



自动化集装箱码头智能空轨集疏运系统实现

鲁彦汝, 李永翠, 李波, 张传军, 刘玉坤
(青岛新前湾集装箱码头有限责任公司, 山东 青岛 266500)

摘要: 为解决港内交通拥堵、缓解城市集疏运断带现象, 以立体交通的思维构建未来物流体系已经成为一种新的趋势。针对上述问题, 开展智能空轨集疏运系统的关键技术研究。设计空轨运输流程并采用清除-简化-整合-自动化(ESIA)方法进行运输路径简化、流程拼接; 采用自适应动态蚁群算法解决空轨集疏运系统与码头现有系统重构、融合和迭代困难问题; 采用线性约束的混合整数规划和改进型混沌粒子群优化(PSO)算法解决空轨选箱和路径协同问题。通过设计系统整体架构, 进行各子系统功能模块分析, 给出通用性的系统实现方案。

关键词: 空轨集疏运系统; 流程优化; 智能调度; 功能模块

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0223-05

Realization of intelligent air rail collection and distribution system for automated container terminal

LU Yanru, LI Yongcui, LI Bo, ZHANG Chuanjun, LIU Yukun

(Qingdao New Qianwan Container Terminal Co., Ltd., Qingdao 266500, China)

Abstract: To solve the traffic congestion in the port and alleviate the interruption phenomenon of urban collection and distribution, it has become a new trend to construct the future logistics system with the thinking of three-dimensional traffic. In view of above problems, the research of key technologies of intelligent air rail collection and distribution system is carried out. The air rail transport process is designed and ESIA method is adopted to simplify the transport path and splice the process. The adaptive dynamic ant colony algorithm is used to solve the reconstruction, integration and iteration difficulties of the air rail collecting and distributing system and the existing system of the wharf. Mixed integer programming with linear constraints and improved chaotic PSO algorithm are used to solve problems of empty rail box selection and path coordination. By designing the overall structure of the system and analyzing function modules of each subsystem, a universal system implementation scheme is obtained.

Keywords: air rail collection and distribution system; process optimization; intelligent scheduling; function module

港口作为海洋运输和陆路运输的重要交互点, 公路疏港是目前最主要的疏港方式, 但港内交通拥堵严重、重要枢纽间“连而不畅”和“邻而不接”是亟待解决的问题^[1]。空轨运输是将地面交通立体化, 以空中通道连接重要枢纽, 打破“最后一公里”。这种运输方式, 一方面为港口集疏运提供一

种新装备, 构建一种智能、高效、安全、绿色的港口集疏运新模式; 另一方面, 空轨占地面积约为公路通道的30%, 可减少用地, 降低建设和维护保养成本。针对这种港口新型装卸工艺, 孙梅玉等^[2]探讨空轨系统在多式联运中的应用前景; 钱秋英等^[3]分析空轨集疏运系统的经济性; 耿卫

收稿日期: 2023-11-27

作者简介: 鲁彦汝(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事集装箱码头信息系统、自动化与智能化技术研究。

宁等^[4]、殷健等^[5]分别探讨分析青岛港前湾港区空轨系统的应用可行性及线路设计和物理构成；王向阳等^[6]针对性研究空轨运行控制技术。这些都为自动化集装箱码头智能空轨集疏运系统的设计和实现提供了理论基础。

智能空轨集疏运系统是空轨运输信息化和智能化的落脚点。本文以空轨系统与港口生产系统协同交互、与原有装卸工艺精准衔接、与设备运行控制和信息调度技术的深度集成等为出发点，进行自动化集装箱码头智能空轨集疏运系统架构设计，采用模块化设计思维，提出了系统在信息化方面的实现方案，具有建设周期短、适用性强、运行安全可靠的特点，并在青岛港前湾港区成功应用。

1 系统整体架构

自动化集装箱码头智能空轨集疏运系统是一套实现集装箱空中运输的系统。就自动化集装箱码头而言，智能空轨集疏运系统一方面需要与码头原有的智能管控系统对接，获取码头集装箱的受理计划和集装箱信息；另一方面需要按照码头运输规则与码头设备控制系统对接，实现从水平运输设备上提取和转运集装箱的功能。空轨集疏运系统建设的重点和难点在于其需要考虑码头原有作业流程和业务模式，与码头原有生产系统进行深度融合和协同交互，且必须对接至少 2 个码头，或场站、物流园区等，所以在进行整体架构设计时必须统筹规划，以实现集装箱全流程智能化、自动化、高效化运输作业。

空轨集疏运系统主要包含智能调度系统、智能运控系统、人机交互系统、统计分析系统及接口等部分。其中，接口主要包括空轨信息交换平台及其与码头设备控制系统的接口。系统整体架构见图 1。

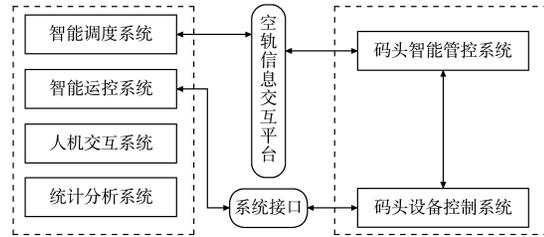


图 1 系统整体架构

智能调度系统从码头智能管控系统获取集装箱信息、中转计划、堆场计划、查验计划等，并反馈运单状态和异常信息；智能运控系统接收到运单和行车调度指令后，在对水平运输设备进行抓放箱作业之前需要与码头设备控制系统进行信息交互处理与安全锁定，以保证设备作业安全及集装箱信息更新无误。

2 系统流程优化

空轨运输流程按照识别流程优化因素、发现融合问题、新建或改造流程、流程细化和优化的步骤进行设计，并采用清除-简化-整合-自动化 (eliminate-simplify-integrate-automate, ESIA) 方法主要从以下 4 点进行运输路径简化和作业流程拼接，以减少集装箱运输作业时间，提高效率：1) 删除无价值的运输路径节点，在空轨转运点与岸桥之间仅使用自动化水平运输设备，减少集装箱入堆场的环节；2) 简化复杂环节，空轨动车与水平运输设备之间使用直接取放箱的交互模式；3) 集整合功能，把光学字符识别 (optical character recognition, OCR) 功能嵌入调度系统，分节点并行分别部署在空轨运行线路的两端，简化 OCR 识别功能校验逻辑；4) 自动化应用，运用先进的信息技术加速流程运转，将自动选箱、自动驾驶、自动避让、自动装卸等技术应用于智能空轨集疏运系统，提高流程运行质量。系统流程优化见图 2。

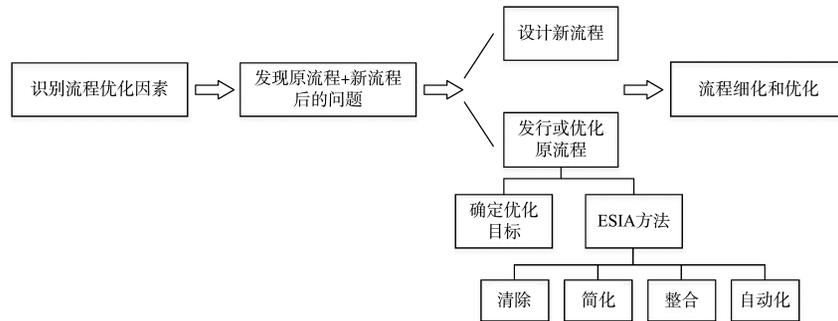


图2 系统流程优化

3 系统实现方案

针对码头动态调度的要求,为解决空轨集疏运系统与码头原有生产系统重构、融合和迭代困难的问题,结合阻塞模型,提出一种自适应的动

态蚁群算法,实现了信息物理系统的新融合和作业指令任务的协同调度。分析各子系统功能,对系统进行模块化设计,见图3。

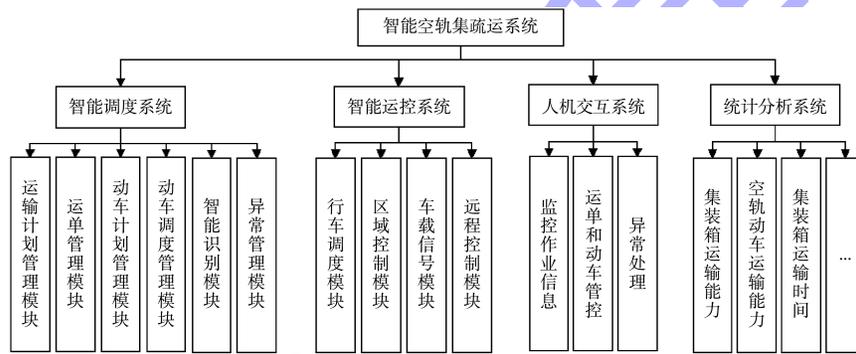


图3 系统设计

3.1 智能调度系统

智能调度系统作为空轨高效运行的核心,是空轨集疏运系统可以智能化运行的大脑。主要包含以下6个功能模块。

1) 运输计划管理模块。运输计划按照运输任务的需求分为日计划和班计划。为解决查验、中转等不同业务类型不同的作业优先级要求、空轨动车选择、站点规划和空轨路径等问题,提出线性约束的混合整数规划算法,判断受理计划中各集装箱的优先级,为每个集装箱构建特征向量,基于特征向量与权值向量计算每个集装箱的评分并归一化,选取评分最高的集装箱作为作业效率最优的集装箱任务,实现空轨动车、业务类型和站点规划布局的数字化管理、网络化操控,解决了不同业务类型下空轨运输选箱问题,保证了日

计划和班计划制定的最优性。

2) 运单管理模块。运单是空轨运输计划的最小单位,以空轨运输班计划为基础,每一个待运输的集装箱都是一个运单计划。运单管理模块可以实现运单创建、运单跟踪、运单查询、异常管理等功能。

3) 动车计划管理模块。动车计划管理主要是根据运输计划和运单计划的数据,结合动车资源生产承载运输任务的动车计划,为下一步动车调度执行运输任务提供基础。

4) 动车调度管理模块。动车调度管理是整个调度系统的运算核心,负责管理空轨可用的动车资源、计算动车周转时间、计算满足运输计划所需的动车资源数量,并实时获取动车位置及运行情况,发起空轨运输请求并下发调度指令。为解

决空轨运输调度与码头智能管控系统调度两种调度因素粒子融合、作业运单匹配困难的问题，调度系统引用了改进型混沌粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法，提出改进混沌粒子群优化系统动力学模型，它将根据预设的调度规则、策略为运单提供分配空轨动车，并与智能运控系统进行通信。

5) 智能识别模块。通过识别集装箱号、国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 码和箱门朝向，以保证港区集装箱运输的准

确性，对识别信息与运单计划信息不一致的集装箱要进行异常提示并显示具体信息。同时，操作人员可通过智能识别系统软件平台查询任意时间任意车次运输的集装箱识别结果。

6) 异常管理模块。因运单计划异常、派发异常、执行异常、设备故障、系统异常或集装箱超重等原因造成调度失败，需要进行异常事件告警，并设计异常处理接口，可供操作人员进行紧急处理。

一个完整的智能调度系统作业规划过程见图 4。

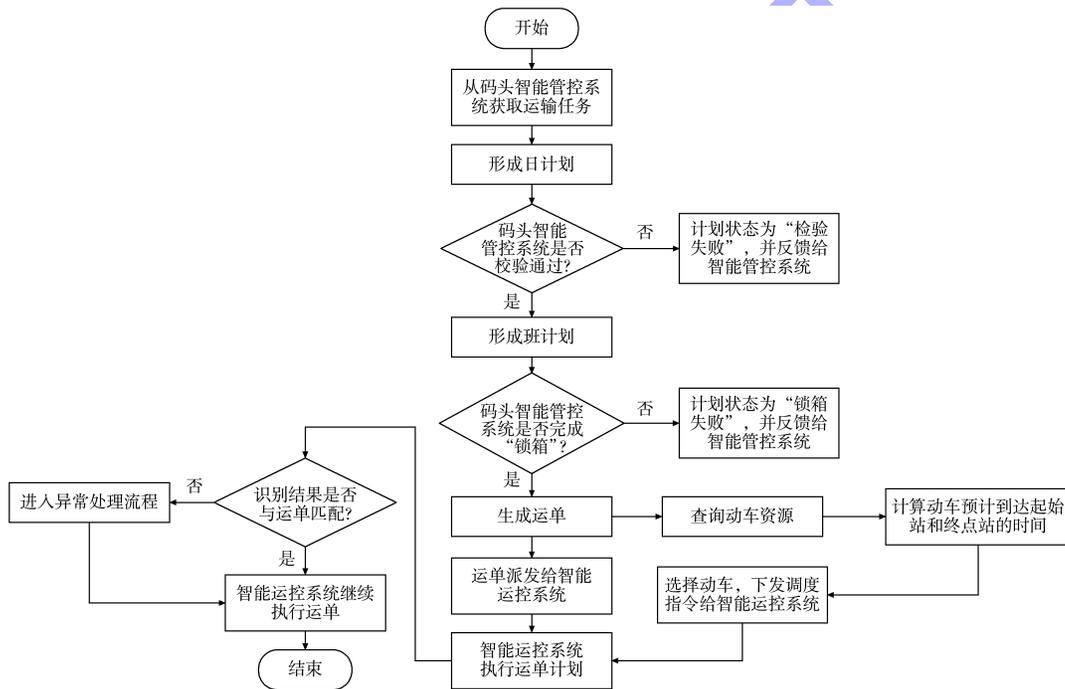


图 4 智能调度系统作业规划

3.2 智能运控系统

智能运控是基于现代计算机、通信、控制和系统集成等技术实现列车运行全过程自动化的新一代列车运行控制系统。具有调度信息接收处理、运行线路自动规划、车载路径锁定、动车自动运行控制、多车运行安全防护^[7]、站点集装箱自动装卸、道岔自动调整、线路和车辆运行状态自动监控等功能。主要包含以下 4 个功能模块。

1) 行车调度模块。负责实时获取动车运行状态，同时与智能调度系统、码头设备控制系统对接，获取外部运单、运输计划及外部对接系统状

态，进行运单信息处理、车辆调度及车辆运行管理，根据运单发起进路（指定车辆的运行路线）申请。

2) 区域控制模块。区域控制模块会根据行车调度模块发来的进路申请，结合动车位置信息办理进路，然后将进路信息发给动车，同时实时获取动车的位置信息。区域控制模块可以对接外部辅助装卸系统、集卡防吊起系统、集卡引导系统和线路区域防护等。

3) 车载信号模块。具有动车车辆运行状态实时采集与传送、车辆自动防护、自动驾驶、精准

定位、车辆休眠唤醒、车地无线通信、远程复位控制信息管理等功能。当动车收到区域控制模块发来的进路信息后,车载信号模块能够根据线路要求,控制车辆自动运行,包括车辆的速度控制、位置控制等。

4) 远程控制模块。作为一个辅助模块,可实现对动车车辆和吊具的远程监测和微调、复位等控制功能。该模块主要在动车定位不准确、机械故障或维修时使用。操作人员根据业务状况明确需要远程接入的场景,确认空轨线路及交互点安全,通过视频监控实现人工介入^[8]。

3.3 人机交互系统

人机交互系统作为空轨集疏运系统主要的前端显示和控制系统,集合了集装箱计划查看与管控设置、运单管理、动车调度管理、动车实时状态显示、异常管理、第三方接口数据查看与处理等功能,可以使操作人员对各终端、设备、轨道、集装箱信息及业务数据进行及时监控和查询,并根据实时生产状况进行调整或异常处理。

3.4 统计分析系统

统计分析系统是空轨系统运行能力持续改进过程中的一个环节。通过提取过滤集装箱信息,按照运输方向、运输节点、运输状态等对集装箱运输能力、空轨动车运输能力、集装箱运输时间等进行数据统计,记录、分析运行过程中的低效因素,从而协助管理人员优化运行流程,也可以为机器学习及大数据分析提供必要的数据来源,为调度算法提供更多的经验值参考,使整体调度效率越来越高。

4 系统应用验证

自动化集装箱码头智能空轨集疏运系统实现方案已成功应用于青岛港前湾港区空轨示范段。该示范段连接前湾港区2个集装箱码头,设置了双向并行多装卸点线路设计,除去设备维护保养

或恶劣天气,集装箱每小时平均运输能力可达到50 TEU,OCR识别成功率已达到99%以上,智能空轨集疏运系统应用效果较好。

5 结论

1) 空轨集疏运作为多式联运的中间节点,将集装箱运输与社会车辆分离,缓解地面交通拥堵问题,充分满足了物流场景运能的动态多变的需求。而智能空轨集疏运系统作为集疏运的中枢系统,是整个流程自动化和智能化的重要载体,实现了调度智能化、数据智能化、作业自动化和运营维护智能化。

2) 系统设计与实现过程中与码头原有系统对接,匹配原有的作业结构和业务模式,整体设计、按层规划,动态地将码头原有卸货、装货、转堆等系列操作与空轨进行综合调度,在任意时刻均可根据路径距离的选择在多项任务中使用,实现了集装箱高效运输与安全作业完美结合。

3) 智能空轨集疏运系统的实现,采用了模块化设计思维,在实现各子系统关联的同时又可以保持各自的独立性,系统部件可灵活组装、拆卸和二次开发,增强了系统模块的可靠性、可重用性和移植性,降低了系统制造的周期性和安全风险。

4) 智能空轨集疏运系统在青岛港前湾港区成功运行后,验证了系统模块的适用性以及码头原有生产系统的可集成性,也说明本系统的实现方案具有重要的实用价值,这对其他类似工程具有参考意义。

5) 在系统实施过程中,调度算法仍在不断的完善和升级,在系统验证过程中也存在因集装箱信息异常、动车或吊具故障导致无法衔接作业等问题,制约着整体效率,这些都需要继续深入研究、持续优化。

(下转第232页)