

散货自动化装船策略设计及算法优化

袁建明¹, 闫家豪¹, 涂铮², 胡志辉^{*1}

(1. 武汉理工大学 物流工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 武汉港迪智能技术有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要:为实现大宗散货自动化装船,设计一种以平衡装载原则、货物堆积平整度和船舶安全性为基础,利用散货物料堆积特性建立理想锥体模型近似模拟物料平整堆积装船效果,建立散货装船物料堆点布置及对应装载量的自动规划策略,提出一种具有自我影响因子的改进型黄金分割法,快速构建理想平整堆积模型,优化自动规划算法效率,最后通过实验验证自动装船策略规划及算法.结果表明:改进的黄金分割法比传统黄金分割法能够更准确、快速找到平整堆积模型参数的最优值,优化效果明显;实验测量和算法模型的堆点堆高最大平均相对误差在7%范围内,证明散货装船规划策略在实现散料平整堆积上具有良好的准确性、适用性.

关键词:散货装船;二次开发;自动规划;黄金分割

中图分类号:U693.5

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb202104005

0 引言

矿石、散粮等大宗散货多为单一类型的散状颗粒,常采用水路船舶输送.目前,大宗散货装船自动化水平较低,装船过程中难以合理规划散货物料在船舱的分布,需要人工不断调整装船设备位置进行补料,而装船机不宜频繁移动,需要定点堆积物料,容易造成物料分布不均匀、不合理.散货装船过程中物料的分布位置对船舶的运载方式、航行姿态、船身寿命都有重要影响^[1],因此合理实现散货装船的自动规划显得极为重要.

为了实现散货装船自动化,建立能预测物料堆积效果且实现散货装船的自动规划策略是必不可少的.关于散货装船自动化的研究主要集中在设备的自动化控制及检测反馈.曹洪岐等设计了一种可以实时测量船舶装载状态,反馈散货堆积过程的系统,实现无人化的远程监控^[2-5].赵激等研究了散货在存储、运输、装卸等过程中智能化装卸机器的使用,指出了智慧散货码头的发展方向^[6].包起帆研发并应用多种自动化散料装卸机

械,为散货码头机械自动控制奠定了基础^[7].薛允涛建立了一种散货智能装船系统,实现了对散货装载过程的控制与反馈^[8].

综上所述,国内关于散货码头设备自动化控制与检测研究较多,取得了一定的研究成果,但针对散货装船的物料自动规划方案研究较少,散货装船过程中物料的分布需要大量人工干预和判断.为此,本文提出一种实现散货装船自动规划的策略,并提出具有自我影响因子的改进黄金分割法,最优化建模次数,且将实验和算法规划的装船结果进行对比,探究散货装船自动规划策略的可行性及其效果.

1 散货自动化装船策略设计

1.1 功能需求

散货船舶装载量大,而装船机的效率相对较低,为减少装船过程中装船机移动频次,降低设备损耗、能耗以及操作人员劳动强度,通常采用断续移动装船机进行装船.首先根据船型及总装载量

收稿日期:2020-11-24; 修回日期:2021-05-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71372202).

作者简介:袁建明(1977-),男,博士,教授,E-mail:13871511072@163.com;胡志辉*(1980-),男,博士,副教授,E-mail:huzhihui@whut.edu.cn.

规划若干装料点及每个装料点对应的装载量,而后的装船过程中,装船机驻足在某个装料点连续装料,物料在船舱内对应堆点形成一定大小和质量的料堆,然后装船机沿船长或船宽方向移动到下一个相隔一定距离的装料点继续装料。因此,综合考虑装船过程中船体的稳定性、船体强度以及料堆顶部最终高度,需要以平衡装载原则、物料堆积平整度和船舶安全性为基础,合理规划船舱内物料堆点的布置及每个堆点对应的装载量。

1.2 装船机落料口行走路线规划

根据平整度最低原则及散料连续装载原则,结合装船机行走过程的起停状态和装船效率,参考人工装载的习惯进行装船机落料口行走路线规划,如图1所示。装船机落料口的行走路线需要考虑装船过程中船体的稳定性和船体强度,当单侧装载量过大时,船身横倾角和纵倾角会大于稳定值,因此先从船艏或船艉船舱进行散料装船,使用

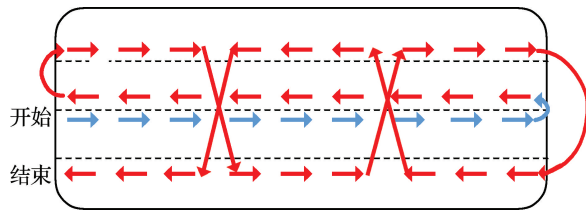


图1 装船机落料口行走路线示意图

Fig.1 Traveling route diagram of ship loader's blanking port

15%~35%的物料铺底,第2层再按照双8字路线将剩余物料铺满船舱。

1.3 自动化装船策略实现与方案选择

散货装船中,各堆点料堆相互重叠,各料堆形状不一且为非标准几何体,因此无法采用数值模型计算各料堆体积。采用离散元仿真可以较好地模拟散粒物料堆积的最终效果,但离散元仿真速度较慢,无法进行超大规模颗粒计算,而且绝大多数的离散元软件只能根据规划的物料质量模拟最终的装载效果,无法计算理想平整度状态下各堆点质量。

根据散货堆积理论以及实验测试,装船机溜筒下落的散粒物料堆积效果多为圆顶锥体,可以利用三维CAD软件SolidWorks二次开发构建的理想锥体近似代替散粒料堆。首先根据装载目标建立物料平整堆积的整体模型。接着根据规划的装船机落料口行走路线计算各堆点的物料质量,最终实现散货自动化装船过程中物料分布的整体规划。

自动化装船策略的运行流程如图2所示。散货自动化装船策略根据测量反馈系统得到的待装船舶船型参数和运载需求参数,调取相应物料参数,按照平衡装载原则,在保证物料堆积平整度和船舶安全性的基础上进行装船方案的自动规划。最后,根据规划方案,通过远程通信控制装船机进行物料装船。

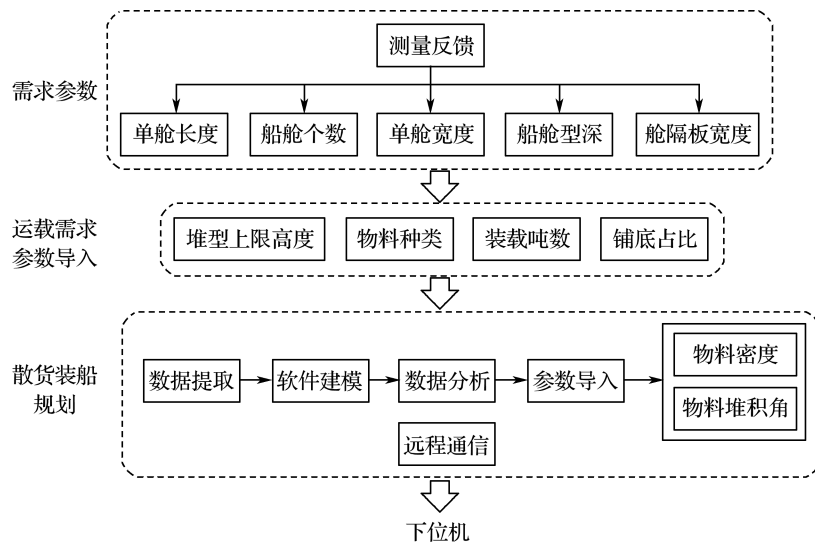


图2 散货装船策略运行图

Fig.2 Operation chart of bulk cargo loading strategy

1.4 堆点变化分析

在散货装船过程中,根据现场装载要求可以选取不同的装载方式,采用的装载方式直接影响船舶的纵弯矩和剪力以及船体的局部应力^[9].本文选择一般的船型数据进行分析,分析结果如图3所示,单个船舱中随着堆点数量 n 的增加,堆点之间距离变化趋于缓和,堆点堆高 h 下降速率明显减小,堆高与堆谷之间的差值明显缩小,装载平整度接近理想状态.由分析结果可知,对于单个船舱,装载点的规划过少容易造成装载不平整,严重时会造成船体应力集中,损害船体;装载点规划过多容易使装船机频繁移动,不符合实际工程需要.散货装船策略通过堆点之间距离、堆点堆高、堆高与堆谷差值3个参数建立堆点数量评价标准,确保散货装船过程堆点分布的合理性.

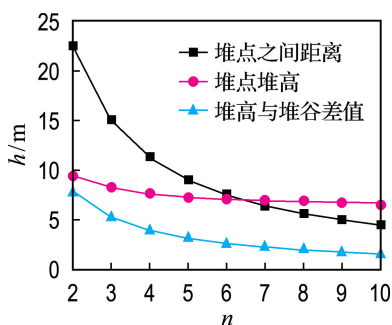


图3 同一船舱不同堆点方案差值变化图

Fig. 3 Variation chart of scheme difference of different stacking points in the same cabin

2 堆点堆积量确定及算法优化

2.1 基于进退法与改进黄金分割法的堆积量确定

为了能够迅速模拟堆积过程,计算各堆点堆积量,需要寻找符合装载总量的最优堆型体积.由于寻找最优堆型体积过程中,散货装船策略设计的堆型体积从小到大不断增加,直至堆型体积大小符合散货装载体积,且堆型体积的变化曲线难以用数学模型表达,因此将堆型体积的搜寻过程提炼为无约束条件求单谷最优解问题^[10],并选取进退法^[11]和黄金分割法^[12]对总体堆积量进行确定.

进退法是一种常用的确定搜索空间优化算法.对于进退法得到的搜索空间,通过优化了的黄金分割法求最优解,即在黄金分割法搜索过程中增加自我影响因子,对其搜索步长进行加速,使其

在搜索过程中能够减少搜索次数,更快地确定最优解.改进的黄金分割法运行过程如图4所示.

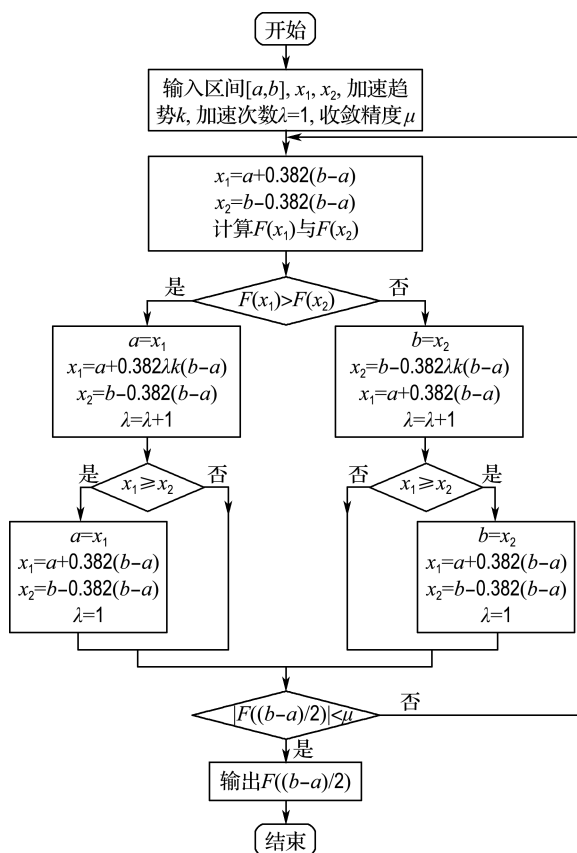


图4 改进的黄金分割法运行流程图

Fig. 4 The operation flow chart of improved golden section method

(1) 为求区间 $[a, b]$ 上最小值,令 $x_1 = a + 0.382(b-a)$, $x_2 = b - 0.382(b-a)$,比较 $F(x_1)$ 与 $F(x_2)$ 大小.

(2) 若 $F(x_1) > F(x_2)$,则去掉区间 $[a, x_1]$,将新区间 $[a, b]$ 进行加速,令 $x_1 = a + 0.382\lambda k \times (b-a)$, k 为加速趋势, λ 为加速次数,加速后若 $x_1 < x_2$,则取消加速.

(3) 若 $F(x_1) \leq F(x_2)$,则去掉区间 $[x_2, b]$,将新区间 $[a, b]$ 进行加速,令 $x_2 = b - 0.382\lambda k(b-a)$,加速后若 $x_1 \geq x_2$,则取消加速.

通过借用粒子群算法中自我影响因子^[13-15]的思想,改进的黄金分割法能够很好地避免谷值过度靠近区间端点时迭代次数过多的情况,使其在建模过程中能够减少运算次数,缩短算法的建模时间,从而提高系统运行效率.

得到最优整体堆型体积后,根据装船机行走

路线,对每个堆点的质量进行提取.根据总体模型各项参数,首先将对应堆点的模型与前一个堆点的模型进行相减,提取出对应堆点的堆积体积,不断重复上述建模过程就可以得到各个堆点规划的物料体积,从而算出各个堆点规划的物料质量.

2.2 改进算法效率分析

基于提出的改进黄金分割法,选取大、中、小3种船型各5组不同装载量进行计算,如图5所

示.对3种船型测试的数据进行对比分析可以发现,针对最优值处于区间中间和两端的情况,改进的黄金分割法在搜索最优值时能够减少搜索次数 t .当最优值靠近区间一端时,改进的黄金分割法能够减少搜索次数.此外,在提高搜索结果的精度时,改进的黄金分割法的搜索次数会远远低于传统黄金分割法的搜索次数,在程序运行时有更好的优越性.

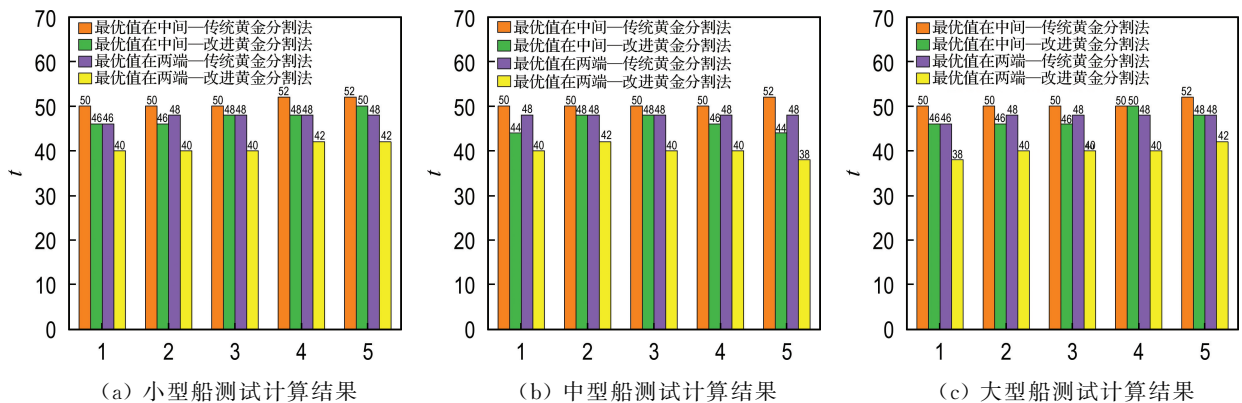


图5 新旧算法在不同船型测试中单次建模计算次数

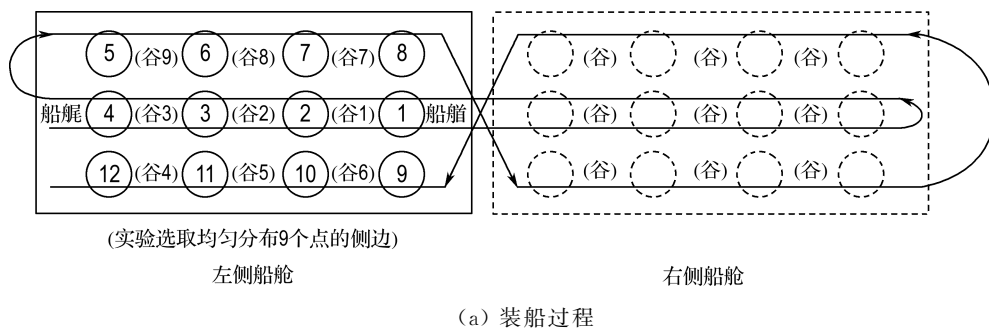
Fig. 5 Single modeling calculation times of new and old algorithms in different ship type test

3 实验验证与分析

3.1 实验台搭建

实验测试依托于实际装船过程,如图6(a)所

示,选择双船舱的左侧船舱建立等比缩小的船舱模型,缩小的船舱模型占据8字行走路线的一半.如表1所示.船舱尺寸为1 m×0.5 m×0.4 m,漏



左侧船舱

右侧船舱

(a) 装船过程



(b) 实验照片

图6 散货装船模型实验

Fig. 6 Model experiment for bulk cargo loading

斗卸料口直径为 0.027 m,漏斗高度为 0.6 m. 根据图 6(a)装船机行走路线所示,第 1 层堆点位置从船艏的中间位置开始依次在 0.2、0.4、0.6、0.8 m 4 个点的位置落料. 第 2 层堆点从船艏按原路径返回,依次在 0.8、0.6、0.4、0.2 m 4 个点的位置落料,落料完毕,移动到距离船舱中间位置 0.125 m 处的船舱一侧,依次在 0.2、0.4、0.6、0.8 m 4 个点的位置落料,接着移动到距离船舱中间位置 0.125 m 处的船舱另一侧,依次在 0.8、0.6、0.4、0.2 m 4 个点的位置落料. 本次实验选取聚丙烯树脂颗粒作为物料,通过测绘其堆积角、密度等作为计算数据,第 1 层铺底量为 30%,第 2 层为总量的 70%,实验过程堆点顺序及堆点质量如表 2 所示.

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

颗粒材质	物料密度/(kg·m ⁻³)		物料堆积角/(°)
聚丙烯树脂	582		28

装载量/kg	等效颗粒半径/m	漏斗直径/m	船舱大小/ (m×m×m)
56.25	2×10 ⁻³	0.027	1×0.5×0.4

表 2 堆点顺序及堆点质量

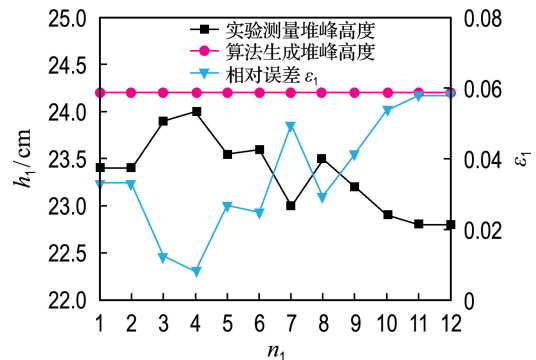
Tab. 2 Stacking point sequence and amount

堆点顺序	堆点质量/kg	堆点顺序	堆点质量/kg
点 4(铺底)	5.743	点 5	1.224
点 3(铺底)	3.747	点 6	1.031
点 2(铺底)	3.747	点 7	1.030
点 1(铺底)	3.637	点 8	1.519
点 1	11.755	点 9	1.519
点 2	5.972	点 10	1.030
点 3	6.150	点 11	1.030
点 4	5.889	点 12	1.224

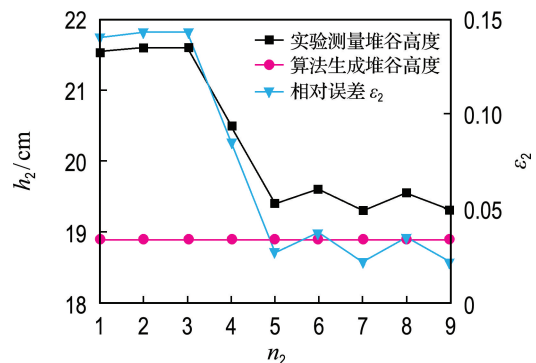
3.2 实验结果分析

图 6(b)为实验照片,实验各堆点测量数据如图 7 所示. 图 7(a)所示为实验测量堆峰高度 h_1 与算法生成模型堆峰高度的对比. 从图中分析可知,实验测量的高度均小于算法生成的高度,船舱中间位置的点 1、2 堆峰高度明显小于船艏点 3、4 的堆峰高度. 这是由于颗粒在堆积过程中,一方面,物料从高处落下,前一个堆点会被后一个堆点下落的物料冲击,从而造成前一个堆点物料从堆峰

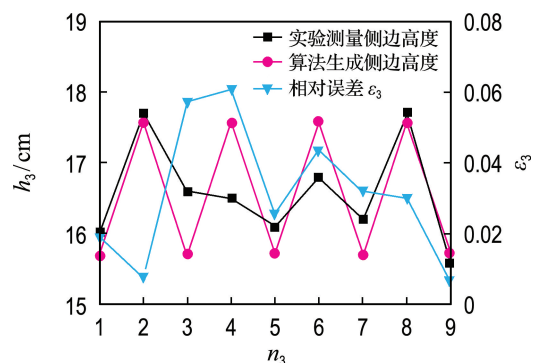
滚落至船舱侧边和堆谷处. 另一方面,由于颗粒的流动性强,物料无法形成理想锥体. 堆点 5~12 处于船舱两侧,堆积过程中颗粒更容易滚落至船舱侧边及堆谷处.



(a) 实验堆峰与算法模型堆峰高度对比图



(b) 实验堆谷与算法模型堆谷高度对比图



(c) 实验侧边与算法模型侧边高度对比图

图 7 实验测量与算法模型对比结果

Fig. 7 Comparison results of experimental measurement and algorithm modeling

如图 7(b)所示为实验测量堆谷高度 h_2 与算法生成模型堆谷高度的对比. 受冲击影响,实验测量的堆谷高度明显大于算法生成的堆谷高度. 而点 1、2 和 3 是位于船舱中间的堆谷,受到周围堆点物料下落影响最多,其堆谷高度明显大于处于

船舱两侧的堆谷高度. 位于船舱两侧的堆谷受到堆峰处物料下落影响较少, 其堆谷高度略大于算法生成的堆谷高度.

如图 7(c)所示为船舱侧边均匀选取 9 个点的实验测量高度 h_3 与算法生成模型侧边高度的对比. 可以看出实验测量的船舱侧边物料高度的起伏变化大致与算法生成的数据变化相同, 由于下料过程的冲击和颗粒的流动性, 实验测量的侧边堆谷高度会大于模型数据, 而侧边堆峰会略小于模型数据. 并且点 4 与 6 受到的冲击影响要大于点 2 与 8.

因此实际物料堆积效果与算法生成模型结果较为吻合. 根据测量结果, 堆峰、堆谷与侧边堆积高度的最大相对误差分别为 5.78%、14.31%、6.08%. 其中, 位于船舱中间堆谷的相对误差均值为 14.22%, 位于船舱两侧堆谷的相对误差均值为 3.77%, 而位于船舱中间区域的堆谷对船舶航行影响较小, 相对均匀分布即可. 最终, 堆点堆高的平均相对误差在 7% 范围内. 因此, 实验结果显示本文所采用的规划策略和实际散货装船效果具有较好的拟合性和准确性.

4 结 论

(1) 利用散货物料堆积特性建立理想锥体模型近似模拟物料平整堆积装船效果, 建立散货装船物料堆点布置及对应装载量的自动规划策略, 为实现散货自动化装船提供了一种可行的实用方法.

(2) 具有自我影响因子的改进黄金分割法, 以最少建模次数为优化目标, 优化自动规划算法效率, 相比于传统黄金分割法, 其优化效果明显.

(3) 实验测量和算法模型的堆点堆高最大平均相对误差在 7% 范围内, 证明文中提出的散货装船策略在实现散料平整堆积上具有良好的准确性、适用性.

参考文献:

- [1] 魏梦娇. 面向船型的干散货码头装船系统线程配置研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
WEI Mengjiao. Research on thread configuration of ship type oriented loading system for dry bulk cargo terminal [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [2] 曹洪岐, 董席亮. 面向全自动散货码头的智能装船成套技术及其应用 [J]. 天津科技, 2016, 43(4): 48-53.
CAO Hongqi, DONG Xiliang. Intelligent loading technology and its application for automatic bulk terminal [J]. Tianjin Science & Technology, 2016, 43(4): 48-53. (in Chinese)
- [3] 李 强, 宓 超, 赵 宁, 等. 自动化散货装船机物位检测技术 [J]. 上海海事大学学报, 2013, 34(3): 13-16, 89.
LI Qiang, MI Chao, ZHAO Ning, et al. Level detection technology of automatic bulk cargo loader [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2013, 34(3): 13-16, 89. (in Chinese)
- [4] 董席亮, 宓 超, 沈 阳, 等. 基于激光三维视觉的散货船舱检测与定位算法研究 [J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(6): 555-559.
DONG Xiliang, MI Chao, SHEN Yang, et al. Research on detection and positioning algorithm of bulk cargo hold based on laser 3D vision [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2014, 12(6): 555-559. (in Chinese)
- [5] 贺俊吉, 史 立. 散货自动装船检测系统 [J]. 光电工程, 2009, 36(6): 52-56, 119.
HE Junji, SHI Li. Automatic loading inspection system for bulk cargo [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(6): 52-56, 119. (in Chinese)
- [6] 赵 激, 赵宪花. 散货码头智能化装卸工艺技术研究 [J]. 中国水运, 2015, 15(7): 121-122.
ZHAO Wei, ZHAO Xianhua. Research on intelligent loading and unloading technology of bulk cargo terminal [J]. China Water Transport, 2015, 15(7): 121-122. (in Chinese)
- [7] 包起帆. 港口散货全自动装卸设备研究与开发 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(23): 2797-2803.
BAO Qifan. Research and development of port bulk cargo automatic handling equipment [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(23): 2797-2803. (in Chinese)
- [8] 薛允涛. 基于计量定量的散货无人化智能装船系统设计 [J]. 港口装卸, 2019(4): 50-52.
XUE Yuntao. Design of unmanned intelligent loading system for bulk cargo based on quantitative measurement [J]. Port Operation, 2019(4): 50-52.

- (in Chinese)
- [9] 邢向辉. 散货船装载计算机数学模型及应用的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2000.
XING Xianghui. Research on computer mathematical model of bulk carrier loading and its application [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2000. (in Chinese)
- [10] 黄正海, 苗新河. 最优化计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
HUANG Zhenghai, MIAO Xinhe. **Optimization Calculation Method** [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [11] 张立卫, 单峰. 最优化方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
ZHANG Liwei, SHAN Feng. **Optimization Method** [M]. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)
- [12] 宋巨龙, 钱富才. 基于黄金分割的全局最优化方法 [J]. 计算机工程与应用, 2005(4): 94-95, 130.
SONG Julong, QIAN Fucui. Global optimization method based on golden section [J]. **Computer Engineering and Applications**, 2005 (4): 94-95, 130. (in Chinese)
- [13] 印波, 王锡淮, 肖健梅. 基于改进粒子群优化算法的船舶能量管理方案 [J]. 中国舰船研究, 2020, 15(6): 37-45.
YIN Bo, WANG Xihuai, XIAO Jianmei. Ship energy management scheme based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. **Chinese Journal of Ship Research**, 2020, 15(6): 37-45. (in Chinese)
- [14] MENG Shuo, KANG Jianshe, CHI Kuo, *et al.* Gearbox fault diagnosis through quantum particle swarm optimization algorithm and kernel extreme learning machine [J]. **Journal of Vibroengineering**, 2020, 22(6): 1399-1414.
- [15] ZHANG Enze, CHEN Qingwei. Multi-objective reliability redundancy allocation in an interval environment using particle swarm optimization [J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 2016, 145: 83-92.

Strategy design and algorithm optimization of bulk cargo automatic loading

YUAN Jianming¹, YAN Jiahao¹, TU Zheng², HU Zhihui^{*1}

(1. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Wuhan Guide Intelligent Technology Co., Ltd, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to realize the automatic loading of bulk cargo, according to the stacking characteristics of bulk materials, an ideal cone model is designed based on the principle of balanced loading, the flatness of cargo stacking and the safety of the ship. The ideal cone model is used to simulate the effect of the smooth stacking loading of bulk cargo, and the automatic planning strategy of the material stacking point layout and the corresponding loading capacity is established. An improved golden section method with self influence factor is proposed to quickly build the ideal flat stacking model and optimize the efficiency of automatic planning algorithm. Finally, the automatic shipping strategy planning and algorithm are verified by experiments. The results show that: compared with the traditional golden section method, the improved golden section method can more accurately and quickly find the optimal value of the flat stacking model parameters, and the optimization effect is obvious; the maximum average relative error of the stacking point height measured by the experiment and the algorithm model is within 7%, which proves that the bulk cargo loading planning strategy has good accuracy and applicability in realizing the smooth stacking of bulk materials.

Key words: bulk cargo loading; secondary development; automatic planning; golden section