

离子阱量子计算机与量超融合计算平台的设计与应用

周德泽¹, 王翔宇², 刘庆¹, 王古月^{2*}

1. 国仪量子技术(合肥)股份有限公司, 安徽 合肥 231200

2. 合肥市大数据资产运营有限公司, 安徽 合肥 231200

DOI: 10.61369/TACS.2025100006

摘 要 : 量子计算机的发展目前正处于中等规模含噪声量子计算(NISQ)时代, 量子比特数量受限, 且量子操作受到噪声的影响, 直接限制了能够处理问题的复杂度。本文基于离子阱量子计算机设计了一套量超融合计算平台, 将计算任务分解成量子任务和超算任务并完成算力的调度, 实现算力协同。开放了琴谱化编程和“Jupyter”交互式编程, 可以运行自定义量超融合算法。同时集成了最大割计算、电子结构计算与手写识别等量超融合应用。本平台验证了量超融合计算模式在组合优化、量子模拟与量子机器学习等问题中应用的可行性, 为量子计算实用化提供支撑。

关 键 词 : 量子逻辑门; 离子阱量子计算机; 量超融合计算; 量超融合应用

Design and Application of A QC-HPC Hybrid Computing Platform Based on the Ion-Trap Quantum Computer

Zhou Deze¹, Wang Xiangyu², Liu Qing¹, Wang Guyue^{2*}

1. CIQTEK Co., Ltd., Hefei, Anhui 231200

2. Hefei Big Data Asset Operation Co., Ltd, Hefei, Anhui 231200

Abstract : The current development of quantum computing is situated in the noisy intermediate-scale quantum (NISQ) era, characterized by limited qubit counts and quantum operations susceptible to noise. These constraints directly restrict the complexity of problems that can be effectively addressed. In this work, we design an QC-HPC hybrid computing platform based on the ion-trap quantum computer. The platform decomposes computational tasks into quantum and classical components, enabling coordinated scheduling and collaboration between quantum and high-performance computing resources. It supports both notated quantum programming and interactive Jupyter programming, allowing users to implement and execute custom hybrid quantum-classical algorithms. Additionally, the platform integrates several hybrid applications, including maximum cut computation, electronic structure calculation, and handwritten digit recognition. Through these implementations, we demonstrate the feasibility of the hybrid computing approach in areas such as combinatorial optimization, quantum simulation, and quantum machine learning, thereby contributing to the practical advancement of quantum computing.

Keywords : quantum logic gates; ion-trap quantum computer; QC-HPC hybrid computing; QC-HPC hybrid application

引言

随着移动数字经济的快速发展, 算力已成为支撑社会智能化的重要资源^[1]。从移动互联网、大数据分析到人工智能训练, 高性能计算已成为数字服务的关键基础。然而, 随着半导体制造工艺逐渐逼近物理极限, 传统计算架构在能耗、并行度与性能增长方面均面临瓶颈^[2], 使得全球日益增长的算力需求与现有芯片技术之间出现矛盾。在此背景下, 具备量子叠加与量子纠缠特性的量子计算因能在特定问题上实现潜在的指数级加速而受到广泛关注, 成为全球科技竞争的重点方向^[3-5]。尽管理论与实验已证明量子计算具有巨大潜力, 但当前量子计算机仍处于 NISQ 阶段^[6], 受限于量子比特数量与噪声, 难以独立承担大规模计算任务。为此, 量超融合计算模式被提出, 通过让量子计算机处理最能体现量子优势的子任务, 而将其余部分交由经典超级计算机完成, 以实现算力的协同增效。基于以上需求, 本文构建了一套基于离子阱量子计算架构的量超融合计算平台。平台为用户提供量子编程环境与多种典型混合应用, 实现量子资源在真实任务中的高效调用与验证。本研究旨在探索量子计算从实验走向实际应用的路径, 为其在材料模拟、组合优化与人工智能等领域的落地提供参考。

作者简介: 周德泽(1999.1.1—), 男, 安徽宿州人, 硕士, 研究方向: 量子计算云平台

一、离子阱量子计算的基本原理

（一）量子比特与量子态操作

量子这一概念最早由德国物理学家马克斯·普朗克在1900年提出，用以描述能量的不连续分布。量子计算与经典计算有很多可以类比的地方，都是对信息进行一定的加工，最终得到计算结果^[7,8]。经典计算中最基本的计算单元是比特，通过高低电平将比特的状态区分为0或1，通过基本的逻辑门操控比特状态的翻转，从而实现信息处理。而量子计算则是基于量子力学原理的新型计算方式，使用的是完全不同于经典比特的量子比特，量子比特可同时处于 $|0\rangle$ 与 $|1\rangle$ 的叠加态，同时操控量子态的逻辑门也完全不同于经典比特的操控，被称为量子门。量子是一个物理量的最小不可分割单位，是现代物理学中一个重要的概念。通过不同量子门操作实现量子态的翻转、相位变化及多量子比特间的纠缠。与经典逻辑门完全不同，量子门通常用么正矩阵描述，可实现对量子态的连续、可逆操控。

量子计算在特定问题上展现出远超经典的能力，在于量子比特的独特性质，以下介绍量子比特不同于经典比特的三个方面：

1. 量子叠加：量子力学中的一个基本原理，指的是一个量子系统可以同时处于多个不同状态的叠加之中，即允许量子比特同时表示多个状态，为并行计算奠定基础。

2. 量子纠缠：指在量子体系中多个粒子之间存在一种超距关联现象，即当两个或多个量子比特发生纠缠时，一个量子比特的状态会即时影响与之纠缠的其他量子比特状态，这种关联与粒子间的距离无关。不同于经典关联，使量子比特之间的信息传递具有高效性。

3. 量子测量：由于量子叠加态并没有办法直接测量，其测量的过程会破坏叠加态，会使得量子叠加态坍塌到特定的经典态上，将量子的叠加态转化为经典的0和1态。为了准确测量叠加态的信息，通常需要进行重复多次的实验和测量，根据统计结果反映原始的量子叠加态。

（二）量子逻辑门

量子逻辑门是量子计算操作的基本单元，用于操控量子比特的状态^[9]。布洛赫球是一种用于可视化描述量子比特状态的工具^[10]，将量子比特的所有状态映射到三维空间的单位球面上，能够更加直观的理解量子比特状态，以及量子逻辑门引起的量子态演化的过程。布洛赫球的北极对应量子比特的基态 $|0\rangle$ ，南极对应激发态 $|1\rangle$ ，量子比特的纯态与布洛赫球面上的点一一对应，因此布洛赫球上每个点都对应相互正交态矢。在本平台的量子线路中，默认初态为 $|0\rangle$ 。如图1所示，经典的量子逻辑门概念示意图。

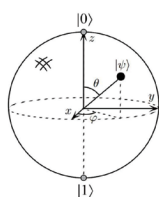


图1 布洛赫球面

（三）离子阱量子计算机的特点

离子阱量子计算机具有量子比特之间连接性好、相干时间长、门操控保真度高、全同量子比特等特点，已成为量子计算机发展中的优势路线之一^[11]。其利用电场在超高真空中囚禁离子，并将囚禁的离子作为量子比特，通过精确控制的激光对离子的量子态进行操控和读出。与其他量子比特技术相比，离子阱体系主要实现了最高保真度的两比特逻辑门运算^[12]、最长的量子比特的相干时间^[13]。离子阱系统通过克服原子物理实验系统复杂的弱点，进一步拓展量子比特数，在能够体现量子计算优势的“量子体积”这一重要指标上遥遥领先其他量子计算技术路线。此外，量子电荷耦合器件（QCCD）架构将量子比特存储在不同区域，不同的功能区域之间通过电场控制运输离子，给予了离子阱系统极大的量子比特拓展潜力^[14,15]。

二、量超融合计算平台设计与实现

（一）量超融合计算平台设计

量超融合计算云平台是一个集成了量子计算机、超级计算机以及经典云计算资源的统一服务平台。它通过软件和中间件，将不同类型的计算任务智能地调度到最相应的计算设备上执行，并允许它们相互协作，形成一种新型的混合计算模式。为解决NISQ量子计算的局限性，本文采用一种创新的混合架构，旨在构建一个协同利用超算与量子计算两种异构算力的量超融合计算平台。

量超融合计算平台的拓扑如图2所示，主要分为离子阱量子计算机、专属服务器和开放超算集群。专属服务器本地部署量超融合计算中心的门户网站和量超融合计算云平台，直接与用户交互。专属服务器接收用户任务后会将其任务分为量算任务和超算任务，分别发送给量子计算机和超级计算机，同时接收计算结果并后处理，实现计算任务和计算资源的分配。开放超算集群专门处理超算任务，在量超融合计算架构中主要用于优化和迭代量子线路。离子阱量子计算机专门处理量子任务，利用并行计算的特性加速计算。

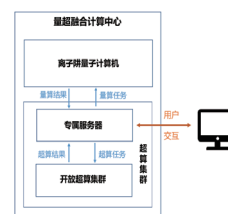


图2 量超融合计算平台的拓扑图

（二）平台总体架构与任务流转

量超融合计算平台包括用户交互层、量子应用层、资源管理与控制层、核心计算层、系统管理层以及安全合规管理层。其中用户交互层用于提供前端界面与身份验证；量子应用层包含量子谱化编程、量子高级语言及算法库；资源管理层负责任务调度、数据存储和算力管理；核心计算层包括量子模拟器与真实离子阱量子计算机；系统管理层提供权限管理、计费与日志监控；安全合规层实现数据加密、密钥管理与审计。平台总体架构如图3所示：



用户通过浏览器提交任务后,平台首先由 Web 管理前台接收请求,并将任务元数据写入 MySQL 数据库。此时平台并不会直接分配算力,而是由管理服务进程根据任务类型、参数结构和预设规则对任务进行解析。随后由管理服务进程读取任务配置,根据任务内容、参数类型及资源策略对任务进行解析。解析过程中,系统会识别任务是否包含量子线路结构、是否需要经典预处理或后处理,并结合统一配置服务提供的系统参数完成任务格式化与合法性校验。

当调度器接收到解析后的任务后,会根据任务类别将计算逻辑拆解成量子计算部分和经典计算部分。此处涉及到平台核心的“量算——超算协同”策略。量子任务会通过业务中转服务器发送至核心计算层模块,再由量子计算机调度服务将通用量子门翻译为硬件支持的原生 R 门与 RXX 门,并生成对应的激光时序控制指令,根据量子门的要求实现对量子态的精确控制。

与此同时,被识别为经典计算的任务,如线路迭代优化、哈密顿量求解、图结构权重处理等,则由超算任务分发器发送至超算平台执行。超算集群在整个体系中承担高吞吐量、强并行的经典计算任务,其结果通过业务中转服务器回传给管理服务。

量子计算任务完成后，量子态读出服务会通过外触发相机采集离子荧光图像，对其进行区域框选、灰度计算，并将0/1判决后的测量结果返回给调度器。调度器将这些结果写回数据库并与来自超算侧的结果进行整合。整合后的混合结果由管理服务统一封装，通过 Web 前端展示给用户。

最终，用户界面会以图形化方式呈现量子线路、概率分布、经典结果及资源消耗情况。整条数据流以管理服务为核心枢纽，以业务中转服务器为桥梁，以离子阱量子计算及与超算集群为执行端，实现了任务解析、任务拆解、量子——经典协同、算力融合与可视化展示的闭环操作。通过调度器持续监控系统状态与算力负载，平台能够在多用户并发环境下高效完成量子与经典算力的动态调度，确保任务的可靠执行。

三、平台功能与典型应用

量超融合计算平台是一个稳定、开放、灵活性高的云服务平台，旨在为用户提供高性能、高可靠性的计算服务。通过平台能够直接调用国仪量子的12比特离子阱量子计算机和巢湖明月超级计算机的计算资源，利用量超融合算力加速计算。平台推出了三款量超融合应用，包括最大割计算、电子结构计算及手写数字识别三个量超融合集成应用，分别对应组合优化、量子模拟以及量子人工智能这三个量子计算具有巨大潜力的领域。

量超融合计算平台支持图形化电路设计和 Jupyter。使用图形

化电路设计时，琴谱化编程和伪代码同步，即在任意一边改变量子线路，另外一边会相应更新。量子电路创建过程中，预期投影概率会实时更新。同时提供了 Jupyter 混合编程工具，允许用户自由创建量超融合算法。

（一）琴谱化编程

琴谱化编程是一种直观的量子编程方式，通过平台，用户可以拖拽量子门来构建量子线路，其过程类似于作曲家编排乐谱。该方式具有高度抽象性，能显著降低编程门槛，尤其适用于物理专业学生及跨行业初学者快速入门量子计算。此外，琴谱化界面会明确展示每个量子门对应的矩阵表示，并清晰呈现整体线路结构，极大便利了量子计算的基础教学与概念理解。

量子计算使用的量子比特在读出前处于叠加态，在进行测量时量子态会坍缩到经典的0或1，因此无法直接对量子态进行读出。实际计算过程中采用多次测量的办法，通过利用多次测量的0、1态分布表征实际的量子态。在量子线路创建完成后，设置合适的循环次数，测量的次数越多得到的态分布越符合概率预期，同时会消耗更多的资源。如图4所示，给出了一个量子态编程的示例，创建了一个3qubit组成的GHZ线路，循环次数为1024次。琴谱化编程区域的右侧为伪代码，两者对应的量子线路相同，主要用于琴谱化编程传参的补充。



图4 琴谱化编程示意图

运行以上线路，等待平台处理，计算完成后可以查看详细信息，包括量子线路、概率分布、资源消耗等。保存实验结果会将量子态以及分布的概率以 CSV 文件保存到本地。

（二）量超融合应用案例

量超融合计算平台集成了算力调度系统，并内置了针对最大割问题、电子结构计算及数字手写识别等应用的专用算法。用户只需根据需求传入相应参数，即可一键调用并完成计算，极大简化了操作流程。

1、最大割问题

最大割问题是给定一个图，如何将它所有的顶点分成两个部分，使得连接这两个部分的边的数量最多（或者这些边的权重之和最大）。该问题是一个典型的 NP 难问题^[10]，在计算机科学和图论领域具有重要的研究价值。在生物信息学、金融风险管、组合优化、网络路由优化、社交网络分析、统计物理、图像处理等工程问题中有着广泛的应用。

量超融合计算平台提供了最大割计算的集成应用，支持的操作包括修改实验名称、载入最大割矩阵信息、选择计算资源实例、重置实验任务信息、提交实验计算。重置是将会把载入的最大割矩阵和计算结果，恢复至初始状态；载入为上传矩阵信息，支持 txt 格式。提交计算实验时，需填写实验名称、载入最大割矩阵信息、选择计算资源实例，最后提交任务。平台提供了示例，可以直接导入并进行演示，图5为导入示例情况，本应用可以直接

计算得到最大割权结果：



图5 最大割计算

2、电子结构计算

电子结构计算是通过理论方法模拟和求解一个原子、分子或材料中电子的分布和运动状态，从而从量子力学层面预测物质的性质。通过对微观尺度物质的模拟计算来理解其性质和规律。在药物设计领域中电子结构计算有助于理解药物分子与生物靶标的相互作用、在计算化学领域用于模拟和预测分子结构、化学反应动力学和热力学性质。

在电子结构计算应用中，支持的操作包括修改实验名称、载入小分子文件、选择计算资源实例、重置实验任务信息、提交实验计算。重置将会把输入参数、载入的化学结构和计算结果，恢复至初始状态；载入会上传小分子结构信息，支持 mol 和 mol2 格式。提交计算实验时，需填写实验名称、基组类型、单位、载入小分子的化学结构文件。如图6所示，本应用可以直接计算得到基态能量：



图6 电子结构计算应用

3、数字手写识别

数字手写识别是计算机视觉和模式识别中的一个经典问题，其目标是让计算机能够自动识别和分类手写的数字字符。传统的数字手写识别算法可能在处理大规模数据时遇到计算复杂度、运行时间长的问题。量子算法具有潜在的计算效率优势，能够在某些情况下更快地进行数据处理和模式识别，从而加速数字手写识别过程。

在此应用中，核心是一个4qubit的量子线路，超级计算机会对手写输入结果进行处理，转化成量子线路中每个qubit第一个Rx门的传参。量子计算机运行线路并将计算得到的概率分布传给超级计算机，超算对量算结果进行解码，得到不同识别结果的概率。图7所示，是平台的数字手写识别应用界面。



图7 数字手写识别应用

（三）量超融合算法自定义设计

量超融合计算平台集成了“Jupyter”交互式开发环境，为核心用户提供了强大的自定义量超融合算法能力。在此环境中，用户可通过 Python 灵活定义计算任务的执行逻辑。其核心流程是：用户首先明确需要解决的具体问题以及解决问题的算法，随后在代码中自主指定哪些部分由经典超算资源处理，哪些部分则调用量子算

力执行。平台底层负责资源的精确调度与协同，最终将异构算力的计算结果统一返回给用户。这一功能将算法的主导权交还用户，实现了从“使用预设应用”到“创造专属算法”的跨越。

基于 Jupyter 的交互式开发环境为量子-经典混合算法提供了理想的实验平台，支持自定义算法架构，借助超算力实现量子线路的迭代优化与动态条件分支。完整涵盖变分量子本征求解 (VQE)、量子近似优化算法 (QAOQ) 等核心混合算法，能够有效应对当前主流量超融合协同计算需求，适用于量子化学模拟、组合优化等多种典型量超融合计算场景。

四、总结与展望

本文设计并实现了一种面向离子阱量子计算架构的量子-超算融合计算平台，通过建立量子计算资源与高性能超算资源的协同调度机制，实现了二者在统一编程框架与智能调度体系下的深度融合。该融合模式并非简单的物理互联，而是能够在任务级别实现算力的动态协同，对于克服 NISQ 阶段量子计算机量子比特规模有限、噪声显著等瓶颈具有重要意义。

致谢：

本项工作得到了巢湖明月合肥量超融合计算中心的支持。

参考文献

[1] 张宏科. 发展算力网络 构筑数字经济时代的重要基石 [J]. 中国科技产业, 2025(5): 1-3.

[2] 刘朝阳, 任博琳, 王则栋, 等. Chiplet 技术发展与挑战 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2024, 000(2): 13.

[3] Google Quantum AI. Quantum error correction below the surface code threshold. Nature 638, 920 - 926 (2025).

[4] Bluvstein, D. et al. A quantum processor based on coherent transport of entangled atom arrays. Nature 604, 451 - 456 (2022)

[5] Klimov, P. V. et al. Optimizing quantum gates towards the scale of logical qubits. Nat. Commun. 15, 2442 (2024).

[6] Kishor Bharti, Alba Cervera-Lierta, Thi Ha Kyaw. et al. Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) algorithms. Preprint at <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.08448> (2022)

[7] 夏威, 邹杰, 邱型泽, 等. 自适应量子储层计算与多任务学习 [J]. 科学通报: 英文版, 2023, 68(20): 2321-2329.

[8] 美 尼尔森 M.A. Nielsen, Michael A, 美 庄 I.L. Chuang, Isaac L. 量子计算和量子信息 [M]. 清华大学出版社, 2004.

[9] 李萌, 赵威威. 量子计算机中多比特量子逻辑门的构建 [J]. 信息与电脑, 2024, 36(12): 86-88.

[10] 孙立伟, 黄泽, 占梅, 等. 一种基于 vizard 的量子比特可视化仿真模型 [J]. 电脑与电信, 2024(6): 40-43.

[11] 周卓俊; 罗乐. 离子阱量子计算机的发展现状与趋势 [J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(2): 15.

[12] A. C. Hughes, R. Srinivas, C. M. Löschner, et al. Trapped-ion two-qubit gates with > 99.99% fidelity without ground-state cooling. Preprint at <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.17286> (2025).

[13] Wang, P., Luan, CY., Qiao, M. et al. Single ion qubit with estimated coherence time exceeding one hour. Nat Commun 12, 233 (2021).

[14] S.A. Moses, C.H. Baldwin, M.S. Allman, et al. A Race-Track Trapped-Ion Quantum Processor. Phys. Rev. X 13, 041052 (2023)

[15] Pino, J.M., Dreiling, J.M., Figgatt, C. et al. Demonstration of the trapped-ion quantum CCD computer architecture. Nature 592, 209 - 213 (2021).

[16] 张亚玲, 龙熙华, 穆学文. 求解最大割问题的分枝定界算法 [J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(4): 4. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9315.2006.04.025.