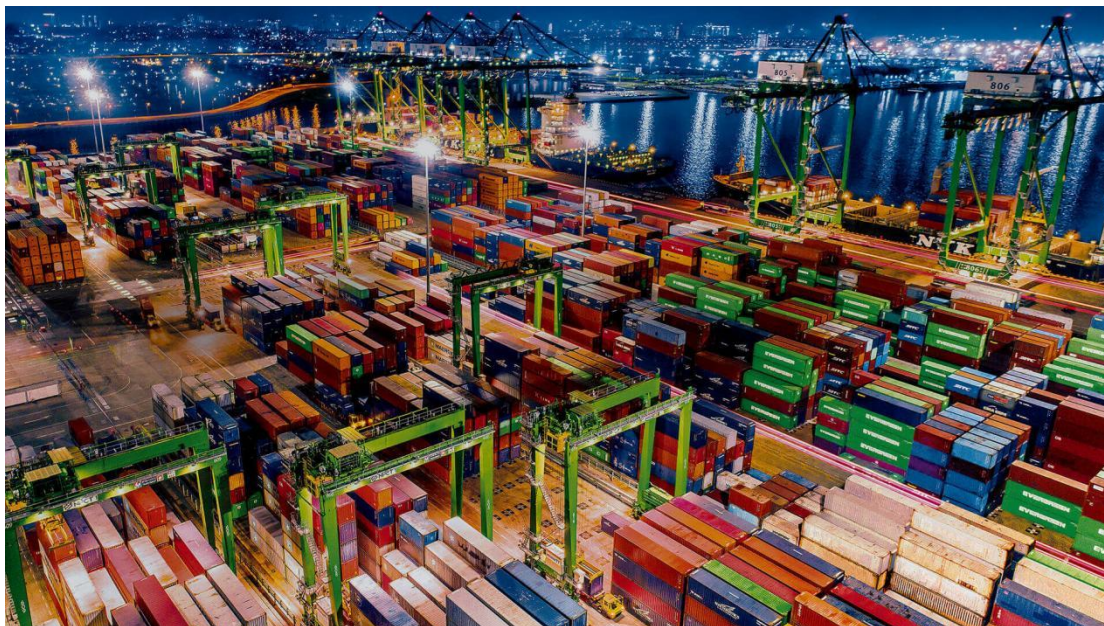


面向港口场景的混合量子 - 经典算法



1 行业痛点及政策牵引

泊位资源分配、船舶靠离泊调度、场内运输与作业协同，是港口高效运行的核心环节。随着港口规模不断扩大、作业模式日趋复杂，传统依赖人工经验和规则的调度方式正面临越来越大的挑战。

对于港口而言，在传统调度模式下，生产调度人员通常根据当日船舶计划、泊位条件及设备状态，人工制定泊位分配和作业安排方案。在实际操作中，需要综合考虑船型差异、吃水限制、靠泊时间冲突、安全间隔、装卸设备匹配、作业连续性以及客户服务水平等多种复杂因素，以保障港口整体运行的安全与效率。当船舶数量增加、作业约束增多或突发情况频繁出现时，单纯依靠人工经验和规则调度，已难以在可接受时间内获得全局最优或近似最优的解决方案。

在散杂货码头场景下，问题的复杂性进一步放大。散杂货作业具有货物流连续性、作业流程差异大、皮带系统与泊位、堆场高度耦合等特点，不同码头在工艺流程和资源配置上差异显著，难以套用统一的调度模型，导致现有信息系统和算法工具在实际应用中效果有限。

从政策层面看，港口智能化、数字化发展已成为国家层面的重要战略方向。

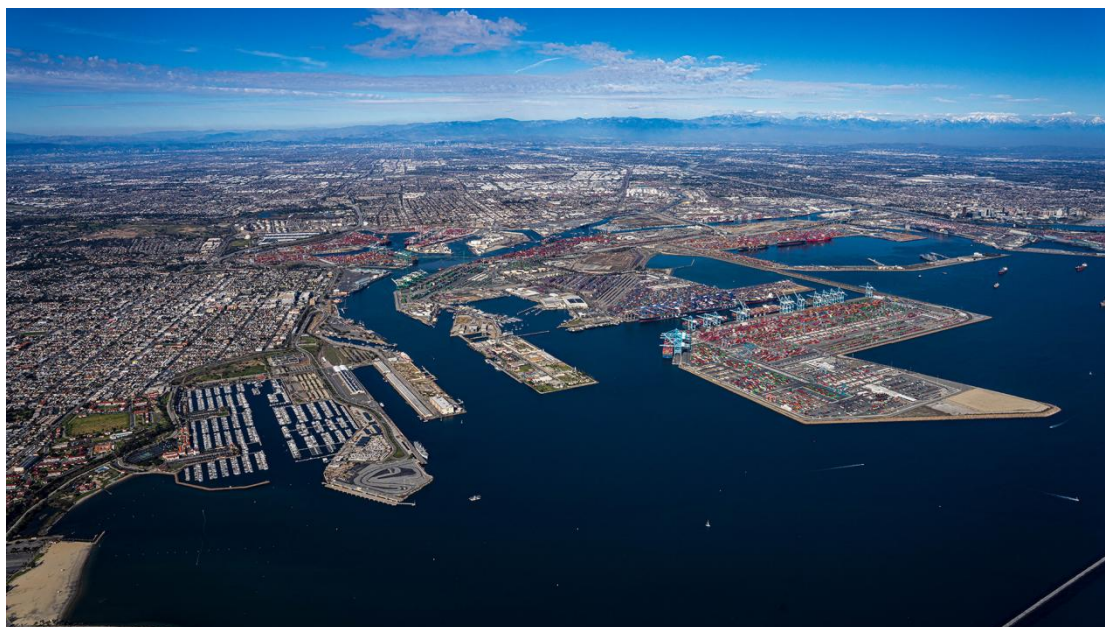
《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》明确提出，要加快推进交通基础设施数字化升级，提升综合交通体系运行效率和资源配置能力，推动港口等关键枢纽由“规模扩张”向“质量效率提升”转型发展。

在此基础上，交通运输部在《数字交通“十四五”发展规划》进一步提出，到 2025 年基本建成“交通设施数字感知、信息网络广泛覆盖、运输服务便捷智能、行业治理在线协同”的数字交通体系，强调通过数字技术和智能决策手段提升交通运行效率和管理能力，为港口调度智能化和新型计算技术应用提供了明确的政策牵引。

同时，《关于加快智慧港口和智慧航道建设的意见》明确将港口生产运营管理智慧化作为重点任务之一，提出要通过新一代信息技术提升港口资源配置效率、作业协同能力和运行决策水平，推动港口调度由经验驱动向数据驱动、模型驱动转变。

在此背景下，引入能够应对大规模复杂调度问题的新型计算方法，已成为港口提升运营效率和智能化水平的重要技术方向。

2 国际案例：洛杉矶港



2.1 项目背景

洛杉矶港是美国最繁忙的海运枢纽之一，其 Pier 300 集装箱码头针对装卸

与卡车调度复杂优化问题，与量子分析公司 SavantX（利用 D-Wave 量子退火系统）合作开展了量子优化项目。SavantX 开发了 HONE（Hyper-Optimized Nodal Efficiency）混合量子-经典优化引擎用于解决港口物流问题。

2.2 优化方法

- 项目建立了数字孪生模型模拟码头操作流程，以大量仿真样本构建操作数据集，然后将优化问题（如卡车预约调度、吊机安排和集装箱搬运顺序）输入到 HONE 系统。
- HONE 混合使用量子退火计算与经典优化方法来寻找更高效的调度方案，并在模拟与实测中持续迭代。

2.3 优化结果

- 优化后，码头的起重机生产效率显著提高：每台起重机每天的集装箱处理量提升约 60%（从~60 个提升至~97 个）。
- 卡车在码头等待的时间有所缩短，提高了码头整体的吞吐率和资源利用效率。
- 项目显示量子优化在复杂调度问题中可以显现出相对于传统方法的优势，尤其是在约束、变量和不确定性都很高的应用场景中。

3 混合量子 - 经典算法的优势

在量子硬件仍处于发展阶段的背景下，我们采用经典计算与光量子计算协同的混合调度架构，将港口调度问题拆分为“经典系统可高效处理的部分”和“传统方法最难优化的组合决策部分”，实现工程上可落地的量子加速。

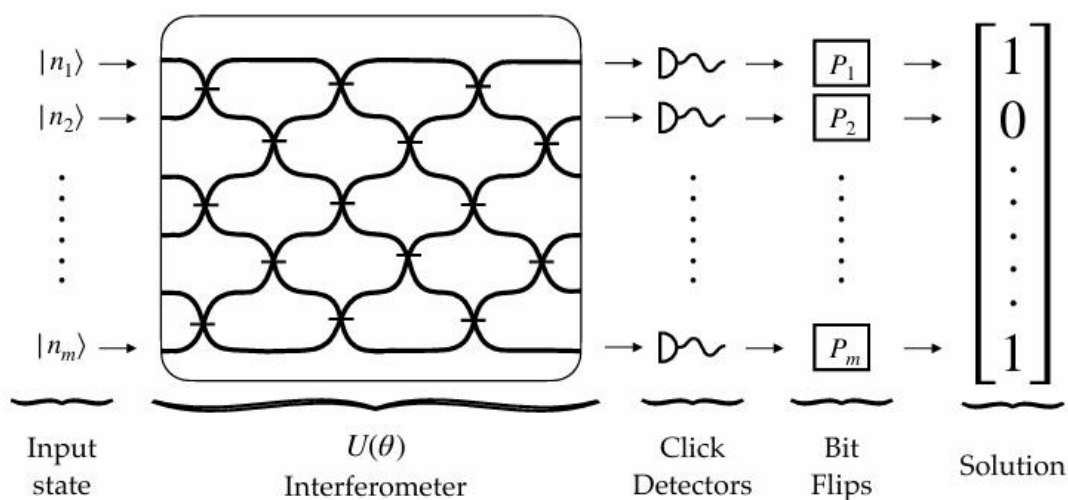
经典系统负责业务建模、规则约束、规模控制和结果评估；量子侧则基于量子光路运行的 BBS（Bosonic Binary Solver，玻色采样二元求解器），专注解决高维离散组合空间中的核心搜索问题。

在泊位分配、船舶调度、装载规划等典型港口场景中，问题本质都是高维离散组合优化。随着规模和规则增加，可行方案数量迅速膨胀，传统算法往往需要在巨大组合空间中逐步搜索，计算时间显著拉长；在多重约束叠加时，解的质量

也容易受到搜索机制本身的限制。

BBS 通过量子光路中的玻色采样，一次性并行生成大量具有统计偏好的二进制候选解，具备更强的全局探索能力，尤其适合“选/不选、匹配/不匹配”这类港口调度决策问题。

在系统中，BBS 作为独立的量子优化模块嵌入现有调度流程，仅对最困难的组合决策环节提供加速，不影响原有系统结构，部署成本低、改造风险小，同时有效提升方案质量与决策效率。



BBS 算法架构示意图

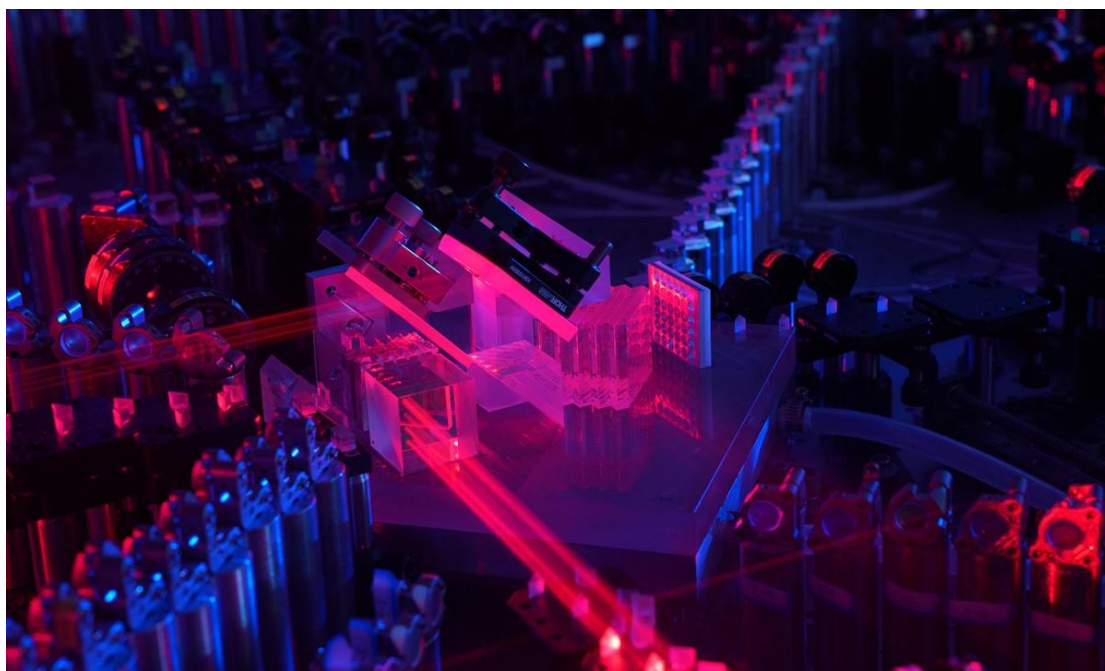
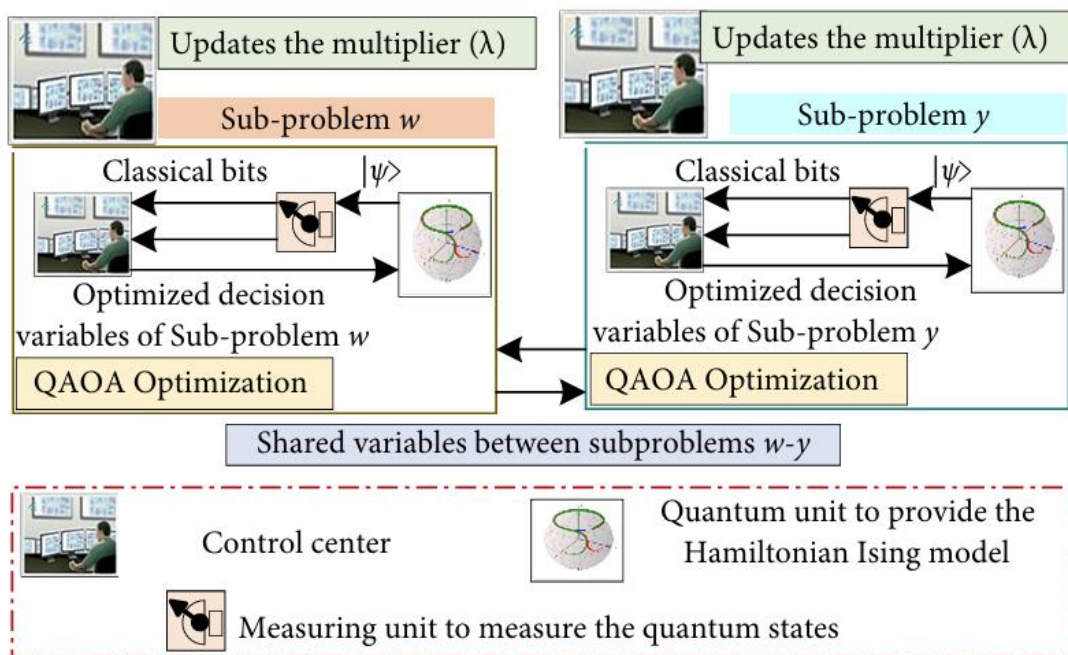
该算法引擎具有面向多港口场景的通用能力，包括集装箱装载规划、港口泊位分配、船舶调度、设备协同作业和场内资源分配等多类场景，为现有港口系统提供一个更高效、更智能的决策引擎。

4 港口智能调度系统

我们提供一套混合量子 - 经典调度引擎（Q-ADMM+BBS），可覆盖港口的多类复杂调度场景（如泊位调度、岸桥协同、场内运输、装载规划等）。下面步骤以装载规划（箱区 - 贝位匹配）为例说明。

- 经典筛选（降维筛选模块）：对所有箱区 - 贝位组合进行快速筛选，筛出高潜力候选集合，避免全量计算带来的效率瓶颈。
- 量子光路优化（玻色采样二元求解器 BBS）：在候选集合中，利用量子光路并行采样生成高质量方案，并通过经典后处理进一步提升解的质量。

- 迭代协同（量子-交替方向乘法 Q-ADMM）：经典模块与量子模块交替迭代更新，快速收敛到稳定的装载方案。



本质上，只要问题可以抽象为高复杂度的离散组合决策，都可以由经典系统建模，再交由 BBS 进行量子级搜索优化。

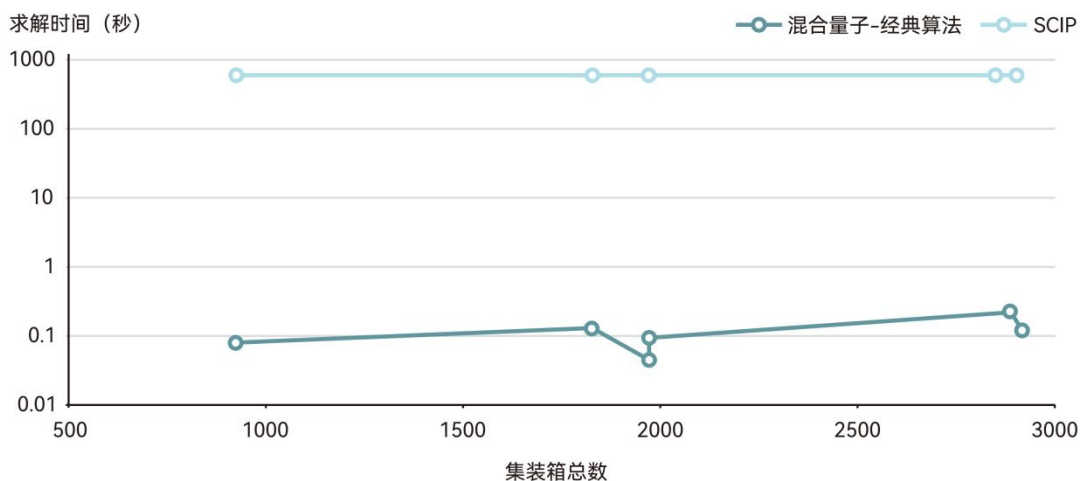
5 应用案例

在全球最大的集装箱港口之一，每天需将成千上万的集装箱精准装船。核心决策是：从哪个堆场箱区 (Block) 调拨多少集装箱，分配到船上的哪个贝位 (Bay)？这是一个宏观的流量分配问题，也是一个巨大的组合优化挑战。

我们在该港口部署了**混合量子 - 经典算法**，以实现如下目标：

1. 均衡船上同一个贝位集装箱来自堆场 3-5 个相同箱区，保证多个作业点同时供箱，提高装船连续性。
2. 尽可能让船上同一个箱区集装箱来自同一个贝位，减少跨贝取箱，提高装船效率。

结果表明，在保证高装载率的前提下，该方法将装船调度方案的求解时间由传统算法的约 **600 秒大幅缩短至 0.5 秒**，同时有效降低了方案的跨区作业成本，显著提升了港口作业效率，实现了降本增效。



算法性能-对数坐标时间趋势对比图

配载需求				
码头箱区	箱区供应集装箱	船舶贝位	贝位需求集装箱	货物属性
128 个	2888 个	84 个	2898 个	18 个

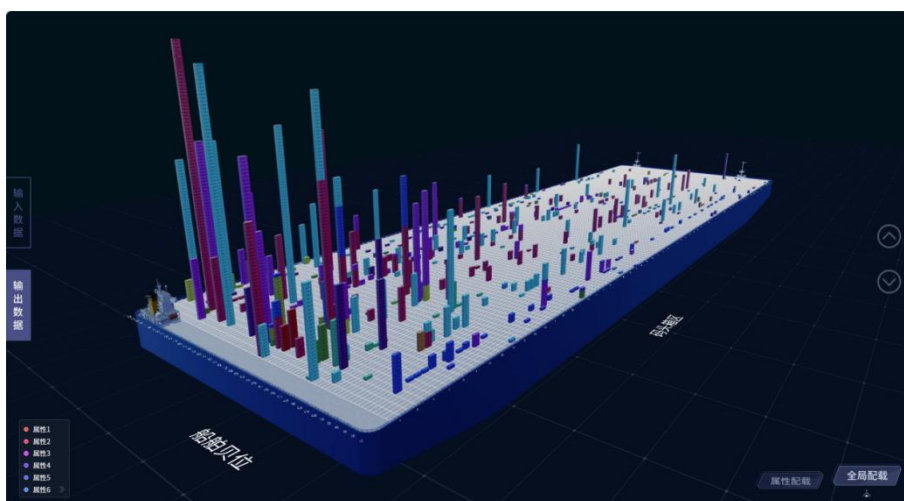
混合量子-经典算法			
算法用时	装载数/总数	跨区作业成本 (箱区-贝位连接数)	需求匹配率
0.502"	2788/2888 个	299 (249)	96.54 %

SCIP算法

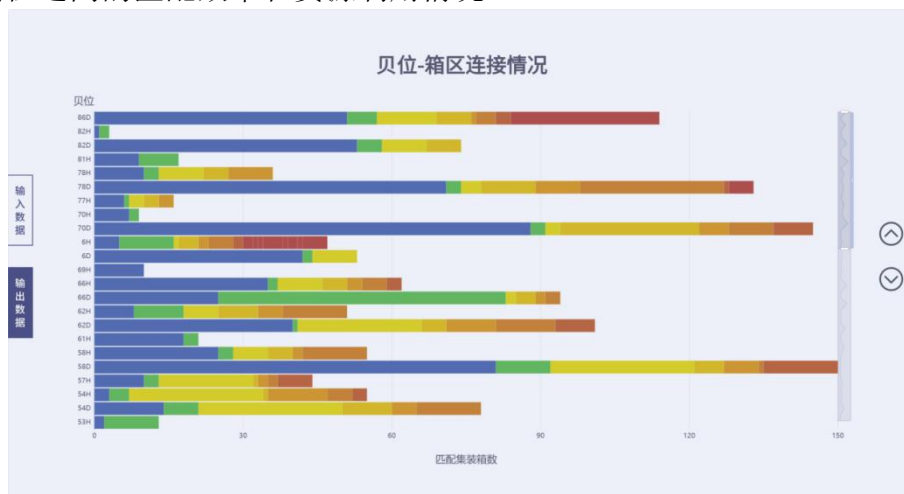
算法用时	装载数/总数	跨区作业成本 (箱区-贝位连接数)	需求匹配率
600.00"	2831/2888 个	375 (225)	98.02 %

通过 2D/3D 视图，可直观呈现优化后的集装箱配载方案：

三维可视化：以船舶三维模型为基础，通过在船体不同贝位（Bay）上竖立彩色柱状图，直观展示各位置集装箱的堆叠情况和属性分布。不同颜色代表不同类型的集装箱属性（如重量、危险品等级、目的地等），柱子高度表示堆叠层数或数量。整体可反映船舶装载的空间布局、重心分布及配载合理性，便于操作人员快速掌握全局状态。



二维条形图：展示“贝位-箱区连接情况”，横轴为匹配集装箱数量，纵轴为贝位编号（如 86D、82H 等）。每个条形按颜色分段，代表来自不同箱区的集装箱分配情况，清晰体现每个贝位的集装箱来源构成与数量分布。可用于分析箱区与贝位之间的匹配效率和资源利用情况。



5 关于我们

九章（济南）量子科技有限公司专注于光量子计算及其相关技术研发和应用推广。主要生产光量子计算整机及全链条关键器件，开发量子算法及混合量子-经典算法，并研制具有实际应用价值的专用量子模拟机和通用量子计算机，重点应用领域包括智慧城市、交通出行、金融、医药等。