arXiv:2603.01980v1 [quant-ph] 2 Mar 2026

本文已被IEEE量子通信、网络与计算国际会议（QCNC 2026）录用发表。此为通过arXiv提供的录用稿。

© 2026 IEEE。允许个人使用本材料。对于所有其他用途，无论是在当前还是未来的任何媒体中使用，包括为广告或宣传目的重印/再版本材料、创作新的汇编作品、转售或再分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品的任何受版权保护部分，均须事先获得 IEEE 的许可。

量子网络仿真与模拟：量子互联网设计路线图

Brian Doolittle与Michael Cubeddu*Aliro*
*Technologies,Inc.*美国马萨诸塞州布莱顿 电子邮箱： {
bdoolittle,mcubeddu}@aliroquantum.com

摘要——**量子网络正在推动社会信息技术基础设施的发展。仿真与模拟软件工具已经出现，用于支持量子网络的设计、开发与部署；然而，经典仿真与模拟方法在可扩展实现的误差、延迟和成本方面存在重大瓶颈。在本文中，我们综述量子网络仿真与模拟工具，包括基础原理、最先进的工具及其瓶颈。随后，我们讨论量子技术如何应对这些挑战，并构建量子仿真与模拟工具的采用路线图，强调与量子网络测试平台开展协同设计。**

索引词——**量子联网、量子仿真、量子模拟**

I. 引言

量子网络正在快速开发、部署和扩展，推动安全通信、分布式传感以及分布式量子计算等应用的发展 [1]。随着量子网络不断扩展，其对社会的益处将日益增加，但对其设计工具的要求也会随之提高。量子联网设计的标准工具包括分析方法与理论框架、信息论度量与基准，以及用于仿真、模拟和优化的软件工具 [2]。我们重点关注软件工具，因为它们受到当前信息处理技术局限性的约束。

从历史上看，基于软件的设计工具一直在经典网络和通信领域解决大规模的关键设计挑战。计算机辅助设计框架等仿真工具，以及数字孪生等模拟工具[3], , 加速了众多行业的研究与开发。数字孪生和网络模拟工具（例如 Common Open Research Emulator（CORE）） [4], 的一项关键特性是，它们能够在虚拟环境中测试网络应用，同时还能与外部现实世界中的软件和设备集成。

用于仿真和模拟的基于软件的设计工具，早已成为量子网络设计与开发不可或缺的一部分，这并不令人意外 [5]–[7]。这些工具包括离散事件仿真器和量子电路仿真器等仿真软件，以及数字孪生和虚拟量子网络等模拟软件。现有的量子网络模拟器已经展示了其加速、验证和基准测试量子网络应用与协议设计的能力 [8]–[16]。

经典软件易于开发和扩展，但事实仍然是，经典计算机通常无法在保持低误差、低延迟和低成本的同时仿真大型量子系统。事实上，使用经典处理器和近似方法仿真量子计算机的主要瓶颈包括 [17]:

1)**可扩展性：** 经典处理器无法在内存中存储大型量子态，因此需要采用近似。2) **准确性：** 在经典处理器上使用的近似会造成仿真误差。3) **效率：** 经典处理器需要大量硬件和能量，才能准确地大规模模拟量子系统。4) **有效性：** 量子系统的预期行为可能未知，因此难以验证仿真输出是否准确。

在经典处理器上仿真或模拟量子网络时，这些瓶颈会导致障碍，阻碍设计工具扩展。随着量子网络规模不断扩大，经典设计工具将会达到一个无法满足工业量子网络需求的拐点。然而，可以利用量子硬件仿真和模拟大规模量子网络，从而解决仿真量子网络所面临的瓶颈。本文概述了量子网络设计工具的路线图，从最先进的技术出发，推演量子互联网设计所需的工具。我们重点介绍了关键挑战领域，以及计算硬件与网络硬件协同设计的重要性。

本文结构安排如下：第 II 节阐述量子网络仿真与仿真工具的基础概念、技术定义和性能指标。第III节回顾用于量子网络的先进水平基于软件的设计工具。第 IV 节提出量子网络仿真与仿真工具的发展路线图，探讨扩展经典基于软件的设计工具的可行性与挑战，以及如何通过量子技术和与硬件的协同设计来解决瓶颈。第 V 节讨论基于软件的设计工具必须发展的关键方向，以推动量子互联网的更广泛发展。

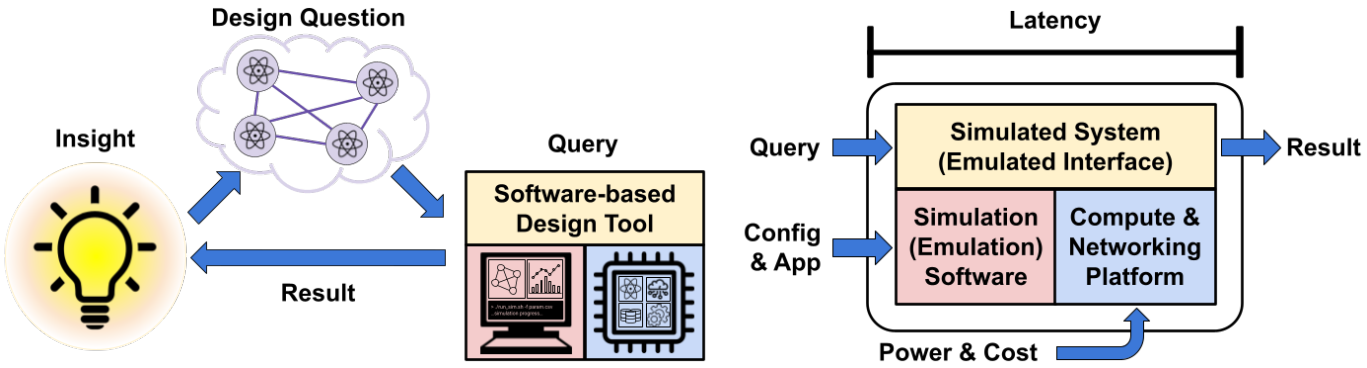

图1。（左）量子联网设计问题用于查询基于软件的设计工具，输出数据用于获取洞见并推动开发的设计周期。过程中会遇到新问题，设计周期随之迭代。（右）仿真或模拟工具的关键组件、输入及相关指标示意图。

II. 量子网络仿真与模拟

A. 基于仿真的设计与基于模拟的设计

仿真和模拟都是用于量子网络的基于软件的设计工具，但各自用于不同的任务。仿真器用于估算物理系统的属性，例如量子态、概率分布或各项指标，通常在研究和设计中用作预测工具。模拟器则复现系统接口的实时行为，用于网络应用和设备集成的工程开发与测试。总体而言，仿真是一个更广泛的概念，其中包含模拟。

使用仿真或模拟工具时，量子网络设计过程通常是迭代进行的（见图1）。如果仿真和模拟工具的运行速度足够快、成本足够低，就能加速现实系统的开发。这些基于软件的设计工具能够对量子网络设计参数进行微调；目前已有众多针对量子网络的优化框架和工具 [18]–[20]。无论是仿真还是模拟，其主要优势都在于能够快速开展设计和开发，且无需依赖硬件采购。

B. 仿真工具与仿真工具

仿真与模拟是密切相关的概念，各自应对量子网络设计与开发中的关键挑战。仿真器与仿真器都将量子网络动态建模为一个函数，$y = f_{\text{Sim}}(x)$，其中仿真查询 x被转换为仿真结果 y。输入 x 包含仿真参数，而输出 y 包含计算数据和指标。仿真与仿真工具还可配置上下文数据，包括应用层、网络拓扑和仿真超参数。同样，运行仿真或模拟工具的计算平台将具有相应的功耗或成本，且这一点也必须予以考虑（见图 1）。

仿真与模拟的关键区别在于，模拟再现系统接口的实时行为，而仿真则用于预测系统的行为、属性和指标，且不受任何约束，其针对的是实时运行。由于模拟旨在实时复现系统的输入输出行为，仿真工具可以在基本仿真工作流的基础上进行构建，使其具有交互性、能够实时运行，并能与其他模拟或真实世界的网络设备集成（见图2）。

由于仿真工具无需遵循实时约束或现实世界接口，它们在仿真查询和结果方面可以更加灵活。仿真工具通常比仿真工具更简单，因为不必复现实时交互行为。因此，每个仿真作业都可以独立处理，从而使仿真工具的实现更为简单。相反，仿真工具需要更复杂的逻辑，包括交互式 API、有状态数据管理与上下文，以及实时性能。

C. 实时框架与虚拟时间框架

仿真运行于实时状态，这意味着它们依靠计算平台的时钟时间来模拟仿真接口的时序特性。相反，仿真可以运行于虚拟时间中，这意味着仿真具有独立于计算平台时钟的虚拟时间线。实时框架（仿真器）十分有用，因为它们能够集成仿真设备与现实世界中的设备，还能让应用层或控制层软件无需修改，即可在仿真物理层与现实世界中的量子设备之间移植。虚拟时间框架的仿真十分有用，因为它们不受现实世界时钟的限制，因此能够对亚纳秒时间尺度进行高分辨率仿真，也能仿真超出设计时间线的时间尺度。

D. 逼真建模与虚拟建模

仿真和模拟都旨在得出准确的结果，但这并不意味着底层的数据表示和计算平台与物理现实相似。物理建模中的真实主义与虚拟主义构成一个连续谱，用于描述模型刻画物理系统内部运作时所包含的细节程度。仿真或模拟的真实主义程度会对其效率和准确性产生重大影响。逼真建模

会考虑系统中的每个物理参数和耦合，并力求从基础层面重现物理行为。虚拟建模则抽象掉低层次的物理细节，并以更简单的高层模型和表示取而代之。请注意，经典软件中的物理模型以数值数据结构表示；这种虚拟表示不同于物理现实。

量子网络仿真与仿真工具中的真实主义与虚拟主义之间的界限，取决于它们所运行的抽象层级。我们将这些抽象层级概括为三个类似于网络软件栈的层：应用层、控制层和物理层。较高层级的抽象运行时延迟高于较低层级的抽象，因此很难同时仿真或模拟所有层。正如参考文献 [21],所指出的，要高效仿真分布式量子计算栈，必须分别仿真各个层，其中一层仿真的输出会作为下一层的输入。因此，量子网络模拟工具（包括数字孪生和虚拟量子网络）通常侧重于某一抽象层，而以牺牲较低层级的建模为代价（见第 III-C节）。

E. 性能指标：误差、延迟与成本

仿真和模拟工具的性能可根据其误差、延迟和成本进行衡量，从而能够直接比较不同量子网络仿真与模拟工具的性能。

仿真或模拟的误差反映了其结果的准确性，即预期行为或指标 $y \in \mathbb{R}^d$ 与模拟指标均值 $\bar{y} \in \mathbb{R}^d$之间的距离。平均误差或准确性可以通过简单的欧几里得距离来计算

$$E = ||y - \bar{y}|| = \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2}, \tag{1}$$

也可以通过其他类型的范数或比较指标 [6]来计算。无论采用何种范数，仿真的准确性都体现了平均误差 E 。精密度也可以视为平均误差的标准差 E。

仿真或模拟的延迟是指从查询到结果之间经过的时间，

$$T = \frac{1}{R} \cdot \frac{\texttt{seconds}}{\texttt{result}}, \quad \text{and} \quad R = \frac{N}{\Delta t} \cdot \frac{\texttt{results}}{\texttt{second}} \tag{2}$$

其中 R 是仿真结果的输出速率。这里， N 表示结果数量，Δt 表示获取这些结果所需的时长。模拟需要较低的延迟（较高的速率）才能维持实时运行。

成本通过功耗或货币成本 $\Omega^{\$}$ 或焦耳结果 来衡量完成仿真任务所需计算资源的实际开销。我们将仿真的总成本 C 和消耗率 C_S定义为

$$C = N\Omega \cdot (\$ \text{ or } \texttt{Joules}), \quad C_S = R\Omega \cdot (\frac{\$}{\texttt{s}} \text{ or } \texttt{Watts}). \tag{3}$$

以货币单位衡量成本切实可行，而且可以纳入功耗、人工、运营、维护和硬件采购等相关成本；而功耗则为仿真和模拟效率提供了物理衡量指标。

F. 仿真与模拟的实用性

量子网络仿真或模拟工具要具备实用性，就必须在给定项目的约束条件内运行，包括误差容限、仿真延迟和预算。这些性能约束（ε， τ， c）应根据各个项目量身设定，并由以下界限形式化表示：

1) **误差：** 平均误差 E，由公式（1）给出，其上限受误差容限 ε约束，即 $E \leq \varepsilon$。2) **延迟：** 公式（ T2）给出的平均延迟受延迟容限 τ约束，即 $T = 1/R \leq \tau$。3) **成本：** 公式（ C3）给出的总成本受预算 c约束，即 $C \leq c$。

要使仿真和模拟工具在特定项目中切实可用，就应满足上述每一项约束。通常，设计工具应尽量降低运行中的误差、延迟和成本（E、 T、 C）。不过，在优化这些性能指标时可能需要权衡 [17]。例如，降低仿真工具的误差通常需要额外计算，从而增加处理时间和成本。相反，放宽模型往往可以降低延迟和成本，但近似处理可能会增大误差。请注意，仿真工具的实时要求对其性能延迟提出了严格要求，这限制了量子网络仿真的规模和准确性。

G. 仿真与模拟的验证与确认

仿真与模拟工具输出准确的结果非常重要。为验证仿真或模拟工具的准确性，必须将仿真与具有既经实验演示或理论表征行为的既定问题进行基准测试。例如，近期一项工作将基于纠缠的密钥分发系统的仿真与理论模型和实验演示进行了基准测试 [9]。对于无法通过实验或理论进行处理的仿真工具，可以通过不同量子网络仿真与仿真工具之间的交叉验证来进行验证与确认。量子网络软件交叉验证的一个例子，是对 QuISP 和 SeQUeNCe 进行基准测试比较 [22]。

III. 先进水平的量子网络仿真与模拟

现在，我们将回顾量子网络仿真与模拟领域的先进水平工具。关于先进水平的更广泛比较与基准测试，请读者参阅参考文献 [5]–[7]。

A. 量子网络设备的物理建模

网络设备、组件和链路的底层细节通常会单独进行仿真，以刻画其输入输出行为。例如，量子存储器、转换器或光源的物理过程可以进行仿真 [23]–[25]，其结果会被转换为效率、保真度，

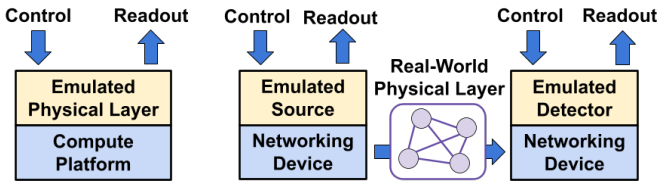

图 2。（左）网络的物理层在单体计算平台上进行仿真。（右）仿真的光源和探测器通过真实世界中的经典或量子物理层连接。

以及为仿真或模拟中的更高层抽象提供参考的运营。因此，底层细节通常可以独立于更高层的量子网络仿真进行仿真。

B. 量子网络离散事件模拟器

离散事件仿真（DES）是模拟多智能体场景的一种常见方法。已有多种用于量子网络设计的离散事件仿真工具，包括 NetSquid[26]，SeQUeNCe [27]，QuISP [28]，SimQN [29],Quantum-Savory.jl [24]，[30],和 Aliro Quantum Network Simulator[9]，[10]。离散事件仿真通常采用虚拟时间线，并以贴近现实的方式表示事件时序、设备和遥测数据。离散事件仿真的多智能体特性支持网络设备的模块化集成，使通用量子网络系统能够快速构建并迭代，从而成功应用于卫星中继网络 [11]，，以及协议设计、验证和基准测试 [8]–[10]。

C. 数字孪生与虚拟量子网络

数字孪生已逐渐兴起，用于模拟量子网络设备的底层接口。现场可编程门阵列（FPGAs）是模拟的首选工具，因为它们运行速度快（～ 1 纳秒）、可重新编程，并支持并行化和流水线处理。例如，现场可编程门阵列已用于模拟量子密钥分发（QKD）系统 [31] 和量子处理器 [32]–[34]。此外，人们还开发了基于模拟电路的方法来模拟量子系统 [35]。虚拟量子网络则作为一种高层设计工具应运而生，用于模拟量子网络的控制层和应用层。SimulaQron [36]和 QuNetSim [37]，等虚拟量子网络可提供虚拟测试平台，从而加速量子网络的应用开发和协议开发。虚拟量子网络已应用于模拟量子计算云基础设施 [38]，、模拟 QKD [12]–[15]，，以及模拟卫星网络中的纠缠分发 [16]。虚拟量子网络和数字孪生的一个缺点是，为了实现实时运行，它们往往忽略了对量子系统的逼真建模；不过，只要处理能力允许，也可以通过加入更低层次的建模来增强它们 [39]。

D. 量子网络的量子仿真与模拟

量子处理器是量子网络仿真的天然平台，因为它们能够高效地模拟高度纠缠态的量子动力学。量子模拟是量子计算的一项关键应用 [40]，[41]，，但其在量子网络仿真与模拟中的应用直到后来才出现 [42]。同样，利用量子处理器和量子接口的量子孪生模拟系统（见图 2 和 4）预计将在众多行业产生广泛影响 [43]。

要在量子计算机上仿真量子网络，主要方法是将量子网络的态制备、设备操作、通信信道、噪声和测量映射到量子电路 [18]，[19]，[44]中。若量子电路在无噪声条件下执行，则网络的随机行为会在每一次采样次中被精确复现。量子计算机也被用于量子网络仿真，即利用更大的量子处理器来模拟由更小量子处理器构成的系统与网络[45]–[47]。量子计算机有望以高于经典计算机的速率进行模拟，因为它能够以更高的效率评估量子电路。尽管这些方法在仿真大规模网络方面展现出前景，但现有量子计算机的噪声与规模尚未显示出相对于经典处理器的任何优势 [18]，[44]，[48]。

IV. 量子互联网设计路线图

在本节中，我们提出量子网络仿真与模拟工具的路线图（见图3）。随着量子网络技术的发展，其速率、规模和复杂度都将提升，这就要求仿真与模拟工具能够容纳更多量子比特并支持更快的速率。这些日益严峻的挑战表明，经典模拟与仿真工具将不足以支撑未来量子网络的设计。要构建量子互联网，我们必须从经典设计工具过渡到量子设计工具。此外，量子网络与其基于软件的设计工具之间的协同设计将促进量子互联网的迭代发展。

A. 量子网络发展阶段

预计量子网络将按照关键能力逐步发展 [1]。我们将这些阶段概述如下：

1) **制备与测量（PM）网络：**光子器件提供点对点量子通信，从而支持通过可信中继节点实现安全通信等应用，并且需要较高的点对点量子通信速率。

2) **纠缠分发（ED）网络：**量子中继器可实现远距离纠缠分发，从而支持端到端安全通信和分布式量子传感等应用；这需要量子存储器、转导以及含噪声中等规模量子（NISQ）信息处理。

3) **量子计算（QC）网络：**纠缠在量子处理器之间共享，从而支持分布式量子计算应用，并需要具备按需纠缠生成能力的容错量子处理器。

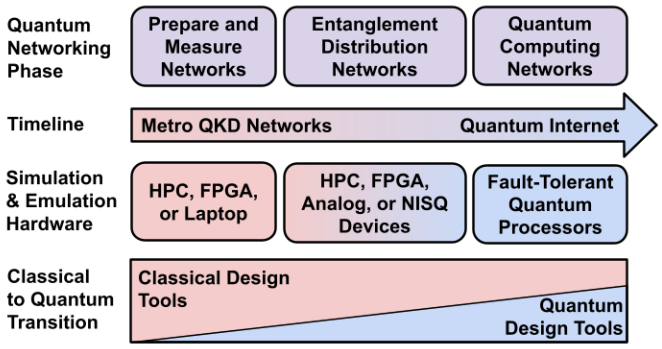

图 3. 图中展示了量子网络仿真与仿真工具的路线图，时间跨度从当今的城域量子密钥分发网络延伸至未来的量子互联网。图中列出了三个能力发展阶段：制备与测量网络、纠缠分发网络以及量子计算网络，并列出了各阶段预期采用的计算平台；量子硬件将逐步取代经典计算平台，用于物理层的仿真与模拟。从长远来看，经典计算平台预计将用于仿真和模拟控制层与应用层中发生的经典过程。

在每个阶段，对保真度和速率的要求都变得更加严格，从而在量子网络仿真与模拟中造成瓶颈。此外，不断发展的技术格局将要求设计工具做出相应调整。

B. 扩展量子网络的经典模拟

一般而言，经典计算机无法以低延迟、低错误率来仿真或模拟量子系统，不过，可以采用多种技术方法来克服这一障碍。首先，高性能计算（HPC）技术，包括并行处理、流水线处理和硬件加速，能够加快量子操作的计算 [49]。例如，图形处理器（GPU）在仿真包含大量量子比特的量子系统方面展现出优势[50]–[52]而现场可编程门阵列和模拟电路则已展现出对量子系统进行低延迟模拟的能力 [32]–[35]。其次，算法和数据表示会显著影响性能。例如，描述量子系统最准确的方法是密度矩阵表示；然而，仿真密度矩阵系统的延迟会随着量子比特数量的增加而呈指数增长。相反，若采用稳定子形式，仿真延迟将随量子比特数量呈多项式增长，但仿真误差会增大，因为稳定子形式无法准确建模某些类型的噪声和操作 [17]，[28]。第三，量子设备和网络层的建模抽象级别会对性能产生重大影响。为加快仿真，尽可能抽象掉低层细节十分重要 [21]，但这样做会增加误差。

经典模拟之所以被认为能够实现量子网络仿真，主要原因在于，借助经典处理器可以以低错误率和低延迟模拟二分纠缠。由于二分纠缠是大多数 PM 和 ED 网络协议中的主要资源，因此预计经典模拟和模拟工具能够为 PM 和 ED 网络中许多应用的设计提供实用支持 [8], [9], [11]–[16], [31]。例如，只要采用高效的状态表示（如稳定子形式或误差基 [28]），经典仿真工具就能够模拟包含多达 100 个节点的 ED 网络。

尽管经典方法已经能够应对许多实际的量子网络设计任务，但所建模的系统往往经过理想化处理。随着物理层纳入更多逼真的建模，在模拟量子网络设备的物理行为和实时运行速度时，将出现规模扩展方面的挑战。尽管 PM 网络的量子信息处理能力有限，但对其进行模拟的一项挑战，是实现对器件物理和光学进行建模所需的亚纳秒级延迟。此外，如果物理系统因与外部系统耦合以及噪声源而变得过于庞大，那么逼真建模可能很快就会超出经典处理器的处理能力。在 ED 网络中，这些规模扩展问题会更加严重，因为此类网络能够构建并处理复杂的多方纠缠。我们预计，近期可借助 HPC 或现场可编程门阵列克服这些挑战，但其规模有限，将制约我们设计量子网络的能力。

使用经典软件设计 QC网络颇具悖论意味，因为 QC 网络配备了容错量子处理器，并支持按需纠缠生成。由于容错量子处理器在信息处理方面优于经典处理器，经典硬件不太可能有助于模拟 QC网络的物理层。尽管如此，量子互联网预计仍将包含经典应用层和控制层[1]。这些层的开发和设计需要经典仿真工具，因此，经典模拟和仿真工具在长期内仍将在量子网络设计中发挥作用。

C. 面向量子网络设计的量子模拟

使用量子硬件来模拟量子网络的优势在于，低层建模的延迟和准确性得到改善，从而能够对物理层进行详细模拟。然而，在含噪中等规模量子处理器上进行量子网络仿真的初步演示表明，由于硬件噪声 [18], [44], [48]，存在相当大的误差。尽管如此，在含噪中等规模量子设备上的模拟可以作为现实世界性能的下限，而量子噪声缓解 [53] 和纠错 [54] 技术可以进一步降低仿真误差。为了在含噪中等规模量子处理器上扩展量子网络仿真，可以使用电路切割技术将大型量子电路分解为更小的量子电路 [55], [56]。随后，这些量子电路可以在量子数据中心中大规模运行，但需要专用基础设施 [57]和大量能量 [58] 。因此，量子硬件所提供的低延迟和低错误率可能需要付出巨大的成本。

尽管量子计算机能够加速量子联网各个阶段的仿真，但近期面临的挑战是量子硬件噪声过大 [59]。含噪中等规模量子处理器需要证明其模拟成本、延迟和误差足够低，才能支持实用的量子网络设计。

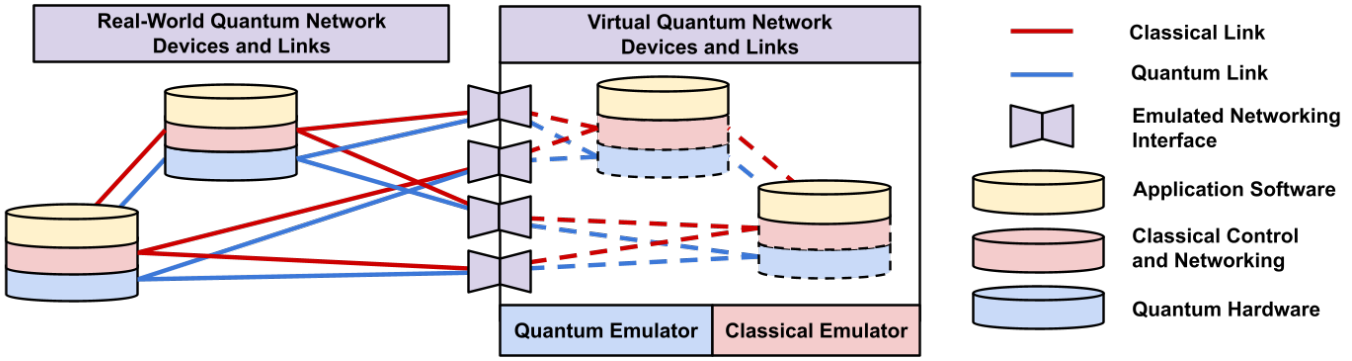

图 4. 混合场景：整合真实世界的量子网络设备（实线）和在量子处理器上模拟的虚拟量子网络设备（虚线）。应用软件层（黄色）可在真实世界和虚拟环境中原生运行。真实世界（左侧）与模拟设备（右侧）之间的模拟量子接口通过量子转导实现，而模拟经典接口则通过传统网络硬件实现。量子硬件（蓝色）在量子处理器上模拟，经典软件（红色）则在经典处理器上模拟。

由于含噪中等规模量子处理器尚未展示出对量子网络进行实用仿真的能力，近期应重点扩大用于制备与测量和纠缠分发网络设计的经典工具，并开发在量子处理器上仿真量子网络的框架，例如 [18], [19], [44], [47]。一旦含噪中等规模量子处理器展现出优于经典处理器的优势，就可以利用这些仿真框架对纠缠分发网络和QC网络的物理层及量子信息处理逻辑进行仿真。随着容错量子处理器的出现，它们将成为QC网络设计的天然工具。

D. 量子网络设计的量子仿真

由于量子网络仿真器会复现网络接口的实时行为，仿真工具需要同时复现经典接口和量子接口。提供量子接口模拟所需的量子硬件，对于实现低延迟和低误差也至关重要。在以往的研究中 [45]–[47], ，量子网络是在单片量子处理器上模拟的，因此网络的物理层得到模拟，其经典接口则对外开放。在这种方法中，量子计算机运行一个量子电路，用以编码对量子网络设备、链路和操作的真实描述。由于量子电路能够复现所建模量子系统的测量统计数据，量子计算机很适合执行模拟任务。除噪声之外，在量子计算机上进行模拟的主要难点在于对量子网络接口进行实时控制、操作和读出。此外，每个量子计算平台都有其特定的门延迟、量子比特相干时间和门保真度 [60], [61],，因此应谨慎选择平台，确保其延迟足够低、门保真度和相干时间足够高，从而准确模拟量子网络。

所有阶段的量子网络都将需要量子孪生体[43] 来模拟物理层中的量子接口，使量子比特或纠缠能够在现实世界设备与虚拟设备之间共享（见图4）。现实世界设备与虚拟设备之间的集成有助于对量子网络硬件和应用层进行稳健测试，也是经典网络模拟框架（如 CORE）的常见特征 [4]。在实践中，现实世界量子网络设备与虚拟量子网络设备通过仿真接口进行集成时，需要高效的量子转导 [62] ，以在量子模拟硬件的量子比特模态与量子网络硬件之间进行转换。由于 ED 网络可能需要高效转导，因此图4 所示的通用模拟系统要到这一阶段才可能开始出现。短期内，PM 设备的量子接口可以利用可调谐、可重构的光源或探测器进行模拟，并由经典处理提供支持（见图2）。此类设备是自检协议的基础 [63],；在这些协议中，模拟的量子源或探测器会推断并认证现实世界量子网络设备或链路的能力、资源和性能。

E. 量子网络与设计工具协同设计

仿真和模拟工具必须服务于量子网络设计、开发和部署的需求。一般而言，仿真和模拟工具应促进快速、迭代式的开发，以扩展现有基础设施，同时解决阻碍量子联网迈向下一阶段的障碍。然而，我们应谨慎开发旨在解决遥远未来问题的工具，因为范式会发生变化、标准会改变，技术也会过时。因此，仿真和模拟工具应与量子网络测试平台及工业部署协同设计。

仿真工具可以为量子网络测试平台提供参考，反之亦然。事实上，测试平台产生的实验数据可用于创建并验证现实世界量子网络的模型。随后，仿真工具可以将这些模型外推至工业规模和应用层，为量子联网基础设施的设计、开发和部署提供参考。随着量子网络测试平台的能力不断提升，仿真和模拟工具将遇到瓶颈。这些瓶颈将揭示仿真工具必须解决的关键问题。同样，仿真工具可以确定测试平台需要展示哪些目标参数，才能满足实用量子网络部署的要求。

	仿真	模拟（经典）	模拟（量子）
经典	噪声环境下的物理层建模 PM 和理想 ED 网络。参见章节III-A 和III-B。	PM 网络的物理层仿真，或应用于 ED/QC 网络的控制层模拟。参见章节 III-C。	光源和探测器模拟，从而实现 PM 网络的设备自测试有效。参见第IV-D节，图2。
量子	有噪声环境下的物理层建模 ED/QC 网络。参见第IV-C	用于 ED/QC 网络的物理层仿真，从而实现全栈虚拟量子网络。参见第IV-D。	真实与虚拟量子设备集成。参见第 IV-D节，图 4。

图 5. 量子网络仿真的预期应用　　在经典处理器和量子处理器上，对（经典/量子）接口进行量子网络仿真与模拟　　.

通过网络设备之间的标准化接口和抽象层，可以促进量子网络与仿真工具的协同设计。标准化的经典接口可实现仿真数据与现实世界数据的直接比较，使量子联网设计工具更易于比较和验证。标准化的量子接口则支持使用自测试工作流来测试量子网络设备和链路的量子资源与能力。因此，通过标准化协同设计量子网络测试平台和量子网络仿真器，将有助于打造可扩展且准确的工具，用于设计、开发和部署量子网络。

V. 讨论

本文分析了量子网络仿真与模拟工具，并概述了未来发展路线图（见图 3）。我们的主要观察是，量子网络仿真与模拟都需要低延迟、低成本和低错误率；我们预计，经典工具在规模扩大时将遭遇严重瓶颈。如图 5所示，经典处理器和量子处理器都将在量子网络的设计与开发中发挥重要作用；我们预计，从经典设计工具向量子设计工具的转变将成为最早一批量子优势工业演示之一。最后，我们强调量子网络测试平台与基于软件的设计工具之间协同设计的重要性，以确保验证、标准化，并加快从测试平台向工业应用的过渡。通过这种方式，量子网络仿真与模拟将促进并加速量子互联网的设计 [1]。

作为行动倡议，我们强调量子网络设计工具可进一步发展的三个关键方向：

1）必须扩展面向量子网络的经典模拟和仿真工具，并对其延迟、误差和成本进行基准测试，以便比较。2）必须开发面向量子网络的量子模拟和仿真工具，并与经典工具进行基准测试，以展示量子处理器在实际应用中的作用。3）必须对量子网络设备与抽象层之间的经典接口和量子接口进行标准化，并通过量子网络测试平台验证相应的仿真和模拟工具。

致谢

本研究由 Aliro Technologies, Inc. 资助。

参考文献

[1] S. Wehner、D. Elkouss和R. Hanson，“量子互联网：未来之路的愿景”，《科学》，第362卷，第6412期，第eaam9288页，2018年。[2] K. Azuma、S. B¨auml、T. Coopmans、D. Elkouss和B. Li，“量子网络设计工具”，《AVS量子科学》，第3卷，第1期，2021年。[3] Q. Qi、F. Tao、T. Hu、N. Anwer、A. Liu、Y. Wei、L. Wang和A. Y. Nee，“数字孪生的使能技术与工具”，《制造系统杂志》，第58卷，第3–21页，2021年。[4] J. Ahrenholz、C. Danilov、T. R. Henderson和J. H. Kim，“Core：实时网络仿真器”，载于MILCOM 2008——2008年IEEE军事通信会议，第1–7页，IEEE，2008年。[5] D. Abreu、A. Pimentel、P. Moraes、D. Tavares、A. Veloso和A. Abel´em，“多用途量子网络模拟器：比较研究”，载于量子网络研讨会，第25–30页，SBC，2024年。[6] O. Bel和M. Kiran，“量子网络建模模拟器：全面综述”，2024年。[7] R. J. Hayek、J. Chung和R. Kettimuthu，“量子网络设计与运行软件综述”，《先进量子技术》，第9卷，2026年2月。[8] W. Kozlowski、A. Dahlberg和S. Wehner，“设计量子网络协议”，载于第16届新兴网络实验与技术国际会议论文集，第1–16页，2020年。[9] M. Chalupnik、B. Doolittle、S. Seshadri、E. G. Brown、K. Kenemer、D. Winton、D. Sanchez-Rosales、M. Skrzypczyk、C. Alexander、E. Ostby等，“面向实验性BBM92密钥分发的真实量子网络仿真”，arXiv预印本 arXiv:2505.24851，2025年。[10] M. Bhatia、S. Doshi、D. Winton、B. Doolittle、B. Abreu和S. N´u˜nez-Corrales，“\textit {计算机模拟}含噪量子网络中可检测拜占庭协议的基准测试”，arXiv预印本 arXiv:2509.02629，2025年。[11] J. Walln¨ofer、F. Hahn、M. G¨undo˘gan、J. S. Sidhu、F. Wiesner、N. Walk、J. Eisert和J. Wolters，“多卫星量子中继器策略仿真”，《通信物理》，第5卷，第1期，第169页，2022年。[12] M. Mehic、E. Dervisevic、P. Burdiak、V. Lipovac、P. Fazio和M. Voznak，“量子密钥分发网络的模拟”，《IEEE网络》，第39卷，第1期，第116–123页，2024年。[13] R. Martin、B. Lopez、I. Vidal、F. Valera和B. Nogales，“部署QKD网络数字孪生的服务”，《应用科学》，第14卷，第3期，第1018页，2024年。[14] A. Diaz-Bricio、B. Lopez、I. Vidal和F. Valera，“窃听条件下量子密钥分发的数字孪生方法”，载于2025年量子通信、网络与计算国际会议（QCNC），第143–150页，IEEE，2025年。[15] R. Yang、R. Wang、M. Clark、J. Tan、J. Tai、R. Balram、S. Jiang、S. K. Joshi和D. Simeonidou，“基于纠缠的量子网络数字孪生演示”，载于2025年光纤通信会议暨展览会（OFC），第1–3页，IEEE，2025年。[16] F. Chiti、T. Pecorella、R. Picchi和L. Pierucci，“迈向数字孪生辅助的软件定义量子卫星网络”，《传感器》（瑞士巴塞尔），第25卷，第3期，第889页，2025年。[17] X. Xu、S. Benjamin、J. Chen、J. Sun、X. Yuan和P. Zhang，“艰巨的任务：量子计算机的经典模拟”，《科学通报》，2025年。[18] B. Doolittle、R. T. Bromley、N. Killoran和E. Chitambar，“含噪量子网络中非定域性的变分量子优化”，《IEEE量子工程汇刊》，第4卷，第1–27页，2023年。[19] B. Doolittle、F. Leditzky和E. Chitambar，“量子通信网络中非经典性的操作性框架”，arXiv预印本 arXiv:2403.02988，2024年。[20] G. Avis和S. Krastanov，“利用随机自动微分优化量子中继网络”，《物理评论研究》，第7卷，第3期，第033111页，2025年。

[21] J. Ang、G. Carini、Y. Chen、I. Chuang、M. Demarco、S. Economou、A. Eickbusch、A. Faraon、K.-M. Fu、S. Girvin等，“Arquin：多节点超导量子计算机架构”，ACM量子计算汇刊，第5卷，第3期，第1–59页，2024年。[22] J. Chung、M. Hajdu˘sek、N. Benchasattabuse、A. Kolar、A. Singal、K. S. Soon、K. Teramoto、A. Zang、R. Kettimuthu和R. Van Meter，“交叉验证量子网络模拟器”，载于IEEE INFOCOM 2025——IEEE计算机通信会议研讨会（INFOCOM WKSHPS），第1–6页，IEEE，2025年。[23] L. d’Avossa、C. Zhan、J. Chung、R. Kettimuthu、A. S. Cacciapuoti和M. Caleffi，“量子网络量子转换策略的仿真”，arXiv预印本arXiv:2411.11377，2024年。[24] J. G. Richardson、P. Dhara、A. Bhatt、S. Guha和S. Krastanov，“级联纠缠链路的全栈物理层模型”，arXiv预印本arXiv:2510.17976，2025年。[25] E. Robertson、B. Maaß、K. Tschernig和J. Wolters，“原子系综量子存储器的数字孪生”，arXiv预印本arXiv:2506 20403，2025年。[26] T. Coopmans、R. Knegjens、A. Dahlberg、D. Maier、L. Nijsten、J. de Oliveira Filho、M. Papendrecht、J. Rabbie、F. Rozpedek、M. Skrzypczyk等，“NetSquid：使用离散事件的量子信息网络模拟器”，《通信物理》，第4卷，第1期，第164页，2021年。[27] X. Wu、A. Kolar、J. Chung、D. Jin、T. Zhong、R. Kettimuthu和M. Suchara，“SeQUeNCe：可定制的量子网络离散事件模拟器”，《量子科学与技术》，第6卷，第4期，第045027页，2021年。[28] R. Satoh、M. Hajdu˘sek、N. Benchasattabuse、S. Nagayama、K. Teramoto、T. Matsuo、S. A. Metwalli、P. Pathumsoot、T. Satoh、S. Suzuki和R. V. Meter，“QuISP：量子互联网仿真软件包”，载于2022年IEEE量子计算与工程国际会议（QCE），第353–364页，2022年。[29] L. Chen、K. Xue、J. Li、N. Yu、R. Li、Q. Sun和J. Lu，“SimQN：面向量子网络研究的网络层模拟器”，《IEEE网络》，第37卷，第5期，第182–189页，2023年。[30] S. Krastanov等，“QuantumSavory.jl。”https://github.com/ QuantumSavory/QuantumSavory.jl，2023年。[31] H. Li和Y. Pang，“FPGA加速量子计算仿真与量子密钥提纯”，《IEEE Micro》，第41卷，第4期，第49–57页，2021年。[32] A. U. Khalid、Z. Zilic和K. Radecka，“量子电路的FPGA仿真”，载于IEEE计算机设计国际会议：计算机与处理器中的VLSI，2004年，ICCD 2004论文集，第310–315页，IEEE，2004年。[33] N. Mahmud、E. El-Araby和D. Caliga，“以高精度和高吞吐量扩展量子算法的可重构仿真”，《量子工程》，第1卷，第2期，第e19页，2019年。[34] E. El-Araby、N. Mahmud、M. J. Jeng、A. MacGillivray、M. Chaudhary、M. A. I. Nobel、S. I. U. Islam、D. Levy、D. Kneidel、M. R. Watson等，“迈向在高性能可重构计算机上对量子算法进行完整且可扩展的模拟”，《IEEE计算机汇刊》，第72卷，第8期，第2350–2364页，2023年。[35] S. Mourya、B. R. La Cour和B. D. Sahoo，“使用CMOS模拟电路模拟量子算法”，《IEEE量子工程汇刊》，第4卷，第1–16页，2023年。[36] A. Dahlberg和S. Wehner，“SimulaQron——用于开发量子互联网软件的模拟器”，《量子科学与技术》，第4卷，第1期，第015001页，2018年。[37] S. DiAdamo、J. N¨otzel、B. Zanger和M. M. Bes.e，“QuNetSim：量子网络软件框架”，《IEEE量子工程汇刊》，第2卷，第1–12页，2021年。[38] W. Luo、B. Baheri、T. Humble、J. Zhao、T. Zhan、R. Maharjan和Q. Guan，“可扩展量子云的数字孪生”，载于第39届ACM SIGSIM高级离散仿真原理会议，第165–175页，2025年。[39] S. DiAdamo、J. N¨otzel、S. Sekav˘cnik、R. Bassoli、R. Ferrara、C. Deppe、F. H. Fitzek和H. Boche，“集成量子模拟以实现量子增强经典网络仿真”，《IEEE通信快报》，第25卷，第12期，第3922–3926页，2021年。[40] S. Lloyd，“通用量子模拟器”，《科学》，第273卷，第5278期，第1073–1078页，1996年。[41] I. M. Georgescu、S. Ashhab和F. Nori，“量子模拟”，《现代物理学评论》，第86卷，第1期，第153–185页，2014年。[42] E. Altman、K. R. Brown、G. Carleo、L. D. Carr、E. Demler、C. Chin、B. DeMarco、S. E. Economou、M. A. Eriksson、K.-M. C. Fu等，“量子模拟器：架构与机遇”，PRX Quantum，第2卷，第1期，第017003页，2021年。

[43] M. Amir、C. Bauckhage、A. Chircu、C. Czarnecki、C. Knopf、N. Piatkowski和E. Sultanow，“我们对量子（数字）孪生可以期待什么？”，载于第17届国际经济信息学会议，2022年。[44] F. Riera-S`abat、J. Miguel-Ramiro和W. D¨ur，“含噪量子网络的量子模拟”，arXiv预印本arXiv:2506.09144，2025年。[45] T. H¨aner、D. S. Steiger、M. Smelyanskiy和M. Troyer，“量子电路的高性能模拟”，载于SC’16：国际高性能计算、网络、存储与分析会议论文集，第866–874页，IEEE，2016年。[46] S. N. Elyasi、S. M. Ahmadian、P. Monti、J. Li和R. Lin，“使用数字量子计算机进行量子数据中心仿真的框架”，arXiv预印本arXiv:2509.04029，2025年。[47] I. Kefaloukos、N. Tcholtchev、M.-A. Kourtis、G. Oikonomakis、E. E. Rompogiannakis和E. Markakis，“量子物联网（ioqt）——量子模拟与仿真的新前沿”，载于2025年联合国家网络安全会议，2025年。[48] D. T. Chen、B. Doolittle、J. Larson、Z. H. Saleem和E. Chitambar，“利用局部测量推断量子网络拓扑”，PRX Quantum，第4卷，第4期，第040347页，2023年。[49] J. Doi、H. Takahashi、R. Raymond、T. Imamichi和H. Horii，“异构HPC系统上的量子计算模拟器”，载于第16届ACM国际计算前沿会议论文集，第85–93页，2019年。[50] P. Zhang、J. Yuan和X. Lu，“融合数据局部性的多GPU量子计算机仿真”，载于国际并行处理算法与架构会议，第241–256页，施普林格，2015年。[51] H. Horii、C. Wood等，“多次量子计算模拟GPU加速的高效技术”，arXiv预印本arXiv:2308.03399，2023年。[52] J. Faj、I. Peng、J. Wahlgren和S. Markidis，“扭曲速度下的量子计算机模拟：评估GPU加速的影响——基于IBM Qiskit Aer、NVIDIA Thrust与cuQuantum的案例研究”，载于2023年第19届IEEE国际电子科学会议（e-Science），第1–10页，IEEE，2023年。[53] Z. Cai、R. Babbush、S. C. Benjamin、S. Endo、W. J. Huggins、Y. Li、J. R. McClean和T. E. O’Brien，“量子误差缓解”，《现代物理学评论》，第95卷，第4期，第045005页，2023年。[54] J. Roffe，“量子纠错：入门指南”，《当代物理学》，第60卷，第3期，第226–245页，2019年。[55] T. Peng、A. W. Harrow、M. Ozols和X. Wu，“在小型量子计算机上模拟大型量子电路”，《物理评论快报》，第125卷，第150504页，2020年10月。[56] H. Harada、K. Wada和N. Yamamoto，“无需辅助量子比特的双重最优并行线路切割”，PRX Quantum，第5卷，第040308页，2024年10月。[57] H. Shapourian、E. Kaur、T. Sewell、J. Zhao、M. Kilzer、R. Kompella和R. Nejabati，“量子数据中心基础设施：可扩展架构设计视角”，arXiv预印本arXiv:2501.05598，2025年。[58] M. J. Martin、C. Hughes、G. Moreno、E. B. Jones、D. Sickinger、S. Narumanchi和R. Grout，“量子数据中心的能耗：扩展计算机架构、量子比特性能、规模与热参数的影响”，《IEEE可持续计算汇刊》，第7卷，第4期，第864–874页，2022年。[59] J. Preskill，“NISQ时代及未来的量子计算”，量子，第2卷，第79页，2018年8月。[60] T. D. Ladd、F. Jelezko、R. Laflamme、Y. Nakamura、C. Monroe和J. L. O’Brien，“量子计算机”，《自然》，第464卷，第45–53页，2010年3月。[61] S. Resch和U. R. Karpuzcu，“量子计算：贯穿系统栈的综述”，2019年。[62] N. Lauk、N. Sinclair、S. Barzanjeh、J. P. Covey、M. Saffman、M. Spiropulu和C. Simon，“量子转导展望”，《量子科学与技术》，第5卷，第2期，第020501页，2020年。[63] I. ˇSupi´c和J. Bowles，“量子系统的自检：综述”，量子，第4卷，第337页，2020年9月。