

近邻耦合受限的量子比特映射补全与动态优化方法研究

刘慧¹, 杨晗笑¹, 李文泽¹, 赵博², 聂凯³, 张冰洁¹

(1.河南师范大学 计算机与信息工程学院(人工智能学院);河南省教育人工智能与个性化学习重点实验室,河南 新乡 453007;

2.中国人民解放军战略支援部队信息工程大学 网络安全学院,郑州 450002;3.郑州大学 国家超级计算郑州中心,郑州 450001)

摘要:为改善多数量子算法受限于量子比特最近邻约束而无法直接在嘈杂中规模量子(NISQ)设备上执行,且动态重映射引入的交换(SWAP)门将降低算法保真度的问题,提出了一种高效的量子比特映射方法.首先,该方法基于图形同构性原理与映射补全策略完成初始映射分配,在满足量子比特连接性需求的同时,减少后续映射变换的SWAP门插入数量;其次,在映射变换过程中改进启发式成本函数,结合模拟退火算法的快速收敛特性与自适应能力,为量子电路动态选择最优前瞻深度与衰减因子,实现最优成本值动态计算.实验结果表明,相较于现有方法,该方法可显著减少SWAP门插入数量,有效提升NISQ设备上量子算法的执行效率与保真度.

关键词:最近邻约束;比特映射;映射补全;模拟退火

中图分类号: O413

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2026)02-0143-07

量子计算利用叠加和纠缠特性实现并行处理,展现出超越经典计算的应用潜力,并在量子机器学习^[1]、搜索算法^[2]和因子分解^[3]等领域取得突破性研究成果.然而,在量子计算机上运行量子算法时,需将逻辑量子比特映射到物理比特,并通过插入SWAP门调整映射以满足最近邻约束^[4].量子门会因NISQ器件^[5]的噪声特性而产生误差积累,过多的插入SWAP门会降低算法保真度.因此,减少新增的SWAP门数量是实现映射优化的关键,也被认为是一个NP(非确定性多项式)完全问题^[6].现有研究方法主要分为两类:第一类将映射问题转换为经典问题模型^[7-8],采用现有解决方案或求解器进行解决,但时间计算成本较高,且通常只适用于小规模量子电路;第二类采用启发式方案进行问题求解,通常先确定一个初始映射,然后通过不同的启发式搜索算法寻找合适的SWAP门序列以更新映射,例如基于随机初始映射的分层方法^[9]、基于SWAP的双向启发式搜索算法(SABRE)^[10]等,但这些方法存在初始映射随机性强、前瞻深度固定等局限,导致在许多情况下,无法实现满足连通性约束的最佳SWAP操作.

现有研究存在初始映射策略不够完善、映射变换阶段对启发式成本函数的设计仅基于固定前瞻深度进行考量等问题.为进一步提升量子算法在物理设备上的运行性能,本文提出一种新的量子比特映射方法.该方法利用图形同构和映射补全生成初始映射,使需要直接交互的量子比特尽可能临近,减少后续SWAP门的插入需求.同时,在映射变换阶段提出一种量子比特映射变换算法,结合模拟退火的参数自适应能力动态调整前瞻深度和衰减因子,以动态计算最优成本值并寻找对后续电路影响最小的SWAP门插入策略,从而通过降低SWAP门的使用数量实现电路深度的缩减以及电路保真度的提升.

收稿日期: 2025-02-27; **修回日期:** 2025-04-25.

基金项目: 国家重点研发计划高性能计算专项(2023YFB3002505);河南省科技攻关项目(242102211094);河南省重大科技专项(221100210600).

作者简介: 刘慧(1982—),女,河南新乡人,河南师范大学副教授,博士,研究方向为高性能计算、量子计算, E-mail: liuhui@htu.edu.cn.

通信作者: 李文泽, E-mail: liwenze@htu.edu.cn.

引用本文: 刘慧,杨晗笑,李文泽,等.近邻耦合受限的量子比特映射补全与动态优化方法研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(2):143-149.(Liu Hui, Yang Hanxiao, Li Wenze, et al. Research on qubit mapping completion and dynamic optimization methods with nearest-neighbor coupling constraints[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(2): 143-149. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.02.27.0001.)

实验结果表明,本文提出的初始映射生成算法相较于文献[11]中的方法,在两种路由算法上插入的 SWAP 门数平均减少 1.65% 和 3.73%。在映射变换的优化方面,本文提出的量子比特映射方法与现有 SA-BRE^[10]、量子电路映射(QMAP)^[12] 和渐进式量子比特分配(PQA)^[13] 方法相比,SWAP 门数平均减少分别达到 18.77%、13.79% 和 24.60%,有效提升了量子电路的映射优化效率。

1 基础理论

1.1 量子计算

双量子比特门的表示见附录图 S1,其中,受控非(CNOT)门见图 S1(a),由控制量子比特 q_0 和目标量子比特 q_1 构成,是量子计算中的基本逻辑门。SWAP 门见图 S1(b),是另一种典型双量子比特门,一个 SWAP 门可分解为 3 个 CNOT 门,其作用是交换两个量子比特 q_0 和 q_1 的状态^[14-15]。

量子电路是描述量子算法的常用模型,通常使用符号 $LC=(Q,C)$ 表示一个量子电路。其中, Q 是量子比特的集合,表示为 $Q=\{q_0,q_1,q_2,q_3,q_4\}$ ^[16]。 C 是量子门的集合,表示为 $C=\{g_0,g_1,\dots,g_7,g_8\}$ 。

交互图是量子电路的图形化表示,直观地展示了电路的结构和逻辑量子比特之间的相互作用模式,例如,附录图 S2(a)的量子电路可以转换为图 S2(b)的交互图形式。在图 S2(b)中,节点对应于量子电路中的逻辑量子比特,而边则对应于在这些量子比特上执行的量子门操作。

1.2 IBM 量子计算架构

物理量子比特之间的相互连接关系可以通过耦合图(CG)进行定义, $CG=(V,E)$, V 表示物理量子位的集合, E 表示能够执行 CNOT 门操作的边的集合^[17-19]。如附录图 S3 所示,图 S3(a)和图 S3(b)分别展示了 IBM Q Tokyo 和 IBM Q Ouense 中量子比特间复杂的耦合关系。

2 量子比特映射方法

为使量子程序能够在量子物理设备上有效运行,需借助量子比特映射算法对量子电路进行物理量子位的适配,以确保其符合硬件的连通性要求,本文提出一种如图 1 所示的量子比特映射方法。该方法将输入量子电路转化为交互图以明确逻辑量子比特之间的相互作用,并根据物理量子设备的耦合拓扑图获取物理比特之间的连通性;在初始映射生成阶段,首先基于交互图和耦合图寻找最大嵌入子图,若子图未包含全部逻辑量子比特,则对未映射逻辑量子比特实施基于最小化物理加权重的映射补全策略,生成完整的初始映射。而对于包含所有量子比特的子图,则可直接得到量子比特的初始映射;在映射变换阶段,首先根据得到的初始量子比特映射遍历分层逻辑电路,判断是否当前层所有量子门均可以直接执行。如果存在无法直接执行的量子门,则寻找当前层中不满足最近邻接约束的量子门,根据该量子门在耦合图中控制量子比特和目标量子比特之间的最短路径确定映射候选解。基于模拟退火算法计算并寻找最小的 SWAP 门成本值进行映射调整,使该层不满足最近邻约束的量子门正常执行。每次调整完成后,更新当前层的量子比特映射。如果当前层所有量子门都可以直接执行,则直接更新当前层的量子比特映射。然后,判断当前层是否是最后一层逻辑电路,是最后一层电路则直接生成满足硬件兼容的量子电路,否则将此映射作为下一层电路的输入映射,继续遍历下一层量子电路,直到所有层遍历结束并生成硬件兼容的量子电路。

2.1 量子比特初始映射生成

本文提出一种量子比特初始映射生成算法,首先根据逻辑电路构建量子比特交互图,表征电路中各比特间的连接关系。判断该交互图能否与物理耦合图形成同构子图匹配。若存在匹配,则直接采用交互图作为最大嵌入子图;否则,通过改进的二分搜索算法在物理耦合图中搜索最大嵌入子图。其次,检查该子图是否覆盖全部逻辑量子比特,若完全覆盖(N_{\max}),则直接将其作为初始映射;若不包含($N < Q$),需进行映射补全。补全过程中,首先基于当前映射确定已映射和未映射的物理量子比特,若已映射集合为空则将所有物理量子比特视为映射补全候选集合,否则选取与已映射比特物理距离不超过两个单位的未映射物理量子比特加入至候选集合。通过遍历未映射逻辑量子比特与候选物理量子比特,计算各临时映射的 W 值,并择优选取最小值的映射扩展策略,循环执行至所有逻辑比特完成映射,最终生成完整的初始映射方案。具体算法步骤如算法 1 所示。

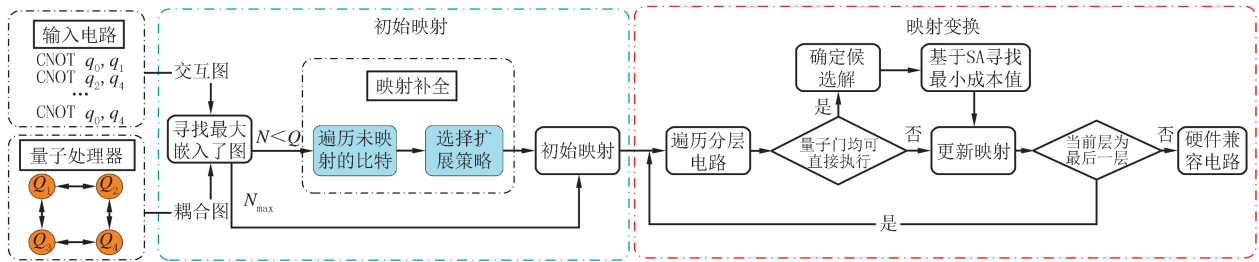


图1 量子比特映射方法框架图

Fig.1 Framework diagram of the qubit mapping method

算法 1 初始映射生成算法

输入 量子电路 C , 耦合图 CG , 逻辑量子比特集合 Q ,

物理量子比特集合 V

输出 补全后的初始映射 map

1. $g \leftarrow \text{inter_graph}(C)$ // 构建交互图

2. $map \leftarrow \text{big_submapping}(CG, g)$ // 子图匹配

3. if $\text{len}(map) < \text{len}(Q)$:

4. $\text{temp_map} \leftarrow \text{map2temp}(map, V)$

5. $\text{UnOcc} \leftarrow \text{initUnoccupiedQubits}()$

6. $\text{Occ} \leftarrow \text{initOccupiedQubits}()$

7. if not Occ :

8. $\text{OccCand} \leftarrow \text{AllPhysicalQubits}()$

9. else:

10. $\text{OccCand} \leftarrow \text{findNearbyUnQubits}(\text{Occ}, \text{UnOcc}, 2)$

11. $W \leftarrow \text{max_num}$

12. for q in Q :

13. if q in temp_map : // q 为逻辑量子比特

14. continue

15. for p in OccCand : // p 为物理量子比特

16. $\text{temp_map} \leftarrow \text{CompleatMapping}(map, q, p)$

17. $T_w \leftarrow C_W(\text{temp_map}, \text{TLG}, C, V, S, \gamma)$

18. if $T_w < W$:

19. $W \leftarrow T_w$ // 更新 W

20. $\text{candidate_map} \leftarrow \{q:p\}$ // 更新当前映射

21. $\text{map.update}(\text{candidate_map})$ // 更新 map

22. return map

23. else:

24. return map

W 指将量子比特完成映射位置分配后, 根据所生成的临时映射计算量子门物理距离加权, 该指标越小表明映射方案越优。

$$W(\tau) = \sum_{i=0}^n \gamma^i \times \sum_{\langle q, q' \rangle \in S_i} d_{CG}(q, q', \tau), (0 \leq \gamma \leq 1, n \geq 0), \quad (1)$$

其中, τ 表示当前映射; γ 表示权重因子, 取决于量子电路的特定需求; S_i 表示当前逻辑电路的第 i 层; $\langle q, q' \rangle$ 表示 CNOT 门, q 为控制量子比特, q' 为目标量子比特; d 表示当前映射下所有量子门映射到物理设备上的距离之和。

2.2 量子比特映射变换

在量子比特映射过程中, 在评估当前 SWAP 门插入操作对后续量子门执行的影响时, 后续量子门层数称为前瞻深度, 选择合适的前瞻深度对量子电路最终的执行结果至关重要。基于前瞻深度和衰减因子的成本函数如式(2)所示:

$$S_{\text{core}}(q_m, q_n) = \sum_{g \in L_i} d_{CG}[g_i] + \omega \times \left(\sum_{j=i}^{i+f} \sum_{g \in L_j} d_{CG}[g_i] \right), \quad (2)$$

其中, S_{core} 表示交换 q_m 和 q_n 后, 所有量子门映射到耦合图上时控制和目标量子比特之间的距离成本, g 表示量子门, CG 表示量子设备耦合图, ω 表示衰减因子, f 表示前瞻深度。

本文提出一种基于模拟退火的成本值优化算法, 用于为量子电路选择更加合适的成本值, 有效降低 SWAP 门的插入总数。首先初始化模拟退火的关键参数, 包括起始温度、终止温度和迭代次数, 同时生成包括前瞻深度和衰减因子在内的初始解集。定义成本函数作为优化目标评价指标, 优化目标为减少 SWAP 门数量和提提高量子电路层的执行效率。然后, 在优化过程中, 通过对当前解施加随机扰动生成新的解, 使用模拟退火的 Metropolis 准则决定是否接受新生成的解, 如果新解的成本值低于当前解, 则无条件接受, 如果新解的成本值较差, 则以概率 $\exp\left(-\frac{S-S_{\text{new}}}{T}\right)$ 接受, 从而避免陷入局部最优解。随着温度的逐渐降低, 高温阶段侧重

全局搜索以探索更广的解空间,低温阶段聚焦局部优化以精细调整解的质量,从而在探索与收敛之间达到平衡,持续优化成本值.具体算法步骤如算法 2 所示.

算法 2 成本值优化算法

输入 迭代次数 $iter$, 初始温度 T_0 , 终止温度 T_f , 前瞻深度 f , 衰减因子 ω

输出 成本值最优解

1. $T \leftarrow T_0$
2. $f \leftarrow \text{generateSequence}()$
3. $\omega \leftarrow \text{generateRandomNumbers}()$
4. $iter \leftarrow \text{setIterationNumber}()$
5. while $T > T_f$:
6. for i in range($iter$):
7. $s \leftarrow S_{\text{core}}(\omega, f)$
8. $f_{\text{new}}, \omega_{\text{new}} \leftarrow \text{generate_new}(f_i, \omega_i)$
9. $s_{\text{new}} \leftarrow S_{\text{core}}(\omega_{\text{new}}, f_{\text{new}})$
10. if $s_{\text{new}} \leq s$ or $\exp(\frac{S - S_{\text{new}}}{T}) > \text{random}()$:
11. $f_i \leftarrow f_{\text{new}}$
12. $\omega_i \leftarrow \omega_{\text{new}}$
13. $T \leftarrow \alpha * T$
14. $s_{\text{best}} \leftarrow \text{findBestScore}(f, \omega)$
15. return s_{best}

3 实验分析

实验平台:使用 IBM Q20 Tokyo 量子处理器作为目标实验平台对算法进行评估.芯片中所有耦合都是对称的,且在每对连接的物理量子位之间的两个方向上都允许 CNOT 门操作.

基准测试:采用量子线路基准测试集 RevLib^[10] 和 IBM qiskit^[20] 中的部分量子线路,由基本量子操作组成,通过 IBM 发布的 QASM 程序语言进行呈现.

3.1 量子比特初始映射性能分析

现有量子比特映射方法主要关注对量子比特映射变换策略的研究,对初始映射生成方式关注较少,然而初始映射会显著影响最终映射效果.本文提出一种基于最大嵌入子图和映射补全的初始映射生成算法,将其与 QIAN 等^[11] 提出的初始映射生成算法进行对比,将两种算法生成的初始映射分别作为 IBM Q 平台上的 BasicSwap 路由算法和 StochasticSwap 路由算法的输入. BasicSwap 路由算法和 StochasticSwap 路由算法用于在给定初始映射的基础上,通过不同的 SWAP 门插入策略进行映射变换.初始映射性能对比如附录表 S1 所示,第 1 列表示基准测试名称,第 2 列表示量子电路中量子比特位数,第 3 列表示量子电路中门的数量.第 4 列至第 6 列表示在 BasicSwap 算法下两种初始映射方法的对比结果, TWP 表示采用文献[11]方法需要插入的 SWAP 门数量, Ours 表示采用本文方法需要插入的 SWAP 门数量, Discrepancy 表示 SWAP 门数的降低比率.第 7 列至第 9 列则表示两种初始映射方法在 StochasticSwap 路由算法下的相关结果.第 10 列和第 11 列分别表示文献[11]和本文方法生成初始映射的时间.

实验结果表明,本文提出的初始映射生成方案在减少量子电路中 SWAP 门插入数量方面性能更优,基于 IBM Q 平台上集成的 BasicSwap 路由算法和 StochasticSwap 路由算法平均减少 1.65% 和 3.73%.且在大多数基准电路上,本文方法生成初始映射的时间均小于文献[11].由表 S1 数据可知,本文所提出的初始映射生成算法在处理 mod5mils_65 基准测试时, SWAP 门数的降低比率达到 100%,即没有添加额外的量子门.原因在于在使用 big_submapping 函数寻找最大嵌入子图的过程中,逻辑量子比特精准匹配了耦合图中的物理量子比特位置,使得 mod5mils_65 基准测试中的所有量子门都能够直接满足硬件执行条件,无需进行映射调整,初始映射结果即为最终映射变换结果 $\{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4\} \rightarrow \{Q_2, Q_8, Q_6, Q_7, Q_1\}$.初始映射方法充分利用了耦合图的拓扑特性,通过最大化逻辑比特与物理比特的匹配程度,确保了电路的高效执行和映射的全局最优性.此外,在处理 rd84_253 基准测试时,本文方法的运行时间为 2.06 s,相较于文献[11]的 3.14 s,时间减少较为明显.原因在于大规模电路量子门数量多、处理复杂度高,文献[11]所采用的方法在计算每个量子门和交互图中每条边的时序权重时,需要遍历整个量子门序列并对每一条边进行权重累积计算,该操作在交互图规模较大或量子门序列较长时计算复杂度较高,导致资源消耗显著增加.本文方法通过调用 big_submapping 函数,直接在硬件耦合图中寻找交互图的最大嵌入子图,避免了对全局时序权重的逐一计算,从而更快速地产生初始映射.

3.2 SWAP 门数对比

首先使用 IBM Q20 Tokyo 量子处理器将本文提出的量子比特映射方法与文献[10,12]所提出的经典代表性算法 SABRE 和 QMAP 基于不同规模电路进行对比分析,部分实验结果如表 1 所示.第 1 列表示基准测试名称,第 2 列表示量子电路中量子比特位数,第 3 列表示电路中量子门的数量,第 4 列至第 6 列分别表示利用 SABRE、QMAP 以及本文方法进行映射变换时需要添加的 SWAP 门数,第 7 列和第 8 列分别表示与 SABRE 和 QMAP 算法对比 SWAP 门数量的降低比率.

表 1 与 SABRE、QMAP 方法的量子电路映射效果对比

Tab. 1 Comparison of quantum circuit mapping effect with SABRE and QMAP method

| Circuit | NUM | GATE | SABRE(g_1) | QMAP(g_2) | Ours(g_3) | Discrepancy1($(g_1 - g_3)/g_1$)/% | Discrepancy2($(g_2 - g_3)/g_2$)/% |
|----------------|-----|--------|----------------|---------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 4mod5-v1_22 | 5 | 21 | 0 | 1 | 0 | 0.00 | 100 |
| mod5mils_65 | 5 | 35 | 0 | 6 | 0 | 0.00 | 100 |
| decod24-v2_43 | 4 | 34 | 0 | 6 | 0 | 0.00 | 100 |
| 4gt13_92 | 5 | 66 | 0 | 18 | 0 | 0.00 | 100 |
| ising_model_10 | 10 | 480 | 0 | 3 | 0 | 0.00 | 100 |
| ising_model_13 | 13 | 633 | 0 | 10 | 0 | 0.00 | 100 |
| ising_model_16 | 16 | 786 | 0 | 24 | 0 | 0.00 | 100 |
| rd84_142 | 15 | 343 | 25 | 45 | 25 | 28.57 | 44.44 |
| radd_250 | 13 | 3 213 | 425 | 432 | 358 | 15.76 | 17.13 |
| z4_268 | 11 | 3 073 | 455 | 382 | 331 | 27.25 | 13.35 |
| cycle10_2_110 | 12 | 6 050 | 874 | 812 | 770 | 11.90 | 5.17 |
| sym6_145 | 7 | 3 888 | 424 | 582 | 268 | 36.80 | 53.95 |
| adr4_197 | 13 | 3 439 | 547 | 464 | 278 | 48.32 | 40.09 |
| rd73_252 | 10 | 5 321 | 711 | 731 | 631 | 11.25 | 13.68 |
| square_root_7 | 15 | 7 630 | 866 | 822 | 825 | 4.73 | -0.36 |
| misex1_241 | 15 | 4 813 | 507 | 648 | 329 | 35.11 | 49.23 |
| sqn_258 | 10 | 10 223 | 1 448 | 1 389 | 1 186 | 18.09 | 14.61 |
| rd84_253 | 12 | 13 658 | 2 049 | 1 921 | 1 509 | 26.35 | 21.45 |
| sym9_193 | 10 | 34 881 | 5 551 | 5 050 | 3 935 | 29.11 | 22.08 |
| col4_215 | 15 | 17 936 | 2 994 | 2 928 | 2 817 | 5.91 | 3.79 |
| 9symm1_195 | 11 | 34 881 | 5 756 | 5 050 | 5 121 | 11.03 | -1.41 |
| average | | | | | | 18.77 | 13.79 |

由表 1 可知,与文献[10]所提的 SABRE 算法相比,本文所采用的方法 SWAP 门数最高减少 48.32%,平均降低 18.77%.基准测试 sym6_145、adr4_197、misex1_241 相比于 SABRE 算法的优化率均达到 30%以上,尤其是量子电路 adr4_197 的优化率接近 50%.主要原因在于 SABRE 算法通过双向电路的迭代来生成较优的初始映射,使用启发式算法来减少编译量子程序时插入的 SWAP 门数.但是,该算法生成的映射开始时具有随机性,不能保证所有方案都能得到较好的结果,且需要通过不断迭代来寻找理想的映射解决方案.而本文所采用的基于最大嵌入子图与映射补全的方法能够生成一个近似最优的初始映射,且在映射变换过程中通过运用模拟退火算法寻找最佳的 SWAP 插入策略,该方法能够更为稳定地得到较优的 SWAP 门插入方案.与文献[12]所提的 QMAP 算法相比,本文所采用的方法 SWAP 门数最高减少 100%,平均降低 13.79%.因为在这些电路中本文提出的算法可通过寻找最大嵌入子图得到满足所有量子门最近邻约束条件的初始映射,使得后续量子门的操作无需插入任何多余的 SWAP 门.在 sym6_145 测试集中,文献[12]在映射变换过程中插入了 582 个 SWAP 门,采用本文方法插入了 268 个量子门.本文利用动态成本函数优化,在处理无法直接执行的 CNOT 操作时,通过对每个逻辑量子比特的候选物理位置进行枚举与筛选,选择能够同时满足当前层和后续层 CNOT 操作需求的最优 SWAP 门插入位置,避免了局部优化导致的全局次优选择,有效降低了额外插入操作对电路深度的影响.文献[12]采用基于分层分割的优化策略,通过逐层独立映

射来减少计算复杂度.然而,该方法在处理复杂电路时未能充分考虑跨层交互和全局映射需求,导致大量冗余 SWAP 门的引入,显著增加了电路开销.相比之下,本文通过结合动态优化方法与全局搜索的成本函数设计,有效减少了 SWAP 门的数量.

同时,为了进一步对比本文方法的性能优势,与文献[13]中提出的渐进式量子比特分配算法(PQA)进行比较,基于更多的基准测试集进行对比实验,实验结果如表 2 所示.由表 2 可知,本文所提出的量子比特映射算法实现了最终量子电路中 SWAP 门总数的显著减少,最大减少 43.75%,平均减少 24.60%.在初始映射阶段,本文利用电路交互图与量子比特耦合图之间的结构相似性来选择量子比特的初始位置,并融入了物理加权和机制以完善初始映射的构建,进一步提升了量子门操作的执行效率.相较于 PQA 算法依据最低交换计数原则为输入电路构建初始映射排列的方法,本文方法增强了初始映射的多样性.在映射变换阶段,本文采用模拟退火算法优化 SWAP 门的插入过程,该算法以一定的概率接受较差的解,这一特性使得算法能够跳出局部最优解进而展开全局搜索,最终产生较优的映射策略.而文献[13]中的多窗口前瞻技术虽然通过扩大窗口范围优化了局部排序,但这种方法在全局层面上仍有改进空间,而且随着窗口范围的扩大,算法需要处理和评估更多的交换操作,导致计算资源需求的显著增加.因此,本文提出的方法在初始映射构建与映射变换过程中上均展现出明显优势,能够有效减少 SWAP 门的使用,提升量子电路的执行效率.

表 2 与 PQA 方法的量子电路映射效果对比

Tab. 2 Comparison of quantum circuit mapping effect with PQA method

| Circuit | NUM | GATE | PQA(g_1) | Ours(g_2) | Discrepancy($(g_1 - g_2)/g_1$)/% |
|---------------|-----|------|--------------|---------------|------------------------------------|
| 3_7_13 | 3 | 36 | 54 | 36 | 33.33 |
| 4_49_16 | 5 | 217 | 358 | 268 | 25.14 |
| 4gt4-v0_73 | 6 | 395 | 647 | 551 | 14.84 |
| 4gt5_77 | 5 | 131 | 203 | 140 | 31.03 |
| 4gt10-v1_81 | 5 | 148 | 247 | 190 | 23.08 |
| 4gt11_82 | 5 | 27 | 32 | 30 | 6.25 |
| 4gt11_84 | 5 | 18 | 32 | 18 | 43.75 |
| 4gt12-v0_86 | 6 | 251 | 404 | 260 | 35.64 |
| 4gt12-v1_89 | 6 | 228 | 381 | 336 | 11.81 |
| 4gt13_90 | 5 | 107 | 173 | 116 | 32.95 |
| 4gt13-v1_93 | 5 | 68 | 104 | 68 | 34.62 |
| 4mod5-bdd_287 | 7 | 70 | 112 | 88 | 21.43 |
| 4mod5-v0_18 | 5 | 69 | 114 | 78 | 31.58 |
| 4mod5-v1_23 | 5 | 69 | 120 | 81 | 32.50 |
| 4mod7-v0_94 | 5 | 162 | 261 | 174 | 33.33 |
| 4mod7-v1_96 | 5 | 164 | 260 | 206 | 20.77 |
| aj-e11_165 | 5 | 151 | 247 | 169 | 31.58 |
| alu-bdd_288 | 7 | 84 | 141 | 111 | 21.28 |
| alu-v0_26 | 5 | 84 | 129 | 108 | 16.28 |
| alu-v1_29 | 5 | 37 | 58 | 46 | 20.69 |
| average | | | | | 24.60 |

4 结 论

本文提出一种高效的量子比特映射方法,该方法自动且快速地在量子计算过程中动态地将逻辑量子位重映射到物理量子位.首先,利用图形的同构性原理和映射补全策略完成初始映射的生成,确保需要频繁直接交互的量子比特尽可能临近,在尽量保持量子门执行的物理距离最短的前提下进行补全操作,生成一个既满足量子比特间连接性需求又尽可能减少后续 SWAP 门插入数量的初始映射.然后,在映射变换过程中利

用模拟退火算法的快速收敛性和自适应能力为每个量子电路选择合适的前瞻深度和衰减因子,动态优化 SWAP 门插入策略以实现最小化插入量子门数量的目的.本文方法在处理不同基准电路时均可以得到较为理想的实验结果,能够生成相比现有研究所需 SWAP 门数更少的量子电路,从而实现量子程序的高效执行.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.02.27.0001).

参 考 文 献

- [1] 王健,张蕊,姜楠.量子机器学习综述[J].软件学报,2024,35(8):3843-3877.
WANG J,ZHANG R,JIANG N.Survey on quantum machine learning[J].Journal of Software,2024,35(8):3843-3877.
- [2] LI P C,LI Z Y.A flexible fixed-phase quantum search algorithm for searching unordered databases with any size[J].Journal of Computational Electronics,2024,23(1):176-187.
- [3] WILLSCH D,WILLSCH M,JIN F P,et al.Large-scale simulation of shor's quantum factoring algorithm[J].Mathematics,2023,11(19):4222.
- [4] 李晖,韩子傲,卢凯,等.改进量子位初始映射的综合 SWAP 优化策略[J].计算机工程与应用,2024,60(14):66-73.
LI H,HAN Z A,LU K,et al.Comprehensive SWAP optimization strategy for improving initial qubit mapping[J].Computer Engineering and Applications,2024,60(14):66-73.
- [5] CHEN S T,COTLER J,HUANG H Y,et al.The complexity of NISQ[J].Nature Communications,2023,14:6001.
- [6] ZHU P C,ZHENG S G,WEI L H,et al.The complexity of quantum circuit mapping with fixed parameters[J].Quantum Information Processing,2022,21(10):361.
- [7] DE ALMEIDA A A A,DUECK G W,DA SILVA A C R.Finding optimal qubit permutations for IBM's quantum computer architectures [C]//2019 32nd Symposium on Integrated Circuits and Systems Design(SBCCI).Sao Paulo:IEEE,2019:1-6.
- [8] WILLE R,BURGHOLZER L,ZULEHNER A.Mapping quantum circuits to IBM QX architectures using the minimal number of SWAP and H operations[C]//2019 56th ACM/IEEE Design Automation Conference(DAC).Las Vegas,NV:IEEE,2019:1-6.
- [9] ZULEHNER A,PALER A,WILLE R.An efficient methodology for mapping quantum circuits to the IBM QX architectures[J].IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,2019,38(7):1226-1236.
- [10] LI G S,DING Y F,XIE Y.Tackling the qubit mapping problem for NISQ-era quantum devices[C]//Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems.Providence RI:ACM,2019:1001-1014.
- [11] QIAN Y,GUAN Z J,ZHENG S G,et al.A method based on timing weight priority and distance optimization for quantum circuit transformation[J].Entropy,2023,25(3):465.
- [12] PEHAM T,BURGHOLZER L,WILLE R.On optimal subarchitectures for quantum circuit mapping[J].ACM Transactions on Quantum Computing,2023,4(4):1-20.
- [13] CHHANGTE L,CHAKRABARTY A.Mapping quantum circuits in IBM Q devices using progressive qubit assignment for global ordering[J].New Generation Computing,2022,40(1):311-338.
- [14] NIELSEN M A,CHUANG I L.Quantum Computation and Quantum Information[M].New ed.,10th anniversary ed.Cambridge:Cambridge University Press,2010.
- [15] 谢磊,翟季冬.量子计算系统软件研究综述[J].软件学报,2024,35(1):1-18.
XIE L,ZHAI J D.Survey on quantum computing system software[J].Journal of Software,2024,35(1):1-18.
- [16] ALI SHAFIQUE M,MUNIR A,LATIF I.Quantum computing: circuits, algorithms, and applications[J].IEEE Access,2024,12:22296-22314.
- [17] 黄泓凯,张雪松.含噪中型量子计算机的量子比特映射算法[J].计算机工程与应用,2024,60(24):110-118.
HUANG H K,ZHANG X S.Qubit mapping algorithm for noisy intermediate-scale quantum computers[J].Computer Engineering and Applications,2024,60(24):110-118.
- [18] KOLE A,HILLMICH S,DATTA K,et al.Improved mapping of quantum circuits to IBM QX architectures[J].IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,2020,39(10):2375-2383.
- [19] LAO L L,VAN SOMEREN H,ASHRAF I,et al.Timing and resource-aware mapping of quantum circuits to superconducting processors [J].IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems,2022,41(2):359-371.
- [20] ALEKSANDROWICZ G,ALEXANDER T,Bello L,et al.Qiskit: An open-source framework for quantum computing[J].Accessed on: Mar,2019,16:61.

- [37] ROA-LINARES V C, ESCUDERO-FLÓREZ M, VICENTE-MANZANARES M, et al. Host cell targets for unconventional antivirals against RNA viruses[J]. *Viruses*, 2023, 15(3):776.
- [38] AMMAR M, MOAAZ M, YUE C X, et al. Emerging arboviral diseases in Pakistan: epidemiology and public health implications[J]. *Viruses*, 2025, 17(2):232.
- [39] ROLFE R J, ZAVALA S, BLACKWOOD E R, et al. Mosquito-borne infections in international travelers[J]. *Wilderness & Environmental Medicine*, 2025:10806032251356485.
- [40] KHAN A, ZAKIRULLAH, WAHAB S, et al. Advances in antiviral strategies targeting mosquito-borne viruses: cellular, viral, and immune-related approaches[J]. *Virology Journal*, 2025, 22(1):26.
- [41] MAURE C, KHAZHIDINOV K, KANG H, et al. Chikungunya vaccine development, challenges, and pathway toward public health impact[J]. *Vaccine*, 2024, 42(26):126483.

Epidemiology and intervention strategies for chikungunya fever

Wang Jianhua, Zhang Shuang

(State Key Laboratory of Antiviral Drugs, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Chikungunya fever is an acute viral infectious disease caused by the chikungunya virus(CHIKV). This disease is primarily transmitted through the bite of *Aedes* mosquitoes. The disease is currently endemic in over 119 countries across the Americas, Asia, and Africa. As of August 2025, over 270 000 cases have been reported globally, posing a significant threat to public health worldwide. The disease is spreading across southern China, with Guangzhou reporting 4 014 confirmed cases in 2025. This paper briefly reviews the epidemiological characteristics, pathogenesis, diagnostic methods, and treatment strategies for chikungunya virus, aiming to promote effective prevention and control of chikungunya fever.

Keywords: chikungunya fever; chikungunya virus; epidemiology; clinical manifestations; prophylaxis and therapy

[责任编辑 赵晓华 刘洋]

(上接第 149 页)

Research on qubit mapping completion and dynamic optimization methods with nearest-neighbor coupling constraints

Liu Hui¹, Yang Hanxiao¹, Li Wenzhe¹, Zhao Bo², Nie Kai³, Zhang Bingjie¹

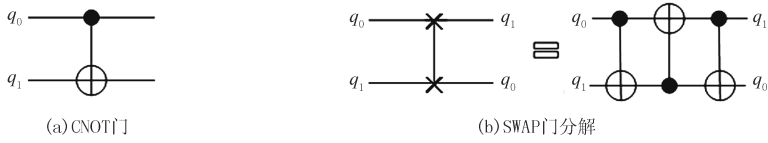
(1. College of Computer and Information Engineering(School of Artificial Intelligence); Key Laboratory of Artificial Intelligence and Personalized Learning in Education of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. School of Cybersecurity, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China; 3. National Supercomputing Center in Zhengzhou, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To address the issue that most quantum algorithms cannot be directly executed on Noisy Intermediate-Scale Quantum(NISQ) devices due to limited qubit nearest-neighbor restriction, and that the introduction of SWAP gates through dynamic remapping reduces algorithm fidelity, an efficient qubit mapping method is proposed. First, the method performs the initial mapping allocation based on the principle of graph isomorphism and a mapping completion strategy. This step aims to satisfy the qubit connectivity requirements while reducing the number of SWAP gate insertions required for subsequent mapping transformations. Second, we enhance the heuristic cost function used during mapping transformation. By harnessing the fast convergence and adaptive nature of the simulated annealing algorithm, our method dynamically determines the optimal look-ahead depth and decay factor for the quantum circuit, enabling the dynamic computation of the optimal cost. Experimental results show the superior performance of the proposed method over existing ones, achieving a substantial reduction in SWAP gate insertions. This reduction directly leads to improved execution efficiency and higher fidelity for quantum algorithms on NISQ devices.

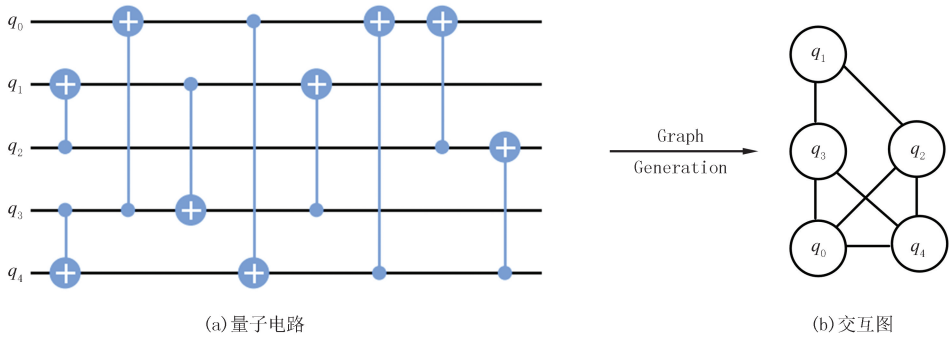
Keywords: nearest-neighbor restriction; qubit mapping; mapping completion; simulated annealing

[责任编辑 赵晓华 刘洋]

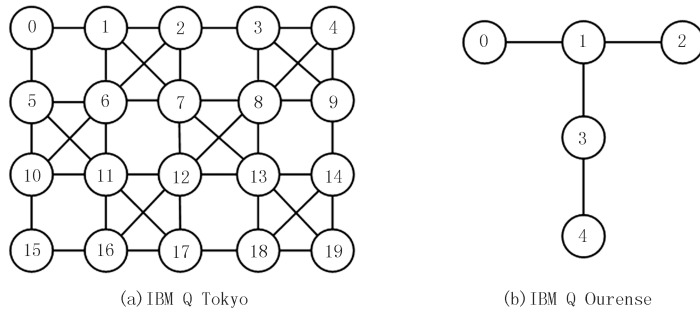
附录



图S1 双量子比特门
Fig.S1 Two-qubit gate



图S2 量子电路交互图生成示例
Fig.S2 Example of quantum circuit interaction graph generation



图S3 IBM量子处理器耦合图
Fig.S3 Coupling diagram of IBM quantum processor

表 S1 初始映射性能对比

Tab. S1 Comparison of initial mapping performance

| Circuit | NUM | GATE | BasicSwap | | | StochasticSwap | | | Time/s | |
|----------------|-----|--------|-----------|-------|---------------|----------------|--------|---------------|--------|------|
| | | | TWP | Ours | Discrepancy/% | TWP | Ours | Discrepancy/% | TWP | Ours |
| 4mod5-v1_22 | 5 | 21 | 5 | 0 | 100.00 | 8 | 0 | 100.00 | 0.06 | 0.06 |
| mod5mils_65 | 5 | 35 | 14 | 0 | 100.00 | 18 | 0 | 100.00 | 0.06 | 0.04 |
| decod24-v2_43 | 4 | 52 | 2 | 0 | 100.00 | 15 | 0 | 100.00 | 0.05 | 0.05 |
| 4gt13_92 | 5 | 66 | 9 | 0 | 100.00 | 14 | 0 | 100.00 | 0.05 | 0.05 |
| ising_model_10 | 10 | 480 | 24 | 0 | 100.00 | 40 | 0 | 100.00 | 0.11 | 0.11 |
| ising_model_13 | 13 | 633 | 35 | 0 | 100.00 | 82 | 0 | 100.00 | 0.12 | 0.12 |
| ising_model_16 | 16 | 786 | 48 | 0 | 100.00 | 73 | 0 | 100.00 | 0.17 | 0.15 |
| rd84_142 | 15 | 343 | 69 | 69 | 0.00 | 137 | 123 | 10.22 | 0.9 | 0.2 |
| adr4_197 | 13 | 3 439 | 697 | 697 | 0.00 | 1 106 | 996 | 9.95 | 0.76 | 0.59 |
| radd_250 | 13 | 3 213 | 669 | 669 | 0.00 | 1 028 | 994 | 3.31 | 0.76 | 0.56 |
| z4_268 | 11 | 3 073 | 550 | 550 | 0.00 | 1 073 | 908 | 15.38 | 0.7 | 0.49 |
| sym6_145 | 14 | 3 888 | 896 | 856 | 4.46 | 1 165 | 1 047 | 10.13 | 0.59 | 0.59 |
| misex1_241 | 15 | 4 813 | 710 | 710 | 0.00 | 1 649 | 1 314 | 20.32 | 1.01 | 0.99 |
| rd73_252 | 10 | 5 321 | 1 296 | 1 076 | 16.98 | 1 728 | 1 692 | 2.08 | 1.01 | 0.94 |
| cycle10_2_110 | 12 | 6 050 | 1 085 | 1 085 | 0.00 | 1 898 | 1 898 | 0.00 | 1.21 | 1.14 |
| square_root_7 | 15 | 7 630 | 2 430 | 2 324 | 4.36 | 2 267 | 2 264 | 0.13 | 1.52 | 1.39 |
| sqn_258 | 10 | 10 223 | 2 021 | 2 021 | 0.00 | 3 446 | 3 334 | 3.25 | 1.63 | 1.58 |
| rd84_253 | 12 | 13 658 | 2 625 | 2 625 | 0.00 | 4 670 | 4 670 | 0.00 | 3.14 | 2.06 |
| co14_215 | 15 | 17 936 | 3 840 | 3 840 | 0.00 | 7 069 | 6 899 | 2.40 | 4.15 | 3.37 |
| sym9_193 | 10 | 34 881 | 6 749 | 6 749 | 0.00 | 11 837 | 11 816 | 0.18 | 6.51 | 6.07 |
| 9symml_195 | 11 | 34 881 | 6 749 | 6 749 | 0.00 | 12 100 | 11 550 | 4.55 | 6.06 | 5.86 |
| average | | | | | 1.65 | | | 3.73 | | |