arXiv:2601.08578v1 [quant-ph] 13 Jan 2026

量子计算——面向工业的战略建议

Marvin Erdmann*[1]、LukasKarch[1], Abhishek Awasthi[2], Caitlin Isobel Jones[2],Pallavi Bhardwaj[3],Florian Krellner[3],Jonas Stein[4],Claudia Linnhoff-Popien[4], Nico Kraus[5], Peter Eder[6,7], Sarah Braun[6], 和 TongLiu[6]

[1]*BMW Group, Munich, Germany*
[2]*BASF Digital Solutions GmbH, Ludwigshafen, Germany*
[3]*SAP SE, Walldorf, Germany*[4]*LMU Munich, Munich, Germany*[5]*Aqarios GmbH, Munich, Germany*[6]*Siemens AG, Garching, Germany*[7]*Technical University Munich, Munich, Germany*

摘要

本白皮书调研了当前量子赋能优化和机器学习在工业场景中用例的发展现状，以及短期至中期前景。本白皮书以 QCHALLenge 项目为基础，综合分析了不同量子架构和供应商的硬件发展轨迹，并在标准化的红黄绿灯评估框架下，评估其成熟度以及在现实用例中的潜力。我们简要总结了相关硬件路线图，区分超导技术与离子阱技术，并介绍其当前状态、运行模式和预计的扩展轨迹。本文的核心内容是对优化问题和机器学习应用领域中的用例评估。针对所开展的实验，我们采用一套一致的评估标准（模型表述、可扩展性、解的质量、运行时间和可迁移性），并在由三个类别构成的统一体系中进行评估：从乐观情形（量子计算机产生的解决方案可与经典方法相竞争，和/或已展现出实现量子优势的明确路径）到悲观情形（重大障碍阻碍量子解决方案当前及未来的实际应用）。最终结论阐明了量子方法目前在哪些领域展现出潜力，经典-量子混合策略在哪些领域最具可行性，以及经典方法在哪些领域预计仍将保持优势。

*通讯作者：marvin.erdmann@bmw.de

1 引言

由德国联邦研究、技术与空间部（BMFTR）资助的“物流与生产线管理的量子-经典混合优化算法”项目（QCHALLenge），探索量子计算（量子计算）在优化和机器学习领域的工业适用性 [1]。该项目由包括巴斯夫、BMW集团、SAP SE、西门子和慕尼黑大学在内的联盟牵头，旨在评估面向现实生产和物流挑战的量子-经典混合算法。项目在不同量子算法上测试了多个工业用例，并在含噪中等规模量子（NISQ）设备上实现这些算法，重点关注能够缓解硬件限制的混合软件，例如量子比特数量少、有限连接性和易受错误影响性等问题。这些算法将与经典求解器进行基准测试，以检验量子算法和量子硬件的有效性。基准测试是项目技术路线图的核心。在项目开展期间，我们使用了 IBM、IonQ 和 DWave 的量子硬件 [2, 3]。

QCHALLenge 项目的关键方面包括：

- 采用自上而下的方法，聚焦于应用层工具，以降低非专业人士的使用复杂度。
- 开发混合分析与评估工具，用于评估问题的复杂度以及不同量子计算硬件的性能。
- 重点关注物流和生产，因为它们与工业高度相关且具有可重复性。

本报告是 QCHALLenge 总体目标的一部分，旨在为工业提供方法论建议；这些建议以量子计算对生产和物流领域选定用例的预估业务影响为依据。本目录还包括本项目测试的若干硬件供应商的量子计算路线图，以及这些硬件是否适用于项目成员提供的用例。请注意，我们所指的是相关硬件供应商在本报告发布日期公开提供的技术路线图。

QCHALLenge 项目是更广泛的量子生态系统的一部分，并与以下其他项目、倡议和行业相连。

• PlanQK：面向中小企业的商业量子平台；QCHALLenge 通过服务大型工业企业与之互补 [4]。

• Luna：由 Aqarios 提供的商业量子解决方案套件。Aqarios 是慕尼黑大学量子应用与研究实验室（QAR-Lab）的衍生公司；该公司与 QCHALLenge 的所有成员合作，并为本研究提供支持 [5]。

• QUARK：量子计算应用基准测试框架；QCHALLenge 提供公共插件，其中包含其用例和指标 [6]。

• QuCUN：面向用户的量子计算平台；QCHALLenge 贡献工具和演示工具 [7]。

• QUTAC：行业联盟；QCHALLenge 的目标与其推动量子计算工业化的使命一致 [8]。

• 活动与传播：QCHALLenge 参与高知名度的会议和公共活动，例如 Bitkom量子峰会及多届 QCE会议，并通过其自有网页向公众介绍这些活动 [9–11]。

本文其余部分安排如下：第2节介绍部分量子硬件提供商公开发布的技术路线图，重点关注本研究实验所采用的量子架构，即超导器件（第2.1节）和离子阱（第2.2节）。在第3节中，我们首先介绍用于评估本研究中量子方法性能与潜力的类别和评估框架。随后，我们介绍优化问题（第3.2节）和机器学习（第3.3节）领域的工业应用，评估量子解决方案的能力，并针对每个用例对量子计算的潜力作出结论。最后，我们概述研究结果（第3.4节），展望量子计算在工业用例中的应用前景，并根据研究结果为评估的技术的用户提出建议（第4节）。

2 量子硬件路线图

量子硬件路线图是工业界和研究领域的基础要素，能够为项目、预算和时间规划提供战略规划、优先级排序以及严谨的资源分配依据。可靠的路线图可将技术能力上限转化为可执行的里程碑，支持风险评估，并为实验、采购和合作决策提供指导。通过将预期的硬件演进与具体用例相结合，组织能够预判近期的可行性，调整对中长期影响的预期，并据此统筹专业知识、资源和资金的分配。从这个意义上说，稳健的路线图是贯穿整个研发至部署流程的基础。

量子比特数量是供应商提供、公开透明度最高且传播最广的指标，但它只是量子硬件容量的一个维度。其他一些关键因素也会影响实际性能：量子比特质量，包括相干时间和门保真度；量子比特的连接性以及决定可嵌入性的架构布局；错误率和纠错前景；原生门集的广度；以及软件栈的成熟度，包括编译器、嵌入技术和生态系统工具 [12]。尽管如此，在本研究中，我们仍以量子比特数量作为核心指标。这一选择体现了比较量子比特数量的实际优势：它提供了一项简单明了、报告方式一致的基准，便于评估各类硬件平台，并为长期规划和跨站点基准测试提供直观依据。

本节重点介绍构建两类量子技术的供应商的产品路线图。第 2.1 节调研超导量子计算机，详细说明其当前状态、基于量子门的模式与退火模式在这一技术中的共存情况，以及以量子比特数量计的主流扩展轨迹。第 2.2 节转向离子阱量子计算机，介绍其物理概念，并呈现此类设备供应商的技术路线图。其他量子相关硬件系列，例如基于中性原子的 [13], 光子 [14] 和拓扑量子计算机 [15], ，未用于本研究中的用例评估，因此不属于本节重点。

2.1 超导量子计算机

超导器件是量子计算技术中的重要类别，其特点是使用超导材料制造量子比特。这些量子比特在极低温度下运行，此时材料表现出零电阻，从而能够高效操控量子态。超导量子比特通常通过约瑟夫森结实现；约瑟夫森结能够形成非线性电感元件，而非线性电感元件是量子操作不可或缺的组成部分。

超导器件的主要优势之一在于其与现有半导体制造技术的兼容性，这可以加速量子系统的开发与扩展。这种兼容性使超导量子比特能够实现大规模生产，从而成为未来量子计算应用的可行选择。然而，挑战依然存在，尤其是在管理热环境和最大限度降低噪声方面，因为噪声会对量子比特的性能产生不利影响。

超导量子比特是实现量子计算硬件的多种方式之一（另一种方式是第 2.2 节介绍的离子阱）。使用超导量子比特的两种计算方法是量子退火和基于门的设备。

基于门的量子计算与量子退火机之间的主要区别之一在于其运行原理。基于门的系统依靠一系列量子门执行计算。这些量子门操控量子比特的量子态，从而能够实现通用量子算法。基于门的量子计算机具有灵活性，能够处理广泛的问题，从大数分解到量子系统模拟。

相比之下，量子退火机专门用于解决优化问题。它们通过寻找系统的最低能态来运行，该能态对应于给定问题的最优解。量子退火机不使用一系列量子门；相反，它们利用量子隧穿和叠加态，同时探索多个解。这使其在特定类型的优化任务中尤为有效，但在通用量子计算方面，其灵活性不如门模型系统。

2.1.1 量子退火机

量子退火是量子计算领域中的一种独特方法，有别于基于量子门的量子计算等其他量子技术。与可能需要复杂电路设计和大量纠错的其他量子技术相比，量子退火为解决特定类型的优化问题提供了更直接的途径，因此特别适用于寻找最优解至关重要的应用场景。

量子退火技术路线图取得了显著进展，尤其得益于 D-Wave 等公司的努力。D-Wave [16,17], 一直走在这项技术的前沿。量子退火机的发展历程中，量子比特数量稳步增加，硬件能力也不断提升。这种增长至关重要，因为量子比特数量直接影响能够解决的问题的复杂度。然而，量子比特的扩展并非简单的线性增长；它需要克服将问题嵌入量子架构的重大挑战，并确保量子比特保持足够长时间的相干性以完成计算。

量子退火技术路线图还强调，需要加强纠错和降噪技术。目前，量子退火机运行于含噪声中型量子时代，量子比特容易出错，从而影响解的可靠性。因此，未来的发展将着重提升量子比特保真度，并开发更先进的算法，以有效利用现有量子比特。

此外，量子退火的预期进展不仅体现在增加量子比特数量上，还包括改进将现实世界问题转化为适用于量子处理的二次无约束二元优化（QUBO）模型所用的算法。这种转化往往十分复杂，可能导致效率低下，从而削弱量子解决方案相较于经典方法的潜在优势。

图1展示了 D-Wave 技术路线图中记录的历史量子比特数量和公布的量子比特数量，以及 NEC [18] 和 Qilimanjaro [19], 两家较小公司的设备所提供的量子比特数量。这两家公司分别来自日本和西班牙，均涉足量子退火领域。

自2011年起，D-Wave便拥有 100+量子比特量子退火机的研发历史，自这项技术开始工程化以来，它一直是此类设备的领先制造商。按量子比特数量计算，其最大的设备是

Advantage 于2020年向公众开放，搭载了5760个物理超导磁通量子比特 [20, 21]。此后，D-Wave致力于研发后继产品*Advantage2*，该产品于2025年全面向公众开放，重点在于提升量子比特互连性和相干性，并降低噪声 [22]。目前其设备的物理量子比特数量仍仅约为4400个，但D-Wave表示计划持续升级设备，目标是打造一个拥有10万个量子比特的系统 2030 [23]。

除 D-Wave 外，量子退火硬件提供商屈指可数。NEC公司、东北大学、日本产业技术综合研究所和 ParityQC 于2023年携手打造了一台8量子比特量子退火机，主要用于公共研究 [18]。Qilimanjaro 更进一步，于2025年将一台10量子比特绝热量子处理单元集成到巴塞罗那超级计算中心，使其成为欧洲首台集成于高性能计算（HPC）系统的量子退火设备 [19, 24]。然而，除 D-Wave 外，没有任何量子退火硬件提供商公布未来的发展计划。

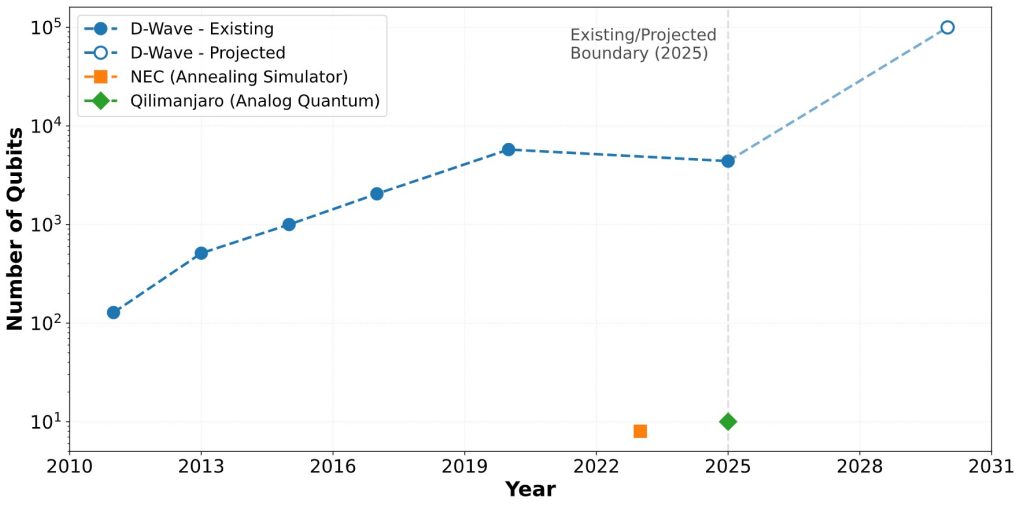


图1：D-Wave量子退火设备量子比特数量的历史变化及预测（蓝色），与NEC（橙色）和Qilimanjaro（绿色）制造的设备量子比特数量对比。

总之，量子退火未来能否成功，取决于量子比特扩展方面的进步，但或许更重要的是克服以下挑战：

量子比特连通性受限、纠错以及算法效率。随着技术日趋成熟，量子退火或许会成为实现实用量子优势最直接的途径，通过解决各行业的复杂优化问题发挥作用。然而，要取得这些进展，仍需持续开展研究与开发，以应对量子硬件和算法设计固有的挑战。由于 D-Wave 是全球唯一具有重要影响力的量子退火硬件供应商，在高度动态的生态系统中，这项技术的前景相对容易受到该企业商业成功与稳定性的影响。

2.1.2 基于门的设备

基于门的量子计算是一种用途广泛的方法，通过量子门操控量子比特，从而能够执行各种量子算法。该方法的特点是通过一系列量子操作完成复杂计算，因此适用于多种应用，包括量子模拟、密码学和优化问题。

IBM [25]和 IQM [26]等供应商为基于门的设备制定的路线图，预示着该领域将迅速发展，尤其是在延长相干时间、提高门保真度以及增加物理量子比特（之后还包括逻辑量子比特）的数量方面。随着研究人员不断改进设计和制造工艺，超导量子比特的性能稳步提升，使得执行更复杂的量子算法成为可能。此外，基于门的电路具有模块化特性，能够整合不同类型的量子比特和经典控制系统，从而增强量子处理器的整体功能。

图2中的图表展示了三家该技术领先供应商（IBM、Google 和 IQM）所构建的基于门的量子计算机的历史发展情况，以及根据各自技术路线图预测的发展趋势。

与量子退火相比，在量子比特数量方面，基于门的量子计算机供应商的格局要密集得多。2015年至 2020 [27, 28], 期间，Google一直保持着基于门的量子计算机量子比特数量纪录，其中包括$Sycamore$处理器；Google凭借该处理器宣称实现了量子霸权。 2019 [29], IBM的$Eagle$ 处理器则是 2021 [30]首个量子比特数量超过100的基于门的量子计算设备。同年，IQM提供了访问其设备的途径

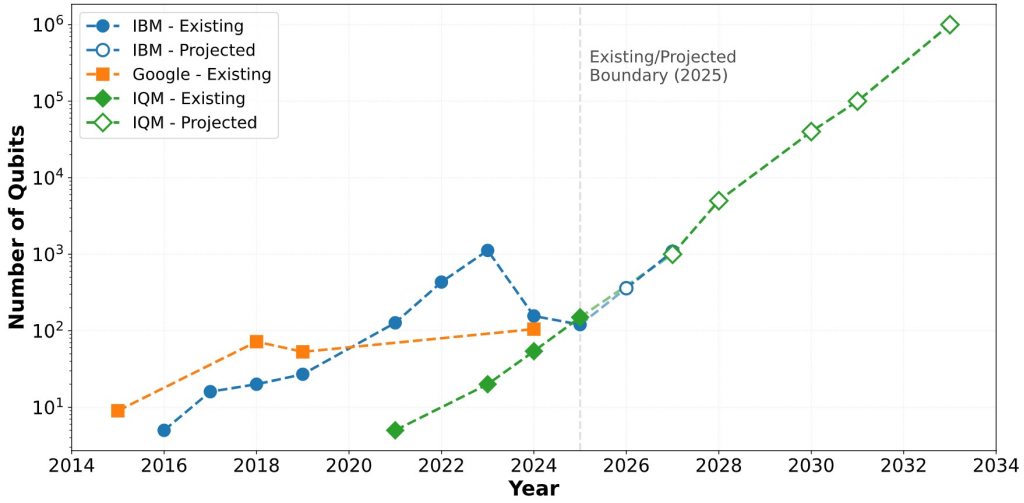


图2：IBM（蓝色）、Google（橙色）和 IQM（绿色）制造的基于量子门的量子计算机物理量子比特数量的历史及预测发展趋势

，其5量子比特*Spark* 设备 [31], 也加入了超导门模型量子计算机制造商之间的领先地位之争。2023年，IBM建造了迄今最大的此类设备：*Condor* 是一款拥有1121个量子比特的量子处理器，IBM借此宣布“量子实用性时代的开端” [32]。

此后，IBM 专注于提升单量子比特质量、量子比特连接性和模块化，由此在2024年推出更小但性能更强的芯片（*Heron* [33, 34]），并于2025年推出新芯片（*Nighthawk* [35]）。在此期间，Google 和 IQM 也迎头赶上：Google *Willow*（105 个量子比特） [36] 以及 IQM *Radiance* （150 个量子比特） [37]。

根据 IBM [25] 和 IQM [26], 的硬件路线图，两家供应商都计划进一步扩展其量子机器。Google 也公布了计划实现的里程碑清单，但没有给出具体时间表 [38]。他们都认同，应在本十年内打造一台经过纠错、具备容错能力的量子计算机，并在各自的路线图推进过程中，逐步开始以逻辑量子比特而非物理量子比特来制定目标数量（本文所示图表中，我们只考虑已公布的物理量子比特预测）。这条通往容错性的明确路径，使我们能够估算出工业相关

问题可在量子硬件上得到高效解决的时间，并将作为我们在第3节评估用例的依据。

总而言之，超导器件是量子计算领域的领先技术之一，其特点是应用领域广泛，性能提升迅速。随着研究不断深入，这些器件有望在实现实用量子应用和潜在量子优势方面发挥关键作用，能够解决当前超出经典计算技术能力范围的复杂大规模工业问题。

2.2 离子阱

与超导器件相比，离子阱技术是在量子计算领域实现量子比特的另一种方案。其显著特点是使用带电粒子，即离子，作为量子比特。超导器件依赖固态系统，而离子阱则利用电磁场在真空中囚禁并操控单个离子。由于可以使用激光束精确控制离子以执行量子门，这种方法能够实现高保真度的量子操作。囚禁离子本身具有的稳定性使其相干时间比许多其他量子比特实现方案更长，因此特别适用于每个量子比特都需要执行大量量子门操作的过程。

离子阱与超导器件的一个主要区别在于其运行环境。离子阱在室温下运行，相较于必须维持在低温环境中的超导量子比特，其冷却要求更为简单。这一特性有助于更轻松地与经典控制系统集成，并可能降低整体量子计算架构的复杂性。

此外，离子阱系统中的量子比特通常具有很高的连通性，因此能够实现更灵活的量子电路设计。相比之下，超导器件的量子比特连通性可能受芯片物理布局的限制。在离子阱中，任意一对离子之间都能够执行纠缠操作，这进一步提升了实现复杂量子算法的潜力。

尽管与其他量子比特技术相比，囚禁离子量子计算机在理论和实践上都具备一些优势，但历史上也面临着独特的挑战，尤其是在可扩展性方面。单个离子阱可以实现出色的性能，但要打造拥有大量量子比特的大规模量子处-

理器，对于 Quantinuum、IonQ 和 AQT 等硬件提供商来说仍是一项重大难题。管理多个离子并确保精确控制它们之间的相互作用，其复杂性会让扩展过程更加困难。

离子阱量子计算领域的两家领先制造商 Quantinuum 和 IonQ 宣称，未来推出的设备到 2030年将大幅增加量子比特数量，而 AQT 目前尚未公布硬件路线图。图 3 显示，2025年，按量子比特数量计算，最大的囚禁离子量子计算机是 Quantinuum Helios，配备 96 个钡-137 物理量子比特 [39]。IonQ 宣称将在五年内推出一款配备 200 万个独立离子的设备 [40], ，而 Quantinuum 则预计以更温和的速度增长至“数千个物理量子比特”，并根据其最新技术路线图，将重点放在降低逻辑错误率上 [41]。

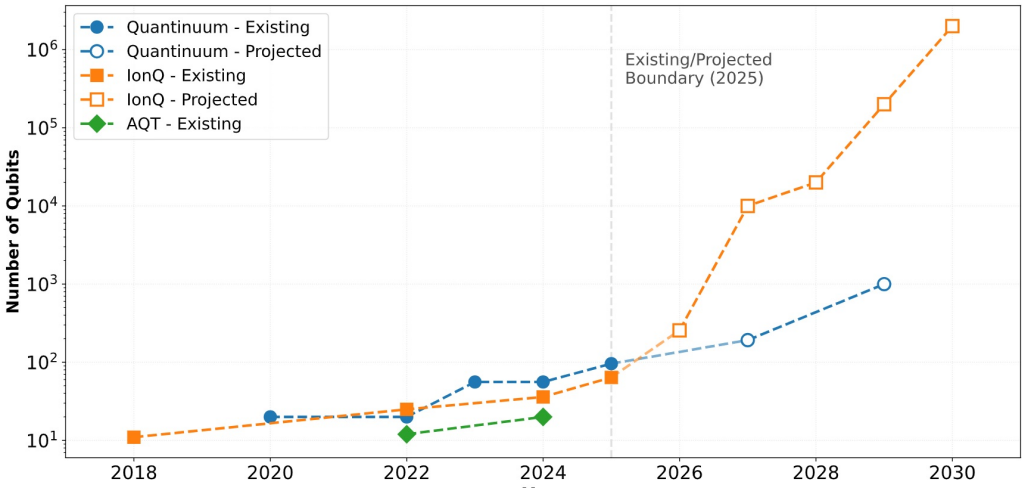


图 3：Quantinuum（蓝色）和 IonQ（橙色）制造的囚禁离子量子计算机的历史及预测发展情况，并与 AQT（绿色）制造设备的量子比特数量进行比较。

总之，离子阱技术为量子计算提供了一种独特的方法，其特点是使用囚禁离子作为量子比特，并在相干性和连通性方面具备运行优势。随着该领域的研究不断推进，预计离子阱将为实用量子计算机的发展作出重要贡献，并补充超导器件的能力。

3 工业用例考量

QCHALLenge 项目最重要的任务之一，是在量子计算领域识别和评估组合优化与机器学习方面的用例。每个用例都会同时采用经典方法和基于量子计算的方法进行评估，并估算量子计算所能带来的收益，以及实现量子优势所需的后续步骤。

本项目实验所用的代码基于可通过开源 GitHub 代码库 [42]获取。此外，由于该代码以插件形式实现于量子计算应用基准测试（QUARK）框架 [6]中，因此也可以复现结果，并使用其他求解方法和（量子）硬件后端进行基准测试。

3.1 交通灯式评估

3.1.1 用例考量方面

通过一组定义明确且标准化的方面评估量子计算，可以用结构化且透明的方式了解其能力、局限性及实际应用潜力。这些方面有助于识别量子方法已具备优势的领域、仍面临重大挑战的领域，以及需要进一步研究的方向。对不同用例采用一致的评估标准，便能进行有意义的比较、确定开发工作的优先顺序，并了解其在工业领域实现的现实前景。此外，在某些情况下，特定用例可能需要考察补充的、针对该用例的方面。这些额外评估旨在突出各项应用的特定优势、劣势或独特属性，而非作为与其他用例直接比较的依据。

- **模型与实现**：此方面评估问题在量子计算背景下的表述和表示方式，包括所用的具体算法、编码和问题结构。它衡量问题与二次无约束二元优化（QUBO）或二元二次规划（BQP）等适用于量子计算的格式的契合程度，以及模型在量子硬件上的实现效果，例如是否

需要使用松弛变量来实现约束，以及这些变量是否会影响性能。

- **可扩展性**：此维度评估量子计算方法处理不断增大的问题规模的能力。它考察随着问题复杂度提高，所需的变量数量、量子比特数量及计算资源，以及当前或未来的硬件是否能够支持大规模工业问题。

- **解的质量**：此维度衡量量子算法生成的解在最优性、准确性和稳定性方面相较于经典方法的表现。它评估量子方法在实际应用中能否找到更优、更快或更可靠的解。

- **运行时间**：此维度考察量子解决方案相较于经典方法的时间效率。它考虑解决问题所需的总时间，包括嵌入、执行和后处理，并评估其是否适用于实时或近实时应用。

- **可迁移性**：此维度评估量子解决方案在不同问题类型或领域中的适用性。它反映所评估的量子方法适应各种用例的灵活性，以及其广泛用于工业部署的潜力。

3.1.2 类别、评估与结论

交通灯式系统是一种简单直观的方法，用于对量子计算在不同方面的性能和潜力进行分类。通过使用绿色、黄色和红色，该系统能够快速传达每个方面的当前状态、短期前景和长期挑战。绿色表示量子方法具有竞争力或前景可观，黄色表示其收益尚不确定或取决于未来的发展，红色则突出显示目前以及未来可能仍会因重大障碍而无法实现实际应用的方面。这种直观且易于理解的框架有助于清晰传达复杂的技术评估，帮助利益相关方快速掌握量子计算在各种用例中的优势与局限。它还通过突出研究与开发的优先领域，以及识别需要长期

投资与创新的方面来支持战略决策，这些内容会在每个用例部分末尾的结论中提供。

- **绿灯**：在这些方面，量子计算（或混合方法）在此用例的评估中可与经典方法竞争，甚至优于经典方法。实现切实的短期量子优势已有明确路径。

- **黄灯**：对于归为黄色的方面，量子计算机何时能够与经典解决方案竞争或带来优势，目前仍有待观察。

- **红灯**：本研究得出的结果明确表明，在这些方面，量子计算无法与经典方法竞争。根据现有技术路线图，未来五到八年内实现量子优势的路径尚不明确。

3.2 优化用例

QCHALLenge 项目针对一系列多样化的工业优化用例开展研究，每个用例都根据其复杂性、经济相关性和实现量子优势的潜力进行筛选。这些用例涉及多个工业联盟合作伙伴，旨在将量子计算方法与经典方法进行基准比较。项目会在模拟量子硬件和真实量子硬件上（如可行）对每个用例进行严格的基准测试，使用的设备包括 D-Wave、IBM 和 IonQ 量子计算机，以评估其可行性和性能。

在接下来的章节中，我们将简要介绍这些用例，并说明如何为经典和量子求解器建立问题模型，因为问题的数学模型是任何求解方法（经典或量子）中最重要的方面之一。随后，我们将概述对上述用例不同方面的评估。

3.2.1 生产分配与调度

生产分配与调度问题是一种 NP 难的组合优化问题，涉及多个作业和机器，重点在于平衡机器的加工时间、缩短产品的制造时间，同时最大化所生产物品的价值，如图4所示。

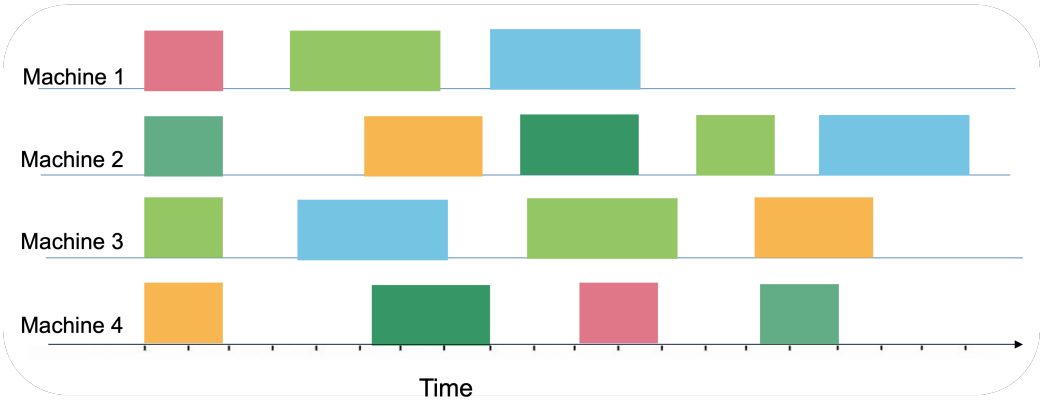


图4：一个包含 16 个作业和 4 台机器的问题的示例解。机器在相邻作业之间的空闲时间表示所需的设置时间。目标是减少总设置时间、均匀分配所有机器的忙碌时间，并最大化总价值 [2]。

例如，巴斯夫的业务部门就面临这类优化任务。目前，优化过程（即寻找最优或足够好的解决方案）耗时较长，因此任何显著的提速都备受期待，尤其是在意外发生操作中断时。本项目将量子退火和混合量子退火方法与工业规模经典求解器进行比较测试。

我们针对每种求解器的优势，分别开发了两种不同的数学模型。对于经典求解器，问题被表述为混合整数凸规划，以利用传统优化技术的结构和精确性。相比之下，量子-经典方法采用二元二次规划（BQP）表述，与 D-Wave 的 Leap 混合求解器 [43] 的能力相匹配。这种建模选择确保使用最适合问题的表述来评估每种求解器，从而实现公平且有意义的比较。

基准测试涵盖的问题规模最高约为 150,000 个变量，这一规模体现了真实的工业复杂性。该研究将工业级经典求解器与 D-Wave 的混合量子求解器进行比较，并分析了各项 Metrics 的性能。值得注意的是，量子—经典求解器展现出竞争力，在某些情况下，甚至在速度上超过经典求解器，彰显了混合方法在生产环境中的潜力。

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **可扩展性**：此用例的结果表明，D-Wave 的混合量子求解器能够处理多达 150,000 个变量的问题规模，这对现实世界中的工业调度意义重大。这说明量子-经典求解器并非仅停留在理论层面，而是能够扩展到实际工作负载。

  – **运行时间**：在一些基准测试案例中，量子-经典求解器的速度超过了经典求解器，尤其是在问题采用适合量子优化的方式建模时（例如，二次二进制格式）。当问题结构与量子方法高度契合时，这有力地表明量子技术能够带来优势。

- **黄灯**

  – **模型与实现**：量子求解器的性能很大程度上取决于问题的表述方式。要通过量子计算机高效求解该问题，二元二次模型必不可少；而经典求解器则受益于凸形式。这意味着量子优势并非自动产生，而是需要经过审慎的建模。

  – **解的质量**：研究表明，尽管量子求解器具有竞争力，但经典求解器在某些结构化问题上仍表现出色。量子求解器能否带来优势取决于问题类型和表述方式，并非普遍适用。

- **红灯**

  – **可迁移性**：目前纯量子硬件的规模尚不足以解决量子比特数量、连接性或噪声等方面的限制——这些因素仍在实际应用中制约着量子计算。它们可能会限制量子计算在其他领域或不同硬件上的适用性。

  – 没有纯量子基准测试：由于目前可用的量子退火器无法处理工业实践中具有实际意义的问题规模，因此本研究使用了 D-Wave 的混合求解器，该求解器结合了经典与量子资源。然而，

目前没有明确的信息说明，为了得出最终结果，实际进行了多少量子计算。因此，尚不清楚性能提升有多少是单由量子计算带来的。

结论

总体而言，这一用例的研究凸显了问题建模对于发挥经典求解器和量子求解器各自优势的重要性。这也有力地证明了 D-Waves 混合优化工作流的价值，尤其是在传统方法难以应对规模扩展或非线性的领域。

- **前景可期且切实可行——但也有局限**：这一用例非常适合采用量子-经典方法。我们证明，当问题得到恰当建模时，例如将其建模为二元二次规划，D-Wave 的混合求解器能够处理大规模工业问题（多达 150,000 个变量），并取得有竞争力的性能，甚至优于建模为混合整数线性规划（MILP）的经典求解器。这表明，量子计算不仅仅是理论上的可能性，对于某些类别的工业优化问题而言，它在实践中也切实可行，尤其是在以下情况下：

  – 问题具有非线性或组合性质。– 经典求解器面临可扩展性或性能瓶颈。–问题可以重新表述为二次无约束二元优化或二元二次规划，从而契合量子求解器的优势。

- **然而，量子优势是有条件的**：量子优势并非普遍存在。它在很大程度上取决于：

  – 建模选择：经典求解器擅长处理凸形式，而量子求解器则需要二进制／二次结构。– 求解器成熟度：本研究采用的是混合求解器，而非纯量子求解器，因此量子计算的贡献与经典资源相结合。– 硬件限制：目前纯量子硬件的规模不足以解决量子比特数量或噪声等限制问题；这些问题可能影响问题规模扩展时的泛化能力。

• **建议**：对于正在探索量子计算的组织而言，这个用例充分体现了混合工作流的价值。值得投资于：

  – 求解器感知的问题建模。– 在真实工作负载上对混合求解器进行基准测试。– 与量子技术供应商合作，量身定制问题表述。

3.2.2 列车路径规划

在此用例中，我们探讨铁路网络发生设备故障、环境灾害或意外延误等干扰后，如何对列车重新调度和重新规划路径（下文简称列车路径规划）。通常，铁路时刻表经过精细优化，以平衡轨道和站台等有限资源。一旦发生干扰，列车争夺这些稀缺资源，便会产生额外延误。传统启发式方法和人工调整通常能够给出可行方案，但无法保证最优性。因此，我们开始探索量子优化技术，利用并行状态空间搜索，在指数级庞大的搜索空间中找出全局最优时刻表。

首先将该问题建模为混合整数线性规划，其中纳入最小会车时间、单线轨道独占约束、车站容量以及列车间隔条件等现实约束。每列列车的延误分解为主要延误（不可避免）和次要延误（可避免），优化目标则是最小化按列车优先级加权的次要延误总和。二元优先顺序变量决定列车在共用轨道区段上的先后顺序，二元选择变量决定用于列车路由的轨道区段，同时通过约束确保不得提前发车，并满足最小车站停站要求。鉴于该问题规模庞大且复杂度高，研究人员探索了分解技术，将问题拆解为较小的子问题。具体而言，拉格朗日松弛和 Benders 分解均被研究为提高计算效率的潜在方法。采用拉格朗日松弛时，每个子问题负责求解单列列车在网络中的调度和路由。采用 Benders 分解时，在主问题中求解每个车站-列车对的延误，而所有轨道层面的协调则建模为可满足性问题，并在

一个子问题中求解。这显著降低了复杂度，并提升了可扩展性。

随后推导出一个 QUBO 模型，将分解后的问题或子问题映射到量子硬件上。CPLEX 或 Gurobi 等经典求解器可以在几毫秒内解决极小规模的问题，甚至能在一秒内解决更大规模的问题。但对于工业中存在的大规模问题，经典求解器难以在几秒内找到最优解，而这正是所要求的。

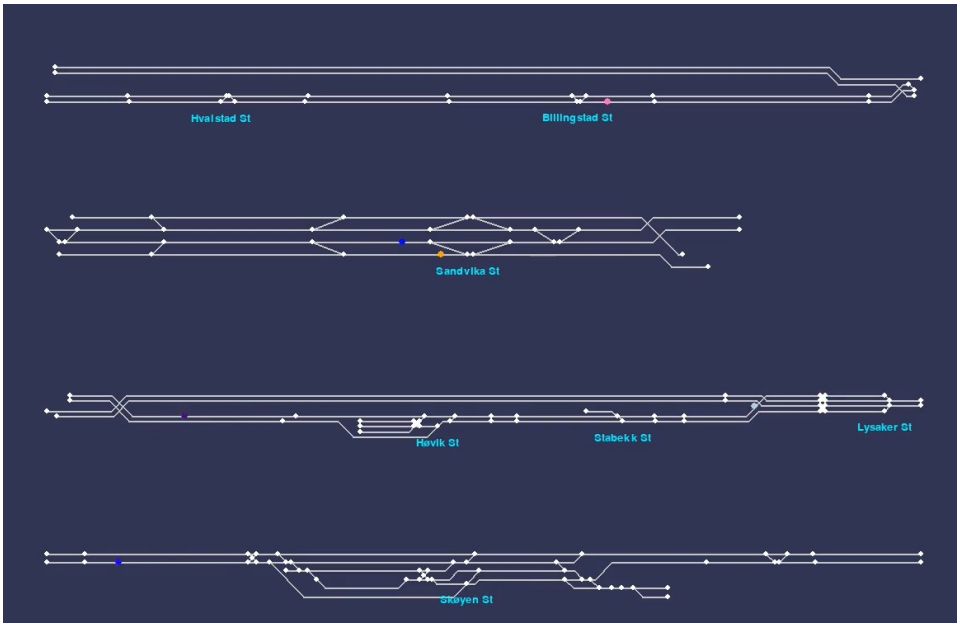


图 5：挪威铁路网络部分区域的微观示意图。彩色圆圈表示列车的位置。可视化基于来自 [44]的数据。

交通灯式评估

- **黄灯**

  – **可扩展性**：评估显示，要将整个问题编码为 QUBO 公式，决策变量的数量在最坏情况下会随列车数量呈二次增长，并随车站数量呈线性增长。当列车和车站数量都增加时，这会导致规模呈三次增长，而这

与其他问题相比是可以接受的。除一个较大的常数因子外，其规模增长与经典混合整数线性规划问题表述相符。然而，通过应用 Benders 分解，量子退火机能够使用少于 240 个量子比特求解一个包含 47 条轨道、6 个车站和 6 列列车的实例；而基于量子门的方法（QAOA+）则使用少于 40 个量子比特求解了同一实例。这些结果凸显了合理分解问题对于提升量子方法的可扩展性和效率至关重要。

– **可迁移性**：此用例与具有预定义路径的 AGV 车队调度和路由问题有相似之处。因此，未来的研究可以考虑将其迁移到此类用例。

- **红灯**

  – **运行时间**：在工业中，重新调度必须在几秒钟内完成。由于嵌入以及预处理与后处理步骤会带来一定开销，这可能会给量子计算带来问题。此外，目前基于量子门的量子硬件的运行时间远长于经典计算机，而量子退火速度很快。

  – **解的质量**：采用 Benders 分解，量子退火和基于量子门的量子计算方法（QAOA+）均成功求解了一个包含 47 条轨道和 6 列列车的问题实例。对于这些小规模实例，基于量子门的模型能够获得接近最优的解，而量子退火机得到的解质量低于最优水平。

  – **模型与实现**：当前对该用例的建模采用了一些简化处理，例如忽略列车连续动力学、不考虑列车之间换乘选项的协调、忽略列车取消，以及不纳入车辆段列车调度。实际上，这些因素会引入额外约束，增加问题的复杂性。这进一步凸显了采用恰当分解技术的重要性，以提取适合量子计算的（子）问题结构。

结论

- **当前局限**：尝试将整个问题编码为单个 QUBO公式，结果效率较低且可扩展性较差。目前可用的硬件不足以处理现实世界中的实例。鉴于硬件提供商当前的路线图，即使在未来 10 年内，也不太可能出现拥有足够多量子比特、能够容纳大型现实世界实例的系统。即便未来某个时候硬件足以嵌入该问题，所得解是否优于经典算法得出的解仍有待验证。然而，必须强调的是，由于硬件限制，目前只能考虑规模较小的问题实例。因此，根据已开展的研究，只能对未来结果得出非常有限的结论。

- **令人鼓舞的发现**：恰当结合分解技术与量子算法，对于提升效率和可扩展性至关重要。借助 Benders 分解，主问题仅对车站-列车对的延误进行编码，在数学上等价于一个集合覆盖问题，因此可以通过基于量子门的量子算法 QAOA+ 成功求解，同时保持较低的量子比特数量。其解的质量可与经典求解器相媲美。

- **未来潜力**：未来的潜在收益很大，尤其是量子退火速度非常快，非常适合实时调整；前提是量子退火的解的质量能显著提升，并且能够开发出恰当的分解技术。

- **建议**：为提升可扩展性和效率，采用适当的分解方法对于使用量子计算求解列车路径规划问题至关重要。结合 Benders 分解与 QAOA 等基于门的方法，在量子比特用量极少的情况下展现出良好的解的质量；量子退火则具有求解速度快的优势，但目前解的质量较低。建议进一步开展这一方向的研究。

3.2.3 舱体协调

舱体协调问题（PCP）描述了一种按需响应、门到门的运输系统，该系统使用由列车或卡车等主动式车辆运载的被动式模块化容器（舱体）。这一问题属于具有多种同步约束的主动—被动车辆路径问题，需要舱体与基地之间进行紧密协调。PCP 融合了需求响应式接送问题、多基地车辆路径问题、异构车队和多种运输模式等要素，旨在优化服务质量和运营效率。目前，该用例尚未在现实环境中实施，而问题的复杂性给经典和量子求解器都带来了重大挑战。

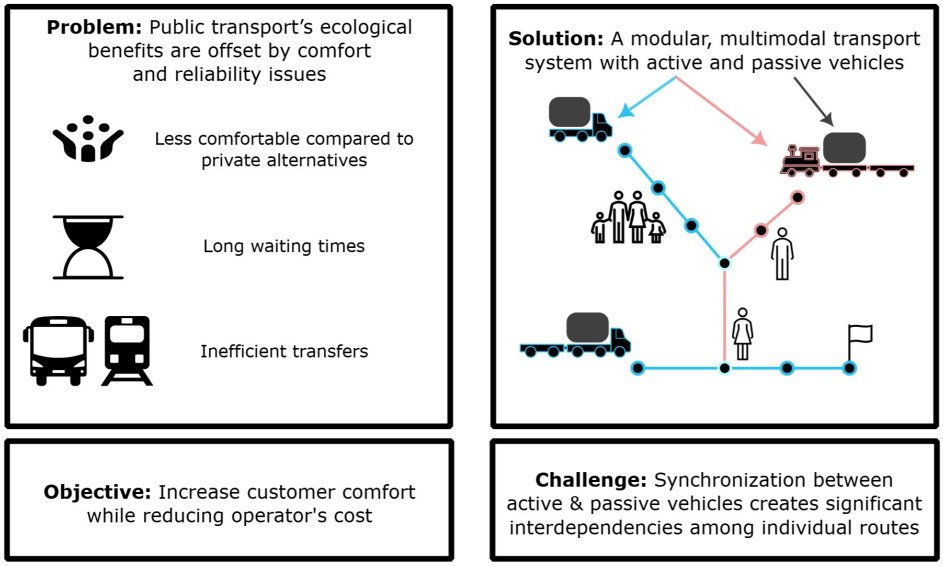


图 6：PCP 将车辆路径规划、调度和排序问题结合起来。其目标是在降低服务提供方运营成本的同时，改善公共交通服务用户的体验。此图改编自 [45]。版权所有 ©2025年 爱思唯尔。

在本项目中，我们探索了多种经典求解方法，包括混合整数线性规划（混合整数线性规划）、自适应大邻域搜索和迭代束搜索。该问题的复杂性体现在其对大量量子比特的需求上；例如，即使是

最小的测试实例也需要超过 10,000 个量子比特，这使得它们对于当前的量子硬件而言不切实际。

交通灯式评估

- **黄灯**

  – **模型与实现**：将量子计算应用于 PCP 的理论框架已成功实现。然而，混合整数线性规划表述需要处理连续变量，而同步约束又要求这些变量，因此如何高效处理连续变量给量子计算带来了挑战。未来能够有效处理这些变量的量子算法将至关重要。

- **红灯**

  – **可扩展性**：即使对于最简单的实例（五个客户就需要超过 10,000 个量子比特），所需的量子比特数量也远远超出了当前量子硬件的能力。这给实际实现带来了重大障碍。然而，由于这些硬件限制，目前无法对未来系统的可扩展性作出任何可靠判断。

  – **解的质量**：由于量子比特需求很高，尚未在量子硬件上进行任何测试。针对问题定制的经典启发式方法已展现出快速找到高质量解的能力。这表明，量子方法要想提供具有竞争力的 Advantage，仍需要硬件和算法取得重大进展。

  – **运行时间**：由于 PCP 本身复杂度高且硬约束数量众多，目前将 PCP 嵌入量子电路似乎在电路深度、映射开销以及由此产生的运行时间方面效率极低。然而，由于无法在量子硬件上进行测试，目前的研究对于未来可能的发展参考价值有限。

  – **可迁移性**：尽管 PCP 代表一种相当通用的问题类别，且与车辆路径问题密切相关，其核心与旅行商问题有关，但它的

额外约束和目标使其难以在任何依赖量子电路或该问题的QUBO公式的量子计算机上实现。

结论

总体而言，舱体协调用例凸显了量子计算在实际应用中面临的重大挑战，尤其是在涉及大量约束和优化的车辆路径规划问题中。

- **当前可行性有限**：量子比特需求量大，且目前无法在量子硬件上开展实验，因此该用例暂不适用于量子解决方案。现有的经典方法已被证明行之有效，而在现阶段，现有启发式方法的表现优于量子方法。

- **未来潜力存疑**：如果量子硬件和算法取得进展，量子计算或许能在这一领域带来益处。然而，这在很大程度上取决于能否克服当前量子比特数量有限，以及难以有效处理硬约束和连续变量等局限。

- **建议**：有意探索量子计算在舱体协调用例相关问题中的应用的组织，应考虑寻找依赖离散变量且（硬）约束较少的问题模型。否则，在可预见的未来，预计 PCP 不会成为最先能从量子技术进步中为工业带来切实益处的问题类别之一。

3.2.4 传感器定位

在汽车工业中，新生产的车辆需要从生产线末端运输到配送区域。借助最新一代车辆搭载的自动驾驶软件，这项任务无需人类驾驶员即可完成。为此，车辆所处环境必须由基于基础设施的传感器覆盖。需要优化这些传感器的位置，以便在最大化覆盖区域的同时，尽量减少传感器数量。

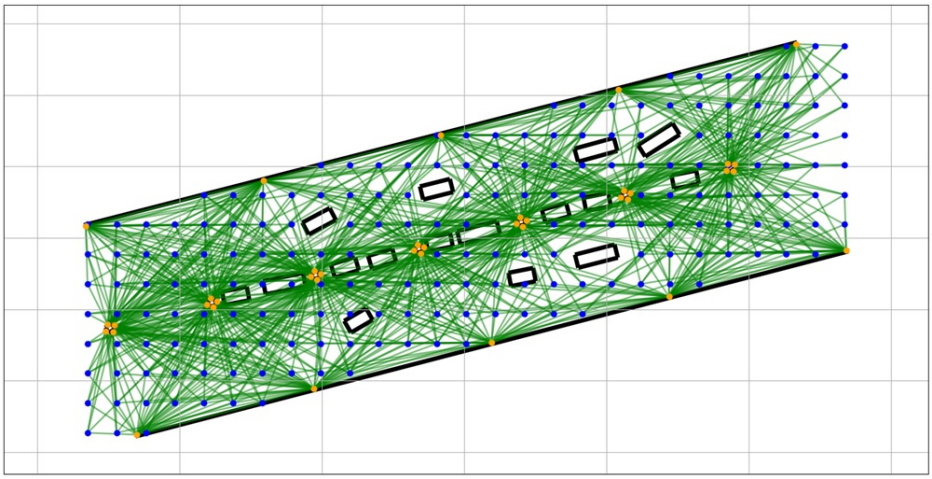


图7：一个示例场景，设定灵感源自真实生产环境，其中有38个可能的传感器位置，需要覆盖194个街道点。

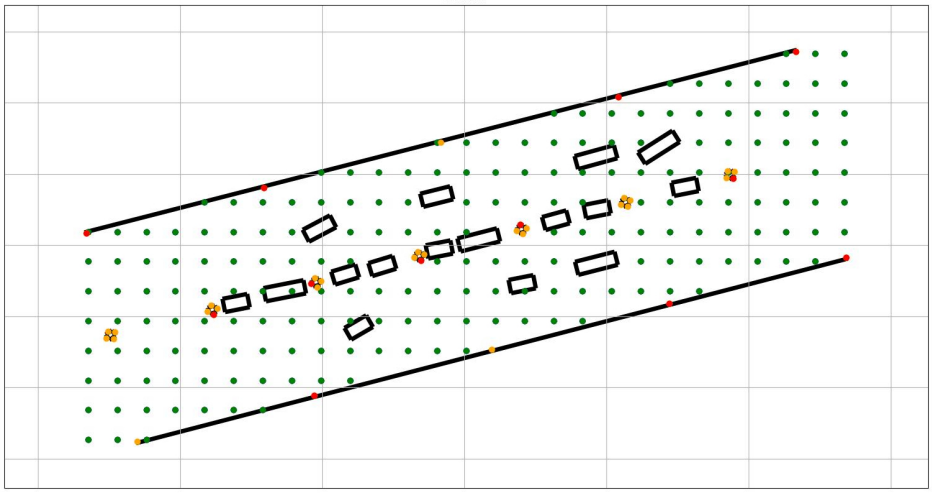


图8：此处展示了图7中示例场景的解决方案。在38个可能的位置上布置了12个传感器，覆盖了全部194个街道点。

此任务可建模为组合优化问题，通常采用 QUBO公式表示。在该公式中，二元决策变量表示是否在特定位置放置传感器（1 表示放置，0 表示不放置）。目标函数旨在最大化总覆盖区域，同时满足与传感器范围及可用传感器数量相关的约束。

公式的关键组成部分包括覆盖约束，以确保所有关键区域至少由一个传感器监测；还包括成本因素，涵盖安装、维护和运营费用。此外，模型还纳入了柱体等结构障碍物，这些障碍物可能形成覆盖阴影，从而确保传感器能够在预定环境中有效运行。

量子退火过程的超参数优化包括调整编码方案、惩罚因子、链强度和退火时间。此外，还会评估不同的分解策略，迭代地将模型划分为更小的子问题，从而确保大型传感器定位场景能够获得可行且可扩展的解决方案。有关此用例的更多详情，请参阅随附论文 [46]。

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **可迁移性**：我们为传感器定位用例制定的集合覆盖QUBO模型能够高效地找出最小覆盖方案，这一原理可迁移至其他领域，例如驾驶情境仿真的测试场景选择，或基于任务的人员配置与调度。该模型能够在确保全面覆盖的同时最大限度地减少资源，因此可应用于各种需要以有限资源实现最优覆盖的汽车和工业应用。

- **黄灯**

  – **模型与实现**：该问题非常适合采用集合覆盖和最大独立集框架，而当前的量子算法和硬件范式均支持这些框架。经典模型中的变量数量主要由传感器

位置决定；而对于量子方法，每个约束都需要许多松弛变量。

– **运行时间**：如果量子硬件的量子比特数量、相干时间和纠错能力继续按预期提升，那么根据本研究评估的测试用例，与工业相关的实例有望在本十年内得到求解，其计算时间也可与经典方法相当。

- **红灯**

  – **解的质量**：量子退火机的实验结果显示，所得解的稳定性较差，质量也不理想，不如 Gurobi 等经典求解器或模拟退火等启发式方法。

  – **可扩展性**：对于该问题的二次无约束二元优化公式，变量数量会随着传感器和街道点密度近乎按立方增长。这意味着，对于采用高分辨率网格、包含大量可能传感器位置和所覆盖街道点的大规模实例，所需量子比特数量将比预计未来几年可用的数量高出几个数量级。

结论

传感器定位用例体现了当前量子硬件在解决大规模、工业相关问题时的局限性。虽然已成功求解最多包含 60 个量子比特的玩具实例，但就解的质量和稳定性而言，这些解尚无法与经典方法相媲美。

- **当前实用价值有限**：现有的量子退火及其他量子方法仅适用于小规模问题，其解往往不如经典启发式方法，因此目前尚不足以支持实际部署。

- **扩展前景**：变量数量随问题规模线性增长，这一趋势令人鼓舞，表明随着硬件改进，包含数千个传感器的实例或许能够得到求解，这可能在未来十年内实现。

• **未来展望**：随着硬件扩展的持续推进、纠错能力的提升以及嵌入技术的改进，量子方法最终有望以经济高效的方式提供最优传感器布置方案，从而降低基础设施成本并提高覆盖效率。

• **建议**：组织应关注硬件发展，并投资于与量子能力相匹配的问题建模策略。建议与硬件供应商合作，并研究可扩展嵌入，为未来的大规模应用做好准备。

3.2.5 自动运输车装载

汽车运输车装载问题（ACLP）是汽车工业中的一项优化挑战，尤其涉及新车的配送。列车是陆路运输的首选方式，但制造商往往会因灵活性或铁路网络不可用而改用汽车运输车进行公路运输。汽车运输车是配备灵活装载平台的专用卡车。由于乘用车的尺寸、形状和重量各不相同，确定这些平台的最佳配置十分复杂。

通常，一辆卡车及其拖车一次最多可运载十辆车。这些车辆可以安置在装载平台上，平台可单独倾斜或组合使用，以最大限度地提高空间利用率。此外，还可以将车辆朝前或朝后放置，进一步优化装载。卡车和拖车以及总载荷都必须遵守与重量、高度和长度相关的约束。

理论上，ACLP 的解空间会随着车辆数量的增加而呈指数级增长，因此可能的排列方式数量极其庞大 [47]。然而，目标函数高度离散，这意味着尽管许多排列方式都可能满足要求，但借助简单启发式方法或人工决策，往往能获得令人满意的结果，因此找到最优解可能相对容易。

在本项目中，我们探索了多种经典求解方法，包括模拟退火和 CPLEX [48], 这款商业优化软件，以及 D-Wave量子退火机 [20]。问题的复杂性体现在需要大量变量；例如，研究人员已针对最多 18 辆汽车的玩具问题进行了研究

这些汽车被安排在最多六个站台上，从而形成最多包含 1000 个变量的二次无约束二元优化矩阵。然而，目前可用的量子硬件还不足以求解工业规模问题实例。



Fig图 9：在卡车和拖车上装载七辆车的示例解 .

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **模型与实现** 将量子计算应用于 ACLP 的理论框架已经建立。如果能够克服硬件限制，量子方法有望比经典方法更有效地优化复杂的装载问题。

- **黄灯**

  – **可扩展性与运行时间**：问题规模随汽车数量线性增长。经典混合整数线性规划公式化和 QUBO 表述都具有这一特性，这使得量子计算前景可期。然而，该问题包含大量约束，其中一些是四阶的。这会导致 QUBO 公式中需要引入许多松弛变量，因此量子计算所需的变量数量会按一个虽为常数但很大的倍数增加。目前可用的量子硬件尚不足以求解工业规模问题实例；量子方法能否与运行时间相竞争，仍有待观察。经典启发式方法已能在合理的运行时间内产生足够优质的解。

  – **解的质量**：D-Wave量子退火机针对小规模问题实例得出的结果，与模拟退火等经典启发式方法找到的解不相上下，这表明

随着量子硬件日趋成熟，较大问题规模下的解的质量也有望具备竞争力。

– **可迁移性**：如果量子硬件取得进展，量子计算或许有潜力以目前仅适用于单辆汽车运输车的详细程度，优化整个卡车车队。

结论

近期内，ACLP 是否存在一条通往量子优势的清晰路径，这是一个复杂的问题。其影响将波及汽车行业及其他领域中物流相关问题，并具有重大意义。

• **令人鼓舞的发现**：实证观察表明，模型变量的数量会随着问题中包含的汽车数量线性增加。这种线性关系意味着，涉及最多 100 辆汽车和 10 辆卡车的问题，或许可以使用约 100,000 个含噪量子比特加以处理；这意味着，与现实世界相关的问题规模可能在数年内通过量子设备得到解决。

• **改进潜力有限**：尽管 D-Wave量子退火机已经能够解决小型问题实例，但所得结果并未明显优于通过经典启发式方法获得的结果。这表明，由于经典方法具有相对良好的性能，量子计算可能难以在这一特定应用中提供竞争优势。

• **建议**：在量子硬件成熟并具备解决大规模问题所需的量子比特数量之前，依赖高效物流且面临与 ACLP 类似挑战的行业，应探索将量子解决方案集成到现有物流系统中。这将加速向改进决策流程的转型；由于全球化制造商的物流框架中涉及大量车辆和卡车，这些决策流程具有巨大的扩展潜力。

3.2.6 模块化生产物流

在此用例中，我们研究了模块化物流环境中涉及自动导引车（AGV）的复杂工业调度问题，并对量子—经典优化方法与经典优化方法进行了比较研究。图10展示了一个涉及不同作业和自动导引车的小型流程示意图。

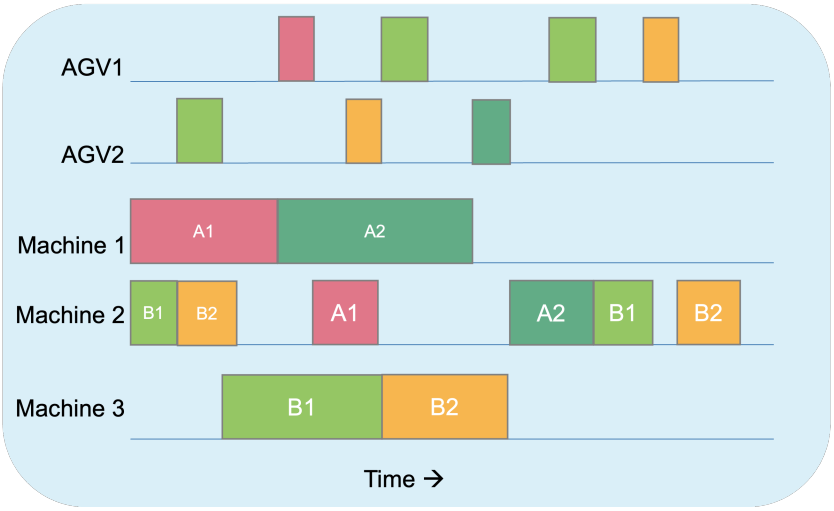


图10：包含两辆自动导引车、共2个作业和3台机器的问题实例示意图。任何作业从一台机器运输到另一台机器，均由自动导引车完成。

该用例源自巴斯夫的多个灌装车间，在那里，托盘上装满不同的产品，随后进行缠膜包装以便运输。在本项目中，我们评估不同建模方法对求解器性能的影响，并探索量子-经典元启发式算法是否能相较于传统方法带来实际优势。

我们针对同一调度问题建立了两种不同的数学模型。第一种是时间索引混合整数线性规划，适用于经典数学规划求解器。第二种是包含线性约束和二次约束、目标函数为线性的二元优化模型，旨在兼容量子-经典元启发式算法。这种双重建模方法使我们不仅能够跨技术评估求解器性能，还能比较针对各类求解器优势设计的问题表述。

我们的研究发现，建模选择会显著影响优化结果。经典求解器采用混合整数线性规划表述时表现良好，而量子-经典元启发式算法在二元二次模型上表现出色。这凸显了使问题结构与求解器能力相匹配的重要性。尤其是，量子-经典方法得益于这种新颖的建模技术，这表明当问题得到恰当表述时，受量子启发的方法在现实工业场景中也具备竞争力。

总体而言，经典计算取得的结果远胜于量子计算。然而，这个用例有力地证明，量子-经典元启发式算法是工业调度中切实可行的工具，尤其是在传统求解器因优化问题的数学表述不当而受到限制时。因此，这进一步印证了一个更广泛的观点：无论是经典还是量子计算范式，求解器感知建模对于充分释放其潜力都至关重要。

交通灯式评估

- **黄灯**

  – **模型与实现：** 当问题被建模为带有二次约束的二元优化问题时，量子-经典元启发式求解器表现良好。这种问题表述契合经典-量子混合求解器的优势，使其能够取得有竞争力的结果。然而，这种优势并非量子计算固有的，而是高度取决于建模策略。采用时间索引混合整数线性规划表述的经典求解器，表现优于混合求解器。这表明量子优势是有条件的，求解器性能与问题的表述方式密切相关。

  – **可扩展性：** 所使用的量子-经典求解器是一种元启发式算法，这意味着它无法保证最优性。尽管结果颇具前景，但其性能因实例而异，并可能取决于调度任务的复杂度和约束条件。这限制了它在更广泛应用中的可预测性和可靠性，除非进行进一步调优。

  – **解的质量：**D-Wave 混合求解器为调度问题生成了可行解，但其解的质量

明显低于 Gurobi 等最先进的经典求解器所达到的水平。不过，这些结果绝非微不足道——它们表明混合量子求解器能够处理复杂的优化任务，并为未来的改进奠定基础。

- **红灯**

  – **可迁移性：**尽管结果在特定的自动导引车调度用例中颇具前景，但关于其普遍适用性的证据有限。尚不确定，在没有类似建模调整的情况下，其他物流优化问题是否也能观察到量子-经典优势。

  – **运行时间**：混合求解器为调度问题找到了可行解，但总体运行时间通常比 Gurobi 更长。Gurobi 始终能在几秒或几分钟内将实例求解至接近最优，而混合方法的运行时间波动较大，复杂情况下有时需要数分钟。

  –并非纯量子解决方案：由于 D-Waves 混合求解器的专有性质，我们无法评估量子计算本身的实际效果，因此不清楚性能提升有多少归功于量子计算，又有多少来自混合求解器中嵌入的经典启发式方法。这使得评估或量化真正的量子优势变得困难。此外，硬件规模有限，无法考察量子比特数量、连通性或噪声等硬件约束；这些因素对于评估量子解决方案在现实环境中的可扩展性和可行性至关重要。

结论

- **量子-经典优化前景可期**：带二次约束的二进制问题表述使混合求解器能够展现出有竞争力的表现，这表明量子启发式方法可应用于现实世界的工业挑战，尤其是在对问题进行建模以适应量子范式时。

量子优势是有条件且依赖模型的：当问题结构可形成线性或凸形式时，采用时间索引混合整数线性规划的经典求解器表现优于混合方法。由于硬件限制，无法与纯量子求解器进行基准测试。

- **量子-经典方法与经典方法互为补充**：虽然在某些情况下有效，但并不能取代经典方法。经典求解器依然稳健可靠，尤其是在问题结构契合其优势时；而量子优势尚未得到广泛验证。

总而言之，针对这一用例的研究表明，量子-经典元启发式方法可用于工业调度，但量子优势取决于具体条件和建模方式，且尚未得到广泛验证。经典求解器依然稳健可靠，尤其是在问题结构契合其优势时。

- **建议**：对于正在探索量子计算的组织而言，这一用例充分说明了采用混合工作流的价值。值得投资于：

  –投资于求解器感知建模框架：研究表明，当问题被建模为带有二次约束的二元优化问题时，量子-经典求解器表现良好。未来应着力开发自动化或半自动化的建模流程，将工业调度问题转换为适用于量子计算的格式，例如二次无约束二元优化或二元二次规划。这样可以减少释放量子优势所需的人工工作和专业知识。

  – 与纯量子求解器进行基准测试：为更好地了解量子的真正贡献，未来的工作应包括与纯量子求解器的比较基准测试（例如，不带经典增强的门模型系统或退火器）。这将有助于隔离量子性能，并指导人们判断何时更适合采用混合量子方法，何时更适合采用纯量子方法。

  – 探索其在不同物流领域的泛化能力：当前研究聚焦于模块化物流中的自动导引车调度。未来研究

应在其他物流问题上测试量子-经典元启发式算法，例如仓库路径规划、供应链优化或多式联运规划，以评估建模和求解器策略的适用范围。

– 纳入硬件感知约束：由于量子硬件规模对该用例而言极为受限，因此目前尚未考虑量子硬件的局限性（例如量子比特数量、连通性和噪声）。未来的实现应纳入硬件感知建模与调度，确保问题实例符合现有量子设备的能力。这样有助于提升实际部署中的可行性与性能。

3.2.7 冷却系统优化

冷却系统优化问题旨在解决如何为由不同组件（例如电池、发动机、冷却器和泵）构成的机电一体化系统设计最优架构这一难题。该任务包括根据给定的运行条件和约束（例如重量、成本或热限制），确定应纳入哪些组件，以及如何将它们相互连接。评估系统性能需要模拟组件的物理行为，这些行为由（微分）方程建模。该问题结合了优化与仿真的要素，属于动态系统优化这一学术领域（与最优控制密切相关）。其工业目标是在计算上可行的前提下，平衡系统性能、成本与效率。系统由一组微分方程定义，这些方程可线性化为线性方程组。组件之间的连接由二元变量表示，用于标示组件是否已连接。通过将相关方程乘以对应的决策变量（即连接变量），即可将这些变量纳入线性系统。最优解则由连接变量的最小分配表示，以优化特定指标（例如一个或多个组件的温度）。

测试实例从最小配置（四个组件和六种可能的连接）扩展到具有工业相关性的案例，其中约有十个组件和五十种运行条件。目前，经典方法依赖遗传算法与显式积分方案相结合，在较大型案例中，运行时间可达数小时。对于量子方法，

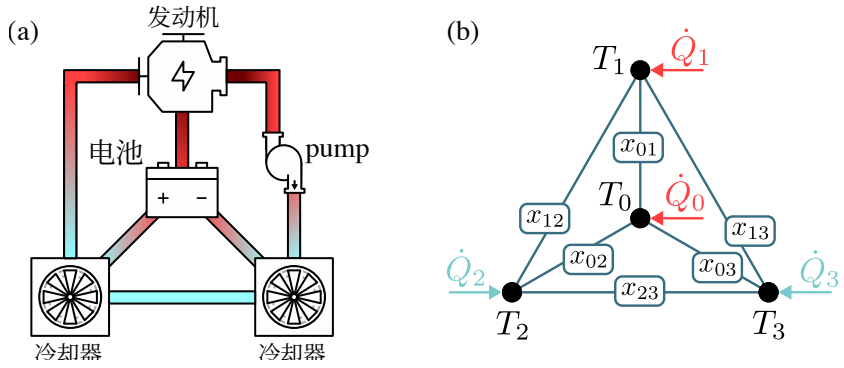


图11：冷却系统的简单示例及其抽象为线性系统的数学过程。

该用例探讨了用于优化的量子近似优化算法（QAOA），以及用于模拟的量子奇异值变换（QSVT）。由于 QSVT 的电路深度对于当前的含噪中等规模量子设备（NISQ设备）而言过高，因此该方法仅通过模拟进行研究，未在实际量子硬件上进行测试。更多信息请参阅详细介绍实现与评估的论文 [49]。

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **可迁移性**：该方法可以扩展到其他以线性系统为核心仿真步骤的用例（例如机组组合或拓扑优化）。

- **黄灯**

  – **解的质量**：在资源充足的情况下，该算法能够为非常小型的系统找到最优解。由于算-法的复杂性，无法对更大型的系统进行仿真，因此 QAOA 的有效性仍有待测试。使用 Grover 将产生一种具有可证明有效性的算法。

- **红灯**

  – **可扩展性**：对于优化，每种可能的连接都由一个量子比特表示。在最坏情况下（全连接），其

连接数量与组件数量呈平方关系。当前的NISQ设备受噪声和电路深度限制，无法支持QSVT；这需要容错机器上的逻辑量子比特。

– **运行时间**：实际可实现的运行时间优势程度取决于系统（即矩阵和解向量）的高效编码，而这一优势尚未在一般的现实场景中得到证明。

– **模型与实现**：将用例建模为线性系统，会将动力系统的复杂性限制在不含非线性元素的系统范围内，这不足以解决工业问题。

结论

冷却系统优化用例在交通灯评估中被评为红色。

• **开放性挑战**：尽管理论上运行时间加速的潜力显著，尤其是在求解线性系统方面，但目前这种方法仍受到硬件就绪度和算法障碍的限制。仅限于线性系统，限制了该方法在优化动力系统这一特定用例中的实用性。一般而言，系统矩阵并不能实现高效编码，从而削弱了任何潜在的加速效果。这是一个独立于当前硬件能力的挑战。然而，由于该方法采用容错算法，硬件限制仍使其目前无法适用。

• **可迁移发现**：对于许多其他用例，线性系统所定义问题的适用性具有很高价值，尤其是在求解物理量的数值模拟时；这类问题通常有高效的经典方法（例如有限元法、有限体积法等），可将问题离散化为线性系统。进一步在 QAOA 或 Grover 等优化算法中利用量子线性系统求解器的结果，可以消除读取完整状态向量这一瓶颈，并利用叠加态求解线性系统。



图12：推车杆物理实现的照片。

- **建议**：继续探索是合理的，尤其是在自然适用于线性形式的问题背景下；但要实现工业部署，算法设计和硬件能力都必须取得突破。尤其需要解决的挑战包括：找到高效方法来改善条件数的缩放（这会影响 QSVT 的复杂度），以及实现高效编码。

3.3 机器学习用例

3.3.1 CartPole量子孪生

Cart Pole量子孪生问题基于控制工程中广为人知的推车杆或倒立摆基准。尽管该系统维度很低（只有四个变量），但它具有非线性，且并非易于解决，因此可作为一般控制任务的代表性案例。在本项目中，推车杆被用作更复杂工业控制问题的替代模型（例如配备数百或数千个传感器的燃气轮机控制），同时又足够小，能够在当今的量子模拟器上进行模拟。该用例采用量子机器学习方法进行了研究，并探索量子增强训练方法在设计控制策略方面能否优于经典方法。

该玩具实例可以使用四个量子比特表示，而现实的工业基准测试（例如 Hein等人，2017年的工业基准测试）可能需要 30–50 个量子比特。关键性能标准是解的质量，同时次要关注计算时间。实际上，量子方法获得了几乎与经典方法相当的质量，但速度慢了 10–100 倍。经典基准方法包括使用粒子群优化进行优化的神经网络。在量子方面，实验

采用了变分量子电路（VQCs）、量子长短期记忆（LSTM）和量子一粒子群混合方法。所有实现均通过 Qiskit 在模拟器上进行，未在实际量子硬件上取得任何结果。

概念验证确认了该方法在玩具问题上有效，但未能扩展到这些问题之外。预计量子方法的主要 Advantage 在于，它们能够在不依赖梯度且不会陷入局部最小值的情况下探索解空间。由于噪声和电路深度限制，当前的含噪中等规模量子硬件尚不够用，但未来的发展路径包括扩展到无噪声的 30–50 个量子比特系统，并在模拟中采用约 20 个变分量子电路层，在优化中采用数千层。预计未来需要容错设备，才能开展有意义的工业规模实验。实现过程中未遇到任何重大的意外阻碍。更多详情请参见用例，实验结果已发布于 [50]。

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **解的质量**：模拟结果显示，与经典机器学习方法相比，两者结果相当——更好的量子硬件应能支持规模更大且更贴近现实的基准测试。– **可迁移性**：该方法有机会迁移至现实世界的控制问题，例如聚变反应堆中的等离子体稳定、风力涡轮机调节、设计优化，甚至药物发现。

- **黄灯**

  – **可扩展性**：目前尚不清楚，量子方法在超越玩具模型的更现实基准测试中能否良好扩展，也不清楚要在实际量子硬件上开展训练，对相干时间和噪声有何要求。

  – **模型与实现**：与经典机器学习模型相比，量子机器学习模型同样适用，并且在小规模实例上表现出相当的性能。在更大规模硬件上的可扩展性仍有待验证。

- **红灯**

  – **运行时间**：当前的量子模拟速度明显慢于经典方法（慢 10–100 倍）。如果没有加速，其实际应用价值仍然有限。

结论

在交通灯评估中，推车杆量子孪生体被评为绿色。与许多其他用例相比，展现其潜在量子优势的路径似乎更加明晰，因为该问题定义明确，原则上可扩展，并且与工业应用密切相关。

- **依赖未来硬件**：由于电路所需的层数超过当前硬件在错误累积过多之前所能处理的范围，因此取得有意义的结果完全取决于未来容错量子硬件的发展。

- **乐观前景与适用性**：其主要吸引力在于有望优化量子电路，避免局部极小值并探索更大的解空间，从而有可能得到优于经典控制器的结果。该研究方向具有广泛的迁移潜力，这表明一旦硬件能力足够，最终或可支持高影响力的工业应用。

- **建议**：密切关注硬件发展，并在改进后的量子处理器上测试复杂度更高的问题实例。

3.3.2 上下文老虎机

上下文老虎机问题涉及在高维空间中确定最优决策，其中最佳动作取决于外部上下文信息，而这些信息本身也可能是高维的。这类问题常见于工业机器和系统的最优控制。要确定最佳控制输入，必须考虑许多外部变量（复杂情况下可达数百个甚至更多），因此，找到能够最大化特定目标的最佳选项并非易事。在机器学习中，这被称为连续动作上下文老虎机问题。本项目使用 Industrial Benchmark[51] 作为代表性环境，旨在捕捉工业控制场景的真实特征

。在此框架下，优化需要在固定控制变量的同时进行搜索，然后测量系统对此作出的响应性能。此用例属于机器学习范畴，旨在评估量子方法能否提升在大型复杂空间中的搜索效率。

初步实验采用五个量子比特建模玩具实例。经典基准方法使用神经网络，而量子变体则借助 TensorFlow Quantum，通过变分量子电路（VQCs）实现。尽管计算资源和现有硬件方面的实际限制依然存在，但变分量子电路强大的泛化性能，加上量子技术的快速发展，凸显了其在工业优化任务中的潜力，尤其是在高维场景中，并表明有必要进一步探索量子机器学习。对于工业规模的问题，所需量子比特数量及性能特征仍然未知。

实验表明，上下文老虎机形式化可以映射到一个小型量子系统，但研究并未超出玩具实例的范畴。实验没有在真实硬件上运行，而是使用经典工作站模拟量子电路。尽管量子上下文老虎机求解器潜力巨大，尤其适用于需要全面探索庞大解空间的领域，但实际挑战仍未解决。这些挑战包括如何处理大量数据、针对特定问题采用何种试探态，以及如何将基于量子电路的老虎机集成到现实工作流中。有关基准问题和所开展研究的更多详情，请参阅 [52]

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **可迁移性**：上下文老虎机是众多应用的基础，涵盖推荐系统、在线广告、临床决策支持、机器人学和金融优化。

- **黄灯**

  – **解的质量**：量子电路所得解的质量表现出竞争力，甚至比经典模型具有更好的泛化能力。

- **红灯**

  – **运行时间**：上下文老虎机的工业实例通常有实时约束，这给将量子硬件集成到工作流中带来了挑战。目前的量子模拟比经典方法慢得多（10–100 倍）。如果没有加速，实际应用价值仍然有限。– **可扩展性**：现实世界上下文老虎机问题所需的量子资源尚未量化，因此无法确定能否实现实际的量子优势。– **模型与实现**：对于一般情况，目前尚无已知的现实世界数据高效编码方法。

结论
在整体红绿灯评估中，上下文老虎机用例被评为琥珀色。

- **依赖未来硬件**：在当前硬件上无法生成可用的解决方案，因此未来硬件必须有所改进，才能取得与已进行的模拟相当的结果。

- **适用性**：鉴于上下文老虎机在各行业中无处不在，其理论影响巨大，但实际应用既需要更好的硬件，也需要新的建模策略。

- **建议**：通过增加上下文维度，并探索高效编码现实世界数据的方法，将测试范围从玩具问题扩展出去。

3.3.3 预测

时间序列预测在许多领域都非常重要，例如金融、物流（如大宗商品价格预测），以及天气预测等其他领域。

我们研究了具有等间隔时间步的一维时间序列，任务是根据最近 n 个时间步的回看窗口预测下一个值。作为起点，我们预测了简单函数

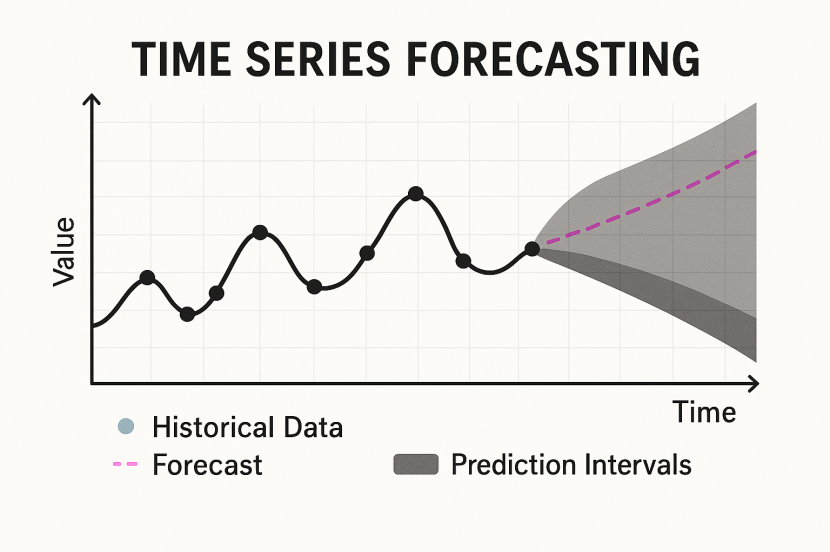


图13：时间序列预测的概念示意图。

例如正弦波或重复值。基准测试使用了苹果公司的股票数据和某意大利面品牌的销售数据。

研究比较了多种不同的模型。经典模型方面，包括长短期记忆、自回归积分滑动平均模型，以及一种简单方法：直接将最后一个值作为下一个值的预测。量子模型方面，研究开发了三个版本的量子神经网络、量子深度玻尔兹曼机（QDBM）、量子储备池计算和量子长短期记忆网络。所有量子模型都在模拟器上运行了多次，以获得稳定的结果。为了实现这一点，研究使用了巴斯夫的高性能计算集群 Quriosity 来处理这项资源密集型任务。

在苹果公司股票数据上，简单的“以最后一个值作为预测”的方法在所有量子模型和经典模型中表现最佳，这表明该时间序列本质上是随机游走。在意大利面销售数据上，长短期记忆的性能最佳，其次是量子神经网络。

量子深度玻尔兹曼机在不同超参数和权重初始化下表现出较大差异。这可以视为模型的弱点，也可以看作是为未来研究寻找更优设置的机会。对于其他模型而言，超参数优化的影响往往也大于模型之间的差异。

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **可扩展性**：量子模型在回看窗口中的每个时间步都需要一个量子比特。因此，如今的硬件已经可以运行完整实验：量子深度玻尔兹曼机可以在 D-Wave 的量子退火机上运行，如今在真实硬件上即可实现规模更大的网络，最多可达数千个量子比特。

  – **运行时间与模型和实现**：量子储备池计算无需训练。运行一定数量的样本后，拟合过程会以经典方式进行，因此非常适合早期的含噪中等规模量子设备。

  – 混合方法：由量子部分和经典部分构成的混合网络易于实现，可在一个模型中兼得两种方式的优势。

- **黄灯**

  – **解的质量**：量子模型的性能可以媲美经典模型。不过，目前尚无明确迹象表明任何量子模型相较于经典模型具有潜在优势。

  – 维度：大多数真实世界数据集具有多个维度，目前无法在真实硬件上使用足够大的回看窗口对其进行评估。

- **红灯**

  – **可迁移性**：股票数据接近随机游走，这意味着它无法被预测。我们的评估结果支持这一理论：在该数据集上，最后值方法的表现优于所有模型，包括经典模型。因此，取得与经典模型相近的结果并不能提供有意义的洞见。

结论

• **当前可行性**：目前可用的硬件足以支持这个简单的一维时间序列示例，其回看窗口较小—

窗口。然而，硬件访问成本高昂，因此进行数百个训练轮次的完整训练并不实际。大多数现实应用会涉及多个维度，而这些维度很难在真实硬件上运行。

- **未来潜力**：这个用例在多个领域都有许多应用，因此未来潜力很大。同时，机器学习是一个黑箱，很难找到普遍适用的理论优势。

- **建议**：请记住，量子机器学习未来可作为时间序列预测的有效工具。它可以视为每位机器学习专家工具箱中的一种新工具，而且在处理单维数据集以及回看窗口较短的情况下已经很有用。5 到 10 年后，它有望应用于更复杂的示例。

3.3.4 多准则优化

多准则优化旨在找到不同输入特征的最佳组合，以使输出特征达到期望值。这可以通过帕累托前沿来呈现：一个多维曲面，展示了最佳的输入组合。

在这个用例中，我们研究了一种机器学习代理模型，该模型旨在近似输入与输出之间的内在关系。如果获取一个数据点的实验成本非常高，那么这种方法就非常有用，因为只需较少的实验即可获得对有效前沿的良好近似。

所使用的机器学习模型是监督学习中的标准回归模型。作为经典方法的对照，我们采用了随机森林和多层感知机。此外，我们构建了一个由特征映射和拟设层组成的量子深度神经网络，形成一个完整层。数据重上传和可训练特征映射增强了模型的表达能力。

我们在一个合成数据集上测试了该模型，该数据集由$perm$、罗森布罗克、拉斯特里金和施韦费尔函数组成，并将这些函数组合成一个多输出函数，需要 4 个量子比特。在实际应用中，我们使用了巴斯夫提供的涂料数据集，15 个输入特征需要 15 个量子比特。

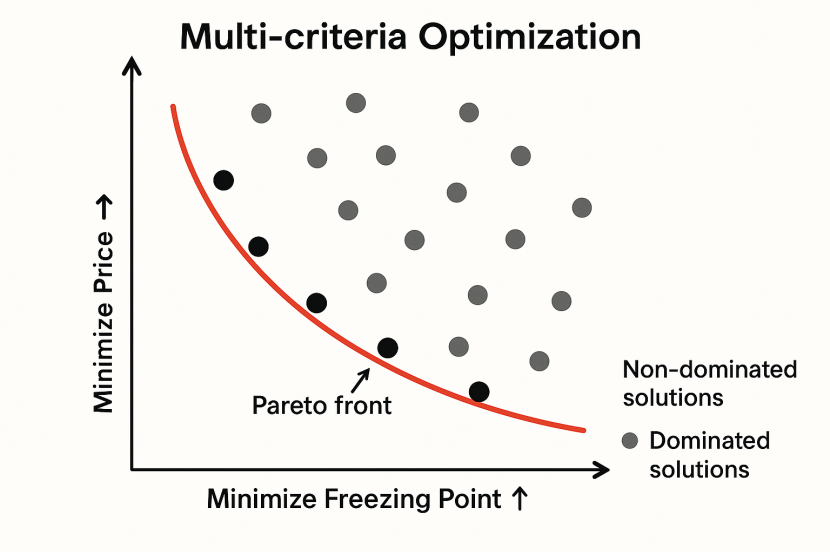


图1 4：多准则优化的概念示意图。

交通灯式评估

- **绿灯**

  – **可扩展性**：该量子模型在模拟器上训练，并在 IonQ 的基于量子门的计算机上进行预测。使用较少层数时，真实硬件上的结果与模拟器上的结果相似。这表明，随着硬件变得更加经济实惠、噪声更低，也可以训练和运行更大的模型。

  – **可迁移性**：这个用例是一项标准的监督学习任务，即通过代理建模进行回归，以近似未知函数并预测新数据点，用于多准则优化。由于回归是最常见的机器学习任务之一，这种方法具有广泛的可迁移性；不过，在量子机器学习中，极高维输入可能超出量子比特资源限制，进而降低适用性。

- **黄灯**

  – **解的质量**：量子模型取得了与经典机器学习模型相当的结果。尽管经典

模型的表现略胜一筹，但差异并不显著。不过需要注意的是，经典基线模型并未经过微调，而量子模型则经历了大量调优。因此，在此次比较中，经典模型的性能可能被略微低估。

– **模型与实现**：贫瘠高原是一个复杂问题，类似于经典机器学习中的梯度消失问题。目前尚无解决方案，而且它可能会限制量子机器学习，尤其是随着电路规模增大，这一问题会愈发严重。

– **运行时间**：在模拟器上训练非常缓慢，目前只有小型电路切实可行。真实硬件的成本非常高；目前，在离子基量子计算机上完成一个包含数千个训练轮次的完整训练周期，成本约为 100 万欧元。

结论

• **当前可行性**：目前已有硬件可用于在真实硬件上测试特定用例，例如油漆数据。不过，当前硬件的可靠性和运行时间有限，仍是持续开展实际应用的重要障碍。未来降低噪声的改进将使得在复杂任务中使用更深的电路和更多量子比特成为可能。

• **未来潜力**：这一用例非常重要，因为它是监督学习中常见的回归任务，涵盖了当今大多数机器学习任务。随着硬件日趋成熟，量子机器学习能够处理图像和文本等更大型的数据集，因此有望至少在某些领域展现出优于经典机器学习的优势。对工业而言，这可能会对产品设计产生重大影响。

• **建议**：当前最重要的任务是进一步研究如何以不同方式搭建电路，以及如何运用机器学习技术来避免贫瘠高原和局部最优解。它目前已可用于数据点较少、维度较低的数据集。随着硬件日渐成熟，它在广泛的机器学习任务中将会很有应用前景。同时，谨慎地

与经过充分调优的经典基准方法进行基准测试，对于识别真正的优势至关重要。

3.4 所考虑用例的评估概述

项目期间评估的工业应用大致可分为三类。所有用例的评估概述见表1。

与当前量子硬件和算法最为契合的用例，在小型测试问题实例上表现出与经典方法相当的结果。对于这些用例，现有算法已经能够带来优势，或与经典算法协同发挥作用。

生产分配与调度 前景良好，且以混合形式实现切实可行；不过，量子优势取决于建模和硬件，并且需要将问题重新表述为二次无约束二进制优化形式，这也带来了一定限制。对于规模达数十万量子比特的实例，其工业应用价值已接近混合求解器所能达到的水平；根据量子退火器和基于门的设备的路线图，纯量子方法预计到2030年左右才具备相应的应用前景。

预测 时间序列是可行的，在简单的一维设置中，其解决方案质量与经典机器学习模型相当，并且有望应用于更复杂的情况。然而，目前尚未显示出明确优势，也缺乏可扩展至多维数据的实证。预计在量子硬件能够支持数十至数百个逻辑量子比特运行更深的电路后，未来五到十年内，这种方法有望展现出工业应用价值。

这个倒立摆量子孪生体 在概念上很有说服力，也具有广泛的迁移能力，但其在玩具模型之外的可扩展性尚未得到证实，而且当前的实现速度远慢于经典方法。与预测用例类似，硬件需要进一步成熟，才能增加层数以支持数十到数百个量子比特。

汽车运输载具装载目前还无法与经典启发式方法相媲美，尽管具有良好的扩展特性，但受运行时间和解的质量较差所限。对于规模更大的实例（如车队级优化），随着未来硬件性能提升且错误率降低，这种方法可能会展现优势。根据当前路线图，考虑到工业相关问题需要数十万个量子比特，预计其工业应用价值可能在2030年前后显现。

多准则优化适用于小型数据集，但受贫瘠高原和繁重的微调工作所限，因而其可扩展性尚不确定。如果硬件发展成熟，能够支持更多层且训练时不会出现贫瘠高原问题，那么我们可以预期该方法将在2030年代初应用于工业问题。

总体而言，这些用例受到的限制，与其说来自建模或算法方面的不足，不如说更多源于当前的量子比特数量、噪声和电路深度。预计到2030年或之后，它们才会具备工业相关性，适用范围从混合方法中的早期适用，到需要更深且更不易出错的电路不等。

第二类同样包含能够以足够有效的方式解决完整问题的量子算法。然而，目前已经可以估计，对于工业相关问题规模，复杂度会大幅增加，使得基于当前技术的量子方法难以实施。

模块化生产物流 在混合求解器方面展现出有条件的前景，但其优势高度取决于具体的问题表述，而经典混合整数线性规划对于通用问题仍然更具优势。2030年之后的量子硬件或可支持解决工业相关问题，这些问题将需要数十万量子比特；但当前实验显示，与经典求解器相比，其解的质量较低。

在传感器定位 用例中，量子方法目前不如经典方法，主要原因在于松弛变量导致量子比特需求膨胀，以及解的稳定性较差。尽管该问题天然适合采用QUBO形式，但建模效率低下严重限制了可扩展性，且解的质量落后于经典求解器。只有在2035年之后，随着大规模传感器网格的发展，该用例才可能变得具有吸引力，因为当前路线图预计，在此之前量子比特数量和改进后的纠错能力都不足以处理膨胀的问题规模。

同样，冷却系统优化 这一用例只适用于可线性化问题。然而，这类问题在工程领域十分常见。在能够高效编码一般系统（由线性系统的矩阵和向量表示）之前，量子方法不如经典替代方案。在某些约束条件下（例如需要评估所有可能的解），一般情况下的运行时间和扩展优势仍纯属理论层面；不过，所开发的算法可能带来运行时间上的优势，这一点需要在未来硬件上加以验证。我们预计，支持在小规模实例上运行完整算法的硬件最早要到 2035 年才能面世。

最后，三个用例因建模不足而难以促进

在量子硬件上解决完整的工业问题。上下文老虎机具有很高的理论影响力，但其成败关键取决于能否解决编码和电路效率方面的开放性挑战；其局限在于缺乏适用于真实数据的通用高效编码，且模拟速度远慢于经典方法。由于存在开放性挑战，其工业相关性尚不明确，因此取决于可扩展编码。

列车路径规划通过分解展现出良好的前景，但当前模型忽略了关键的现实约束，且大规模实例仍难以处理，这清楚地表明需要更有效的建模和算法策略。与上下文老虎机类似，如果无法对完整的约束集进行建模，其工业应用价值仍不明确。

舱体协调目前并不实用，因为缺乏能够纳入连续变量的建模方法，而且量子比特需求极高，即使是玩具问题也超过 10,000。这些用例面临的主要障碍是算法创新不足以及硬件可用性有限，其工业应用价值尚不明确，或距离实际应用仍很遥远。未来量子算法和建模方面的发展将揭示这些用例是否能从量子计算中受益。

Use Case	Run-time	可扩展性	模型与实现	解的质量	可转移性
预测-ing	绿色	绿色	绿色	黄色	Red
生产分配与调度	绿色	绿色	黄色	黄色	Red
推车杆量子孪生	Red	黄色	黄色	绿色	绿色
自动运输车装载	黄色	黄色	绿色	黄色	黄色
多准则优化	黄色	绿色	黄色	黄色	绿色
模块化生产物流	Red	黄色	黄色	黄色	Red
传感器定位	黄色	Red	黄色	Red	绿色
冷却系统优化	Red	Red	Red	黄色	绿色
上下文老虎机	Red	Red	Red	黄色	绿色
列车路由	Red	黄色	Red	Red	黄色
Pod协调	Red	Red	黄色	Red	Red

表1：本研究评估的用例概览，分为三类，按对当前及未来量子计算相较于经典方法的性能所持乐观程度由高到低排列。

4 对量子生态系统中的工业界及利益相关方的建议

根据本研究的用例分析和洞见，可以为行业利益相关者、量子技术提供商以及更广泛的生态系统提出若干建议。这些建议涵盖短期、中期和长期视角，既强调实际行动，也关注协作与创新的战略方向。

1. 短期内，不应期待纯量子设备带来明确收益。应研究混合设备的实用性，并与纯经典解决方案进行全面基准测试，尤其是针对那些可自然映射为 QUBO 表述，且不会因需要松弛变量而产生显著开销的优化用例。经过评估的用例——生产分配与调度、模块化生产物流以及汽车装载——可作为良好的参考问题。

2. 对于结果与经典机器学习方法相当的量子机器学习用例，应持续在改进后的硬件上进行测试，以确定其能否像经典方法一样扩展。解决方案的运行时间和成本仍是需要考虑并改进的重要因素。建议与硬件提供商开展联合研究，以优化这些指标，这将是很有价值的工作。已研究用例清单中的参考示例包括预测、倒立摆量子孪生体和多准则优化。

3. 第二类用例的优势取决于建模的改进和更高效的编码。这些领域的研究应以工业需求为导向，由工业界、学术界、算法开发者和硬件提供商开展合作，开发针对特定工业用例和硬件模态进行优化的映射与算法。本项目研究的多个用例都属于这一类。传感器定位问题需要更高效的编码，或采用不依赖松弛变量的编码。冷却系统优化用例将受益于更具可扩展性的系统编码。此外，汽车运输载具装载用例

则可通过更优的建模提高解的质量并缩短运行时间。结合特定硬件模态与优化后的建模策略，或可进一步改善所得结果。

4. 本项目获得的见解和开展的实现工作，应作为识别更多适用于量子计算的工业问题的蓝图。在这些案例的基础上，学术界和工业界可以携手开发可复用组件、开源框架和标准化基准测试协议。这些努力将有助于持续追踪进展，并确保不同方法之间具有可比性。QCHALLenge 和 QUTAC 等合作倡议凸显了利益相关方在问题定义、硬件路线图和软件工具链方面保持一致的重要性。持续合作将增强欧洲量子生态系统，推动可复现实验，并加速实现具有工业相关性的量子实用性。

5. 展望未来，量子计算硬件的发展以快速进步和持续的不确定性为特征。超导和基于量子门的架构通过提高保真度和采用模块化设计不断改进，而量子退火在组合问题的启发式探索中仍然具有价值。离子阱系统能够实现高保真度操作，但其能否扩展到工业级规模仍有待观察。光子、神经形态和拓扑量子计算等新兴方法展现出发展潜力，但目前与工业的融合仍然有限。未来十年，进展预计将沿着三条相互依存的路径展开：求解器感知的问题建模，使工业挑战能够以兼容经典和量子求解器的方式进行表述；硬件成熟化，重点关注嵌入效率、误差缓解以及与经典控制系统的集成；以及工业界、学术界和硬件提供商之间的持续合作，通过共享基准测试、数据和 QUARK 等开放框架推动发展。

致谢

本文部分经费由德国联邦研究、技术与空间部（BMFTR）通过资助计划“量子计算——面向工业的应用”（QCHALLenge）提供，依据的资助项目为“数字技术开发”（合同编号：01MQ22008）。AI 工具（OpenAI ChatGPT）用于辅助润色文本和制作视觉材料。作者对科学内容承担全部责任。

参考文献

[1] QAR Lab. *QCHALLenge*项目，*BMWK*。[访问日期：15-07-2025]。URL: https://qarlab.de/qchallenge/.[2] Abhishek Awasthi 等人。“量子-经典优化在生产调度中的实际应用”。载于：*2024*年*IEEE*量子计算与工程国际会议（*QCE*）。第 02 卷。2024年，第 239–244 页。[3] Florian Krellner 等人。“使用量子-经典元启发式算法解决实际模块化物流调度问题”。载于：*2025*年国际量子计算与工程会议（*QCE*）。2025年7月。预印本 - arXiv: 2507.21701（quant-ph）。[4] KIPU Quantum。*PlanQK*。[访问日期：04-09-2025]。URL: https://platform

.

planqk.de/community.[5] Aqarios。借助 *Luna* 释放量子驱动的优化能力. [访问日期：04-09-2025]. URL: https://aqarios.com/platform/.[6] GitHub。*QUARK*框架。[访问日期：04-09-2025]。URL: https://github.com/QUARK-framework/QUARK-framework.[7] QuCUN。德国量子计算用户网络。[访问日期：04-09-2025]。URL: https://qucun.de.[8] 量子技术与应用联盟 – QUTAC 等。“工业量子计算应用”。载于：*EPJ* 量子技术。8.1（2021年），第 25 页。DOI: 10.1140/epjqt/s40507-021-00114-x.URL: https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00114-x.[9] QAR Lab。访问日期：2025年9月30日。URL: https://qarlab.de/en/talk-on-bitcom-2024.[10] QAR Lab。访问日期：2025年9月30日。URL: https://qarlab.de/en/qchallenge-publications-for-qce-conference-2024-in-montreal.[11] QAR Lab。访问日期：2025年9月30日。URL: https://qarlab.de/en/contributions-to-qce-conference-2025。

[12] Hassan Soubra 等。“量子系统指标与测量的综合综述”。载于：Metrics 2.2（2025年）。 ISSN: 3042-5042.DOI: 10.3390/metrics2020009。URL: https://www.mdpi.com/3042-5042/2/2/9.[13] Karen Wintersperger 等。“中性原子量子计算硬件：性能与终端用户视角”。载于：EPJ 量子技术 10.1（2023年8月）。 ISSN: 2196-0763. DOI: 10.1140/epjqt/s40507-023-00190-1。 URL: http://dx.doi.org/10.1140/epjqt/s40507-023-00190-1.[14] Koen Alexander 等。用于光子量子计算的可制造平台。2024年。arXiv: 2404.17570 [quant-ph]。 URL: https://arxiv.org/abs/2404.17570。[15] David Aasen 等。使用拓扑量子比特阵列实现容错量子计算的路线图。2025年。arXiv: 2502.12252 [quant-ph].URL: https://arxiv.org/abs/2502.12252。[16] D-Wave。Quantum Realized。 [访问日期：15-07-2025]。 URL: https://www.dwavequantum.com.[17] D-Wave。AdvantageTM 量子计算机。 [访问日期：15-07-2025]。URL: https://www.dwavequantum.com/solutions-and-products/systems/.[18] ParityQC。以独特方法加速 NEC 的量子计算机研究。 [访问日期：23-07-2025]。 URL: https://parityqc

.

com/a-new-quantum-annealer-by-nec.[19] Ana Palacios 等人用于任意维度伊辛模型量子退火的可扩展二局部架构。2025年。 DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.054070。arXiv: 2404.06861 [quant-ph]. URL: https://arxiv.org/abs/2404.06861.[20] D-Wave。访问日期：2025年8月8日。 URL: https://www.dwavequantum.com/media/3xvdipcn/14-1058a-a_advantage_processor_overview.pdf.[21] R. Harris 等人。“稳健且可扩展的磁通量子比特的实验演示”。载于：*Physical Review B* 81.13（2010年4月）。 ISSN: 1550-235X。DOI: 10.1103/physrevb.81.134510。 URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.134510。

[22] D-Wave。访问日期：2025年8月8日。URL：https://www.dwavequantum.com/media/wakjcpsf/adv2_4400q_whitepaper-1.pdf.[23] D-Wave。访问日期：2025年8月8日。URL：https://www.nextplatform.com/2025/03/31/d-wave-pushes-back-at-critics-shows-off-aggressive-quantum-roadmap/.[24] Qilimanjaro。访问日期：2025年8月5日。URL：https://www.qilimanjaro.tech/qilimanjaro-quantum-tech-and-do-it-now-selected-to-advance-european-quantum-computing-as-part-of-eurohpc-ju-initiative/。[25] IBM量子计算。量子未来技术。[访问日期：15-07-2025]。URL：https://www.ibm.com/quantum/technology#roadmap。[26] IQM。发展路线图。[访问日期：15-07-2025]。URL：https://meetiqm.com/technology/roadmap/。[27] J. Kelly 等。“通过超导量子电路中的重复错误检测实现状态保持”。载于：Nature 519.7541（2015年3月），第66–69页。ISSN：1476-4687。DOI：10.1038/nature14270。URL：http://dx.doi.org/10.1038/nature14270。[28] Julian Kelly。访问日期：2025年8月8日。URL：https://research.google/blog/a-preview-of-bristlecone-googles-new-quantum-processor/。[29] Frank Arute 等。“使用可编程超导处理器实现量子霸权”。载于：Nature 574.7779（2019年10月），第505–510页。ISSN：1476-4687。DOI：10.1038/s41586-019-1666-5。URL：http://dx.doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5。[30] Jerry Chow、Oliver Dial 和 Jay Gambetta。访问日期：2025年8月8日。URL：https://www.ibm.com/quantum/blog/127-qubit-quantum-processor-eagle。[31] Jami R¨onkk¨o 等。“用于教育与研究的本地部署超导量子计算机”。载于：EPJ Quantum Technology 11.1（2024年4月）。ISSN：2196-0763。DOI：10.1140/epjqt/s40507-024-00243-z。URL：http://dx.doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00243-z。[32] Jay Gambetta。访问日期：2025年8月8日。URL：https://www.ibm.com/quantum/blog/quantum-roadmap-2033。

[33] IBM。访问日期：2025年8月8日。 URL： https://newsroom.ibm.com/2023-12-04-IBM-Debuts-Next-Generation-Quantum-Processor-IBM-Quantum-System-Two, -Extends-Roadmap-to-Advance-Era-of-Quantum-Utility。[34] Jay Gambetta 和 Ryan Mandelbaum。访问日期：2025年8月8日。 URL：https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024。[35] Ryan Mandelbaum 等。访问日期：2025年8月8日。 URL： https://www.ibm.com/quantum/blog/large-scale-ftqc。[36] Rajeev Acharya 等。“低于表面码阈值的量子纠错”。载于：Nature 638.8052（2024年12月），第920–926页。 ISSN：1476-4687。 DOI： 10.1038/s41586-024-08449-y。 URL： http://dx.doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y。[37] IQM。访问日期：2025年8月8日。 URL： https://meetiqm.com/products/iqm-radiance/。[38] Google Quantum AI。我们的量子计算路线图。 [访问日期：15-07-2025]。 URL： https://quantumai.google/roadmap。[39] Quantinuum。技术展望：到本十年末，我们将交付通用、完全容错量子计算。 https://www.quantinuum.com/blog/technical-perspective-by-the-end-of-the-decade-we-will-deliver-universal-fault-tolerant-quantum-computing。 [访问日期：15-08-2025]。[40] Inc. IonQ。IonQ 的加速路线图：将量子雄心变为现实 — ionq.com。 https://ionq.com/blog/ionqs-accelerated-roadmap-turning-quantum-ambition-into-reality。 [访问日期：24-06-2025]。[41] Quantinuum。Quantinuum 发布加速路线图，力争到2030年实现通用、完全容错量子计算。 https://www.quantinuum.com/press-releases/quantinuum-unveils-accelerated-roadmap-to-achieve-universal-fault-tolerant-quantum-computing-by-2030。 [访问日期：24-06-2025]。[42] GitHub。QCHALLenge-FW。 [访问日期：29-09-2025]。 URL： https://github.com/Project-QCHALLenge/QCHALLenge-FW。[43] D-Wave。访问日期：2025年10月27日。 URL： https://docs.dwavequantum.com/en/latest/industrial_optimization/leap_hybrid.html。

[44] railOscope。基础设施。[访问日期：29-09-2025]。URL：https://railoscope.com/workspace/6074970aaba15e47fca2625d?capability=TcBEfyVmiJTWLZm8&branchId=6281fc03a6ce9f408c072307&noTT=true.[45] Peter J. Eder 等。《多式联运网络中主动—被动车辆的高效协调》。载于：《交通研究*E*辑：物流与运输评论》203（2025年11月），第104318页。ISSN：1366-5545。DOI：10.1016/j.tre.2025.104318。URL：http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2025.104318.[46] Nico Kraus 等。《生产环境中最优传感器布置的量子退火超参数分析》。2025年。arXiv: 2507.16584 [cs.ET]。URL：https://arxiv.org/abs/2507.16584.[47] Christian J¨ack、Jochen G¨onsch 和 D¨ormann-Osuna Hans。“汽车运输车装载问题的装载因子优化”。载于：《运输科学》57.6（2023年）。[48] IBM ILOG Cplex。“V12.1：CPLEX 用户手册”。载于：国际商业机器公司 46.53（2009年），第157页。[49] Leonhard H¨olscher 等。冷却系统的量子模拟优化。2025年。arXiv：2504.15460 [quant-ph]。URL：https://arxiv.org/abs/2504.15460。[50] Yize Sun 等。《使用模拟VQC量子策略进行实时控制的首次实践》。2025年。arXiv：2508.01690 [quant-ph]

URL：https://arxiv.org/abs/2508.01690。[51] Daniel Hein 等人。“一个受工业控制问题启发的基准环境”。载于：*2017 IEEE*计算智能研讨会系列（*SSCI*）。IEEE，2017年11月，第1–8页。DOI：10.1109/ssci.2017 年。8280935。URL：http://dx.doi.org/10.1109/SSCI.2017.8280935。[52] Lukas Schulte 等人。离线情境老虎机问题中的变分量子电路。2025年。arXiv：2509.07633 [quant-ph]。URL：https://arxiv.org/abs/2509.07633。