

兰州理工大学

硕士论文

兰州理工大学图书馆

学校代号 10731

学 号 213125100155

分 类 号 C931

密 级 公开



兰州理工大学
LANZHOU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

工商管理硕士学位论文

基于机器学习的宁波梅东集 装箱码头调度优化研究

学位申请人姓名 郑宇翔

培 养 单 位 MBA 教育中心

导师姓名及职称 何卫平 教授

学 科 专 业 工商管理硕士 (MBA)

研 究 方 向 运营管理

论文提交日期 2023 年 10 月 1 日

学校代号: 10731

学 号: 213125100155

密 级: 公开

兰州理工大学工商管理硕士学位论文

基于机器学习的宁波梅东集装箱码头 调度优化研究

学位申请人姓名: 郑宇翔

导师姓名及职称: 何卫平 教授

培 养 单 位: MBA 教育中心

专 业 名 称: 工商管理硕士 (MBA)

论文提交日期: 2023 年 10 月 1 日

论文答辩日期: 2023 年 12 月 2 日

答辩委员会主席: 柳江

Research on scheduling optimization of Ningbo Meidong Container

Terminal based on machine learning

by

ZHENG Yuxiang

B.E.(Shanghai Maritime University) 2009

A thesis submitted in partial satisfaction of

the

Requirements for the degree of

Master of Business Administration(MBA)

in the

Graduate School

of

Lanzhou University of Technology

Supervisor

Professor WeipingHe

October, 2023

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和研究意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外相关研究现状.....	2
1.2.1 关于码头作业数据和作业瓶颈分析的相关研究	2
1.2.2 关于码头效率优化解决方案的相关研究	4
1.2.3 关于码头作业管理调度系统的相关研究	5
1.2.4 关于机器学习应用于码头的相关研究	5
1.2.5 对现有文献的评述.....	7
1.3 研究内容、方法和路线.....	7
1.3.1 研究内容.....	7
1.3.2 研究方法.....	8
1.3.3 技术路线.....	8
第 2 章 相关基本理论及概念	10
2.1 集装箱码头作业调度策略	10
2.1.1 进出口作业调度流程.....	10
2.1.2 装卸作业设备资源分配.....	11
2.1.3 平面运输调度策略.....	12
2.2 码头运营统计分析.....	12
2.3 机器学习算法概述.....	13
2.3.1 机器学习基本原理.....	13
2.3.2 机器学习在集装箱调度的应用.....	14
2.4 作业计划管理方法概述.....	15
第 3 章 梅东集装箱码头调度现状及问题分析	17
3.1 梅东集装箱码头调度现状	17
3.2 梅东集装箱码头运营数据分析	19
3.2.1 作业效率关键影响指标相关性检验.....	19
3.2.2 资源投入数量与设备效率关系分析.....	20
3.3 调度策略存在的主要问题与成因分析	20
3.3.1 设备配合衔接问题及成因分析.....	20
3.3.2 资源分配问题及成因分析.....	21
3.4 本章小结.....	22
第 4 章 机器学习模型设计与集装箱码头调度优化	23

4.1 机器学习可行性分析.....	23
4.1.1 数据收集.....	23
4.1.2 相关性检验.....	23
4.2 基于机器学习改进调度策略的优化目标	24
4.3 机器学习模型设计框架与思路	25
4.4 机器学习调度优化策略.....	28
4.4.1 调度策略整体架构.....	29
4.4.2 机器学习算法在码头调度中的应用设计	31
4.4.3 改进的调度算法应用案例解析.....	32
4.5 本章小结.....	34
第5章 码头作业调度优化策略实施保障措施	35
5.1 信息系统升级与算法应用	35
5.1.1 相关信息系统接口改造.....	35
5.1.2 系统的软硬件需求.....	35
5.1.3 数据库设计.....	35
5.2 仿真测试与效果验证.....	36
5.3 码头经营管理保障.....	37
5.3.1 构建智慧化管理体系.....	37
5.3.2 建设复合型人才团队.....	38
5.3.3 加强与外部优质资源的合作交流.....	38
5.3.4 建立持续学习和创新的机制.....	39
5.3.5 强化码头与航运链上下游的协同联动	39
结论与展望.....	41
参考文献.....	42
附录 B 附件.....	45

摘 要

在当今全球经济一体化和互联网经济时代，港口的现代信息化技术的应用能力和智能化水平，在一定意义上体现了一个国家的科学技术发展水平与现代物流的进步程度，也决定了港口的可持续发展能力和在国际市场中的竞争地位。近年来，我国发布了《交通强国建设纲要》、《关于建设世界一流港口的指导意见》等多份指导文件，对港口行业的自动化、数字化、智慧化建设发展提出明确要求。宁波梅东集装箱码头作为宁波舟山港的核心港区，已完成了装卸运输的自动化建设，但在设备综合调度方面还主要依赖人工调度，随着码头的发展人工调度已难以满足码头超大规模精准化的调度需求，设备利用率低不高、设备资源分配不合理、作业安排不均衡等都是亟需智能化手段解决的问题。

本研究旨在应用机器学习等方法，以梅东集装箱码头为研究对象，开展集装箱码头调度优化相关研究，主要研究方法、步骤和结论如下：（1）定位了码头运营瓶颈，并验证了瓶颈与各影响因素间的相关性。通过现场调研和定性分析，发现码头生产环节的衔接不流畅在时间上导致设备利用率低、设备作业资源分配不合理、任务分配不均衡等是限制码头效率的主要瓶颈，确定了设备路程到达时间和作业设备资源投入两个机器学习在码头应用场景的切入点。（2）设计了集装箱码头大数据处理和机器学习的流程框架。基于 `pyspark` 大数据架构设计了数据清洗、降噪、特征工程、模型训练到模型调用的分布式流程框架，实现了数据到模型的全过程自动化，通过应用随机森林算法实现了 90% 的调度衔接时间预测精度。（3）改进了码头调度流程框架。基于集卡设备路程时间机器学习模型，对码头调度流程框架进行改进，基于作业设备资源投入机器学习模型，对码头资源分配进行改进，降低了设备间衔接的等待时间，提升了设备的利用效率。

本研究设计了集装箱码头调度机器学习模型，经过仿真验证得出本文所设计的机器学习模型算法可使得梅东集装箱码头装卸效率提高 10% 以上，有效解决了设备利用率低、设备资源和生产任务分配不均等问题，提升了调度的精准性和合理性，对国内外集装箱码头的调度优化具有较高的借鉴意义。

关键词：梅东集装箱码头；机器学习；设备相互等待；生产调度；流程优化

Abstract

In today's era of global economic integration and Internet economy, the application ability and intelligence level of modern information technology of the port reflect the level of scientific and technological development of a country and the progress of modern logistics in a certain sense, and also determine the sustainable development ability of the port and its competitive position in the international market. In recent years, China has issued a number of guiding documents such as the Outline for the Construction of a Transportation Power and the Guiding Opinions on Building a World-class Port, which put forward clear requirements for the automation, digitalization and intelligent construction and development of the port industry. As the core port area of Ningbo Zhoushan Port, Ningbo Meidong Container Terminal has completed the automation construction of loading and unloading transportation, but it still mainly relies on manual scheduling in terms of comprehensive equipment dispatch. With the development of the terminal, manual dispatch has been unable to meet the ultra-large-scale precision of the terminal. The low utilization rate of equipment, unreasonable allocation of equipment resources, and uneven arrangement of operations are all problems that urgently need intelligent solutions.

The main research methods, steps and conclusions are as follows: (1) Locate the terminal operation bottleneck and verify the correlation between the bottleneck and various influencing factors. Through on-site investigation and qualitative analysis, it is found that the unsmooth connection of terminal production links leads to low equipment utilization, unreasonable allocation of equipment operation resources, and unbalanced task allocation in time, which are the main bottlenecks limiting the efficiency of the terminal. The equipment journey, arrival time and operation equipment resource investment are determined as two entry points for machine learning application scenarios in terminal application scenarios. (2) Designed a process framework for big data processing and machine learning at container terminals. Based on the PySpark big data architecture, a distributed process framework of data cleaning, noise reduction, feature engineering, model training and model invocation was designed, which realized the automation of the whole process from data to model, and achieved 90% prediction accuracy of scheduling connection time by applying random forest algorithm. (3) Improved the terminal scheduling process framework. Based on the machine learning model of the journey time of the truck equipment, the framework of the terminal scheduling process is improved, and the allocation of terminal resources is improved based on the machine learning model of equipment resource input, which reduces the

waiting time for the connection between equipment and improves the utilization efficiency of equipment.

This study designs a machine learning model for container terminal scheduling. Through simulation verification, it is concluded that the machine learning model algorithm designed in this study can increase the loading and unloading efficiency of Meidong Container Terminal by more than 10%, effectively solving the problems of low equipment utilization, uneven distribution of equipment resources and production tasks, and improving the accuracy and rationality of scheduling. It has high reference value for the optimization of container terminal scheduling at home and abroad.

Key Words: Meidong Container Terminal; machine learning; equipment waiting for each other; production scheduling; process optimization

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和研究意义

1.1.1 研究背景

当今世界正经历新一轮大发展、大变革、大调整，全球经济一体化进程受到中美贸易争端、俄乌冲突的严重影响，全球经济“滞胀”风险加大、全球供应链断裂加剧和全球多边贸易体系受到严重冲击。同时，信息化技术的提升与应用进一步促使国际分工和合作，全球科技革命和产业变革方兴未艾，特别是新冠肺炎疫情的发生加速了互联网经济的发展，大数据、云计算、物联网、人工智能、区块链等现代信息技术与科技创新不断突破，科学技术正以前所未有的力量推动全球经济的发展。把握历史发展机遇，抢占行业发展制高点，成为国内外企业赢得未来发展的关键。港口作为全球综合运输网络的关键性节点，承担着约 90% 进出口物资的运输任务，在全球贸易和航运中发挥着至关重要的作用，是经济社会发展的战略资源和重要支撑。在当前的时代背景下，港口现代信息化技术应用能力和智能化水平在一定意义上体现了一个国家的科学技术发展水平与现代物流的进步程度。

以习近平同志为核心的党中央高度重视港口发展，近年来，中共中央、国务院及各部委相继发布多份指导文件，从国家战略层面要求港口发展探索新途径。2019 年 9 月，中共中央、国务院印发了《交通强国建设纲要》，明确提出瞄准新一代信息技术、人工智能、智能制造、新材料、新能源等世界科技前沿，加强对可能引发交通产业变革的前瞻性、颠覆性技术研究。2019 年 11 月，交通运输部、国家发改委等 9 部门联合印发《关于建设世界一流港口的指导意见》，指出推动港口发展要更加注重向创新驱动转变，明确提出了建设智能化港口系统、加快智慧物流建设等重点任务。2021 年 8 月，交通运输部印发的《交通运输领域新型基础设施建设行动方案（2021—2025 年）》中，提出要加快新型码头、堆场建设和改造，加强设施远程自主操控改造，推进码头操作系统与设备控制系统深度融合，推进码头作业装备自动化；推进港口各方信息互联共享，建设港口智慧物流服务平台，提高物流便利化和业务效率。在经济和技术持续发展，政策支持力度不断加大的背景下，国内掀起了自动化港口、智慧化港口的热潮，并取得了显著成效。厦门远海码头、上海洋山四期码头、青岛新前湾码头、天津 C 段码头、广州南沙四期码头、广西北部湾钦州码头、深圳盐田妈湾码头等均结合自身情况积极探索自动化、智慧化港口发展之路。

宁波梅东集装箱码头(以下简称梅东集装箱码头)位于宁波舟山港梅山港区，

主要从事集装箱装卸业务，目前已建成 10 个集装箱专用泊位，岸线 3950 米，陆域总面积超 320 万平方米。2022 年梅东集装箱码头吞吐量超过 800 万标箱，约占宁波舟山港集装箱总吞吐量的 25%。10 个泊位完全投用后，集装箱通过能力将超过 1000 万标准箱，有望成为宁波舟山港第二个、全球第四个“千万箱级”单体集装箱码头。梅东集装箱码头是宁波舟山港智慧港口建设先行示范地，是传统码头自动化改造升级的样板工程，目前拥有远控桥吊 35 台、自动化龙门吊 81 台、智能集卡 62 辆，形成了规模化的自动化设备集群。

当前，梅东集装箱码头已完成了装卸和水平运输等生产环节的自动化应用研究，但在设备综合调度方面还主要依赖人工调度。在码头业务量和设备规模不断扩大，生产作业效率要求不断提高的情况下，受限于人脑的思考极限，人工调度难以满足大规模、超精准的生产作业调度要求。在码头企业的生产经营中，生产设备的调度是其核心工作之一，生产调度水平在一定程度上决定了码头的核心竞争力，尤其在梅东集装箱码头这种集装箱作业量高、设备规模大、生产节奏快、作业要求高的集装箱码头，梅东集装箱码头对于智能化的调度策略需求紧迫。

1.1.2 研究意义

通过上述背景介绍可以看出，集装箱码头的生产设备的调度水平决定着码头生产效率和码头竞争力。从企业角度来看，研究码头调度策略优化对合理配置码头设备资源，可以提高设备利用率和码头生产效率，从而降低码头能源消耗和人力资源消耗成本，对提升码头经济效益和行业竞争力具有重要意义。从行业角度来看，码头调度策略优化可以提升航运供应链的服务效率，提升航运物流供应链的智能化服务水平，同时引领以码头为主要组成部分的现代物流基础设施向自动化、智能化发展。从社会角度来看，码头调度策略优化将强化码头对外服务能力，有力推动国内外贸易速度和贸易量，对社会经济发展提供更强的保障，促进区域经济繁荣和“一带一路”建设。

1.2 国内外相关研究现状

随着集装箱码头作业量的提升和信息技术的发展，国内外学者从不同角度对集装箱码头运行过程中各个环节和各种设备产生的数据进行了分析，对造成码头作业瓶颈的因素进行了研究，并针对码头各个作业环节研究了对应的智慧调度策略，这些策略采用了许多种不同的方法，本文对其相关文献进行系统性地梳理。

1.2.1 关于码头作业数据和作业瓶颈分析的相关研究

（1）国外相关研究成果

在集装箱码头作业各个环节不同设备产生的各种数据分析方面，Yuanchang Xie^[1]通过基于 Kernel-Based 的机器学习算法，预测集装箱码头的集卡日运输量，

并以此分析在不同的作业量下最优的集卡数量，在每日作业量波动的情况下计算保证码头效率所需要的集卡数量。Kim Jae Hun^[2]以韩国集装箱港口数据为基础，通过机器学习算法构建了集装箱港口事故预测模型，以此分析了集装箱码头较常出现的事故。通过仿真技术再现了事故发生的全过程，分析码头存在的易被忽略的安全隐患，对如何保障码头的安全运行提出了建议。

在集装箱码头作业瓶颈分析方面，Weibin Zhang 等^[3]基于仿真模拟和机器学习算法研究了集装箱码头集卡排队拥堵情况的短期预测，以此分析集卡拥堵的产生原因，提出了相应的解决措施。

（2）国内相关研究成果

在集装箱码头生产作业数据分析方面，周强等^[4]构建了集装箱码头前沿的交通流模型，分析了集装箱拖挂车在前沿的滞留时间与作业的集装箱岸桥数量比的关系，并根据这个模型推断出了合适的数量比，实现了码头调度资源的最优化利用。俞潘^[5]分析了装卸集装箱总量的相关影响因素，得出了集卡行驶速度、集卡的数量、堆场阻塞情况、装卸桥与龙门吊的配置数量及其作业效率、堆场和码头前沿的距离等因素对集卡作业效率的影响情况，对码头的规划建设和已成型码头如何提升集卡效率提出了建议。李靖逵^[6]从桥吊装卸效率和泊位效率入手，分析了重点舱作业时间、资源配置、集装箱翻箱率、卸船箱场地安排等因素对集装箱码头整体效率的影响，并对如何提升桥吊装卸效率和泊位效率提出了多条建议。卢靖雯^[7]分析了码头闸口自动化、堆场装卸系统自动化、堆场装卸系统智能化、装卸设备作业效率等因素对集装箱码头作业效率的影响，指出码头闸口的自动化和堆场装卸系统的自动化工艺能大幅减少集卡等待时间，提高码头作业效率。

高玮^[8]借助仿真语言 WITNESS 建立了集装箱码头物流系统的计算机仿真模型，将前人较少涉及的堆场也纳入模型中，对码头进行仿真实验分析，分析集装箱码头的作业瓶颈。周瑞^[9]以理论研究、数学分析建模方法为基础，通过离散事件系统仿真技术模拟出集装箱码头作业的动态过程，研究了连续泊位分配模型，在将岸桥分配考虑到模型中，并建立岸桥配置优化动态模型和集装箱码头排队网络模型，并进行了瓶颈分析，得出了泊位、岸桥、集卡的最佳配比。于剑侠^[10]指出集装箱码头存在的集港高峰时段集港路拥堵、集港操作岗位对后方堆场调控困难、繁忙时易发生混堆等现象，并着重研究集装箱集港效率问题，探究了场桥的六种状态和场桥作业的空耗原因，还分析了码头自身管理、业务流程、布局交通和外部集疏运道路交通情况等多个因素对码头效率的影响。赖文光^[11]统计分析了国内外各种类型港口拥堵事故并分析了其产生原因，其中包括港口码头基础设施不足、港口生产效率水平低、港口集疏运体系不完善、港口信息化水平低、恶劣天气、劳资纠纷、货物意外激增、进出口货物大幅提升、港航企业与行政部门配合不密切等，提出了建设自动化码头、打造智慧港口、优化集疏运体系、发展多

式联运、推进港口资源整合等解决措施。杜晔^[12]分析了集装箱码头作业能力波动造成的港区外部道路交通拥堵问题，用决策树算法进行完成结果预测，达到了较高的准确率，社会集卡的相关方可以通过该结果降低社会集卡在港区作业的不确定性。

1.2.2 关于码头效率优化解决方案的相关研究

在集装箱码头的调度策略和各个环节的作业流程优化方面国内外学者也进行了研究，主要分析了效率的限制瓶颈。

（1）国外相关研究成果

在集装箱码头堆场配载策略优化方面，Ron C. Chiang^[13]研究了基于机器学习算法的集装箱码头堆场配置策略，在堆场堆存量不高的情况下如何规划进出口箱的布局来减少集卡行驶时间和集装箱倒箱率。

（2）国内相关研究成果

在集装箱船舶积载策略方面，郝聚民等^[14]利用多目标优化遗传算法和隔离小生境技术的多峰函数优化遗传算法，确定集装箱最优装船顺序来解决船舶实配优化问题，并在仿真环境下验证了算法的可行性。张维英等^[15]通过人工智能技术，建立了集装箱船舶配载方案评价的神经网络模型，通过数据的量化评价不同的配载方案，成果可用于集装箱船配载方案的优选。车鉴^[16]将配载问题分解为多个子问题，然后根据各个子问题分别建立了数学模型，降低了问题复杂度。着重研究了在预配载图与堆场结合的情况，制定出将堆场上集装箱组配到船上单元块的策略，使得分配最为合理。刘志雄^[17]以堆场贝位和船舶贝位翻箱次数之和最小为优化目标，提出混合演化策略算法，并基于三点交叉互换的重组算子，单点突变的变异算子和互换的局部搜索策略对算法进行改进，并通过计算证明，在不同的规模算例下，HES 算法均能求解出较优的贝内配载方案和堆场装船顺序，验证了算法的可靠性。纪卓尚等^[18]在图搜索技术和模式识别理论的基础上通过建立 BAY 优化模型，研究了在堆场作业不倒箱的前提下产生符合配载要求的堆场问题。李建忠^[19]采用运用局部优化服从整体优化的系统化思想，在给定堆场设备配置数量基础上考虑单一最优目标的现状，运用数学规划方法，构建了多目标情况下混堆情况下集装箱的动态堆存配置模型。

在集装箱卡车路径优化方面，刘丰硕^[20]以降低集卡在装卸作业过程中的空驶距离为目标，将集卡调度同桥吊作业相结合，建立了最短路径的数学模型。赵金楼^[21]在传统集卡路径优化中通常以距离或时间最短为目标的情况下，从燃料成本和作业时间两个角度研究集装箱码头的集卡路径优化问题，分两步进行了集卡路径优化，并通过粒子群算法给出了每辆集卡应执行的路径任务，通过算例验证可以有效减低码头运营成本。

1.2.3 关于码头作业管理调度系统的相关研究

在集装箱码头智慧化的建设过程中,许多学者都对于码头各类环节的作业管理是否可以通过使用各类算法的调度系统来完成进行了研究,以此达到提高码头效率,减轻调度人员负担,减少人为失误的目标。

(1) 国外相关研究成果

Alan León^[22]基于机器学习算法研究了在散杂货码头如何根据船舶作业量和堆场情况,动态安排泊位上的桥吊、龙门吊和集卡,并通过数例计算验证了算法的效果。

(2) 国内相关研究成果

赵苏^[23]利用仿真方法建立模型,以最优作业路为基础进行仿真实验,确定了作业路中场桥与岸吊的最优机械配比,验证了出口箱装船距离是影响作业路效率的重要因素,对码头如何提高堆场利用率和场吊、岸吊、集卡作业效率提供了参考。张莉^[24]以集装箱码头的作业系统为研究对象,基于排队网络理论和仿真优化方法,通过对码头前沿的重要设备桥吊,堆场设备和集卡设备的配置等对港口运营效率影响重大的相关问题的探讨,建立了码头多船服务的并列式排队网络,提出了确定桥吊数量后配置龙门吊和集卡,集卡数量需动态调整等建议。计明军^[25]研究了集装箱装卸船同时作业的情况下,综合考虑集卡运输时间和桥吊作业时间,建立基于时间最少的优化模型,并利用进化计算的特点,设计求解此优化模型的进化算法,进行了数值仿真试验,为码头集卡线路优化问题提供了决策支持。钱继锋^[26]研究了如何让泊位、岸桥、集卡及堆场等装卸资源协同配合,使码头的效率最优,考虑了合理分配泊位和岸桥等码头紧缺资源和集装箱码头岸桥、集卡与堆场双向作业如何协同优化等问题,采用多种算法对调度模型进行求解。徐皖东^[27]研究了基于多源信息的集装箱码头泊位和岸桥联合调度问题,认为鲁棒基准调度方案考虑客户服务优先级信息更加符合现实需求,可以有效提升码头系统的抗干扰能力,保证生产计划的顺利执行。白天舒^[28]从装卸系统的主要设备出发,考虑岸桥数量已知的前提下,以船舶在港时间最短为目标,考虑了集装箱岸桥调度优化中的各种约束条件及特点,建立了装卸作业调度优化模型,设计了求解的遗传算法,并以大连港集装箱码头为案例背景,验证了模型和算法的有效性。

1.2.4 关于机器学习应用于码头的相关研究

机器学习是研究怎样使用计算机模拟或实现人类学习活动的科学,是人工智能中最具智能特征,最前沿的研究领域之一,其理论和方法已被广泛应用于解决工程应用和科学领域的复杂问题。在解决集装箱码头领域的工程问题上,机器学习主要的研究内容有三大类:第一类是将机器学习用于智慧码头上的无人驾驶技术,第二类是将机器学习用于集装箱码头的作业调度管理系统方面,第三类是将机器学习用于码头的状态监测和预测方面。

(1) 国外相关研究成果

Chatterjee^[29]研究了如何通过机器学习算法来调度集装箱码头的桥吊和龙门吊,并通过仿真技术将码头建模,对调度算法进行了验证确定了算法的有效性。Bandung Institute^[30]通过机器学习算法和对离散事件系统建模,对集装箱码头构建了综合考虑泊位和码头桥吊调度策略的预测分配算法,在仿真系统中该算法较好的提升了码头的作业效率。Cristiane F 等^[31]研究了将货车卸载到堆场的调度问题,并比较了混合整数规划模型、约束规划模型和贪婪随机算法三种求解方法的性能,同时研究了不确定性条件下纯预测调度与应急响应调度的差异,发现使用演化后的调度规则更优。Danilo R C S 等^[32]建立了港口航线规划三阶段模型,采用混合整数规划模型求解港口调度和泊位分配模型,研究结果表明该模型在经济成本方面效果显著,同时可大幅度减少港口排队等待时间。

(2) 国内相关研究成果

孙羽^[33]通过机器学习算法研究如何调度和控制无人集卡车队,搭建无人集卡车队管理系统,从而提高生产安全性和生产效率,建设智慧港口和绿色港口。侯珏^[34]研究如何将专家经验融入到预警模型中,应用机器学习技术建立码头节能减排预警模型,从而对码头节能减排进行绩效化考核和精细化管理。王冰^[35]研究了港口船舶调度问题,根据业务特点和影响因素分析量化通过多目标优化算法设计了多目标遗传算法的船舶调度模型,并在实际船舶调度取得了很好的效果。杨神化等^[36]构建了智能港口交通流模拟系统,模拟了港口交通流并与运用排队论计算结果比较,提出了港口规划方案的建议。聚焦散杂货港口的泊位调度问题,针对散杂货港口的随机性与不确定性,建立基于场存平衡与时间最小化的多目标散杂货港口泊位调度模型,结合启发式规则与遗传算法对模型进行求解。王宁宁等^[37]设计了一套港口调度算法,对港口历史数据进行模拟并与自己设计的港口调度算法结果对比,在等待时间等指标上优于历史数据。杨鹏南等^[38]基于港口调度信息资源建立调度数据分析模型,基于港口生产调度大数据分析平台实现多个维度智能分析调度,提供实时决策支撑。黄晓波^[39]考虑港口环境因素建立低碳龙门吊调度混合整数规划模型,运用模拟退火算法求碳排放总量和运行效率的最优解,为绿色港口建设提供了参考。刘佳^[40]利用头脑风暴算法对集卡调度与箱位分配问题的数学模型进行最优求解,对比了其他 6 种算法的性能,得出了寻优能力最和稳定性最高的算法。谢屏楠^[41]提出了基于粒子群优化算法的港口泊位调度方案,以船舶在港时间最小化为目标建立了泊位调度实时性的数学模型,以总损失(总在港时间短)为目标建立模型的约束函数,通过改进粒子群算法求解,结果表明建立的数学模型实用性良好。李凡^[42]通过优化 AGV 和岸吊的协同调度,加入岸吊的设备等待时间等因素构建了三个目标函数和若干个约束条件的优化模型,通过对 SPEA2 的研究与改进,提出一种基于改进 SPEA2 的 AGV-岸吊协同调度算法(MSAQ-SPEA2),

最后利用 FlexTerm 验证了算法的提升。

1.2.5 对现有文献的评述

从上述国内外学者的研究来看,近年来集装箱码头的调度策略研究发展迅猛,取得了丰富成果,码头生产调度涉及作业设备调度、港区交通、装卸作业顺序等方面,调度策略的智能化更是涉及多学科的系统工程,前人的研究成果对本论文的研究具有珍贵的参考价值,但仍存在不足之处。

(1) 集装箱码头的数据分析依赖于码头本身的数字化水平,传统的分析方式往往依赖于仿真环境下的建模分析,基于真实作业数据的分析尚需完善。

(2) 已有的集装箱码头优化方案往往涉及码头作业的单个环节,孤立性强,整体统一的调度算法整体解决方案少,缺少对码头调度全流程的思考与研究。

(3) 已有的优化方案和调度算法往往只是在仿真环境中验证算法的效果,而仿真环境本身就只包括了码头的部分内容,同时现实的码头往往会有各种突发情况,导致应用推广的困难。

综上所述,尽管国内外学者在集装箱码头调度策略优化方面已有较多研究,但尚未发现一个可以对码头各个资源统一管理和调度全流程管控的实践策略。机器学习算法在其他领域大显身手的同时,在集装箱码头的调度算法运用还比较少,因此研究机器学习在码头流程策略的优化对于指导码头生产意义重大。

1.3 研究内容、方法和路线

1.3.1 研究内容

本文拟通过分析研究选题的背景,开展国内外研究现状分析,借鉴国内外港口作业调度管理先进经验和方法,研究提出梅东集装箱码头作业调度管理优化策略,并在该方案的应用过程中收集数据,分析和评价具体的应用效果。具体研究内容如下:

(1) 通过对集装箱码头行业发展和政策背景进行梳理研究,明确集装箱码头调度研究具有重要意义。同时对国内外学者在集装箱码头调度和机器学习方法在集装箱码头调度方面的应用情况等国内外研究现状进行分析,发现本研究创新点。

(2) 研究并明确集装箱码头主要的生产作业流程和调度策略的主要内容和范围,明确本文所运用的统计分析、机器学习、计划管理等理论方法的概念,分析其在集装箱码调度中的应用情况,形成本文的研究技术路线。

(3) 调查梅东集装箱码头的调度现状,通过数据分析法对码头生产的瓶颈和存在的问题进行了定性与定量的分析,确定了影响码头生产效率的主要问题。

(4) 采用相关性检验对相关数据关系进行了验证,总结形成可用机器学习方法解决的问题点。从技术目标、技术框架、技术与业务流程融合应用三个角度论

证机器学习技术在码头调度策略优化的设计框架，分析机器学习技术在梅东集装箱码头新型调度策略实现过程中发挥的作用，全方位设计基于机器学习技术的码头调度应用落地方案。

(5) 从码头相关信息系统接口改造、系统软硬件需求等信息系统升级与算法应用方面，和码头智慧化管理体系、人才队伍建设等经营管理方面，分析研究集装箱码头调度优化实施过程中需要的保障措施。

此外，集装箱码头涉及危险品集装箱、超限集装箱、冷藏集装箱等特殊类集装箱作业，其作业流程为非标准化流程，难以实现自动化作业和智能调度，且作业量占比较小。因此考虑特种类集装箱作业具有特殊性，特种集装箱调度不在本文的研究范围内。

1.3.2 研究方法

(1) 统计分析方法

将梅东集装箱码头历史数据与业务流程相结合，通过定量和定性分析相结合的研究方法，找出码头目前作业的瓶颈。利用数据统计学的相关方法，对码头运行数据进行定量分析，量化各类因素对码头效率的影响权重。

(2) 机器学习方法

收集历史作业数据并利用特征工程方法提取数据的维度，通过机器学习方法对数据进行回归或分类，实现数据预测的效果。通过回归类机器学习方法对资源分配的数据进行学习，达到资源利用效率最大化的效果。

(3) 计划管理方法

借鉴网络计划图、甘特图管理学图论方法，结合码头作业流程，建立时间和空间结合的码头调度模型。以码头作业效率最大化为目标，调度各类作业机械设备，完成作业环节的计划排程，实现设备调度的无缝衔接，降低设备空置率，提升全场作业效率。

1.3.3 技术路线

根据本文的研究思路和内容，绘制技术路线图，如图 1.1 所示：

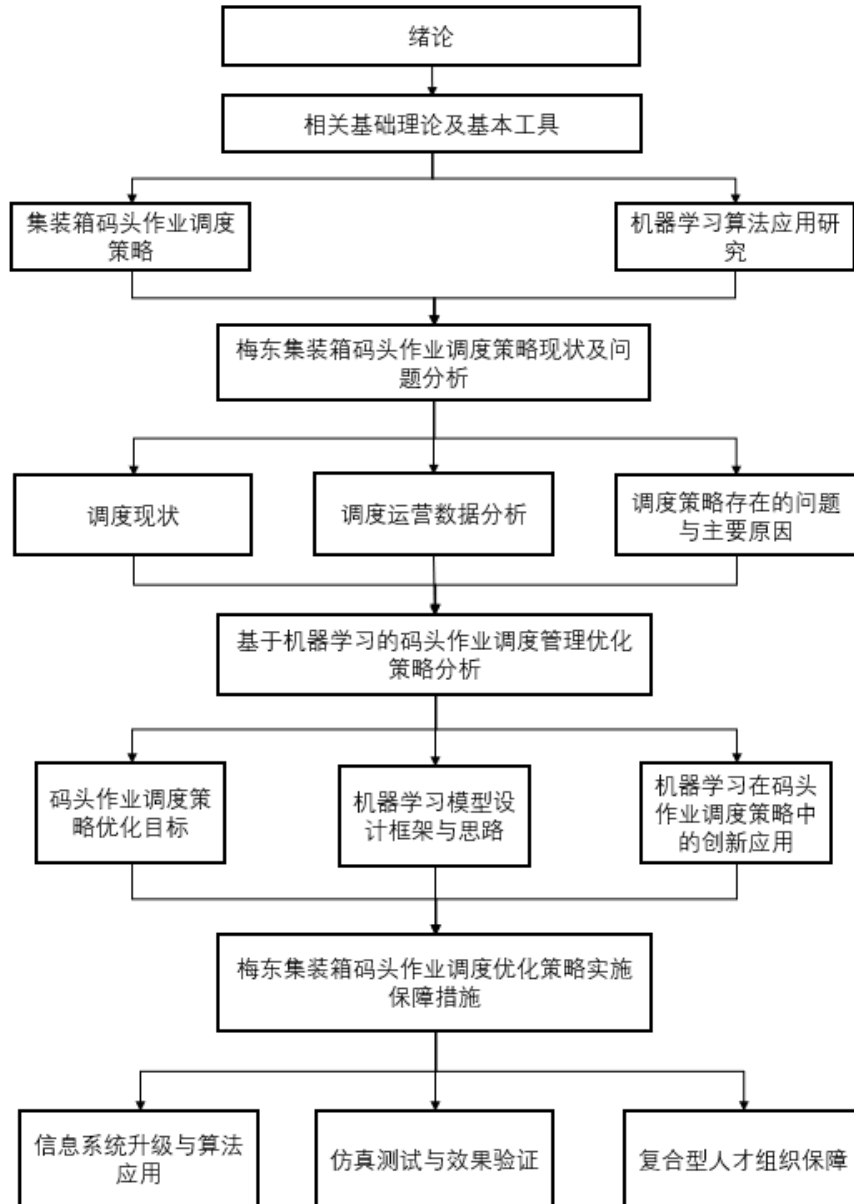


图 1.1 技术路线图

第2章 相关基本理论及概念

2.1 集装箱码头作业调度策略

2.1.1 进出口作业调度流程

集装箱码头进出口装卸作业流程主要包括装船和卸船2个过程。

(1) 装船过程

集装箱出口操作在码头生产过程中以装船作业为主，装船过程又分为集装箱进港、集装箱堆存和集装箱装船三个部分。

集装箱进港。由码头生产管理人员依据堆场堆存情况、船舶的到港时间、集装箱类型和数量以及卸货目的地等因素，在既定堆存策略下制定堆场进箱计划。当外集卡进入港区后，由码头生产管控人员按照进箱计划，向堆场龙门吊派发作业任务，堆场龙门吊将进港集装箱吊放至指定堆场位置。

集装箱堆存。在集装箱进港后至装船前，集装箱需堆存在码头堆场内。由于堆场内集装箱堆存整理、同贝位集装箱出港、同类型集装箱集中堆放等原因，对集装箱位置进行调整。此过程若发生在同一贝位内，则由一台龙门吊单独完成；若发生在不同贝位内，需由一台龙门吊完成出箱后，交由一辆集卡完成水平运输，再由另一台龙门吊完成进箱。

集装箱装船。将堆场内配载至船舶的集装箱，按照一定的顺序由堆场龙门吊出箱后，由集卡将集装箱运送到码头船舶装卸区，再由桥吊将集装箱运送到船舶指定位置。此过程中的集装箱装卸顺序收到集装箱在堆场内的位置、集装箱配载至船舶上的位置、集装箱箱型及多类属性等因素的影响和制约。

(2) 卸船过程

集装箱进口操作在码头生产过程中以卸船作业为主，卸船过程又分为集装箱卸船、集装箱堆存和集装箱出港三个部分。卸船过程与装船过程的集装箱流向相反。

集装箱卸船。由桥吊将船舶上的集装箱吊起放置到港内运输集卡上，由集卡将运送到堆场内指定的贝位，再有堆场龙门吊将集装箱吊放至堆场指定位置。

集装箱堆存。集装箱卸至堆场后至外集卡提箱前，集装箱需堆存在码头堆场内。此过程中由于堆场内集装箱整理及其他装卸运输需求，可能对集装箱堆放位置进行一定的调整，具体调整过程与装船时集装箱堆场整理基本相同。

集装箱出港。由外集卡进入港区进行提箱作业完成。此过程中，由外集卡进港区集装箱所在位置后，再由堆场龙门吊吊装集装箱至外集卡上，外集卡输出港区。

由上述装、卸船过程可以看出,在码头内部的集装箱进出口作业可以细分为进箱、装船、卸船、提箱、集装箱堆场整理(移箱和贝内整理)等过程。此外还有水水中转即集装箱由船舶卸至码头后再由船舶装船的出港类型,其作业流程由上述的卸船、堆存、装船三个过程组成;集装箱查验即在集装箱进出口过程中对部分集装箱进行抽取检查,从而产生额外的集装箱运输活动,其过程基本与集装箱堆存整理相似。集装箱码头的装卸设备主要包括桥吊、龙门吊、港内集卡和外集卡,空箱作业中因堆存方式不同,主要由堆高机负责堆场内的垂直装卸。

在码头实际运营过程中,上述作业流程均在同一时空范围内进行,码头生产管控人员需对码头生产设备资源进行合理分配、调度,保证码头装卸流程顺畅、高效。

2.1.2 装卸作业设备资源分配

集装箱码头装卸设备主要包括桥吊、龙门吊、堆高机等3种,桥吊负责岸边船舶装卸,龙门吊负责堆场内重箱和部分空箱装卸,堆高机负责堆场内空箱装卸。装卸作业设备资源分配是主要指在集装箱码头中合理分配和利用各种装卸设备(以桥吊、龙门吊、堆高机为主)的策略,以提高装卸作业效率和减少装卸时间。梅东集装箱码头作为“千万级”作业能力的单体集装箱码头,其装卸设备数量及作业量都较大,整体生产节奏较快,其设备资源分配主要有以下几点:

重点路保障。定义以船舶相邻两贝的作业量之和最大的贝位为该船舶的重点作业路,重点路的装卸作业时间较大程度的决定了该船舶的整体作业时长。因此在船舶装卸作业中,以重点路作业不间断为核心,调配桥吊、龙门吊设备保障其装卸任务持续进行。

船型匹配。在桥吊资源分配中,要根据船型及作业任务贝位分布情况进行桥吊作业的安排,即在满足桥吊相邻作业距离间隔要求的情况下,按照船舶可同时作业的最多桥吊数量确定桥吊分配上限。

先来先服务。在桥吊分配方面,按照船舶靠港先后顺序进行桥吊安排,遵从先到港先作业的原则,减少桥吊的空闲等待时间。在龙门吊分配方面,按照集卡到达箱区的先后顺序进行龙门吊任务分配,确保每辆集卡都能按时完成装卸。

最短移动距离。在堆场龙门吊作业中,对两台或多台龙门吊均可作业的任务,按照移动距离最短的原则进行任务分配,减少龙门吊空驶距离。在堆高机空箱作业中,同样按照就近原则进行任务分配。

最小作业时间。在龙门吊和堆高机作业任务分配中,优先分配给完成任务时间最短的龙门吊、堆高机,以减少集卡等待时间,提高龙门吊、堆高机的利用率。

均衡分配。在设备资源分配中,需考虑各泊位、箱区及作业船舶的均衡,保障各项作业区域均据具有与装卸任务相对应的产能水平。在作业任务分配中,考虑各作业区域的作业任务平衡性,减少装卸设备忙闲不均的情况,最大程度提高

设备利用率。

高密度区优先分配。针对堆场内、码头面密集装卸的区域，优先分配龙门吊、堆高机和桥吊资源，以便保障集中区域内密集、快节奏装卸的需求。

2.1.3 平面运输调度策略

集卡是集装箱搬运的关键设备，集装箱码头平面运输调度主要是指对码头内部集卡的调度，其目的是对码头内部集装箱水平运输作业任务进行合理的任务分配和调度，以优化集装箱码头的内部转运效率和减少作业时间。集卡调度策略主要包括以下几点：

就近分配。选择距离集装箱发出地最近的集卡车辆来执行运输任务，减少运输时间和集卡空驶率。

最短路径调度。根据集装箱运输发出地与目的地位置，选择最短路径进行集卡行驶路径规划，以减少运输时间和距离。

高密度区优先调度。针对堆场内和码头面密集装卸的区域，优先调度集卡进行运输任务，保障龙门吊、堆高机和桥吊的装卸任务中对集卡运输的需求，最大程度保障装卸设备发挥最优作业效率。

前置任务调度。在集卡调度中，依据集卡前一任务类型进行任务分配，实现码头面、堆场内的“边装边卸”，如集卡完成装船运输后，在码头面就近分配卸船任务，以此提高集卡的利用率。

任务集中调度。将可合并运输的任务集中安排，减少集卡运输过程中的空驶时间和等待时间，提高设备利用率，如装船双箱作业，两小箱在堆场内分别堆存在不同箱区的情况，可提前将两小箱集中堆存在同一贝位，由同一集卡一次完成装船运输。

灵活分配。根据码头实际装卸情况，根据装卸任务的优先级，灵活地对水平运输任务进行分配和调整，确保作业及时高效。

2.2 码头运营统计分析

统计分析法广泛应用于各种领域，在集装箱码头生产调度中具有重要的应用价值，可以提供数据支持和决策依据，帮助优化调度方案、提高作业效率、优化资源利用以及评估风险，对提升集装箱码头的运营效益和客户满意度具有重要意义。统计分析法在集装箱码头生产调度中的应用主要体现在以下几个方面：

（1）作业量预测：通过统计分析历史数据，可以预测不同时间段的集装箱作业量。这将帮助码头管理者合理安排资源，避免资源短缺或过剩，从而提高调度效率和资源利用率。

（2）作业时间预估：根据历史数据估计各个作业环节的平均作业时间和变异程度，有助于制定合理的设备调度计划和作业计划，避免生产过度拥挤和作业不

平衡，提高作业效率。

(3) 资源分配优化统计：根据收集并分析码头历史生产数据，确定码头不同作业类型的作业量分布和作业时间分布，以及各类生产资源（如岸桥、龙门吊、集卡等）的利用率和作业效率，评估码头的生产能力，并基于分析结果提出资源分配策略优化建议，提高码头生产资源利用率和生产潜力。

(4) 调度作业流程统计：通过对作业流程和作业时序进行测量和分析分析，找出作业流程中的瓶颈环节，并基于分析结果为码头合理安排作业顺序、减少等待时间、减少作业冲突、缩短作业周期等生产调度问题提出优化建议，改进码头作业流程，以提高生产作业效率。

(5) 风险分析和决策支持：统计分析可以帮助评估码头调度方案的风险和可行性。通过分析历史数据和模拟实验，可以评估不同因素对码头生产调度结果的影响，确定风险因素，辅助制定风险应对策略。

2.3 机器学习算法概述

2.3.1 机器学习基本原理

机器学习是一种人工智能的分支领域，它涉及让计算机系统通过学习数据而自动改善和适应的技术。简而言之，机器学习可以被视为给计算机系统提供大量数据和相应的算法，使其能够从数据中学习规律和模式，并根据学到的知识做出预测或者决策。与传统的编程方式不同，机器学习的目标是通过让计算机从数据中进行学习，从而使其能够自主地进行决策和预测，其核心思想是利用统计学、概率论和优化算法来构建模型，然后使用数据来训练和调整这些模型。

机器学习的基本原理可以概括为以下几个关键步骤：

(1) 数据收集：机器学习的基础是数据，首先需要收集和获取相关的数据集，包括输入特征和对应的标签。

(2) 数据预处理：数据通常需要进行清洗和预处理，包括去除噪声、处理缺失值、特征缩放、标准化等，以提高机器学习模型的准确性和可靠性。

(3) 特征工程：在机器学习中，特征工程是一项重要的任务。它包括选择和提取与问题相关的特征，以便模型能够更好地学习和理解数据的模式。

(4) 模型选择：根据问题的性质和要求，选择适合的机器学习模型，例如决策树、逻辑回归、支持向量机、神经网络等。每种模型都有其特点和适用的场景。

(5) 模型训练：使用训练数据集来训练选定的机器学习模型。训练过程中，模型会根据输入的特征和对应的标签调整自身的参数，使其能够更好地拟合数据。

(6) 模型评估：使用测试数据集评估模型的性能和准确性。常用的评估指标包括准确率、精确率、召回率、F1 值等。

(7) 模型优化：根据模型评估的结果，调整模型的参数、选择不同的算法或

者采用其他的优化技术，以进一步提高模型的性能。

(8) 模型应用：经过训练和优化的模型可以用于做出预测、分类、聚类或者其他任务，根据输入的新数据生成相应的输出。

机器学习是一个迭代的过程，通过不断的收集更多的数据、改进模型和优化算法，来提高模型的性能和泛化能力。同时，机器学习的结果还需要根据实际应用进行验证和调整，以确保模型的可靠性和有效性。在机器学习中，有监督学习、无监督学习和强化学习等不同的学习方式。在有监督学习中，模型的训练数据集包括输入样本和对应的输出标签，模型通过学习输入和输出之间的关系来进行预测和分类。在无监督学习中，模型从未标记的数据中寻找模式和结构，以发现数据中的隐藏信息。而在强化学习中，模型通过与环境交互来学习确定性策略，并通过与环境的反馈来提高性能。

机器学习广泛应用于各个领域，如自然语言处理、图像识别、人脸识别、推荐系统、金融风险评估等，已成为推动科技进步过程中解决复杂问题和提供智能化解决方案的重要手段。

2.3.2 机器学习在集装箱调度的应用

集装箱码头是一个复杂的环境，涉及到大量的集装箱、船舶、卡车等多种资源的调度和管理，而传统的人工调度往往无法满足实时性、高效性和准确性的要求。机器学习在集装箱码头调度中的必要性分析如下：

(1) 机器学习方法适用于处理大规模数据。在集装箱码头调度中，需要处理大量的船舶、卡车、集装箱等信息，传统方法难以有效处理。机器学习方法可以通过训练大量数据，构建准确的模型，从而能够高效地处理并分析这些数据，提取关键信息和规律。

(2) 机器学习方法具有较强的自适应能力，能够根据实时数据和环境变化进行调整和优化。它可以从历史数据中学习模式和规律，并根据实时情况进行准确预测和决策，不断优化调度方案，适应复杂和变化多端的码头环境需要。

(3) 机器学习方法能够实现快速的响应和灵活性。在集装箱码头调度中，需要实时监控和调整调度方案。机器学习方法可以根据实时数据快速更新模型，并及时调整调度策略，实现快速响应和灵活调度，从而提高实时性和适应性。

机器学习在集装箱码头生产作业调度中有广泛的应用，可以通过分析和学习大量的数据和环境信息，帮助集装箱码头实现更智能化的作业调度和管理，提高生产效率和质量，减少成本和延误，主要体现在以下几个方面：

(1) 预测作业时间：机器学习可以根据历史数据和当前环境状况，对装卸集装箱任务的作业时间进行预测，帮助码头生产管理人员更准确地制定作业计划、合理安排资源，避免码头拥堵和延误。

(2) 任务调度优化：机器学习可以根据不同任务的属性和优先级，以及当前

的生产场地、设备等资源状况，通过学习和优化算法来自动调度和分配任务，从而提高作业效率，减少闲置时间和等待时间。

(3) 负荷预测和资源分配：通过机器学习，可以基于历史数据和实时信息，预测未来一段时间内的作业负荷，并相应地调整资源分配，包括装卸设备和车辆等，使生产过程更平衡和高效。

(4) 异常检测和预警：机器学习可以监测集装箱码头的整体生产运行状况，识别异常情况和潜在故障，并通过预警和提示方式进行异常告知，以便码头生产管理人员及时采取措施以避免效率降低、生产中断和损失。

2.4 作业计划管理方法概述

借鉴网络计划图、甘特图等管理学图论方法，结合码头作业流程，建立时间和空间结合的码头调度模型。以码头作业效率最大化为目标，调度各类作业机械设备，完成作业环节的计划排程，实现设备调度的无缝衔接，降低设备空置率，提升全场作业效率。

装箱码头调度管理方法是指为了协调和优化集装箱在码头的运输、装卸和转运等作业流程，以提高码头运营效率和服务质量的一系列管理方法。这些方法涉及到任务分配、资源调度、信息共享和数据分析等方面，旨在实现集装箱码头的高效运营和作业管理。集装箱码头生产调度过程作为一项可控制的任务，计划管理方法可以帮助实现高效的集装箱运输和资源利用，主要应用的方法有以下几种：

网络计划图。网络计划图在集装箱码头调度方面的应用，主要体现在生产任务顺序安排、优化资源分配、任务进度管理等方面。在网络计划图中，将各生产步骤中的具体任务视作一个节点，用网络计划图中的边表示任务之间的依赖关系。通过任务节点和依赖关系的设置，可以明确每个任务所需要的资源，按各个任务间的依赖关系进行排列和调度，从而实现资源的合理分配和任务执行顺序的合理安排。此外，网络计划图能够给出每个任务的开始时间、结束时间以及整个调度任务的总体进度，通过实时更新任务的完成情况，及时发现任务执行的延误或冲突，从而指导调整调度计划。

关键路径法。在集装箱码头调度中，关键路径法可以用于确定关键任务和关键路径，即对于整个调度流程而言，具有最长工期或最高优先级的任务和路径（如装卸船重点路作业）。通过优化关键任务的安排和调度，可以有效地提升整个集装箱装卸作业的效率 and 准时性。

资源分配法。在集装箱码头调度中，资源分配是关键一环。针对集装箱码头生产中不同任务等级和调度优先级，借助资源分配法为各项生产作业任务分配相应的资源，确保码头核心生产设备资源合理、均衡利用，提升码头整体生产效率和生产力。在码头平面运输设备的调度中，资源分配法可以根据不同作业地点的

任务量、运输路径、运输要求和车辆类型要求，合理安排平面运输车辆资源的使用和分配，以便高效地完成运输配送任务。

甘特图。对于集装箱码头调度而言，可以将作业链上不同的任务（如同船舶对桥吊装卸任务）及对应的运行时间段以条形图的形式展示出来，辅助相关操作人员可以清晰地了解任务的安排顺序、持续时间和交叉关系，从而更好地组织资源和协调各项工作。

第3章 梅东集装箱码头调度现状及问题分析

3.1 梅东集装箱码头调度现状

集装箱码头装卸作业类型涵盖了多个不同的业务类型，每种类型都涉及不同的货物和作业流程。

集装箱码头出口装船作业是指将待运往国外的货物装载到集装箱船舶上的流程。货物应根据货物性质和体积选择适当的尺寸和类型选择合适的集装箱，预约船舶航次同时安排卡车或铁路等运输工具运输集装箱到码头，货物到达码头后海关等部门需要进行验收和检查。验收合格的集装箱将被运送到码头的集装箱堆场，在堆场中，集装箱将按照目的地、货主或其他标识进行分类和分组，并根据船舶装载方案进行准备。在装船前，码头工作人员将根据装载计划从堆场中取出相应的集装箱，这通常涉及使用吊车或其他装卸设备将集装箱从堆场吊起，并移动到装船区域。集装箱装船是整个出口装船作业的核心环节。码头工作人员将用吊车等装卸设备将集装箱逐一吊运到船舶上，并根据装载计划进行摆放和固定。集装箱码头的进口作业与出口作业环节基本相同，但是顺序相反。码头还有部分集装箱因为安全等级、时间等其他原因的直装直卸业务，这类业务相对于正常的进出口业务涉及的流程更为少。

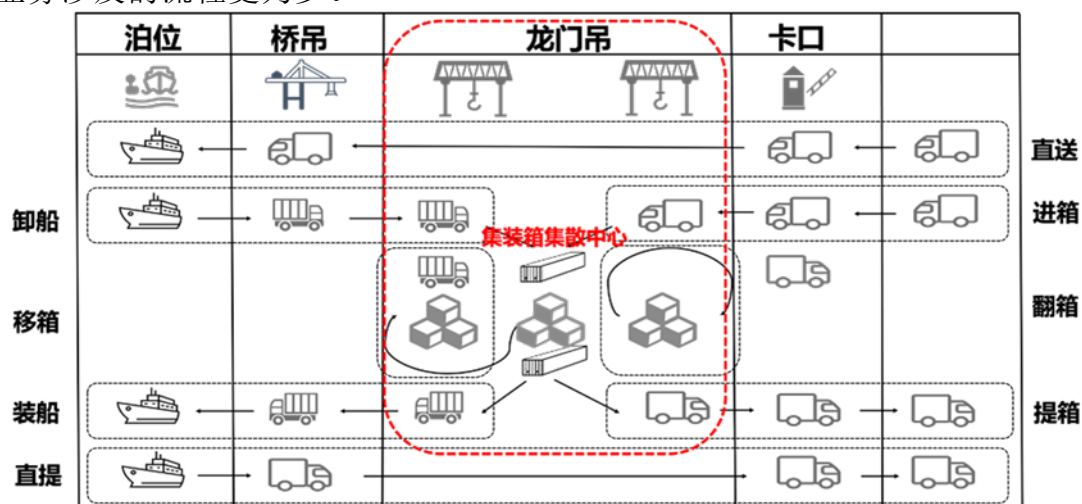


图 3.1 集装箱码头装卸作业流程图

经过调研发现，梅东集装箱码头生产调度主要依赖人工计算进行分配资源以及资源的调度，由于人的算力有限，无法充分的考虑整个码头的作业状况以及不同作业的紧急程度等信息，导致一些作业冲突的发生，影响作业效率，存在一定的局限性，目前生产调度的主要问题有以下几点：

(1) 设备配合衔接不顺畅。在梅东集装箱码头生产中，码头装卸、堆场作业等各环节中桥吊、集卡、龙门吊等主要生产设备之间的衔接存在设备等待和闲置

的情况，主要原因包括调度计划不统一、码头区域作业量不均衡、外集卡作业难管控、各生产环节控制员掌握信息不对称等原因。

(2) 资源分配不均衡。受码头建设投资成本和运营成本的限制，集装箱码头的桥吊、龙门吊、集卡等作业设备往往不能按照码头满负荷运转的需求进行配置，这导致在码头高峰作业期间，设备资源往往存在不足的情况，成为影响生产作业效率的主要瓶颈。在梅东集装箱码头生产中，由于生产调度依靠人工，且各调度员掌握的生产信息主要来自于码头局部的生产情况，这导致人工调度不能从全局的角度进行生产设备资源的优化分配，容易出现不同生产区域的作业任务量与设备投入数量不均衡的问题。

(3) 集装箱堆区空间不足带来的计划限制。随着中国进出口贸易的增长和船舶大型化的发展，船舶一次性装卸量常常超过 1 万 TEU，梅东集装箱码头堆场有 15 万 TEU 的容量，想要同时满足 10 条船舶作业，调度协调空间已经明显不足。堆场很容易出现堆垛物理空间不足的情况，这导致堆场内的集装箱堆放高度增加，增加了取箱和放箱作业的困难度，堆场翻箱频繁，堆场和作业船舶的空间距离也不断增长，降低了作业效率。目前梅东集装箱码头的堆场面积已经不能满足调度作业的要求。

(4) 设备资源不足导致的服务不顺畅。装卸作业操作需要大量的人力和机械设备参与，目前机械设备和司机的数据量不足，限制了集装箱作业的整体效率。

(5) 缺乏信息共享导致的任务切换和调度计划的变换：作业包括船运公司、货代、码头经营者等许多的参与方，任何一层的信息变换都有可能导致计划或者作业层的信息大幅变动。由于信息孤立和不同系统之间的兼容性问题，无法实现良好的信息共享和协同。缺乏全面的、实时的信息共享，使得作业调度无法全面了解码头的实际情况，从而影响作业的准确性和时效性。造成了作业流程的延误和不必要的沟通，调度计划面对不对称的信息变化疲于应对

(6) 感知水平低导致调度的时效性不足。作业调度需要准确的实时数据支持，码头作业通常需要大量的感知设备来监测和收集数据，如传感器、摄像头等。然而梅东集装箱码头的系统仍然依赖人工或手动方式进行数据收集和处理，无法及时获取准确的信息。或者现有感知设备的覆盖范围和精度不足以满足实际需求。例如，集装箱位置、堆场拥堵情况、设备状态等数据的延时和不准确，这导致无法全面感知作业现场的情况，从而影响作业调度的准确性。调度缺乏全层面的考量。

为了解决这些瓶颈集装箱码头可以采取系列措施，如优化堆场管理，提升装卸设备的数量和性能，加强作业员培训和技能匹配，建立准确的集装箱跟踪系统和信息共享平台，加强各环节间的协调和合作关系等。通过综合性的改进，可以提高调度的效率和准确性，优化集装箱码头的作业流程。

3.2 梅东集装箱码头运营数据分析

3.2.1 作业效率关键影响指标相关性检验

通过数据分析相关性检验法对集装箱作业调度的运营数据展开分析，寻找码头作业调度的瓶颈。

表 3.1 公司运营数据指标

船名	装船箱占比 (X_1)	单路集卡配比 (X_2)	场泊对应指数 (X_3)	箱区等待时间 (X_4)	平均桥吊路数 (X_5)	船时效率 (Y_1)
CMAFR8	0.3	7.14	0.86	7.57	9	172.64
EMCEX11	0	8.49	1	6.53	7	176.16
CMABO5	0.22	6.89	0.87	5.89	11	177.61
CMAFU10	0.16	7.24	0.91	6.91	9	179.01
EMCGI8	0.28	7.76	0.9	7.76	8	180.36
EMCTN6	0.01	8.26	1	6.02	8	182.16
CMAEL7	0.16	7.42	0.73	6.84	8	184.23
EMCTS9	0	8.32	1	7.22	6	188.38
EMCLY5	0.01	10.06	0.75	6.85	9	191.48
CMARR8	0.43	8.21	0.77	6.85	9	203.71

通过相关性分析发现，装船箱占比与船舶作业效率的相关性系数是-0.781，装船数量越多作业效率越低。这是由于梅山码头是一个出口作业为主的集装箱码头，出口箱堆场作业繁忙，各类集装箱互压情况严重，导致出口作业发箱困难，影响作业的流畅性。因此出口箱占比影响作业的效率。

通过相关性分析发现，平均桥吊作业路数与船舶作业效率的相关性系数是 0.799，单路集卡配比与船舶作业效率的相关性系数是 0.737，装卸设备的数量越多效率越高，水平运输作业设备的数量在一定区间内对作业效率影响明显，设备资源数量属于强相关因素。由此可以发现设备资源数量成为限制码头作业效率的重要因素，资源限制成为作业效率的瓶颈，提升作业设备的效率或者增加设备资源的数量都是提升效率的方式。

通过相关性分析发现，场泊对应度与船舶作业效率的相关性系数为 0.439，属于弱相关因素。场泊对应度是指出口场地和作业船舶的空间距离，空间距离的不对应会增加水平运输集卡的运输距离，导致运输时间的增加从而降低船舶的作业效率。这主要是各方的信息差导致的，船舶到达码头的信息不明确，集装箱改船改航次等信息严重影响计划判断，导致场泊对应度的降低。

综上所述，装船箱占比和场泊对应指数属于作业基本环境因素，虽然会产生相关影响但很难进行调整。设备效率和资源分配等因素影响码头的作业调度计划，且具有优化空间，为减少设备等待时间、提高设备资源利用率，码头应在调度和规划层做出更多的优化，以提升码头的作业效率。

3.2.2 资源投入数量与设备效率关系分析

在资源规划层面进一步分析设备资源分配对作业效率的影响，通过历史作业数据分析集卡资源投入数量与桥吊效率的关系，如图 3.2，图中横坐标为集卡资源投入数量、纵坐标为桥吊装卸效率。

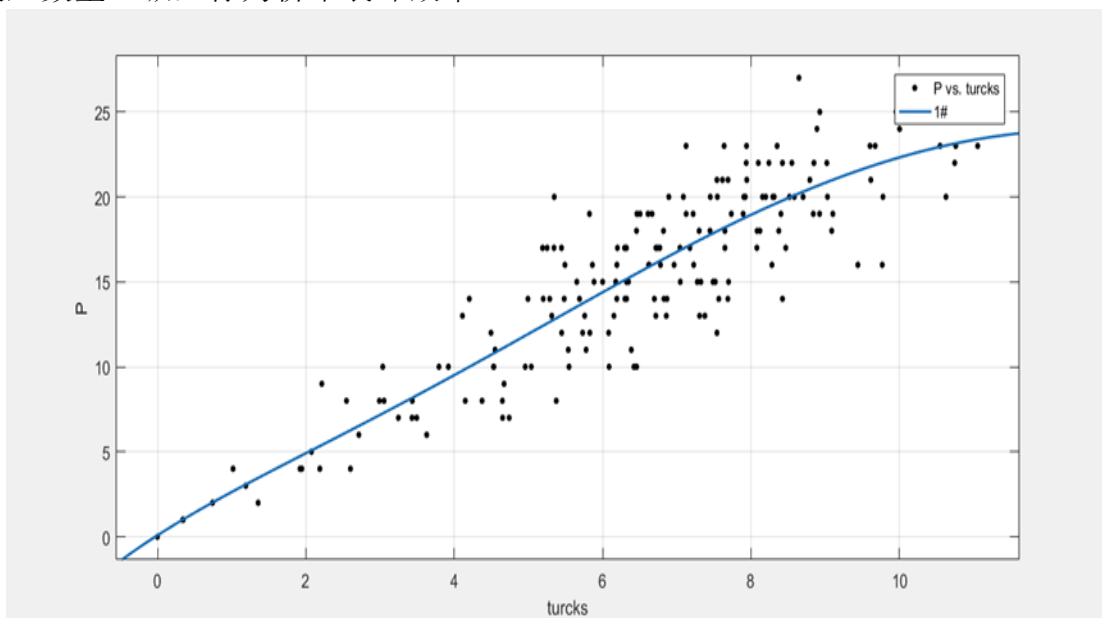


图 3.2 集卡资源投入数量与桥吊效率关系图

通过分析可发现，集卡资源投入数量可以提高桥吊效率，但是两者之间并不是线性增长关系，数量为 0-8 时线性关系明显，大于 8 时线性关系逐渐减弱，10 以上衰减明显。主要原因是由于堆场、道路等基础设施资源有限，集卡同时到达相同空间区域时会产生拥堵，造成作业排队等情况，说明资源投入数量并不是越多越好，而是在某一个合理区间内较优。

目前人工调度模式下的生产过程中，设备资源利用不合理的情况表现明显，资源不足或过多使用都会影响作业效率，因此作业调度策略需要注意设备资源的合理分配。

3.3 调度策略存在的主要问题与成因分析

3.3.1 设备配合衔接问题及成因分析

集装箱码头的调度作业环节是否流畅是影响作业效率的重要因素。梅东集装箱码头作业中，集卡平均每次等待龙门吊的作业时间为 6.3 分钟，集卡等待桥吊作业的平均等待时间为 2.5 分钟，设备间的配合衔接约占调度任务的 30%，是码头生产作业的重要瓶颈，严重影响梅东集装箱码头的作业效率。

设备间的信息不对称导致衔接时间的产生。在设备衔接作业时，由于设备间信息的封闭装卸起重设备只有在集卡设备到达装卸位置后才会发送到达信息，然后装卸起重设备收到到达信息才会赶往装卸场地，装卸起重设备往往质量大、重

心高移动缓慢，在此期间设备间互相等待。

衔接不流畅会引起装卸作业的延误。集卡作为集装箱码头的重要工具，负责运输集装箱到指定位置，而龙门吊、桥吊等装卸设备则负责将集装箱吊起进行装卸。如果集卡与这些设备的衔接不协调，例如集卡与装卸设备不在同一位置、装卸设备不能及时操作等，将会导致作业员不得不等待或调整作业顺序，从而延误整个作业流程。延误会造成集装箱堆场积压、装卸设备闲置等问题，严重影响作业效率。衔接不流畅还会降低设备的利用率和作业效率。在码头作业中，装卸设备数量通常有限，如果衔接不流畅导致设备不能及时进行装卸操作，将会导致设备闲置的时间增加。闲置时间的增加不仅浪费了设备资源，还导致作业效率的降低。如果码头作业流程中集卡与装卸设备的衔接不流畅，可能需要增加额外的操作步骤和调整，进一步增加装卸作业的时间和难度。因此，对于集装箱码头的作业调度，需要合理规划和优化作业流程，确保集卡与装卸设备的衔接流畅，从而提高作业效率和降低成本。

3.3.2 资源分配问题及成因分析

集装箱码头的调度作业资源分配是影响作业效率的重要因素。梅东集装箱码头作业通常是按照作业组来分配的，如一台船舶装卸桥吊通常配备 6-10 辆集卡和 2-3 台堆场龙门吊，但这并非一个常数，不同的作业环境下需要配备的资源数量往往是需要根据目标动态调整的，不同的装卸比、运输路径长度、堆场繁忙度等都会影响装载的作业效率，因此合理的资源配置是影响作业效率的重要因素。

设备资源分配对码头调度的精准度要求高、考虑因素多且复杂。为实现对资源的精确分配，需根据作业计划做出合理规划和决策，资源分配考虑的是船舶的大小、装卸速度和作业量等因素，确定所需的桥吊、集卡、场地龙门吊等设备的数量。桥吊作业需根据作业计划进行动态调度，需要考虑船舶的到离港时间、抵达码头的的时间以及其他作业任务的优先级等因素，综合考虑后确定桥吊的调度顺序和作业时间。动态调度可以使桥吊设备的利用率最大化，同时也能够避免作业的冲突和延误；堆场龙门吊的装卸作业往往需要结合堆场管理确保龙门吊的作业空间充足，并且避免作业冲突，通过合理的堆场规划和负荷平衡，减少设备之间的移动距离，提高作业效率和资源利用率，实现资源的最大化利用。

综上所述，码头集卡设备资源分配对桥吊装卸船和堆场龙门吊装卸的要求包括设备数量和类型的选择、动态调度、作业效率以及负荷平衡等方面。根据作业计划实现对资源的精确分配需要进行详细计划、实时监控、信息共享、技术支持和经验总结等步骤，可以提高作业效率、资源利用率和安全性。通过不断优化资源分配方案，可以为码头作业提供更好的作业流畅支持和保障。

3.4 本章小结

本章对梅东集装箱码头的生产作业流程进行了梳理，通过调研法和数据分析法对码头生产的瓶颈和存在的问题进行了定性与定量的分析，确定了影响码头生产效率的两个主要问题为设备作业衔接耗时长和设备资源分配不合理。

第 4 章 机器学习模型设计与集装箱码头调度优化

4.1 机器学习可行性分析

应用机器学习等人工智能技术统筹协调调度多类生产设备，打造各生产环节无缝衔接、生产设备高效协同的生产作业链，是提升梅东集装箱码头服务水平和核心竞争力的重中之重。解决设备衔接时间和设备资源动态分配的问题，可以通过对历史数据的相关性分析判断指标矩阵是否适合进行因子分析，采取相关系数矩阵计算、KMO 检验和 Bartlett 球度检验来进行判断，若适合则提取主要影响因子，然后通过机器学习算法训练历史数据得到时间预估模型。

4.1.1 数据收集

机器学习训练历史数据解决码头信息不对称和最有资源配置问题。设备间的信息不对称主要是由于平面运输设备运输路径上的各类不确定性事件导致的，例如集卡在路上堵车、司机的路径选择、司机的车速和驾驶习惯等都会导致路程的时间不同。作业资源分配问题可以将历史上作业效率最高的前 20% 的资源配置对应的数据作为训练数据集，从而让机器学习给出历史经验的最优资源配置。历史数据样例如表 4.1 和表 4.2。

表 4.1 集卡路程耗时与可能性影响因素数据样例

集卡 id	任务距离 千米 (X_1)	集卡载重吨 (X_2)	司机年度绩 效 (X_3)	道路区间平均流 量辆/分钟 (X_4)	集卡路程/分钟 (Y_1)
T08	2.67	7.14	0.86	3.7	10.8
T135	5.8	20.2	0.78	6.53	20.1
T45	6.3	6.89	0.89	5.89	12.6
T15	7.2	7.24	0.68	6.91	18.0
T87	4.9	7.76	0.92	7.76	10.06

表 4.2 船时效率与资源配置的可能性影响因素数据样例

船名 id	龙门吊设备 数量 (X_1)	集卡设备数量 (X_2)	桥吊设备数量 (X_3)	船时效率 teu/小时 (Y_1)
CMAMZ13	20.67	56.2	8.5	160.7
COSML16	25.8	62.2	10.2	178.2
COSKM13	25.3	76.7	9.4	189.8
EMCHY3	15.2	45.4	7.3	138.1
CMAGT8	20.9	58.6	8.7	146.0

4.1.2 相关性检验

KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验是一种常用的多元统计分析中用于评估变量间相关性的检验方法。它用于判断是否适合进行因子分析或结构方程模型等分析。下面是进行 KMO 检验的步骤：

(1) 收集数据：首先，需要收集所需的数据。这些数据可以是观察数据、问卷调查数据或者其他类型的数据，必须包含多个变量。

(2) 构建相关矩阵：将收集到的数据转化为相关矩阵。相关矩阵显示了每个变量之间的相关性。确保在计算相关系数之前，先进行数据标准化或规范化，以保证不同变量之间具有可比性。

(3) 计算 KMO 值：将相关矩阵输入统计软件中，执行 KMO 检验。KMO 值的计算基于样本数据的相关矩阵。KMO 值的范围从 0 到 1，值越接近 1 表示变量间的相关性越高，适合进行因子分析。

(4) 判断 KMO 值：根据计算得到的 KMO 值，对变量间的相关性进行评估。一般来说，KMO 值应大于等于 0.6 才被认为是可接受的，值越接近 1 说明变量之间的相关性越强，适合进行因子分析。

(5) 决策分析方法：根据 KMO 值的结果，可以做出相应的决策。如果 KMO 值低于 0.6，说明变量之间的相关性较弱，因此不适合进行因子分析。反之，如果 KMO 值高于 0.6，可以继续进行因子分析或其他相关的多元统计分析。

运用 SPSS 软件对历史数据进行 KMO 分析发现，集卡路程耗时与各可能性影响因素的 KMO 值为 0.95，船时效率与资源配置的各可能性影响因素的 KMO 值为 0.86，均为强相关，可以进行后续的机器学习建模。

4.2 基于机器学习改进调度策略的优化目标

基于机器学习改进调度策略主要从从资源、规范、空间、时间四个方面开展优化，以提高码头生产作业效率。

资源方面，由于堆场龙门吊资源数量配置、最大作业效率、可移动范围等因素限制，堆场龙门吊资源很可能因为作业繁忙度的提高而出现紧缺状况。通过机器学习算法的优化，智能调度系统能够通过船舶作业计划推算堆场和桥吊繁忙程度，计算船舶贝位所需的资源动态配置量，优化船舶分路和自动解封，实现资源之间的平衡使用。

规范方面，由于码头作业信息不能及时共享和传递，堆场计划员、配载计划员、调度员、策划员和控制员相互间沟通存在延时性、错误率双高的问题，容易出现步调不一致的情况。同时由于泊位计划的调整，货代临时改船改港会影响堆场计划的调度策略，外集卡司机未按照码头作业规定规范作业、未及时打开定位设备、未能按照计划路线行驶到指定贝位等情况的出现都会对码头作业效率造成不利影响。通过机器学习算法的优化，智能调度系统能够实现全场指令排程，为突发性事件提供更多优化方案选择。

空间方面，码头面和引桥作为集卡转运装卸船集装箱的必经之路天然成为限制码头作业效率的空间瓶颈。堆场作业空间资源和龙门吊资源的有限性使得堆场

内纵路容易形成场内输运拥堵点，集卡输运效率将严重下降。通过机器学习算法的优化，智能调度系统能够实现基于时空网络的路径规划，推算拥堵点，实现线路的动态规划，从时间上避免空间上拥堵点的发生。

时间方面，依据业务生产系统提前激活的指令，不能密切衔接未完成指令按序连续性作业。码头生产作业需要提高集卡重进重出率，岸桥作业需要避免悬空箱和嵌档箱的出现。调度策略需要提前预判堆场繁忙程度，优化已有自动给位和解封场，减少堆场资源争抢。通过机器学习算法的优化，智能调度系统可以做到预估不同作业的运行时间，衔接指令之间的协同，提高重进重出，避免悬空箱和嵌档箱的产生。

梅东集装箱码头将对 1-10#泊位进行全场调度，对码头作业调度策略的优化目标包括下面几点：

(1) 提高整体作业效率和管理效率：目标是在短期内利用现有设备资源，通过自动化调度算法实现码头整体作业效率和管理效率的提升。通过动态配置堆场和桥吊资源，优化船舶分路和自动解封，实现资源之间的平衡使用。

(2) 持续优化资源配比：通过算法的持续优化提升资源配比，优化设备投入数量，确保码头在不断发展和扩张中能够高效利用资源，提高吞吐量和运营效率。

(3) 实现全场指令排程和规范统一输出：通过智能化调度，实现全场指令排程，整合堆场计划员、配载计划员、调度员、策划员和控制员的考虑规则，统一输出，从而提高整体的调度效率。

(4) 实现基于时间网络的路径规划：实现基于时间网络的路径规划，避免同一时间在空间上的拥堵点，提高作业效率。

(5) 提高核心设备效率和时效性：目标是优化核心桥吊单机效率和集卡时效，确保设备高效运转和作业的快速完成。

(6) 实现运营管理的智慧化：通过全量、实时、精准的数据感知，为港区运营管理提供智慧化辅助决策，确保港区高效有序运转。

通过以上优化目标，梅东集装箱码头将成为全域智能化集装箱码头的标杆，为其他国内国际有传统码头向智慧化码头转型提供经验和借鉴，提升梅东集装箱码头的地位和竞争力。

4.3 机器学习模型设计框架与思路

经上述业务调研和数据关联分析，发现码头机器学习算法可以选择有监督学习类方法，其中作业时长预估的输出变量为连续型数值变量，属于回归类任务。机器学习回归的思路是通过构建基于树型、多项式型或网络型的计算单元，拟合学习得到历史数据中由输入到输出的映射关系，从而将这种映射关系应用到未来的预测中，其中拟合的过程称为训练，应用到未来的过程称为预测，通过历史数

据中抽样数据集验证拟合学习效果好坏的过程称为验证。

模型的好坏主要受感知的数据范围和数据质量所影响。机器学习数据层面上流程如 4.1 所示。

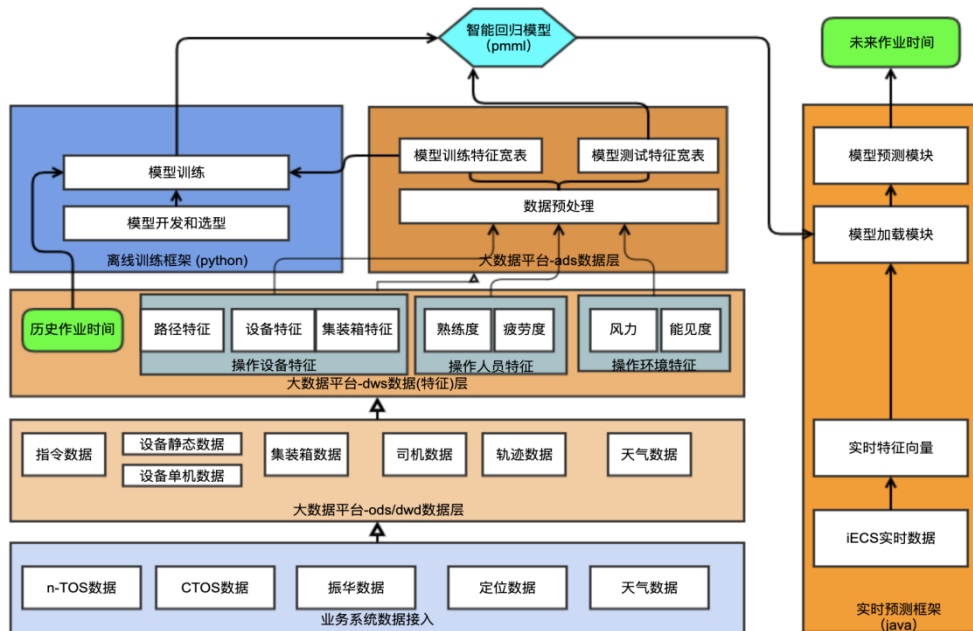


图 4.1 机器学习数据流程图

1、特征加工（dwd/dws 层）

根据各设备作业时间的影响因素从操作人员、操作设备、操作环境三个方面挖掘可能的影响因子，关联各因子构成特征宽表。特征宽表加工依赖于准确的特征仓库数据，各设备的特征仓库数据考虑的依赖数据、影响因素和具体特征宽表字段。

2、数据预处理（ads 层）

机器学习模型能够训练和预测的特征宽表均需要处理为数值类型。数据处理分为特征编码、特征工程、数据预处理三部分。特征编码的目的是将部分非数值类型的字段通过数值映射的方式加工为数值型字段，特征工程是通过对特征的合并、分裂、改造等方式将特征宽表信息加工成为能够反映模型最有效影响因素的最小子集、数据预处理是将数值型特征经过数学统计的方式处理成为满足模型训练和预测要求的特征向量，特征向量将直接参与模型训练和预测的过程。设备作业时长预估所采用的数据预处理包含：数据清洗、数据填充、特征工程、特征预处理。

3、模型开发

由于特征向量和模型参数间的正向传播和反向传播的计算涉及大量的线性代数计算，本机器学习模型的建模利用 Python 语言搭建基于机器学习智能回归算法的作业时间预估模型。

对于业务各类输入对需求的影响，采用回归模型能够将各类影响因素对需求

的影响加以利用。对于回归预测器,根据不同模型在不同数据集的表现可能不同,如作业指令这类无时序规律数据集会考虑采用机器学习的 L1/L2 正则化线性回归模型和集成模型。通常集成模型选取 XGBoost, GBDT, 随机森林等模型。

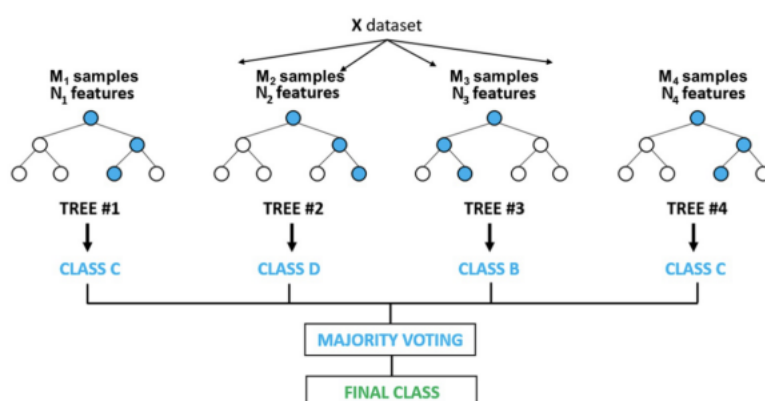


图 4.2 集成模型结构示例

在构建回归模型时,会通过取一部分历史数据作为验证集进行模型选型,选取在验证集中表现最优的模型作为最终训练模型。训练得到的模型将应用于预测集数据的预测。在可拿到真实作业时长的指令数据中可选取一部分与训练集不重合的数据作为测试集评估模型整体预估效果。

作业时长预估模型的模型离线训练和在线预测流程如图所示,通过模型标记性语言文件实现模型跨平台调用。模型离线训练模块将实现历史数据规律的挖掘和学习,模型在线预测模块将实现模型在生产中的调用和预测。

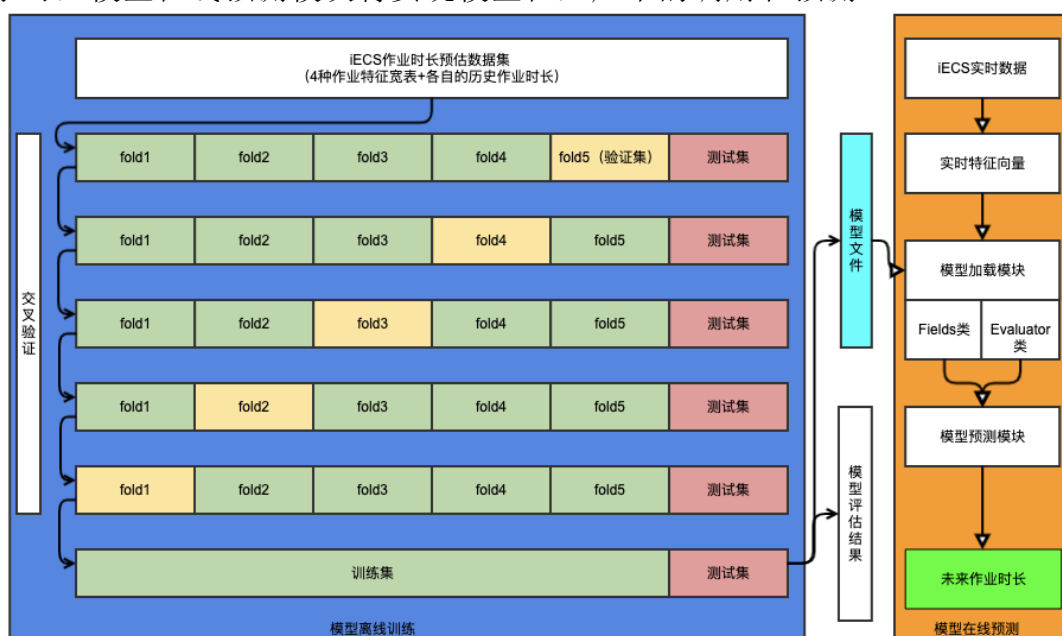


图 4.3 机器学习预估模型流程图

4、模型训练

根据训练集特征矩阵和标签矩阵训练回归预测子 Ψ_r , 选取已尝试模型中获得最佳交叉验证结果的最佳模型, 其中由最佳模型超参数构成最佳预测子 $\hat{\Psi}_r$ 。记 L

为损失函数，则由回归预测子 Ψ_r 输出的结果可表示为式（4.1）。

$$Y_{\text{train}} = \hat{\Psi}_r(X_{\text{train}}) = \operatorname{argmin} L(\Psi_r(X_{\text{train}}), Y_{\text{train}}) \quad (4.1)$$

模型训练完成后得到的模型可导出为模型文件。目前较为常用的模型标记性语言为 PMML，其主要使用 XML 来对机器学习的输入、转化、输出过程进行描述，从而使得模型可以在不同的系统之间流转。对于复杂的机器学习模型参数，模型参数的抽取过程较繁杂，使用 PMML 可以从容地处理机器学习模型跨平台调用的问题。

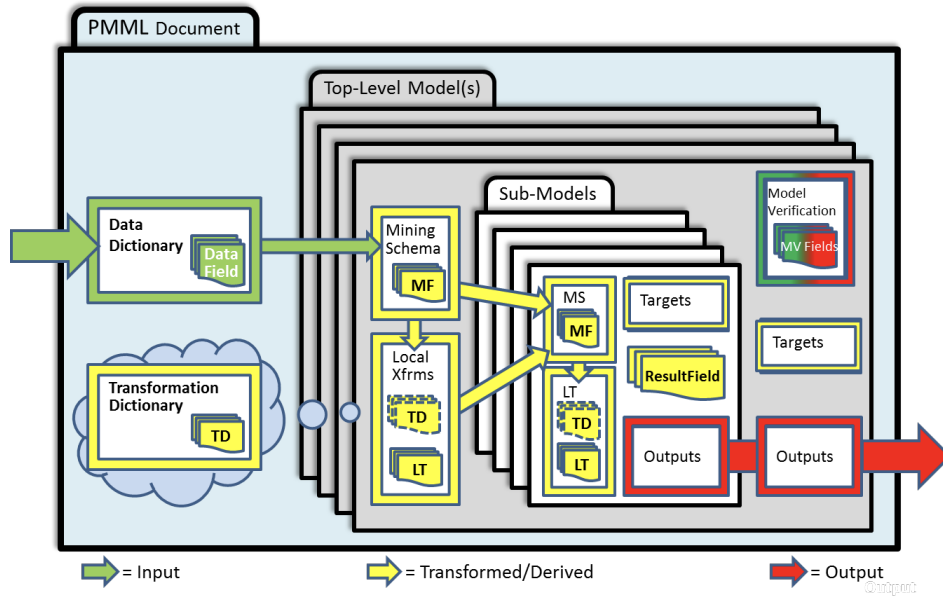


图 4.4 PMML 模块

5、模型预测

利用由模型训练得到的最佳模型超参数构成最佳预测子 $\hat{\Psi}_r$ ，对预测集各预测输入记录和特征构成的矩阵记为 X_{test} ，则预测结果为式（4.2）。

$$Y_{\text{test}} = \hat{\Psi}_r(X_{\text{test}}) \quad (4.2)$$

在各类算法的训练实验中随机森林算法的预测精度为 92.3%，高于其它三种机器学习模型，因此选择使用该模型。

4.4 机器学习调度优化策略

机器学习技术的出现为集装箱码头的作业调度策略优化提供了崭新的思路。近年来信息化技术蓬勃发展，大数据、云计算、物联网、人工智能等计算机数字化技术已经发展成熟并逐步开始向产业应用化迈进，“互联网+实体产业”成为港口物流产业寻求进一步发展的新方向。相较于其他技术早已在港口物流行业中广泛应用，以机器学习为核心的计算机人工智能技术仍有待进一步开发利用，为进一步优化码头调度策略提供新的可能。机器学习技术在集装箱码头高效调度技术的发展中具有创新性应用。依靠计算机数字化技术赋能加持，以机器学习为核心的

智能调度系统可以在很大程度上代替原有的调度员、指挥员等职务,结合大数据、云计算、物联网技术对整个集装箱码头港区进行数字化感知,以更全面视角化的维度整合统一对码头作业任务进行调度安排,能够显著提升港区对整个集装箱码头的监控感知能力,进而提升整个码头作业设备、场地、人力等资源的调配效率,达成提高集装箱码头作业运行效率和降低资源闲置率、误用率的降本增效目标,最终提升码头在港口物流行业领域的核心竞争力,具有极大的应用前景与广阔的应用空间。

4.4.1 调度策略整体架构

码头作业是一个系统性、整体性的工作,需要一个能够协调各个环节内部运作与相互协调的调度策略。码头作业的各项环节间既具有各自的内在作业规则与逻辑,又具有相互协同运作的强相关性,需要各个环节密切衔接连贯运行,以提升码头作业的整体运行效率。以机器学习技术为核心产生的调度策略可以从资源、规范、时间、空间四个方面对原有的调度策略进行优化。

资源优化方面,通过物联网技术将堆场和岸桥等设备、场地资源信息上传感知,结合已有数据库中的命令数判断堆场和岸桥的繁忙程度,可以更好的开展资源动态配置,优化船舶分路和自动封解堆场,实现码头资源之间的平衡利用。规范优化方面,以机器学习为核心的智能调度系统能够综合考虑堆场计划员、配载计划员、调度员、策划员和控制员的考虑规则,以更合理的方式实现全场的统一调度输出,很大程度避免不同人员指挥调度资源时出现的矛盾、重叠、闲置、误导等调度失误问题。

时间优化方面,通过历史大数据结合机器学习技术实现码头作业各个环节的作业时间预估功能,实现无缝衔接各个指令之间的协调协同,针对现存数据库中的诸多指令开展合理的排程工作,提高集卡重进重出的运营效率,避免出现悬空箱、嵌档箱等情况的出现。空间优化方面,机器学习调度指挥可以实现基于时空网络的路径规划,从时间上避免空间节点存在拥堵点的发生。

基于集装箱码头作业场景及业务的要求,以机器学习为核心的智能调度系统需要同时兼顾处理多个不同的码头作业工作场景的协同调度任务,包括:船舶作业分路计划安排、堆场岸桥资源调度计划、码头作业调度指令安排、平面运输路径规划选取、码头作业监控预警、码头作业时长预估。此系统能够运用机器学习算法模型进行运算,最终得到一段时间内需要协同处理的所有指令任务的最优开展方案,用于指导码头所有作业设备、场地、人力等资源开展作业工作。

本文提供一种自主研发基于机器学习技术用于处理集装箱码头多场景协同高效作业的新型调度策略架构,在整体架构上,为聚焦核心问题,从“智慧生产大脑”为核心进行演绎,为最终实现“零等待”的生产作业链,形成从“接力棒”向“并发共进”的作业模式演进。构建以下五个层次:物联感知层、大数据应用层、调度平台

层、核心算法层、可视化和验证层。各层次体系业务管理如图 4.5:



图 4.5 新型码头作业调度策略的整体架构

(1) 物联感知层。物联感知层具体分为生产设备物理感知和作业计划数据感知。生产设备物理感知按设备类型分，分为龙门吊感知、桥吊感知、集卡感知、正面吊堆高机感知、人员感知、船舶感知和生产辅助设备感知。作业计划数据感知，需要从码头业务生产系统、预约系统等系统中获得码头过去发生的、正在发生的和未来要发生的作业计划数据。

(2) 大数据应用层。依托大数据平台的能力，在平台中构建以下数据主题，实时在线计算数据：定位数据、状态数据和业务生产系统任务数据，其中定位数据包括：设备的经纬度、业务点位、速度、朝向等；状态数据包括：设备运行状态、设备运载情况、设备姿态、设备剩余油量（电量）等。大数据平台层的建设的重点是“吞”与“吐”，“吞”是指要满足高并发海量非结构化数据的存储，“吐”是指要满足应用层，一次性数据计算的要求，并能够按需输出结果。大数据平台层还具备整套系统消息总线的功能，为业务系统提供稳定的数据服务

(3) 调度平台层。调度平台层的职责是从业务生产系统中获取整个港区发生的作业任务集合，包括：装船、卸船、进箱、提箱、翻箱和移箱。任务一般包括以下数据要素：从哪里抓，到哪里放，任务派发时间，业务紧急程度等。如果发

现业务生产系统中任务有变化，需立即进行调度算法调用，将算法输出的新结果分解成设备能够理解的指令后进行下发。调度平台层还需要处理统一路径规划、统一交通管理、统一规则管理、异常管理和相关系统等协同调配问题。

（4）核心算法层。算法层包括两类算法，第一类的算法全局类算法，包括资源估算、全程排序、预警识别等；第二类算法为设备调度算法，包括：岸桥调度、龙门吊调度、流机调度、水平运输调度、辅助生产设备调度等。整套算法应该实现以下五个层次的内容：把无人车当有人车进行调度；无人车、有人车混合驾驶分段优化调度；远控设备预配合作业，并行作业时序调度；加入辅助生产设备调度；实现数字港区自动化作业调度。

（5）可视化和验证层。整个系统的人机交互界面，核心功能为任务、指令、PKI 监控，能够结合数字可视化平台进行二维或三维的可视化展示，能够将优化后的策略输出到仿真环境中进行验证。

本研究所关注的机器学习技术的创新型应用主要在核心算法层，负责根据任务指令和资源状态等输入，进行基于规则 and 智能学习的算法计算，将路径规划和任务指派等结果输出给上层调度平台，生成优化后的调度策略。

4.4.2 机器学习算法在码头调度中的应用设计

梅东集装箱码头的作业流程为非固定流水线式作业生产模式，复杂程度较高。非稳定因素的存在对生产作业的调度顺序具有较大影响。因此码头作业的智能调度算法需要具有足够的包容性和灵活性，既能兼容控制力强的场景，又能兼容控制力弱的场景。

针对梅东集装箱码头现有生产作业情况，本文提出了三层算法架构，主要包含：资源计划层、协同调度层和指令执行层。资源计划层主要实现船舶分路计划算法和资源动态配置算法。协同调度层主要实现全场指令排程算法、集卡路径规划算法、状态监控与预警算法等。指令执行层主要实现作业时间预估算法模型，包括桥吊作业时间预估、龙门吊作业时间预估、集卡作业时间预估和无人集卡剩余行驶里程和时间预估。其中，资源分配和时间预估是基于机器学习算法训练后的模型，为算法实时提供预估参数。具体层级设计如图 4.6。

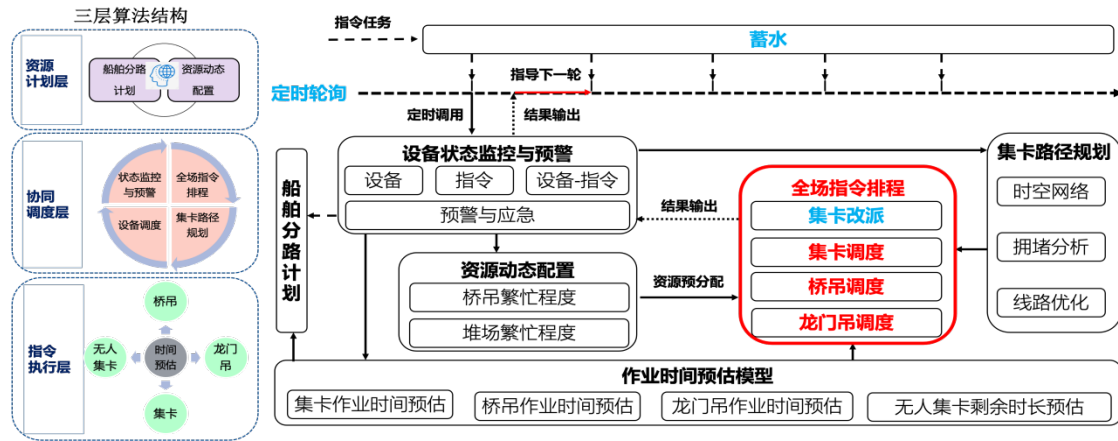


图 4.6 基于机器学习改进的码头调度算法架构

整个核心算法采用蓄水和定时轮询的方式执行。当每一轮询计算触发时，蓄水模块将码头业务生产系统新激活的指令放在蓄水池里面，然后按照时间、数量、优先级等限制因素进行未执行指令的初步排序，按照预定的筛选条件将部分未完成指令和正在执行中的指令打包调用进核心算法。核心算法内部首先会根据上一轮指令的派发结果和当前已派发指令的执行情况，计算设备和指令的当前状态。如果状态超过设定的阈值，系统将会生成预警和应急信号。然后系统将所有信息传输至船舶分路计划算法优化调整开工贝位，传输至作业时间预估算法调整指令预估时长，传输至资源动态配置算法动态调整船舶锁定集卡资源数量，传输至集卡路径规划算法调整时空路网拥堵状态。最后全场指令排程算法依据最新的资源动态配置算法计算空间资源配置、作业时长预估和集卡路径规划等，实现设备指令的派发与不同设备之间指令的衔接。如果已指派指令无法满足现状，将进行限定条件下的改派，最后将全场指令排程结果和算法预警结果一起打包返回给调用算法，重新计算。

4.4.3 改进的调度算法应用案例解析

以出口箱作业智能化调度为案例，展开讲解集装箱出口作业的全流程。出口箱业务在码头作业的主要流程包括：进港、堆放、装船。每一个业务流程环节包含许多作业细节，整个业务链条流程较长，业务管控点纷繁复杂，需要机器学习技术加持的智能调度系统进行精细化管理。以下将进口箱作业和出口箱作业的标准工况智能化调度案例分别开展讲述。

出口箱到港前需要开展资料信息收集整理工作和作业计划指定工作。资料收集需要的信息包括船舶动态信息、ETA 预报信息、出口舱单、出口船图、集装箱箱号清单等信息。作业计划的制定需要码头业务生产系统提前制定好船舶靠泊计划、卸船作业计划、堆场计划、机械设备调度计划等。

出口箱到港后需要智能调度系统根据作业计划与码头当前实时状况开展具体的作业调度。基于机器学习技术的调度策略会结合以往码头集装箱进口箱作业历

史数据与当前码头的运行状态数据，并根据业务生产系统制定完成的作业计划开展运算得到当前最优的调度方式。智能调度算法会优先将业务生产系统的指令任务信息储存到一个临时存储数据库中，间隔一段时间会将库中的指令信息进行轮询调用。同时，系统也会不间断监控码头作业设备的运行状况，由此得到桥吊和龙门吊的繁忙程度信息，并依此开展资源动态配置，随后系统会根据配置结果进行资源预分配。如何优化资源分配并下发调度指令需要运用机器学习技术。机器学习算法首先会整合当前全场需要进行调度的所有指令开展全场指令排程，将不同作业模块间的指令密切衔接，做到资源最优化使用，使得全场设备都能处于运行状况而不至于因为顺序问题导致部分设备资源需要等待其他设备。系统将排程后的指令分别下派到对应的龙门吊、集卡等主要作业设备。机器学习算法会对各个作业设备的作业方式和作业情况进行指挥和预估。系统会基于传输给集卡的作业贝位信息等预测时空网格的拥堵情况，并根据结果优化最优输运路线。系统会根据历史数据进行学习，更好的模拟预估龙门吊、集卡分别的作业时间，优化调度指令对于何时何地作业等细节信息，做到集装箱输运集卡不间断到达制定贝位与在此作业的龙门吊按需不间断将进场箱放入堆场制定位置。如果堆场存在繁忙情况，龙门吊资源可能不能满足此时的作业需求，系统会得出是否从其他场区调其他龙门吊前来支援，此外系统也会调整调度指令让其他堆场的作业集卡优先进场作业，实现灵活调度和资源最大化利用。港区堆场集装箱管理需要尽可能保证减少翻箱操作造成的龙门吊资源浪费。同时堆场管理也需要保证同一船的集装箱分散摆放又距离计划泊位相距较近，因为这样安排可以保证多台龙门吊同时作业满足装船需求。此外，先上船的集装箱应尽可能堆放在堆场上方位置以减少翻箱次数。机器学习算法可以很好地完成依据堆场管理优化的调度安排，得到根据装船计划、集装箱进箱顺序等条件计算优化后的最优进箱堆场摆放方案。

出口箱离港装船过程需要桥吊、龙门吊和内集卡的密切配合，需要优先保证桥吊的最大作业效率。船舶作业分路计划出现后，系统会预测不同贝位桥吊的作业所需时间，找到作业量最大的分路作为重点路，会优先满足重点路的作业任务，因为重点路的作业时间最终决定了装船的总时间。由于桥吊之间不能错位移动，部分贝位作业完成后需要横移相邻部分桥吊一起更换作业贝位使得桥吊不出现闲置状态，以实现桥吊资源最大化利用。这里需要系统依靠机器学习技术结合历史作业数据灵活开展调度。每个作业贝位的桥吊最优作业集卡配比同样是影响作业效率的关键因素，配比过高会导致集卡在岸桥上停留过多造成交通拥堵，反而会降低作业效率。配比过低会导致桥吊出现工作闲置的情况，违背桥吊最大效率作业原则。集卡配比安排完成后，需要规划作业集卡前往桥吊下指定贝位开展作业的路线。由于堆场和码头岸边需要通过引桥，引桥的通过效率对集卡的运输效率起到关键性影响。系统可以将集卡前往桥吊作业的路径进行优化，合理安排引桥

的通过量，以避免出现交通堵塞现象。

出口箱作业的具体作业时间可以按照上述分为进港前、到港和离港三个主要阶段，每个阶段可以不在一起连续作业。但出口箱作业也是一项系统性工作，每一步如何开展都会对接下来的步骤产生重要影响。合理运用机器学习技术对过往码头作业数据进行合理分析运算，再结合调度员、操作员等熟练工的操作经验，才能得到可以从根本上为码头作业效率带来优化的调度策略。

4.5 本章小结

本章对机器学习技术在梅东集装箱码头智慧化建设中的智能调度系统里的应用展开讲述，主要从采用相关性检验对数据关系进行了验证、机器学习在智能调度策略中的优化目标、算法模型以及创新应用案例进行详细讲述，明确阐述了机器学习技术在梅东集装箱码头新型调度策略实现过程中发挥的作用，同时结合码头自身作业特性提出了基于智能化调度策略的新型功能，为码头智能调度建设提升生产效率赋予强大动能。本章从技术目标、技术框架、技术与业务流程融合应用三个角度论证了机器学习技术在码头调度策略优化的设计框架，实现了基于机器学习技术的码头调度应用落地方案的全方位设计。

第 5 章 码头作业调度优化策略实施保障措施

5.1 信息系统升级与算法应用

5.1.1 相关信息系统接口改造

信息系统接口是在不同的软件系统、硬件设备或其他 IT 组件之间传递信息和实现交互的一种连接方式。它定义了两个或多个系统之间如何通信、交换数据和共享资源。信息系统接口有助于不同系统之间的协作和集成,以实现数据共享、功能扩展和系统互操作性。

信息系统接口可以包括以下几个方面的定义:数据接口。定义了如何传递数据和信息。这包括数据的格式、协议和传输方式。例如,使用 RESTful API、SOAP 协议、JSON 或 XML 格式进行数据交换;功能接口。定义了系统之间如何调用和使用彼此的功能。这通常涉及到接口方法、参数、返回值和异常处理等方面。例如,通过函数调用或远程过程调用(RPC)实现功能的共享和调用;信息系统接口的定义需要清晰地描述各个接口的功能、规范和使用方法。这有助于不同系统开发者理解和实现接口的集成,并确保系统之间的有效通信和协作。本系统的通用接口定义如附录表 B1,各系统间的交互接口设计清单具体如附录表 B2。

5.1.2 系统的软硬件需求

算法程序部署往往需要满足一些通用的软硬件需求,需要部署一套虚拟化的服务器系统和一套监控系统可以实时查看监控算法服务器部署服务器的 CPU 占用、内存占用、运行状态等硬件指标。

处理器(CPU):服务器计算资源要求为 265 核。

内存(RAM):528GB 以上。

存储设备:20TB 以上。

操作系统:需要选择适合算法开发和执行的操作系统,如 Windows、Linux 等。操作系统的选择也可能会受到算法程序所需的依赖库和开发工具的限制。

并行处理:使用支持并行计算的硬件设备,如图形处理器(GPU)或专用加速器(如 FPGA)。

5.1.3 数据库设计

数据共分为三种类型:离线数据、实时数据、基础数据。

其中离线数据存放在大数据平台上,包含各类感知和业务系统等数据。为时间预估模型提供特征数据、为设备的数据指标提供计算所需数据、为基础数据提供数据基础。

实时数据存放在 Redis 数据库中，包括缓存的基础数据、静态参数、打标数据（箱表、队列、池、集卡、人员、船舶、箱区、桥吊、龙门吊、指令）、指标数据（桥吊效率、龙门吊小时作业量、集卡时效）、路径数据（电子围栏、路段、距离）、设备数据（桥吊、龙门吊）、集卡 GPS（外集卡、内集卡）、各算法模块输出结果数据。

基础数据存放在 Mysql 数据库中，部分数据根据梅山提供的数据文件，手动入库，如电子围栏、内集卡等明细信息（车牌号与编号的映射关系）；另一部分是从大数据平台同步的基础信息，包括：设备数据指标、引桥基础基础信息、泊位基础信息、桥吊基础信息、龙门吊基础信息、船舶基础信息、工作人员基础信息等。

5.2 仿真测试与效果验证

为验证系统设计的有效性，借助 flexsim 仿真平台对梅东集装箱码头近期的十条船舶进行仿真并与实际生产对比，借助码头指标对效果进行量化评价。

（1）船时效率

船时效率计算公式为：船时效率 = 船舶总箱量（作业量）/（船舶完工时间-船舶开工时间），单位吊/时。

通过生产仿真与人工实际作业对比，发现算法仿真优于人工调度，这验证了算法的能力符合生产优化的目标。但人工调度的上限高于算法调度，其中主要是由于资源分配的不合理造成的，人工调度往往会有偏好，因此设备资源分配会有偏向。具体数据如表 5.1。

表 5.1 船时效率数据表

调度模式	最大值	最小值	平均值
算法仿真	180.36	94.93	134.42
实际生产	191.48	61.34	126.61

（2）设备效率

设备效率计算公式为：设备时效 = 总箱量（作业量）/作业时间（结束时间-开始时间），单位吊/时。

通过生产仿真与人工实际作业对比，发现算法调度整体优于人工实际调度，这说明算法的能力整体可靠。通过算法对资源的合理使用和调度顺序的优化，实现了生产作业的更优化，缓解了生产拥堵等问题。具体数据如表 5.2。

表 5.2 设备效率数据表

设备	最大值	最小值	平均值
桥吊时效（仿真）	26.4	20.2	24.3
桥吊时效（实际生产）	28.3	18.9	22.3
龙门吊时效（仿真）	9.20	8.32	8.85
龙门吊时效（实际生产）	9.14	8.31	8.72
集卡时效（仿真）	2.97	2.63	2.81

集卡时效（实际生产）	2.87	2.56	2.68
------------	------	------	------

（3）设备间的等待时间

设备等待时间=装卸作业完成时间-集卡到达时间，单位为分钟。

通过生产仿真与人工实际作业对比，发现人工作业等待的平均时间为 6.5 分钟，仿真的结果为 5.2 分钟。虽然我们在调度层面增加了时间窗以减少设备间的互相等待时间，但是生产作业中设备往往是不足的，无法实现设备同时空闲或者设备间的同步到达。同时作业任务地点的冲突也会产生设备互相等待时间，这个是作业环境造成的，通过调度不可能完全消除。但是等待时间的降低侧面说明了调度算法的有效性。

（4）集卡通过时间

集卡通过时间指集卡在堆场、码头面、引桥、泊位四个空间的作业和行驶时间和，单位为分钟。

通过仿真实验数据与人工调度历史数据对比，可以发现改进后调度系统的集卡各空间通过时间明显减少，集卡的单循环通过时间降低为 0.158，即集卡效率提升 15.8%。其中，仿真实验的箱区通过时间对比人工调度下降 16%，表明集卡与场地装卸设备的互相等待明显降低，这说明预估到达时间精准度高于人工，场地装卸设备可以提前达到作业位置，降低了集卡在箱区的等待时间，设备配合衔接水平明显提升；仿真实验的码头面通过时间对比人工调度下降约 6%，这主要是由于码头面的作业设备移动较少，因此配合优化的空间较小，所以优化空间小提升困难；仿真实验的引桥通过时间对比人工调度下降 14%，集卡到达引桥的排队长度降低，表明集卡到达引桥队伍序列更有序，集卡全场指令排程效果明显。仿真实验的道路通过时间对比人工调度下降 27%，这主要是由于改进后的调度系统采用了全场集卡调度模式，集卡上一任务完成后可以接到就近的任务，对比人工调度模式任务选择范围更大，因此集卡行驶时间大幅降低。具体数据如表 5.3。

表 5.3 集卡通过时间数据表

通过时间	第一次仿真	第二次仿真	第三次仿真	人工调度均值	降低比例
堆场	5.69	6.17	5.86	7.04	-0.16
码头面	9.04	8.85	11.54	10.47	-0.06
引桥	3.54	3.33	3.01	3.84	-0.14
泊位	5.83	6.28	5.38	7.97	-0.27

5.3 码头经营管理保障

5.3.1 构建智慧化管理体系

（1）制定并持续更新智慧化发展战略规划。智能化发展需要有长远的战略规划，从集装箱码头经营管理的角度，应在全面考虑梅东集装箱码头当前运营情况、行业发展趋势、技术创新等多方面因素的基础上，制定全面、清晰、可行的智慧化发展战略，明确梅东集装箱码头智慧化发展的目标、定位、竞争优势、规划资

源、实施步骤等，并定期更新和升级战略规划，以适应市场竞争环境和技术发展的变化。

(2) 构建与智慧运营匹配的组织架构。有别于传统集装箱码头，智慧化集装箱码头在组织架构、人员配置、权责分配、管理规范等管理体系方面需根据其智慧化运营特点，建立有效的组织关系、运行机制和完善的管理规范，以实现有效地规划、组织、执行和控制智慧化项目建设和运营。在梅东集装箱码头现有组织架构的基础上，结合智慧化运营需求，优化调整公司组织架构，成立专职负责信息化、智慧化发展的部门，为梅东集装箱码头智慧化可持续化建设、运营提供组织保障。

(3) 运用数字化手段提升管理水平。智慧化集装箱码头要加强数字化建设，利于数字化手段加强运营管理，通过数据分析和信息共享可以实现整个作业流程优化，提升运营效率和准确性。同时，智慧码头要关注环保和绿色建设，采用新能源和清洁技术降低环境污染和能源消耗，同时还要注重社会责任和可持续发展。

5.3.2 建设复合型人才团队

为保证梅东集装箱码头智慧化建设稳步推进，需要大量熟悉机器学习技术的复合型人才参与建设。本文针对相关复合型人才的组织构建工作提出保障性建议。

(1) 改进和创新人才评价方式。创新多元评价方式。按照社会和业内认可的要求，建立以同行评价为基础的业内评价机制，注重引入市场评价和社会评价，发挥多元评价主体作用。科学设置人才评价周期。遵循不同类型人才成长发展规律，科学合理设置评价考核周期，注重过程评价和结果评价、短期评价和长期评价相结合，克服评价考核过于频繁的倾向。探索实施聘期评价制度。

(2) 加快改革分领域人才评价制度。实行代表性成果评价，突出评价研究成果质量、原创价值和对企业创新发展的实际贡献。改变片面将论文、专利、项目、经费数量等与科技人才评价直接挂钩的做法，建立并实施有利于科技人才潜心研究和创新的评价制度。分专业领域建立健全工程技术人才评价标准，着力解决评价标准过于追求学术化问题，重点评价其掌握必备专业理论知识和解决工程技术难题、技术创造发明、技术推广应用、工程设计、工艺流程标准开发等实际能力和业绩。健全以职业能力为导向、以工作业绩为重点、注重职业道德和知识水平的技能人才评价体系。

5.3.3 加强与外部优质资源的合作交流

加强与码头外部优质资源的合作交流，能够为梅东码头智慧化建设提供技术创新、共享资源、行业合作和品牌提升等诸多益处，有利于推动码头智慧化建设的顺利进行。

(1) 加强与先进港口企业的沟通交流。要加强与国内先进港口企业的沟通交

流,学习其先进经验和创新思维,开阔智慧化发展、数字化应用的视野,汲取灵感,结合梅东集装箱码头的实际需求和条件限制,寻找可借鉴、融合应用的案例和技术方法,为梅东集装箱码头自动化、智慧化等相关设计带来新思路。

(2) 加强行业合作与经验分享。积极与码头外部优质资源合作交流,拓展与行业内其他机构的合作关系,共同参与行业标准制定、规划和政策研究。借助来自不同的行业背景的合作伙伴带来不同的视角和经验,促进码头智慧化建设中的最佳实践和经验分享,提高建设的可行性和可持续性。

(3) 积极与科研单位合作交流。积极与国内一流高校、科研院所和优质科技企业等交流沟通,建立良好的沟通渠道,合作成立智慧港口相关专题研究中心,通过建立共享平台、合作研发项目等形式,共享双方的专业知识、经验和资源,以开放的思维和创新的方法,共同探索解决行业难题的新思路 and 方案。

5.3.4 建立持续学习和创新的机制

在快速变化的市场环境下,创新和变革管理是企业持续发展的重要驱动力。在信息化技术迅速发展的背景下,智慧化码头的需要建立创新机制,推动技术和业务创新,以适应行业发展趋势。

(1) 建立创新发展机制。智能化发展离不开技术和业务创新,要营造一种鼓励创新的文化氛围,建立创新激励机制,鼓励码头员工结合自身工作感受提出改进和创新的想法和建议,鼓励跨部门和跨领域的交流合作有助于促进创新的萌芽和实现。注重培养员工的创新意识,建立与实际业务相关的培训课程和技能培训,提高员工的创新意识和技能水平。要积极关注市场上的新技术和新方法,找到适合集装箱码头的创新路径,结合实际业务应用场景和需求,形成具有有效性和实用性的创新成果。

(2) 建立创新容错机制。建立创新容错机制可以帮助企业鼓励探索性的创新,并允许员工在创新的过程中可能存在的失误和错误中学习和成长。建立一种容错的文化氛围,允许员工尝试新的方法、新的想法,鼓励员工尝试创新,共同推动集装箱码头技术、业务、管理等多方面的创新发展。

5.3.5 强化码头与航运链上下游的协同联动

(1) 构建多式联运智慧服务体系。以物流数字生态为导向,以集装箱码头全业务流程数字化建设为核心支撑点,建立多式联运智慧服务平台,打造公铁水多式联运物流数据交互枢纽,打通海铁联运、海河联运、内支中转、陆路集运等物流运输方式信息流,构建多式联运智慧服务平台,在宁波舟山港域内为船公司、货主、货代、铁路、集卡车队等主体提供“一码预约、一单到底、一站联运、一路可视”的全方位服务。

(2) 建立口岸协同管理机制。建立口岸业务协同管理平台,为码头、海关、

边检等多方提供航运物流信息共享、联合办公、远程会议等服务，实现口岸各方实时的信息交流和合作决策。建立全面、及时、准确的信息共享机制，确保各方共享的航运信息及时可靠，包括货物信息、船舶信息、仓储信息、报关信息等，通过建设统一的数据平台，各个口岸能够共享相关信息，避免信息断档和信息重复录入，提高办理效率。建立口岸监管流程协同机制，整合各个监管流程，包括检验检疫、海关查验、物流运输等，各个环节的工作人员应通过信息系统共享数据，共同参与流程的规划和优化，实现高效、协同的口岸作业。

结论与展望

随着现代信息化技术的迅速发展，港口的智能化发展建设日益广泛和深入，应用人工智能和运筹学等技术对码头生产调度策略的优化应用案例越来越丰富。本文以梅东集装箱码头为对象，利用统计分析方法发现了集装箱码头生产调度存在的主要问题，并以此为切入点开展调度优化研究，应用机器学习方法对码头调度策略进行了优化改进，同时提出一系列管理保障措施，经仿真验证本文所设计的调度优化模型可行有效，对国内外集装箱码头调度优化具有一定的借鉴意义。

本文的主要研究过程和成果如下：（1）通过调研发现设备间的互相等待导致业务流程衔接不顺畅和设备调度时资源分配不均衡导致设备使用率低是影响当前码头生产效率的主要问题；通过数据定性分析和统计学相关性分析方法得出：集卡运行路程等 11 个重要因素是与上述两个主要问题具有相关性；经过研究分析，确定了集卡设备路程时间和作业设备资源分配 2 个调度优化切入点。（2）基于梅东集装箱码头大数据平台，设计了一套数据清洗、降噪、特征工程、模型训练到模型调用的流程框架；基于梅东集装箱码头的信息化现状，设计了一套数据实时预测框架。（3）基于集卡设备路程时间机器学习模型，加入全场调度指令的计划排程，实现了设备间衔接的优化，降低了互相等待时间；基于作业设备资源投入机器学习模型，按照最大化全局效率对资源进行分配，提升了设备的利用效率；通过出口箱案例分析了这两个模型在调度过程中起到的作用。（4）设计了一套包括业务系统改进方案、算法交互等内容的技术保障体系，提出智慧化管理、人才培养等一系列管理保障措施。

此外，本研究尚存在以下不足之处：（1）研究方法的存在一定的局限性，本文研究方法来自于生产作业参与者的经验，数理统计方法仅限于验证经验的有效性，对于数据内部的相关因素的理论研究存在不足。（2）对于业务流程本身的改造不足。在整体调度模型中本研究仅增加了时间这一个维度，优化的是设备间的衔接等待问题，未对作业场景进行全盘考虑。针对以上不足，后续将进一步开展深入研究，实现更大的研究成果。

参考文献

- [1]Yuanchang Xie, Nathan Huynh. Kernel-Based Machine Learning Models for Predicting Daily Truck Volume at Seaport Terminals[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(12).
- [2]Kim Jae Hun, Kim Juyeon, Lee Gunwoo, Park Juneyoung. Machine Learning-Based Models for Accident Prediction at a Korean Container Port[J]. Sustainability, 2021, 13(16).
- [3] Weibin Zhang, Yajie Zou, Jinjun Tang, John Ash, Yinhai Wang. Short-term prediction of vehicle waiting queue at ferry terminal based on machine learning method[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2016, 21(4).
- [4]周强, 肖矫矫, 陶德馨.集装箱码头前沿交通流模型研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005(04):487-490.
- [5]俞涛, 潘文献.集装箱码头集卡作业效率影响因素分析[J].黑龙江科技信息, 2013(12):5.
- [6]李靖逵, 张壮.集装箱码头岸边装卸效率提升策略[J].集装箱化, 2017, 28(03):11-14.DOI:10.13340/j.cont.2017.03.003.
- [7]卢靖雯.集装箱码头装卸作业效率影响因素分析[J].珠江水运, 2019(01):86-87.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2019.01.040.
- [8]高玮. 基于 WITNESS 的集装箱码头物流系统建模与仿真[D].武汉理工大学, 2003.
- [9]周瑞. 港口集装箱物流系统建模及仿真相关技术研究[D].武汉理工大学, 2009.
- [10]于剑侠. 集装箱集港效率影响因素分析及解决办法研究[D].大连海事大学, 2013.
- [11]赖文光.港口拥堵产生的原因及建议[J].中国港口, 2017(09):14-16.
- [12]杜晔, 赵一飞.以决策树算法分类预测社会集卡码头作业状态[J].工业工程与管理, 2021, 26(01):183-190.DOI:10.19495/j.cnki.1007-5429.2021.01.022.
- [13]Ron C. Chiang. Contention-aware container placement strategy for docker swarm with machine learning based clustering algorithms[J]. Cluster Computing, 2020(prepublish).
- [14]郝聚民, 纪卓尚, 戴寅生, 林焰.集装箱船舶实配过程的遗传算法解决策略[J].中国造船, 1999(03):8-15.
- [15]张维英, 林焰, 纪卓尚, 邓林义.集装箱船舶配载方案评价的 Hopfield 神经网络模型[J].大连海事大学学报, 2005(03):13-16.DOI:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2005.03.004.
- [16]车鉴. 集装箱船舶配载计划优化研究[D].上海交通大学, 2008.
- [17]刘志雄, 颜家岚, 张煜.集装箱船舶贝内配载和堆场装船顺序协调优化[J].交通运输系统工程与信息, 2019, 19(06):223-230.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2019.06.032.
- [18]郝聚民, 纪卓尚, 林焰.混合顺序作业堆场 BAY 优化模型[J].大连理工大学学报, 2000(01):102-105.
- [19]李建忠. 集装箱港口堆场资源配置问题研究[D].上海海事大学, 2005.

- [20]刘丰硕. 基于装卸协调作业的集装箱码头集卡路径优化研究[D].大连海事大学, 2010.
- [21]赵金楼, 黄金虎, 刘馨, 高宏玉.考虑燃料成本的集装箱码头集卡路径优化[J].哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(12):1985-1990.
- [22]Alan Dávila de León, Eduardo Lalla-Ruiz, Belén Melián-Batista, J. Marcos Moreno-Vega. A Machine Learning-based system for berth scheduling at bulk terminals[J]. Expert Systems With Applications, 2017, 87.
- [23]赵苏. 基于最优作业路效率的出口箱场区分配研究[D].清华大学, 2007.
- [24]张莉. 基于排队网络理论的集装箱码头设备配置优化研究[D].同济大学, 2007.
- [25]计明军, 靳志宏.集装箱码头集卡与岸桥协调调度优化[J].复旦学报(自然科学版), 2007(04):476-480+488.DOI:10.15943/j.cnki.fdxh-jns.2007.04.003.
- [26]钱继锋. 集装箱码头“岸桥—集卡—堆场”作业计划的优化[D].北京交通大学, 2014.
- [27]徐皖东. 基于多源信息的集装箱码头泊位—岸桥联合调度方法研究 [D].宁波大学, 2022.
- [28]白天舒. 集装箱码头装卸系统及调度优化[D].大连海事大学, 2016.
- [29]Chatterjee Indranath, Cho Gyusung. Port Container Terminal Quay Crane Allocation Based on Simulation and Machine Learning Method[J]. Sensors and Materials, 2022, 34(2).
- [30]Machine Learning; Studies from Bandung Institute of Technology in the Area of Machine Learning Described (Discrete-event Systems Modeling and the Model Predictive Allocation Algorithm for Integrated Berth and Quay Crane Allocation)[J]. Journal of Robotics & Machine Learning, 2020.
- [31]Cristiane F,Gonçalo F,Pedro A, et al. Scheduling wagons to unload in bulk cargo ports with uncertain processing times[J]. Computers and Operations Research,2023,160.
- [32]Danilo R C S,Oliveira D C B J S,Pedro R L, et al. A solution framework for the integrated periodic supply vessel planning and port scheduling in oil and gas supply logistics[J]. Optimization and Engineering,2022,24(2).
- [33]孙羽, 汪沛.无人驾驶技术在未来智慧港口的应用[J].珠江水运, 2019(23):5-7.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2019.23.002.
- [34]侯珏, 李庆祥.基于支持向量机的码头节能减排预警[J].中国航海, 2016, 39(04):108-112.
- [35]王冰. 基于多目标遗传算法的散杂货港口船舶调度系统研究[D].北京交通大学,2014.
- [36]杨神化,施朝健,关克平等.基于 MAS 和 SHS 智能港口交通流模拟系统的开发与应用[J].系统仿真学报,2007(02):289-292+299.
- [37]王宁宁,施灿涛,索伟岚.基于启发式规则的散杂货港口泊位调度研究[J].北京信息科技大学学报(自然科学版),2019,34(03):16-22.DOI:10.16508/j.cnki.11-5866/n.2019.03.004.
- [38]杨鹏南,侯贵宾,赵谓博等.港口生产调度大数据分析平台[J].港口科技,2017(05):22-25+30.
- [39]黄晓波. 考虑碳排放的港口装卸设备路径优化问题[D].天津大学,2018.
- [40]刘佳. 基于头脑风暴算法的集卡调度与箱位分配问题研究[D].深圳大学,2019.

- [41]谢屏楠. 粒子群算法在港口泊位调度中的应用[D].燕山大学,2018.
- [42]李凡. 基于 SPEA2 的多目标 AGV-岸吊调度优化研究 [D]. 山东科技大学,2020.DOI:10.27275/d.cnki.gsdku.2018.000350.

附录 B 附件

表 B1 接口格式样例

	InterfaceName	Strin	接口名	
	Timestamp	g Strin	时间戳	yyyy-MM-dd
	ID	g int	消息编号	hh:mm:ss
	Data	Strin		回复请求时 ID 一致

表 B2 全部接口清单样例

数据来源	数据分类	字段	数据类型
状态监控与预警-指令	指令数据	指令 ID 指令时间 距离外集卡集中开港时间 指令名 龙门吊 ID 桥吊 ID 泊位 ID 船舶 ID 指令类型（装船、卸船、卸舱盖板、装舱盖板） 集装箱 ID 集卡 ID 是否调箱门 是否到锁亭开解锁 是否解捆 是否为远程操控 是否为双箱操作（双箱标志） 是否翻箱 箱位数据 舱盖板对应贝位列信息	String String Double String String String String String String String Boolean Boolean Boolean Boolean Boolean String List<int>
状态监控与预警-状态监控-桥吊	桥吊数据	司机 ID 泊位 ID、桥吊 ID 泊位名 作业线 ID	String String String String
状态监控与预警-船舶	船舶数据	岸边桥吊作业车道 ID 船舶 ID 船舶方向 经营公司 船舶结构（生活舱、烟囱位置）	String String String String String

状态监控与预警- 状态监控-桥吊	桥吊数据	桥吊 ID 桥吊类型 操作类型 桥吊高度	String String String Double
状态监控与预警- 状态监控-龙门吊	龙门吊数据	龙门吊 ID 龙门吊类型（远控、人工） 过街转场时间 跑大车准备时间	String String Double Double
状态监控与预警- 指令	集装箱数据	集装箱 ID 集装箱类型（普通箱、危险品箱、 冷冻箱、油罐箱、超限箱、悬空 箱、嵌挡箱等），类型编码越细越 全越好 集装箱尺寸（20FT、40FT、其 它） 重量 超高高度 超限箱标记	String Double Double String
状态监控与预警- 集卡	集卡数据	集卡 ID 集卡名 集卡类型（内集卡、外集卡、无人 集卡） 集卡位置 无人集卡电池年限 无人集卡电池电量	String String String String Integer Double
状态监控与预警- 基础数据	司机数据	司机 ID、工作类型、熟练度、疲 劳度、交接班时间 未来天气时刻 T（若 T>24h, T=24）	String String
状态监控与预警- 基础数据	天气数据	天气类型（雪天、雾天、雷雨） （T） 温度（影响智能集卡待机时间） 能见度（T） 风力等级（T）	String Double Integer Integer
状态监控与预警- 指令	箱位数据	箱位 ID 贝位 ID 坐标	String String List<Double>
平面运输路径规 划	路段数据	路段 id 速度 流量	String Double Double
状态监控与预警- 基础数据		路段默认速度、路段长度、剩余路 段长度	Double