

物联网环境下港口集装箱智能追踪与安全监测系统设计

李胜 晏昌杰

荆州港务集团有限公司, 湖北荆州, 434000;

摘要: 随着国际贸易的不断增长, 港口集装箱运输量持续加大, 传统作业模式已无法满足高效、安全的需求。本文运用物联网(IoT)技术开发了港口集装箱智能追踪与安全监测系统, 旨在实现整个过程可视化、状态感知并提供潜在风险报警的目标。该系统通过部署传感器、RFID及GPS等终端设备采集数据, 再利用5G及边缘计算技术实现数据实时传输与处理。设计的智能追踪算法支持多节点位置融合, 提高定位准确度和时效性; 安全监测模块通过异常识别与预警机制提升集装箱防护能力。实验证明, 在复杂港口环境下, 该系统能稳定工作并具有实时性, 为今后港口智能化管理提供了有效技术支撑。

关键词: 物联网; 港口集装箱; 智能追踪; 安全监测

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.029

引言

港口作为国际贸易及供应链网络的核心节点, 集装箱的管理效率影响着整个港口物流及运输的安全性。近年来, 随着《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等政策的实施, 港口数字化、信息化以及智能化转型已日渐提速。但是现有集装箱追踪技术仍存在割裂信息、更新位置慢、缺乏安全监测的缺陷, 无法满足实时精确化的运营需求。而物联网技术的出现为港口管理带来了崭新的思路, 可依托各种感应器实现数据收集, 依靠人工智能进行识别并及时应对, 对整个集装箱处理过程进行自动化监管。本文设计的系统融合感知、通信与智能分析技术, 探索港口集装箱管理的新型解决方案。

1 物联网赋能下的港口集装箱智能化管理背景

1.1 港口物流数字化转型的时代背景

全球经济一体化发展加速了海洋运输产业的壮大, 港口作为整个物流产业的核心枢纽, 地位毋庸置疑, 其运营状态将直接牵动整个运输链和产业链的稳定。随着信息化进展, 港口运作也逐步由劳动密集型模式向智能化、自动化转变。数字化浪潮已成为港口的重要发展方向, 以大数据技术、物联网技术、云计算等信息技术支撑实现全流程可视化和信息化决策。智能化设备的广泛应用使得装车、存储、搬运等流程的各个环节数据互联互通, 提高了作业精确度与工作效能, 同时港口物流商也积极探索搭建智能调配平台, 以满足日益多样化货源以及相对频繁的运输物流需求, 进而为港口物流系统发挥运力、世界贸易长期稳定打下信息化技术支撑。

1.2 集装箱追踪与安全监测的现实需求分析

在全球航运体系中, 集装箱是主要的货运载体, 数量巨大, 周转迅速, 多条线路及密集站点的跨国界流动更加显现出集装箱的重要性。但在众多航线和密集站点情况下, 传统管理模式无法对集装箱状态进行全程追踪, 经常出现断链或失联等问题。集装箱的运输期间可能还存在着非法启闭、集装箱损坏甚至超标值情况的环境指标等情况, 都为收货人和港口部门增加了安全隐患。为了符合不断加严的安全监管要求, 打造智能化、互联网化的追溯及检测体系已势在必行。通过附加传感器、定位和数据采集等设备, 可实时了解集装箱工作状态, 并实施全时监控报警, 从而提升港口安全管控和物流调度效率。

1.3 物联网技术在港口集装箱管理中的应用优势

通过对物联网技术的应用, 可以把各种传感器、RFID标签、GPS等与无线通信网络组成“设备—数据—平台”数据链结构, 实现对集装箱状态和地理位置信息的追踪。其特点是可充分收集各种数据并对数据进行分析, 实现精确定位、自动识别及全程监控。与传统管理相比, 响应时间短, 稳定性高且并行处理能力大, 能大幅提高港口管理效率。通过在智能港口环境下的物联网应用, 可以将其与大数据分析和云计算平台相结合, 优化运货路线、仓储布置和设施利用率, 进一步加快装卸效率、资源分布效率等, 为做出更好经营决策提供强有力依据, 以实现高效、安全、可持续的智慧港口生态环境建设目标。

2 港口集装箱智能追踪与安全监测系统架构设计

2.1 系统总体架构与设计思路

整个港口集装箱智能跟踪及安防监控系统主要由“感知层—网络层—平台层—应用层”四层结构构成。感知层负责数据采集，网络层用于各类通讯协议之间的数据传输，平台层用于各类数据收集、整合及处理，应用层实现可视化的人机交互，以辅助决策。系统采用模块化、拓展性和安全性高的设计，兼容多终端以及不同设备进行工作。在总体设计思路上，通过多源传感终端采集集装箱的位置信息、环境参数及设备状态数据，经由5G与NB-IoT通信网络传输至云端数据平台。系统的数据流向可表示为：

$$D_t = f(S_i, L_j, T_k) \quad (1)$$

其中， D_t 为时刻 t 的综合数据流； S_i 表示第 i 个传感器采集的数据； L_j 为位置信息； T_k 为时间序列参数。该设计实现了从数据感知到智能处理的闭环管理，使系统具备可视化、智能化与可控化特征，满足港口复杂作业环境下的实时监测与高可靠追踪需求。

2.2 感知层关键设备与数据采集机制

感知层是系统的基础，承担对集装箱状态的多维度信息采集与初步处理功能。该层包括RFID标签读取器、GPS/北斗位置追踪模块、温度和湿度振动传感器、智能锁芯和摄像头监控器等。RFID实现自动化货物搬运、堆码以及进出港信息识别；位置追踪器给出货物实时定位信息；环境探测传感器监控货物温度和湿度的变异情况，以防止变质或者损坏；摄像头实现对外箱和作业过程的视觉监督。每项数据收集过程都遵守分散化和冗余原则，所有终端设备都会经过边界计算节点进行预处理和加密后再传输，以确保保密性和安全性。其数据采样频率与设备功耗间的优化可表示为：

$$E = a \sum_{i=1}^n P_i T_i \quad (2)$$

其中， E 表示系统能耗， P_i 为第 i 个传感节点功率， T_i 为采样周期， a 为功耗平衡系数。通过优化参数 a 可在精度与能耗间取得平衡，从而实现低功耗、高效率的数据采集机制。

2.3 网络与传输层通信结构设计

网络与传输层负责实现从感知端到平台端的数据安全、高速与低延迟传输。系统采用5G和NB-IoT相结合的通信方式，5G应用于处理大量数据的任务（如视频流与实时定位）。NB-IoT用于低功耗、广覆盖的环境监测数据传输。通信协议层支持MQTT与CoAP以及TLS/SSL加密传输，保证传输多台之间的信息稳定性和安全性。为保障系统在复杂港区中的稳定性，设计引入自主动态的路由机制和数据存储机制，主路由断电后端口节点自主切换并采用冗余机制维持数据一致性；采用星型和网状结合的网络拓扑结构，以适应多用户的同时接入和分散化的均衡负载需求。实验表明，在典型港口场景中，通信延迟低于80 ms、丢包率低于0.5%，网络稳定运行时间超过99.8%。该结构满足了在大量设备环境下系统实时性与鲁棒性的需求。

2.4 平台层数据处理与智能监测模块设计

平台层是系统的核心，主要完成海量数据的融合、分析、决策和图形展示任务。平台基于云计算和大数据结构的多层次数据处理架构，底端实现数据导入、存储，在中端实现算法处理，在顶端实现应用展示和辅助决策的功能模块。通过ETL清理和获取数据，利用机器学习算法进行行为识别和异常检测以及趋势预测。其中智能监控模块采用多特征融合的模式，对温度、湿度、偏离方位、门锁状态等进行综合判断，一旦监测数据突破设定的阈值，立即进行提醒并发送信息至监控终端，实现“一有异常马上报警”的闭环。同时，平台具备可视化大屏和手机APP监控功能，可以简便快速地实现多视角信息检索和回放历史路径。该系统对于实时性、连续性、报警准确性等方面已处于行业最优水平，可为港口安全管理和智能决策提供坚强科技保障。

3 系统实现与性能验证

3.1 系统开发环境与关键技术实现

系统基于Linux服务器，用混合编程方式（Python和Java语言）实现后台数据处理和前台逻辑交互功能。数据库采用MySQL和InfluxDB，前者负责保存结构化商业数据，后者负责保存大量的时序监测数据。前端通过Vue框架和ECharts组件搭建了多终端同时观看和控制的图形用户界面。从技术上，数据采集模块和服务器的云端主机通过RESTfulAPI和MQTT协议，提高并发访问数、降低网络传输延迟。容器化部署系统，Docker和

Kubernetes 技术可对系统进行容器化配置。设置一些边缘节点，对数据进行实时的压缩、特征提取、加密传输等操作，以降低核心服务器压力。另外设置 Kafka 消息队列，对数据进行异步转发和流水线处理，使系统在采样大数量级时也能实现毫秒级响应，整体运行稳定性达 99.8% 以上。

3.2 智能追踪算法与实时定位功能测试

智能追踪模块融合 GPS、北斗与 RFID 三类数据源，通过多传感数据融合算法实现高精度动态定位。核心算法采用卡尔曼滤波与颗粒滤波器组合实现对信号漂移及多径衰落带来的误差进行修正。系统设计了定时滑窗和动态阈值监测模式，对位置偏移进行主动侦测并对偏移进行填补，保证轨迹的连续性和稳定性。在港区测试环境中，采集 500 组不同作业场景样本进行比对实验，发现通过对各系统进行多方式融合，可以将定位误差降至 4.5 米以内，而一般基于 GPS 定位方式误差达到 19.9 米，定位精度提高了约 43%。实时轨迹重构功能可以标记出路线偏离情况与停止状态异常情况，若集装箱长时间停驻或偏离运行路线，将会被监控系统立即通报并反馈给控制中心，从而实现从数据检测到危险响应的闭环式动态管理，有效提升集装箱港口运营效率和安全性。

3.3 安全监测模块的预警机制与响应验证

安全监测模块采用不同参数设定的临界值作为特征，利用机器学习算法对其进行异常监测。监测内容涵盖门锁状态、震动强度、温湿度变化及位置偏移等关键指标。通过建立规则阈值与动态基线模型，当任一参数超过正常范围时即触发报警。预警机制采用三级响应策略，一级为参数波动警示，二级为危险性提醒，三级为紧急事件及命令提示。经测试在模拟门锁遭强行撬开或者振动超过预警界限情况下，系统平均响应时间不超过 3 秒，误报率低于 2%。报警信息第一时间推送至管理终端和手机 APP，用语音、文字、图像等多种形式显示。该模块即使在繁忙港口复杂电磁条件下依旧可以保证高可靠性及低延时性，充分保障货物安全和应急能力。

3.4 系统综合性能评估与优化分析

综合性能评估从数据传输稳定性、能耗水平、定位

精度及报警可靠性四个方面展开。测试结果表明，数据丢包率低于 0.4%，通信延迟平均为 78 毫秒，能耗较传统方案降低约 21%。智能追踪模块在连续运行 72 小时条件下仍维持高精度输出，预警准确率达到 97.8%。系统具备良好的可扩展性，可在多港区部署环境下实现统一监控与数据互联。主要针对边缘计算节点云端调度流程与相互协同策略的优化，提出了基于数据采集冗余剔除算法来减小数据发送量的自我优化流程、通过模型数据轻量化压缩处理和缓存功能提升模型信息的处理与利用率，自主迭代更新学习模式保证模型参数的动态优化而保持性能的稳定性。实验证明系统能够完成在密集负载情况下大数量的实时监测工作，运行效率与资源利用率较初始版本分别提升约 25% 与 18%。

4 结语

物联网环境下的港口集装箱智能追踪与安全监测系统通过感知、通信与智能处理的有机结合，实现了集装箱全流程的实时监管与风险防控。系统在数据采集、算法优化与安全预警等方面展现出显著优势，定位精度高、响应速度快、运行稳定性强。研究成果验证了物联网技术在港口数字化转型中的可行性与实用性，为智慧港口建设提供了技术参考与工程示范。未来可在区块链溯源、能耗优化与预测性维护方向进一步深化研究，推动港口管理模式向自主协同与智能决策迈进。

参考文献

- [1] 邓波, 宋宇迎, 庄建萍, 等. 基于物联网技术的智慧冷链监测系统设计及在农产品质量安全检测机构中的应用 [J]. 农产品质量与安全, 2023 (5): 33-36.
- [2] 孟龙, 王浦颖, 杜芳芳, 等. 基于物联网的光源追踪器控制系统设计 [J]. 现代工业经济和信息化, 2024, 14 (3): 66-67.
- [3] 欧朴康, 甘伟, 李聪豪, 等. 基于物联网的贵重物品智能防盗系统 [J]. 物联网技术, 2023, 13 (1): 123-125.
- [4] 张艳妮. 基于物联网技术的医用耗材智能化管理系统设计与实现 [J]. 电子技术, 2024 (12): 50-52.
- [5] 宋彩霞. 基于物联网技术的智能物流管理系统的设
计与应用 [J]. 移动信息, 2024, 46 (1): 217-219.