

装船机运行效率提升与优化研究

韦凯匀 苏亥俊

北部湾港防城港码头有限公司, 广西 防城港 538000

[摘要]装船机是散货码头装船作业的主要设备,它的工作效率直接影响到码头的吞吐量和经济效益。目前我国散货码头装船机运行还存在着作业循环时间长、多机构协同控制精度不高、供料系统流速匹配不好等状况,从而影响到整个运行效率的提高。文章在系统整理装船机运行效率现状和瓶颈之后,创建起装船作业循环时序解析模型,还做了关键影响因素的敏感性分析。因此从装船工艺路径和移舱策略优化、俯仰回转和伸缩机构协同控制、供料系统流速匹配和缓冲容量优化、智能辅助决策和远程操控提升四个方面给出系统性的改进措施。最后从实施原则和总体流程、装备可靠性保障、作业标准化和人员技能提升、运行数据驱动的迭代优化机制等几个方面来建立优化实施的保障体系,为散货码头装船机运行效率的持续改善提供理论依据和实践借鉴。

[关键词]装船机;运行效率;时序解析模型;协同控制;智能优化

DOI: 10.64635/ja.2026.1206

中图分类号: U653.928+1

文献标识码: A

Research on the Improvement and Optimization of Ship Loader Operating Efficiency

Wei Kaiyun, Su Haijun

Beibu Gulf Port Fangchenggang Terminal Co., Ltd., Fangchenggang, Guangxi 538000, China

Abstract: Ship loaders are the main equipment used for loading operations at bulk cargo terminals, and their operating efficiency directly affects terminal throughput and economic benefits. At present, ship loader operations at bulk cargo terminals in China still face problems such as long operating cycle times, insufficient coordination control accuracy among multiple mechanisms, and poor flow-rate matching in the feeding system, which restrict the improvement of overall operating efficiency. After systematically reviewing the current operating efficiency and bottlenecks of ship loaders, this paper establishes a time-sequence analysis model for ship loading operation cycles and conducts a sensitivity analysis of key influencing factors. Accordingly, systematic improvement measures are proposed from four aspects: optimization of ship loading process routes and hatch-shifting strategies, coordinated control of luffing, slewing, and telescopic mechanisms, flow-rate matching and buffer capacity optimization of the feeding system, and enhancement of intelligent decision support and remote operation. Finally, an implementation guarantee system for optimization is established from several aspects, including implementation principles and overall procedures, equipment reliability assurance, operation standardization and personnel skill improvement, and an iterative optimization mechanism driven by operating data. The study provides theoretical basis and practical reference for the continuous improvement of ship loader operating efficiency at bulk cargo terminals.

Keywords: ship loader; operating efficiency; time-sequence analysis model; coordinated control; intelligent optimization

引言

装船机是大宗散货码头实现物料由堆场到船舶高效转运的设备。伴随着全球贸易量增大、港口吞吐量上升,散货码头对于装船机的运行效率也有了更高的要求。装船机运行效率同单船作业时间、泊位利用率有直接联系,也对港口综合运营成本和市场竞争力造成影响。近些年来,国内港口对于装船机的智能化改造取得了明显成果,智能远程操控系统的部署使得港口整体运行效率提高 30%左

右,部分港口装船效率比原来提高了 33%。但是从系统工程的角度来看,装船机运行效率的提高不能单靠某一项技术的改进来实现,必须从作业时序解析、机构协同控制、供料系统优化、智能化决策等各个方面入手,才能取得系统性的突破。

1 装船机运行效率现状及瓶颈分析

目前我国散货码头装船机运行效率总体上呈上升趋势,但是各个港口、各个机型之间存在较大的差别。以本

公司化肥装船作业为例，装船机实际作业效率约为 2000t/h，而部分中小内河港口同类设备效率仅为 800~1300t/h。制约装船机运行效率提高的瓶颈主要有以下几方面。其一，作业循环中非增值时间占比大。装船作业包含装料、移舱、等待信号等环节，各个环节的衔接常常会出现空档期。装船机等待“允许移舱”信号时间过长，是造成效率损失的主要问题。在传统的操作方式里，移舱要经过指挥手告知中控调度、调度告知现场指导员、指导员确认并反馈调度、调度再通知司机移机这样的冗长信息链条，单次移舱的沟通环节多、时间长，大大影响了整体的效率。另外化肥遇雨不能装船，雨季经常打开舱门造成非作业时间增多，雨后复工时需要排水、流程检查等一系列准备工作，使作业效率阶段性下降。其二，多机构协同控制的精度和响应速度不够。装船机具有臂架俯仰、回转、伸缩和大车行走等动作，作业时经常要联动配合。但是传统的电控系统各个机构控制是相对独立的，没有根据实时工况进行协同优化，造成物料落点控制不准、装船不均匀，进而产生船舶偏载的风险，需要反复调整作业姿态，增加作业时间。第三，供料系统流速与装船机能力不相匹配。装船机的效率受上游给料速度和稳定性的影响。皮带输送机流速波动、筒仓下料不连续、转接环节衔接不畅都会造成装船机空转等待或者瞬间过载。部分港口供料系统的缓冲容量不够，不能平抑短时的波动，造成实际运行效率远低于额定能力。第四，人工操作依赖度高，操作品质参差不齐。装船作业效率和安全都完全取决于司机和舱口指挥

工的熟练程度以及配合默契程度。不同的司机操作水平直接表现为效率的波动，长时间高强度的工作中，操作人员的注意力以及反应速度很难一直维持在最佳状态。

2 装船机运行效率的解析模型与评价

2.1 装船作业循环时序解析模型

为了定量分析装船机运行效率的影响因素，本文建立了装船作业循环时序解析模型。装船作业过程可以分解成若干个具有先后时序关系的作业单元，单个船舱的装船作业循环时间 T 可以表示为 $T= T_1+T_2+T_3+T_4+T_5$ 。式中 T_1 为装料准备时间，包括装船机就位、溜筒下降、舱盖开关（雨季作业时，因阵雨频繁开关舱门，此项耗时尤为突出）等； T_2 为连续装料时间； T_3 为物料换向和等待时间； T_4 为移舱时间； T_5 为作业收尾时间，在雨后复工或特殊工况下，还需涵盖设备检查与流程恢复时间。 T_2 是由舱容和装船机的有效作业速度所决定的，是有效作业时间，其余四项是非装料时间，是效率优化的主要方向^[1]。

以黄骅港三期筒仓到装船机作业流程为例，在流程衔接布置中，核心就是准确计算装船机给料时间、移舱时间和停料时间的预算，根据流程作业特点设置筒仓的给料时刻，缩短装船机移舱过程中提前上料的空档期。该模型清楚地显示出各个时间段的组成以及相互制约的关系，给效率的改善提供了一个定量分析的框架。

2.2 效率影响因素的敏感性分析

根据时序解析模型，对影响装船机运行效率的各种因素做敏感性分析，结果见表 1。

表 1 装船机运行效率影响因素敏感性分析

影响因素	影响环节	敏感性等级	优化潜力	备注
移舱信号响应时间	T_4	高	大	信号延迟直接增加等待时间
供料流速稳定性	T_2 、 T_3	高	大	流速波动影响连续装料时间
臂架协同控制精度	T_1 、 T_4	中	中	影响就位速度与移舱效率
操作人员熟练度	T_1 、 T_4 、 T_5	中	中	经验差异导致效率波动
缓冲仓容量	T_3	中高	较大	缓冲不足导致频繁启停
船型与舱口布局	T_4	低	小	受外部因素制约

表中农可以发现响应时间和供料流速稳定性对响应时间影响最大，在优化策略中应该先考虑。臂架协同控制精度、缓冲仓容量属于中等偏高敏感度，用技术手段可以取得较为明显的改善。船型和舱口布置属于外部给定条件，优化空间小。

3 装船机运行效率系统性优化策略

3.1 装船工艺路径与移舱策略优化

装船工艺路径规划会直接牵涉到作业循环时间，改良

要从削减移舱次数和缩减单次移舱时间这两个方面一起推进。按照船舶舱位布置及装船机作业范围来制订最佳的装舱顺序，从而使得大车行走距离最短。采用对称式装舱方式，按照舱位中心对称依次装载，减少大车无效往返。

从移舱策略上来说，增加提前移舱、提前完成的信号可以有效地缩短移舱时间。传统流程中装船机要等当前舱装完并收到“允许移舱”信号之后才能开始移舱。优化解锁逻辑，在装料将要结束时就发出“提前移舱”的信号，

使装船机提前进入移舱准备状态,移舱时间可以缩短 20%~30%。装船机自动控制提前上料技术应用之后,改善了取装设备联锁逻辑,实现了自动控制提前上料,减少了流程空转等待时间。

3.2 大车、俯仰及伸缩机构协同控制

装船机大车、俯仰和伸缩机构属于实现物料精确落料的主要执行部分。传统的控制方式下各个机构都是独立的手动操作,容易造成动作衔接不好、落料点偏差大、运行效率低等状况。协同控制把大车运行、臂架俯仰、伸缩动作作为一个整体来规划,以目标落料点为控制目标,对各个机构的运行轨迹、速度进行联合优化,使多机构同步协调运行,避免出现某个机构提前到位而其他机构等待的情况。控制精度上用伺服驱动系统和位置闭环反馈控制可以将俯仰控制精度提高到 $\pm 0.5^\circ$,伸缩定位精度控制在厘米级以内,结合激光测距、料位检测技术,对船舱内物料堆积情况进行实时监测,动态调节各个机构的参数,实现落料点的自动修正,提高装船效率,减少撒料。

3.3 供料系统流速匹配与缓冲容量优化

供料系统流速稳定性和缓冲容量直接影响到装船机是否能在额定速度下连续工作,优化可以从流速匹配、缓冲扩容、自动给料三个方面着手。在流速匹配上,利用变频调速技术对皮带输送机进行精确的调节,保证供料流速和装船机臂架皮带输送能力相适应,防止出现物料堆积或者断料的情况。枝城港将皮带机输送带宽由原来的 1m 增加到现在的 1.2m,并且采用了变频控制方式,使得散货的输送更加稳定,装船速度达到了 800t/h,比以前提高了 33%。在缓冲容量的优化上,在供料系统中增加中间缓冲仓,用蓄料的能力来平抑上游给料的波动,保证装船机连续稳定的作业。合理的缓冲仓容量设计要综合考虑给料的波动幅度、装船机的额定速率和允许的启停频率等各方面因素^[2]。自动给料采用现场 PLC 程序编制、管理网络平台,完成筒仓到装船机的自动给料作业,省去中控人员手动操作,使流程衔接更紧密。

3.4 智能辅助决策与远程操控提升

智能化技术是装船机运行效率提高的主要力量。近些年来,港口在装船机远程操控以及智能决策方面取得了显著的进步。深国际靖江港的三台斗轮机、五台装船机都安装了智能远程操控系统,实现了全自动堆取料、混配煤、装船作业等高效作业模式。该系统把精准定位、实时建模、舱口检测和船体平衡这些技术融合起来,使得装船过程更为精确、有条理。智能辅助决策上,数字孪生、人工智能

技术给效率提升赋予了新的途径。生产可视化平台用数字孪生、物联网等技术对码头核心场景做高精度建模,实现 1:1 三维仿真还原,动态模拟现场作业情况。利用 AI 策略分析系统可以完成作业指令的自动产生、料流稳定情况的实时监测以及碰撞危险的智能规避。梁山港 3 台装船机使用的是“主-辅”协同控制方式,常态运行的自动化水平基本达到 90%以上,可以达到减人增效的目的。人工智能技术对于装船机自动配载及路径规划的应用,可以依照货物种类、数量、重量以及船舶结构和装载需求,对最优配载方案展开计算。这些智能化手段使港口由原来的“人工操作”转变为现在的“智能决策”,给运行效率的持续提高打下了技术基础。

4 装船机运行效率优化的实施保障与持续改进

4.1 优化实施的原则与总体流程

装船机运行效率优化属于一项系统工程,在执行时应遵守以下基本原则,即系统性原则,从人、机、料、法、环等诸多方面齐头并进,不能孤立地改善某一个环节;渐进性原则,依照“先易后难、先点后面”的顺序分阶段推进,先解决移舱时间、供料波动这些见效较快的问题,然后才慢慢推进智能化升级等长周期项目;经济性原则,以投入产出比为准则挑选优化方案,保证经济效益可以量度并可验证。总体实施流程大体上可以归纳为现状诊断和瓶颈识别、方案设计和分步实施及验证、效果评估和改进这四个部分。在执行时要确定清楚的里程碑节点以及量化的考核标准,保证优化工作有条不紊地推进。

4.2 装备可靠性保障与预防性维护

装备可靠性属于装船机运行效率的基本保证。装船机长时间工作在高粉尘、高湿度、重载荷的环境下,重要部件磨损、故障造成非计划停机居多。创建以预防性维护为依托的装备可靠性保证体系十分重要^[3]。预防性维护的实施可以从以下几方面入手,一是建立关键部件状态监测体系,对电机、减速器、轴承、钢丝绳等主要部件运行参数进行实时监测,掌握设备劣化趋势,提前安排保养和更换;二是优化备件库存管理,对易损件设置合理的安全库存,缩短故障修复时间;三是采用以可靠性为中心的维修方式,按照设备重要程度和失效模式分类制订不同的维修计划,达到维修资源的最佳配置。

4.3 作业标准化与人员技能提升

作业标准化可以消除由于人而造成的效率波动,保证作业质量的一致性。推进智能化改造过程中,虽然自动化程度不断提高,但是人的因素仍然不能被忽略。根据装船

作业全过程的要求来制订相应的操作规程,确定各个操作环节的操作要点、质量标准以及注意事项,从而减小各个操作人员之间效率的差别。就人员技能提升而言,要创建起分层分类的培训体系。对一线操作人员主要培训智能化系统操作使用及异常工况应急处置能力^[4],对维护人员主要培训故障诊断和快速修复能力,对管理人员主要培训数据分析和决策优化能力。随着装船机操作人员由码头一线转到远程操控中心,作业环境大为改善,劳动强度大大降低,但是对操作人员系统理解、数据分析能力的要求也更高了。

4.4 运行数据驱动的迭代优化机制

数据成了持续改进的推动力。装船机智能化改造之后,运行过程中产生的大量的数据,即作业时序数据、机构运动参数、供料流速曲线、故障报警记录等等,给效率的改善赋予了诸多的信息来源。应当创建运行数据驱动的迭代改良体系,把数据分析,问题诊断,方案改良,效果验证构成闭环。具体来说,可以建立装船机运行效率的数据指标体系,对作业循环时间的构成变化进行分析,找出新的瓶颈环节;利用机器学习算法对历史作业数据进行挖掘,得到最优的操作模式和控制参数,将它们固定成系统默认的策略。梁山港不断加强生产作业数据分析和精准控制,推进卸车机系统到装船机系统的“链条式一键启动”,

就是数据驱动持续改进的典型实践。

5 结束语

装船机运行效率的提高,对于散货码头提质增效来说,是关键的一环。本文利用建立的装船作业循环时序解析模型,对移舱时间、供料稳定、机构协同精度等主要瓶颈因素进行了系统的识别,并从工艺路径优化、多机构协同控制、供料系统匹配、智能辅助决策四个方面给出了系统的优化措施。装船机运行效率的改善是不断迭代的,要依靠装备可靠性的保证、作业标准化的执行、人员技能的提高以及数据驱动的决策来达成由“单点优化”向“系统最优”的转变。随着数字孪生、人工智能等技术的不断发展,一人多机操控模式和全流程无人化作业也将会成为装船机运行效率提升的新方向。

【参考文献】

- [1]王宁.装船机自动控制提前上料关键技术分析[J].设备管理与维修,2023(22):104-105.
- [2]方晟,陈顺怀.基于多装船机的散货船智能装载[J].船海工程,2021,50(1):17-20.
- [3]段凯,李轶鸣.浅谈系统化设备装船机移舱工艺的提升[J].设备管理与维修,2022(15):119-121.
- [4]胡晓阳.港口筒仓至装船机自动给料的研究[J].能源科技,2022,20(6):82-84.