

基于混合遗传模拟退火算法的无人机货舱装载优化研究

王彦兆, 殷旅江*, 沈明辰, 张驰
(湖北汽车工业学院, 湖北 十堰 442002)

摘要: 目的 旨在解决无人机货舱三维装箱空间利用率的优化问题, 突破传统经验装箱法的空间利用瓶颈, 实现多约束条件下的高效装载。方法 结合无人机装载货物高支撑度的要求, 构建高稳定性的数学模型, 采用遗传算法和模拟退火算法相结合的混合优化方法, 通过混沌映射生成初始种群, 然后采用两段式编码, 结合动态空间分割法进行装载优化, 最终迭代出最优装载方案。结果 采用提出的混合算法对某汽车零部件企业的 20 种共 390 件零件进行仿真实验, 在满足支撑约束与其他约束的前提下与原算法进行对比, 空间利用率提高 5%, 可见装箱效果显著优于其他算法。结论 改进的算法装载效率高, 稳定性强, 为无人机货舱装载问题提供一种有效的优化方法; 它面对各种货物均能保证较优的装载效果, 解决了某企业经验装箱法中存在的空间利用问题, 同时为以后研究无人机装箱问题提供了借鉴, 具有较好的应用前景。

关键词: 无人机; 三维装箱; 遗传算法; 模拟退火算法

中图分类号: TB485.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)09-0250-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.09.029

Cargo Compartment Loading Optimization of Unmanned Aerial Vehicles Based on Hybrid Genetic Simulated Annealing Algorithm

WANG Yanzhao, YIN Lyujiang*, SHEN Mingchen, ZHANG Chi

(Hubei University of Automotive Technology, Hubei Shiyan 442002, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the optimization problem of three-dimensional container loading space utilization in the cargo hold of unmanned aerial vehicles (UAVs), break through the space utilization bottleneck of the traditional empirical container loading method, and achieve efficient loading under multiple constraints. In combination with the requirement of high support degree for loading goods by unmanned aerial vehicles, a highly stable mathematical model was constructed. A hybrid optimization method combining genetic algorithm and simulated annealing algorithm was adopted. The initial population was generated through chaotic mapping. Then, two-stage coding was used, combined with the dynamic spatial segmentation method for loading optimization. Finally, the optimal loading scheme was iterated out. Simulation experiments were conducted on 390 parts of 20 types in an automotive parts enterprise using the proposed hybrid algorithm. Compared with the original algorithm under the premise of meeting the support constraints and other constraints, the space utilization rate was increased by 5%, indicating that the packing effect was significantly better than other algorithms. In conclusion the improved algorithm has high loading efficiency and strong stability, providing an effective optimization method for the cargo hold loading problem of unmanned aerial vehicles. It can ensure an optimal loading effect for all kinds of goods, solve the space utilization problem existing in the empirical packing method of a

收稿日期: 2025-03-09

基金项目: 国家社会科学基金一般项目 (17BGL238); 湖北省高等学校哲学社会科学研究重大项目 (23ZD241); 湖北省科技厅重点研发课题 (KJCXQS2022000225)

*通信作者

certain enterprise, and at the same time provide a reference for the future research on the packing problem of unmanned aerial vehicles, and has a good application prospect.

KEY WORDS: unmanned aerial vehicle; three-dimension packing; genetic algorithm; simulated annealing algorithm

随着市场需求的快速增长和电商行业的蓬勃发展, 快递业务订单量呈现爆发式增长。根据国家邮政局发展研究中心发布的《2023 年邮政行业发展统计公报》, 截至 2023 年, 全国邮政行业寄递业务总量达 1 624.8 亿件, 其中快递业务量达 1 320.7 亿件, 同比增长 19.4%, 连续 10 年稳居世界首位。在庞大的业务量下, 配送效率问题日益凸显, 尤其是在偏远山区等道路不发达地区, 传统配送方式面临诸多挑战, 不仅导致配送时效难以保障, 还使运输成本居高不下, 成为制约快递行业进一步发展的重要瓶颈。因此, 探索更加高效、智能的物流配送方式势在必行。在此背景下, 无人机作为一种颠覆性技术得到了广泛关注, 它凭借灵活性和高效性, 能够有效克服地形限制, 大幅提升配送效率, 降低运营成本。由于无人机货舱空间有限, 提高货舱装载效率, 充分利用有限空间, 成为影响运输成本和能效的关键因素。高效的货舱装载不仅能提升物流配送效率, 也为低空经济的进一步发展提供了重要动力。

目前, 众多学者和企业已深入研究传统运输工具的货舱装载优化问题, 提出多种智能优化算法和创新解决方案, 在理论上为无人机货舱空间的高效利用提供了科学依据。

1980 年, George 等^[1]首次提出“层”的概念, 主要针对装箱剩余空间进行平整合并处理, 提高了空间利用率, 并根据此概念开发出最具代表性的启发式算法。1989 年, Miller 等^[2]首次提出使用拟退火算法解决三维装箱问题, 但只适用于规模较小的装箱问题。1990 年, Gehring 等^[3]通过建立多维度模型的遗传算法来解决装箱问题。Ma 等^[4]提出一种贪心多指标融合算法, 通过 SVR 算法和拟牛顿方法确定指标的权重, 解决在线三维装箱问题。Tole 等^[5]针对矩形物品的圆形垃圾箱包装问题, 提出一种首次拟合网络搜索算法来生成初始解, 并设计模拟退火算法, 采用局部邻域搜索策略从初始解中探索解空间。Fleszar^[6]研究同一物品拆分装箱的问题, 提出一种新的混合整数线性规划模型和 2 种启发式算法。Borges 等^[7]研究带场景的装箱问题, 考虑不确定性场景的存在, 提出指数集覆盖模型和变量邻域搜索启发式算法寻找实例的最优解。

2007 年, 张德富等^[8]根据砌墙的思想结合模拟退火算法提出一种具有代表性的组合优化算法, 通过对货物进行水平、竖直方向的参照来装箱, 确定参照基准判断货物是否可以装入。曹先彬等^[9]对遗传算法进行优化, 提出一种免疫遗传算法来解决装箱问题。张

长勇等^[10]提出一种混合遗传算法, 采用三段式编码求解货物装载时的布局方案。徐江等^[11]针对可变尺寸货物装箱问题进行研究, 构建非线性混合整数规划模型, 此类问题具有 NP-hard 属性, 需要求解大规模算例, 因此设计一种有效结合遗传算法与深度、底部、左部方向优先装载的算法。赵向领等^[12]针对货运飞机装箱问题建立分步优化模型、组合优化模型, 以业载量装载最大和重心偏移指定位置最小为目标, 考虑集装箱和飞机机舱的体积、质量、位置、平衡限制等各类约束, 对 4 类不同条件数据进行求解和验证。李想等^[13]针对集装箱装载问题, 采用塔装载启发式算法将三维待装箱装载成塔集, 通过蚁群算法融入信息素选择更新策略, 同时结合模拟退火算法对每代优秀路径集进行局部搜索, 寻找最优装载方案。杨欣等^[14]针对多目标传统货车的装箱问题, 结合力学分析, 设计一种基于强化学习、Q-Learning 的算法。杜文龙等^[15]对人工蜂鸟算法进行优化, 采用剩余空间启发式搜索原理, 解决了航空行李装箱的问题。张长勇等^[16]提出利用极值点优化初始种群, 再结合混合遗传算法来解决飞机舱腹的装载问题。Kang 等^[17]针对电商物流背景下的多阶开维三维矩形包装问题, 提出一种将遗传算法与 Gurobi 求解器相结合的新型元启发式方法, 以提高求解质量和计算效率。Wang 等^[18]针对多仓库带时间窗和三维装载约束的车辆路径问题, 提出基于客户聚类的资源共享与车厢分区策略, 结合三维 K 调和均值聚类算法与改进非支配排序遗传算法构建两阶段混合优化模型, 提升了车辆装载率, 降低了运营成本。

综上所述, 目前的研究主要集中于传统运输工具的三维装箱问题, 且遗传算法凭借其优越的全局搜索能力, 已经成为解决三维装箱问题广泛应用的方法, 许多具有创新性的组合算法的设计均基于遗传算法^[19-20]。但是, 针对无人机装箱问题, 尤其是考虑多种约束条件的无人机装箱问题的相关研究仍显不足。

本文通过分析无人机货舱的装载问题, 建立以空间利用率最大化为目标函数的数学模型, 同时结合多种现实约束 (如支撑约束和正交约束等), 采用一种结合遗传算法和模拟退火算法的混合方法来求解模型。遗传算法能够进行全局搜索, 避免陷入局部最优解, 适用于解决 NP-hard 类型的组合优化问题; 而模拟退火算法在局部搜索和精细调整方面表现突出, 能够有效优化解的质量, 将这 2 种算法相结合, 能够提高解的稳定性和装载效率。首先, 利用动态空间划分法生成初始的装箱方案; 其次, 通过针对货物装载顺

序和货物状态的两段式编码,结合混合算法中的相关规则生成新的装箱方案;最后,借助最优解保存策略,确保在所有方案中保留空间利用率最高的结果。本文创新性地将混合优化算法引入无人机装箱问题,考虑多种约束条件,结合装载策略,为无人机货舱的装载问题提供新的解题思路,同时为无人机物流配送提供了优化方案,具有较强的实际应用价值,推动了无人机物流行业的发展,为未来无人机货舱装载问题提供了借鉴。

1 问题描述

本文主要研究单个无人机的装箱问题,在已知货物和无人机参数的情况下优化货舱的装载方案,使装载效率最大化。与传统装箱问题相比,该问题的特殊性主要在于必须确保货物间的支撑度极高,以应对飞行中频繁的加速、振动和姿态变化。由于无人机货舱空间紧凑且载质量敏感,无法依赖大量的外部固定装置,货物需通过紧密堆叠形成自支撑结构,或利用刚性规则箱体的交错排列将重力均匀传递至舱壁。同时,算法需优先选择支撑面积大的摆放方式,避免悬空或单点受力,确保动态外力下堆垛的整体刚性,从而在减重提效的同时维持飞行稳定性。受科技水平的限制,目前无人机的自重和载质量较低且价格高昂,因此可运输的货物应具有体积小、质量轻、价值高的特点。

本研究假设所有货物的质量、体积以及无人机的承载能力等参数均已知,不考虑运输距离、航程或动态需求等因素,仅聚焦于如何提高装载效率和优化装箱方案。此外,假定所有货物在初始时已确定,且无人机仅执行一次装载操作,不涉及多次装卸。

1.1 约束条件

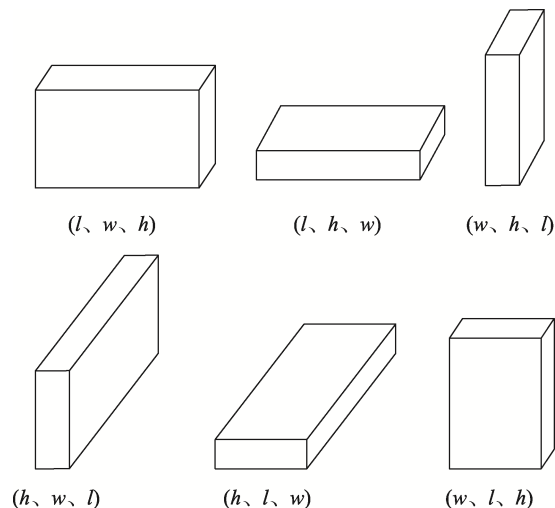
在实际操作中,需要综合考虑多个变量和条件。因此,在分析此问题时必须设定详细的约束条件,并对其进行深入研究。

1) 体积约束。在装载过程中,所选货物的体积不得超过货舱的最大可用体积,以确保不会超出货舱的容量上限。

2) 载质量约束。装入货物的总质量不能超过货舱的最大载质量,以确保容器不会超载。

3) 稳定性约束。空中的不确定因素较多,无人机装箱问题对货物垛型的稳定性要求更高,为保证装箱的稳定性,货物的底面必须确保至少 70% 的面积与货舱底面或其他货物接触。

4) 货物旋转约束。货物旋转约束是指在装箱问题中,货物的放置状态不固定,可以进行旋转或翻转,这样可以更好地适应货舱形状,提高装箱利用率。在装入货舱时,每件货物应考虑 6 种旋转方式,如图 1 所示。



注: l 、 w 、 h 分别为货物的长、宽、高

图 1 货物放置状态

Fig.1 Status of goods being placed

5) 不重叠约束。要求货舱内装入的所有货物在空间上互不重叠,每个物品都应有足够的空间,且货物之间不能产生空间上的交集。

6) 正交约束。装入货舱的货物的长、宽、高与货舱的长、宽、高应平行或垂直。

1.2 基本假设

在实际装箱过程中,除了货物的空间限制和稳定性要求等约束条件,还需要考虑许多其他因素^[21]。这些约束条件会影响装箱效率,因此本文根据需解决的问题作出以下假设:

- 1) 货仓和货物的形状均为规则的长方体;
- 2) 货物的质量均小于货舱的载质量;
- 3) 货物具有良好的承载能力,不会因挤压或堆叠而产生形变;
- 4) 货物在同一地点装载,并在同一目的地卸载,不考虑装箱顺序。

2 数学模型

根据上述分析,本文建立包含目标函数和约束条件的数学模型,货舱空间利用率、体积约束、载质量约束、稳定性约束最大化的目标函数分别见式(1)~(5)。

$$\max R = \frac{\sum_{k=1}^n v_k}{V} \quad (1)$$

式中: R 为货舱的空间利用率; V 为货舱的体积; v_k 为装入的第 k 件货物的体积, $k=1,2,\dots,n$ 。目标优化是尽量将更多货物装载到货舱中,以最大限度地提高货舱空间的利用效率^[22]。

$$\sum_{k=1}^n v_k \leq V \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^n g_k \leq G \quad (3)$$

式中: g_k 为装入货物的质量; G 为货舱载质量。

$$\begin{cases} a_{ij}^x = \max\{0, \min\{x_i, x_j + l_j\} - \min\{x_j, x_i\}\} \\ a_{ij}^y = \max\{0, \min\{y_i, y_j + w_j\} - \min\{y_j, y_i\}\} \end{cases} \quad (4)$$

$$a_{ij}^x a_{ij}^y \geq 0.7 l_j w_j \quad (5)$$

式中: i, j 分别为 2 件货物 (图 2), i 放置在下层, j 放置在上层; a_{ij}^x, a_{ij}^y 分别为 2 件货物重叠部分的边长。由式 (5) 可知, 上层货物 j 与下层货物或货舱底面之间的接触面积应不少于 j 货物底面面积的 70%。

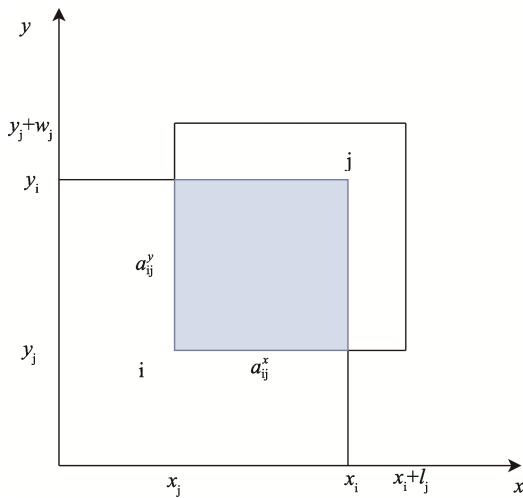


图 2 i, j 货物重叠俯视图
Fig.2 Top view of i, j cargo overlap

不重叠约束和正交约束见式 (6) ~ (7)。

$$\begin{cases} x_i + \frac{1}{2}l_i - x_j - \frac{1}{2}l_j \geq \frac{1}{2}l_i + \frac{1}{2}l_j \\ y_i + \frac{1}{2}w_i - y_j - \frac{1}{2}w_j \geq \frac{1}{2}w_i + \frac{1}{2}w_j \\ z_i + \frac{1}{2}h_i - z_j - \frac{1}{2}h_j \geq \frac{1}{2}h_i + \frac{1}{2}h_j \end{cases} \quad (6)$$

式中: (x_i, y_i, z_i) 为货物摆放时左后下角的坐标; l_i, w_i, h_i 分别为货物 i 的长、宽、高。

$$[(X_i - x_i) - l_i][(Y_i - y_i) - w_i][(Z_i - z_i) - h_i] = 0 \quad (7)$$

式中: (X_i, Y_i, Z_i) 为货物摆放时右前上角的坐标。

3 求解算法

无人机货舱装载问题具有较高的复杂性, 尤其是在同时考虑载质量、体积限制和稳定性等多重约束条件时。在实际应用中, 高效的装载方案对于提升物流效率至关重要, 因此需开发高效的启发式算法, 以便快速生成满足特定条件的装载方案。高效启发式算法

的核心特性在于快速获取近似最优解的同时, 展现出良好的灵活性以适应不同的实际需求。这种灵活性使得算法能够在多变的应用场景中提供优化的结果, 从而满足各种环境下的装载要求。高效的启发式算法在生成合理的装载方案中发挥着核心作用, 其快速求解和灵活调整能力是实现高效物流的重要保障。本文主要采用动态空间分割法结合空间合并的装载规则, 以及混合遗传模拟退火算法来优化无人机货舱的装载方案。

3.1 装载规则

3.1.1 基本规则

货舱空间的有效利用程度取决于货物在装载时的排列次序, 因此规划装载策略过程中, 确定货物的摆放顺序至关重要。目前, 比较常用的装载规则包括质量递减规则、体积递减规则和最长边递减规则等。由于无人机货舱装载问题对稳定性要求较高, 本文采用体积递减规则进行装载, 将货物按体积大小进行降序排列, 优先装入大体积货物, 以提高装载的稳定性。在本文研究中, 货物装载过程采用占角策略^[23]以优化装载效果, 即首件货物放入货舱时, 应尽量选择靠近货舱左后下角的位置。

3.1.2 动态空间分割规则

当首件货物被放置在货舱的左后下角后, 货舱内会形成一个不规则的剩余空间。为了便于进一步研究与分析, 将这个不规则区域细分为 3 个更小的子空间, 分别为前空间 (Front)、上空间 (Upper) 和右空间 (Right)。每放入一个货物时, 可以将空间划分为 3 个子空间, 不断重复此过程, 直到剩余空间无法再装入任何货物。新西兰学者 George 和 Robinson 在空间分割时按照 Z-R-F 的顺序进行分割并装载^[24], 这种分割方法模式固定, 空间划分不灵活, 有时会出现 3 个分割空间都比较狭小的情况, 无法满足装载需求。

相较于传统的三空间分割法, 本文提出一种改进的动态空间分割方式。在空间分割时, 可以发现剩余空间的分割方式有 3 种, 即 F-R-U、R-F-U 和 U-R-F, 如图 3 所示。分割产生的 3 个空间的体积分别为 V_U, V_R, V_F , 在图 3a 中, 令 $a = \max(V_U, V_R, V_F)$; 在图 3b 中, 令 $b = \max(V_U, V_R, V_F)$; 在图 3c 中, 令 $c = \max(V_U, V_R, V_F)$ 。经过分析得出以下分割原则, 在每次装入货物后动态选择空间分割方式。

- 1) 若 $a = \max(a, b, c)$, 则按照 F-R-U 的顺序进行分割;
- 2) 若 $b = \max(a, b, c)$, 则按照 R-F-U 的顺序进行分割;
- 3) 若 $c = \max(a, b, c)$, 则按照 U-R-F 的顺序进行分割。

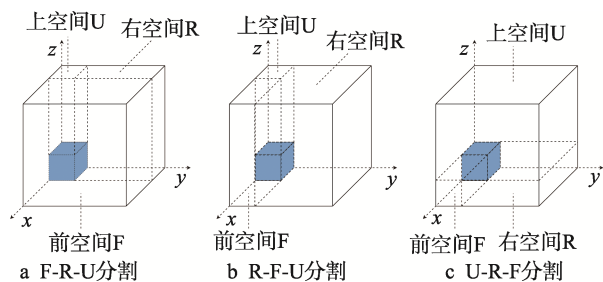


图3 动态空间分割示意
Fig.3 Schematic diagram of dynamic space segmentation

3.1.3 空间合并

动态空间分割方法在每次装载时都会生成3个子空间,尽管这种方法在一定程度上实现了空间的合理划分,但随着纸箱的不断装入,子空间的体积逐渐缩小,部分子空间的尺寸可能不足以容纳任何货物,从而导致空间闲置,如何有效利用闲置的子空间成为一个重要问题。为解决此问题,在每次装载前,通过合并当前装载空间与之前产生的闲置子空间,可以形成一个更大且可用的待装子空间。这种策略不仅能有效减少空间浪费,还能显著提高车厢的空间利用效率。如图4所示,当前装载空间与上次装载形成的闲置子空间共有3种合并方式。

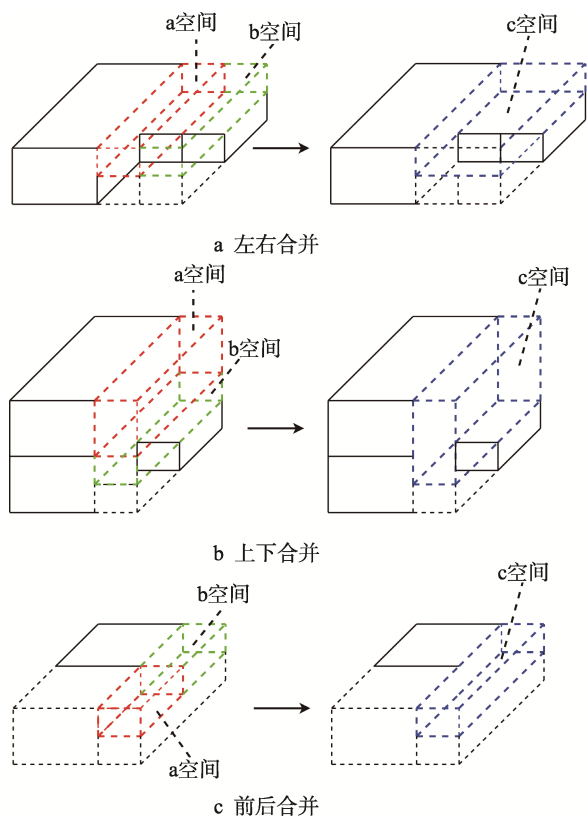


图4 空间合并示意
Fig.4 Schematic diagram of spatial consolidation

3.2 混合遗传模拟退火算法

针对 NP-hard 问题的求解,遗传算法凭借其卓越的全局搜索能力,显著降低陷入局部最优解的可能性,这使得遗传算法成为应对复杂优化问题的重要工具。在局部搜索和收敛速度方面,遗传算法的表现相对较弱,尤其是在处理复杂装载方案时,可能需要较多的迭代才能找到较优解。模拟退火算法在局部搜索方面表现出色,能够通过控制温度逐渐减少探索空间,从而在优化过程中精细调整解的质量。虽然模拟退火算法展现出较强的局部搜索能力,但其全局探索能力相对不足。为了充分发挥2种算法的优势,本文提出混合遗传算法与模拟退火算法相结合的优化方法,以同时利用两者在全局搜索和局部搜索中的特点,提升解的质量和收敛速度。本算法的求解过程包含2个阶段:第1阶段,利用混沌映射生成初始种群,确保种群的多样性,避免遗传算法在后续优化过程中陷入局部最优解;第2阶段,采用混合算法对装载方案进行优化。遗传算法依靠交叉和变异操作不断搜索和探索整个解空间,旨在找到全局最优解;模拟退火算法则通过逐步降温的策略细致调整搜索方式,实现对局部最优解的精确挖掘。通过结合这2种算法的特点,不仅能够增强全局搜索的能力,还能有效提升局部搜索的精度,从而在复杂的装载方案中找到更优的解决方案。

3.2.1 编码

本文采用的算法编码方法为两段式编码。第1段编码旨在对 n 种货物进行编码,具体做法是将 n 种货物依次按照自然数进行编号,从而明确表示货物的装载顺序,确保每种货物能够按照预定的顺序装载到无人机货舱中。第2段编码表示每个货物的放置状态,共有6种放置状态,用数字1~6进行编码,描述货物在货舱中的具体位置和姿态。两段式编码方法分开处理装载顺序与放置状态的优化问题,从而提高了遗传算法的灵活性和搜索效率,有助于更好地解决无人机货舱装载优化问题。

假设有3种货物,编号为1、2、3,则货物可能的装载顺序为[2,1,3]。第2段编码的每一位代表对应货物的放置状态,假设货物1的放置状态为1,则货物可能的放置状态为[1,3,2]。因此,一个个体的整体编码为[2,1,3,1,3,2],前3位表示装载顺序,即货物2先装载,接着是货物1,最后是货物3;后3位表示货物的放置状态,即货物1的放置状态为1,货物2的放置状态为3,货物3的放置状态为2。

3.2.2 选择算子

本文采取轮盘赌的方式进行个体选择,经过多次旋转轮盘,选出对应的染色体。

染色体适应度总和为

$$F = \sum_{k=1}^n v_k \quad (8)$$

式中: F 为染色体适应度的总和, $k=1,2,\dots,n$ 。
个体的选择概率为

$$P_k = \frac{v_k}{F} \quad (9)$$

式中: P_k 为选中个体 k 的概率, $k=1,2,\dots,n$ 。
累计概率为

$$C_k = \sum_{k=1}^n P_k \quad (10)$$

式中: C_k 为个体 k 的累计概率, $k=1,2,\dots,n$ 。

3.2.3 交叉算子

针对两段式编码, 本文采用部分映射交叉的方法进行交叉操作, 该操作的执行受交叉概率控制, 具体步骤如下。首先, 设编码序列的长度为 $2n$; 然后从区间 $[1,n]$ 中随机选取 2 个相异整数, 分别作为交叉操作的起始点与终止点; 最后, 为确保放置状态的合法性, 基于部分映射规则, 需对第 2 部分的编码值及其对应位置的第 1 部分编码值进行同步调换, 完成放置状态部分的编码值与相应位置的互换。交叉操作过程见图 5。

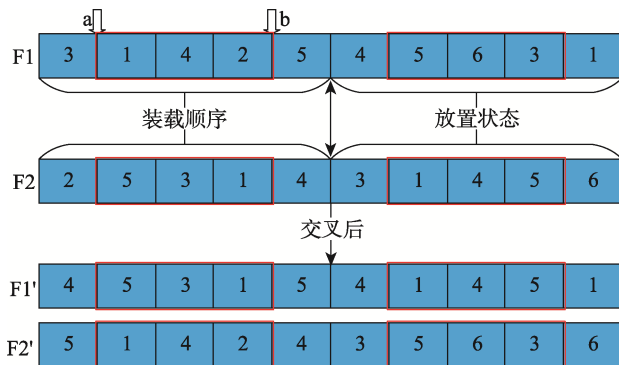


图 5 交叉示意
Fig.5 Cross diagrams

3.2.4 变异算子

在变异操作中, 采用逆转顺序方式对装载顺序和货物放置状态进行变异。在装载顺序部分 (即第 1 段编码), 随机选择编码中的 2 个位置, 对其装载顺序进行逆转。同时, 放置状态应根据第 1 段编码的选择区间进行顺序逆转。具体的变异过程如图 6 所示。

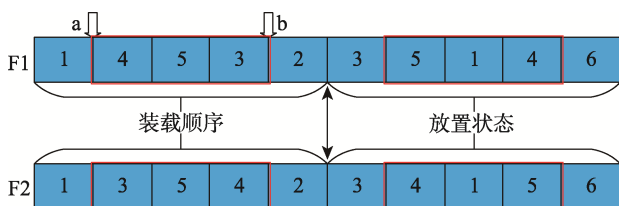


图 6 变异示意
Fig.6 Schematic diagram of variation

3.2.5 算法流程

通过结合 2 种算法的特性, 本文的改进算法既保证了解的多样性, 又能有效提高解的质量, 算法的起止由模拟退火算法的温度值控制。在初始化种群阶段, 为了增强其随机性和多样性, 加入混沌映射策略生成种群。混沌映射策略具有较强的随机性和非线性特征, 使得初始种群的分布更加广泛, 避免了传统随机初始化方法可能导致的初始解集中问题, 提高了解的空间覆盖, 进而提高种群的多样性, 增强算法的全局搜索能力。

算法按照装载规则对每个个体进行装箱操作, 本文将每个个体的装箱利用率直接作为个体的适应度。在选择操作中, 加入最优解保存策略, 将种群的适应度值进行降序排列, 选取适应度最优的 10% 个体进行复制, 直接传递到下一代。这样可以确保在迭代中始终保持找到最优解, 避免由于交叉、变异等操作导致的最优解丢失或退化, 从而提升算法的稳定性和收敛性^[25]。剩余的 90% 个体通过轮盘赌策略选择, 进行交叉变异操作。

在完成遗传算法的交叉和变异操作后, 引入模拟退火算法以实施局部优化, 在预设的起始和终止范围内进行反复迭代, 直至满足终止条件, 从而输出最终的最优解。具体的算法步骤如下。

算法 1: 基于遗传算法与模拟退火的货物装载优化

Input: 货物数据 goods_set, 箱子尺寸 box_x、box_y、box_z, 箱子承重 box_w

Output: 最优解 best_solution, 最优适应度 best_rate

- 1: 初始化工作空间, 设置容器参数
- 2: 缩放容器尺寸并计算容器体积 V_BOX
- 3: 读取货物数据并计算货物的类型数、总数、总体积和总质量
- 4: 设置遗传算法和模拟退火算法的各种参数
- 5: 采用两段式编码的方法, 结合混沌映射策略, 产生初始种群 $Y(a)$
- 6: 根据动态空间分割规则实施解码操作, 生成初步装载方案
- 7: 计算每个个体的适应度, 并依据适应度进行降序排列
- 8: 进行遗传算法种群的选择操作
- 9: for $k = 1$ to 10:
- 10: 将适应度排名前 10% 的个体复制到下一代, 标记为 $Y1(a)$
- 11: end for
- 12: 剩余 90% 的个体进行交叉和变异操作, 标记为 $Y2(a)$
- 13: 进行交叉操作: $Y2(a) \rightarrow Y2(a')$
- 14: 进行变异操作: $Y2(a') \rightarrow Y2(a'')$
- 15: 进行模拟退火操作: $Y2(a'') \rightarrow Y2(a''')$

16: 将复制的高适应度个体 Y1(a)与操作完成的 Y2(a'')结合, 形成新的种群
17: repeat until 满足终止条件:
18: 判断当前是否满足终止条件
19: 如果满足条件, 输出最优解并退出
20: 如果不满足条件, 返回第 8 步, 继续迭代以寻找更优解
21: end for
算法具体流程如图 7 所示。

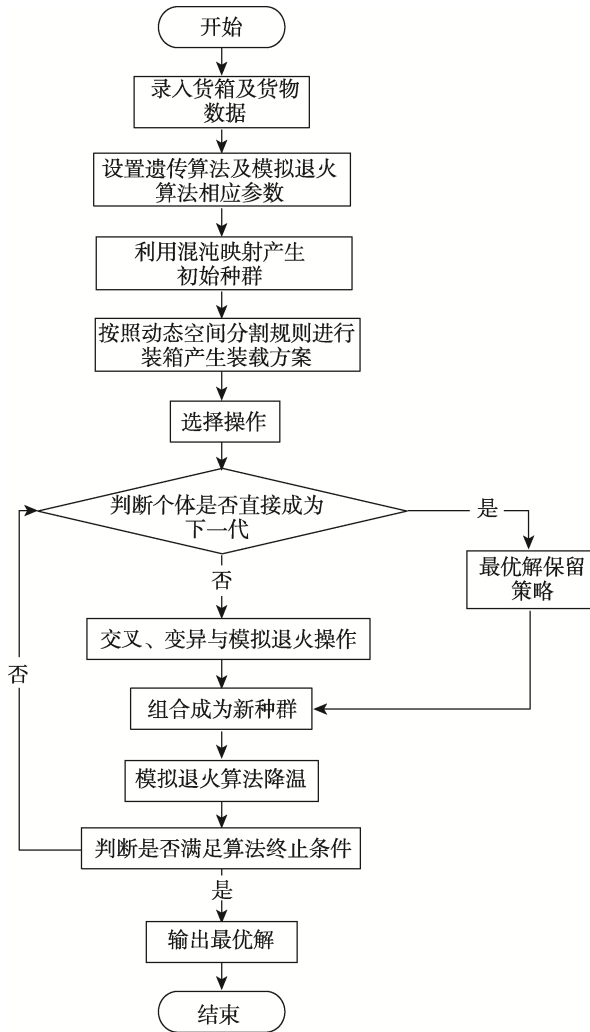


图 7 算法流程
Fig.7 Algorithm flowchart

4 实验方案

4.1 参数设置

本文研究的无人机货舱装载算法采用 MATLAB 编程软件实现。由于无人机装载问题的特殊性, 为验证混合算法的适应性, 从某汽车零部件公司获取的大量零件中抽取 20 种真实货物数据, 并将其分为 3 个实验组: 第 1 实验组为偏大型货物, 第 2 实验组为偏小

型货物, 第 3 实验组为混合型货物, 基本参数见表 1。

表 1 货物参数
Tab.1 Goods parameter

参数	实验组 1 (偏大型)	实验组 2 (偏小型)	实验组 3 (混合型)
平均长度/ cm	14.5	10	13.2
平均宽度/ cm	11	7.1	8.6
平均高度/ cm	5.6	4.7	4.8
平均质量/g	430	175	300
件数	80	170	140

实验中使用的计算机型号及配置为 Intel(R) Core(TM) i5-6500T CPU, 主频为 2.50 GHz。算法具体参数设置如下: 遗传算法的种群规模为 250, 交叉概率为 0.85, 变异概率为 0.05, 保留最优解的比例设定为 10%; 模拟退火算法的初始温度设定为 1 000, 终止温度为 10^{-2} , 降温速率为 0.95。所选无人机型号为 DJI FlyCart 30 双电版本, 载质量为 30 kg, 货箱尺寸为 573 mm×416 mm×306 mm。

4.2 算例分析与比较

本研究基于 Bischoff 与 Rateliff 提出的标准三维装箱测试数据集 BR1—BR15 进行算法验证, 重点选取 BR1—BR7 共 7 个测试集开展实验。实验采用统一规格的标准货箱 (587 cm×233 cm×230 cm), 并与贾康^[26]研究公布的基准数据进行对比分析。如表 2 所示, 本文算法在 7 组测试中平均空间利用率达到 89.45%, 相较于文献[26]的平均利用率 (87.53%) 提升 1.92%。实验结果表明, 本文设计的混合遗传模拟退火算法能够有效协调全局探索与局部优化能力, 在保证解质量的同时提升三维装箱效率, 验证了该算法在复杂约束场景下的工程适用性。

表 2 数据集 BR1—BR7 的运行结果对比
Tab.2 Comparison of operation results of datasets BR1-BR7

测试集	空间利用率/%	
	文献[26]	本文算法
BR1 (3)	84.55	88.61
BR2 (5)	87.02	95.82
BR3 (8)	88.45	89.54
BR4 (10)	88.76	87.12
BR5 (12)	88.60	88.78
BR6 (15)	88.05	88.64
BR7 (20)	87.33	87.69

4.3 实例验证

本文通过遗传算法和模拟退火算法的结合设计出混合算法, 为了验证算法的表现, 分别使用混合遗传模拟退火算法、遗传算法、模拟退火算法以及大邻域混合模拟退火算法运行 3 组实验数据, 所得结果如图 8~11 所示。

由图 8~11 可知, 采用遗传算法与模拟退火相结

合的优化方法, 其货物装载布局呈现显著的优越性, 不仅实现了空间利用率的最大化, 在堆垛密度和结构稳定性方面也达到了较优水平。通过这种智能优化策略获得的货物装载方案表现出理想效果, 充分体现了该算法在解决复杂装载问题中的实际应用价值。

4 种算法的实验结果对比见表 3。从货舱空间利用率来看, 混合遗传模拟退火算法的平均空间利用率

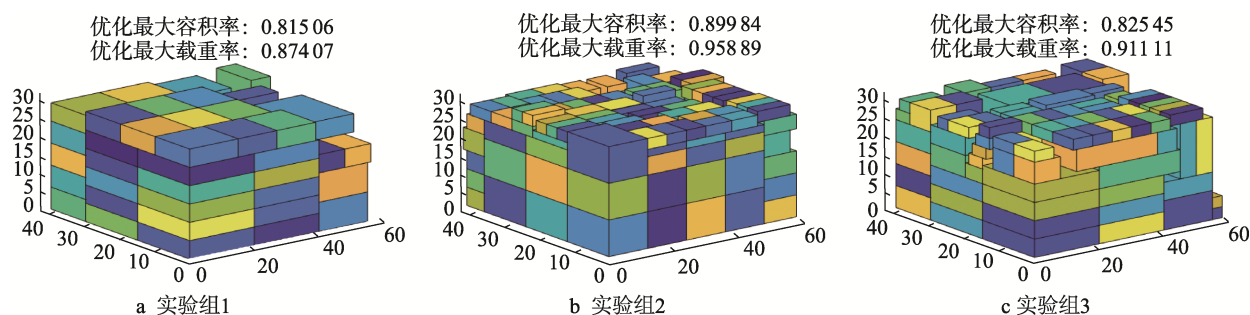


图 8 遗传算法

Fig.8 Genetic algorithms

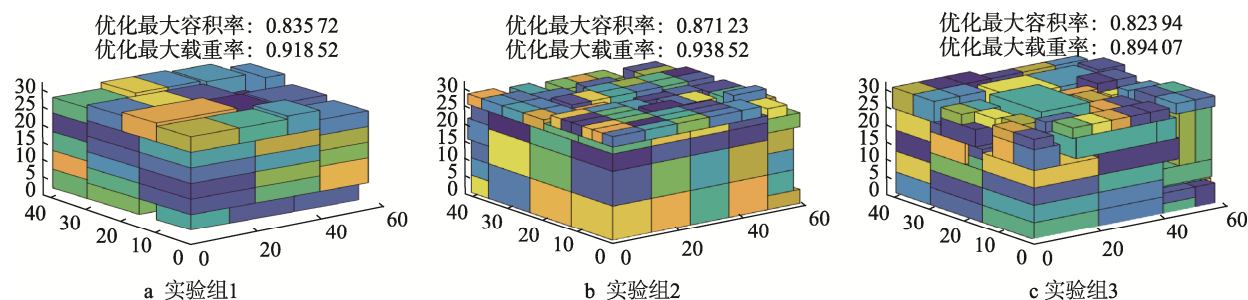


图 9 模拟退火算法

Fig.9 Simulated annealing algorithm

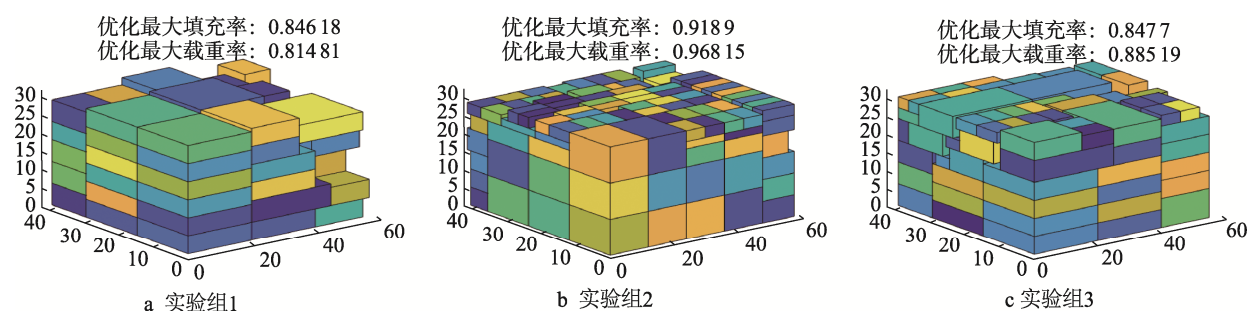


图 10 大邻域混合模拟退火算法

Fig.10 Large neighborhood hybrid simulated annealing algorithm

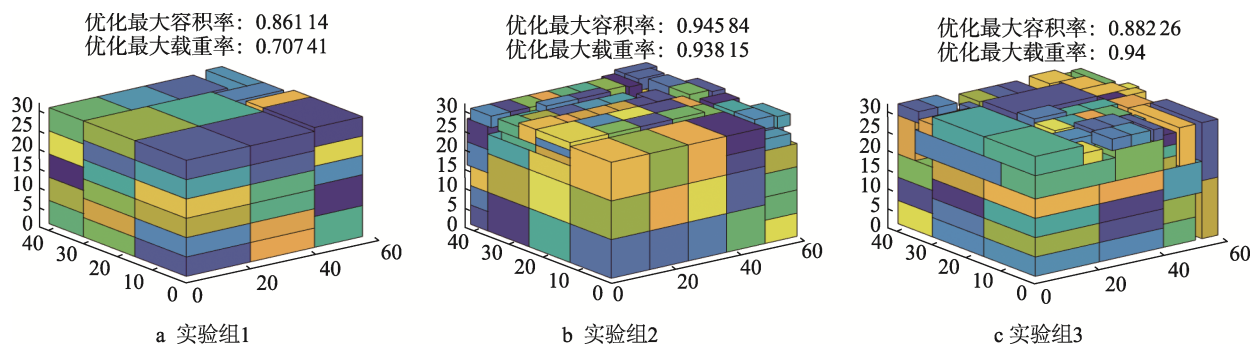


图 11 混合遗传模拟退火算法

Fig.11 Hybrid genetic simulated annealing algorithm

表 3 算法对比
Tab.3 Algorithm comparison

算法	空间利用率/%			平均利用率/%
	实验组 1	实验组 2	实验组 3	
遗传算法	81.50	89.98	82.54	83.67
模拟退火算法	83.57	87.12	82.39	84.36
大邻域混合模拟退火算法	84.61	91.89	84.77	87.09
混合遗传模拟退火算法	86.11	94.58	88.22	89.63

达到 89.63%，相较于其他 4 种算法，装载利用率平均提高将近 5%，垛型布局也更加合理。通过 3 组实验的对比可知，混合遗传模拟退火算法的装载利用率均高于其他 3 种算法，由此证明本文算法的鲁棒性较优，在实际工作中面对不同尺寸的货物均能保证得出较优的装载方案，降低企业成本，提高装载效率。

5 结语

针对无人机货舱装载优化问题，通过构建数学模型并改进智能优化算法，提出一种创新的混合算法进行求解。为验证算法的实际效果，研究选取某汽车零部件公司的真实货物数据进行测试，结果表明，该混合算法在多种现实约束条件下能够提供更合理的装载方案，显著提升空间利用率和装载稳定性。在应用价值方面，本研究不仅优化了货舱空间的使用效率，有效减少空间浪费和企业运营成本，还为推动低空经济政策的实施提供了技术支撑，同时为解决传统集装箱装载问题提供了有益参考。然而，研究仍存在进一步探索的空间，未来可着重研究不规则货舱与不规则货物的装载问题，深入探索其他智能算法与实际无人机模型的结合方式，以期获得更优的优化效果。本研究提出的混合算法为无人机货舱装载问题提供了有效的解决方案，具有重要的实践意义和推广价值，对推动无人机在物流、运输等领域的应用具有积极作用。

参考文献：

[1] GEORGE J A, ROBINSON D F. A Heuristic for Packing Boxes into a Container[J]. Computers & Operations Research, 1980, 7(3): 147-156.

[2] MILLER R, STOUT Q F. Hypercube Algorithms for Some NP-Hard Packing Problems[C]// Proceedings of the Fourth Conference on Hypercube Concurrent Computers and Applications, 1989: 769-776.

[3] GEHRING H, MENSCHNER K, MEYER M. A Computer-Based Heuristic for Packing Pooled Shipment Containers[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 44(2): 277-288.

[4] MA L X, WANG W, ZHANG T, et al. A Greedy Online 3D Bin Packing Algorithm Based on Multi-Indicator Fusion[C]// Third International Conference on Algorithms, Microchips, and Network Applications (AMNA 2024). SPIE, 2024: 1317103.1-1317103.7.

[5] TOLE K, MOQA R, ZHENG J Z, et al. A Simulated Annealing Approach for the Circle Bin Packing Problem with Rectangular Items[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 176: 109004.

[6] FLESZAR K. A MILP Model and Two Heuristics for the Bin Packing Problem with Conflicts and Item Fragmentation[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 303(1): 37-53.

[7] BORGES Y G F, LIMA V L D, MIYAZAWA F K, et al. Algorithms for the Bin Packing Problem with Scenarios[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2024, 48(4): 34.

[8] 张德富, 魏丽军, 陈青山, 等. 三维装箱问题的组合启发式算法[J]. 软件学报, 2007, 18(9): 2083-2089.

[9] 曹先彬, 刘克胜, 王煦法. 基于免疫遗传算法的装箱问题求解[J]. 小型微型计算机系统, 2000, 21(4): 361-363.

[10] 张长勇, 刘佳瑜. 基于混合遗传算法的多箱型集装箱装载问题分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 747-755.

[11] 徐江, 王航, 周艳杰, 等. 基于混合遗传算法的可变尺寸货物装箱问题研究[J]. 包装工程, 2024, 45(13):

- 259-267.
- XU J, WANG H, ZHOU Y J, et al. Research on Variable Size Cargo Packing Problem Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(13): 259-267.
- [12] 赵向领, 左蕾. 货运飞机装箱与配载组合优化[J]. *航空动力学报*, 2024, 39(11): 475-485.
- ZHAO X L, ZUO L. Combination Optimization of Cargo Aircraft Packing and Stowing[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2024, 39(11): 475-485.
- [13] 李想, 袁锐波, 杨灏泉. 求解集装箱装载问题的混合蚁群模拟退火算法[J]. *包装工程*, 2024, 45(11): 163-174.
- LI X, YUAN R B, YANG H Q. Hybrid Ant Colony Simulated Annealing Algorithm for Container Loading Problem[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(11): 163-174.
- [14] 杨欣, 李明. 基于块合并策略的三维装箱多目标优化算法[J]. *包装工程*, 2025, 46(1): 193-202.
- YANG X, LI M. A Multi-Objective Optimization Algorithm for 3D Bin Packing Based on Block Merging Strategy[J]. *Packaging Engineering*, 2025, 46(1): 193-202.
- [15] 杜文龙, 罗福源, 臧铁钢. 基于改进人工蜂鸟算法的在线航空行李三维装箱[J]. *包装工程*, 2025, 46(3): 179-185.
- DU W L, LUO F Y, ZANG T G. Online Three-Dimensional Baggage Packing for Aviation Based on Improved Artificial Hummingbird Algorithm[J]. *Packaging Engineering*, 2025, 46(3): 179-185.
- [16] 张长勇, 王彤. 基于混合遗传算法的飞机腹舱装载优化[J]. *包装工程*, 2024, 45(21): 200-207.
- ZHANG C Y, WANG T. Optimization of Aircraft Abdominal Cabin Loading Based on Hybrid Genetic Algorithm[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(21): 200-207.
- [17] KANG Z J, GUAN Y, WANG J K, et al. Research on Genetic Algorithm Optimization with Fusion Tabu Search Strategy and Its Application in Solving Three-Dimensional Packing Problems[J]. *Symmetry*, 2024, 16(4): 449.
- [18] WANG Y, WEI Y H, WANG X W, et al. A Cluster-
ing-Based Extended Genetic Algorithm for the Multi-depot Vehicle Routing Problem with Time Windows and Three-Dimensional Loading Constraints[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 133: 109922.
- [19] BOUKEDROUN M, DUVIVIER D, AIT-EL-CADI A, et al. A Hybrid Genetic Algorithm for Stochastic Job-Shop Scheduling Problems[J]. *RAIRO-Operations Research*, 2023, 57(4): 1617-1645.
- [20] DUAN S, JIANG S, DAI H, et al. The Applications of Hybrid Approach Combining Exact Method and Evolutionary Algorithm in Combinatorial Optimization[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2023, 10(3): 934-946.
- [21] JUNQUEIRA L, MORABITO R, YAMASHITA D S. Three-Dimensional Container Loading Models With-cargo Stability and Load Bearing Constraints[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(1): 74-85.
- [22] PISINGER D. Heuristics for the Container Loading Problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 141(2): 382-392.
- [23] 唐祎玲, 江顺亮, 叶发茂, 等. 最优粒子增强探索粒子群算法[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(4): 25-32.
- TANG Y L, JIANG S L, YE F M, et al. Optimal Particle Enhanced Exploration Particle Swarm Optimization[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(4): 25-32.
- [24] WANG H F, CHEN Y J. A Hybrid Genetic Algorithm for 3D Bin Packing Problems[C]// 2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA). Changsha, China. IEEE, 2010: 703-707.
- [25] 汪凯, 张贵仓. 基于改进蚁群算法的图像边缘检测研究[J]. *计算机工程与应用*, 2017, 53(23): 171-176.
- WANG K, ZHANG G C. Research on Image Edge Detection Based on Improved Ant Colony Algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(23): 171-176.
- [26] 贾康. 基于遗传算法的三维装箱问题优化研究[J]. *计量与测试技术*, 2023, 50(7): 75-78.
- JIA K. Research on Optimization of 3D Bin Packing Problem Based on Genetic Algorithm[J]. *Measurement & Testing Technology*, 2023, 50(7): 75-78.