

港口自动化装卸系统的数据融合与实时控制技术研究

李胜 晏昌杰

荆州港务集团有限公司，湖北荆州，434000；

摘要：随着港口物流的自动化与智能化水平不断提升，装卸作业系统已成为港口有效运行和安全保障的重要核心。本文主要针对数据融合与实时控制两种关键技术进行了阐述，研究港口自动装卸系统体系构架和技术流程，并着重分析介绍基于大数据驱动的技术体系构架，建立了多源的数据融合算法，并及时聚集传感器数据、调度信息、监测信息，实现混合存储、集中防护。应用实时控制算法调整装卸作业的协同动作，提升系统整体快速性及动态调度的时效性。研究结果表明，融合式控制体系可将数据延时和控制误差有效降低，为智慧港口的建设提供必要的技术支撑与理论依据。

关键词：港口自动化；数据融合；实时控制；智能装卸

DOI：10.64216/3080-1508.25.12.028

引言

港口自动化是现代物流体系数字化转型的重要方向。《交通运输部关于加快港口智慧化发展的指导意见》明确提出，要以数字化转型推动港口装卸作业智能化、无人化，实现港口生产运行的安全、高效与绿色发展。随着港口工程技术的不断进步，港口建设也向着专业化方向发展，港口生产的机械化、自动化的发展趋势日益明显，在集装箱码头、散货码头等领域已基本实现全机械化、自动化。本文从理论基础出发，系统分析数据融合与实时控制技术在港口装卸系统中的关键作用与实现路径。

1 港口自动化装卸系统的理论基础

1.1 港口自动化装卸系统的构成与运行原理

港口自动化装卸系统是集成机械设备、控制算法与信息网络的综合性智能体系，主要由感知层、决策层和执行层构成。感知层采用激光雷达、摄像头、RFID标签、压力传感等装置实时采集货物的位置及周边环境信息；决策层应用边缘计算和云端服务平台进行数据融合处理和任务调度与路径规划；执行层由自动化桥吊、轨道吊、AGV搬运小车等组成，负责堆装、搬运、存储。系统按照“数据获取—分析决策—执行实施—反馈修正”的循环管理方式进行控制。通过数据传输和控制命令实时反应来实现港口在线无人化工作流程、可视化工作流程和协同最优化，大幅提升了装卸效率和服务水平。

1.2 数据驱动的港口装卸系统技术框架

基于数据驱动的融合与智能管理构成港口装卸系

统的核心部分，形成基于多个层次的技术体系，其中底层为数据采集和通讯层，完成采集数据的接收和数据传输；中间层是数据综合和解析层，利用机器学习的算法完成关键特性的挖掘、设备运行状态的识别、潜在风险的研判；顶层是控制和决策层，完成实时数据的最佳调配和操作指令生成。整个体系采用“云一边一端”一体架构设计，实现分散化的数据处理和满足及时性需求。各环节间通过5G专网和工业以太网实现高效交互，实现操控信息可靠传递。该框架以数据流作为决策核心信息，形成“数据检测—智能解析—自动控制”的闭环结构，对港口自动化技术形成强有力支撑。

2 港口自动化装卸系统的数据融合技术

2.1 数据融合的基本原理与体系架构

在港口自动化装卸系统中，数据整合负责将异构、异质数据转换为统一决策依据，通过算法模型连接和匹配从感知层采集到的数据，然后再对数据进行改写，获得信息提供决策依据。由于港口工作场景的高度动态性以及大量扰动因素，单一传感器的数据很难精确表述工作状况，但是通过数据整合技术实现空间、时间和意义层面的一致计算，使得机器、任务、位置之间的信息能够组成完整逻辑关系。

体系架构依托于系统的三层结构展开，感知层主要实现货物、设备、位置及能耗等信息的采集；决策层通过融合技术进行综合分析判断，得出设备特性和状态；执行层根据融合结果调整作业策略和调度计划。各个层次间通过高效的信息传递通道与分散式处理单元实现信息交互，从而实现了数据感知到行为执行的完整闭环。

由于融合技术的存在，搬运系统具备自学习能力和灵活行为，使设备之间合作程度、工作流程整体具备更高层级的智能化水平。

2.2 多源数据的预处理与特征提取方法

港口作业过程中的各类传感器、摄像头、定位单元提供的原始数据可能具有噪声、格式紊乱、时差、位置误差等特性，未经处理直接输入算法模型中将会导致算法误判，因此系统对原始数据进行规整，经过消除噪声、对时、补全、格式统一四个环节处理原始数据。采用小波去噪及小波平滑，消除原始数据中的噪声；采用时间戳对原设备间的各自数据帧进行精确的时空排列；利用周围样本值、趋势估计法对缺失的数据值进行补全；全部统一单位进行数值比对。

在特征提取环节，针对数值型数据采用主成分分析（PCA）筛选关键特征，降低冗余维度；针对图像与视频信息，利用卷积神经网络（CNN）提取空间结构特征，其映射过程可表示为：

$$F_i = f(W_i \cdot X_i + b_i) \quad (1)$$

其中， X_i 为输入矩阵， W_i 为权重， b_i 为偏置项， $f(\cdot)$ 为非线性激活函数。该模型实现了高维输入到特征空间的非线性映射，为数据融合阶段提供稳定且区分度高的特征向量。

2.3 数据融合算法模型与融合过程设计

港口自动化装卸系统在实时决策中依赖于高效、稳定的数据融合算法。融合模型的选择取决于信息的不确定性和动态特性。面对不同模糊程度、变化趋势的感知信息，针对多传感器感知过程导致的噪声和时延问题，通过改进后的扩充卡尔曼滤波方法（EKF）进行动态估计。该算法在保留线性卡尔曼滤波器的基础上，增加了非线性线性化和协方差约束机制，使状态估计更加贴近真实工况。

融合过程分为状态预测与结果更新两个阶段。预测阶段依据系统状态方程估算下一时刻状态；更新阶段结合实时观测进行偏差修正，其数学表达为：

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k(z_k - H_k \hat{x}_{k-1}) \quad (2)$$

其中， \hat{x}_k 为估计状态， z_k 为观测量， H_k 为观测矩阵， K_k 为卡尔曼增益。系统计算时，在每一循环期间，算法重新对所有传感器的观测信息加权修正，利用动态

可信度因子对权重加以修正。该模型具有抗干扰特性，对状态估计进行平滑，更能满足状态估计实时要求，为决策层及时提供调度和控制的指令依据。

2.4 数据融合精度控制与一致性维护机制

加强数据融合的准确处理是港口自动化系统稳定运行的重要保障。为提升数据融合的可信度，系统构建了动态精度控制和一致性保护机制。精度控制模块基于置信度评估模型，对各数据源的误差方差进行实时计算，并通过采用基于权重矩阵自适应修改的方法减弱误差累积带来的误差影响。残差检测单元在每个周期内比对融合结果与历史预测差值，如有超过阈值的边界则启动一个纠错环节，对状态估计和权重参数作出调整。

一致性维护机制重点确保不同来源的所有数据时间一致性和逻辑一致性。通过引入基于时间的滑动窗口算法来实现对数据输入顺序的协调、应用基于信息熵约束的技术来消除融合后数据的不确定性，实现多维的收敛稳定，同时引入轻量级的验证模块实现对关键任务数据进行跨项校验和平滑修整。实测表明，该机制可以将融合误差下降约 18%，同时将系统反应延时降低约 25%，支持港口装卸系统的错综复杂环境下的正确调度和稳定运行。

3 港口自动化装卸系统的实时控制技术

3.1 实时控制系统的架构与信息交互机制

港口自动化装卸系统的实时控制体系以感知层、决策层与执行层协同运行为核心，通过高速通信网络实现数据采集、命令传递与反馈处理的闭环控制。信息系统根据实时运行系统构造，利用高速数据采集系统进行信息采集、指令下达、意见反馈闭环操作。采用组合式的分散控制集中调度的控制系统结构设计。底层由现场控制单元（FCU）和传感器单元组成，主要是实时捕捉货物位置、设备情况及周边状态；中间层为调度服务器单元，主要负责对指令的解析、路径优化、工况安排；顶层为监控与控制单元，主要对工况状态进行可视化显示和安全监控。

通过工业以太网及 5G 专网的信息沟通架构同步完成控制指令与信息传递，各节点间通信采用消息队列远程通信传输协议（MQTT）异步通信实现，确保通信即便在大量同步开展任务的情况下也能拥有低通信延迟且高稳定性。具备双路备份通信与失败转移能力，可使某

节点断链时，控制执行的流程自动转换至其他路径，实现其工作不断链。通过相同接口规约及实时总线实现不同品牌产品跨品牌的控制统一管理。总体上实现了“分层互动、信息互通、指令闭环”高效的控制网络结构，为日后算法配置与调整提供稳定的实现基础。

3.2 实时控制算法的设计与执行流程

实时控制算法是实现自动化装卸作业稳定性和高效性的重要一环，由于港口作业包含了起重机、AGV 和轨道吊等多类设备，需要这些机器紧密协作才能完成任务。采用分布化的控制思想构建实时性算法结构，实现了对机器从微观层面上的控制自我治理，宏观层面上对任务的整体协同性处理，针对反应和稳定性两方面兼顾，数据驱动模型构建与控制参数的动态调整保证对任务进行稳定的长周期执行。

执行流程分为收集状况、决定实施、产生指示和反应反馈四个环节。传感单元持续采集机器的位置、姿态和载荷状况，汇总处理后传入管理中心；算法模块依据计划方案进行预估计算，推出航线调节和行动指导；执行层设备立即反应并发送现状数据，系统会对差值数据自动调整操作指导。这个循环过程确保工序之间交接平顺、速度管控稳定、能耗分配合理。实践表明，改进后的实时操控方式使作业反应时间缩短了 30%，产量增长了约 20%，大大改善了系统高密度作业场景下的作业稳定性。

3.3 动态调度与反馈控制策略实现

动态调度与反馈控制机制构成港口装卸系统实现柔性管理的核心。通常选择机器工作负载、物流方向和操作重要性作为评价指标形成全面性评价体系，实时监督各执行体的工作信息，当存在延误、故障、堵塞等异常现象时，立即对任务排序与资源配置等进行调整以完成工作流的自我调节。

反馈控制环节主要是通过多源信息实时反馈，了解机器情况及控制效果，由系统计算实际执行情况与设定目标状态偏差，然后纠正偏差，若偏差大于设定值时便启动调度纠正程序，调整控制参数。这样就实现了对港口生产的灵活调度，具有学习及应变能力。大量实验证明，采用动态反馈可使堆场车位利用率提升 18%，提升装卸待时率 25%，提升调度整体调度效率。

3.4 实时控制系统的稳定性与响应性能优化

港口自动化装卸系统运行质量的高低取决于系统的可靠性与响应性能。通过为整体装运控制系统增设多级缓存器以及优先级调度系统，以确保对控制过程中重要的指令作出快速响应。在通信网络层面上加入带宽分配及延迟补偿机制，以防范高峰期通信堵塞现象，确保信息传递流畅。控制决策采用分布式并行计算体系结构，将需要处理的任务分块形成多个节点任务以降低单一控制中心负荷。

在响应性能优化上，该系统采用自适应参数优化的方法实现对控制增益的动态优化。当运行过程或者外界环境发生改变时，控制器依据逆向误差信息自身更改控制系数，使得控制命令更加适应现场的需要。通过采用本地边界处理单元作为实时决策点，使由信息采集到发出命令平均的执行时间为 50ms 左右。该结构通过若干次试验验证，即使在非常复杂的运行场景下也可保证 98%以上的控制命令执行精度，并且有效减小了系统振荡。该体系的优化方案使得港口运行更加合理和稳定，并适应 24 小时持续运行条件下大流量的支撑。

4 结语

港口自动化装卸系统的核心在于实现数据融合与实时控制的高效协同。通过构建层次化管理层和智能调度决策方法以优化响应时间，实现系统在动态环境下的持续稳定可靠作业。数据融合技术提高了数据的完备性和可靠性，而在线操作能增强其灵活性、安全性。使工作形式从基于人力判断转向了智能化自主动作。该体系在降低装卸周期时间、装卸能耗、提高作业调度效果等方面表现出明显优势，为智慧港口建设提供了可推广的工程范式。

参考文献

- [1] 崔仕杰, 李九州, 杨立. 充填工作面捣实机构多源信息融合控制技术研究[J]. 煤矿机械, 2024, 45(12): 185-189.
- [2] 林杰, 王轲歆. 工业自动化仪表的数据融合与实时监测技术应用[J]. 消费电子, 2024(11): 239-241.
- [3] 郭文庆. 电网系统高效数据融合通信技术研究[J]. 电子通信与计算机科学, 2024, 6(4): 85-87.
- [4] 吴振宙, 李清亮, 林焕明, 等. 输气管道压气站控制系统融合与防喘解耦技术研究[J]. 石油和化工设备, 2022, 25(1): 34-36.
- [5] 王云. 自动化控制技术在矿井通风系统中的融合运用[J]. 矿业装备, 2024(9): 31-33.