量子网络的路由协议：概述与挑战

Binayak Kar、Pankaj Kumar 计算机科学与信息工程系，台湾科技大学，台北，台湾 电子邮箱：bkar@mail.ntust.edu.tw、pnkazaayan@gmail.com

arXiv:2305.00708v1 [quant-ph] 1 May 2023

摘要—**过去50年来，传统网络路由设计经历了显著发展，从具有静态节点的小型网络演变为连接数十亿台设备的大型系统。这一进步得益于关注点分离原则，即将网络功能整合到图或随机网络设计中，并采用特定的网络协议来实现多样化的通信能力。本文旨在阐述为量子网络设计路由技术的潜力。由于量子力学的作用，量子网络呈现出独特的性质。量子路由设计必须充分考虑量子纠缠和量子信息的独特特征，因此需要大幅偏离传统网络设计协议。然而，实施这些技术面临诸多重大挑战，例如量子系统中的退相干与噪声、受限的通信范围，以及高度专业化的硬件要求。本文首先考察量子路由设计方法的关键研究，随后介绍量子路由的基本方面、相关量子操作，以及构建高效且稳健的量子网络所需的步骤。本文总结了量子路由技术的当前状态，包括其原理、协议和挑战，并着重指出潜在的应用与未来发展方向。**

索引词—**纠缠、保真度、量子信息、量子路由**

I. 引言

本文聚焦于量子网络中的一项根本挑战：如何将量子信息路由至正确的目的节点，或者更准确地说，如何控制网络中的纠缠。为了与经典网络建立联系，我们先简要介绍量子网络的组成。在量子网络中， [1], 每个节点都代表一台微型量子计算机，能够存储多个量子比特并对其执行操作。在量子网络中，节点可以通过传统的经典通信信道交换经典控制信息。这可以通过直接物理连接实现，也可以采用互联网等其他方式。此外，彼此物理距离较近的节点——最远约相隔 250 千米——可以通过电信光纤等直接量子通信信道，利用光学连接。由于量子纠错需要大量量子比特，而且量子比特无法复制，也无法像经典中继器处理信号那样放大信号，因此要实现更远距离的直接量子通信颇具挑战。因此，量子中继器的工作方式与经典中继器有着根本区别。

量子隐形传态是一种重要的通信协议， [2], 由量子信息系统支持，是这种依赖关系的典型例子。具体而言，量子隐形传态提供了一种非凡的方法，无需实际移动包含量子比特的粒子，即可传输量子比特。然而，这一过程需要两种不同的通信信道。第一种是量子信道：源节点和目的节点各有一个量子比特，两者组成一对共享的（最大）纠缠态。第二种则更为传统，由从源节点传输至目的节点的比特组成。事实上，经典信号传输不仅是实现量子隐形传态的必要条件，也是各种量子网络任务和功能的常见前提 [3], ，涵盖从纠缠生成到蒸馏与交换等过程。

必须仔细评估并考虑传统路由与量子路由之间的相互依存关系，才能成功设计量子路由 [4]。然而，尽管这种相互依存关系至关重要，人们对它的理解仍然不足，导致存在许多亟待解决的问题[5]。本文旨在深入探讨量子网络中的量子路由设计技术，使读者能够：

- 认识量子网络中路由协议的高效设计，以理解网络内的信息流。
- 考察网络设计中的路由过程以及量子操作（量子隐形传态、交换）。

本文其余部分的结构如下：第二节探讨量子网络组件，第三节讨论量子操作。第四节介绍量子路由协议的各种设计技术，第五节讨论未来的研究方向。最后，第六节总结本文，概述主要发现，并强调量子网络对量子通信领域及其他领域的潜在影响。

II. 量子网络组件

A. 量子处理器

量子处理器类似于经典网络中的端主机，并与相邻的量子提议者（也称为量子节点）相连。量子信道将这些处理器连接起来，以执行量子网络任务并运行通信应用进行交互。量子处理器不同于经典节点，其硬件包括量子

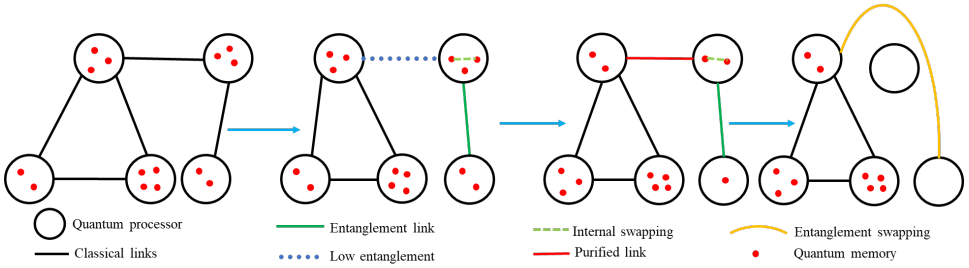


图 1：量子网络中的纠缠生成、纯化与交换。

存储量子比特，用于在量子系统中实现量子纠缠和量子隐形传态。这些量子处理器通过传统互联网互连，并可自由交换经典信息。

B. 量子中继器

在量子网络中，建立两个相距甚远的量子节点之间的连接颇具挑战。与传统网络类似，量子中继器充当中继站。如图 1 所示，它们通过量子交换促进远距离纠缠连接。量子中继器还可以使用传统互联网与其他中继器和量子处理器交换控制消息。每个量子处理器都具备完整的中继器功能，因此我们将量子处理器和中继器统称为节点。

C. 量子交换机

量子交换机是一种能够在量子网络中控制和操纵量子态的设备。它充当守门者，调度量子信息的流动，并促进量子态从一个位置传输到另一个位置。量子交换机的设计与实现是量子通信和量子计算的重要组成部分，因为它们在确保量子系统的可靠性和稳定性方面发挥着至关重要的作用。

D. 量子信道

物理连接，例如光学 [6], 和自由空间，在两个节点之间建立量子信道，从而促进量子比特的传输。然而，量子信道本质上具有损耗，每次尝试建立信道 c 纠缠的成功率由 p_c表示。该成功率会随着信道物理长度的增加而呈指数下降，如方程 $p_c = e^{-\alpha L}$所示，其中 L 是信道的物理长度，α 是取决于物理介质 [7]的常数。

III. 量子网络操作

A. 纠缠纯化

在量子网络中，纠缠纯化旨在将两个低保真度贝尔对合并为一个保真度更高的贝尔对，这可以通过受控非门来实现（CNOT）门。考虑比特翻转错误，纯化操作后的保真度可按 [8], 计算

$$f(x_1, x_2) = \frac{x_1 x_2}{x_1 x_2 + (1 - x_1)(1 - x_2)},$$

其中，x_1和 x_2 是贝尔对的保真度。假设相同边 a 的保真度相等，则 x_1=x_2。该过程可以递归地应用于量子网络，以实现整个网络中更高的保真度，如图 1 所示。

B. 纠缠交换

纠缠交换是一种颇具吸引力的技术，可用于在量子节点之间建立远距离连接。量子中继器或拥有两个节点间纠缠对的节点，可以将两段单跳纠缠合并为量子节点之间的直接纠缠。通过使用图 1 所示的纠缠交换操作，可以沿着承载纠缠对的中继器路径建立远距离连接。然而，由于中继器 [9] 上存在非完美测量（即噪声操作），多跳纠缠保真度可能会在纠缠交换过程中下降。此外，由于不同量子信道上的纠缠对具有不同的保真度，不同的路由路径可能会导致交换后端到端纠缠连接的保真度各不相同。

IV. 量子协议设计技术

本节着重探讨如何在建立适当模型后，为量子信息路由优化分配路径，或者说，如何尽可能有效地管理纠缠。我们现在面对的是一个相当标准的资源分配与管理问题。本文将采用上述模型，并进一步作出简化，例如假设所有路由路径的存续时间任意，并忽略经典通信时延，以给出解析结果。尽管如此，本文还将探讨若干具有特定特点的协议；即便放宽这些额外的简化假设，这些协议仍有望取得良好性能。

该论文涵盖了量子网络的有效设计，以便在图 2 所示的特定时隙内传输信息。量子路由在图上的扩张率较低。网络架构的约束由一个包含 n 个顶点的基本图 G 表示，其中顶点集 $V(G)$ 表示量子比特，而允许的

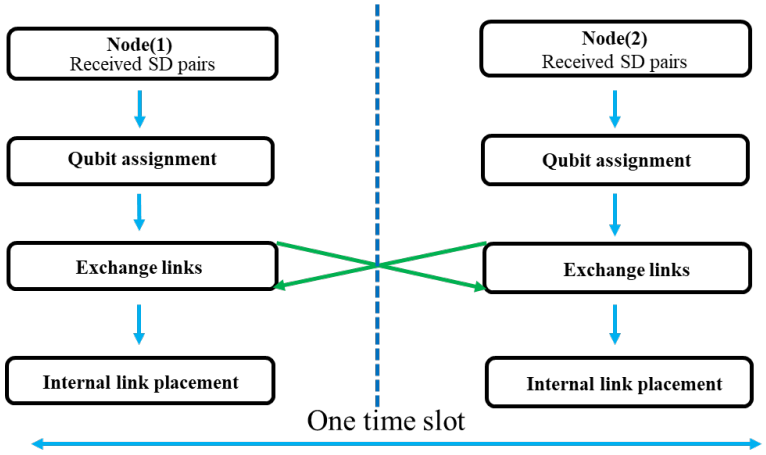
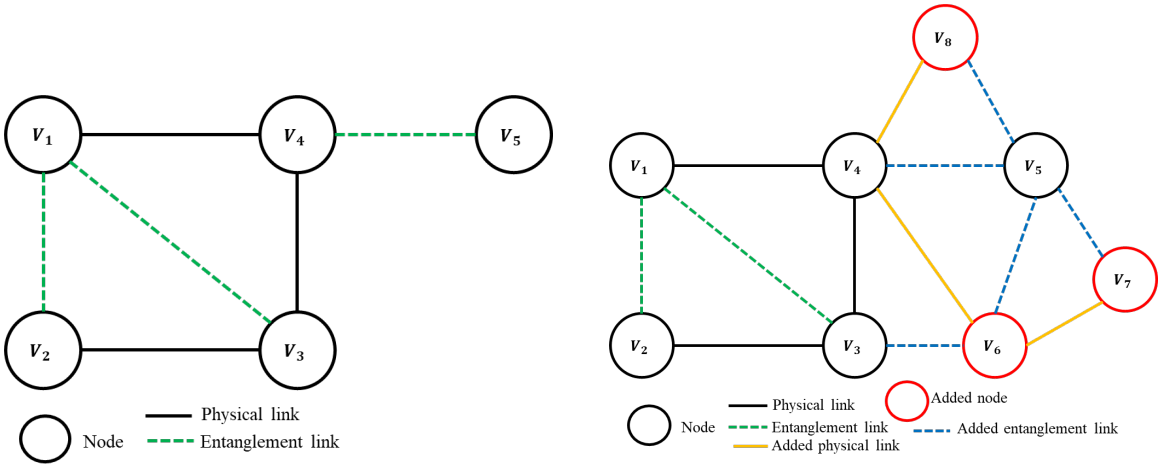


图 2：量子网络中通信分配的过程。



(a) 由五个节点组成的网络。 (b) 向网络中添加新的边和节点。

图 3：用于量子网络的基于边细分的网络设计。

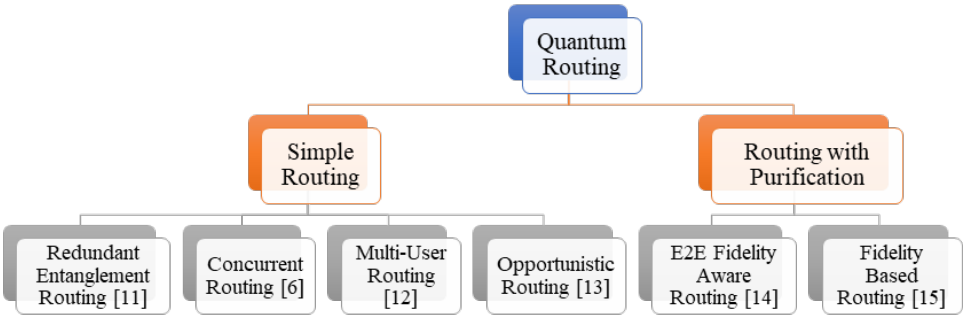


图 4：量子路由的分类。

它们之间的相互作用由边集$E(G)$表示。网络设计中的核心概念 [10]，涉及从基本结构开始，通过边细分逐步模拟目标网络。细分一条边包括用一个节点替换该边，并将其连接到该边的端点。细分后，新增的节点相互连接以创建所需的结构。重复此技术，直到该图准确表示物理网络中的节点和连接。随后，可以利用先前通过细分生成的图作为结构来分发纠缠。重复此技术，直到该图准确表示物理网络中的节点

和连接。例如，在图 3(a) 中，网络包含五个节点（V_1、V_2、V_3、V_4、V_5），黑线表示物理链路，绿色虚线表示纠缠链路。在图 3(b) 中，黄色线表示新添加的边，红色节点（如 V_6、V_7、V_8）表示添加到网络中的节点。

根据上述研究，量子路由可分为两类：简单路由和带纯化的路由，如图 4 所示。在简单路由中，系统总会寻找一条替代的纠缠路径来建立连接；而在带纯化的路由中，为了提高通信效率，会对量子链路进行纯化，以达到所需的保真度阈值。总结这些概念有助于读者为理解尚未解决的挑战，以及开发成功且全面的量子路由基础设施所需的工作，打下坚实基础。

A. 简单路由

在此路由过程中，网络节点尝试通过不同的路由路径相互连接。这些路径可以是最短路径，也可以是到达目的节点的替代路线。在量子网络中，简单路由的作用是在双方之间交换贝尔对。在这项技术中，双方交换信息。在这项技术中，两个节点之间的信息交换依赖于量子隐形传态，或在节点之间交换量子存储器。尤其是在多方量子网络中，会使用预共享链路连接各节点。然而，这需要量子中继器具备较大的量子存储器和较高的信道容量。图 5 展示了简单路由可能采用的量子网络架构。

1) 冗余纠缠路由：Zhao 等人 [11], 首次全面开展了量子网络协议设计工作，之后该协议得到了改进。本文中，作者提出了冗余纠缠供应与选择（REPS），并首次介绍了量子网络的经典网络设计。在这一模型中，他们假设网络在一个时隙内实现时间同步。此外，该模型还假设，像软件定义网络（SDN）这样的集中式控制系统掌握网络的所有基本信息，例如网络拓扑、每条边的资源，以及纠缠生成的成功概率。图 5(a) 概述了 REPS 中量子路由设计技术的四个阶段，具体如下。

1) 在网络配置的初始阶段，中央控制器收集有关源节点—目的节点对（S-D）的信息，并确定用于建立外部链路的最佳边集合。这些链路也可在发生故障时用作备用链路。该决策过程由容错供应（PFT）算法控制，该算法沿边建立重复的外部链路，以确保冗余。

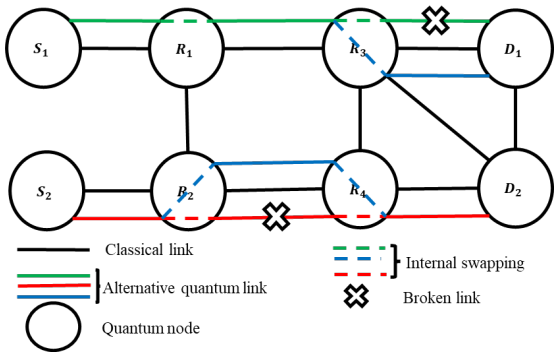
2）在后续阶段，中央控制器会指示相关节点按照 PFT 算法指定的方案建立外部链路。然而，尽管已分配资源，也可能无法成功建立所有链路。

3）流程的第三阶段，中央控制器接收节点报告，了解已成功建立的外部链路。根据这些信息，中央控制器使用两种算法来确定构建纠缠路径的最高效方式。第一种算法——纠缠路径选择（EPS）——使用随机舍入，选择一组对于纠缠连接而言近乎最优的路径。第二种算法——纠缠链路选择（ELS）——选择要使用的适当外部链路，并创建内部链路，以构建纠缠路径。

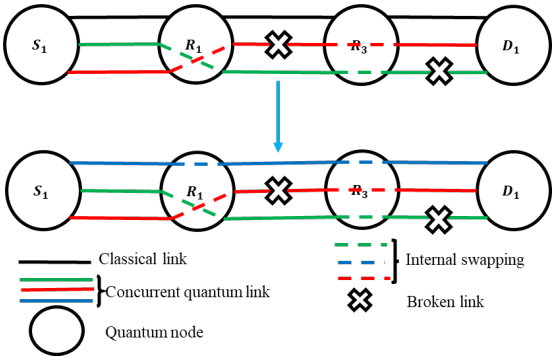
4）在第四阶段，节点反馈其进展情况，中央控制器接收这些信息。一旦外部路径和纠缠路径建立，源节点就可以在当前时隙结束前通过纠缠连接发送量子比特。该过程确保量子网络完成配置并高效运行。

2）并发路由： Shi 等人 [6],提出了一种用于量子网络的并发纠缠路由，其基础是寻找具有可用量子资源（存储器）的备用路由路径。在这篇文章中，他们重点研究了纠缠路由，目标是在量子网络中构建长距离纠缠。他们介绍了以下三种设计技术，用于定义量子网络的并发纠缠路由。

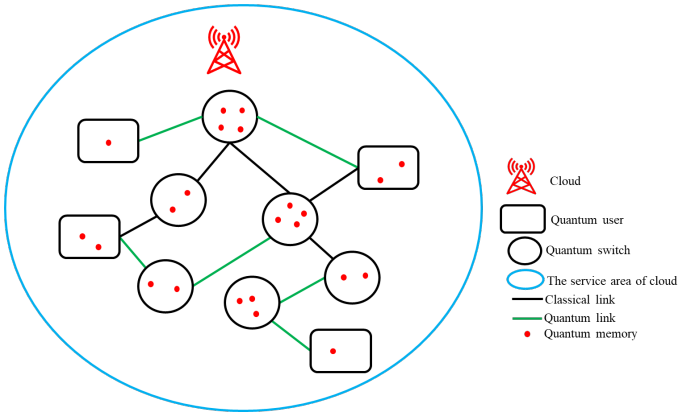
1) 基于全局拓扑的路径查找和基于局部链路状态的路径恢复：网络表示为图 $G = (V, E, C)$，通常保持稳定，且所有节点都知晓该网络。然而，如图 4 所示，每个时隙中的网络链路都高度易变且具有不确定性。由于网络拓扑的变化无法传达到整个网络，尤其是在纠缠迅速衰减时，所选节点会利用全局拓扑信息（如图 5(b) 所示）协商确定一组路径，并尝试使用局部链路状态信息从链路故障中恢复。2) 优选宽路径：网络中每条边至少有 W 个并行信道。图 5(b) 展示了一条从源节点到目的节点的 2 路径。与图中所示的备选路径相比，宽路径被认为更加可靠，因为只有在单个步骤中两条链路同时发生故障时，它才会失效。节点会协调交换技术，而不是任意作出选择。每个信道都分配有唯一的全局标识符；在纠缠过程中，节点会在其前驱链路和后继链路之间建立内部链路。重复此过程，直到无法再为该路径建立内部链路为止。3) 离线和在线路径选择：作者概述了在特定时间范围内为源-目的节点对选择路由的两种方法。第一种方法是在时隙开始前进行离线预计算，由所有节点计算并对多条候选路径进行排序。每个时隙中，再为当前的源-目的节点对选择一条预先确定的路径。第二种方法称为



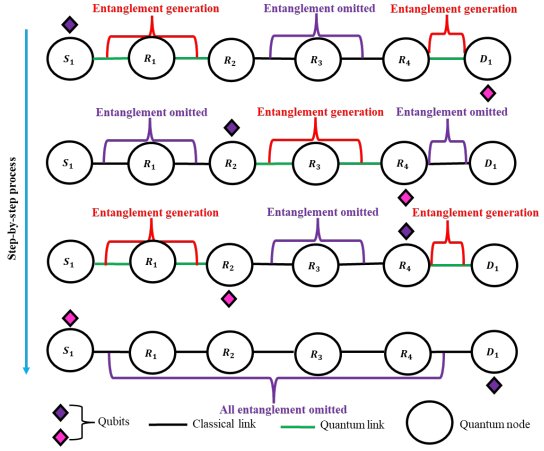
（a）冗余纠缠路由——其中实心蓝线（R_3, D_1）和（R_2, R_4）为冗余路径。



（b）并发路由——其中所有实心蓝线、红线和绿线表示一个时隙内的并发路径。



（c）多用户路由——其中所有量子用户彼此不重叠地与量子交换机进行通信。



（d）机会式路由——其中菱形蓝色量子比特传输方向为从左至右，粉色量子比特传输方向为从右至左。

图 5：简单路由设计技术。

争用感知在线算法，不执行预计算。相反，它会在每个时隙内为每个源-目的节点对寻找一条无冲突路径。如果网络有足够的量子比特和信道，能够以满容量支持所有路径，则该路径被视为“无争用”。

3) 多用户路由：与考虑的其他方案不同，Zeng 等人提出的量子网络设计 [12],采用多纠缠路由，以便在网络中容纳更多量子用户。具体而言，作者将网络描绘成类似云端的结构。作者在图 5(c) 中进一步阐述并展示了多个量子用户对的纠缠路由过程：该过程分为两部分，涵盖离线阶段和在线阶段 [8]。

1) 离线阶段： 量子网络的主要重点是为量子用户对设计离线纠缠路由，然后将路由路径传送至交换机，以进行在线纠缠。云端在量子网络中进行离线路由协议设计。假设云端完整掌握网络的所有离线信息，例如量子用户对的信息、网络拓扑（包括交换机方向♀♀♀♀♀♀以及连接），以及每台交换机的信息（包括可用量子比特的数量）。云端根据这些信息，为各量子用户对计算路由路径，同时考虑交换机容量的限制。计算完成后，这些路由路径会通过互联网传输到交换机，以建立纠缠。

2) 在线阶段：在此阶段，量子交换机根据从云端收到的路由路径，尝试在链路之间生成纠缠，然后执行网络交换。纠缠和交换本质上都是概率过程。链路上的纠缠持续时间很短，因此沿路径进行的所有纠缠生成和交换过程都必须在单个时隙内完成。为建立纠缠，量子网络中的所有交换机都进行时间同步，并同时启动纠缠过程。在沿链路进行纠缠生成以及在网络中进行交换的过程中，交换机遵循分配给各量子用户对的路由路径。如果某些交换机未能在构建量子用户对路径所需的部分链路上生成纠缠，就会尝试在本地构建一条恢复路径。交换机可以获取

附近链路状态的信息，并通过互联网与其他交换机通信。

4）机会式路由：Farahbakhsh 等人 [13]，开发了一种新颖的方法，用于在量子网络中路由请求，以尽量缩短总等待时间。这种称为机会式路由的路由技术，允许请求沿路径尽可能快速地前进，即使路径上的某些资源尚不可用。即使请求只需经过一跳，也会尽早进行路由。图 5(d) 展示了一个简单场景中的机会式路由方法。蓝色和粉色请求分别从最左侧和最右侧的节点发出。每一步都会随机生成若干条链路（以绿色链路表示），请求利用这些链路继续前进。随后，这些链路会恢复到未生成状态（黑色）。请求不会等待所有链路都可用，而是抓住任何机会继续前进。为简化图示，省略了链路连续生成失败时的中间步骤。

量子交换 [13]中转发请求有两种解释方式。第一种是在交换步骤成功后，立即沿路径转发请求；第二种则是等待整个交换过程完成，再通过一次量子隐形传态转发请求。两种方法都具有机会性，因为它们都会尽早启动交换过程。机会性可以应用于两个层面：首先，利用交换过程部分环节的生成时间；其次，在交换过程中采取机会式行动。无论采用哪种方法，如果交换过程的某个部分失败，请求都不必从头开始。不过，第一种方法可能会占用部分中间节点的存储器，从而对其他请求的路由产生负面影响。另一方面，第二种方法无需额外资源即可处理请求，但每当交换过程的某个部分失败时，都必须重新开始。如果链路一旦可用就立即转发请求，大规模情况下某些请求的路由效率可能会降低。此外，请求可能具有不同的优先级。因此，机会式方法必须足够灵活，以支持高度动态的量子网络所需的动态路由能力。

B. 采用纯化的路由

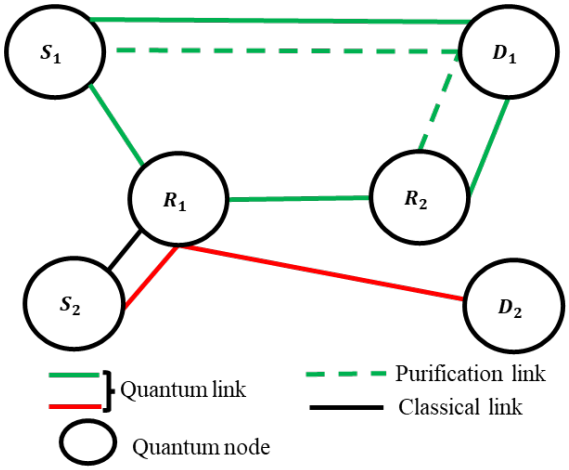
在图 6 所示的这种路由技术中，为了在相邻节点之间建立连接，每条纠缠链路都必须达到一定的保真度阈值。当纠缠过程中的保真度值超过该阈值时，即可建立连接。如果未达到阈值，则需要先对保真度进行纯化，然后再生成下一次纠缠。这个迭代过程会持续进行，直到各条链路上的保真度达到较高水平。在定义网络时，首先使用简单路由在节点之间建立链路，并根据最短距离选择路径。我们从一种初始配置开始：通过光学链路连接的节点共享最大纠缠的量子比特对。执行适当的纠缠交换步骤后，便形成了网络。人们已经研究了如何利用测量和经典通信对任意已连接的链路进行纯化，并考察了其在量子网络中的应用。

1）端到端保真度感知路由：Zhao 等人 [14],提出了端到端（E2E）保真度感知路由与纯化（EFiRAP），这是一种旨在优化网络吞吐量的路由设计方法。EFiRAP 负责确定应使用的适当纠缠路径、识别需要纯化的纠缠链路，并计算纯化所需的额外贝尔对数量。EFiRAP 采用类似于软件定义网络（SDN）的集中式运行方式。EFiRAP 主要有两种实现方法。第一种涉及测量 E2E 保真度的设计技术，第二种则是一种分析方法，用于识别能够高效纯化资源的关键链路。EFiRAP 分两个阶段解决 E2E 保真度感知纠缠路由的挑战。

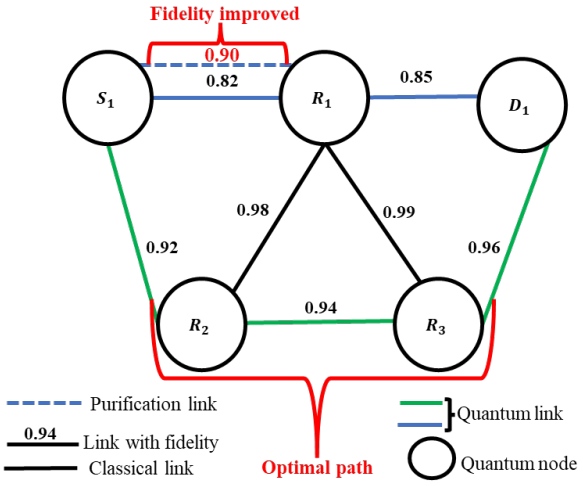
首先，该模型生成一组候选纠缠路径（CEPS），其中 CEPS 中的每个集合都提供一条纠缠路径及其相关纯化方案的详细信息。在 CEPS 中，两个组件可以共享同一条纠缠路径，但采用不同的纯化方法。CEPS 中的每个元素都有可能创建满足最低 E2E 保真度标准的纠缠链路。为实现这一目标，采用了纠缠路径准备（EPP）算法。CEPS 创建完成后，EFiRAP 将从中选择特定组件，以建立能够优化网络吞吐量的纠缠连接。该选择过程会考虑可用资源的有限性，例如链路容量（量子信道数量）以及每个节点可用的量子存储器；这些资源必须由所有相互竞争的纠缠连接共享。纠缠路径选择（EPS）算法用于完成此任务。图 6(a) 所示的路由场景进一步说明了这一过程。

2）基于保真度的路由：Li 等人 [15],提出了一种用于量子网络中纠缠路由的设计，该设计支持纯化，并确保多个源—目的节点对具有较高的保真度。该设计（如图 6(b) 所示）旨在满足保真度约束的同时，最小化纠缠对的成本。为实现这一目标，作者提出了 Q-PATH 算法，该算法搜索成本最低的可能路由路径和纯化决策，并迭代更新纯化决策。该算法在每次迭代中设定一个预期成本值，并检查所有可能的路由方案，以找到成本最低的方案。尽管该算法在每次迭代中会生成多个路由方案，但这些方案的纠缠对成本必须全部相同。在获得实际成本值后，算法输出成本最低的路由方案。该路由的步骤如下。

1) 初始化：算法为每条边计算一张纯化表，以满足路由请求的保真度约束。如果某条边即使经过纯化也无法生成满足该约束的纠缠对，则将其从图中移除，以降低复杂度。随后，算法创建一个更新后的图，用于跟踪所做的纯化选择。最后，为确保 the



(a) 端到端保真度感知路由——虚线绿色线条表示提纯后的路径，绿色和红色实线为端到端保真度纠缠路径。



(b) 基于保真度的路由——其中虚线蓝线显示保真度提升路径。因此， $S_1 \rightarrow R_1 \rightarrow D_1$ 和 $S_1 \rightarrow R_2 \rightarrow R_3 \rightarrow D_1$ 的纠缠最优路径。

图6：采用纯化的路由设计技术。

在可能的最低成本下，使用广度优先搜索（BFS）确定图上的最短路径。

2) 路径选择流程：为了找到成本最低、效率最高的路径，Q-PATH 创建了一个迭代过程，在每一轮循环中使用成本作为主要指标来引导路径搜索。为此，该算法采用 k 最短路径算法，以识别若干条具有相同最低成本的不同最短路径。

3) 边成本更新：在选定的路径上，每条边的成本对应于未经任何纯化时的吞吐量。然而，路径上的某些边可能需要进行纯化，才能满足保真度约束。为了在确保端到端保真度的同时，将纠缠对的成本降至最低，我们设计了一种纯化决策流程，每次检查并添加一轮纯化。

4) 吞吐量更新：该算法通过考虑特定路径的纯化决策，计算可达到的最高吞吐量。如果请求得到满足，算法将退出并返回路由路径、纯化决策以及预期的保真度水平。

V. 挑战与未来研究方向

量子路由设计的潜在研究方向可以聚焦于开发能够找到离线路径、并抵御运行时资源竞争的方法。这可能涉及开发相关算法，在选择路由路径时考虑资源的可用性，以及不同量子通信任务之间可能产生的冲突。未来量子路由研究面临的一些挑战包括：

1) 量子退相干：量子信息极其脆弱，容易因环境因素而丢失。噪声或与其他量子系统的相互作用。退相干会导致路由协议出现错误，并降低量子网络的性能。在量子网络中，信息通常编码在单个量子粒子的状态中，例如光子或量子比特。随后，这些粒子通过网络传输，并在传输过程中经历各种操作和测量。然而，当这些粒子与其环境相互作用时，它们可能与其他粒子发生纠缠，并失去其量子相干性。

2) 量子比特资源有限：量子比特资源有限，是开发实用量子网络面临的一项重大挑战。量子比特是量子信息的基本单元，极易受到环境噪声和退相干的影响。因此，传输和处理量子信息需要大量高质量的量子比特，而制造这些量子比特既困难又昂贵。此外，量子比特十分脆弱，寿命也很短，进一步限制了其在量子网络中的可用性。为应对这一挑战，研究人员正在探索多种策略，例如量子纠错码、纠缠蒸馏以及量子—经典混合架构。这些方法旨在克服量子比特资源有限带来的制约，提高量子网络的效率和可靠性。

3) 缺乏经典控制：缺乏经典控制是量子网络面临的另一项重大挑战。经典控制是指利用经典设备和技术操控和测量量子系统的能力。然而，量子系统遵循的基本规则与经典系统截然不同，经典控制方法往往不足以充分控制量子系统并发挥其潜力。缺乏经典控制严重阻碍了实用量子网络的实现，因为这限制了以受控且可靠的方式传输和处理量子信息的能力。为应对这一挑战，研究人员正在开发新的量子控制方法和技术，例如

量子控制算法、机器学习技术和量子纠错码。这些方法旨在提升对量子系统进行稳健、高效控制和操控的能力，即使缺乏经典控制也能做到这一点。

4) 不确定性原理：不确定性原理是量子力学中的一个基本概念，它指出，某些成对的物理属性（例如位置和动量）无法同时以任意精度获知。该原理对量子网络具有重大影响，因为量子网络依赖于准确测量和操纵量子态的能力。在量子网络中，不确定性原理限制了可传输信息的数量，以及信息传输的精确程度。例如，如果以高精度测量一个量子态，测量行为可能会扰动该状态，并在传输过程中引入错误。因此，量子网络设计者必须仔细考虑不确定性原理，并开发相关技术以尽量减小其影响，从而确保通信的可靠性和准确性。

这些研究方向包括开发新的路由算法或其他技术，以高效地重新引导流量，利用此前生成的纠缠对，从而有望降低网络延迟并提升整体性能。

VI. 结论

量子网络技术领域正在快速发展，而高效的路由技术对于建立可靠且可扩展的量子通信系统至关重要。本文综述了量子网络中所采用的若干路由技术，包括经典路由、量子路由和混合路由方法。这些技术在应对量子通信独特挑战和局限性方面的能力各不相同。尽管经典路由对于简单的量子网络而言仍是一种可靠的方法，但量子路由方法已在更复杂的网络中展现出良好前景，而混合方法则可能为整合经典路由与量子路由提供一种实用的解决方案。然而，要针对大规模量子网络优化这些技术，仍有大量工作要做。未来的研究应继续探索新的路由算法和协议，以进一步推动量子通信系统的发展。

致谢

本研究获台湾国家科学及技术委员会（NSTC）资助，项目编号为 109-2221- E-011-104-MY3。

参考文献

[1] A. S. Cacciapuoti、M. Caleffi、R. Van Meter 和 L. Hanzo，“当纠缠遇上经典通信：面向量子互联网的量子隐形传态”，*IEEE*通信汇刊，第 68 卷，第 6 期，第 3808–3833 页，2020 年。[2] J. Illiano、M. Caleffi、A. Manzalini 和 A. S. Cacciapuoti，“量子互联网协议栈：全面综述”，计算机网络，第 109092 页，2022 年。

[3] Z. Li、K. Xue、J. Li、N. Yu、D. S. Wei 和 R. Li，《量子网络中面向连接和无连接的远程纠缠分发策略》，*IEEENetwork*，第 36 卷，第 6 期，第 150–156 页，2022 年。[4] E. Schoute、L. Mancinska、T. Islam、I. Kerenidis 和 S. Wehner，《量子网络路由的捷径》，*arXiv* 预印本 *arXiv:1610 05238*，2016。.[5] A. Bapat、A. M. Childs、A. V. Gorshkov 和 E. Schoute，《量子路由的优势与局限》，*PRX Quantum*，第 4 卷，第 1 期，第 010313 页，2023 年。[6] S. Shi 和 C. Qian，《量子网络的并发纠缠路由：模型与设计》，载于*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，2020 年，第 62–75 页。[7] M. Pant、H. Krovi、D. Towsley、L. Tassiulas、L. Jiang、P. Basu、D. Englund 和 S. Guha，《量子互联网中的纠缠路由》，*npjQuantumInformation*，第 5 卷，第 1 期，第 25 页，2019 年。[8] S. Zhang、S. Shi、C. Qian 和 K. L. Yeung，《面向量子网络的碎片感知纠缠路由》，*Journal of Lightwave Technology*，第 39 卷，第 14 期，第 4584–4591 页，2021 年。[9] S. Perseguers、G. Lapeyre、D. Cavalcanti、M. Lewenstein 和 A. Ac´ın，《大规模量子网络中的纠缠分发》，*Reports on Progress in Physics*，第 76 卷，第 9 期，第 096001 页，2013 年。[10] C. Loop，《基于三角形的光滑细分曲面》，1987 年。[11] Y. Zhao 和 C. Qiao，《量子网络中用于吞吐量最大化的冗余纠缠供应与选择》，载于*IEEE INFOCOM 2021——IEEE* 计算机通信会议。IEEE，2021 年，第 1–10 页。[12] Y. Zeng、J. Zhang、J. Liu、Z. Liu 和 Y. Yang，《量子网络上的多纠缠路由设计》，载于 *IEEE INFOCOM 2022——IEEE* 计算机通信会议。IEEE，2022 年，第 510–519 页。[13] A. Farahbakhsh 和 C. Feng，《量子网络中的机会式路由》，载于*IEEE INFOCOM 2022——IEEE* 计算机通信会议。IEEE，2022 年，第 490–499 页。[14] Y. Zhao、G. Zhao 和 C. Qiao，《面向吞吐量最大化的量子网络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。IEEE，2022 年，第 480–489 页。[15] J. Li、M. Wang、K. Xue、R. Li、N. Yu、Q. Sun 和 J. Lu，《量子网络中保真度有保证的纠缠路由》，*IEEE Transactions on Communications*，第 70 卷，第 10 期，第 6748–6763 页，2022 年。

Binayak Kar 现任台湾国立台湾科技大学（NTUST）计算机科学与信息工程学系助理教授。他于 2018 年在台湾国立中央大学（NCU）获得计算机科学与信息工程博士学位。2018 至 2019 年，他在台湾国立交通大学（NCTU）担任计算机科学博士后研究员。他的研究兴趣包括网络软体化、云端／边缘／雾计算、优化、排队理论、机器学习、网络安全和量子计算。

Pankaj Kumar 在印度达恩巴德印度理工学院（ISM）获得计算机科学与工程硕士学位（M.Tech.）。目前，他正在台湾国立台湾科技大学（NTUST）攻读计算机科学与信息工程博士学位。Kumar 的研究重点是量子信息理论、量子通信和量子网络。