未来的发展需要聚焦硬件优化、算法适配和生态建设, 以推动量子-经典计算的全面落地。

### 参考文献:

- [1] 陈极. 量子-经典混合神经网络的设计及其在多元分类问题中的应用 [D]. 东南大学, 2023.
- [2] 邵磊. 面向分布式量子计算的量子线路分割与重构研究 [D]. 西安电子科技大学, 2022.
- [3] 唐涌泽. 基于线性光学量子计算的量子线路学习机制研究 [D]. 中南大学, 2022.