arXiv:2302.02003v1 [quant-ph] 3 Feb 2023

QContext：量子门的上下文感知分解

JiLiu*[1]、Max Bowman[2], 、Pranav Gokhale[3], 、Siddharth Dangwal[4], 、Jeffrey Larson[1], 、Frederic T. Chong[3,4],和 Paul D. Hovland[1]

[1]数学与计算机科学部，阿贡国家实验室[2]莱斯大学电气与计算机工程系[3]
ColdQuanta 旗下部门 Super.tech[4]芝加哥大学计算机科学系

2023年2月7日

摘要

本文提出 QContext，这是一种新型编译器结构，融合了上下文感知分解和拓扑感知分解。由于电路等价规则和重新合成，同一分解模板可能存在不同的门变体。QContext 利用电路信息和硬件拓扑，选择能够提升电路优化机会的门变体。我们研究了 Toffoli 门的基门级上下文感知分解，以及 CNOT门的原生门级上下文感知分解。实验结果表明，与最先进的方法 Orchestrated Trios 相比，QContext 减少了门的数量。 [13]。

关键词：量子计算，电路综合，编译器优化

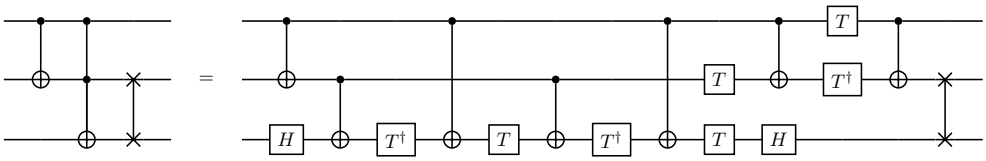
1 引言

量子逻辑门是量子信息处理（QIP）的基石。程序中的量子逻辑门通常需要分解为汇编语言中的基门集（ISA）。由于目标硬件的连通性可能有限，近期有多项研究 [11, 13, 35, 49] 提出了拓扑感知分解方法，以便在映射到目标硬件拓扑结构时最大限度地降低门成本。然而，这些分解方法对同一类型的量子门使用相同的模板。使用固定模板分解量子门，无法充分探索电路优化的机会。

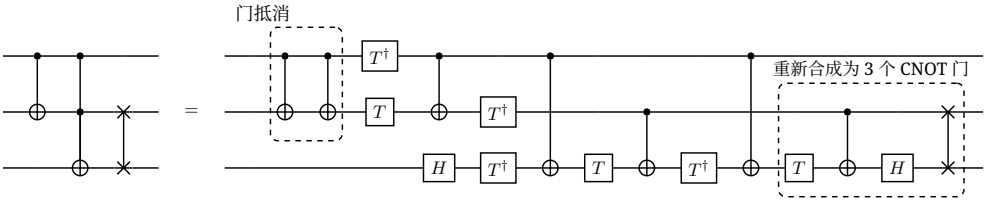
门上下文表示电路有向无环图（DAG）中的前驱和后继。由于不同的门上下文可能带来不同的电路优化机会，量子门分解应当考虑上下文。下面通过一个示例说明上下文感知门分解的有效性。若将图1b 中的 Toffoli 门按包含六个 CNOT门的规范模板进行分解，则不会产生门抵消或电路重新综合的机会。然而，由于 Toffoli 门是自反门，对规范模板中的所有门取逆，将得到另一种分解模板。如图1b所示，使用逆模板分解 Toffoli 门时，可以进行门抵消和双量子比特块再综合优化。基于电路等价规则和重新综合，同一种门分解模板可能存在多个变体。我们开发了上下文感知分解方法 QContext，用于识别门上下文结构并探索电路优化机会。

QContext 同时提供拓扑感知和上下文感知分解。QContext 首先找出与目标硬件拓扑兼容的门分解变体。然后，QContext 根据电路有向无环图表示中后继和前驱的信息，选择最佳门分解变体。在将 CNOT门分解为

*通讯作者： ji.liu@anl.gov



(a) 规范的全连接 Toffoli 分解，产生十个 CNOT门



(b) 上下文感知的 Toffoli 分解，产生七个 CNOT门

图 1：两个 Toffoli 分解的 CNOT 门总数不同

原生交叉共振（CR）门和单量子比特门时，QContext 也会执行上下文感知分解。我们为 CNOT 门到 CR 门的分解提出了新的模板。我们在 Qiskit-Terra 中实现了 QContext，并将其与最先进的方法 Orchestrated Trios 进行了比较。实验结果表明，通过结合基门级和原生级的上下文感知分解，QContext 减少了量子电路中的双量子比特门和单量子比特门数量。

2 背景

基门与原生门： 为了在真实硬件上运行量子程序，需要将复杂的量子门分解为汇编语言（如 OpenQASM）中的基门 [9]。OpenQASM 中的基门包括单量子比特旋转和双量子比特 CNOT门。

然而，量子设备可能并不原生支持 CNOT门。汇编语言中的基门应分解为目标硬件技术所支持的一系列原生门。本文聚焦于 CR 门，因为它是用于操作固定频率超导设备的原生门 [36]，例如 IBM 的超导系统。我们预计，上下文感知分解也适用于其他原生门，例如 Google [2] 和 Rigetti [6] 设备上的 CPHASE 和 iSWAP。

量子门分解： 最优量子门分解对于量子编译至关重要。研究人员已开展大量研究 [11,31,40,46]，以寻找酉矩阵的高效分解方法。除了通用分解外，研究人员还提出了结构化模板 [38,39]，用于分解某些类型的量子门。

随着量子硬件的最新发展，已有多位研究人员提出拓扑感知分解 [7,22]，以便在映射到目标硬件拓扑时最大限度地降低门成本。Toffoli 门是量子信息处理中最常用的三量子比特门之一。Duckering 等人 [13] 提出了一种编译器结构 Orchestrated Trios，可高效地对 Toffoli 门进行路由和分解。他们发现，在路由过程中保留 Toffoli 门，比对 Toffoli 门分解中的每个 CNOT 门分别进行路由更为高效。该方法首先将量子程序分解为单量子比特门、双量子比特门和三量子比特门，并对这些门进行路由。随后执行第二步分解，根据物理量子比特的连通性对 Toffoli 门进行分解。

量子优化： 当前最先进的量子编译器大多在基门级进行电路优化。Qiskit [1]、$t\,|ket\rangle$ [41] 和 Cirq [8] 编译器包含能够识别多量子比特块并使用 KAK 分解 [25] 对这些块重新合成的优化遍次，以降低电路成本。门抵消 [28] 是另一种有用的优化方法。量子门可能彼此对易，编译器可以重新排列量子门，以通过门抵消 [27]优化电路并改进路由。其他优化还包括串扰抑制 [32]、窥孔优化 [33], 和动态解耦 [34]。

3 QContext

QContext 对 Toffoli 门执行基门级上下文感知分解，并对 CNOT 门执行原生门级上下文感知分解。图 2 展示了 QContext 的编译流程。灰色背景的框表示 Trios 和 Qiskit 中原有的编译步骤。橙色背景的框表示 QContext 引入和修改的编译步骤。给定一个输入量子程序，QContext 首先将量子门分解为单量子比特门、双量子比特门和 Toffoli 门。不分解 Toffoli 门可以使路由算法捕获程序结构，并减少路由开销 [13]。编译器会对量子门执行量子比特映射和路由。我们提出了一个门库，其中包含 Toffoli 门和 CNOT 门的门分解变体。该门库包含 32 种 Toffoli 门变体和 14 种 CNOT 门变体。每种门变体都关联有一个变体标签。编译器在门库中指定搜索，并根据硬件拓扑结构和门上下文返回匹配度最高的门变体。随后，编译器执行电路优化。优化完成后，需要将基门分解为原生门。对于电路中的每个 CNOT 门，编译器都会找到一种 CNOT 门变体，使优化后的单量子比特旋转数量最少。

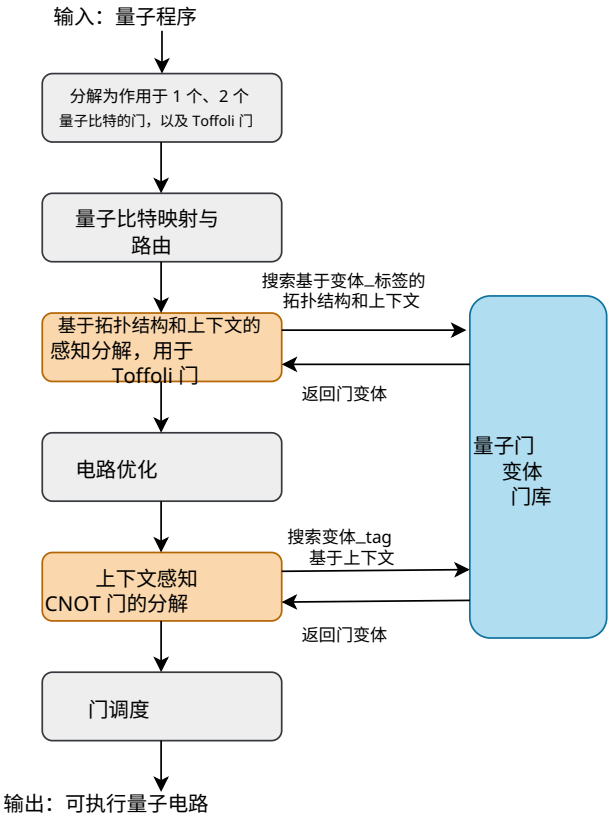


图2：QContext 的编译流程。QContext 引入的步骤以橙色背景标示。

4 基门级分解

我们以 Toffoli 门为例，讨论门变体的格式和生成策略。

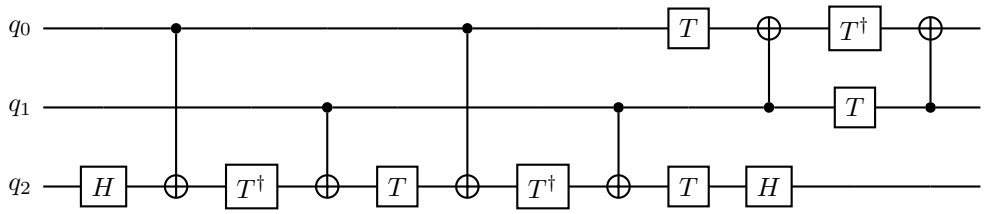
4.1 变体标签

我们用不同的标签标记门变体，以便区分它们。n量子比特门的变体标签是一个包含五个元素的元组：

$$variant_tag = (pre_tag,\ suc_tag,\ design_tag,\ topo_tag,\ opt_tag) \tag{1}$$

第一个元素 前驱标签 表示电路开头处可与前驱抵消或优化的 CNOT门的位置。如图 3所示，第一个 CNOT门位于 q0 和 q2 之间。该门变体的 前驱标签 设为“02”。第二个元素 后继标签 表示电路末尾处可与后继抵消或优化的 CNOT 门的位置。图中的最后两个 CNOT 门位于 q0 和 q1 之间，且后继标签 设为“10”。比特的顺序表示控制量子比特和目标量子比特。

设计标签 是一个整数，用于表示模板的基本设计。通过将等价规则应用于标准Toffoli分解而生成的门变体具有相同的设计标签 $= 0$。但是，基于重新合成的门变体具有不同的设计，因此应具有不同的设计标签。拓扑标签 表示物理量子比特的连通性。拓扑标签 有四个取值：F、L0、L1 和 L2。“F”或“L”表示三个量子比特完全连通或呈线性连通。整数表示与另外两个量子比特相连的量子比特的 ID。最后一个元素优化标签 用于区分结构相似但优化机会不同的门变体。优化标签 可以是“O”或“I”，分别表示原始分解和逆分解。变体标签为定义和搜索门变体提供了一种高效方式。



Figu图 3：通过置换控制量子比特得到的全连接 Toffoli 变体，变体标签 $=$(02，10，0，F，O)

4.2 Toffoli门变体

我们可以根据电路等价规则 [15] 和重新合成生成门变体。我们采用以下三种策略来寻找门变体。

1）自反： 对于自逆门，可以将分解模板中的门按相反顺序排列，并对每个门取逆，从而得到新的门变体。由于电路的前层与末层可以互换，取逆后的变体标签通过将 $pre\ tag$与 $suc\ tag$互换来指定。优化标签从“O”变为“I”。其他自逆门还包括 CNOT门、SWAP 门、Bridge门 [23],和 Fredkin门 [5]。

2）置换控制量子比特和目标量子比特： 对于具有多个控制量子比特的门，我们可以置换分解模板中的控制量子比特，以生成新的门变体。图 3 展示了基于标准分解和控制量子比特置换生成的门变体 $q0$，$q1$。变体$variant\ tag$ 通过在 $pre\ tag$ 和 $suc\ tag$中交换相应的量子比特来指定。 $design\ tag$、$topo\ tag$和 $opt\ tag$ 在置换后保持不变。

当目标门是非门时，我们还可以将多重控制非门转换为多重控制 Z 门 [15]，从而交换控制量子比特和目标量子比特。多重控制 Z 门具有对称性，因此任何量子比特都可以作为目标量子比特。

3) 重新合成： 基于等价规则，我们可以找到许多门变体。然而，某些结构无法通过等价规则生成。一种解决方案是利用先前研究中的门分解模板。另一种解决方案是将 [11,42,49]酉矩阵重新合成为具有预期结构的量子电路。系统将为综合模板分配一个新的 $design\ tag$ 。

我们可以将等价规则应用于规范的 8-CNOT 线性 Toffoli 分解，以生成具有线性连接的门变体。由于 8-CNOT 线性 Toffoli 分解不同于全连接设计，因此为其分配了一个 $design\ tag$等于 1。图 4 展示了其中一种线性 Toffoli 门变体。由于 q2 与 q0 和 q1 相连，因此拓扑标签 被设置为“L2”。

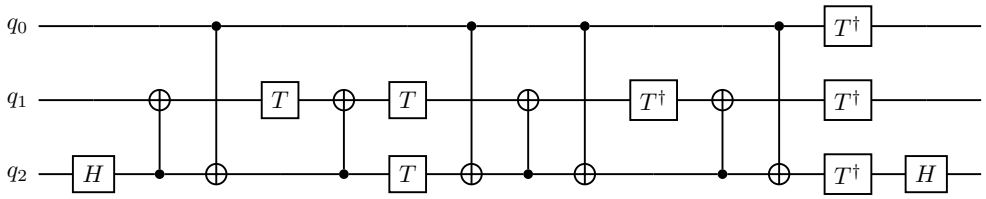


图4：具有线性连接的 Toffoli 门变体，变体标签 =(21、02、1、 $L2$、 O)

4.3 变体标签计算

这里介绍如何根据硬件拓扑结构和门上下文确定变体标签。对于有向无环图中的每个 Toffoli 门节点，编译器首先根据物理量子比特连接关系确定拓扑标签 。然后，对于门库中具有拓扑标签的每个门变体，我们可以估算优化后的 CNOT 门数量减少。由于三量子比特门变体的数量有限，编译器会在门库中执行穷举搜索，并返回 CNOT 门数量减少最多的门变体。

5 原生门级分解

5.1 变体标签

首先，我们介绍 CNOT 门变体标签的格式。CR 门存在两种方向。广义 CNOT 门分解电路如图 5 所示。U3 门是具有三个角度 θ、ϕ和 λ 的通用单量子比特旋转门。由于 CNOT 门的物理量子比特连接关系始终是线性的，因此不需要拓扑标签 和 优化标签。CNOT 门变体标签是一个包含十二个元素的元组，用于指定模板中的四个 U3 门以及用于指定 CR 门方向的 方向标签 。

$$variant_tag = (\theta_1, \phi_1, \lambda_1, ..., \theta_4, \phi_4, \lambda_4, ori_tag)$$

变体标签使我们能够快速找到逆门并计算原生门数量。 $U3(-\theta,\ -\lambda,\ -\phi)$是 $U3(\theta,\ \phi,\ \lambda)$的逆门。广义 U3 门需要两个 $Rx(90)$脉冲和三个 Rz 门。Rz 门 [29] 通过参考系变换在软件中实现，不会引入任何噪声。分解 CNOT 门时，编译器首先根据目标物理量子比特连接的方向指定方向标签。然后，对于每个包含正确方向标签的变体标签，编译器会估算优化后的 $Rx(90)$脉冲总数，并选择 $Rx(90)$门数量最少的变体。

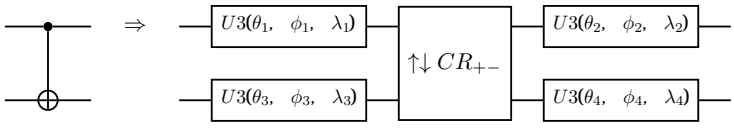


图5：广义 CNOT 门分解模板

5.2 CNOT门变体

我们有三种寻找 CNOT门变体的策略。**1）自反：** CNOT门是一种自逆门。我们可以将原生门按相反顺序排列，并对每个原生门取逆，从而得到一种新的门

分解变体。

2) 极性切换： CR 原生门通过一个正半 CR 门和一个负半 CR 门实现，以减轻噪声 [43]。我们也可以先实现一个负半 CR 门，再接一个正半 CR 门，从而实现 CR 门。这种极性切换 [17, 18] 会产生副作用，在 CR 原生门的左右两侧各附加两个 Rx(180) 门。我们还可以将极性切换与门逆结合起来。

3) 重新合成： 我们采用数值优化方法来寻找新的 CNOT 门分解。我们可以将发现 CNOT 酉矩阵的新分解视为一个非线性最小二乘优化问题。可以将参数生成的酉矩阵与目标酉矩阵之差的弗罗贝尼乌斯范数的平方定义为目标函数，并调整 U3 参数以最小化该目标函数。可以使用多种标准的最小二乘优化算法，例如 Levenberg–Marquardt [30] 和 Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno [21] 。

我们发现了一些门变体，其 Rx旋转次数（90）与标准分解相近，但提供了更多门抵消机会。例如，图 6 所示的梯形电路结构在量子电路中 [23, 24, 26]普遍存在。这里我们采用数值方法，找出左上角为 U_3（90，0，0）的门变体，且右下角为逆门 U_3（−90，0，0）。当一串梯形 CNOT 门依次排列时，中间的单量子比特门会相互抵消。图6中用虚线框标出了会相互抵消的单量子比特门。通过数值方法，我们得到了六种具有自抵消性质的 CNOT 门变体。

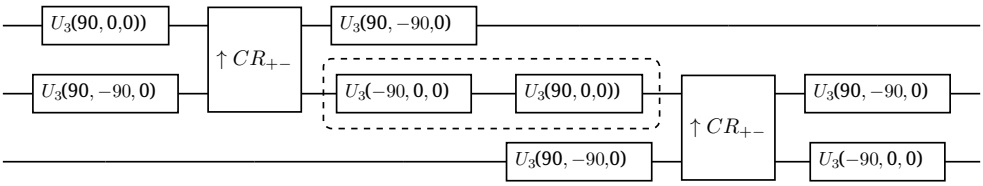


图 6：梯形 CNOT 结构与门分解

6 方法

实现： 我们基于开源量子计算框架 Qiskit 实现了 QContext 框架 [1]。Qiskit-Terra 的版本为 0.18.3，我们的实现已公开发布于https://github.com/revilooliver/context-aware-decomposition。我们将结果与在 Qiskit 中实现的 Orchestrated Trios 编译器进行比较。

基准测试： 我们实验中的基准测试源自 Orchestrated Trios 中的 Toffoli 基准测试 [12] 以及可逆电路 [48]。除包含 Toffoli 门的基准测试外，我们还纳入了用于 LiH 的 VQE UCCSD 拟设 [37] 和用于最大割的 QAOA [14]。我们使用这两个基准测试来研究 CNOT 门分解的性能。

7 评估与讨论

本节展示了在具有重六边形拓扑结构 [45]的 ibmq montreal 上，使用 QContext 与 Trios 相比时的单量子比特门和双量子比特门数量。

CR 门和单量子比特门的精简结果如表 1所示。所有 Toffoli 门均被分解为包含 8 个 CNOT 门的线性连接门变体。由于我们的优化重点是 Toffoli 门和 CNOT门，为了区分量子比特路由与我们的方法所产生的效果，我们将用于量子比特路由的 CR 门与用于基准测试的 CR 门分开统计。 CR_r 表示组成 SWAP 门且未参与优化的 CR 门数量。更好的路由算法或许能减少 CR_r 的数量，但这超出了当前讨论的范围。 CR_b 表示实现基准测试所需的 CR 门数量。 ΔCR_b 表示 CR_b数量的百分比变化： ΔCR_b= 1-$CR_b(QContext)$ $/CR_b(Trios)$。 Δ#sx 表示 sx 旋转总数的百分比变化：$\Delta\#\text{sx} = 1 - \#\text{sx(QContext)}/\#\text{sx(Trios)}$。在原生门中，z 轴旋转 Rz 门通过

软件中的参考系变换实现；只有 90度绕x轴旋转 sx 和 180 度绕x轴旋转 x 门会引入噪声。这里我们计算绕x轴旋转 90 度的总数，记为 #sx。一个 x 门计作两个 sx 门。CNOT 门上下文感知分解也会优化插入的 SWAP门，因此计算 #sx 时，我们不区分路由电路。

表 1：QContext 与 Trios 的 CR 门数量比较 [13] 在`ibmq montreal`

电路			Trios		QContext		比较		
基准测试	$\#Q$	CR_r	CR_b	$\#sx$	CR_b	$\#sx$	ΔCR_b	Δsx	T_c/T_t
cnx_half [16]	5	0	35	112	29	64	17.1%	42.9%	1.14
对称6 [48]	10	99	128	631	100	402	21.9%	21.7%	1.09
cnx_脏污 [3]	11	102	146	666	119	520	18.5%	21.9%	1.02
cnx_half [16]	19	132	289	1204	230	841	20.4%	30.1%	1.26
cnx_对数 [4]	19	195	163	972	129	799	20.9%	17.8%	1.32
C_加法器 [10]	20	507	196	1828	184	1579	6.1%	13.6%	1.19
t_加法器 [44]	20	483	220	1859	191	1532	13.2%	17.6%	1.04
递增器 [16]	5	105	461	1585	421	1114	8.7%	29.7%	1.02
Grover 算法 [19]	9	201	724	2524	609	1848	15.9%	26.8%	1.16
QAOA [14]	10	168	96	672	96	592	—	11.9%	1.04
UCCSD [37]	8	654	274	2348	274	2022	—	13.9%	1.10
几何平均值							14.7%	20.9%	1.12

#Q 表示量子比特的数量。t 加法器是 Takahashi 加法器 [44]。c 加法器是_Cuccaro 加法器 [10]。T_c/T_t 表示 QContext 与 Trios 的总转译时间之比。

如表1所示，QContext 对所有基准测试都减少了单量子比特旋转的数量 #sx ，并且对所有包含 Toffoli 门的基准测试都减少了 CR_b 。对于包含 Toffoli 门的基准测试， ΔCR_b 的几何平均值为 14。7%。 Δsx 的几何平均值为 20。9%。QAOA 基准测试和 UCCSD 基准测试的结果表明，CNOT 门上下文感知分解是有效的。请注意，QAOA 和 UCCSD 基准测试均不包含 Toffoli 门，因此不会减少 CNOT 门。我们还比较了编译时间，编译时间为十次运行的平均值。采用预合成模板门库，使 QContext 在编译时间方面更具可扩展性。在 `ibmqmontreal` 上的平均编译时间比 Trios 增加了 12%。

8 结论

本文提出了 QContext，这是一种融入上下文感知和拓扑结构感知分解的新型编译器结构。我们强调，量子门分解应当感知上下文。QContext 通过感知基门级和原生门级的门上下文，减少了单量子比特门和双量子比特门数量。

9 致谢

本材料基于 Q-NEXT 的支持开展。Q-NEXT 是美国能源部科学办公室（DOE-SC）国家量子信息科学研究中心之一，并得到高级科学计算研究办公室量子计算加速研究计划的支持。本研究部分由 NSF 计算领域远征项目 EPiQC 资助（奖项编号 CCF-1730449）；部分由 STAQ 资助（奖项编号 NSF Phy-1818914）；部分由美国能源部高级科学计算研究办公室量子计算加速研究计划资助；部分由 NSF 混合量子架构与网络量子飞跃挑战研究所（NSF 奖项 2016136）资助；此外，研究还基于美国能源部科学办公室国家量子信息科学研究中心的支持。本研究使用了橡树岭领导力计算设施的资源,

该设施是 DOE-SC 用户设施，依据合同 DE-AC05-00OR22725 获得支持。FTC 是 Infleqtion 的量子软件首席科学家，同时也是 Quantum Circuits, Inc. 的顾问。

参考文献

[1] ANIS, M. 等，《Qiskit：一个用于量子计算的开源框架》（2021）[2] F. Arute 等，“使用可编程超导处理器实现量子霸权”，《自然》，第574卷，第7779期，第505–510页，2019年。[3] J. M. Baker、C. Duckering、A. Hoover 和 F. T. Chong，“利用任意数量的辅助量子比特分解量子广义托福利门”，arXiv:1904.01671，2019年。[4] A. Barenco、C. H. Bennett、R. Cleve、D. P. DiVincenzo、N. Margolus、P. Shor、T. Sleator、J. A. Smolin 和 H. Weinfurter，“量子计算的基本门”，《物理评论A》，第52卷，第5期，第3457页，1995年。[5] J. Brown，《量子计算机探索记》。西蒙与舒斯特出版社，2001年。[6] S. A. Caldwell 等，“使用跨单量子比特的参数激活纠缠门”，《物理评论应用》，第10卷，第3期，第034050页，2018年。[7] X. Cheng、Z. Guan 和 W. Ding，“将多重控制托福利电路映射到线性最近邻量子电路”，《量子信息处理》，第17卷，第7期，第1–26页，2018年。[8] Cirq 开发者，“Cirq”，2021年。 [在线]。可访问：https://zenodo.org/record/5182845[9] A. W. Cross、A. Javadi-Abhari、T. Alexander、N. de Beaudrap、L. S. Bishop、S. Heidel、C. A. Ryan、J. Smolin、J. M. Gambetta 和 B. R. Johnson，“OpenQASM 3：更广泛、更深入的量子汇编语言”，arXiv:2104.14722，2021年。[10] S. A. Cuccaro、T. G. Draper、S. A. Kutin 和 D. P. Moulton，“一种新型量子行波进位加法电路”，arXiv quant-ph/0410184，2004年。[11] M. G. Davis、E. Smith、A. Tudor、K. Sen、I. Siddiqi 和 C. Iancu，“迈向拓扑感知的最优量子电路综合”，载于《国际量子计算与工程会议》。IEEE，2020年，第223–234页。[12]C. Duckering、J. M. Baker、P. Gokhale 和 A. Litteken，“量子电路基准测试”，2020年。[在线]。可访问：https://github.com/jmbaker94/quantumcircuitbenchmarks[13] C. Duckering、J. M. Baker、A. Litteken 和 F. T. Chong，“Orchestrated Trios：为使用三量子比特门的量子程序高效通信进行编译”，载于《第26届ACM编程语言与操作系统体系结构支持国际会议论文集》，2021年，第375–385页。[14]E. Farhi、J. Goldstone 和 S. Gutmann，“量子近似优化算法”，arXiv:1411.4028，2014年。[15] J. C. Garcia-Escartin 和 P. Chamorro-Posada，“等价量子电路”，arXiv:1110.2998，2011年。[16] C. Gidney，“构造大型受控非门”，2015年。 [在线]。可访问：https://algassert.com/circuits/2015/06/05/Constructing-Large-Controlled-Nots.html[17] P. Gokhale、T. Tomesh、M. Suchara 和 F. T. Chong，“通过原生门实现更快、更可靠的量子交换门”，arXiv:2109.13199，2021年。[18] M. A. Bowman、P. Gokhale、J. Larson、J. Liu 和 M. Suchara，“量子托福利门的硬件感知优化”，arXiv:2209.02669，2022年。

[19] L. K. Grover，“用于数据库搜索的快速量子力学算法”，载于第二十八届*ACM*计算理论年度研讨会论文集，1996年，第212–219页。[20] K. Gui、T. Tomesh、P. Gokhale、Y. Shi、F. T. Chong、M. Martonosi 和 M. Suchara，“数字量子模拟的项分组与旅行商问题”，*arXiv:2001.05983*，2020年。[21] J. D. Head 和 M. C. Zerner，“一种用于分子几何结构的 Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno 优化过程”，《化学物理快报》，第122卷，第3期，第264–270页，1985年。[22] S. Hu、D. Maslov、M. Pistoia 和 J. Gambetta，“二维方格架构上的量子搜索高效电路”，载于第*56*届设计自动化年度会议论文集，2019年，第1–2页。[23] T. Itoko、R. Raymond、T. Imamichi 和 A. Matsuo，“使用门变换与对易优化量子电路映射”，《*Integration*》，第70卷，第43–50页，2020年。[24] A. Kandala、A. Mezzacapo、K. Temme、M. Takita、M. Brink、J. M. Chow 和 J. M. Gambetta，“适用于小分子和量子磁体的硬件高效变分量子本征求解器”，《自然》，第549卷，第7671期，第242–246页，2017年。[25] B. Kraus 和 J. Cirac，“利用双量子比特门实现纠缠的最优生成”，《物理评论*A*》，第63卷，第6期，第062309页，2001年。[26] G. Li、A. Wu、Y. Shi、A. Javadi-Abhari、Y. Ding 和 Y. Xie，“Paulihedral：用于量子模拟内核的通用分块编译器优化框架”，载于第*27*届*ACM*编程语言与操作系统体系结构支持国际会议论文集，2022年，第554–569页。[27] J. Liu、P. Li 和 H. Zhou，“并非所有交换操作的成本都相同：一种面向优化的量子比特路由方法”，载于*2022*年*IEEE*高性能计算机体系结构国际研讨会（*HPCA*）。IEEE，2022年，第709–725页。[28] D. Maslov、G. W. Dueck、D. M. Miller 和 C. Negrevergne，“量子电路简化与层压缩”，*IEEE*集成电路与系统计算机辅助设计汇刊，第27卷，第3期，第436–444页，2008年。[29] D. C. McKay、C. J. Wood、S. Sheldon、J. M. Chow 和 J. M. Gambetta，“用于量子计算的高效 Z 门”，《物理评论*A*》，第96卷，第2期，第022330页，2017年。[30] J. J. Mor´e，“Levenberg–Marquardt 算法：实现与理论”，载于《数值分析》。Springer，1978年，第105–116页。[31] M. M¨ott¨onen、J. J. Vartiainen、V. Bergholm 和 M. M. Salomaa，“通用多量子比特门的量子电路”，*Physical Review Letters*，第93卷，第13期，第130502页，2004年。[32] P. Murali、D. C. McKay、M. Martonosi 和 A. Javadi-Abhari，“在含噪声中等规模量子计算机上通过软件缓解串扰”，载于第二十五届编程语言与操作系统体系结构支持国际会议论文集，2020年，第1001–1016页。[33] J. Liu、L. Bello 和 H. Zhou，“宽松窥孔优化：一种面向量子电路的新型编译器优化”，载于*2021*年*IEEE/ACM*代码生成与优化国际研讨会（*CGO*）。IEEE，2021年，第301–314页。[34] K. N. Smith、G. S. Ravi、P. Murali、J. M. Baker、N. Earnest、A. Javadi-Cabhari 和 F. T. Chong，“Timestitch：利用松弛时间缓解量子电路中的退相干”，*ACM*量子计算汇刊，第4卷，第1期，第1–27页，2022年。[35] P. Niemann、A. A. de Almeida、G. Dueck 和 R. Drechsler，“将可逆电路基于模板映射到IBM量子计算机”，《微处理器与微系统》，第90卷，第104487页，2022年。

[36] G. Paraoanu，《超导量子比特的微波诱导耦合》，*Physical Review B*，第74卷，第14期，第140504页，2006年。[37] A. Peruzzo、J. McClean、P. Shadbolt、M.-H. Yung、X.-Q. Zhou、P. J. Love、A. Aspuru-Guzik和J. L. O'Brien，《光子量子处理器上的变分本征值求解器》，*Nature Communications*，第5卷，第1期，第1–7页，2014年。[38] C. Jones，《容错托福利门的低开销构造》，*Physical Review A*，第87卷，第2期，第022328页，2013年。[39] R. Cleve和J. Watrous，《量子傅里叶变换的快速并行电路》，载于第*41*届计算机科学基础年会论文集。IEEE，2000年，第526–536页。[40] V. V. Shende、S. S. Bullock和I. L. Markov，《量子逻辑电路综合》，*IEEE*集成电路与系统计算机辅助设计汇刊，第25卷，第6期，第1000–1010页，2006年。[41] S. Sivarajah、S. Dilkes、A. Cowtan、W. Simmons、A. Edgington和R. Duncan，《t|ket⟩：面向NISQ设备的可重定向编译器》，*Quantum Science and Technology*，第6卷，第1期，第014003页，2020年。[42] E. Smith、M. G. Davis、J. M. Larson、E. Younis、C. Iancu和W. Lavrijsen，《LEAP：利用增量方法扩展基于数值优化的综合》，*ACM*量子计算汇刊，doi:10.1145/3548693。[43] N. Sundaresan、I. Lauer、E. Pritchett、E. Magesan、P. Jurcevic和J. M. Gambetta，《通过优化的旋转回波降低交叉共振中的幺正误差和旁观者误差》，*PRX Quantum*，第1卷，第2期，第020318页，2020年。[44]Y. Takahashi、S. Tani和N. Kunihiro，《量子加法电路与无界扇出》，*arXiv:0910.2530*，2009年。[45] M. Takita和T. J. Yoder，《IBM量子计算如何通过硬件实验推进量子纠错》，2022年。[46] J. J. Vartiainen、M. M¨ott¨onen和M. M. Salomaa，《量子门的高效分解》，*PhysicalReview Letters*，第92卷，第17期，第177902页，2004年。[47] R. Wille和D. Große，《可逆逻辑的快速精确托福利网络综合》，载于*IEEE/ACM*计算机辅助设计国际会议。IEEE，2007年，第60–64页。[48] R. Wille、D. Große、L. Teuber、G. W. Dueck和R. Drechsler，《RevLib：可逆函数与可逆电路的在线资源》，载于第*38*届多值逻辑国际研讨会，2008年，第220–225页。[49] E. Younis、K. Sen、K. Yelick和C. Iancu，《QFAST：融合搜索与数值优化，实现可扩展量子电路综合》，载于量子计算与工程国际会议)。IEEE，2021年，第232–243页。

所提交的稿件由 UChicago Argonne, LLC（阿贡国家实验室（"阿贡"）的运营方）编制。作为美国能源部科学办公室下属实验室，阿贡依据合同编号 DE- AC02-06AN11357 运营。美国政府为自身及代表其行事的其他方保留一项已付清、非独占、不可撤销的全球许可，可复制本文、编制衍生作品、向公众发行副本，并由政府或代表政府公开表演和展示本文。能源部将根据能源部公共访问计划，向公众开放这些由联邦资助的研究成果 http://energy.gov/downloads/doe-public-access-plan。