

# 开题报告

(清华大学硕士学位论文选题报告)

培养单位：计算机科学与技术系

学 科： 计算机科学与技术

研 究 生： 王思图

二〇二六年一月



## 摘要

量子互联网的核心任务是在多跳网络中为上层应用分发量子纠缠资源。现有量子网络层协议设计通常将链路保真度视为一个二值约束条件，即仅要求其不低于某个应用相关阈值，并在此约束下优化如纠缠生成率或时延等传统指标。然而，对于分布式量子计算中的远程逻辑门操作、分布式量子传感等关键应用而言，其最终性能（如算法成功率、测量精度）与所使用纠缠资源的保真度呈连续正相关。在这些场景中，满足保真度阈值仅为实现功能的基础要求，而进一步提升保真度能够直接、显著地改善应用层性能。因此，有必要在路由机制中探索以主动优化保真度为导向的路径选择策略。

本研究旨在设计、实现并评估一种将保真度作为核心优化目标之一的量子网络层协议。研究包含两个并重的部分：一是协议与算法的设计，二是在一个能真实反映量子-经典混合网络环境的仿真平台中进行实现与验证。

在协议设计方面，希望提出一种基于链路状态的路由算法。该算法应能在以保真度衰减为链路权重的路径计算基础上，引入动态保真度评估与路径协调机制。

在实现与验证方面，我们将选择 qns-3 作为实验平台。qns-3 是首个深度集成于工业级网络模拟框架 NS-3 的量子网络扩展，其关键特性在于实现了量子物理层事件与经典网络协议栈在统一离散事件时间轴上模拟。这一特性使得在 qns-3 中实现的协议能够被置于包含经典背景流量、资源共享竞争的真实网络环境中进行测试，这是其他量子专用模拟器所不具备的能力。在本研究中，我们将为 qns-3 实现网络层协议，并基于此设计对比实验，评估所提协议与仅以跳数或静态保真度阈值为基准的路由策略之间的性能差异。评估将重点聚焦于端到端纠缠的平均保真度、高保真纠缠交付的成功率等直接反映优化目标的指标，以验证在路由决策中系统性考虑保真度优化的必要性与有效性。

**关键词：**量子网络；网络层协议；路由算法；保真度优化；qns-3；混合网络仿真

## 目 录

## 第1章 选题背景及意义

### 1.1 量子互联网的发展愿景与核心挑战

量子互联网是未来信息技术的战略制高点，其核心目标是将地理上分离的量子处理器、量子存储器与量子传感器通过量子链路互联，形成一个支撑高级量子信息处理任务的分布式系统。这一网络将为量子应用提供支持，例如通过量子隐形传态和纠缠交换实现分布式量子计算，构建连接多个传感节点的高精度量子测量网络，以及实现理论上无条件安全的广域量子密钥分发。实现这些应用的基础资源是量子纠缠，其核心质量指标——保真度，直接决定了上层量子任务的最终性能。因此，如何在大规模、多跳的网络环境中，高效、可靠地分发高保真度的纠缠对，是构建实用化量子互联网面临的最根本挑战之一。

### 1.2 量子网络路由

在经典互联网中，网络层路由协议（如 OSPF、BGP）的核心任务是寻找数据包从源到目的地的可行路径，其优化目标通常是时延、吞吐量或链路利用率。然而，直接将这一范式移植到量子网络将面临严重的不适应性。量子纠缠的建立具有概率性、易衰减性和资源消耗性等独特物理约束。具体而言，纠缠生成可能失败，生成的纠缠对保真度会因信道噪声和存储器退相干而随时间下降，而纠缠交换等中继操作则会引入额外的保真度损耗。因此，量子网络的路由决策不能仅基于拓扑连通性，还必须考虑物理层的状态信息，将链路保真度、生成成功率及存储器相干时间等量子特征作为核心的路径度量指标。

当前学术界针对量子路由的研究，大多将保真度视为一个二元化的约束条件。其典型思路是：首先为特定应用设定一个最低可接受的保真度阈值，然后在所有满足此阈值约束的候选路径中，优化如纠缠生成速率或跳数等其他指标。这种模式虽能保证基本功能，却未能充分利用量子网络的潜力。此外，对于分布式量子计算中的复杂电路执行或高精度量子传感而言，最终结果的误差率往往与所使用的纠缠资源的保真度成反比。这意味着，在满足基础阈值之上，主动寻求并建立保真度更高的纠缠连接，能够直接转化为应用层性能的提升。因此，将路由策略从“满足保真度阈值”演进为“在资源约束下最优化保真度”，是一个关键且尚未被充分探索的科学问题。

### 1.3 混合网络仿真平台

量子网络协议的设计与验证严重依赖于高性能的离散事件仿真。然而，现有的主流量子网络模拟器（如 NetSquid, SeQUENCe）均为独立的量子专用仿真框架。它们虽能精细模拟量子物理过程，但其内部的事件调度引擎与经典网络协议栈（如 TCP/IP）完全隔离。这种隔离导致研究者无法在仿真中观察量子业务与经典流量共享底层光纤等基础设施时，由排队、缓存、拥塞控制等经典网络功能所引发的相互影响。例如，经典数据流的突发可能抢占波分复用信道资源，间接导致量子纠缠生成尝试的失败或时延增加，而这种复杂的跨层相互作用在现有分离的仿真工具中无法被有效捕捉。

在此背景下，qns-3 模拟器的出现提供了一个解决方案。作为首个深度集成于工业级网络模拟框架 NS-3 的量子扩展，qns-3 的创新性在于将量子物理层的事件调度完全纳入了 NS-3 的离散事件时间轴。这使得量子纠缠的生成、交换、测量等过程，能够与 NS-3 中已高度成熟的经典协议模型（如 IPv4/v6 路由、TCP 流、HTTP 业务）在同一时间轴上运行。这一特性使得 qns-3 成为研究“量子-经典”混合组网问题的理想仿真平台。然而，作为一个新兴平台，qns-3 目前主要实现了物理层和基础的链路层模型，其网络层协议栈尚属空白，这极大地限制了利用该平台探索量子路由问题的能力。

### 1.4 本课题拟解决的关键问题与研究内容

基于以上分析，本课题旨在回应量子互联网发展中的两个关键需求：一是设计一种能够主动优化端到端纠缠保真度的网络层路由策略；二是在一个能真实反映量子-经典混合网络环境的仿真平台上实现并系统评估该策略。因此，本课题将聚焦并尝试解决以下科学及工程问题：

科学层面的核心问题是：如何将保真度从静态的路径约束条件，转化为动态的路径优化目标？具体而言，如何在路由计算中，综合考虑链路的实时保真度估计、存储资源的可用性以及路径建立的成功概率，设计出能够在网络资源竞争和物理衰减约束下，主动趋向于选择更高保真度路径的分布式算法。

工程实现层面的关键问题是：如何在一个成熟的、事件驱动的经典网络模拟框架（NS-3）内，设计与实现一个功能完整的量子网络层协议栈？这涉及量子路由控制报文格式的定义、与经典 IP 控制平面的协同、量子链路状态信息的分布式同步机制，以及最终在 qns-3 的量子-经典混合事件驱动引擎中的正确集成与调试。

为解决上述问题，本研究将包含以下并重的研究内容：首先，设计一种保真度感知的自适应路由算法，该算法在经典最短路径算法的基础上，引入对保真度梯

度与资源消耗的联合评估。其次，依据 NS-3 及 qns-3 的软件架构规范，设计并实现量子网络层的协议模型，包括邻居发现、拓扑收集、路由表计算和路径建立等核心模块。最后，基于实现的协议栈，在 qns-3 中构建多跳量子网络仿真场景，设计对比实验，定量评估所提路由算法在提升平均保真度、保障高保真业务成功率等方面性能优势，从而验证其有效性与实用性。本研究不仅旨在提出一种改进的路由思想，更力求通过在高保真混合仿真平台上的完整实现，为未来量子网络协议的标准化与实用化研究提供可靠的实验方法论与原型基础。

## 第2章 现有研究综述

量子网络的研究涵盖两个紧密关联的层面：一是如何设计高效、可靠的网络协议以管理量子资源；二是如何借助经典计算工具对包含噪声的复杂量子系统进行高效模拟，以验证协议设计。本章将从这两个维度对现有研究进行梳理，旨在明确当前的研究范式、主流方法及其存在的局限。

### 2.1 量子网络路由协议研究进展

量子网络路由协议的核心任务是在满足量子物理约束的前提下，在多跳网络中确定建立端到端纠缠的路径。现有研究主要沿几个主流范式发展，并从早期理论探索逐步转向面向实际挑战的工程设计。

#### 2.1.1 基于链路状态与度量计算的路由范式

这是目前最接近经典网络设计哲学且被广泛采用的方法。其核心思想是将量子链路的物理特性（如纠缠生成成功率  $p$ 、贝尔态保真度  $F$ 、存储器相干时间  $T_2$ ）量化为一个或多个可计算的链路度量（metric）或成本（cost）。节点通过交换这些链路状态信息，构建网络拓扑的全局视图，并运用图论算法计算最优路径。

早期的奠基性工作如<sup>1</sup>提出的量子链路状态算法（Q-LSA），系统地阐述了将链路权重与纠缠生成率相关联，并运用 Dijkstra 算法计算最优路径的框架。随后的研究更精细地整合了保真度衰减模型。例如，<sup>2</sup>提出的纠缠路由代数（ERA）框架，将链路建模为能够同时表征“纠缠对数量”和“保真度上限”的代数对象，为形式化分析多路径路由和保真度约束下的流问题提供了数学工具。

然而，该范式下的多数协议仍将保真度视为一个硬性约束条件。其典型路径选择逻辑是两阶段的：首先，从拓扑中筛选出所有预计保真度不低于应用阈值  $F_{th}$  的候选路径；其次，在这些合格路径中，再根据跳数、时延或总权重进行优化选择。这种“先过滤，后优化”的模式本质上是一种满足性策略，未能将“在资源约束内尽可能提升保真度”本身作为路由计算的单一且连续的优化目标。

#### 2.1.2 近期代表性路由协议详述

近期的研究在应对量子网络独特挑战方面提出了更具体和创新的协议，尤其体现在处理非等方性路由度量（non-isotonic metric）以及保真度感知的动态多路径路由上。

### 2.1.2.1 基于路由代数与 KOP 的优化路由协议

针对量子网络路由度量（如期望吞吐量 EXT 和可达速率 AR）固有的非等方性（non-isotonic）特性，直接应用经典最短路径算法（如 Dijkstra）可能无法找到全局最优路径。<sup>?</sup>提出的 KOP（K-Optimal Paths）算法系统性地解决了这一问题。

该工作的核心理论贡献在于引入路由代数（Routing Algebra）作为分析量子路由度量的数学基础。它首先证明，对于像 EXT 和 AR 这样的度量，其全序关系  $\leq$  不满足“等方性（isotonicity）”，即  $w(a) \leq w(b)$  不能保证  $w(a \oplus c) \leq w(b \oplus c)$ （其中  $\oplus$  表示路径拼接）。为了克服这一障碍，作者定义了最大等方性约化（Greatest Isotonic Reduction,  $\leq_{GR}$ ）关系，它是一个保持等方性的偏序关系，并且是原全序关系的最大子关系。基于  $\leq_{GR}$ ，他们设计了 D-Dijkstra（Dominant Dijkstra）算法，用于在每个节点找到并保留所有在  $\leq_{GR}$  意义下的“支配路径”。

KOP 算法在 D-Dijkstra 的基础上，结合了 Yen's K-最短路径算法的思想。其具体步骤是：1) 使用 D-Dijkstra 找到源-目的节点间在  $\leq_{GR}$  下的第一条最优路径。2) 对于已找到的第 k-1 条路径，依次将其“根路径（root path）”与“支路（spur path）”拼接，并通过临时删除边和节点来避免生成环，再利用 D-Dijkstra 计算新的候选路径。3) 在所有候选路径中，根据原始全序  $\leq$  选择最优先的作为第 k 条路径。该算法被严格证明能够找到前 K 条简单最优路径。为了降低计算复杂度，作者还提出了一个启发式变种 H-KOP，在后续搜索中用标准 Dijkstra 替代 D-Dijkstra，在多数情况下仍能保持接近最优的性能。

该协议的另一重要贡献是对 EXT 度量的深入分析与简化。作者给出了一个更易于计算和分析的 EXT 表达式（公式 8），并利用它推导出  $\leq_{GR}$  的显式判据，从而实现了对路由代数的具体计算。该工作首次为量子网络最优路由提供了坚实的理论基础和可实现的算法，但主要关注离线路径计算，其在线动态适应性有待进一步研究。

### 2.1.2.2 保真度感知的多路径多体态分发协议

在分发多体纠缠态（如 GHZ 态）时，如何在网络噪声（退相干、操作不完美）影响下，同时优化分发速率和最终态的保真度，是一个关键挑战。<sup>?</sup>提出了两种保真度感知的多路径路由协议，即多路径星型（mp-s）和多路径树型（mp-t）协议。

该协议的核心特点是动态路由和保真度驱动的路径选择。与单路径协议预先计算固定路由方案不同，多路径协议在每一轮（timeslot）开始时，根据当前网络的链路状态图  $G'$ （表示哪些节点间已成功建立贝尔纠缠）来动态选择路由方案。对于 mp-t 协议，其目标是找到连接所有目标用户的斯坦纳树（Steiner Tree）；对于

mp-s 协议，则是找到从中心节点到所有用户的边不相交路径集。

在选择具体路由时，协议以最大化最终 GHZ 态保真度的下界  $\mathcal{F}_{LB}$  为目标。该下界被定义为路由方案  $R$  中所有边  $e$  的贝尔态保真度  $\mathcal{F}_e$  的乘积。由于  $\mathcal{F}_e$  随存储时间因退相干而衰减， $\mathcal{F}_{LB}$  同时编码了路径长度（边数）和边龄（存储轮数）对保真度的影响。协议通过为边分配权重  $c_e = -\log(w_e)$  ( $w_e$  为 Werner 参数)，将保真度最大化问题转化为标准的最小代价流（mp-s）或斯坦纳树（mp-t）问题求解。

该协议还引入了存储器截止时间  $Q_c$  作为调控速率-保真度权衡的关键参数。模拟结果表明，通过选择合适的  $Q_c$ ，mp-t 协议相比单路径树协议（sp-t）能实现高达 8.3 倍的速率提升和 28% 的保真度提升。其性能增益主要源于：1) 利用多路径冗余减少等待所有预定链路成功所需的平均轮数；2) 动态路由能在每一轮选择当时保真度最高（最“年轻”）的链路组合，从而有效缓解退相干效应。

## 2.2 量子网络模拟方法研究现状

由于大规模量子硬件难以获取，利用经典计算机模拟量子网络的行为成为算法设计、性能评估和系统优化的关键手段。模拟方法的核心挑战在于，如何以可承受的计算资源，高效且准确地模拟包含噪声、纠缠和测量的大规模量子系统。

### 2.2.1 主流量子网络模拟器及其方法

目前已多个专用量子网络模拟器，它们采用了不同的抽象层次和模拟策略来权衡精度与效率。

以 NetSquid 和 SeQUENCe 为代表的模拟器，提供了高保真的量子物理层模型。它们通常采用密度矩阵或状态向量来精确模拟量子态，并能够模拟复杂的噪声过程和量子操作。然而，这种精确模拟的计算成本随量子比特数指数增长，限制了其可模拟的网络规模。QuISP 等模拟器则采用了另一种思路，它不完整模拟量子态，而是通过追踪少量关键错误参数来近似评估量子态的质量，从而实现了大规模网络的快速模拟，但牺牲了模拟的普遍性和精确性。

这些模拟器构成了当前量子网络研究的重要工具，但它们普遍作为独立的仿真框架运行，难以与成熟的经典网络协议栈进行深度的、事件级同步的交互仿真，而这对于研究量子-经典混合网络的动态行为至关重要。

### 2.2.2 控制流适应：一种针对 LOCC 协议的高效模拟方法

在提升模拟效率方面，近期出现了一种面向特定协议类型的重要优化方法。<sup>?</sup> 在《Control Flow Adaption: An Efficient Simulation Method For Noisy Quantum Net-

works》一文中提出了“控制流适应”(Control Flow Adaption, CFA)方法，旨在高效模拟一类常见的“局域操作与经典通信”(LOCC)协议。

该方法的核心洞见在于，许多量子网络协议（如纠缠交换、蒸馏）的步骤由经典通信传来的测量结果控制。直接模拟需要跟踪所有可能的分支并进行大量的蒙特卡洛采样。CFA 方法通过将经典控制流“吸收”到量子电路中，构造一个包含所有可能分支的“叠加”式张量网络进行计算。具体而言，它通过引入辅助量子寄存器来编码经典控制信息，并设计相应的适应酉操作(Adaption Unitary)来模拟经典计算函数，最后通过及时的张量收缩丢弃不必要的中间信息。

该方法的优势在于，对于适用协议，它能够在一次模拟中精确计算出所有可能分支的平均结果（如平均保真度、成功率），从而完全避免了蒙特卡洛模拟的随机性和大量重复运行的开销。同时，通过精心设计适应酉操作和张量收缩顺序，它能有效降低张量网络的复杂度，节省内存与计算时间。论文中以链式纠缠交换和嵌套纠缠蒸馏为例，展示了 CFA 方法如何将模拟复杂度从指数级降低至线性级。

### 2.3 研究现状总结

综上所述，在路由协议层面，当前研究已建立了基于链路状态的基本范式，并开始关注动态性、多路径和混合组网等实用问题，但在路由决策中如何将“保真度优化”作为首要且连续的优化目标，仍有深入探索的空间。在模拟方法层面，尽管已有多种专用模拟器，并且在模拟算法上出现了如 CFA 这样针对性强的高效方法，但仍缺乏一个能够无缝集成高保真量子模拟与成熟经典网络协议栈、并支持大规模混合网络研究的统一仿真平台。本研究后续工作，正是旨在上述两个方面进行有意义的探索与推进。

## 第3章 研究方法

本研究旨在应对当前量子网络路由协议将保真度视为静态约束的局限性，探索将保真度作为核心优化目标的新型路由策略，并在一个能够真实反映量子-经典混合网络动态特性的仿真平台中进行实现与验证。研究遵循“问题建模-算法设计-系统实现-性能评估”的技术路线，核心在于解决如何动态优化保真度以及在混合仿真环境中实现协议栈两大关键技术问题。

### 3.1 面向保真度优化的路由算法设计

本部分旨在设计一种能够动态权衡保真度与资源消耗的路由算法，其关键在于建立准确的保真度衰减模型并据此设计自适应的路径选择机制。

#### 3.1.1 保真度衰减模型与路径度量

量子纠缠在路径建立过程中的保真度衰减主要源于两个方面：一是各跳链路固有噪声及纠缠交换操作引入的固定衰减；二是量子存储器在等待与中继过程中的退相干效应。本研究采用一个综合模型来刻画路径  $P$  的预期保真度  $F_{est}(P)$ ：

$$F_{est}(P) = F_0 \cdot \left( \prod_{e \in P} \eta_e \right) \cdot \exp \left( -\frac{T_{total}(P)}{\tau} \right) \quad (3.1)$$

其中， $F_0$  为理想贝尔态保真度， $\eta_e$  为链路  $e$  的纠缠生成与交换操作保真度因子， $T_{total}(P)$  为路径  $P$  的估计建立总时延， $\tau$  为量子存储器的相干时间。该模型量化了路径长度（通过连乘项）和建立时延（通过指数衰减项）对最终保真度的联合影响，是算法评估不同路径“质量”的基础。

#### 3.1.2 自适应权重调整机制

基于上述模型，路由算法的核心挑战是如何在路径选择中动态平衡保真度与建立成功率（或时延）。本研究拟在经典最短路径算法框架内，引入一个动态链路权重函数：

$$w_e(t) = \alpha(t) \cdot [-\log(\eta_e \cdot e^{-t_{e,wait}/\tau})] + (1 - \alpha(t)) \cdot [-\log(p_e)] \quad (3.2)$$

其中， $p_e$  为链路  $e$  的纠缠生成成功率， $t_{e,wait}$  为链路在当前网络状态下的预估

排队等待时间。关键技术参数  $\alpha(t) \in [0, 1]$  是一个随时间或网络状态变化的权衡因子。

该机制的核心思想是： $\alpha(t)$  的值并非固定，而是根据网络全局状态（如平均存储器利用率、链路拥塞程度）和业务需求特征（如请求是否对保真度敏感）进行动态调整。当网络负载较轻或业务要求高保真度时，可增大  $\alpha$ ，使算法优先选择保真度衰减更小的路径；当网络拥塞时，则减小  $\alpha$ ，促使算法选择建立更快、成功率更高的路径，以避免因长时间排队导致所有路径的保真度均因退相干而严重劣化。此机制旨在解决静态策略在动态网络中表现僵化的问题。

## 3.2 基于 qns-3 的混合网络协议栈实现与验证

算法设计的有效性需在贴近实际的混合网络环境中验证。选择 qns-3 作为实现与验证平台，其根本原因在于它是目前唯一能将量子物理层事件与经典 TCP/IP 协议栈纳入同一离散事件时间轴进行仿真的工具。本研究将在此平台上解决量子网络层协议栈的实现问题。

### 3.2.1 协议栈实现的关键技术问题

在 qns-3/NS-3 框架内实现量子网络层，需解决以下工程与技术问题：1. 量子-经典控制平面集成：如何利用 NS-3 成熟的 IP 协议栈（如套接字、数据包转发）来承载量子路由信令（如链路状态通告）。这要求设计专用的量子控制报文格式，并确保其能无缝嵌入经典网络流中传输。2. 与量子物理层的接口：如何定义清晰的接口，使得网络层模块能够调用 qns-3 底层提供的纠缠生成、存储、操作（如 Bell 态测量）等量子原语。这涉及量子资源（如存储器地址、纠缠对句柄）的抽象与管理。3. 混合事件调度的一致性：如何确保量子纠缠尝试、经典控制报文处理、以及可能的经典背景流量等不同类型事件，在 NS-3 的全局事件队列中正确、有序地被执行，以模拟真实的时间同步关系。

### 3.2.2 系统性仿真评估设计

为验证算法性能，将设计对比仿真实验，重点考察算法在混合环境下的表现。

- **对比基准：**设置两种基准算法：(1) 最小跳数路由；(2) 静态保真度阈值路由（筛选  $F_{est} \geq F_{th}$  的最短路径）。
- **评估场景：**构建包含经典背景流量（如 CBR 流）的网络场景，模拟量子与经典业务共享信道资源（通过 WDM 模型）的情形。引入随机的链路参数波动（模拟环境噪声变化）或节点失效，测试动态适应性。

- **核心指标:** 除纠缠建立成功率与吞吐量外, 将重点分析平均保真度以及保真度分布的尾部改善情况(如95分位数保真度), 以证明算法对高保真业务的有效支撑。同时, 监测在网络动态变化时, 算法通过调整 $\alpha(t)$ 来维持服务稳定性的能力。

通过上述方法, 本研究旨在不仅提出一种具有自适应能力的保真度优化路由思路, 更通过在高保真混合仿真平台qns-3上的首次完整实现与系统性评估, 为量子网络协议的实用化发展提供兼具理论价值和工程可行性的参考。

## 第 4 章 研究计划

本研究总周期为 16 周，计划分为四个阶段有序推进。

### 4.1 第一阶段：核心方案设计（第 1-4 周）

基于已完成的理论模型，完成动态保真度优化路由算法的详细设计，包括权重调整策略的量化规则与伪代码。同时，设计量子网络层协议栈的架构、报文格式及信令流程，并规划其在 qns-3 平台上的具体集成方案。最后，细化仿真实验的对比场景与参数。

### 4.2 第二阶段：系统实现与集成（第 5-9 周）

在 qns-3 平台上编码实现所设计的协议栈，依次完成邻居发现与拓扑同步、路由计算引擎、路径建立信令等核心模块。本阶段重点在于工程实现，确保各模块功能正确并能在仿真环境中稳定协同工作。

### 4.3 第三阶段：性能评估与分析（第 10-13 周）

运行预先设计的仿真实验，在静态与动态多种网络场景下，批量收集并分析所提算法与基准算法在保真度、成功率及吞吐量等关键指标上的性能数据。通过可视化图表与量化分析，验证算法有效性。

### 4.4 第四阶段：论文撰写与答辩准备（第 14-16 周）

系统整理研究内容与实验成果，撰写毕业论文全文，重点完成设计与实现、实验分析等核心章节。经多次修改定稿后，整理所有材料并准备毕业答辩。