

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，主动倾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

第3章 数学符号和公式

3.1 数学符号

中文论文的数学符号默认遵循 GB/T 3102.11—1993《物理科学和技术中使用的数学符号》^①。该标准参照采纳 ISO 31-11:1992^②，但是与 \TeX 默认的美国数学学会（AMS）的符号习惯有所区别。具体地来说主要有以下差异：

1. 大写希腊字母默认为斜体，如

$$\Gamma \Delta \Theta \Lambda \Xi \Pi \Sigma \Upsilon \Phi \Psi \Omega.$$

注意有限增量符号 Δ 固定使用正体，模板提供了 `\increment` 命令。

2. 小于等于号和大于等于号使用倾斜的字形 \leqslant 、 \geqslant 。
3. 积分号使用正体，比如 \int 、 \oint 。
4. 偏微分符号 ∂ 使用正体。
5. 省略号 `\dots` 按照中文的习惯固定居中，比如

$$1, 2, \dots, n \quad 1 + 2 + \dots + n.$$

6. 实部 Re 和虚部 Im 的字体使用罗马体。

以上数学符号样式的差异可以在模板中统一设置。另外国标还有一些与 AMS 不同的符号使用习惯，需要用户在写作时进行处理：

1. 数学常数和特殊函数名用正体，如

$$\pi = 3.14 \dots; \quad i^2 = -1; \quad e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n.$$

2. 微分号使用正体，比如 dy/dx 。
3. 向量、矩阵和张量用粗斜体（`\mathbf`），如 \mathbf{x} 、 $\boldsymbol{\Sigma}$ 、 \boldsymbol{T} 。
4. 自然对数用 $\ln x$ 不用 $\log x$ 。

英文论文的数学符号使用 \TeX 默认的样式。如果有必要，也可以通过设置 `math-style` 选择数学符号样式。

关于量和单位推荐使用 `siunitx` 宏包，可以方便地处理希腊字母以及数字与单位之间的空白，比如： $6.4 \times 10^6 \text{ m}$, $9 \mu\text{m}$, kg m s^{-1} , $10^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ 。

^① 原 GB 3102.11—1993，自 2017 年 3 月 23 日起，该标准转为推荐性标准。

^② 目前已更新为 ISO 80000-2:2019。

3.2 数学公式

数学公式可以使用 `equation` 和 `equation*` 环境。注意数学公式的引用应前后带括号，通常使用 `\eqref` 命令，比如式（??）。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k). \quad (3.1)$$

多行公式尽可能在“=”处对齐，推荐使用 `align` 环境。

$$a = b + c + d + e \quad (3.2)$$

$$= f + g \quad (3.3)$$

3.3 数学定理

定理环境的格式可以使用 `amsthm` 或者 `ntheorem` 宏包配置。用户在导言区载入这两者之一后，模板会自动配置 `theorem`、`proof` 等环境。

定理 3.1 (Lindeberg–Lévy 中心极限定理): 设随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 独立同分布，且具有期望 μ 和有限的方差 $\sigma^2 \neq 0$ ，记 $\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ，则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \leq z\right) = \Phi(z), \quad (3.4)$$

其中 $\Phi(z)$ 是标准正态分布的分布函数。

证明 Trivial. ■

同时模板还提供了 `assumption`、`definition`、`proposition`、`lemma`、`theorem`、`axiom`、`corollary`、`exercise`、`example`、`remark`、`problem`、`conjecture` 这些相关的环境。

第 4 章 引用文献的标注

模板支持 BibTeX 和 BibLaTeX 两种方式处理参考文献。下文主要介绍 BibTeX 配合 `natbib` 宏包的主要使用方法。

4.1 顺序编码制

在顺序编码制下，默认的 `\cite` 命令同 `\citet` 一样，序号置于方括号中，引文页码会放在括号外。统一处引用的连续序号会自动用短横线连接。

```
\cite{zhangkun1994}           ⇒ [?]
\citet{zhangkun1994}          ⇒ ?
\citetp{zhangkun1994}         ⇒ [?]
\cite[42]{zhangkun1994}        ⇒ [? ]42
\cite{zhangkun1994, zhukezhen1973} ⇒ [? ?]
```

也可以取消上标格式，将数字序号作为文字的一部分。建议全文统一使用相同的格式。

```
\cite{zhangkun1994}           ⇒ [?]
\citet{zhangkun1994}          ⇒ ? ]
\citetp{zhangkun1994}         ⇒ [? ]
\cite[42]{zhangkun1994}        ⇒ [? ]42
\cite{zhangkun1994, zhukezhen1973} ⇒ [? ?]
```

4.2 著者-出版年制

著者-出版年制下的 `\cite` 跟 `\citet` 一样。

```
\cite{zhangkun1994}           ⇒ ?
\citet{zhangkun1994}          ⇒ ?
\citetp{zhangkun1994}         ⇒(?) 
\cite[42]{zhangkun1994}        ⇒(?)42
\citetp{zhangkun1994, zhukezhen1973} ⇒(??)
```

注意，引文参考文献的每条都要在正文中标注 [?????????????????????????????????]。