

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0673. 2026. 02. 008

面向多后端的量子资源虚拟化调度框架

郑丹旸, 周 鑫, 许 航, 许瑾晨

(信息工程大学, 河南 郑州 450001)

摘要:为解决当前量子云服务静态资源分配模式引发的资源利用率偏低、线路执行灵活性不足等问题,提出一种面向多后端的量子资源虚拟化调度框架。首先,该框架构建涵盖后端资源整合、虚拟资源管理、分配及映射执行的全流程调度体系,可实现多量子后端资源的统一调度。其次,设计基于测控读取线的量子芯片虚拟划分机制,完成物理量子资源向虚拟资源的高效抽象,建立全局统一虚拟资源池。最后,提出虚拟资源分配算法,其综合考量资源状态、门操作保真度等关键属性,且支持相邻虚拟资源动态合并,以适配不同规模线路的执行需求。试验结果表明,该方案在高负载场景下可将量子云吞吐量提升3倍以上,用户等待时间优化效果优于现有多道程序设计方案,有效提升量子资源利用率与线路执行灵活性。

关键词:量子计算;资源虚拟化;任务调度;调度框架

中图分类号:TP385

文献标识码:A

文章编号:1671-0673(2026)02-0185-07

Multi-Backend Quantum Resource Virtualization Scheduling Framework

ZHENG Danyang, ZHOU Xin, XU Hang, XU Jinchen

(Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To address the problems such as low resource utilization and insufficient circuit execution flexibility caused by the current static resource allocation mode of quantum cloud services, a multi-backend quantum resource virtualization scheduling framework is proposed. Firstly, a full-process scheduling system covering backend resource integration, virtual resource management, allocation, and mapping execution is constructed in the framework, which enables unified scheduling of multiple quantum backend resources. Secondly, a quantum chip virtual partitioning mechanism based on measurement and control readout lines is designed to achieve efficient abstraction of physical quantum resources into virtual resources and establish a global unified virtual resource pool. Finally, a virtual resource allocation algorithm is proposed, which comprehensively considers key attributes such as resource status and gate operation fidelity, supports dynamic merging of adjacent virtual resources, and can adapt to the execution requirements of circuits of different scales. Trials results show that under high-load scenarios, the scheme can increase quantum cloud throughput by more than 3 times, and the optimization effect of user waiting time is better than that of existing multi-programming design schemes, which effectively improves quantum resource utilization and circuit execution flexibility.

Key words: quantum computing; resource virtualization; task scheduling; scheduling framework

近年来,量子计算凭借量子叠加与量子纠缠的独特物理特性,在金融建模、数据库搜索、分子

模拟及机器学习等关键领域^[1-2]展现出巨大潜力,迎来爆发式发展。尽管未来数年内量子比特规模

收稿日期:2026-01-18;修回日期:2026-02-10

基金项目:国家重点研发计划(2024YFB4504104)

作者简介:郑丹旸(1995—),男,博士生,主要研究方向为量子操作系统。E-mail:13673370381@163.com

有望突破数千量级,但保真度不足与计算资源缺乏仍是大规模应用落地的核心瓶颈。当前量子计算仍处于含噪声的中等规模量子(Noisy Intermediate-Scale Quantum, NISQ)时代^[3],量子计算设备不可避免地受到测量误差、量子门操作误差及短退相干时间等噪声影响,导致大量子线路输出可靠性难以保障。

此外,量子计算硬件的高昂制备与运维成本,以及低温运行环境、高精度微波控制及强噪声屏蔽等苛刻的运行环境要求^[4-5],使得普通用户和中小型研究机构难以拥有本地量子计算资源。云量子服务^[6-8]的兴起有望破解这一困境,其远程资源访问模式显著降低了使用门槛,让研究者与开发者无需依赖本地硬件即可开展量子算法探索与应用开发。

尽管云量子计算在硬件研发与应用推广上取得诸多突破,但其软件基础设施仍处于起步阶段,发展进程显著滞后于经典云计算体系。当前主流量子云服务平台普遍采用基于时间划分的资源共享架构^[9],用户提交的量子程序需按队列顺序独占整台量子计算机的硬件资源直至执行完毕,无论线路计算规模与资源需求是否匹配。这种静态分配模式引发两大核心问题:1)资源适配灵活性匮乏,无法基于量子线路自身属性实现动态调度,导致资源分配与实际需求脱节;2)资源利用率偏低,多数中小型任务仅需少量量子比特却需独占整个芯片,造成大量资源闲置浪费。

为了解决上述问题,部分研究者提出量子多道程序设计(Multi-Programming)方法。但该方法依赖定制化量子编译器在编译阶段完成多线路合并^[10-14],且需预先获取所有并发执行线路集合,无法支持线路独立编译与灵活调度,与经典计算虚拟化技术的灵活性存在显著差距。而经典计算中的虚拟机(Virtual Machine, VM)技术^[15-19]通过抽

象底层物理资源为多个独立虚拟资源,支持多虚拟实例共享硬件资源,可有效提升资源利用率与调度灵活性,与当前量子云环境的发展需求高度契合。

因此,提出一种适配量子云环境的量子资源虚拟化方案,旨在解决现有量子云服务中线路执行灵活性不足与资源利用率低下的核心问题。主要贡献如下:1)提出涵盖多后端资源整合、虚拟资源管理、分配及映射执行的全流程调度框架,支持多量子后端资源的统一调度与量子线路的灵活执行;2)设计基于测控读取线的量子芯片虚拟划分机制,实现物理资源向虚拟资源的高效抽象,保障各虚拟资源的独立性与可用性;3)提出虚拟资源分配算法,综合考量资源状态和门操作保真度等关键属性,支持相邻虚拟资源的动态合并以适配大比特量子线路的执行需求;4)通过多组对比试验验证所提方案的有效性,试验结果表明,该方案在量子资源利用率、线路执行保真度及任务吞吐量等核心性能指标上均优于现有资源分配策略。

1 基于虚拟化的量子云管理框架

本文所提出的量子云管理框架如图1所示,其由多后端资源整合层、虚拟资源管理层、虚拟资源分配层及映射执行层构成。多后端资源整合层通过标准化接口实现量子设备的统一接入与管控,而虚拟资源管理层调用接口获取资源信息,将物理资源抽象为标准化虚拟资源并纳入资源池管理。用户提交量子任务按先进先出原则进入队列,并调度至虚拟资源分配层,该层依据资源池实时状态匹配资源并生成虚拟资源实例。随后,任务与虚拟资源共同提交至映射执行层,完成线路编译优化与物理比特映射,并下发至物理资源执行。结果反馈用户后,虚拟资源释放至资源池以实现循环复用。

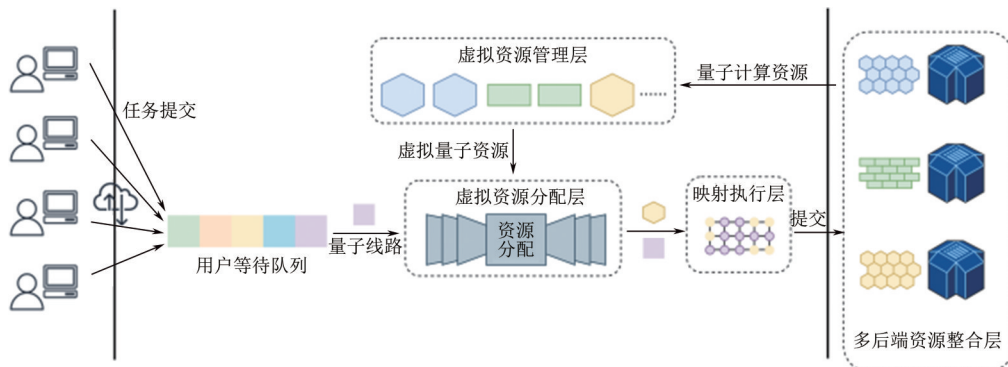


图1 量子云管理框架

1.1 多后端资源整合层

多后端资源整合层核心目标在于解决不同量子计算机提供商量子设备接口的异构性问题,实现跨厂商后端资源的统一接入、属性采集与标准化封装,同时为后续基于读取线的虚拟资源划分及虚拟资源分配提供数据支撑。

多后端资源整合层在量子资源接入时查询资源的自身属性,包括设备类型、可用状态、支持的门操作集合、拓扑结构、量子比特数量及其物理特性。为实现量子资源虚拟化,该层需额外收集测控读取线分布与各读取线对应的量子比特映射关系。

需要注意的是,NISQ 计算机易受温度波动和磁场干扰等外部因素影响,这些因素可能导致量子比特产生失真和误差。因此,必须实施周期性校准过程,以确保量子计算机的可靠性和准确性。当多后端资源整合层接入量子资源后,会定期向每个量子资源发送请求,以确保当前量子计算资源的可用性和准确性。

多后端资源整合层的标准化封装机制显著提升了量子计算资源的互操作性。开发者无需关注底层硬件差异,即可通过统一接口访问多平台量子设备,大幅降低了跨平台应用开发复杂度。

1.2 虚拟资源管理层

当前,量子云仍是访问量子计算资源的主要途径,其提供的后端资源属性各异,用户需结合任务需求选择合适资源,但现有量子云平台难以支持用户快捷地获取量子资源属性及任务排队信息,给用户操作带来额外负担。

为解决这一问题,本文提出虚拟资源管理层,其对接入的所有可用计算资源进行虚拟化处理,核心逻辑是依据芯片测控读取线条数,将物理量子芯片划分为多个相互独立的虚拟计算资源,并构建全局统一的虚拟资源池,如图2所示。每个虚拟计算资源不仅保留对应读取线关联的原始量子比特拓扑结构与物理属性,还可独立对外提供计算服务,实现量子资源的统一管理 with 直观展示。

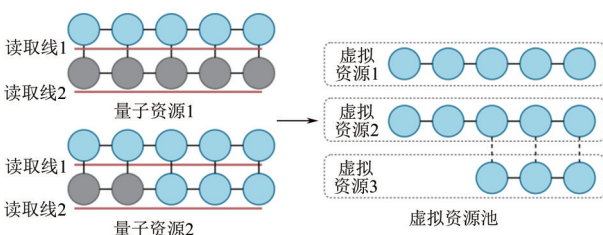


图2 资源虚拟化

具体而言,在拓扑层面,所有量子计算资源与量子比特资源均按测控读取线为最小单元进行整合。量子资源1和量子资源2接入多后端资源整合层,其中量子资源1读取线1和量子资源2读取线1均包含5个量子比特,其读取线与量子比特的映射关系清晰且功能完好,量子资源1读取线2上比特因测控设备维护、比特属性校准等原因整体不可用,而量子资源2读取线2关联的量子比特存在故障,导致对应部分比特无法正常使用。

虚拟化规则如图2右侧所示。对于运行状态正常的读取线上的比特,按照其读取线完整划分为若干虚拟量子资源,并全部纳入资源池。对于整体不可用的量子芯片,则直接排除。针对单条读取线上存在部分量子比特不可用的情况,设置双重阈值判断规则:若该读取线上可用量子比特数量占其关联总比特数的比例超过 $2/3$,则将该条读取线对应的虚拟量子资源纳入资源池;同时,若因部分比特故障导致读取线关联比特的连通性中断,则选取该读取线上连通性最优、包含比特数最多的连续区域,将其对应的量子资源纳入资源池。反之,则直接将该读取线对应的量子资源排除在外。

该配置具有以下3个优点。1)提高资源利用率。若在1条读取线上的量子芯片存在大量不可用量子比特,其有效计算能力将大幅受限。通过排除这些量子资源,可确保资源池内仅保留有效计算能力充足的虚拟资源,从而提升资源利用率。2)优化任务调度。可用量子比特不足或拓扑连通性问题可能导致某些特定任务执行效率低下或失败。通过排除这些资源,可以简化任务调度过程,确保任务分配给最适合的量子计算资源,提高整体任务执行效率。3)增强任务执行的可靠性。量子比特不可用通常由硬件故障、环境噪声、校准误差等原因导致。这些不可用量子比特与拓扑结构中其他元素的位置关系会对编译效果产生显著影响,进而影响量子算法的执行和结果的准确性。排除这些量子资源,可减少因硬件问题导致的编译失败和误差,从而增强任务执行的可靠性。

综上,虚拟资源管理层基于读取线条数实现量子芯片的虚拟化划分与资源池构建。在执行量子线路任务时,最大化整体资源利用率。同时,该架构增强了后端兼容性与可扩展性,简化了用户操作流程。

1.3 虚拟资源分配层

虚拟资源分配层是框架的核心决策模块,负

责接收用户提交的量子线路任务,完成线路需求解析、后端匹配、资源充足性校验,并通过内置的虚拟资源分配算法实现最优虚拟量子资源的选择与分配。为实现如上目标,利用已构建资源池,提出基于多目标优化的虚拟资源分配算法,即根据虚拟资源池进行全局资源分配优化。流程如下。

用户提交量子线路任务后,系统首先执行后端适配性校验。校验核心为判定任务所需量子比特数是否超出当前接入的所有物理量子资源的最大比特容量:若超出,则直接向用户返回资源超限提示;若未超出,则进入虚拟资源匹配阶段。

匹配阶段首先对资源池中所有可用的虚拟资源进行综合评分与全局排序。使用 $\text{Score}(\cdot)$ 表示后端的评估得分^[20],得分越高,证明在其上执行任务效果越好,使用式(1)确定:

$$\text{Score}(B) = \exp\left(-\frac{D(\mu_{L_{G_1}} + \mu_{L_{G_2}})}{2T_1T_2}\right) \cdot (1-\gamma)^{G_1}(1-\beta)^{G_2}(1-\omega)^M \quad (1)$$

式中: B 表示后端; D 表示线路深度; G_1 和 G_2 分别表示单双比特门操作个数; M 表示测量门个数; $\mu_{L_{G_1}}$ 和 $\mu_{L_{G_2}}$ 分别表示该后端单量子比特门和双量子比特门的操作平均延迟; γ 表示单量子比特门错误率; β 表示双量子比特门错误率; ω 表示测量错误率; T_1 、 T_2 分别表示能量弛豫时间及退相干时间。根据评分进行资源排序,将其作为后续资源匹配的核心优先级判据,为高优资源的优先调度提供支撑。

虚拟资源匹配时,首先尝试对单个虚拟量子资源进行直接分配,即按资源排序顺序遍历空闲虚拟量子资源,选取首个满足任务需求的高评分虚拟量子资源分配给相应线路任务。若不存在可直接适配的虚拟量子资源,则进行虚拟资源合并拓展流程:以评分最高的虚拟量子资源为起始节点,沿相邻虚拟量子资源逐步拓展合并,直至合并子集的总比特数满足任务需求。若合并拓展失败,则将该任务纳入等待队列等待现有资源释放。

1.4 映射执行层

映射执行层负责接收虚拟资源分配层输出的分配方案,完成量子线路到虚拟量子资源的适配映射、编译优化及执行监控。本框架采用一种启发式量子线路映射策略,在保证量子线路执行保真度的基础上,实现映射效率的最大化。

为精准评估量子比特性能,构建量子比特保真度综合评价指标。该指标选取单量子比特门保

真度、双量子比特门保真度及测量门保真度作为核心特征参数,其计算方式如式(2)所示:

$$\text{Score}(q) = W_1(1-\gamma) + W_2(1-\beta) + W_3(1-\omega) \quad (2)$$

式中: q 表示量子比特; W 表示各特征参数对应的权重系数,且所有权重系数之和为1,用于调整特征参数的重要性,本文将 W_1 和 W_2 设置为0.3, W_3 设置为0.4。在候选线路的映射匹配过程中,采用贪心策略,将双量子比特门的数量作为关键特征,优先将包含更多双量子比特门的线路映射至保真度更优的物理量子比特。需要说明的是,各量子后端的保真度参数及其他性能指标均在系统校准阶段提前测定并存储,而线路中双量子比特门的数量可通过解析线路结构属性直接获取。综上,所提出的启发式映射算法不仅能够保证用户任务调度的公平性,还可有效提升整体调度效率。

2 试验验证与结果分析

为验证所提虚拟化框架的有效性,基于线路执行保真度、吞吐量及用户等待时间等,对所提方法进行评估。

2.1 试验环境

试验环境基于 IBM Qiskit^[21]与 IBM 量子后端设备模型构建,用于模拟量子计算云服务的提供,并选取4个典型后端设备。各后端对应的特征信息如表1所示。尽管虚拟后端中模拟量子线路的执行保真度与真实量子计算环境保持一致,但二者的运行耗时存在显著差异。在真实物理量子系统中,线路运行时长主要由线路执行次数决定,这一特性由量子比特的相干性本质所决定。为精准复现真实场景运行特性,本文在调度试验中基于线路实际运行时长建立耗时模型,以验证所提方案的有效性。

表1 后端特征

后端名称	量子比特数	读取线条数	单比特门平均错误率	双比特门平均错误率	测量门平均错误率
Manhattan	65	8	0.000 406	0.316 699	0.043 416
Rochester	53	6	0.001 948	0.123 988	0.168 325
Cambridge	28	3	0.001 005	0.194 178	0.138 357
Boeblingen	20	4	0.000 541	0.016 142	0.052 579

试验数据集采用量子数据集 QASM-Bench^[22],其整合了多领域常见的量子算法与核心程序,涵盖多个方向。本试验从中抽取100个量子线路,用

于模拟用户输入。

2.2 虚拟资源性能评价指标评估

为验证虚拟资源分配层中量子虚拟资源性能评价指标的准确性,首先采用该评价指标对“Manhattan”后端的虚拟资源进行评分,其次从试验数据集选取10条量子线路,分别输入至该后端的不同虚拟量子资源中执行。试验过程中,同步统计各虚拟量子资源对应的线路执行保真度数据,本文采用试验成功率(Probability of a Successful Trial, PST)^[23]进行评估,其被定义为获得预期结果的试验次数与总试验次数之比。相关结果如图3所示。图3(a)展示了虚拟资源评分情况,图3(b)展示了线路执行保真度,横坐标均为后端资源虚拟化后的编号。试验结果表明,虚拟量子资源的性能评分与线路实际执行保真度呈现显著正相关关系。性能评分较高的虚拟资源,其对应的线路执行保真度普遍处于更高水平,这一相关性验证了虚拟资源评分体系的有效性。

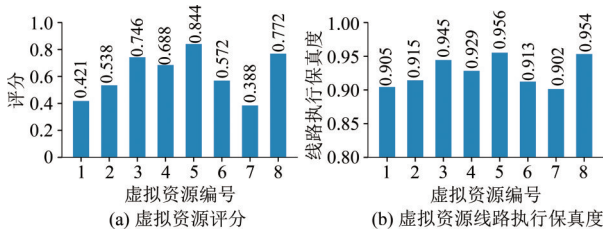


图3 虚拟资源评分与线路执行保真度

2.3 吞吐量评估

量子云环境中的大多数现有量子后端均面临线路排队等待问题,因此重点验证所提架构在高负载条件下的吞吐量提升情况。将100个线路任务随机输入所提框架,重复开展50次试验,统计不同量子后端的任务分配执行情况及试验缩减因子(Trial Reduction Factor, TRF)^[24],即量子线路单独执行所需的试验次数与同时执行所需的试验次数之比。当线路无并行执行时,TRF为1。相关结果如图4所示。

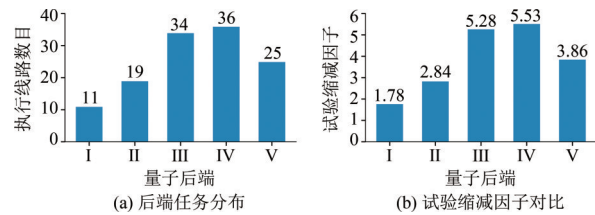


图4 后端任务分布及吞吐量情况

平均调度情况如图4(a)所示。其中,横坐标中的I、II、III、IV、V分别代表4个量子后端“Boeblingen”、“Cambridge”、“Rochester”、“Manhattan”和

均值。从试验结果可以看出,任务数量与后端量子比特数量呈正相关趋势。总体而言,随着后端量子比特数量的增加,分配执行的量子任务数量也随之增加。“Boeblingen”系统执行的任务数量最少,核心原因在于其量子比特数量有限,无法实现更高的并发;“Manhattan”后端拥有最多的65个量子比特,因此,其执行的量子任务数量也最多。

图4(b)展示了经过框架调度后,4个量子后端的平均试验缩减因子。由平均值可见,所提框架可将量子云的吞吐量提升至原有的3.86倍。从图4整体趋势来看,试验缩减因子的变化趋势与后端执行任务数量的变化趋势完全一致,即随着后端量子比特数量的增加,二者均呈显著上升趋势。其中,量子比特数量较多的后端(如“Rochester”、“Manhattan”),其吞吐量可提升至原有的5倍以上。这一结果验证了后端量子比特数量及读取线数目是影响吞吐量的核心因素,后端的读取线及其上的量子比特数越多,可划分的虚拟资源数量越多,能够并行运行的量子线路数量也就越多,从而显著提升吞吐量。

2.4 基线对比

本试验引入两种基线方案开展对比验证,所有基线方案的设计均参考量子计算云调度领域的主流实现思路与经典配置逻辑。

第1种基线为现有量子计算平台通用的基础调度方案^[9],命名为“Basic”方案。该方案遵循量子计算资源独占性调度原则,规定单个量子芯片在同一时段仅能执行一个用户的量子任务,且任务部署时仅筛选可提供最优保真度的量子计算资源,是当前量子云平台资源调度的典型实现方式。

第2种基线为融合多道程序设计思想的调度方案,命名为“Multi”方案。该方案借鉴量子计算资源并行调度的经典优化思路^[10],以最小化用户任务等待时长、提升资源整体利用率为核心目标,任务调度过程中暂不考虑保真度等量子计算性能指标。

首先开展用户等待时间的优化性能验证,本试验采用时间提升比(Time Improvement Ratio, TIP)作为评估指标,该指标用于量化优化方案相较于“Basic”方案的时间缩减比例,计算公式为:(“Basic”方案下的用户等待时间—优化方案下的用户等待时间)/“Basic”方案下的用户等待时间×100%。该指标值越大,表明等待时间缩短越显著,优化效果越好。试验结果如图5所示。结果表明,在高负

载场景下,本文所提方案与“Multi”方案的性能均实现显著提升,且虚拟化方案的提升更为突出。在中等负载条件下,两种优化方案同样展现出性能优势,且虚拟化方案相较于“Multi”方案的提升效果更为显著。而随着负载的降低,“Multi”方案与虚拟化方案的并行执行优势逐渐减弱,使得更多任务只能以串行方式单独执行。

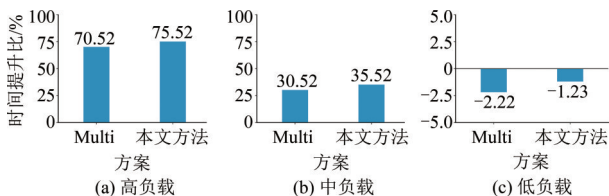


图5 不同负载下用户等待时间对比

尽管“Multi”方案的时间提升比指标有所提升,但该方案依托的时间共享量子后端特性,会造成用户等待时间的增加。而本文所提方案可在资源池中出现满足当前等待线路执行需求的资源时,立即启动线路的编译与执行流程,如图6(a)所示。相比之下,“Multi”方案必须等待前一线路执行完毕,这无疑延长了用户的等待时长。两种方案的执行差异在图6(c)中以红色标注的形式予以区分。

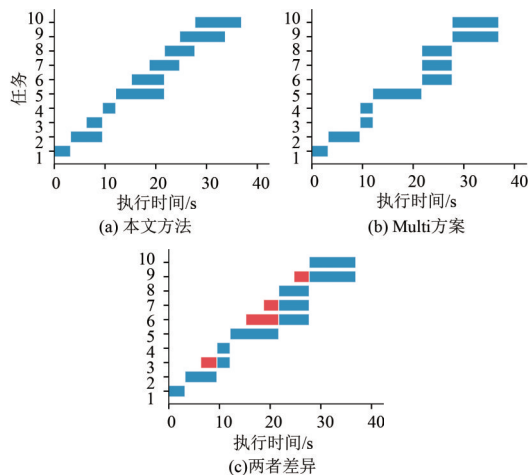


图6 不同方案下用户等待时间对比

针对保真度评估,本试验进一步在不同负载条件下,将所提虚拟化方案与两种基准调度方案展开对比验证,如图7所示。

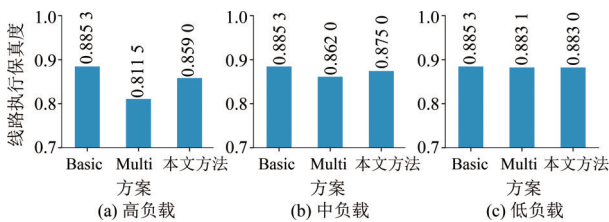


图7 不同负载下线路执行保真度对比

图7(a)展示了高负载场景下,各方案在模拟量子云环境中执行线路后的平均保真度。可以看出,“Basic”方案在该场景下的保真度表现更优,这是由于该方案的量子比特间串扰效应更弱。“Multi”方案的保真度略低于所提虚拟化方案,核心原因在于并行执行多条线路时,不同线路的量子门数量存在差异。在其并行执行机制中,量子门数量较少的线路需等待门数量较多的线路执行完毕,这一等待过程会对前者产生较强的干扰,进而造成保真度的下降。图7(b)为中等负载条件下的保真度试验结果。总体来看,3种方案的保真度差异有所缩小,这是因为中等负载下并行执行的线路数量减少,任务以串行方式执行的概率上升,从而有效降低了量子比特间的串扰。随着负载的进一步降低,两种并行执行方案逐步退化为串行单独执行模式,其保真度如图7(c)所示。尽管高负载条件下虚拟化方案的保真度相较于串行单独执行有所下降,但其在任务执行效率与系统吞吐量方面的优势十分显著。

3 结束语

针对当前量子云服务静态资源分配模式存在的线路执行灵活性不足与资源利用率偏低问题,提出适配量子云环境的量子资源虚拟化方案及全流程调度框架。核心工作与结论如下:搭建全流程调度框架,实现异构量子后端统一管控与调度;设计基于测控读取线的量子芯片虚拟划分机制,构建高效可靠的虚拟资源池;提出多目标虚拟资源分配算法,支持动态合并以适配不同规模任务。试验结果表明,该方案可显著提升量子云吞吐量与资源利用率,优化用户等待时间,验证了有效性与实用性。未来计划针对虚拟资源分配进行进一步探索,以持续提高资源利用率。

参考文献:

- [1] HERMAN D, GOOGIN C, LIU X Y, et al. Quantum computing for finance [J]. *Nature Reviews Physics*, 2023, 5 (8): 450-465.
- [2] LU W, LU Y, LI J, et al. Quantum machine learning: classifications, challenges, and solutions [J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2024, 42: No.100736.
- [3] PRESKILL J. Quantum computing in the NISQ era and beyond [J]. *Quantum*, 2018, 2: No.79.
- [4] HORNIBROOK J M, COLLESS J I, CONWAY LAMB I D, et al. Cryogenic control architecture for large-scale quan-

- tum computing[J]. *Physical Review Applied*, 2015,3(2): No.024010.
- [5] 范智强,王卫龙,岳峰,等.面向超导量子芯片的自动化测控系统设计与实现[J].*信息工程大学学报*,2025,26(1):51-56.
- [6] GOLEC M, HATAY E S, GOLEC M, et al. Quantum cloud computing: trends and challenges [J]. *Journal of Economy and Technology*, 2024,2:190-199.
- [7] SOEPARNO H, PERBANGSA A S. Cloud quantum computing concept and development: a systematic literature review[J]. *Procedia Computer Science*, 2021,179:944-954.
- [8] SINGH H, SACHDEV A. The quantum way of cloud computing[C]//*Proceedings of the 2014 International Conference on Reliability Optimization and Information Technology*. Piscataway, USA: IEEE, 2014:397-400.
- [9] BECHTOLD M. Bringing the concepts of virtualization to gate-based quantum computing[D]. Stuttgart, Germany: University of Stuttgart, 2021:22-32.
- [10] DAS P, TANNU S S, NAIR P J, et al. A case for multi-programming quantum computers[C]//*Proceedings of the 52nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*. New York, USA: ACM, 2019:291-303.
- [11] LIU L, DOU X L. QuCloud: a new qubit mapping mechanism for multi-programming quantum computing in cloud environment[C]//*Proceedings of the 2021 IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture*. Piscataway, USA: IEEE, 2021:167-178.
- [12] NIU S Y, TODRI-SANIAL A. How parallel circuit execution can be useful for NISQ computing?[C]//*Proceedings of the 2022 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*. Piscataway, USA: IEEE, 2022:1065-1070.
- [13] NIU S Y, TODRI-SANIAL A. Enabling multi-programming mechanism for quantum computing in the NISQ era [J]. *Quantum*, 2023,7:No.925.
- [14] LIU L, DOU X L. QuCloud+: a holistic qubit mapping scheme for single/multi-programming on 2D/3D NISQ quantum computers [J]. *ACM Transactions on Architecture and Code Optimization*, 2024,21(1):No.9.
- [15] TICKOO O, IYER R, ILLIKKAL R, et al. Modeling virtual machine performance: challenges and approaches [J]. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 2010,37(3):55-60.
- [16] RAWAT P S, GAUR S, BARTHWAL V, et al. Efficient virtual machine placement in cloud computing environment using BSO-ANN based hybrid technique[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2025,110:145-152.
- [17] HIDAYAT T, ALAEI ROOZBAHANI P. Strategic scheduling of a live migration virtual machine using machine learning: a review [J]. *International Journal of Management Science and Application*, 2025,4(1):46-54.
- [18] LIU Y, YAO M Y, YANG X L, et al. Advanced virtualization in automotive operating system: technology overview and scheme design [C]//*Proceedings of the 2024 IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications*. Piscataway, USA: IEEE, 2024: 74-81.
- [19] 师雪霖,徐恪.云虚拟机资源分配的效用最大化模型 [J].*计算机学报*,2013,36(2):252-262.
- [20] STEIN S, WIEBE N, DING Y F, et al. EQC: ensembled quantum computing for variational quantum algorithms [C]//*Proceedings of the 49th Annual International Symposium on Computer Architecture*. New York, USA: ACM, 2022:59-71.
- [21] JAVADI-ABHARI A, TREINISH M, KRSULICH K, et al. Quantum computing with qiskit [DB/OL]. (2024-06-19)[2026-01-18]. <https://arxiv.org/abs/2405.08810>.
- [22] LI A, STEIN S, KRISHNAMOORTHY S, et al. QASMBench: a low-level quantum benchmark suite for NISQ evaluation and simulation[J]. *ACM Transactions on Quantum Computing*, 2023,4(2):No.10.
- [23] LAST T, SAMKHARADZE N, EENDEBAK P, et al. Quantum Inspire: QuTech's platform for co-development and collaboration in quantum computing [C]//*Proceedings of Novel Patterning Technologies for Semiconductors, MEMS/NEMS and MOEMS 2020*. Bellingham, USA: SPIE, 2020:49-59.
- [24] TANNU S S, QURESHI M K. Not all qubits are created equal: a case for variability-aware policies for NISQ-era quantum computers [C]//*Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*. New York, USA: ACM, 2019:987-999.

(编辑:李志豪)