

基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制研究

王鑫¹ 李泽锐¹ 何发猛¹

WANG Xin LI Zerui HE Fameng

摘要

堆垛机在频繁启停过程中,加速度会发生突变,这会导致堆垛机运行时出现不平稳的状况,致使所载货物跌落下平台,在使用原始的细菌觅食算法时,细菌迁徙与趋向操作固定,使堆垛机速度控制受限,无法达到最优速度控制效果,难以保证堆垛机运行的平稳性。为此,文章研究了一种基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制。以堆垛机准时到达、稳定运行、能耗最小为目标,构建一个堆垛机速度优化函数;改进细菌觅食算法中的迁徙与趋向操作,提高算法性能,以求解优化函数获取当前工况下的最优速度,并将其输入到PID控制器中优化调整速度,以提升控制适应性,实现堆垛机速度优化控制。实验结果表明,设计方法可获取最优控制速度,且在该方法控制下堆垛机立柱振动最大振幅仅0.1334 m,保证堆垛机运行的平稳性,具有良好的速度控制效果。

关键词

改进细菌觅食算法;堆垛机;堆垛机速度;速度优化;速度控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.03.045

0 引言

堆垛机作为自动化立体仓库中的关键设备,主要沿货架之间的巷道运行,负责执行货物的存放与拿取任务,其运动速度控制不仅影响堆垛机的作业效率,还直接关系到整个仓库内货物的安全、存取精度以及能耗水平。一般情况下,堆垛机主要在货架间的巷道内做前后移动和上下运动,动作复杂且变化频繁。由于作业空间有限,堆垛机存在碰撞货物等风险,这给其速度控制带来了严峻挑战,一旦速度调控不当,极易引发安全事故或降低作业效率。近年来,随着智能控制技术的发展,诸多控制方法被应用于机械设备速度控制中。文献[1]中在机床速度控制中,应用一种模糊自整定PID控制器,能够提高机床动作的安全稳性与定性,但是该方法无法有效获取最优速度作为控制的输入,导致难以保障速度控制的有效性。文献[2]中在牵引装置的速度控制中,引入一种改进自抗扰控制器,该控制器在实际的速度控制中具有较高的稳态精度,但是其对外部干扰的适应性较差,无法获取最优控制速度,在极端工况下难以保障控制效果。文献[3]中在列车速度控制中,应用了新型滑模控制器,可以对列车运行速度进行高精度跟踪控制,但是该方法未考虑速度的优化调整,导致速度控制效果不佳这种控制器在某些情况下面临收敛速度不足的问题,无法大规模应用。文献[4]中提出

一种基于参数模糊推理的虚拟惯量优化控制策略。从采用附加功率虚拟惯量控制输出增量组成,推导得出速度控制器输出的调频抑制量。同时,将附加功率量转化为转速释放量,作为速度控制器参考转速调整量,并采用模糊推理算法动态调整虚拟惯量控制参数,完成速度优化控制。然而该方法在面临各种复杂工况时,难以及时完成对速度的优化,导致控制效果不佳。

基于上述研究,为提高控制效果,保证堆垛机运行的平稳性,本文探索一种基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制方法,为物流行业的智能化发展注入新的活力。

1 构建堆垛机速度优化函数

为了实现堆垛机的高效运作,必须对其速度进行精确控制,以满足准时到达、稳定运行以及能耗最小化的多重目标。因此,本文在构建堆垛机速度优化函数,综合考虑了上述3个目标,旨在通过算法优化实现堆垛机速度的动态调整,以为后续控制提供最优的控制速度,保证堆垛机运行的平稳性。

首先是堆垛机准时到达目标,假设堆垛机在自动化立体仓库中执行码垛任务时,从起始点出发移动到终点,所需花费的时间为 t_0 ,如果堆垛机按照最大速度运动,从起始点出发,移动到终点所需的最短时间为 t_{\min} ,正常情况下,只有 t_0 大于 t_{\min} ,才能保证堆垛机准时完成任务,即:

$$\Delta t = t_0 - t_{\min} \quad (1)$$

式中: Δt 表示给定时间与最短时间之间的差值。如果

1. 红云红河烟草(集团)有限责任公司昆明卷烟厂
云南昆明 650000

$\Delta t > 0$ ，说明堆垛机按照最大速度运动，会提前到达终点；如果 $\Delta t = 0$ ，说明堆垛机按照最大速度运动，会恰好准时到达终点；如果 $\Delta t < 0$ ，说明堆垛机按照最大速度运动，无法准时到达终点。因此，在实际的堆垛机速度控制中，需要在确保堆垛机安全稳定运行的基础上，尽可能提高堆垛机运动速度，从而确保堆垛机准时到达终点。本文在式（1）所求差值的基础上，计算出其与给定时间之间的比值 λ 为：

$$\lambda = \frac{\Delta t}{t_0} \quad (2)$$

为了实现堆垛机准时到达这一目标，需控制式（2）所求比值 λ 小于 5%。然后是堆垛机稳定运行目标^[5]，一般来说，堆垛机在改变速度运行时，如果瞬时加速度变化程度较高，堆垛机立柱会发生振动现象，影响其稳定性，所以本文用堆垛机瞬时加速度累计值的倒数来表示堆垛机稳定运行，其越小，稳定性越高。则具体表示公式为：

$$\eta = \frac{1}{\sum_{i=1}^T |a_i - a_{i-1}|} \quad (3)$$

式中： η 表示堆垛机稳定运行指标； a_i 表示堆垛机在时刻 i 的瞬时加速度； T 表示堆垛机执行作业任务的总时间。最后是能耗最小目标^[6]，为了降低堆垛机运行成本，需要控制堆垛机从起始点运动到终点全过程所消耗的能量最小，具体能耗指标表达式为：

$$\gamma = \sum_{i=1}^T aG(L_i - L_{i-1}) \quad (4)$$

式中： γ 表示能耗指标； G 表示堆垛机的质量； L_i 表示堆垛机在时刻 i 的位置。通过上述步骤，本文综合考虑准时到达、稳定运行以及能耗最小等多个目标，依据多目标优化的加权和的方法，通过赋予不同的权重，可以将多目标在一个相对的尺度上进行比较和权衡，由此构建了堆垛机速度优化函数，具体表示为：

$$F = \min(\alpha_1 t + \alpha_2 \eta + \alpha_3 \gamma) \quad (5)$$

式中： α_1 、 α_2 、 α_3 为各子目标对应的权值。

基于所构建的堆垛机速度优化函数，通过优化算法求解即可获取最优的控制速度，实现堆垛机速度的动态调整和优化。并将其作为控制器的输入，从而完成堆垛机速度优化控制。

2 改进细菌觅食算法求解速度优化函数

常规细菌觅食算法（BFA）具有收敛速度较慢和稳定性较低等问题，限制了其在对实时性和稳定性要求较高的堆垛机速度控制领域中的应用。因此，本章针对堆垛机速度优化的具体需求，对 BFA 算法中的迁徙与趋向操作进行了改进，

以提高算法的收敛速度和稳定性^[7]，以完成堆垛机速度优化函数的求解。因此，本文采用改进后的 BFA 算法求解堆垛机速度优化函数的具体流程如下：

首先，进行 BFA 算法的初始化，设定细菌种群规模，迁徙与趋向操作的初始参数，以及目标函数（堆垛机速度优化模型中的目标函数）的上下界，并随机生成初始细菌位置（即初始速度配置）。然后，进行细菌的趋向操作，对于每个细菌，计算当前位置的目标函数值，并根据步长调整各个细菌的下一步位置，由于常规 BFA 算法中固定步长会使收敛速度变慢，所以本文将固定步长改进为自适应步长，具体调整机制的计算公式为：

$$B_d = \left(\frac{(M_d - N_d)/4}{n_1 \times n_2 \times n_3} \right) \text{rand}() \quad (6)$$

式中： B_d 表示细菌向前游动的步长，其中 d 为维度； N_d 、 M_d 分别表示第 d 维寻找堆垛机速度优化模型最优解的范围最小值和最大值； n_1 、 n_2 、 n_3 分别表示细菌趋向、复制、迁徙的次数； $\text{rand}()$ 表示随机数，取值范围为 $[0,1]$ 。根据式（6）所求自适应补偿调整各个细菌的下一步位置。更新细菌位置后，进行细菌的迁徙操作，已知常规 BFA 算法中迁徙概率是一个定值，可能会造成精英个体丢失，所以本文对迁徙操作进行改进，采用自适应的迁徙概率，具体表达式为：

$$P(j) = \frac{f_{\max} - f_j}{f_{\max} - f_{\min}} \times P_0 \quad (7)$$

式中： $P(j)$ 表示第 j 个细菌的迁徙概率； f_j 表示第 j 个细菌的目标函数值； P_0 表示设定的固定迁徙概率； f_{\min} 、 f_{\max} 分别表示所有细菌的最小和最大目标函数值。根据上式所求概率进行细菌的迁徙，可以确保精英个体一定被迁徙^[8]，进而提高堆垛机速度优化函数求解精度。完成迁徙操作后，再次计算出各个细菌的目标函数值，即上述式（5）的值，按照目标函数值对细菌进行排序，选择最优的一部分细菌进行繁殖，生成新的细菌种群。同时，淘汰目标函数值最差的细菌，以保持种群多样性。不断重复上述步骤，直到达到预设的迭代次数停止 BFA 算法，从最终细菌种群中选择目标函数值最优的细菌位置，作为堆垛机的最佳速度配置结果。

3 PID 控制器控制堆垛机速度

通过改进细菌觅食算法对堆垛机速度进行了优化，并将优化后的速度作为输入信号，输入到一个 PID 控制器中，利用该控制器实时反馈调整堆垛机速度，达到预定的控制目标^[9]。PID 控制器具有结构简单、适应性强等优势，由比例项、积分项和微分项 3 部分组成，能够根据偏差值实时计算控制信号，表达式为：

$$K(t) = \sigma_p \cdot \varepsilon(t) + \zeta_i \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + \zeta_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (8)$$

其中:

$$\varepsilon(t) = X(t) - Y(t) \quad (9)$$

式中: $K(t)$ 表示 PID 输出的码垛机控制信号; σ_p 表示控制器结构中的比例系数; ζ_i 、 ζ_d 分别表示控制器结构中的积分与微分常数; $\varepsilon(t)$ 表示偏差信号; $X(t)$ 、 $Y(t)$ 分别表示改进 BFA 算法优化后和实际的堆垛机运行速度。如式 (8) 所示, 当优化后的堆垛机速度数据输入到 PID 控制器中, 经过运算后, 得到的是连续时间内的控制信号, 为了实现更精确的堆垛机速度控制, 本文对原始控制率公式 (8) 进行离散化处理, 得到离散 PID 控制信号为:

$$K(m) = \sigma_p \cdot \varepsilon(m) + \sigma_i \cdot \sum_{h=0}^m \varepsilon(h)C + \sigma_d \cdot \frac{\varepsilon(m) - \varepsilon(m-1)}{C} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} \sigma_i = \frac{\sigma_p}{\zeta_i} \\ \sigma_d = \sigma_p \cdot \zeta_d \end{cases} \quad (11)$$

式中: $K(m)$ 、 $\varepsilon(m)$ 分别表示第 m 次采样时控制器的输出值与偏差值; σ_i 、 σ_d 分别表示积分与微分系数。总之, 在堆垛机速度控制中, 本文引入改进细菌觅食算法, 将速度控制问题转化为优化问题, 不断寻找最优速度, 并将优化后的速度作为 PID 控制器的输入信号, 输出离散的控制信号, 实现堆垛机速度的平滑控制, 避免加速度突变。

4 实验测试

4.1 实验准备

完成基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制方法的理论设计后, 为验证该方法的有效性和优越性, 本章展开一个堆垛机速度控制的对比实验。构建一个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的仓库环境的测试场地, 如图 1 所示。



图 1 测试场地示意图

采用 MATLAB/Simulink 软件平台, 随机生成一个堆垛机作业任务, 在该任务中, 关键参数设置情况如表 1 所示。

表 1 参数设定

参数	单位	数值
载货高度	m	2
载货重量	kg	500
堆垛机与目标货位的水平距离	m	5
堆垛机加速度上限	m/s^2	1.5
堆垛机减速度上限	m/s^2	2.4
堆垛机最大速度	m/s	3.0

然后, 将本文设计方法设置实验组, 将文献 [1] 中基于模糊控制器的堆垛机速度控制方法和文献 [2] 中基于改进自抗扰的堆垛机速度方法设置对比方法。在 Simulink 中, 为每种控制方法分别配置相应的控制器模块, 并连接到堆垛机上。本次实验中, 模拟了堆垛机从静止状态启动, 加速至最大速度, 再减速至停止的全过程, 同时记录堆垛机立柱的振幅变化作为实验结果。每种控制方法均在相同的参数配置下重复实验 10 次, 以减少偶然误差。

4.2 指标设置

堆垛机速度的变化模式, 如加速、减速过程是否平滑, 也会影响立柱的振幅变化。如果加速过程过于急促, 立柱会受到较大的冲击力, 导致振幅突然增大。因此, 利用堆垛机立柱的振幅变化来衡量速度优化控制算法的有效性。如果通过方法进行优化控制后, 立柱的振幅变化减小, 说明该算法能够有效地改善堆垛机的运行稳定性。

4.3 结果分析

4.3.1 有效性分析

由于改进后 BFA 算法的有效性直接会影响速度控制效果, 因此根据最优解的质量, 来展开改进 BFA 算法与原始算法的对比测试。比较两种算法在相同迭代次数下达到的最佳目标函数值。较小的目标函数值通常表示更优的解, 即可有效获取最优控制速度。则其结果如图 2 所示。

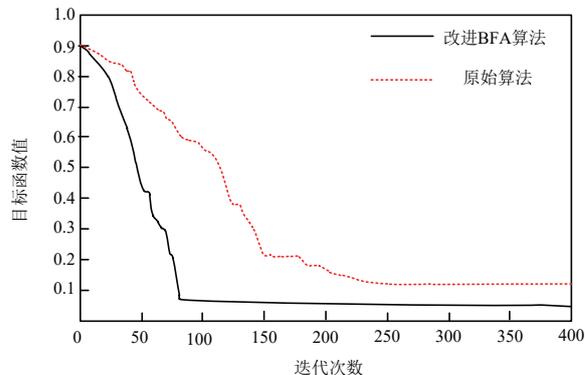


图 2 目标函数值结果对比

根据图 2 结果可知, 当改进 BFA 算法和原始算法稳定后, 达到的最佳目标函数值存在差距, 改进 BFA 算法最佳目标函

数值可达到 0.1 以下，原始算法的最佳目标函数值为 0.15。相比之下改进 BFA 算法所得解最优，且收敛速度较快，当迭代次数为 60 时，已达到最佳目标函数值。综上分析说明，改进 BFA 算法具有有效性，可获取最优控制速度，为后续速度控制提供可靠的支撑。

4.3.2 对比分析

根据上述实验准备完成堆垛机速度控制后，在 Simulink 中得到实验组方法和两种对比方法控制下堆垛机立柱的振幅变化情况如图 3 所示。

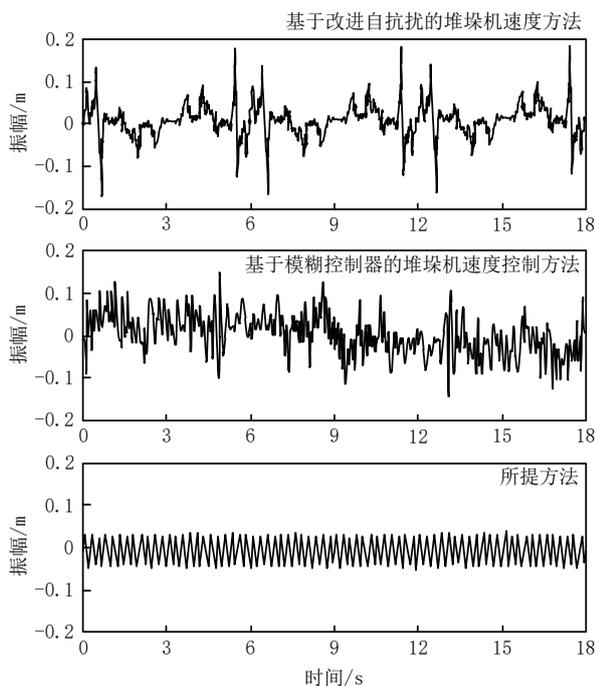


图 3 堆垛机速度控制结果对比图

从图 3 可以看出，在堆垛机速度控制中，与两种对比方法相比，所提方法控制下堆垛机立柱的振幅波动更小，说明所提方法对于抑制堆垛机立柱振动振幅效果更好。为更直观且客观地证明设计方法的优越性，统计了每种方法下的最大振幅（最正值与最负值）及其出现时间：所提方法控制下堆垛机立柱振动振幅较为均匀，稳定浮动在 ± 0.02 m 之间，而两种对比方法的堆垛机立柱振动振幅波动不稳定，且振幅均超过 ± 0.1 m。因此，经对比可得出，本文研究的基于改进细菌觅食算法的堆垛机速度优化控制方法是有效且优越的，该方法能够自适应调节堆垛机运行速度，并根据实时最优速度值进行堆垛机控制，从而减少因速度突变引起的振动，降低立柱振幅，保证堆垛机安全稳定运行。

5 结语

本文聚焦于堆垛机速度优化控制问题，通过构建堆垛机速度优化模型，采用改进细菌觅食算法求解最优速度，并结

合 PID 控制器有效实现了精确速度控制。对比实验结果表明，设计方法相较于传统控制方法具有显著优势，能够提升堆垛机的运行效率和稳定性。未来研究工作将致力于优化改进细菌觅食算法的参数设置和 PID 控制器的参数整定方法，同时开展实际仓储系统的应用测试。此外，还将探索将其他智能控制方法与改进细菌觅食算法相结合，以拓展堆垛机速度控制技术的应用场景和范围。

参考文献：

- [1] 赵鹏展, 郭鹏远, 黄贵川. 模糊自整定 PID 的液压马达驱动机床主轴速度控制研究 [J]. 机械设计与制造, 2024(3): 111-114.
- [2] 黄飞, 季诚昌, 孙以泽, 等. 基于改进自抗扰的往复式牵引装置速度控制 [J]. 现代制造工程, 2023(3):124-133.
- [3] 侯涛, 魏建鹏, 牛宏侠. 基于预设非奇异终端滑模控制的高速列车速度控制研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1): 38-50.
- [4] 黎静华, 宋诚鑫, 兰飞. 基于参数模糊推理的风机虚拟惯量优化控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20):125-133.
- [5] 王欣伟, 闫明. 立体库堆垛机运行系统优化研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(5):111-115.
- [6] 耿赛, 王雷, 李东东. 基于改进防撞策略的两端式双堆垛机出入库优化研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1159-1168.
- [7] 董海, 齐新娜, 吴瑶. 基于改进细菌觅食算法的堆垛机调度 [J]. 控制工程, 2022,29(11):2054-2065.
- [8] 边琦, 马建, 张梦寒, 等. 改进细菌觅食算法的永磁同步电机参数辨识 [J]. 电机与控制学报, 2024,28(2):174-181.
- [9] 王牧, 赵世田, 许宁, 等. 基于正矢平方型曲线加减速算法的堆垛机立柱振幅研究 [J]. 包装工程, 2023,44(7):230-240.

【作者简介】

王鑫 (1985—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 堆垛机电控设备优化改造技术, email:372835657@163.com.

李泽锐 (1976—), 通信作者 (email:13708482587@163.com), 男, 云南昆明人, 中职, 修理组长, 研究方向: 堆垛机改造技术。

何发猛 (1986—), 男, 云南昆明人, 本科, 助理工程师, 研究方向: PLC 设备改造, email:15529263758@163.com.

(收稿日期: 2025-02-22)