Schism：面向分布式量子计算的可重构扩展域

Daniel Alexander 普渡大学
Deeksha P Rao 普渡大学
Nilesh Vyas Vamsi Addanki Airbus Central R&T 普渡大学

arXiv:2611.31193v1 [cs.NI] 23 Nov 2026

摘要

基于交换机的量子数据中心通过光子交换机和共享的贝尔态测量（BSM）设备连接量子处理单元（QPU）。共享贝尔态测量装置可以节省硬件，但固定连接限制了对这些资源的访问。局部通信可能使一个机架的贝尔态测量装置过载，而其他装置仍处于空闲；访问这些空闲资源会因经过交换机和量子频率转换器（QFC）而产生额外的光损耗和重试。随着通信模式的变化，程序仍被锁定在这种局部性与争用权衡之中。

我们提出 Schism，这是一种架构，可让程序动态改变哪些量子处理单元共享每个贝尔态测量池。Schism 将贝尔态测量池部署在汇聚交换机上，并将 QFC 部署在其核心侧上行链路上。架顶交换机在量子处理单元与这些池之间建立可重新配置的原生波长电路，形成受光损耗预算限制的纵向扩展域。重新配置可在不移动量子处理单元或迁移量子态的情况下，调整不同机架间的资源共享。我们的关键洞见是，量子处理单元的分组会同时决定光子路径损耗以及对贝尔态测量资源的争用：仅凭局部性无法确定最佳分组，而且只有当分组带来的节省超过重新配置所需的延迟时，分组才有收益。我们构建了一个优化框架，将图划分、资源约束完成时间估算和动态规划相结合，以选择量子处理单元如何共享贝尔态测量池，以及这些分组何时重新配置——在电路阶段之间或阶段内部。我们使用 SeQUeNCe 和离子阱参数进行的评估表明，与固定 Clos 连接相比，在 32 个量子处理单元上运行的 11 种工作负载中，Schism 的通信加速比达到 4.9–7.3×。对于 192 量子比特的量子傅里叶变换、量子近似优化算法和 Grover，Schism 的加速比分别为 4.87×、6.66× 和 6.61×；与 SwitchQNet 相比，则分别为 6.73×、8.26× 和 6.22×。对于阶段可容纳于一个池中的八种工作负载，Schism 的表现也优于假设的全网交换机 1.35–1.38×；对于其余三种工作负载，则落后 1.1–1.75×。转换损耗越大，收益越显著：将每个 QFC 的损耗从 0.5 分贝提高到 5 分贝后，相较于固定 Clos 的平均加速比从 2.8× 提高到 20×。

1 引言

量子计算为大整数分解提供了新方法 [35, 68, 69]，模拟量子系统 [24, 33, 51, 79]，以及组合优化 [1, 30]。将这些能力扩展到单个量子处理单元（QPU）之外，推动了量子数据中心的发展，其中互连的处理器共同执行量子程序 [10, 21, 23, 45, 46]。跨量子处理单元的操作会消耗共享的贝尔对，使纠缠生成成为分布式执行的关键。然而，建立这些对代价高昂：光损耗和概率生成需要反复尝试，而对共享资源的争用则会延迟通信。增加处理器可以扩展计算能力，但要实现这一能力，需要一种能够在它们之间高效进行纠缠生成的架构 [13, 19, 20, 50]。

量子数据中心架构涵盖从直接的QPU间互连到基于交换机的系统，例如受经典叶脊拓扑和 Clos 拓扑启发的 SwitchQNet [80]，[5, 66]。在基于交换机的系统中，光子交换机将光子从QPU接口路由至共享的贝尔态测量（BSM）设备 [40, 48, 66, 72, 84]。成功的测量可以在源量子处理单元上的量子比特之间建立一个贝尔对。

基于交换机的架构 [17, 28]有两大优势。首先，不同的QPU对可以共享贝尔态测量池，从而减少硬件重复配置，并使资源配置能够反映并发需求。其次，量子频率转换器（QFC）通过将光子转换到电信波长，实现超越原生波长链路实际传输范围的通信，并降低光纤传输损耗。将QFC部署在交换机上行链路上，无需在每个QPU上配备专用转换器，即可实现这一传输范围 [80]。

这些优势带来了两个架构问题：哪些量子处理单元应共享每个贝尔态测量池，以及应在哪里进行波长转换？在机架顶部（ToR）交换机上部署贝尔态测量装置和量子频率转换器的设计中，物理连接决定了哪些量子处理单元能够直接以原生波长访问每个池。要访问另一台 ToR 的池，则需要经过额外的交换机并进行转换。在图1a中，来自 Q_3 的光子需要经过两个量子频率转换器和一台汇聚交换机，才能到达 ToR 1 的贝尔态测量装置，并与 Q_1 生成一个贝尔对。

将频繁通信的量子处理单元集中到同一个贝尔态测量池周围，似乎是避开这些高损耗路径的一种直接方法 [32, 47]。然而，这些量子处理单元也要争用同一组有限资源。当多对设备请求纠缠时

若同时发出请求，则只有一部分请求能够继续进行；其他请求必须等待贝尔态测量装置空闲。生成重试会延长资源占用时间，从而增加等待时间。等待 BSM 资源所耗费的时间可能抵消光子路径较短带来的优势。

将请求分散到多个 BSM 池，可以缓解争用，让更多纠缠生成尝试能够并发进行 [59]。然而，要连接到这些池，需要通过交换机（以及可能的波长转换器）增加光路。额外的损耗会增加生成重试，而对共享上行链路的争用则可能进一步延迟通信。接入更多贝尔态测量装置可以提高并行度，但也会带来额外的光损耗，并占用共享网络资源。

最佳分组方式取决于程序，并且可能随着其量子线路的推进而变化。一个阶段可能会使请求集中在少数几个量子处理单元之间，而另一个阶段则会让通信分散到许多对之间。量子比特放置可以减少通信，调度可以协调资源使用，但两者都无法改变网络的物理 QPU 至 BSM 连接。固定架构会让程序受制于僵化的权衡：贝尔态测量容量可能有余，但需要它来实现连接的量子处理单元却可能承担高昂代价。

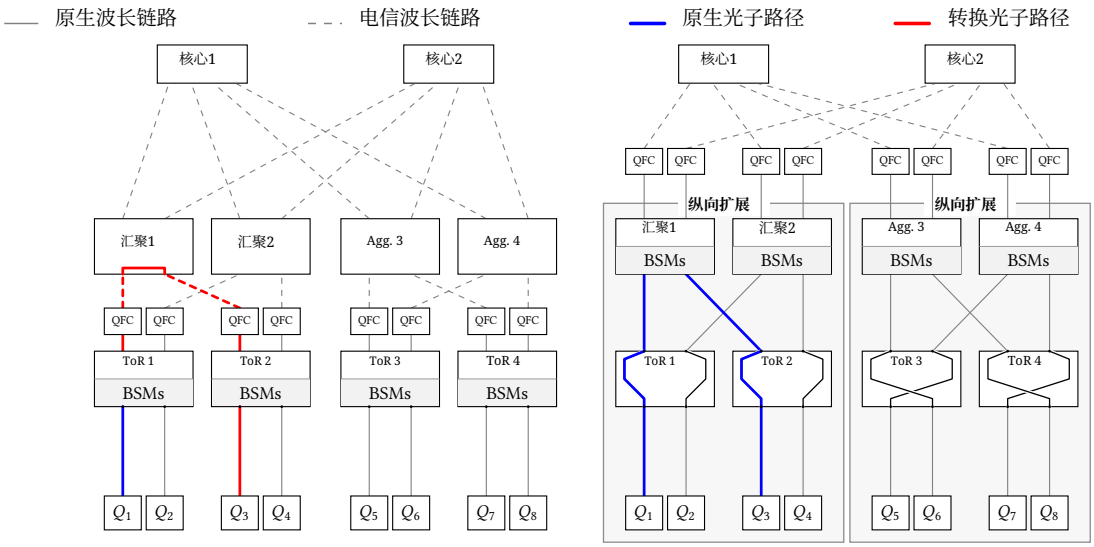


图 1：Schism 通过机架顶端交换机处的光路实现可编程的 QPU-BSM 共享。（*a*）以往的设计（例如 SwitchQNet）将贝尔态测量装置和量子频率转换器放置在机架顶端交换机处。要在 Q_1 和 Q_3 之间生成一个贝尔对，来自 Q_3 的光子需要经过两个量子频率转换器和一个汇聚交换机，才能到达 ToR 1 的贝尔态测量装置。（*b*）Schism 将贝尔态测量池放置在汇聚交换机处，并将量子频率转换器放置在其核心侧上行链路上。机架顶端交换机通过原生波长光路，将两个量子处理单元连接到同一个贝尔态测量池，从而避免转换。重新配置光路会改变纵向扩展域内哪些量子处理单元共享各个池，使贝尔态测量共享能够在不移动量子处理单元或存储的量子态的情况下实现重构。光损耗预算决定纵向扩展的范围：低损耗的机架顶端交换机可实现跨多个机架的贝尔态测量共享，但可能需要付出更高重配置延迟的代价；而较高的损耗则可能将共享限制在单个机架内。要充分利用这一覆盖范围，需要选择何时以及如何重新配置光路，在贝尔态测量争用和上行链路争用与光损耗及重配置延迟之间取得平衡。

我们提出 Schism：可重构扩展域，这是一种能够实现 BSM 资源可编程共享的架构。我们的设计基于两个观察。首先，机架边界并非波长转换边界。在可用光损耗预算内，原生波长路径可以跨越多个机架，但每个机架顶端交换机上行链路上的量子频率转换器（例如 SwitchQNet）都会迫使机架顶端交换机之间的通信经过转换。其次，量子处理单元无需按照其物理机架布局共享 BSM 资源。光电路交换可以决定哪些量子处理单元能够访问各个资源池，而无需移动量子处理单元或迁移量子态。

如图1b 所示，Schism 将机架顶端交换机用作本征波长光量子线路交换机，并在汇聚交换机处部署贝尔态测量池。每个机架顶端交换机都会建立量子线路，将量子处理单元分配至选定的贝尔态测量池。分配到同一池的量子处理单元共享本地纠缠生成资源，无需频率转换即可建立贝尔对。纵向扩展域由连接到同一组汇聚交换机的机架组成，这些汇聚交换机承载贝尔态测量资源；其中的机架顶端交换机可以改变哪些量子处理单元共享各个贝尔态测量池。纵向扩展范围受本征波长光损耗预算限制，因此机架顶端交换机需要具有较低的插入损耗。即使处于同一纵向扩展域，分配到不同池的量子处理单元仍可通过配备量子频率转换的上行链路和核心网络进行通信。

核心决策变成了如何让量子处理单元共享贝尔态测量池，以及何时改变这种共享方式。我们的关键洞见是，分组共同决定了光子路径和资源争用而其收益则取决于程序能够利用这种分组配置多久。独立优化每个阶段可能会因频繁重新配置而牺牲这些收益。我们转而针对各个电路阶段优化配置序列；对于毫秒级交换机，编译器还可以在一个阶段内重新分组，使跨池量子对保留在同一个池中。我们基于按贝尔对请求加权的量子处理单元交互图进行图划分，以识别通信群组，然后估算它们在光损耗、贝尔态测量争用和链路争用下的完成时间。动态规划选择一系列配置，使估算的总通信时间（包括重配置延迟）最短。该框架会在切换带来的收益不足时保留当前配置，并在程序的通信节省足以证明转换合理时进行切换。

我们使用 SeQUeNCe，结合囚禁离子参数 [70]、MQT Bench 工作负载 [62] 以及包含 16 至 64 个量子处理单元的网络，对 Schism 进行评估。在 32 个量子处理单元上运行全部 11 种工作负载时，与固定 Clos 连接相比，Schism 的通信加速比为 4.9–7.3×（平均值为 6.4×）；与 SwitchQNet [80]相比，加速比为 3.6–8.3×。对于 192 量子比特的量子傅里叶变换和 Grover，Schism 分别消除了固定 Clos 下全部 27,705 次和 28,916 次经由量子频率转换器及核心网络的贝尔对生成。重新分组最多约占总通信时间的 2.5%。这些优势也适用于更大型的系统：对于运行在 64 个量子处理单元上的 384 量子比特量子近似优化算法，与固定 Clos 连接相比，Schism 的加速比为 7.78×；与 SwitchQNet 相比，加速比为 10.63×。

总而言之，我们的主要贡献如下：

■ 我们确定了固定量子数据中心架构中通信局部性与贝尔态测量争用之间的权衡，说明为何仅最小化光子路径损耗不足以最小化通信时间。

■ 我们提出 Schism，这是一种架构，将聚合层贝尔态测量池与机架顶端交换机上的原生波长电路交换相结合，使量子处理器与贝尔态测量设备共享能够跨机架编程，而无需迁移量子态。

■ 我们开发了一个程序感知优化框架，结合图划分、资源约束完成时间估算和动态规划，以联合选择量子处理单元分组及其跨电路阶段的配置序列。

■ 我们使用 SeQUeNCe 对 Schism 进行评估，并与固定 Clos 连接和 SwitchQNet 进行比较，量化其优势，以及路径损耗、资源争用和重配置延迟之间的权衡。

2 动机

我们首先介绍架构和假设（§2.1），然后展示固定连接下调度的优势与局限（§2.2）。接着，我们讨论可重构贝尔态测量共享如何减少争用和光子路径损耗，以及何时值得进行重新配置（§2.3）。最后，我们讨论设计目标和未来挑战（§2.4）。

2.1 架构与假设

我们考虑一个数据中心，其中 n 量子处理单元通过基于交换机的光子互连连接，并采用 Clos 拓扑。这种拓扑广泛用于经典数据中心，近来也被用于量子数据中心设计 [5, 66]。如图1a 所示，每个机架包含 n_u 个量子处理单元，它们连接至机架顶端交换机（ToR），其上行链路连接到汇聚交换机。核心交换机将各汇聚交换机互连，以提供遍布整个数据中心的路径。

光子互连：光子电路交换机通过将光子从输入端口导向配置好的输出端口来建立光路。交换机还可以集成贝尔态测量（BSM）设备和量子频率转换器（QFC） [61, 73]。贝尔态测量装置为纠缠生成提供共享的测量资源：每个装置一次处理一对光子，而贝尔态测量池则可并行处理多对光子。量子频率转换器通过在量子处理单元的本征波长（例如近红外）与电信波长（例如 O 波段或 C 波段）之间转换光子，扩大通信范围，从而实现更长距离的低损耗传输 [65]。这些设备的部署位置决定了哪些量子处理单元共享各贝尔态测量池，以及哪些路径需要进行转换。

纠缠生成：我们考虑双光子预告生成，其中每个参与的量子处理单元在一个静止的通信量子比特与一个发射光子之间制备纠缠。网络将两个光子路由到同一个贝尔态测量处，被接受的测量结果预示源量子处理单元处通信量子比特之间的纠缠。光子被测量，而由此产生的贝尔对仍留在量子处理单元中，供远程操作使用。失败的尝试要求在重新尝试生成之前重置通信量子比特。成功的对保留在存储器中直至需要使用，但存储容量和退相干限制了可预先制备的数量以及它们保持可用的时间 [29, 55]。

光损耗与生成时间：每个光子在通往贝尔态测量的路径上会累积来自光纤、交换机以及任何波长转换器的损耗，从而降低其到达并被测量的概率。对于光子 i，以分贝计的总路径损耗为

$$L_i = \sum_{e\in\mathcal{F}_i} \alpha_e d_e + \sum_{s\in\mathcal{S}_i} \ell_s + \sum_{c\in C_i} \ell_c, \tag{1}$$

其中，F_i、S_i和C_i分别表示其路径上的光纤、交换机和转换器。这里，α_e 表示传输波长处的光纤衰减，d_e表示光纤长度，ℓ_s和ℓ_c分别表示交换机插入损耗和转换损耗，因此路径传输概率为 $10^{-L_i/10}$。

只有两个光子均到达并被探测到，生成才会成功。假设发射、传输和探测相互独立，则每次尝试的成功概率为

$$p_{\text{gen}} = p_{\text{BSM}} \prod_{i=1}^{2} \left(\eta_{\text{emit},i}\eta_{\text{det},i} 10^{-L_i/10} \right), \tag{2}$$

其中，$\eta_{\text{emit}、i}$ 包括发射和收集效率，$\eta_{\text{det}、i}$ 表示探测效率，而 p_{BSM} 表示在两个光子均被探测到的条件下，贝尔态测量的接受概率。我们采用囚禁离子节点的实测值（§4.1）；对于特定实现，任一光子路径上的额外损耗都会降低建立贝尔对的概率。

对于成功概率恒定且彼此独立的尝试，预期尝试次数为$1/p_{\text{gen}}$。如果每次尝试耗时τ_{attempt}，并视情况包括制备、传输、预示和重置，则预期生成时间为 $E[T_{\text{gen}}] = \tau_{\text{attempt}}/p_{\text{gen}}$。由于路径设置时间 t_{setup} 只在每次路由分配时产生一次，且光路会在之后的所有重试中重复使用，因此预期总服务时间为：

$$E[T_{\text{service}}] = E[T_{\text{gen}}] + t_{setup} = \frac{\tau_{\text{attempt}}}{p_{\text{gen}}} + t_{setup}. \tag{3}$$

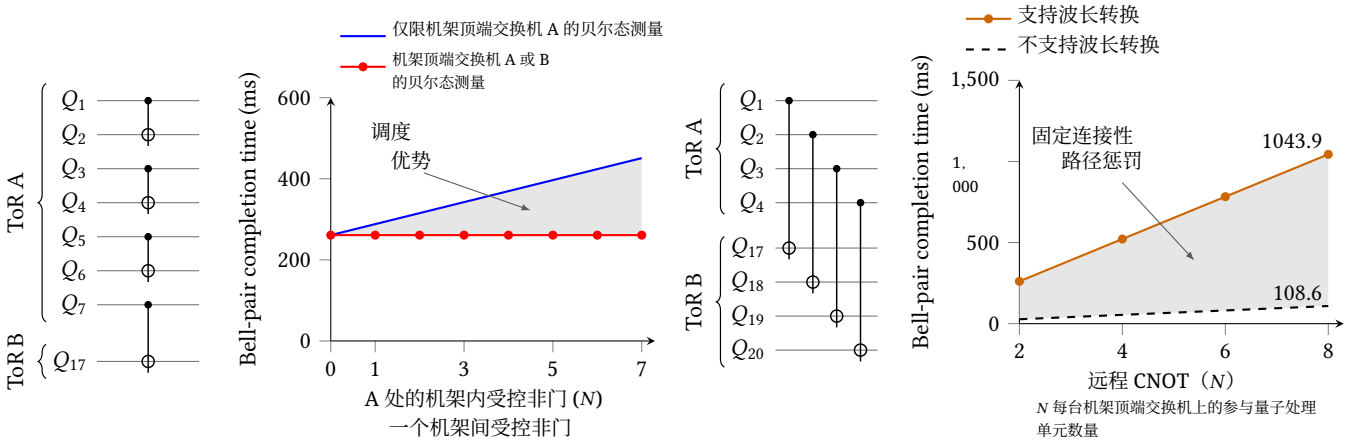
这些路径一旦建立，就会一直占用贝尔态测量装置和光链路，直到生成成功；这样无需反复承担建立路径的开销，但可能会延迟其他请求。较早生成的贝尔对可能需要在存储器中等待其他贝尔对生成或操作完成，在此期间因退相干而损失保真度。生成延迟会影响程序进度，也会影响贝尔对使用时的保真度。

■ 要点： 远程纠缠的完成时间取决于光子路径损耗（它会增加生成重试次数），也取决于建立每个贝尔对所需的贝尔态测量装置的争用情况。

2.2 调度的局限性

在基于交换机的 Clos 架构中，贝尔态测量装置和 QFC 部署在机架顶端交换机处 [66, 80],，固定连接决定了每个量子处理单元无需进行波长转换即可访问哪个贝尔态测量池。调度可以通过将贝尔对生成分散到不同的池中来缓解争用，但无法改变访问这些池所使用的光子路径。

为说明这种权衡，我们考虑一个示例：两个机架各有 16 个量子处理单元和一个贝尔态测量装置，并运行两个量子线路（图2），以展示贝尔态测量争用和光子路径损耗如何影响通信完成时间。量子处理单元 Q_1 至 Q_{16} 连接到机架顶端交换机 A，量子处理单元 Q_{17} 至 Q_{32} 连接到机架顶端交换机 B。两个汇聚交换机通过配备量子频率转换的上行链路连接这两台机架顶端交换机，每条链路使用一个光信道，使两个贝尔态测量装置都能服务机架间贝尔对



(a) 混合受控非门。 **（b）调度收益。** **（c）跨机架 CNOT 门。** **（d）固定连接路径惩罚。**

图 2：调度可减少贝尔态测量争用，但机架间贝尔对仍会产生转换损耗。*(a, b)* 我们改变 A 处机架内受控非门的数量，N，同时保留一个 A-B 受控非门。在 B 处生成 A-B 对后，A 可同时处理本地贝尔对，且无需额外转换。对于 (a) 中所示的 $N=3$ 量子线路，与在 A 处处理全部四对相比，完成时间从 342.4 毫秒降至 261.0 毫秒，减少了 23.8%。*(c, d)* 当每一对都跨越两个机架时，即使均衡贝尔态测量的使用，每对仍有一个光子需要经过转换路径。与均衡的本地原生生成相比，阴影区域表示调度无法消除的路径惩罚。每个机架顶端交换机连接 16 个量子处理单元，并配有一个贝尔态测量装置（图中仅显示参与的量子处理单元）。

并发执行。本地生成无需转换，而要到达另一台机架顶端交换机的贝尔态测量装置，则需要经过两个量子频率转换器和一台汇聚交换机。受控非门同时就绪，连接互不重叠的量子处理单元对，且每个都需要一个贝尔对。我们根据预期生成时间以及每对的路径建立时间，估算建立所有贝尔对所需的时间，并在路径建立和重试期间预留贝尔态测量装置和链路。我们的评估（§4）对随机尝试和重试进行了建模。

对于图 2 和 3，我们采用每个 QFC 2.4 分贝的损耗 [42, 73] 以及每个 2×2 交换元件 0.3 分贝的损耗。贝内什路径经过每个 32 端口机架顶端交换机中的九个元件，以及每个双端口汇聚交换机中的一个元件，分别产生 2.7 和 0.3 分贝的损耗。每条光纤链路长 50 米，衰减为 0.2 分贝/千米。我们根据 $^{88}Sr^{+}$ 囚禁离子硬件 [70]设定有效光子效率。贝尔态测量接受概率为 0.5，我们采用有效尝试周期 1。198 μs 再加上往返传播时间。计入路径建立时间后，本地生成一对需要 27.1 毫秒，而当一个光子跨越机架顶端交换机时则需要 261.0 毫秒。

调度缓解贝尔态测量争用：我们将 N 个 A 处的机架内受控非门与一个 A-B CNOT 结合，将 N 从零变为七，并选择完成时间最短的贝尔态测量分配方案（图2b）。对于图 $N=3$ 中的量子线路2a，在 A 处服务全部四对需要 342.4 毫秒。将机架间的那一对分配给 B 后，A 就能同时服务本地各对，将完成时间缩短至 261.0 毫秒，同时保持相同的光子路径损耗。

固定连接会造成光子路径损耗：在图2c 和2d中，每个受控非门都连接 A 处的一个量子处理单元与 B 处的一个量子处理单元。任一贝尔态测量装置都能生成每一对，但无论如何选择，都必须有一个光子穿过机架顶端交换机。让两个贝尔态测量装置均衡生成，可以缩短完成时间；但生成八对仍需 1043.9 毫秒，而通过具有相同贝尔态测量装置容量的本征波长路径只需 108.6 毫秒。即使调度均衡了贝尔态测量装置的使用，阴影区域仍显示固定光子路径额外造成的完成时间。

随着通信在电路阶段之间发生变化，能够从共享一个池中受益的量子处理单元也可能随之变化。固定连接使程序陷入本地贝尔态测量争用与光子路径损耗之间的权衡：调度可以重新分配生成，但若不进行波长转换，就无法改变哪些量子处理单元能够连接到各个池。

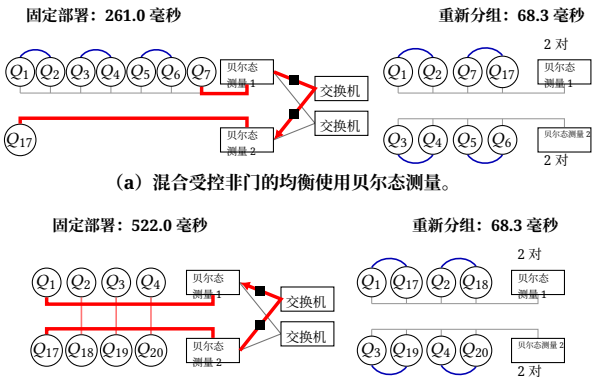
■ 要点：调度可以在各贝尔态测量装置之间平衡贝尔对生成，但固定的*QPU*到*ToR*连接决定了哪些对需要波长转换。要消除该损耗，就必须改变哪些量子处理单元共享对某个池的原生波长访问。

2.3 迈向可重构贝尔态测量装置ha ring

接下来，我们探讨改变哪些量子处理单元共享一个贝尔态测量池能否克服这些限制。我们使用相同的电路和32个量子处理单元，每个池配备一个贝尔态测量和16个量子处理单元，但允许分配发生变化。池内的对可避免转换，而跨池的对仍需要转换。可重构路径使每个光子增加0.5分贝的总损耗，将本地服务时间从27.1毫秒增至34.2毫秒，其中包括路径建立。我们首先比较一个阶段内的分组，然后考虑节省量在何时足以证明改变这些分组是合理的。

重新分组消除了固定连接所施加的转换：对于图2c中的四个跨机架 CNOT 门，调度平衡了贝尔态测量的使用，但每一对都需要转换。重新分组将每一对的两个量子处理单元分配到同一池，尽管存在额外的路径损耗，仍将完成时间从522.0毫秒降至68.3毫秒（图3b）。由于每个贝尔态测量仍服务两对，改进来自改变用于到达它们的光子路径。

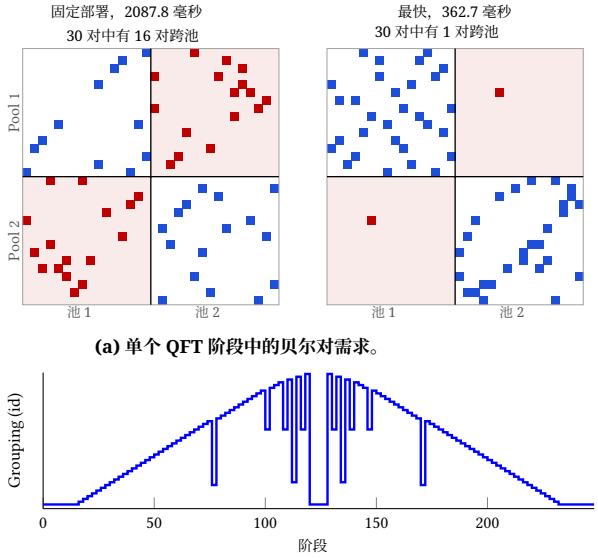
分组必须同时平衡贝尔态测量的使用与局部性：对于图2a中的混合量子线路，调度服务于A处的局部对以及B处的跨机架对，其转换后的路径决定完成时间。重新分组使每个池拥有两个局部对，将完成时间从261.0毫秒降至68.3毫秒（图3a）。将全部四对放入同一池中也可避免转换，但会迫使它们共享单个贝尔态测量。在这些分组之间进行选择时，需要同时考虑争用与局部性。



(a) 混合受控非门的均衡使用贝尔态测量。

(b) 跨机架 CNOT 门的光子路径更短。

图 3：重新分组改变了图2中的电路的光子路径和贝尔态测量争用。 *(a)* 重新分组混合 CNOT 门可避免转换，同时使生成在两个贝尔态测量装置之间保持均衡。 *(b)* 将每个机架间的配对移至同一个池可避免转换。



(a) 单个 QFT 阶段中的贝尔对需求。

(b) 每个阶段最快的分组：106 次重新配置。

图4：改变贝尔态测量共享可减少转换，但最快分组会随量子傅里叶变换的各个阶段而变化。*(a)* 在同样的 30 次贝尔对操作和贝尔态测量容量下，重新分组将跨池对从 16 个减少到 1 个。*(b)* 在 248 个阶段中始终采用最快分组需要 106 次重新配置，按每次分组变更 100 毫秒计算，额外增加 10.6 秒。

程序的通信对会随阶段变化，因此首选分组也可能随之改变。我们在32个量子处理单元上研究64量子比特量子傅里叶变换，采用两个各含四个贝尔态测量装置的池，并使用相同的光学参数和路径建立延迟。我们比较了62种均衡分组，所用完成时间估算计入了损耗以及对贝尔态测量装置、链路和QPU接口的争用。为每个阶段选择最快的分组，可将跨池贝尔对操作从2,048次降至80次，降幅达96.1%。在图4a所示的单个阶段中，重新分组将跨池对从16个减至1个，并将估计完成时间从2087.8毫秒降至362.7毫秒，所需操作与贝尔态测量容量保持不变。

按阶段选择最快的分组可能导致过多的重新配置：分组带来的收益还必须足以抵偿建立分组所花费的时间。若在量子傅里叶变换的 248 个阶段中始终采用最快的分组，至少需要进行 106 次重新配置（图4b）。每对路径建立需要10 μs，因此估算的通信时间在分组重新配置前为 39.87 秒。若每次分组变更耗时 100 毫秒（我们的评估采用 1 毫秒，并在 §4.5中对其进行变化测试），重新配置将增加 10.6 秒，使总时间增至 50.47 秒。如果切换所节省的时间不足以抵偿重配置延迟，那么在某些阶段采用较慢的分组可能更合适。

■ 要点：可重构贝尔态测量共享能够避免转换并平衡争用，而且无需增加贝尔态测量装置。其收益取决于量子处理单元如何共享资源池，以及何时改变共享方式。

2.4 设计目标与挑战

我们的目标是通过在程序执行过程中调整量子处理单元对现有 BSM 资源的共享方式，缩短通信完成时间。这需要一种支持可编程共享的架构，以及一种确定分组方案和变更时机的方法。

(Q1)架构如何实现可重构贝尔态测量共享？量子处理单元仍固定在机架中，但它们共享的贝尔态测量池需要随着程序执行而变化。要支持这种灵活性，就需要可编程光子路径，让量子处理单元能够直接访问不同的池，而无须物理移动处理器或迁移其量子态。

(Q2) 量子处理单元应如何共享贝尔态测量池？
可编程连接形成了量子处理单元分组的组合空间：仅将 32 个量子处理单元平均分配到两个相同的池中，就有 $^{32}C_{16}/2 \approx 300$ 百万种不同的选择。穷举搜索并不可行，因此面临的挑战是高效识别有前景的分组，并评估在概率生成以及贝尔态测量装置和链路争用情况下的完成时间。

(Q3) 何时应改变分组？R
econfi gurat ion deliv ers ben efit s
个分组的价值取决于它前后阶段的安排。即使将搜索范围缩小到 2 种分组，QFT 示例中的 248 个阶段仍有 $2^{248} \approx 4.5 \times 10^{74}$ 种可能的序列。挑战在于找到一种序列，使其通信节省足以抵偿重新配置延迟，而无需遍历所有序列。

3 Schism 架构

我们在 §2.2 中观察到的僵化，源于根据量子处理单元的物理机架布局，固定了它们无需转换即可访问哪些 BSM 池。调度可以使用其他位置的贝尔态测量装置，但要访问它们仍需沿着固定连接所限定的路径。Schism 通过允许量子处理单元更改可直接访问的池，实现可重配置的 BSM 资源共享。程序可以在多个阶段采用同一种分组，也可以随着通信对的变化而更改分组。该架构提供这些连接，而编译器则决定如何以及何时更改连接，以平衡光子路径损耗、争用和重配置延迟。

3.1 启用可重构贝尔态测量共享

如图 1b所示，Schism 使用机架顶端交换机作为原生波长光电路交换机，并将 BSM 池部署在汇聚交换机上。每台机架顶端交换机都会建立从其量子处理单元到选定池的量子线路。汇聚交换机将分配到的量子处理单元连接到相应的贝尔态测量装置，而配备量子频率转换的上行链路则提供通往核心网络的访问路径。不同机架中的量子处理单元现在可以无需转换便共享一个池，而同一机架中的量子处理单元则可以使用不同的池来分散争用。更改这些连接即可重塑 BSM 共享，无需增加贝尔态测量装置、移动量子处理单元或迁移量子态。

跨机架的可重构连接：Schism 中的一个纵向扩展域由连接至一组共用汇聚交换机的机架组成。每个机架顶端交换机充当原生波长光电路交换机，将面向量子处理单元的端口连接至选定的汇聚上行链路。这些量子线路将量子处理单元分配至跨机架的贝尔态测量池，并在汇聚交换机将传入光子导向可用的贝尔态测量装置期间保持不变。重新配置机架顶端交换机可在不移动量子处理单元或迁移量子态的情况下更改这些分配，从而使该纵向扩展域成为可重构纠缠域。分配至同一池的量子处理单元无需转换即可生成贝尔对，而跨池的贝尔对则使用配备量子频率转换器的上行链路和核心网络，即使处于同一纵向扩展域内也是如此。机架顶端交换机电路提供了实现第 §2.3节所探讨分组所需的可编程访问。

保持原生波长传输距离：在机架之间共享贝尔态测量装置，对机架顶端交换机插入损耗提出了严格要求。每个光子都要经过一条 ToR 电路，而这一阶段的损耗既会限制纵向扩展时的原生波长传输距离，也会增加生成重试。低损耗机械式光交换机（例如基于 MEMS 的器件）有助于保持这一传输距离，但其机械驱动可能会导致更高的重配置延迟。Schism 接受这一权衡，以实现对共享 BSM 池的低损耗、可编程访问。

这一选择切实可行，因为 ToR 电路无需针对每个贝尔对都进行更改。它们将量子处理单元连接到池，而汇聚交换机则根据当前分组建立通往各个贝尔态测量装置的路径。一个分组可以服务多项操作，无论是在同一阶段内还是跨越多个阶段，因此其带来的通信节省可以抵消建立分组所需的延迟。问题在于，如何对量子处理单元进行分组以充分利用这种访问方式，以及何时更改分组所节省的时间足以抵偿重新配置的代价。

3.2 选择量子处理单元分组

编译器必须选择能够减少光子路径损耗、又不会加剧贝尔态测量争用的分组。正如我们在 §2.3 中观察到的，仅避免转换并不能区分这样两种分组：一种会使某个池过载，另一种则能让生成并行进行。Schism 利用程序的通信情况识别有希望的分组，然后根据可用的贝尔态测量能力和链路容量比较它们的完成时间。

我们将程序表示为通信阶段序列，同时保留由本地操作和远程操作引入的依赖关系。每个远程操作都需要其参与量子处理单元之间的一对贝尔对。在一个阶段内，只要资源允许，就可以并发生成多对贝尔对；当所有所需的贝尔对完成后，下一阶段的生成便会开始。对于包含 n 个量子处理单元和 m 个配置相同的池的纵向扩展域，分组 g 会为每个池分配n/m 个量子处理单元，同时不改变逻辑量子比特放置。

编译器构建候选集 G，并估算每个阶段在每个候选方案下的完成时间 $C_t(g)$，同时考虑该方案提供的光子路径以及其造成的争用。

寻找有希望的分组：我们为每个不同的阶段构建一个量子处理单元交互图，其中量子处理单元作为顶点，边权重表示它们之间所需的贝尔对数量。使用 METIS [25, 38] 进行平衡图划分，将相互通信的量子处理单元分组，以减少跨池操作，同时为每个池分配相同数量的量子处理单元。我们将得到的分组映射到物理池，移除重复分配，并纳入原始部署分组，构成 G。对某一阶段有利的分组，也可能高效地服务于其他阶段，因此编译器会针对完整序列评估每个候选分组。划分将搜索范围缩小到能够减少转换的分组，而完成时间估算则会考虑每种分组内部的争用情况。

比较损耗与争用：对于每个候选方案，我们使用 §2.1 中的期望服务时间来调度其贝尔对操作，从而估算一个阶段的完成时间。所选光子路径决定了成功概率和预期重试次数。逐对路径建立会增加贝尔态测量装置和链路的预留时间。该模型还会考虑可用的贝尔态测量容量、光信道和量子处理单元通信接口，因此，即使光子路径较短，共享同一资源的操作也可能需要等待。最后一个完成的量子对决定该阶段的估计完成时间。即使两个分组的跨池对数量相同，如果其中一个分组将操作集中到较少的贝尔态测量装置上，它们的完成时间也可能不同。通过这种方式进行比较，编译器可以权衡较短的光子路径与其可能造成的等待。比较结果还取决于每个分组内的生成调度方式。正如我们在 §2.2 中所观察到的，使用另一个池的贝尔态测量装置可以减少等待，但到达该装置会增加损耗和重试次数。

Schism 在调度规则下评估分组，这些规则包括等待本地贝尔态测量装置、使用可用的远程贝尔态测量装置，或允许 SwitchQNet [80] 所采用的纠缠交换选项。它还考虑在一个阶段内临时重新分组量子处理单元，以便在不进行转换的情况下服务跨池对，并计入每次此类阶段内重新分组所带来的额外延迟。该规则首先服务已经共享同一池的对，然后等待正在进行的生成完成，再为剩余的对更改分配。调度器在完成前恢复该阶段所选的分组，并将此延迟计入阶段成本，从而使每个阶段边界处所假定的分组保持不变。这些选择使编译器能够比较通过量子频率转换器到达另一个池与重新配置访问以避免转换这两种方式。所有规则使用相同的资源约束和路径相关的生成时间。我们不利用前瞻，因为在候选分组和各阶段之间应用前瞻会使大型电路的编译成本高得令人难以承受。

3.3 选择何时重新配置

分组带来的收益还必须足以抵偿建立分组所花费的时间。在 §2.3 中的量子傅里叶变换示例中，每个阶段都选择最快的分组，会导致频繁变更，其延迟会在整个程序运行过程中累积。 Schism 会在整个序列范围内选择分组，因此在某些阶段，即使选择较慢，也可以避免切换所耗费的时间超过其节省的时间。

对于固定的调度规则，设 T 为通信阶段的数量，G 为候选集，$C_t(g)$ 为阶段 t 在分组 $g \in \mathsf{G}$ 下的估计完成时间。此估计包括逐对路径建立、生成、等待共享资源，以及调度规则所要求的任何阶段内重新分组和恢复。设 $\delta \geq 0$ 为分组在阶段之间发生变更时产生的延迟。编译器选择一个序列 $(g_1,\ldots,g_T) \in \mathsf{G}^T$，使其最小化

$$J(g_1,\ldots,g_T) = \sum_{t=1}^{T} C_t(g_t) + \delta \sum_{t=2}^{T} \mathbf{1}[g_t \neq g_{t-1}], \tag{4}$$

其中 J 是估计的总通信完成时间，$\mathbf{1}[\cdot]$ 在其条件成立时等于一，否则为零。初始分组在执行前配置，因此只有后续变更才会产生重配置延迟。

尽管存在许多可能的序列，但在同一分组中完成某一阶段的序列，对剩余阶段面临相同的选择。保留以每个分组结束的代价最小序列，就足以找到最佳后续方案。令 $D_t(g)$ 为完成第 1 阶段至第 t 阶段并在分组 g 中结束的最小估计时间。由于第一个分组不产生重配置延迟，$D_1(g) = C_1(g)$。对于 $t = 2,\ldots,T$，我们计算

$$D_t(g) = C_t(g) + \min_{h \in \mathsf{G}} \{ D_{t-1}(h) + \delta \mathbf{1}[h \neq g] \}, \tag{5}$$

其中 h 是前一阶段使用的分组。继续使用 $h = g$ 不会产生重配置延迟，而从 $h \neq g$ 变更则会增加 δ。最小估计完成时间是 $\min_{g \in \mathsf{G}} D_T(g)$。记录每个状态的最小化前驱，并从最小化的最终分组回溯，即可恢复所选序列。

每次分组变更的延迟都是固定的，因此可以高效地计算这一递推关系。定义 $M_{t-1} = \text{最小值}_{h \in \mathsf{G}} D_{t-1}(h)$ 为截至前一阶段的最小估计完成时间。于是，方程 5 可改写为

$$D_t(g) = C_t(g) + \min\{ D_{t-1}(g), M_{t-1} + \delta \}. \tag{6}$$

如果已存在一个可达到 M_{t-1} 的分组 g，那么继续使用而不重新配置的代价不会高于支付 δ。每个阶段计算一次 M_{t-1}，即可在常数时间内更新每个候选方案；在获得阶段代价后，序列选择的时间复杂度为 $O(T|\mathsf{G}|)$。由此得到的序列使 G 上的估计目标最小化，因此当切换带来的收益不足时，分组可以在多个阶段中保持不变。

期望服务时间使这一搜索变得可行，但概率性重试可能改变操作的完成时间以及资源的可用时间。执行前，Schism 会通过随机试验，比较每种调度规则下选定的序列，以及在整个程序期间保持同一分组、不进行临时重新分组的有前景方案。它会选出平均完成时间最低的方案和调度规则，并使用单独的试验进行评估。执行期间，控制器会在每个阶段内遵循所选的调度规则，包括任何临时重新分组和恢复，然后在需要时应用下一阶段的分组及其重配置延迟。量子处理单元和存储的量子态保持不动，而它们对共享 BSM 资源的访问则遵循所选序列。

表1：囚禁离子量子处理单元和光互连的默认仿真参数。ToR电路损耗按每个光子计算，而 Beneš损耗按每个交换元件计算。我们在 §4.5中改变损耗和重配置延迟。

参数	值
光子效率 / 尝试时间 [70]	0.0209 / 1.2 μs
贝尔态测量接受概率	0.5
本征 / 电信衰减	30 / 0.2 分贝/公里
每个QFC的损耗 [73]	2.4 分贝
每个Beneš元件的损耗 [83]	0.3 分贝
每个贝尔对的路径建立	10 μs
每光子的ToR电路损耗 [39]	0.5 分贝
分组重配置延迟	1 ms

3.4 实用性

要实现这些优势，就需要以低损耗方式访问贝尔态测量池，同时避免过长的重配置延迟或增加对 QPU 内存的需求。机架顶端交换机必须为原生波长路径保留足够的光损耗预算，使其能够跨越多个机架。低损耗机械交换机（包括基于 MEMS 的器件和光束转向器件）可满足这一要求（例如，插入损耗为 0.5 分贝 [39]），但其重新配置可能需要数毫秒 [39, 56, 80],，而量子交换机的切换时间则为微秒或纳秒级 [81]。Schism 通过在更改 QPU 至池电路无益时维持其原状，来应对这种权衡。编译器在估算完成时间时会考虑插入损耗，在选择分组序列时则会考虑重配置延迟。重配置延迟越长，就越倾向于选择能让通信节省在更多阶段内累积的分组。

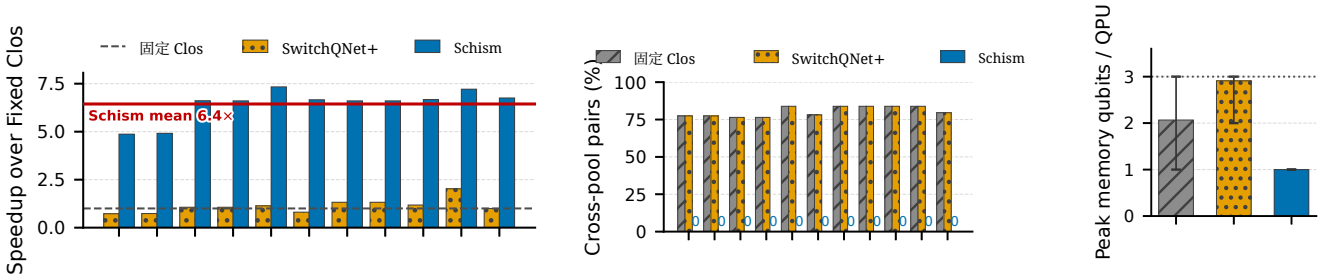
4 评估

我们评估可重构贝尔态测量共享是否能缩短通信时间、增益来自何处，以及它们如何取决于交换机损耗和重新配置延迟。我们还将 Schism 与一种假设的大型交换机进行比较，并讨论其对存储器和对质量的影响。

4.1 方法

我们在 SeQUeNCe [77]，（一种用于量子网络的离散事件模拟器）中实现了 Schism 及所有基线方法。

系统与硬件： 我们的默认架构是在四个机架中部署 32 个量子处理单元，共享八个贝尔态测量装置。固定 Clos 在每个机架顶端交换机处部署两个贝尔态测量装置，而 Schism 则构建四个汇聚层池，每个池包含两个贝尔态测量装置，为八个量子处理单元提供服务。两个核心交换机连接这些池。每个量子处理单元有六个数据量子比特、一个光接口，以及三个通信存储量子比特，用于一个传输中纠缠对和两个已存储纠缠对。两个缓冲量子比特遵循 SwitchQNet 的分配方式，占八个数据量子比特和缓冲量子比特的 25% [80]。我们对囚禁离子节点进行建模，其配备 $^{88}Sr^{+}$ 光接口和 $^{43}Ca^{+}$ 存储器 [70]。表 1 列出了物理参数。贝尔态测量交换机采用贝内什路径，包含 $2\log_2 N - 1$ 个元件，用于一个 $N \times N$ 交换机，在 16 个端口下每次遍历的损耗为 2.1 分贝。 Schism 的机械式 ToR 电路使每个光子的损耗增加 0.5 分贝，重新分组需要 1 毫秒。池内的光子保持本征波长，并在核心路径上进行转换。



(a) 相较于固定 Clos 的加速比 **(b) 跨池贝尔对** **(c) 每个量子处理单元的存储器**

图 5：Schism 在全部 11 个工作负载上缩短了通信时间（a），这是通过将需要通信的量子处理单元置于同一个贝尔态测量池中实现的（b）。固定 Clos 和 SwitchQNet+ 仍有 76–84% 的贝尔对需要跨机架生成。这些性能提升所需的存储空间更少：Schism 每个量子处理单元最多只保留一对贝尔对，而 SwitchQNet+ 在 10 个工作负载中都占满了其三量子比特存储器（c）。误差线表示各工作负载的取值范围。

对比方案： 我们将 Schism 与以下方案进行对比：*(i)* 固定 Clos，*(ii)* SwitchQNet+，以及 *(iii)* BigSwitch。固定 Clos 在每个机架顶端交换机处部署贝尔态测量装置，并对跨机架量子对进行转换。SwitchQNet+ 在此互连结构上运行 SwitchQNet 编译器 [80]，其中包括前瞻、缓冲和拆分量子对。我们扩展其调度器，使其等待最短路径上的贝尔态测量装置，而不是选择经过第三个机架顶端交换机、损耗更高的路径；我们的实验表明，后者的表现显著差于固定 Clos。BigSwitch 通过一个原生波长交换机连接所有量子处理单元和贝尔态测量装置（§4.4）。两种对照方案用于单独评估 Schism 的优势：不进行重新分组时，会保留 Schism 互连结构上的机架到池分配；而单次分组则在整个程序中使用最佳候选方案。完整编译器可以在不同阶段之间以及阶段内部重新分组（§3.2）。

工作负载和指标： 我们使用 11 个 MQT Bench 电路 [62]，，每个量子处理单元配备六个数据量子比特：在 32 个量子处理单元下共 192 个量子比特；随着网络规模从 16 个量子处理单元扩展到 64 个，量子比特数为 96–384。量子比特划分遵循 Davis 等人 [25]，的方法，并且在不同设计之间以及整个执行过程中固定放置。每种设计使用 10 次模拟运行来选择调度规则，并通过另外 30 次独立随机种子的运行进行评估。加速比为平均通信完成时间之比。我们还测量跨池生成、存储器占用率和重新分组开销。参数实验使用说明文字中所述的工作负载子集，其他所有参数均保持默认值。

4.2 Schism 加速每一项工作负载

我们首先在同一 32 量子处理单元网络上比较全部 11 个工作负载。在保持放置和贝尔态测量容量固定的情况下，我们可以将完成时间的变化与每种设计如何提供所需贝尔对联系起来。

改变 BSM 共享可缩短通信时间： 图 5a 显示，相比固定 Clos 的加速比为 4.9–7.3×（平均值为 6.4×），相比 SwitchQNet 的加速比为 3.6–8.3× +。我们将相位通信组可容纳在由八个量子处理单元组成的池中的八种工作负载称为稀疏工作负载。量子傅里叶变换、相位估计和量子近似优化算法包含更大的分组，因此属于稠密工作负载。稀疏工作负载的加速比达到 6.6–7.3×，这主要得益于在各阶段之间重新分组。稠密工作负载也会在阶段内重新分组，在量子近似优化算法上达到 6.7×，在量子傅里叶变换和相位估计上达到 4.9×

表2：Schism 在这些工作负载中避免了所有已转换的对，同时仅用少量通信时间进行重新分组。加速比是将 Schism 与各基线进行比较得出的。列出的数量为固定 Clos 下已转换的对，这些对均被 Schism 消除。上方的比较使用 32 个量子处理单元，量子近似优化算法除外（64 个）。下方的比较则将稀疏和稠密工作负载分别与 BigSwitch 进行比较。

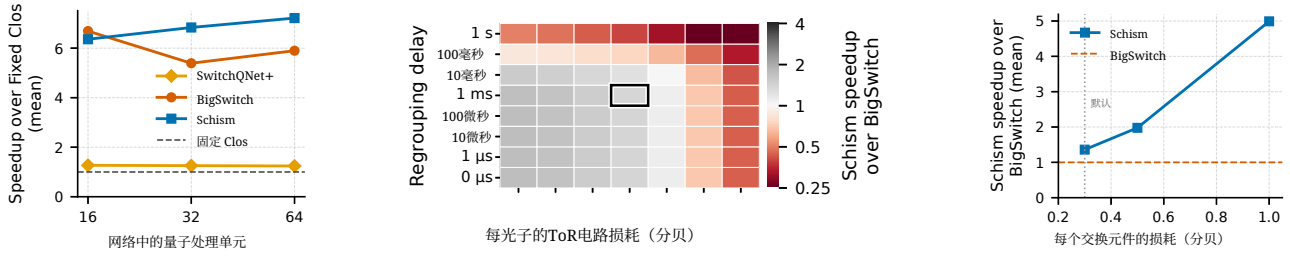
工作负载	加速比（相比于） 固定 Clos	SwitchQNet+	转换后的重新分组 对	时间（%）
QFT	4.87	6.73	27,705	2.54
QAOA	6.66	8.26	–	2.03
Grover	6.61	6.22	28,916	0.23
量子近似优化算法 (64)	7.78	10.63	–	–
相较于 BigSwitch（32 个量子处理单元）的加速比				
八个稀疏工作负载				1.35–1.38×
三个稠密工作负载				0.57–0.89×

估算。表 2给出了引言中所强调的工作负载的确切加速比和转换次数。

重新分组消除了调度无法避免的转换： 固定 Clos 和 SwitchQNet+ 在机架之间生成 76–84% 的对，而 Schism 在一个池内生成每一对（图 5b）。这为 QFT 消除了 27,705 次转换，为 Grover 消除了 28,916 次转换（表 2）。SwitchQNet+ 可以通过预读隐藏生成延迟，但其固定连接仍然需要转换。在 11 个工作负载中的 10 个上，它会填满三量子比特通信存储器，而 Schism 每个量子处理单元至多保留一对（图 5c）。

4.3 重新分组带来性能提升

前述结果综合体现了Schism的互连结构与其分组决策的影响。图7 通过逐步增加一种能力来分别考察两者：不重新分组时的互连结构、整个程序采用同一分组，以及阶段之间和阶段内部的变化。这也检验了仅配置一次网络，是否就能获得根据通信进行调整所带来的好处。



(a) 网络规模　**(b) 与 BigSwitch 对比：ToR 损耗 × 延迟**　**(c) 快速交换机损耗**

图6：网络规模增大会提高 BigSwitch 的基数和损耗，使 Schism 在平均加速比上反超 BigSwitch (a)。较高的 ToR 电路损耗和重新分组延迟会削弱这一优势 (b)，而每个快速交换元件的损耗越高，越有利于 Schism 使用规模更小的 BSM 交换机 (c)。(a) 面板取 BV、GHZ、伊辛、量子近似优化算法、RCA、VQE-RA 和 VQE-SU2 的平均值。(b、c) 面板取 GHZ、RCA 和 VQE-SU2 的平均值，其中 (b) 用轮廓标出了默认值。

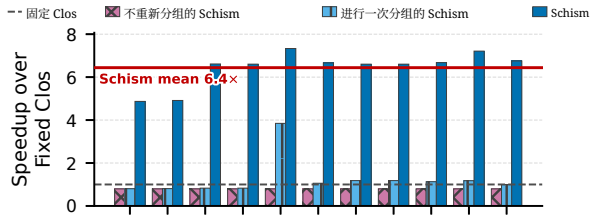


图7：加入 Schism 的互连结构但不进行重新分组，会增加损耗并减慢通信。选择一种分组只能弥补部分代价，而在执行过程中动态调整分组则能实现全部收益。

表 3：允许阶段内重新分组，相比仅在阶段之间更改分组（PW）效果更好，可消除剩余的跨池对。加速比以固定 Clos 为基准。

工作负载	加速比 PW	加速比 Schism	跨池对（%） PW → Schism
QFT	1.66	4.87	33 → 0
阶段估算	1.70	4.91	32 → 0
QAOA	2.60	6.66	15 → 0

互连结构本身会增加损耗：将每个机架固定分配到一个池，可保留固定 Clos 的 BSM 共享，但会在 BSM 交换机之前增加一条 ToR 电路。每个光子损耗 0.5 分贝，使成对光子的损耗达到 1 分贝，从而将联合传输概率缩放为 $10^{-0.1} \approx 0.79$。不进行重新分组时，Schism 在所有工作负载上的运行速度都与固定 Clos 相同，为 0.79×。重新分组必须先弥补这部分额外损耗，才能改善通信。

单次分组带来的收益有限：为整个程序选择最佳候选方案，可将平均加速比提升至1.26×，但仅达到0.80–1.18×，RCA（3.9×）除外，因为其通信变化不大。在某个阶段将彼此通信的量子处理单元归入同一池中，可能导致它们在另一阶段被分到不同的池。像在作业之间重新配置速度较慢的交换机的设计那样，每个程序只配置一次连接 [82]，，无法充分发挥根据阶段进行调整的优势。

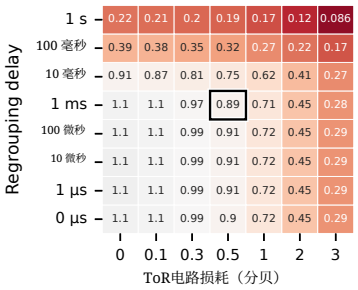
阶段之间与阶段内部的变更可恢复局部性：重新分组将平均加速比提高到 6.4×。在密集型工作负载上，仅在阶段之间进行变更会使 15–33% 的对跨越多个池。阶段内变更将这些对纳入同一池，使加速比从 1.7–2.6× 提高到 4.9–6.7×（表 3）。这些变更最多约占通信时间的 2.5%，其中量子傅里叶变换所占比例最大（表 2）。在默认参数下，避免转换所带来的节省超过了这些延迟。

4.4 与BigSwitch的比较

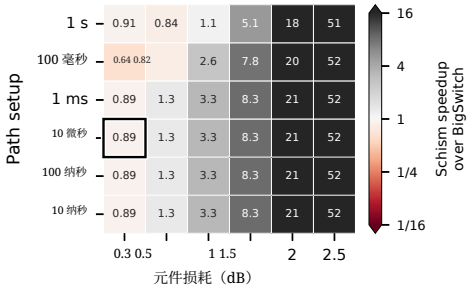
如果重新分组通过对纳入同一池而发挥作用，那么一个覆盖整个网络的单一池便可以持续提供这一机会。我们将与 BigSwitch 进行比较，以了解避免分组变更是否足以抵消更大交换机带来的光子损耗。

BigSwitch 无需转换和重新分组：一个假设的全网范围 Beneš交换机以本征波长将每个量子处理单元连接到每个贝尔态测量。我们采用与其他贝尔态测量交换机相同的 10 μs路径建立方式和每个元件 0.3 分贝的损耗。在 32 个量子处理单元时，其 64×64 互连结构中每个光子的损耗为 3.3 分贝。 Schism 则将 0.5 分贝的 ToR 电路与损耗为 2.1 分贝的较小型贝尔态测量交换机相结合，但需要花费 1 毫秒进行重新分组。在八个稀疏工作负载中，较低的损耗足以抵消重新分组的开销，使 Schism 快 1–1.38× 倍（表2）。在三个密集型工作负载中，BigSwitch 仍然 快 1–1.75× 倍，因为在这些工作负载中，Schism 还必须在各阶段内重新分组。

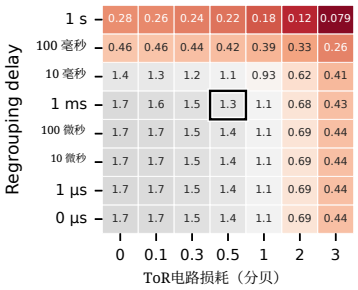
更大的网络更适合采用较小的 BSM 交换机：当网络规模从 16 个量子处理单元扩大到 64 个时，Schism相较于固定 Clos 的平均加速比从 6.4× 升至 7.2×，而 BigSwitch 的平均加速比则从 6.7× 降至 5.4–5.9×，因为其基数和损耗均有所增加（图 6a）。Schism 在 32 个量子处理单元时，平均表现便超过 BigSwitch。在 64 个量子处理单元时，量子近似优化算法相较于固定 Clos 的加速比为 7.78×，相较于 SwitchQNet 的加速比为 10.63×+（表 2）。每个交换元件的损耗越高，也越有利于 Schism：损耗从 0.3 分贝升至 1 分贝时，Schism 在 GHZ、RCA 和 VQE-SU2 上相对于 BigSwitch 的优势从 1.36× 增至 5.0×（图 6c）。相反，较高的机架顶端交换机电路损耗或较慢的重新分组则有利于 BigSwitch。在这些工作负载下，当机架顶端交换机损耗不超过 1 分贝、重新分组延迟为 1 毫秒，或损耗为 0.5 分贝、重新分组延迟为 10 毫秒时，Schism 表现领先；重新分组延迟达到 100 毫秒后，BigSwitch 则胜出（图 6b）。



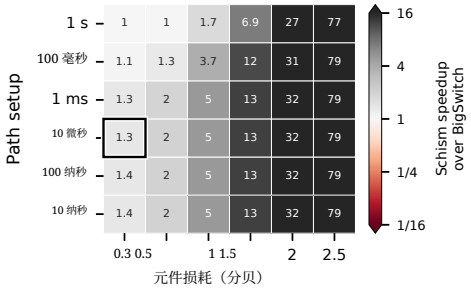
(a) ToR 损耗（Schism）和重新分组延迟（量子近似优化算法）



(b) 交换机 2×2 元件损耗和路径建立（量子近似优化算法）



(c) ToR 损耗（Schism）和重新分组延迟（GHZ）



(d) 交换机 2×2 元件损耗和路径建立（GHZ）

图 8：与 BigSwitch 的比较取决于两个交换层级。随着 ToR电路损耗降低，Schism 的性能超过 BigSwitch（c），即使对于 QAOA 这类需要阶段内重新分组的稠密工作负载也是如此（a）。提高快速交换机损耗有利于 Schism 较小的 BSM 交换机（b、d）。各单元显示 Schism 相对于 BigSwitch 的加速比，灰色表示 Schism 占优，红色表示 BigSwitch 占优。每个面板改变其两个坐标轴，同时将其他参数保持为默认值。

密集型工作负载凸显了机架顶端交换机电路的代价：量子近似优化算法受益于避免转换，但在默认参数下仍落后于 BigSwitch。图 8a、8b 分别展示了重新分组延迟和交换机损耗的影响。即使重新分组延迟为零，Schism 在机架顶端交换机损耗为 0.5 分贝时，也只能达到 BigSwitch 速度的 0.90×。在默认的 1 毫秒延迟下，将这一损耗降至 0.3 分贝后，Schism 的表现便接近 BigSwitch（0.97×）；降至 0.1 分贝或更低时，Schism 则能领先。快速交换元件的单位损耗越高，也越有利于 Schism，因为较小的交换机经过的元件更少。在 10 μs 路径建立期间，Schism 在每个元件的损耗达到 0.5 分贝时便超过 BigSwitch。密集型工作负载下的差距取决于两种技术，而不只是重新分组延迟。对于 GHZ 等稀疏工作负载（图 8c、8d），Schism 即使在重新配置延迟更高、机架顶端交换机损耗更大的情况下，仍优于 BigSwitch。

随着延迟增加，选择何时重新分组至关重要：在离子阱参数下，本地生成需要几十毫秒，因此，后续操作可以弥补毫秒级的重新分组开销。ToR 损耗为 0.5 分贝时，即使重新分组延迟为 100 毫秒，平均加速比仍为 3.9×。表4 通过将Schism 与每个阶段独立选择最快分组的方案进行比较，单独考察序列选择的价值。该替代方案使用相同的候选项和估算值，但在选择时忽略阶段之间的重新分组延迟，也不考虑始终保持同一分组。延迟为 1 毫秒时，该方案与Schism相差不到 2%；但在 GHZ、RCA 和 VQE-SU2 上，延迟为 100 毫秒时，其耗时会多出1。2–1.6×。延迟为 1 秒时，Schism 在这些工作负载中始终保持同一分组，而替代方案有 80–98% 的时间都花在重新分组上。对于 QAOA，两种方法在延迟不超过 100 毫秒时选择相同的序列，这表明延迟感知选择的价值也取决于通信结构。

4.5 对损耗和延迟的敏感性

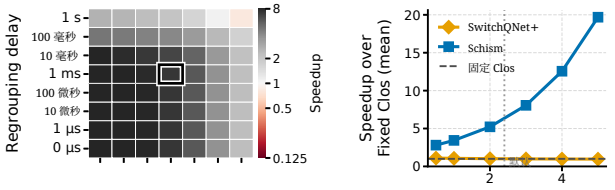
接下来，我们改变决定重新分组是否值得的成本：ToR电路损耗、重配置延迟和转换损耗。

这些收益能够承受额外的 ToR 电路损耗：在Schism中，每个光子都会经过一个 ToR 电路，其损耗会增加重试次数。对于 GHZ、RCA 和 VQE-SU2，与固定 Clos 相比，平均加速比从无损耗电路时的 9.0× 降至 2.3×（每个光子损耗为 3 分贝），但在重新分组延迟达到 100 毫秒时仍高于 1（图9a）。延迟为 1 秒时，平均值仍为1。1–2.6×，损耗不超过 2 分贝时如此；损耗达到 3 分贝时则低于 1。收益取决于能否弥补额外的光子损耗和更改分组所耗费的时间。

转换损耗会放大其优势：固定 Clos 要为每个跨机架对进行两次转换，而 Schism 在这些实验中会在池内生成所有对。将每个 QFC 的损耗从 0.5 分贝提高到 5 分贝，会使 Schism 的平均加速比从 2.8× 提高到 20×（图 9b）。SwitchQNet+ 的平均表现仍与固定 Clos 接近，因为调度无法消除固定连接所带来的转换。即使在测试的最低损耗下，避免核心路径并减少争用仍能带来显著收益。

表4：考虑延迟可避免代价高昂的变更，因为重新分组会变慢。在 ToR 损耗为 0.5 分贝时，各比值为每阶段最快方案的耗时除以 Schism 的耗时。最后几列显示了 Schism 的变更，以及每阶段方案在 1 秒时重新分组时间所占的比例。

	完成时间比			在 1 秒时	
工作负载	1 毫秒	100 毫秒	1 秒	变化时间（%）	
GHZ	1.02	1.60	6.85	0	98
RCA	1.00	1.21	2.71	0	80
VQE-SU2	1.01	1.35	3.43	0	95
QAOA	1.00	1.00	1.05	9	47



（a）与固定 Clos 对比：ToR 损耗 × 延迟　　（b）转换损耗

图 9：随着 ToR 电路损耗升至 3 分贝、重新分组延迟升至 100 毫秒，Schism 仍比固定 Clos 更快；数据取 GHZ、RCA 和 VQE-SU2 的平均值（a）。灰色单元格表示 Schism 占优，红色单元格表示固定 Clos 占优，轮廓线标示默认设置。转换损耗越高，避免跨池路径的收益越大，如 QFT、量子近似优化算法、VQE-SU2 和伊辛的平均值所示（b）。

4.6 讨论与局限

我们将讨论可重构贝尔态测量共享对存储器和对质量的影响，以及评估的局限性。

研究范围：我们根据所选的离子阱参数，测量预示贝尔对的生成时间，但不评估保真度。这样可以单独考察 BSM 共享、光子路径损耗和争用的影响。实验表明，这些优势在何种情况下仍然存在，以及交换机损耗或延迟在何时会抵消这些优势。对质量评估需要平台特定的存储器和门模型，这超出了完成时间目标的范围。

重新分组无需预留缓冲区：在这些实验中，Schism 每个量子处理单元最多保留一对贝尔对，也不为未来操作预留缓存。已生成的贝尔对仍会占用量子比特，直到被使用；而在某一阶段中较早完成的贝尔对，可能需要等待其余贝尔对完成。避免推测生成可以减少存储需求，但保真度取决于这些等待时间。若存储器条件允许，前瞻可与重新分组相辅相成。

更快的通信可以缩短等待量子态的时间：数据量子比特在生成和重新配置的整个过程中都必须保持相干。 Schism 缩短了通信间隔，而其编译器已将重新分组所耗费的时间纳入考量。交换和纯化会增加局部操作、存储器和初级对的开销 [14, 26]。更快的生成可以缩短获得这些对所需的时间，但局部操作错误和存储器衰减也会影响它们的质量。若将这些开销纳入考量，就能让编译器根据生成满足程序所需保真度的对所需时间来比较分组。

5 相关工作

Schism 将可重构互连与分布式 Quantum 编译连接起来。先前工作会刻画程序所需的通信，或在可用资源上对其进行调度。我们关注的是调整哪些量子处理单元共享服务于该通信的 BSM 池。

量子数据中心架构： 光子链路连接模块化量子寄存器 [50]，而动态量子网络则将资源共享扩展至数据中心和云基础设施 [53]。以交换机为中心和以服务器为中心的设计研究拓扑与物理层约束如何影响分布式执行 [66]。量子信息保持交换机支持在不破坏光子编码状态的情况下进行路由 [81]。Schism 在此基础上，使连接共享贝尔态测量池的原生波长连接能够在执行期间重构。

纠缠路由与调度： 路由技术在生成具有概率性且存储器有限的条件下，选择路径和交换操作 [26, 37]。这些技术包括多路径分发 [54]、预生成纠缠和按需纠缠 [22], 以及并发源-目的节点对 [67]。程序导出的需求指导资源分配和交换机控制 [75]，而网络感知调度则考虑生成概率、通信量子比特可用性、交换机延迟和存储器相干性 [60]。SwitchQNet 协调程序调度与网络调度 [80]。Schism 改变这些调度决策所基于的 QPU 到 BSM 的分配，使程序能够随着通信需求的变化避开转换路径。

量子线路划分和量子比特放置：图划分和超图划分可减少量子处理单元之间的通信 [9, 25], ，包括异构映射和拓扑感知映射 [8]。时间切片放置会考虑在不同映射间移动量子数据 [15], ，而联合分配与调度则会考虑网络资源和退相干 [71]。这些技术决定了哪些量子处理单元必须进行通信。Schism 在逻辑量子比特放置之后应用划分：其图顶点是量子处理单元，而各分组决定对贝尔态测量池的共享访问。它通过完成时间估算比较这些分组，估算中会考虑损耗和争用，且不会迁移量子态。

可重构经典数据中心：近年来，光电路交换一直是一个活跃的研究方向 [3, 4, 6, 12, 16, 18, 31,34, 36, 41, 43, 44, 49, 52, 58, 64], ，研究范围涵盖需求无关配置 [3, 6, 16, 49, 57] 以及旨在优化吞吐量或完成时间的需求感知调度 [4, 7, 18, 31, 44]。RDC [76]提出在边缘实现可重构性：在分组交换的背景下，于电 ToR 交换机下方增设光交换机，以提升各机架顶端交换机之间的带宽利用率。近期的设计会根据 AI 通信调整连接关系 [2, 11, 27, 63, 74, 78]。Schism 同样在通信节省与重配置延迟之间进行权衡，但其配置会分配共享 BSM 资源。值得注意的是，Schism 的决策还取决于光子损耗、概率生成和争用，而不仅仅是流量规模和链路带宽。

6 结论

我们介绍了 Schism，这是一种架构和编译器，可在不移动量子处理单元或迁移量子态的情况下，实现跨机架的可重构贝尔态测量共享。在采用囚禁离子参数的 32 个量子处理单元上，对于全部 11 种工作负载，Schism 相较于固定 Clos 可将通信时间缩短 4.9–7.3× 倍（平均 6.4× 倍），相较于 SwitchQNet+ 可缩短 3.6–8.3× 倍，同时重新分组所占时间最多约为运行时间的 2.5%。我们证明，改变各个量子处理单元共享每个池的分组方式，可以减少波长转换和贝尔态测量争用；而选择何时更改这些分配，则可在通信节省与重配置延迟之间取得平衡。这些优势来自对现有 BSM 资源访问方式的调整，而非增加其容量。这项工作为联合优化量子比特放置和贝尔态测量共享，以及协调并发执行程序之间的资源访问，开辟了新的方向，从而将可重构资源共享扩展至量子数据中心更广泛的需求。

致谢

我们使用 GPT-6 Astra 和 Claude Opus 5.5 改进作者最初撰写文本的语法和可读性，并协助编写代码。所有想法和智力贡献均来自作者。我们审阅并核实了所有最终文本。

参考文献

[1] Amira Abbas、Andris Ambainis、Brandon Augustino、Andreas Bärtschi、Harry Buhrman、Carleton Coffrin、Giorgio Cortiana、Vedran Dunjko、Daniel J. Egger、Bruce G. Elmegreen、Nicola Franco、Filippo Fratini、Bryce Fuller、Julien Gacon、Constantin Gonciulea、Sander Gribling、Swati Gupta、Stuart Hadfield、Raoul Heese、Gerhard Kircher、Thomas Kleinert、Thorsten Koch、Georgios Korpas、Steve Lenk、Jakub Marecek、Vanio Markov、Guglielmo Mazzola、Stefano Mensa、Naeimeh Mohseni、Giacomo Nannicini、Corey O'Meara、Elena Peña Tapia、Sebastian Pokutta、Manuel Proissl、Patrick Rebentrost、Emre Sahin、Benjamin C. B. Symons、Sabine Tornow、Víctor Valls、Stefan Woerner、Mira L. Wolf-Bauwens、Jon Yard、Sheir Yarkoni、Dirk Zechiel、Sergiy Zhuk 和 Christa Zoufal。2024。《量子优化中的挑战与机遇》。《自然·物理评论》 6, 12 01 2024 718 735 42254 024 00770 9 (Dec), –。doi:10.1038/s - - - 2025

[2] Vamsi Addanki。。《当光响应集体意志：自适应光子纵向扩展域的理论与愿景》。载于第24届 ACM网络热点专题研讨会论文集（美国马里兰州大学公园市马里兰大学校园）（HotNets '25）。计算机协会，美国纽约州纽约，326–334。doi:10.1145/3772356.3772395[3] Vamsi Addanki、Chen Avin 和 Stefan Schmid。2023。Mars：在可重构数据中心网络中利用浅缓冲区实现近最优吞吐量。《ACM测量、分析与计算系统汇刊》7, 1，文章2（2023年3月），43页。doi:10.1145/3579312[4] Vamsi Addanki、Deeksha P Rao、Goran Dario Knabe、Chen Avin 和 Stefan Schmid。2027。Vermilion：具备正式吞吐量保证的流量感知可重构光互连。载于第24届 USENIX 网络系统设计与实现研讨会（NSDI 27）。USENIX协会，美国罗得岛州普罗维登斯。https://www.usenix.org/conference/nsdi27/presentation/addanki [5] Mohammad Al-Fares、Alexander Loukissas 和 Amin Vahdat。2008。一种可扩展的商用数据中心网络架构。载于 ACM SIGCOMM 2008 数据通信会议论文集（美国华盛顿州西雅图）（SIGCOMM '08）。计算机协会，美国纽约州纽约，63–74。doi:10.1145/1402958.1402967[6] Daniel Amir、Nitika Saran、Tegan Wilson、Robert Kleinberg、Vishal Shrivastav 和 Hakim Weatherspoon。2024。Shale：一种实用、可扩展的无阻塞可重构网络。载于 ACM SIGCOMM 2024 会议论文集（澳大利亚新南威尔士州悉尼）（ACM SIGCOMM '24）。计算机协会，美国纽约州纽约， 449 464 10.1145 3651890.3672248 –。doi: / Eliezer Amponsah、

[7] Deeksha P Rao 和 Vamsi Addanki。2026。Tetris：用于可重排无阻塞光子互连的量子线路调度。arXiv: 2609 25434 [ ] . 2609.25434 . cs.NI

[8] https://arxiv org/abs/ Pablo Andres-Martinez、Tim Forrer、Daniel Mills、Jun-Yi Wu、Luciana Henaut、Kentaro Yamamoto、Mio Murao 和 Ross Duncan。2024。在异构、模块化量子计算网络架构中分发量子线路。《量子科学与技术》9, 4（2024年8月），045021。doi:10.1088/2058-9565/ad6734

[9] Pablo Andrés-Martínez 和 Chris Heunen。2019年。通过超图划分自动分发量子电路。《物理评论A》100（2019年9月），032308。第3期。doi:10.1103/PhysRevA.100.032308[10] James Ang、Gabriella Carini、Yanzhu Chen、Isaac Chuang、Michael Demarco、Sophia Economou、Alec Eickbusch、Andrei Faraon、Kai-Mei Fu、Steven Girvin、Michael Hatridge、Andrew Houck、Paul Hilaire、Kevin Krsulich、Ang Li、Chenxu Liu、Yuan Liu、Margaret Martonosi、David McKay、Jim Misewich、Mark Ritter、Robert Schoelkopf、Samuel Stein、Sara Sussman、Hong Tang、Wei Tang、Teague Tomesh、Norm Tubman、Chen Wang、Nathan Wiebe、Yongxin Yao、Dillon Yost 和 Yiyu Zhou。2024年。ARQUIN：多节点超导量子计算机架构。《ACM量子计算汇刊》5，3，文章 19 2024 59 3674151（2024年9月），页码。doi:10.1145/2025

[11] Rukshani Athapathu 和 George Porter。. 集合通信算法中的可重构性。载于第2届人工智能计算网络研讨会论文集（葡萄牙科英布拉）（NAIC '25）。计算机协会，纽约州纽约市，美国， 43 49 10.1145 3748273.3749203 – 。doi: / Chen

[12] Avin 和 Stefan Schmid。. 借助可重构拓扑革新数据中心网络。《ACM通讯》68，6（2025年6月），44–53。doi:10.1145/3708980[13] David Awschalom、Karl K. Berggren、Hannes Bernien、Sunil Bhave、Lincoln D. Carr、Paul Davids、Sophia E. Economou、Dirk Englund、Andrei Faraon、Martin Fejer、Saikat Guha、Martin V. Gustafsson、Evelyn Hu、Liang Jiang、Jungsang Kim、Boris Korzh、Prem Kumar、Paul G. Kwiat、Marko Lončar、Mikhail D. Lukin、David A.B. Miller、Christopher Monroe、Sae Woo Nam、Prineha Narang、Jason S. Orcutt、Michael G. Raymer、Amir H. Safavi-Naeini、Maria Spiropulu、Kartik Srinivasan、Shuo Sun、Jelena Vučković、Edo Waks、Ronald Walsworth、Andrew M. Weiner 和 Zheshen Zhang。2021年。面向下一代信息技术的量子互连（QuICs）开发。《PRX量子》2（2021年2月），017002。第1期。doi:10.1103/PRXQuantum.2.017002[14] Koji Azuma、Sophia E Economou、David Elkouss、Paul Hilaire、Liang Jiang、Hoi-Kwong Lo 和 Ilan Tzitrin。2023年。量子中继器：从量子网络到量子互联网。《现代物理评论》95，4（2023年），045006。[15] Jonathan M. Baker、Casey Duckering、Alexander Hoover 和 Frederic T. Chong。2020年。面向模块化架构的时间切片量子电路划分。载于第17届ACM计算前沿国际会议论文集（意大利西西里岛卡塔尼亚）（CF '20）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，98–107。doi:10.1145/3387902.3392617[16] Hitesh Ballani、Paolo Costa、Raphael Behrendt、Daniel Cletheroe、Istvan Haller、Krzysztof Jozwik、Fotini Karinou、Sophie Lange、Kai Shi、Benn Thomsen 和 Hugh Williams。2020年。Sirius：采用纳秒级光交换的扁平数据中心网络。载于计算机协会数据通信特别兴趣小组年度会议论文集：计算机通信的应用、技术、架构与协议（虚拟活动，美国）（SIGCOMM '20）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，782–797。doi:10.1145/3387514.3406221[17] Mateo M. Blanco、Manuel Fernández-Veiga、Ana Fernández-Vilas 和 Rebeca P. Díaz-Redondo。2025年。从物理到逻辑：量子网络中的图态连接。arXiv:2509.08384 [quant-ph] https://arxiv . 2509.08384 org/abs/ Shaileshh Bojja Venkatakrishnan、

[18] Mohammad Alizadeh 和 Pramod Viswanath。2016年。高成本电路、次模调度与近似Carathéodory定理。载于2016年ACM SIGMETRICS计算机科学测量与建模国际会议论文集（法国昂蒂布-胡安莱潘）（SIGMETRICS '16）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，75–88。doi:10.1145/2896377.2901479[19] Iulian Ioan Bîrlică、Alin Bogdan Popa、Bogdan Călin Ciobanu、Florin Pop 和 Pantelimon George Popescu。2026年。树中的纠缠：二叉树量子网络拓扑中的最优纠缠分发。《未来一代计算机系统》184（2026年），108597。doi:10.1016/j.future.2026.108597[20] Angela Sara Cacciapuoti、Claudio Pellitteri、Jessica Illiano、Laura d'Avossa、Francesco Mazza、Siyi Chen 和 Marcello Caleffi。2026年。量子数据中心：为何纠缠会改变一切。《英国皇家学会哲学汇刊A辑：数学、物理与工程科学》384，2315（2026年2月）。doi:10.1098/rsta.2024.0518[21] Marcello Caleffi、Michele Amoretti、Davide Ferrari、Jessica Illiano、Antonio Manzalini 和 Angela Sara Cacciapuoti。2024年。分布式量子计算：综述。《计算机网络》 254 2024 110672 10.1016 . .2024.110672 ( ), 。doi: /j

[22] comnet Kaushik Chakraborty、Filip Rozpedek、Axel Dahlberg 和 Stephanie Wehner。2019年。在量子互联网中进行分布式路由。arXiv:1907.11630 [quant-ph] https://arxiv . 1907.11630 org/abs/ Daniele Cuomo、Marcello

[23] Caleffi 和 Angela Sara Cacciapuoti。2020年。迈向分布式量子计算生态系统。《IET量子通信》1，1 2020 3 8 10.1049（2020年7月），– 。doi: /iet-qtc .2020.0002 Andrew J. Daley、Immanuel Bloch、

[24] Christian Kokail、Stuart Flannigan、Na-talie Pearson、Matthias Troyer 和 Peter Zoller。2022年。量子模拟中的实用量子优势。《自然》607，7920（2022年7月1日），667–676。doi:10.1038/s41586-022-04940-6

[25] Marc G. Davis、Joaquin Chung、Dirk Englund 和 Rajkumar Kettimuthu。2023年。通过量子比特和门图划分技术实现分布式量子计算。载于2023年IEEE量子计算与工程国际会议（QCE），第 01 161 167 10.1109 57702.2023.00026 卷。– 。doi: /QCE [26] 2026
Manik Dawar、Ralf Riedinger、Nilesh Vyas 和 Paulo Mendes。. 量子网络中纠缠路由的资源估算。《物理评论A》113（2026年2月），022622。第2期。doi:10.1103/vf4x-rjsd [27] Eric Ding、Barry Lyu、Bhaskar Kataria 和 Rachee Singh。2026年。Opus：面向机器学习数据中心的光子轨道优化网络架构。计算机协会，纽约州纽约市，美国，922–939。
https://doi.org/10.1145/3789240.3829187[28] Duncan Earl、K Karunaratne、Jason Schaake、Ryan Strum、Patrick Swingle 和 Ryan Wilson。2022年。第一代商用量子网络架构。arXiv: 2211 14871 [ ] . 2211.14871 。quant-ph https://arxiv [29] 2026
org/abs/ Karim S. Elsayed 和 Amr Rizk。. 面向高保真纠缠分发的非对称中继器量子存储器平衡。arXiv: 2604 24554 [ ] . 2604.24554 。quant-ph https://arxiv [30]
org/abs/ Edward Farhi、Jeffrey Goldstone 和 Sam Gutmann。2014年。一种量子近似优化算法。arXiv:1411.4028 [quant-ph] https://arxiv.org/abs/1411.4028[31] Nathan Farrington、George Porter、Sivasankar Radhakrishnan、Hamid Hajabdolali Bazzaz、Vikram Subramanya、Yeshaiahu Fainman、George Papen 和 Amin Vahdat。2010年。Helios：面向模块化数据中心的混合电光交换架构，采用自由空间光通信。载于ACM SIGCOMM 2010会议论文集（印度新德里）（SIGCOMM '10）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，
339 350 10.1145 1851182.1851223 – 。doi: / Davide Ferrari、Angela Sara [32]
Cacciapuoti、Michele Amoretti 和 Marcello Caleffi。2021年。分布式量子计算的编译器设计。《IEEE量子工程汇刊》 2 2021 1 20 10.1109 .2021.3053921 ( )，– [33] 2014
。doi: /TQE I. M. Georgescu 、 S. Ashhab 和 Franco Nori。. 量子模拟。《现代物理评论》 86（2014年3月），153–185。第1期。doi:10.1103/RevModPhys.86.153[34] Monia Ghobadi、Ratul Mahajan、Amar Phanishayee、Nikhil Devanur、Janardhan Kulkarni、Gireeja Ranade、Pierre-Alexandre Blanche、Houman Rastegarfar、Madeleine Glick 和 Daniel Kilper。2016年。ProjecToR：灵活可重构数据中心互连。载于2016年ACM SIGCOMM会议论文集（巴西弗洛里亚诺波利斯）（SIGCOMM '16）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，
216 229 10.1145 2934872.2934911 – 。doi: / Craig Gidney 和 Martin [35] 2021
Ekerå。. 如何使用2000万个含噪量子比特在8小时内分解2048位RSA整数。《Quantum》5（2021年4月），433。doi:10.22331/q- 2021 04 15 433 - - - Navid Hamedazimi、[36]
Zafar Qazi、Himanshu Gupta、Vyas Sekar、Samir R. Das、Jon P. Longtin、Himanshu Shah 和 Ashish Tanwer。2014年。FireFly：采用自由空间光通信的可重构无线数据中心互连结构。载于2014年ACM SIGCOMM会议论文集（美国伊利诺伊州芝加哥）（SIGCOMM '14）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，
319 330 10.1145 2619239.2626328 – 。doi: / Hugo [37] 2026
Jacinto、Élie Gouzien 和 Nicolas Sangouard。. 分布式量子计算的网络需求。《物理评论研究》8（2026年2月），013205。第1期。doi:10.1103/v9ln-c4v2[38] George Karypis 和 Vipin Kumar。1998年。一种用于不规则图划分的快速、高质量多层次方案。《SIAM科学计算杂志》20, 1（1998年），359–392。arXiv:https://doi.org/10.1137/S1064827595287997 doi:10.1137/S1064827595287997[39] 是德科技。2026年。自动化光开关。https: // www.keysight.com/us/en/products/ethernet-traffic-emulation/lab-test-automation/automation-optical-switches.html[40] Marii Koyama、Claire Yun、Amin Taherkhani、Naphan Benchasattabuse、Bernard Ousmane Sane、Michal Hajdušek、Shota Nagayama 和 Rodney Van Meter。2024年。面向成对出口贝尔态分析器池的最优交换网络。载于2024年IEEE量子计算与工程国际会议（QCE）。IEEE，
1897 1907 10.1109 60285.2024.00219 – 。doi: /qce Abhishek [41]
Vijaya Kumar、Arjun Devraj、Darius Bunandar 和 Rachee Singh。2024年。服务器规模光子互连的优势。载于第23届ACM网络热点研讨会论文集（美国加利福尼亚州尔湾）（HotNets '24）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，
290 299 10.1145 3696348.3696856 – 。doi: / Qing Li、 [42] 2016
Marcelo Davanço 和 Kartik Srinivasan。. 利用硅纳米光子学实现高效、低噪声的单光子级频率转换接口。《自然·光子学》 10, 6 2016 406 414 10.1038 .2016.64 [43]
（2021年4月），– 。doi: /nphoton Xudong Liao、Yijun Sun、Han Tian、Xinchen Wan、Yilun Jin、Zilong Wang、Zheng-hang Ren、Xinyang Huang、Wenxue Li、Kin Fai Tse、Zhizhen Zhong、Guyue Liu、Ying Zhang、Xiaofeng Ye、Yiming Zhang 和 Kai Chen。2025年。MixNet：面向分布式混合专家训练的运行时可重构光电网络架构。载于ACM SIGCOMM 2025会议论文集（葡萄牙科英布拉圣弗朗西斯科修道院）（SIGCOMM '25）。计算机协会，纽约州纽约市，美国，
554 574 10.1145 3718958.3750465 – 。doi: / He Liu、 [44]
Matthew K. Mukerjee、Conglong Li、Nicolas Feltman、George Papen、Stefan Savage、Srinivasan Seshan、Geoffrey M. Voelker、David G. Andersen、Michael Kaminsky、George Porter 和 Alex C. Snoeren。2015年。混合电路/分组网络的调度技术。载于第11届ACM 新兴网络实验与技术会议（德国海德堡）（CoNEXT '15）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章编号 41, 13 10.1145 2716281.2836126 页。doi: / 刘俊宇与 [45] 2024
Liang Jiang。. 量子数据中心：观点。IEEE Network
38, 5 2024 160 166 10.1109 .2024.3397836 ( )，–。doi: /MNET D. [46]
Main、P. Drmota、D. P. Nadlinger、E. M. Ainley、A. Agrawal、B. C. Nichol、R. Srinivas、G. Araneda与D. M. Lucas。2025。跨光网络链路的分布式量子计算。《自然》638, 8050 (2025), 383–388。doi:10.1038/s41586-024-08404-x[47] Francesco Mazza、Marcello Caleffi与Angela Sara Cacciapuoti。2024。量子局域网：基于双色可着色图态的按需网络拓扑。见2024量子通信、网络与计算国际会议（QCNC）。127–134。
doi:10.1109/QCNC62729.2024.00029[48] Francesco Mazza、Caitao Zhan、Joaquin Chung、Rajkumar Kettimuthu、Marcello Caleffi与Angela Sara Cacciapuoti。2025。使用SeQUeNCe对量子局域网中纠缠赋能的连接进行仿真。见ICC 2025 - IEEE国际通信会议。IEEE，
1 6 10.1109 52391.2025.11434940 –。 [49]
doi: /icc William M. Mellette、Rob McGuinness、Arjun Roy、Alex Forencich、George Papen、Alex C. Snoeren与George Porter。2017。RotorNet：可扩展、低复杂度的光数据中心网络。见ACM数据通信特别兴趣小组会议论文集（美国加利福尼亚州洛杉矶）（SIGCOMM '17）。计算机协会，美国纽约州纽约市，267–280。
doi:10.1145/3098822.3098838[50] C. Monroe、R. Raussendorf、A. Ruthven、K. R. Brown、P. Maunz、L.-M. Duan与J. Kim。2014。采用原子存储器与光子互连的大规模模块化量子计算机架构。《物理评论A》89, 2（2014年2月），022317。doi: 10.1103 .89.022317 /PhysRevA Ashley Montanaro。. 量子算法：综述。 [51] 2015
npj Quantum Information
2 2015 2992738 ( )。
[52]
https://api.semanticscholar.org/CorpusID: Matthew Nance Hall、Klaus-Tycho Foerster、Stefan Schmid与Ramakrishnan Durairajan。2021。可重构光网络综述。Optical Switching and Networking
41 2021 100621 10.1016 . .2021.100621 ( )，。doi: /j osn [53] 2022
Reza Nejabati、王锐与Dimitra Simeonidou。. 动态量子网络：从量子数据中心到量子云计算。见2022年光纤通信会议（OFC）。Optica出版集团，Th3D.1。
doi:10.1364/OFC.2022.Th3D.1[54] Mihir Pant、Hari Krovi、Don Towsley、Leandros Tassiulas、Liang Jiang、Prithwish Basu、Dirk Englund与Saikat Guha。2019。量子互联网中的纠缠路由。npj Quantum Information 5, 1 (2019), 25。
doi:10.1038/s41534-019-0139-x [55] Nicolò Lo Piparo、William J. Munro与Kae Nemoto。2026。面向量子纠缠分发稳定性的自适应资源与存储控制。arXiv: 2603 24874 [ ] . 2603.24874 。quant-ph https://arxiv [56] [ ] 7000
org/abs/ Polatis。无日期。. POLATIS®光电路交换机。https: // www.hubersuhner.com/en/shop/product/other-systems/optical-switches/rack-mount-circuit-switches/85223159/polatis-7000-optical-circuit-switch.[57] Matteo Pompili、Sophie LN Hermans、Simon Baier、Hans KC Beukers、Peter C Humphreys、Raymond N Schouten、Raymond FL Vermeulen、Marijn J Tiggelman、Laura dos Santos Martins、Bas Dirkse等。2021。远程固态量子比特多节点量子网络的实现。《科学》372, 6539 (2021), 259–264。[58] George Porter、Richard Strong、Nathan Farrington、Alex Forencich、Pang Chen-Sun、Tajana Rosing、Yeshaiahu Fainman、George Papen与Amin Vahdat。2013。将微秒级电路交换集成到数据中心。见ACM SIGCOMM 2013会议论文集（中国香港）（SIGCOMM '13）。计算机协会，美国纽约州纽约市，447–458。doi:10.1145/2486001.2486007[59] Shahrooz Pouryousef、Eneet Kaur、Hassan Shapourian、Don Towsley、Ramana Kompella与Reza Nejabati。2026。量子数据中心架构基准测试：性能与可扩展性视角。arXiv:2601.01353 [quant-ph] https://arxiv.org/abs/2601.01353[60] Shahrooz Pouryousef、Reza Nejabati、Don Towsley、Ramana Kompella与Eneet Kaur。2025。量子数据中心中远程门执行的网络感知调度。arXiv:2504.20176 [quant-ph] https://arxiv.org/abs/2504.20176[61] Panagiotis Promponas、Leonardo Bacciottini、Paul Polakos、Gayane Vardoyan、Don Towsley与Leandros Tassiulas。2026。全光子与配备存储器的量子交换机中的速率-保真度权衡。arXiv:2603.02610 [quant-ph] https://arxiv . 2603.02610 org/abs/ [62]
Nils Quetschlich、Lukas Burgholzer与Robert Wille。2023。MQT Bench：面向量子计算的软件基准测试与设计自动化工具。Quantum 7 (2023), 1062。arXiv:2204.13719 doi:10.22331/q-2023-07-20-1062 MQT Bench可在https://mqt-bench.app/获取。[63]
Mahir Rahman、Samuel Joseph、Nihar Kodkani、Behnaz Arzani与Vamsi Addanki。2026。Harvest：面向扩展域中集合通信的自适应光子交换调度方案。见ACM SIGCOMM 2026会议论文集（美国科罗拉多州丹佛）（SIGCOMM '26）。计算机协会，美国纽约州纽约市，
1576 1600 10.1145 3789240.3829166 –。doi: / [64] 2026
Deeksha P Rao与Vamsi Addanki。. 重配置延迟究竟是什么？光子交换的端到端视角。见第25届ACM网络热点专题研讨会论文集（HotNets '26）。

[65] Jed A. Rowland、Christopher Perrella、Rachel F. Offer、Andre N. Luiten、Ben M. Sparkes与Till J. Weinhold。2025。充铷空芯光子晶体光纤中近红外到电信波段频率转换的表征。Optics Express 33, 8（2025年4月），18076。doi:10.1364/oe.549459[66] Hassan Shapourian、Eneet Kaur、Troy Sewell、Jiapeng Zhao、Michael Kilzer、Ramana Kompella与Reza Nejabati。2025。量子数据中心基础设施：可扩展架构设计视角。arXiv:2501.05598 [quant-ph] https://arxiv.org/abs/2501.05598[67] Shouqian Shi与Chen Qian。2020。量子网络的并发纠缠路由：模型与设计。见ACM数据通信特别兴趣小组年度会议论文集：计算机通信的应用、技术、架构与协议（美国虚拟活动）（SIGCOMM '20）。计算机协会，美国纽约州纽约市，62–75。doi:10.1145/3387514.3405853。[68] P.W. Shor。. 量子计算算法：离散对数与因数分解。见第35届计算机科学基础年度研讨会论文集。124–134。doi:10.1109/SFCS.1994.365700[69] Peter W. Shor。1997。量子计算机上素数因数分解与离散对数的多项式时间算法。SIAM J. Comput. 26, 5 (1997), 1484–1509。arXiv:https://doi.org/10.1137/S0097539795293172 doi:10.1137/S0097539795293172[70] LJ Stephenson、DP Nadlinger、BC Nichol、S An、P Drmota、TG Ballance、K Thirumalai、JF Goodwin、DM Lucas与CJ Ballance。2020。基本量子网络上量子比特的高速率、高保真度纠缠。物理评论快报 124, 11 (2020), 110501。[71] Ranjani G. Sundaram、Himanshu Gupta与C. R. Ramakrishnan。2024。在量子网络上以最小电路执行时间分发量子电路。见2024 IEEE量子计算与工程国际会议（QCE），第01卷。IEEE，1938–1948。doi:10.1109/QCE60285.2024.00224[72] Aman Yacob Tekleab、Yifeng Shen、Yoshii Yutaro、Amin Taherkhani、Rodney Van Meter与Shota Nagayama。2026。面向量子网络的分布式交换协议。arXiv:2605.07295 [quant-ph] https://arxiv.org/abs/2605.07295[73] Tim van Leent、Matthias Bock、Florian Fertig、Robert Garthoff、Sebastian Eppelt、Yiru Zhou、Pooja Malik、Matthias Seubert、Tobias Bauer、Wenjamin Rosenfeld、Wei Zhang、Christoph Becher与Harald Weinfurter。2022年。通过33公里电信光纤纠缠单个原子。《自然》607, 7917 (2022年), 69–73。doi:10.1038/s41586-022-04764-4 780 nm铷光子到1517 nm的保偏量子频率转换，每个转换器的外部器件效率为57%（2.44分贝）；780 nm光纤在2.5公里内衰减10倍（4分贝/公里）。[74] Abhishek Vijaya Kumar、Eric Ding、Arjun Devraj、Darius Bunandar与Rachee Singh。2026。面向多租户机器学习的可重构环面结构。见第31届ACM编程语言与操作系统架构支持国际会议论文集，第2卷（美国）（ASPLOS '26）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1547–1565。doi:10.1145/3779212.3790238[75] Francesco Vista、Stephen DiAdamo、Eneet Kaur、Hassan Shapourian与Reza Nejabati。2025。量子数据中心网络中的纠缠请求调度。IEEE Network 39, 3 (2025), 188–195。doi:10.1109/MNET.2025.3532847[76] Weitao Wang、Dingming Wu、Sushovan Das、Afsaneh Rahbar、Ang Chen与T. S. Eugene Ng。2022年。RDC：利用边缘拓扑可重构性实现高能效数据中心网络拥塞缓解。见第19届USENIX网络系统设计与实现研讨会（NSDI 22）。USENIX协会，华盛顿州伦顿，1267–1288。https://www.usenix.org/conference/nsdi22/presentation/wang-weitao-rdc[77] Xiaoliang Wu、Alexander Kolar、Joaquin Chung、Dong Jin、Tian Zhong、Rajkumar Kettimuthu与Martin Suchara。2021。SeQUeNCe：可定制的量子网络离散事件模拟器。Quantum Science and Technology 6, 4 (2021), 045027。doi:10.1088/2058-9565/ac22f6[78] Zhenguo Wu、Benjamin Klenk、Larry Dennison与Keren Bergman。2025。ACTINA：将电路交换技术适配于人工智能网络架构。见高性能计算、网络、存储与分析国际会议论文集（SC '25）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1211–1222。doi:10.1145/3712285.3759842。[79] Christof Zalka。. 在量子计算机上模拟量子系统。Proceedings: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 454, 1969 (1998), 313–322。http://www.jstor.org/stable/53167[80] Hezi Zhang、Yiran Xu、Haotian Hu、Keyi Yin、Hassan Shapourian、Jiapeng Zhao、Ramana Rao Kompella、Reza Nejabati与Yufei Ding。2025。SwitchQNet：利用交换网络优化量子数据中心的分布式量子计算。见第52届计算机架构国际年度研讨会论文集（日本东京）（ISCA '25）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1449–1463。doi:10.1145/3695053.3731046[81] Jiapeng Zhao、Stéphane Vinet、Amir Minoofar、Michael Kilzer、Lucas Wang、Galan Moody、Vijoy Pandey、Ramana Kompella与Reza Nejabati。2026。面向可扩展量子网络的通用保量子信息光子交换机。arXiv:2604.21902 [quant-ph] https://arxiv.org/abs/2604.21902[82] Jiapeng Zhao、Yang Xu、Xiyuan Lu、Eneet Kaur、Michael Kilzer、Ramana Kompella、Robert W. Boyd与Reza Nejabati。2025。可扩展的低延迟纠缠面向分布式量子计算的分发。*Optica Quantum* 3, 6（2025），606–616。doi:10.1364/OPTICAQ.569352[83] Shuoyi Zhao、Liangjun Lu、Linjie Zhou、Dong Li、Zhanzhi Guo和Jianping Chen。2016。16 × 16由波导微加热器驱动的硅基马赫–曾德尔干涉仪开关。*Photonics Research* 4, 5（2016），202–207。doi:10.1364/PRJ.4.000202[84] Yangming Zhao、Gongming Zhao和Chunming Qiao。2022年。量子网络中面向吞吐量最大化的端到端保真度感知路由与纯化。载于*IEEE INFOCOM 2022 - IEEE*计算机通信会议。480–489。doi:10.1109/INFOCOM48880.2022.9796814