

· 信息技术 ·



罗泾自动化集装箱码头水平运输 管控系统创新方案研究

胡 坚¹, 赵广申², 乔润青³

(1. 上海国际港务(集团)股份有限公司工程建设指挥部, 上海 200080;

2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 3. 哪吒智慧科技(上海)股份有限公司, 上海 200082)

摘要: 针对港口码头在水平运输中存在的效率低、调度智能化不足及系统兼容性差等问题, 开展面向智慧港口的水平运输管控系统研发, 构建具备智能调度、自主决策能力并兼容多数据库平台的高效调度体系。在国家政策引导及行业数字化转型需求驱动下, 提出“车—路—云—网”协同架构, 推动运输作业提质增效。通过标准化数据模型设计、地图数据本地化处理、调度与路径优化算法开发及数据库无关性适配, 解决了数据交互、平台兼容和调度效率等关键技术难题, 形成了基于实时状态的动态路径规划算法、融合多约束的调度优化模型及面向 FMS 系统的数据接口方案。实际应用显示, 该方案可有效提升作业效率、降低运营成本, 具备良好的智能化、模块化与可扩展特性, 形成了可复制、可推广的技术路径, 对加速港口自动化与智能化升级、提升港口企业国际竞争力具有重要意义。

关键词: 水平运输; 智能调度; 路径规划; 高精地图

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0189-07

Innovative solutions for horizontal transportation control system of Luojing automated container terminal

HU Jian¹, ZHAO Guangshen², QIAO Runqing³

(1. Engineering Construction Headquarters of Shanghai International Port (Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

3. Nezha Intelligent Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: To address issues such as low efficiency, insufficient intelligent scheduling, and poor system compatibility in horizontal transportation at port terminals, a horizontal transportation management system is developed for smart port operations, aiming to establish an efficient scheduling framework with intelligent dispatching, autonomous decision-making, and multi-database compatibility. Driven by national policies and the urgent need for digital transformation in the port industry, a collaborative architecture of “vehicle-road-cloud-network” is proposed to enhance operational quality and efficiency. Key technical challenges in data interaction, platform compatibility, and scheduling performance are solved through standardized data model design, localized map data processing, development of optimized scheduling and routing algorithms, and database-independent adaptation. The system integrates real-time dynamic routing algorithms, multi-constraint scheduling models, and FMS compatible data interfaces. Practical application demonstrates that this solution can effectively improve operational efficiency and reduce operating costs. With strong intelligence, modularity, and scalability, the system provides a replicable and promotable technological path that supports the automation and intelligent upgrading of ports and enhances the international competitiveness of port enterprises.

Keywords: horizontal transportation; intelligent scheduling; route planning; high-precision map

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 胡坚(1979—), 男, 高级工程师, 从事港口信息化建设及研究工作。

在交通运输领域，港口码头作为关键物流枢纽的重要性日益凸显。国家政策积极引导行业发展，于 2019 年先后出台《交通强国建设纲要》及《关于建设世界一流港口的指导意见》，强调了装备技术升级、自主创新与集成创新，尤其针对自动化码头操作系统及港作机械关键技术研发与推广应用提出明确任务，为港口行业智能化发展指明方向。同时，随着数据安全受到重视，2022 年《数据安全法》施行，同年《“十四五”国家信息化发展规划》发布，均对港口数字化建设作出部署，包括推进物流信息化、智能化建设及信息安全保障等，这一系列政策法规为港口行业的信息化、智能化转型提供了有力支撑，也为水平运输管控系统（horizontal transportation management system, HTMS）的研究开发营造了良好政策环境。

本文重点研究罗泾自动化集装箱码头 HTMS 系统的开发策略和主要技术路线，实现数据库无关性，增强系统灵活性、扩展性与可移植性，降低维护成本；打造智能调度体系，利用数据分析和算法优化实现车辆与任务智能匹配，提升载运资源使用效率；达成地图数据本地化部署与精准路径规划，依据多种因素确定最优路径，提高运输可靠性与准时性；提升企业核心竞争力，以先进产品和自主研发能力拓展市场份额，保障企业持续发展。

1 数据模型标准制定

1.1 数据需求分析

通过深入调研罗泾自动化集装箱码头水平运输业务流程，梳理 HTMS 与车商的车队管理平台（fleet management system, FMS）之间的数据交互场景，见图 1，包括任务下达、车辆状态反馈、运输轨迹上传等环节的数据流向和类型，确定所需传输的数据元素及其格式要求。

分析不同车商 FMS 系统的差异，找出共性与个性数据需求，为制定通用且兼容的数据模型^[1]标准奠定基础。

1.2 模型设计与规范制定

设计 HTMS 与 FMS 之间交互的指令数据模型，

涵盖任务指令类型（集装箱装卸任务、运输路线规划等）、任务参数（集装箱编号、质量、尺寸、目标地点等）以及指令执行时间要求等内容。

制定 FMS 反馈给 HTMS 的车辆状态数据模型，包含车辆位置信息（经纬度、海拔高度等）、速度、行驶方向、载货状态、车辆故障代码等数据项，确保 HTMS 能够实时准确掌握车辆运行情况。

规定数据传输的频率、方式（同步/异步传输）以及数据校验规则，保证数据交互的准确性和可靠性。建立数据字典，对模型中的每个数据元素进行定义和解释，便于系统开发和维护人员理解与使用。

1.3 水平运输智能调度体系

HTMS 通过智能调度模块对车辆的调度进行优化，以最小化车辆的等待时间，从而提高车辆的使用率。系统采用贪心算法、动态规划等多种车辆调度算法，以适应不同作业场景的车辆调度需求。建立路径规划的智能算法，考虑多种因素综合评估车辆路线，支持动态调整路径。实时进行大量的数据处理和复杂的计算任务，以提高路径规划的准确性和高效性。借助车辆精准对位系统（chassis positioning system, CPS）引导、车辆进场确认等功能实现车机协同，可提前调度机械为在途的车辆执行准备工作，在车辆到达后协同校准对位，确保作业顺畅。



图 1 自动化码头管控系统架构

Fig. 1 Architecture of automated terminal management and control system

2 地图数据储存、分析设计

2.1 地图数据采集与整理

运用多种地理信息采集技术(如卫星遥感、地面测绘等)获取港口码头及周边区域的高精度地图数据,包括地形地貌、道路网络、建筑物分布、码头泊位布局等信息^[2]。

对采集到的原始地图数据进行清洗、转换和整合,去除噪声数据和冗余信息,将不同格式的数据统一转换为适合系统处理的格式,构建基础地图数据库,地图数据的可视化效果见图 2。

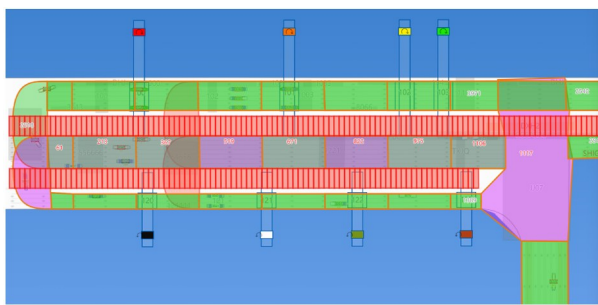


图 2 HTMS 分析服务功能界面

Fig. 2 HTMS analysis service function interface

2.2 本地化储存架构设计

设计地图数据的本地化储存架构,选择合适的数据库管理系统(如空间数据库)来存储地图数据,利用其空间数据存储和查询功能,提高地图数据的管理效率。

建立数据更新机制,确保地图数据能够及时反映港口区域内的基础设施变化(新道路建设、码头扩建等)以及实时交通状况(道路拥堵、施工路段等),保持数据的时效性和准确性。

2.3 分析服务功能开发

各区域支持配置可用性,系统根据时间矩阵计算路径权重,可通过自定义配置权重的方式干预路径规划决策。基于区域概念,HTMS 地图区分了岸桥作业区域、箱区作业区域、岸线行车区域、引桥、主干路、交叉路口。地图基于区域划分进行精细的时间矩阵初始化,路径规划基于时间矩阵来计算车辆的行驶路径。

基于本地化地图数据,开发路径规划服务。根据车辆起始位置和目标地点,结合道路网络和

实时交通信息,利用 A* 等最优路径算法为车辆规划合理的行驶路线,考虑因素包括行驶距离、预计时长、道路通行能力、限高限重、交通规则等。

系统另外实现了虚拟地理围栏设置与监控功能,可根据港口作业区域划分和安全管理要求,设置虚拟地理围栏。当车辆进出围栏区域时,系统能够自动触发预警信息,实时监控车辆是否在规定作业范围内行驶,保障作业安全和区域管理秩序。

3 水平运输调度算法研发

3.1 作业场景建模与分析

对港口码头水平运输的不同作业场景进行分类和建模^[3],如集装箱装卸船作业、堆场内部转堆作业、拆装锁钮、转堆等运输作业。分析每个场景下的车辆行驶路径、任务执行顺序、资源分配要求等特点,确定影响调度决策的关键因素。

建立车辆运行状态模型,考虑车辆在行驶过程中的速度变化、耗电情况、维修保养周期等因素,模拟车辆在不同任务负载和道路条件下的运行性能,精调时间矩阵,为调度算法提供准确的车辆性能参数。

3.2 调度算法设计与优化

结合作业场景和车辆状态模型,设计水平运输调度算法。算法以最小化车辆总行驶里程、减少任务等待时间、提高车辆利用率为目标,实现任务与车辆的智能匹配和动态调度。

针对算法的性能进行优化,通过大量模拟数据和实际业务数据进行测试,调整算法参数,改进算法结构,提高算法在大规模数据和复杂作业环境下的计算效率和求解质量^[4]。

3.3 实时调度与动态调整

建立算法的实时调度机制,使系统能够根据车辆实时位置、任务执行进度、新任务到达等动态信息,及时调整车辆的任务分配和行驶路线^[5]。当出现突发情况(如车辆故障、道路堵塞等)时,算法能够快速响应,重新规划任务调度方案,确

保运输作业的连续性和高效性。针对电量低于阈值的作业车辆,在合适的时机选择合适的换电站进行换电作业^[6]。

4 路径规划算法研发

4.1 多源数据融合与分析

整合本地化地图数据、实时交通数据、车辆

性能数据及历史运输数据等多源信息,建立全面的路径规划数据模型,见图3。模型支持每条车道的行驶方向设定,并在码头的各类作业交互位置均设置关键点,便于全局的交通流向管理与作业控制。分析不同数据源的数据特点和可靠性,制定数据融合策略,将多源数据融合为统一的路径规划决策依据。

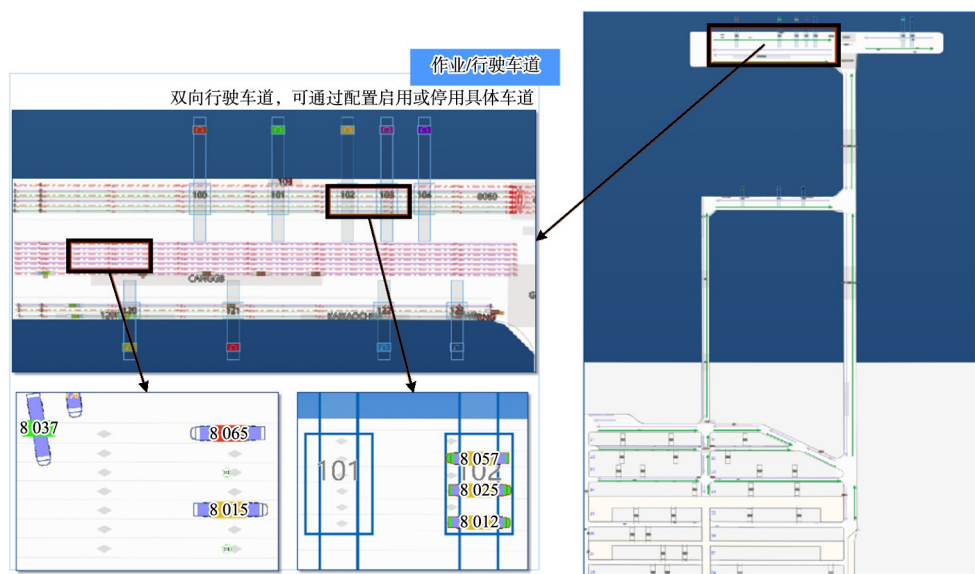


图3 HTMS 路径分析界面
Fig. 3 HTMS path analysis interface

对每条车道设置其可用性及通行方向,桥吊下方的车道可设置为通行车道/作业车道,高速路车道可设置为通行车道/等待车道。每条等待车道均会分配一定数量的等待位,桥吊下方的作业车道可以根据桥吊的实时位置,实时调整等待位的数量和位置。这些岸线上的车道数据支撑了车辆在上档过程中的通行先后顺序,以及拥挤时排队等待的队列布局等系统功能,在路径规划的计算过程中会发挥重要作用。

从历史运输数据中挖掘车辆在不同时间段、不同道路条件下的行驶规律和性能表现,如平均行驶速度、耗电量变化等,为路径规划提供经验性参考,提高路径规划的合理性和准确性。

4.2 路径规划算法构建

基于多源数据融合模型,构建路径规划算法。算法综合考虑道路通行状况(拥堵程度、禁行区

等)、交通规则(限速、限行等)、车辆行驶特性(转弯半径、最大通行速度等)以及运输任务要求(时间窗口、锁钮作业、箱门方向等),计算出从车辆当前位置到目标地点的近似最优行驶路径。

采用分段路径规划策略,先在宏观层面规划出大致的行驶路线(如选择主要道路和交通枢纽),再在微观层面根据实时交通信息和道路细节按照作业阶段实时分段规划(如避开拥堵路段、选择合适的路口转弯或掉头等),提高路径规划的效率和实时性。

4.3 动态路径调整与适应性优化

实现路径规划算法的动态调整功能,当车辆行驶过程中遇到交通状况变化(如突发拥堵)或接收到新的任务指令时,系统能够实时重新计算路径,引导车辆避开不利路段,选择新的最优行驶路线。

建立算法的适应性优化机制, 根据车辆实际行驶轨迹和运输任务完成情况, 对路径规划算法进行反馈调整。不断基于港口作业环境的变化进行适配优化, 提高算法在不同情况下路径规划的灵活性与合理性, 确保车辆始终能够高效、安全地完成转运任务。

5 数据库无关性 SQL 适配

5.1 数据库系统调研与分析

广泛研究市场上主流的数据库管理系统, 分析其 SQL(structured query language, 结构化查询语言) 语法特点、数据存储结构、事务处理机制、性能优化策略等方面的差异, 建立数据库特性对比矩阵。

评估不同数据库系统在港口水平运输管控系统中的适用性, 考虑因素包括数据处理规模、并

发访问性能、数据一致性要求、系统扩展需求以及成本效益等, 为后续的 SQL 适配工作提供决策依据。

5.2 通用 SQL 适配层设计

设计通用的 SQL 适配层架构, 采用抽象工厂模式、接口设计等面向对象设计方法, 将与数据库相关的操作封装在适配层内部^[7]。通过适配层提供统一的数据库访问接口, 使上层应用程序能够以一致的方式与不同数据库系统进行交互, 而无需关心底层数据库具体实现细节。

为实现数据库无关性, 项目提出改造目标, 如在适配层内部实现 SQL 语句的标准化, 使用上层应用程序发送的标准 SQL 语句执行的本地 SQL 语句。同时, 针对不同数据库的性能特点, 对 SQL 语句进行优化处理(如索引优化、查询语句重写等), 提高数据访问效率, 见表 1。

表 1 数据库改造目标
Fig. 1 Database transformation goals

改造思路	执行方式
总体原则	数据库只作为数据存储工具, 尽量减少使用数据库其他功能, 提高系统对各家数据库厂商的兼容性; 使用视图、存储过程、函数、触发器等非必要不使用
SQL 标准化	基于 Oracle 数据库开发, 使用大量的 Oracle 的数据库特性的 SQL 语句, 旧模块改造和新模块开发过程中将全部采用符合 ANSI SQL 标准的 SQL 语句, 禁止使用数据库厂商私有特性的 SQL 语句
避免多表连接	数据层查询数据或者视图中避免多表连接查询, 改为单表多次查询后合并数据, 提高数据库兼容性和数据库性能
程序代码替代	不能采用数据库的存储过程、函数、触发器实现业务功能, 是新系统开发的一个原则, 旧系统中已经存在的存储过程、函数、触发器实现的逻辑改用程序代码实现
取消悲观锁	为了保证数据的一致性, 系统数据库操作采用了 FOR UPDATE NOWAIT 悲观锁机制, 但这种机制只适用于 Oracle 数据库。在开发中采用基于版本戳的乐观锁替换悲观锁
DAL 层	某些无法避免的、与数据库有关的功能, 开发中在服务层和数据层增加 DAL 层, 不同的数据库采用不同的数据层实现, 服务层用统一的方法调用数据接口
主键管理	采用基于 Snowflake 算法实现分布式高效生成有序序列号的方式, 替代基于与数据库相关的 sequence 主键生成方式。目前新开发功能模块和与外部系统无关的表主键都采用代码生成的方式
公共函数	某些公共功能在不同的数据库中有不同的实现, 为了增加数据库兼容性, 保持数据层数据库 SQL 语句的一致, 在数据库中适度创建一定数量的公共函数。公共函数功能需要在不同数据库中创建, 并且与数据库特性密切相关, 故应严格控制公共函数的数量

5.3 数据库连接管理与事务处理

建立高效的数据库连接管理机制, 实现数据库连接的池化管理^[8]。在系统启动时预先创建一定数量的数据库连接并放入连接池中, 当应用程序需要访问数据库时, 从连接池中获取可用连接,

使用完毕后将连接归还池中, 避免频繁创建和销毁数据库连接带来的性能开销。

处理数据库事务的一致性和隔离性问题, 在适配层中实现事务管理功能, 确保在多用户并发访问和复杂业务操作的情况下, 数据库事务能够

正确执行,数据的完整性和一致性得到有效保障。例如采用两阶段提交协议处理分布式事务,保证跨多个数据库操作的原子性和一致性^[9]。

6 主要创新

6.1 智能调度与路径规划算法创新

6.1.1 多因素融合的动态调度算法

综合考虑复杂因素:在水平运输调度算法中,创新性地融合了车辆实时状态(位置、速度、载货情况等)、任务优先级、港口作业流程特点以及交通实时状况等多方面因素^[10]。这种全面的考量打破了传统调度算法仅关注单一或少数因素的局限,使得调度决策更加贴合实际作业需求。如在任务分配时,不仅考虑车辆当前是否空闲,还结合车辆到任务起点的预计时间(基于实时交通信息)以及任务的紧急程度,确保高优先级任务能够及时得到处理,同时优化整体运输效率。

动态适应性调整:算法具备实时动态调整能力,当车辆出现故障、道路突然拥堵或新的紧急任务加入时,系统可以迅速重新规划任务分配和车辆行驶路线,最大限度减少对整体作业计划的影响。通过持续监测和分析实时数据,算法不断优化调度策略,适应港口作业环境的动态变化,有效提高了系统的鲁棒性和可靠性。

6.1.2 高精度实时路径规划算法

多源数据实时融合:路径规划算法创新性地整合了本地化高精度地图数据、来自多种传感器(如车载雷达、车载摄像头、车载GPS等)的实时交通数据^[11]、车辆性能参数以及历史运输大数据。通过先进的数据融合技术,系统能够实时获取最准确的路况信息,如精确到路段级别的道路拥堵程度及影响范围等,并结合车辆自身特性(如转弯半径、爬坡能力等),为每辆车规划出最适合的行驶路径。

动态路径优化与预测:在车辆行驶过程中,算法根据实时更新的交通数据和车辆位置信息,持续对路径进行优化调整。同时,利用时间矩阵和实时路况趋势进行分析预测,提前为车辆规划避开潜在拥堵区域的路线。如在高峰期根据历史交通流量模式预测拥堵路段,并提前引导车辆选

择替代路线,显著提高了路径规划的准确性和时效性,减少了运输时间和成本。

6.2 数据库无关性技术创新

6.2.1 通用SQL适配层架构设计

抽象与封装实现跨数据库兼容:设计了独特的通用SQL适配层架构,采用面向对象的抽象工厂模式和接口设计理念,将与特定数据库相关的操作进行高度抽象和封装。上层应用程序只需与适配层提供的统一接口进行交互,而无需关心底层数据库的具体实现细节。这种设计使得系统能够轻松切换不同的数据库管理系统,仅需在适配层进行简单配置,而无需对应用程序的核心业务逻辑进行大规模修改,极大提高了系统的灵活性和可移植性。

SQL语句转换与优化:适配层具备强大的SQL语句动态转换和优化功能。它能够根据目标数据库的语法规则和性能特点,自动将上层应用发送的标准SQL语句转换为适用于特定数据库的本地SQL语句。同时,针对不同数据库的索引结构、查询优化器等特性,对SQL语句进行智能优化,如自动添加合适的索引、调整查询执行计划等,确保在不同数据库环境下均可实现高效的数据访问和操作,提升了系统的整体性能。

6.2.2 灵活的数据库连接管理与事务处理

高效的连接池技术应用:引入先进的数据库连接池管理机制,在系统启动时预先创建一定数量的数据库连接并放入连接池中。当应用程序需要访问数据库时,从连接池中获取可用连接,使用完毕后立即归还,避免了频繁创建和销毁数据库连接所带来的性能开销。这种连接池技术有效提高了数据库连接的复用率,大大缩短了数据库操作的响应时间,尤其在高并发访问场景下,可以显著提升系统的吞吐量和稳定性。

可靠的事务处理保障数据一致性:在数据库无关性的架构下,实现了可靠的事务处理机制。通过适配层统一管理事务的开启、提交和回滚操作,确保在多用户并发访问和复杂业务逻辑涉及多个数据库操作时,事务能够正确执行,数据的完整性和一致性得到严格保障。如在处理涉及多个表的插入或更新操作时,即使跨越不同的数据库,

也能保证所有操作全部成功提交,或在出现异常时全部回滚,有效防止数据不一致问题的发生。

7 结语

1) 构建了面向智慧港口的水平运输管控系统,系统具备智能调度、自主决策与数据库无关联性等核心能力,显著提升了港口运输作业的效率与灵活性。

2) 提出并实现了基于实时状态信息的智能调度算法和高精度路径规划机制,融合多源数据动态优化路径,有效降低运营成本、提高作业响应速度。

3) 制定了 HTMS 与多种 FMS 系统兼容的数据模型和接口标准,提升了系统集成度与通用性。

4) 设计了本地化地图数据架构与分析服务体系,实现了作业区域精准建模与路径计算,为高密度调度提供支撑。

5) 完成了数据库无关适配层的开发,支持跨平台部署,增强了系统的可移植性和可维护性。

6) 研究成果已在罗泾自动化集装箱码头成功应用,具备良好的复制推广前景,为我国港口自动化与智能化水平提升提供了坚实支撑与实践样本。

参考文献:

- [1] 蔡迅华,李明懋.一种 AGV 调度控制系统软件的数据模型[J].信息技术与信息化,2021(9):20-22.
CAI X H, LI M M. A data model of AGV dispatching control system software [J]. Information technology and informatization, 2021(9): 20-22.
- [2] KHAJEH F, SHAHBANDARZADEH H. Modeling factors affecting the interests of the container terminal using fuzzy cognitive map and fuzzy DEMATEL [J]. Journal of modelling in management, 2023, 18(5): 1364-1388.
- [3] LIU C I, JULA H, IOANNOU P A. Design, simulation, and evaluation of automated container terminals[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2002, 3(1): 12-26.
- [4] 朱瑾,黄琦.路网资源分配下自动化码头水平运输调度与路径规划[J].吉林大学学报(工学版),2024,54(8): 2245-2255.
ZHU J, HUANG Q. Automated terminal horizontal transportation scheduling and route planning under network resource allocation[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2024, 54 (8): 2245-2255.
- [5] 赵雅楠.码头外集卡运输需求时空预测与实时指派研究[D].大连:大连海事大学,2024.
ZHAO Y N. Spatio-temporal prediction and real-time assignment study of transportation demand for external container trucks[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2024.
- [6] 姜桥.自动化集装箱码头水平运输设备能源补充方式及应用[J].水运工程,2025(3):15-21.
JIANG Q. Energy supplement methods and applications for horizontal transportation equipment in automated container terminals[J]. Port & waterway engineering, 2025 (3): 15-21.
- [7] 陈莲.SaaS 系统动态业务逻辑与数据库解耦机制的设计与实现[D].北京:北京邮电大学,2016.
CHEN L. Design and implementation of a mechanism that decouples dynamic service logics and databases based on SaaS [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [8] 师伟,王向辉,林茂春,等.面向大规模集群作业并发规模的数据库连接池优化技术[J].物探化探计算技术,2024,46(2):235-241.
SHI W, WANG X H, LIN M C, et al. Application of database pool technology for job concurrent scale in large-scale cluster environment [J]. Computing techniques for geophysical and geochemical exploration, 2024, 46 (2): 235-241.
- [9] CUI Z Y, DOU W S, GAO Y, et al. Understanding transaction bugs in database systems [C]//2024 IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering. Lisbon: [s. n.], 2024: 2008-2020.
- [10] 张孟真.考虑故障的自动化集装箱码头 AGV 动态调度优化[D].大连:大连海事大学,2023.
ZHANG M Z. Dynamic scheduling optimization of AGVs in automated container terminals considering faults [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [11] 叶增健,李玲,郑敬发.基于 GPS 的集装箱码头集卡场内作业路径规划[J].物流科技,2023,46(24):85-88.
YE Z J, LI L, ZHENG J F. Planning of operation path in the container terminal yard based on GPS [J]. Logistics sci-tech, 2023, 46(24): 85-88.

(本文编辑 王传瑜)