

中文引用格式:唐建勋,岳帅,王岩韬,等. 面向非标应急物资的运输机混合装载方案[J]. 中国安全科学学报,2025,35(9):244-252.

英文引用格式:TANG Jianxun, YUE Shuai, WANG Yantao, et al. Research on hybrid loading scheme of transport aircraft for off-standard emergency materials[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 244-252.

面向非标应急物资的运输机混合装载方案*

唐建勋¹讲师, 岳帅², 王岩韬¹教授, 赵向领¹副教授

(1 中国民航大学 空中交通管理学院, 天津 300300;

2 中国国际航空股份有限公司 运行控制中心, 北京 100621)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.1736

资助项目:国家重点研发课题(2022YFC3002502)。

【摘要】 针对应急物资调运时运输机载重和空间利用率偏低问题,面向类型多、尺寸质量差异大、存在捆绑或成比例运输的非标应急物资,研究运输机的混合装载方法。提出基于尺寸的分类标准,将物资分为大中小3类;针对中小型物资建立多目标二维装载模型,融合最低水平线算法与非支配排序遗传算法(NSGA-III)求解,将结果视为大型物资;在运输机货舱中,以最大装载面积、业载及最小重心偏差为目标,利用NSGA-III生成大型物资装载方案。结果表明:该方法通过物资分类与分阶段求解,可有效降低解空间维度,提高求解效率,生成的装载方案的货舱空间平均利用率达78.09%,载重平均利用率达86.19%,平均重心偏差仅0.222 m,在保障飞行安全的前提下显著提升运输机利用率,为应急救援快速决策提供支持。

【关键词】 非标应急物资; 运输机; 装载方案; 非支配排序遗传算法(NSGA-III); 最低水平线

Research on hybrid loading scheme of transport aircraft for off-standard emergency materials

TANG Jianxun¹, YUE Shuai², WANG Yantao¹, ZHAO Xiangling¹

(1 School of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2 Operation Control Center, Air China Limited, Beijing 100621, China)

Abstract: In order to address the problem of low payload and spatial utilization rates in the air transportation of emergency supplies, this study focuses on mixed loading schemes for transport aircraft, targeting non-standard emergency materials characterized by diverse types, significant variations in size and mass, and the presence of bundling or proportional transportation requirements. A size-based classification criterion was proposed to divide the materials into three categories: large, medium, and small. For medium and small items, a multi-objective two-dimensional loading model was established and solved by integrating the bottom-left algorithm with NSGA-III. The resulting configurations were then treated as large-sized items. Within the aircraft cargo hold, NSGA-III was further employed to generate loading schemes for these large-sized items, with the objectives of maximizing loaded area and payload weight while minimizing center-of-gravity deviation. The results indicate that, through material classification and staged optimization, the proposed method effectively reduces the dimensionality of the solution space and improves

computational efficiency. The generated loading schemes achieve an average cargo space utilization rate of 78.09%, an average payload utilization rate of 86.19%, and an average center-of-gravity deviation of only 0.222 meters. This approach significantly enhances the utilization of transport aircraft while ensuring flight safety, and provides timely decision-making support for emergency relief operations.

Keywords: non-standard emergency supplies; air transportation; loading program; non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-III); bottom-left algorithm

0 引言

非标应急物资指灾害救援中使用的,尺寸或质量不符合民航集装单元标准的物资(如救援车辆、医疗方舱)。这类物资类型多、尺寸质量差异大,部分需捆绑或成比例运输(如设备与配套材料同运)。运输机在重大突发事件中承担其快速投送任务,预先制定混合装载方案是提升应急投送效率的关键。

装箱问题研究呈现出多目标协同^[1-2]、多约束集成^[3-4]等新趋势,航空装载属于装箱问题的分支,PAQUAY 等^[5]研究无重心限制的多尺寸集装器的三维装箱问题,获得了良好可行解的启发式算法。DESAI 等^[6]考虑客改货机型的地板质量限制,构建了混合整数规划装载模型。PILON 等^[7]利用量子退火器,解决了固定集装箱种类的小规模飞机装载问题。赵向领等^[8]研究了货机装箱与配载组合问题,考虑业载和重心偏差,建立了整数规划模型。NANCE 等^[9]研究了无重心限制的托盘与车辆混合装载。KALUZNY 等^[10]设计了一种混合整数线性规划模型,解决了运输机的载荷平衡问题。杨晨光等^[11]基于遗传算法,提出一种求解运输机的多约束装载问题的最小油耗混合算法。刘宁君等^[12]考虑重心位置调整,提出一种自动化运输机群货物装载方法。孟冲等^[13]将运输机装载转化为二维装载问题,通过 Lingo 软件求得最优解。赵灿等^[14]针对多台大型装备提出货舱跨分区装载优化方法。目前,航空装载主要研究民航客货机的集装器装载,部分未考虑重心限制。对于运输机装载,研究非标应急物资的较少,缺少考虑捆绑比例约束。

装载问题属于非确定性多项式时间难解问题^[15],广泛使用模拟退火算法^[16]、蚁群算法^[17]、遗传算法^[18]、禁忌搜索算法^[19]求解,计算效率高但难以获得全局最优解。因此,笔者拟提出一种基于尺寸的物质分类标准,将混合装载拆分为预装载空间中小型物资装载和运输机货舱大型物资装载 2 个问题,分别构建包含捆绑或成比例运输约束的多目标混合整数规划模型,融合非支配排序遗传算法

(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA) 的改进算法 NSGA-III 与最低水平线算法进行求解,以期生成货舱面积和载重利用率高且重心偏移度低的混合装载方案,为投送应急物资提供快速决策支持。

1 运输机混合装载投送非标应急物资

1.1 应急场景下的物资投送

传统装载研究基于确定的物资与飞机数量生成装载方案,难以适用于应急场景下物资陆续运抵机场的情况。文中预先构建非标应急物资混合装载方案,供物资抵达机场后快速匹配选用,实现即时装载。考虑小型物资可集装实现最大化堆叠,大型装备和集装器需平铺,宜采用二维装载制定混合装载方案。

1.2 物资分类

以运输机货舱宽度为依据,设计一套基于尺寸的非标应急物资分类标准,见表 1。其中,物资较长边定义为长,记为 l ;较短边定义为宽,记为 w ; W 为运输机货舱宽度; D 为预装载空间长度,等于中型物资长度的中位数。预装载空间宽度等于运输机货舱宽度。

表 1 物资分类标准		
Table 1 Materials classification standard		
物资分类		尺寸限制
大型		$0.7W \leq w \leq W$
		$0.5W < w < 0.7W (l > D)$
中型	I 类	$0.5W < w < 0.7W (l \leq D)$
	II 类	$0.4W < w \leq 0.5W$
小型		$0 < w \leq 0.4W$

基于上述分类标准,物资按下列原则布置:①大型物资单独放置;②中型 II 类物资,当质量和长度相差在 10% 以内,两两配对形成虚拟大型物资后放置;③其他物资,在预装载空间进行二维装载,形成虚拟大型物资后放置。

1.3 运输机装载重心要求

运输机重心位置对其稳定性与操控性至关重

要,偏离重心包线将危及安全,需满足包线限制。基于合力矩定理,得到无油重心平衡力臂 CG_Z 和起飞重心平衡力臂 CG_T 。

$$CG_Z = \frac{M_E L_E + \sum_1^m M_i L_i}{M_E + \sum_1^m M_i} \quad (1)$$

$$CG_T = \frac{M_E L_E + M_F L_F + \sum_1^m M_i L_i}{M_E + M_F + \sum_1^m M_i} \quad (2)$$

式中: M_E 为机体质量,kg; L_E 机体质量对应的力臂,m; M_F 为燃油质量,kg; L_F 为燃油油箱对应的力臂,m; M_i 为物资 i 的质量,kg; L_i 为物资 i 的力臂,m。

2 运输机混合装载模型构建

基于物资分类,将混合装载转化为分阶段装载(图1):1为预装载空间中小型物资装载,得到虚拟大型物资;2为运输机货舱大型物资装载。

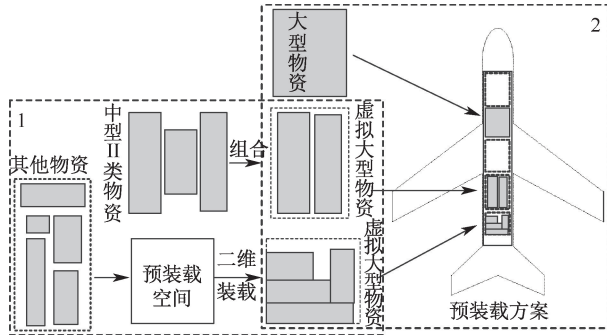


图1 分阶段装载

Fig. 1 Schematic diagram of staged loading

2.1 基本假设

结合实际装载作业要求,为便于建模,作出如下基本假设:物资视为规则、质量均匀物体,按最大外尺寸立方体考虑,其几何中心即重心,忽略挤压变形;物资尺寸已包含系留、装卸等操作所需间隙;货舱可用装载空间近似为规整长方体;预装载空间完成二维装载后,整体视为单件规则物体。

2.2 预装载空间中小型物资装载模型

决策变量为:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{物资 } i \text{ 放入预装载空间} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

目标函数分别为预装载空间装载面积最大化、横向重心偏差最小化和纵向重心偏差最小,分别见下式:

$$\max Z_1 = \sum_1^n s_i x_i \quad (4)$$

$$\min Z_2 = |C_x - R_x| \quad (5)$$

$$\min Z_3 = |C_y - R_y| \quad (6)$$

式中: n 为物资总数; s_i 为物资 i 的占用面积, m^2 ; C_x 、 C_y 为预装载空间的横向和纵向几何中心; R_x 、 R_y 为装载物资的横向和纵向重心。

下式分别表示预装载空间横向重心约束和纵向重心约束,确保装载物资重心尽可能接近预装载空间的几何中心。

$$C_x^D \leq R_x \leq C_x^U \quad (7)$$

$$C_y^D \leq R_y \leq C_y^U \quad (8)$$

式中: C_x^D 、 C_x^U 为预装载空间横向重心前限和后限; C_y^D 、 C_y^U 为预装载空间纵向重心前限和后限。

下式分别表示装载物资总面积不超过预装载空间面积大小以及相邻物资占据的物理空间大小:

$$\sum_1^n s_i x_i \leq S^F \quad (9)$$

$$\begin{cases} \left| \left(a_i + \frac{w_i}{2} \right) - \left(a_j + \frac{w_j}{2} \right) \right| \geq \frac{w_i}{2} + \frac{w_j}{2} \\ \left| \left(b_i + \frac{l_i}{2} \right) - \left(b_j + \frac{l_j}{2} \right) \right| \geq \frac{l_i}{2} + \frac{l_j}{2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: S^F 为预装载空间面积, m^2 ; a_i 、 b_i 为物资 i 的左下角横坐标和纵坐标; w_i 、 l_i 为物资 i 的宽度和长度,m。

2.3 运输机货舱大型物资混合装载模型

预装载空间合成的虚拟大型物资与原有大型物资统称为大型物资,混合装载问题转化为运输机货舱大型物资装载问题,建立混合装载模型。

决策变量为:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{大型物资 } i \text{ 装进货舱} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

目标函数分别为货舱装载面积最大化,装载货物质量最大化和运输机重心偏离最小化,见下式:

$$\max Z_1 = \sum_1^m s'_i y_i \quad (12)$$

$$\max Z_2 = \sum_1^m m'_i y_i \quad (13)$$

$$\min Z_3 = |P_G^o - P_G^c| \quad (14)$$

式中: m 为大型物资总数; s'_i 为大型物资 i 的面积, m^2 ; m'_i 为大型物资 i 的质量,kg; P_G^o 为运输机的目标起飞重心; P_G^c 为运输机的实际起飞重心。

下式分别表示运输机装载后的无油重心约束和

起飞重心约束:

$$P_Z^D \leq P_Z \leq P_Z^U \tag{15}$$

$$P_T^D \leq P_G^r \leq P_T^U \tag{16}$$

式中: P_Z^D 为无油重心前限; P_Z^U 为无油重心后限; P_Z 为运输机无油重心; P_T^D 为起飞重心前限; P_T^U 为起飞重心后限。

下式分别表示物资长度不超过货舱长度、装载物资总质量不超过运输机最大载重,以及相邻物资占据的物理空间大小:

$$\sum_1^m l'_i y_i \leq L \tag{17}$$

$$\sum_1^m m'_i y_i \leq M \tag{18}$$

$$\left| \left(b'_i + \frac{l'_i}{2} \right) - \left(b'_j + \frac{l'_j}{2} \right) \right| \geq \frac{l'_i}{2} + \frac{l'_j}{2}, \forall i, j \in m \tag{19}$$

式中: l'_i 为大型物资 i 的长度, m ; b'_i 为大型物资 i 的纵坐标; L 为运输机货舱长度, m ; M 为运输机最大载重, kg 。

针对需要捆绑或成比例投送的物资,设计捆绑限制约束与数量比例约束,见下式:

$$\sum_1^p \gamma_k = 0, \forall k = 1, 2, \cdots, p \tag{20}$$

$$\sum_1^p \beta_k q_k = 0, \forall k = 1, 2, \cdots, p \tag{21}$$

式中: γ_k 为第 k 种物资的捆绑属性; β_k 为第 k 种物资的比例属性; q_k 为装载方案中第 k 种物资的数量; p 为物资种类数。

3融合最低水平线和 NSGA-III 的算法设计

3.1 解决预装载空间二维装载的启发式算法

采用最低水平线算法^[20]求解预装载空间装载问题,算法步骤如下:①预装载空间底部边界设为初始水平线集。②按质量递减选择物资;质量相同则选放置后重心偏移小者。物资长边不大于预装载空间短边时,有 50% 概率旋转放置。③选定高度最低的水平线。若有多条,则选择最左侧的。④若物资长度小于水平线宽度,则放置在选定水平线的最左端,更新水平线集;否则,提升选定线至其相邻较低水平线高度,更新水平线集,返回步骤 3。⑤物资均放置则结束,否则返回步骤 2。

3.2 解决装载方案的 NSGA-III 算法

针对多目标优化问题,SRINIVAS 等^[21]发展了

NSGA 及其改进算法。其中,NSGA-III^[22]优化效果较好,它通过预设的均匀分布参考点引导算法搜索,有效处理高维多目标问题。

3.2.1 染色体编码

考虑物资可旋转摆放,染色体采用 2 段式编码,第 1 段为装载物资的顺序,基因 i 表示物资 i ;第 2 段为物资是否旋转,基因 1 表示旋转,0 为不旋转。染色体编码操作如图 2 所示。为保证遗传操作可行性,将第 2 段物资旋转基因与第 1 段物资顺序基因绑定。

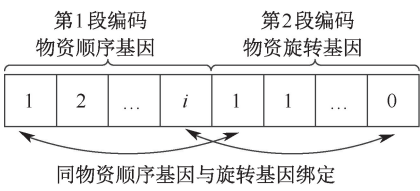


图 2 染色体编码操作

Fig. 2 Chromosome coding operation

预装载空间二维装载时,被最低水平线算法限制旋转的物资,旋转基因固定为 0。运输机货舱装载时,大型物资无需旋转,旋转基因固定为 0。

3.2.2 遗传操作

1) 选择算子。采用基于非支配排序的锦标赛选择算子以维持种群多样性,先对种群进行快速非支配排序,随后在每轮随机挑选的 4 个个体中,优选距参考线最近的 2 个作为交叉双亲。

2) 交叉算子。采用部分映射交叉,在染色体上随机选取 2 点, R_1 和 R_2 ($1 < R_1 < R_2$) 界定交叉片段,并以概率 P_1 交换该片段生成新个体。染色体交叉操作如图 3 所示。

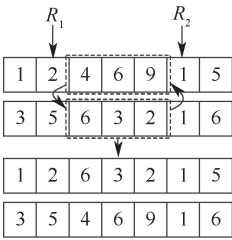


图 3 染色体交叉操作

Fig. 3 Chromosome crossover operation

3) 变异算子。采用区间反转变异,对交叉后的新个体,随机选取 2 点, B_1 和 B_2 ($1 < B_1 < B_2$) 界定变异区间,以概率 P_2 反转该区间基因生成新子代。变异操作如图 4 所示。

3.2.3 协同机制

预装载空间二维装载时,物资的顺序基因与旋转基因在染色体中呈绑定状态,确保交叉和变

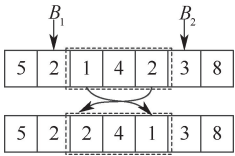


图 4 染色体变异操作

Fig. 4 Chromosome mutation manipulation

异后解码合理。采用最低水平线算法解码染色体为装载布局,计算装载面积利用率、重心偏移等目标函数值,用于启发式排布策略评估染色体优劣。该评估结果反馈至 NSGA-III 算法,引导种群选择与进化,实现启发式排布规则与遗传搜索的有效协同。

3.2.4 NSGA-III 流程

步骤 1:根据所建模型的目标个数生成均匀分布的参考点。

步骤 2:初始化种群,随机产生种群规模为 N 的父代种群 P_t ,并进行非支配排序。

步骤 3:利用锦标赛选择、交叉、变异操作方法生成大小为 N 的子代种群 Q_t 。

步骤 4:将父代种群与子代种群合并,形成新的大小为 $2N$ 的种群 R_t 。

步骤 5:对种群 R_t 进行快速非支配排序,得到种群 R_t 的帕累托前沿面。将帕累托前沿面从低到高排序,利用关联参考点形成种群大小为 N 的下一代种群 P_{t+1} 。

步骤 6:当算法运行到最大迭代次数时停止迭代。否则,重复步骤 3—步骤 5。

3.3 算法总流程

算法总流程如图 5 所示。

4 多运输机型混合装载仿真试验

4.1 B757-200F 混合装载方案

由于运输机的性能参数数据有限,采用 B757-200F 货机进行仿真试验。该机型货舱长 33 m、宽 3.17 m、高 1.95 m,空机质量为 52 752 kg,无油质量为 83 460 kg,起飞质量为 108 862 kg,平均空气动力弦为 5.07 m,前缘平均气动弦为 23.19 m。在计算重心时,使用重心的纵向位置与平均空气动力弦长 (Mean Aerodynamic Chord, MAC) 占比 (%MAC) 表示。目标起飞重心为 24%MAC。

结合实际非标应急物资,构造仿真试验的物资信息,采用字母加数字的组合表示物资编号,截取部分物资信息见表 2。

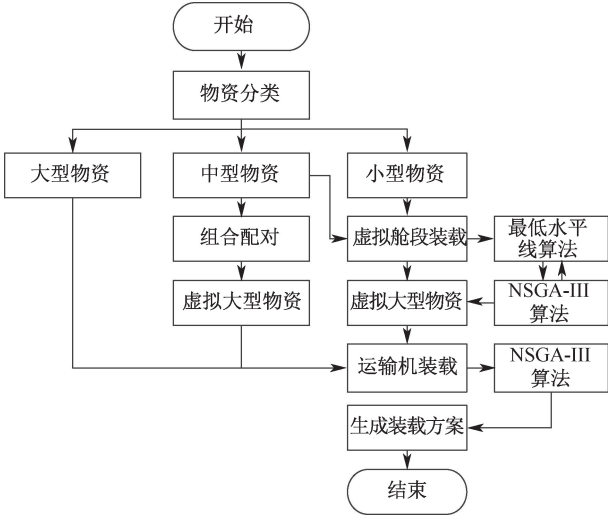


图 5 总流程

Fig. 5 General flow

表 2 物资信息

Table 2 Materials information

序号	物资种类	编号	长/m	宽/m	质量/kg
1	特种车辆	A0	5.10	2.85	7 800
11	发电机	B0	2.00	1.80	1 480
28	建筑材料	C7	0.40	0.20	300

基于 Python 3.11 设计 NSGA-III 算法,针对交叉概率与变异概率等关键参数,采用两因素三水平设计的正交试验进行优选,以优化算法搜索性能。表 3 为各因素水平设置,表 4 为参数组合试验方案。每组参数组合进行 20 次独立试验,取重心偏差均值作为性能评价指标。极差分析各组合结果,见表 5。测试发现交叉概率为 0.95,变异概率为 0.05 时,算法性能最佳,故设置最大迭代次数为 100,种群规模为 50,交叉概率 P_1 为 0.95,变异概率 P_2 为 0.05。

表 3 正交试验参数设置

Table 3 Orthogonal experiment parameter setting

参数	水平 1	水平 2	水平 3
P_1	0.85	0.90	0.95
P_2	0.01	0.05	0.10

表 4 正交试验测试结果

Table 4 Orthogonal experiment test results

试验序号	水平等级		均值 $\bar{F}$
	P_1	P_2	
1	0.85	0.01	0.216
2	0.85	0.05	0.198
3	0.85	0.10	0.216
4	0.90	0.01	0.363
5	0.90	0.05	0.163
6	0.90	0.10	0.171
7	0.95	0.01	0.178
8	0.95	0.05	0.154
9	0.95	0.10	0.187

表 5 正交试验极差分析

Table 5 Orthogonal experimental range analysis				
参数	水平 1	水平 2	水平 3	极差
P_1	0.210	0.232	0.173	0.059
P_2	0.252	0.172	0.191	0.080

仿真试验显示,货舱平均面积利用率达 71.65%,载重利用率达 95.80%,均处较高水平;平均重心偏差为 | 0.166 | m,满足要求。部分装载方案见表 6。

表 6 装载方案
Table 6 Loading plan

序号	装载方案	货舱面积利用率/%	货舱载重利用率/%	重心偏差 /m
1	B7 A3 A4 A4 A4 B4 A2	74.64	94.68	0.323
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
82	B7 C0 A5 B7 A4 A0 A2 A2	69.82	92.44	0.005
平均利用率及偏差		71.65	95.80	0.166

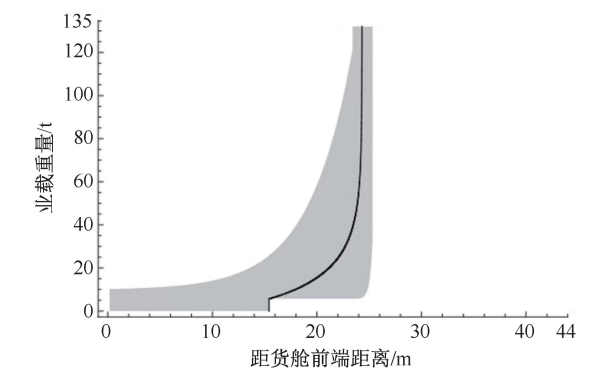


图 6 重心包络线的纵向范围与携带的有效载荷关系
Fig. 6 Longitudinal extent of the center of gravity envelope in relation to the payload carried

4.2 运输机混合装载方案

以文献[10]中某 C 型运输机为例进行仿真试验,该机型货舱长 44 m、宽 5.8 m、高 4.09 m,空机质量为 169 643 kg,起飞质量为 379 000 kg,最大载重

89 000 kg。其配载重心范围如图 6 所示,图中实线为重心理想位置,阴影区域表示允许的前后边界。结合实际非标应急物资,构造仿真试验的物资信息,截取部分物资信息见表 7。

表 7 物资信息

Table 7 Materials information					
序号	物资种类	编号	长/m	宽/m	质量/kg
1	特种车辆	A0	6.45	4.25	12 665
9	救援车辆	A8	8.32	4.56	6 964
15	指挥车辆	B4	6.88	2.87	4 440
22	供水设备	C1	3.68	2.88	670
32	发电设备	D1	6.00	2.81	12 400
51	重型设备	F0	6.35	5.46	17 000

仿真试验显示,生成涵盖所有物资的装载方案,货舱平均面积利用率达 78.09%,载重利用率达 86.19%,均处较高水平;平均重心偏差为 10.222| m,满足要求。部分装载方案见表 8。

表 8 装载方案
Table 8 Loading plan

序号	装载方案	货舱面积利用率/%	货舱载重利用率/%	重心偏差 /m
1	B4 B4 A0 E9 E5 D7	85.40	99.69	0.054
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
81	A2 B6 B7 E1 D3 A0 D1 D9 C4 B9 E1 D3 D1	72.80	98.49	0.029
平均利用率及偏差		78.09	86.19	0.222

为验证模型及算法对物资种类规模的适用性,随机选取种类差异显著的 15 种及 30 种物资进行试验。表 9 为不同规模装载方案效果,其表明:本文方法在不同物资种类规模任务中均能实现高效装载。

为验证所提方法在不同机型的通用性,增加货舱尺寸与载重能力各异的 I 型和 Y 型运输机测试。表 10 展示了不用机型的装载方案效果,证实了该方法在多样化场景的实用性。

表 9 不同物资种类规模的装载方案效果
Table 9 Effective loading schemes for different types and scales of cargo

物资种类 规模	货舱平均面积 利用率/%	货舱平均载重 利用率/%	平均重心 偏差 /m
小规模	76.38	93.85	0.253
中规模	75.29	81.44	0.163

表 10 不同机型的装载方案效果
Table 10 Effect of loading programs for different models

机型	货舱尺寸/m ²	最大载重/kg	货舱平均面积利用率/%	货舱平均载重利用率/%	平均重心偏差 /m
C 型	44×5.8	89 000	78.09	86.19	0.222
I 型	24.5×3.45	48 000	83.01	79.48	0.280
Y 型	18×3	45 000	88.45	72.78	0.192

平均载重利用率 85.06%,在约束中考虑了重心,但结果并未有所体现;相比之下,文中模型算法可生成多种不同装载方案,平均载重利用率为 90.92%,表现更优,在装载过程中有效控制了重心偏差,平均重心偏差为 | 0.134 | m,且能有效处理捆绑/比例约束,展现了更好的实用性和安全性。

4.3 捆绑成比例装载

针对 2.3 节中提到的部分物资存在捆绑或成比例运输需求,模型新增式(20)和式(21)约束。其核心规则为:①对于需捆绑的 G 种物资,指定其中第 k 种物资的捆绑属性 $\alpha_k = -\frac{G-1}{G}$,其他物资属性均为 $\frac{1}{G}$ 。②在捆绑基础上,若要求物资数量比例为 r_1 ,

试验结果表明:针对不同类型运输机,文中方法均能生成高效装载方案,平均面积利用率达 78%,载重利用率达 72%,重心偏差控制在 0.3 m 以内。

为进一步验证方法有效性,与文献[10]相同的数据对比。文献[10]以最小化运输机数量为目标,其货舱平均面积利用率 71.47%,与文中结果相近,

$\cdots r_k, \cdots, r_G$ 进行成比例运输,则物资的比例属性表示为 $\frac{1}{G} \times \frac{1}{r_1}, \cdots, -\frac{G-1}{G} \times \frac{1}{r_k}, \cdots, \frac{1}{G} \times \frac{1}{r_G}$ 。

以表 7 物资 A8、B4、D1 为例:要求捆绑且数量比 1:2:2。据此规则计算结果见表 11。使用文献[10]中 C 型运输机进行仿真试验,装载方案见表 12。

表 11 组合配对试验货物数据
Table 11 Combined paired experimental cargo data

物资种类	捆绑属性	数量比例
A8	2/3	2/3
B4	-1/3	-1/6
D1	-1/3	-1/6

表 12 组合配对装载方案
Table 12 Combined paired loading plan

序号	装载方案	货舱面积利用率/%	货舱载重利用率/%	重心偏差 /m											
1	<table><tr><td>E1</td><td rowspan="2">A8</td><td rowspan="2">D7</td><td>D1</td><td>B4</td><td rowspan="2">D7</td></tr><tr><td>E1</td><td>D1</td><td>B4</td></tr></table>	E1	A8	D7	D1	B4	D7	E1	D1	B4	85.41	99.82	0.954		
E1	A8	D7			D1	B4		D7							
E1			D1	B4											
2	<table><tr><td rowspan="2">A8</td><td>B4</td><td>D1</td><td>C1</td><td rowspan="2">E9</td><td rowspan="2">E8</td><td>D3</td></tr><tr><td>B4</td><td>D1</td><td>C1</td><td>D8</td></tr></table>	A8	B4	D1	C1	E9	E8	D3	B4	D1	C1	D8	88.11	97.09	0.481
A8	B4		D1	C1	E9			E8	D3						
	B4	D1	C1	D8											

5 结 论

1) 通过提出物资分类标准与 2 阶段优化模型(融合最低水平线算法与 NSGA-III),降维求解复杂二维装载问题,生成满足现实约束的非标应急物资混合装载方案。

2) 仿真试验结果表明:该方法适用于不同机型,均获得较好效果,货舱平均面积利用率 $\geq$

78.09%,载重平均利用率 $\geq$ 72.78%,重心偏差均 <10.301 m,且在不同物资种类规模下表现良好。

3) 在对比试验中,该方法载重利用率为 90.92%,高于参考值 85.06%。重心控制更优,平均偏差为 0.134 m。装载效率和飞行安全性显著提升。

4) 当前模型假设(规则物资、规整货舱)与实际存在偏差;未来需研究不规则物资建模、动态装载优先级(如医疗优先)及空地联合调度模型。

参 考 文 献

- [1] 文淦,袁雷峰,王旭东,等. 基于改进 NSGA-II 算法的不规则集装箱装载优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(3):992-1 004.
WEN Gan, YUAN Leifeng, WANG Xudong, et al. Loading optimization of irregular unit load device based on improved NSGA-II algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(3):992-1 004.
- [2] 张晶蓉,贺占文,周艳杰,等. 基于混合整数规划的工厂产品托盘打包及装箱问题研究[J]. 包装工程, 2023, 44(17):143-151.
ZHANG Jingrong, HE Zhanwen, ZHOU Yanjie, et al. Pallet packing and container loading of factory products based on mixed integer programming approach[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(17):143-151.
- [3] 张长勇,姚凯超,张宇浩. 求解在线三维装箱问题的启发式深度强化学习算法[J/OL]. 计算机工程与应用:1-13. [2025-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241025.1504.011.html>.
ZHANG Changyong, YAO Kaichao, ZHANG Yuhao. Heuristic deep reinforcement learning algorithm for solving online 3D bin packing problem[J/OL]. Computer Engineering and Applications:1-13. [2025-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20241025.1504.011.html>.
- [4] SCHOEPP S, MAK S, SENONER J, et al. Using Reinforcement learning for the three-dimensional loading capacitated vehicle routing problem[EB/OL]. (2023-07-22). <https://arxiv.org/abs/2307.12136>.
- [5] PAQUAY C, LIMBOURG S, SCHYNS M, et al. MIP-based constructive heuristics for the three-dimensional Bin Packing problem with transportation constraints[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(4): 1 581-1 592.
- [6] DESAI J, SRIVATHSAN S, LAI W Y, et al. An optimization-based decision support tool for air cargo loading[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 175: DOI:10.1016/j.cie.2022.108816.
- [7] PILON G, GUGOLE N, MASSARENTI N. Aircraft loading optimization-QUBO models under multiple constraints[EB/OL]. (2021-02-16). <https://arxiv.org/abs/2102.09621>.
- [8] 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):482-492.
ZHAO Xiangling, ZUO Lei. Optimization of cargo aircraft packing and stowage combination[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11):482-492.
- [9] NANCE R L, ROESENER A G, MOORE J T. An advanced tabu search for solving the mixed payload airlift loading problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 62(2):337-347.
- [10] KALUZNY B L, SHAW R H A D. Optimal aircraft load balancing[J]. International Transactions in Operational Research, 2009, 16(6): 767-787.
- [11] YANG Chenguang, LIU Hu, GAO Yuan, et al. Load planning of transport aircraft based on hybrid genetic algorithm[C]. Matec Web of Conferences, 2018, 179:DOI:10.1051/mateconf/201817901007.
- [12] 刘宁君,王立新,潘文俊. 运输机群货物装载方案生成方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6):751-755.
LIU Ningjun, WANG Lixin, PAN Wenjun. Optimal method of transport aircraft fleet cargo loading[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6):751-755.
- [13] 孟冲,宋华文,陈柏松. 基于 0-1 整数线性规划的军事空运装载优化算法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 500-505.
MENG Chong, SONG Huawen, CHEN Baisong. Optimization algorithm of military airlift loading based on 0-1 integer linear programming[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(3):500-505.
- [14] 赵灿,吴磊,张帅. 大型装备航空运输装载规划优化方法[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(8):35-40.
ZHAO Can, WU Lei, ZHANG Shuai. Loading planning optimization methods of large equipment air transport[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(8):35-40.
- [15] 赵向领,李云飞. 客改货飞机载重平衡问题建模与 Benders 分解算法设计[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 199-211.
ZHAO Xiangling, LI Yunfei. Weight balance problem modeling and benders decomposition algorithm design of preighter[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2):199-211.
- [16] 田丰,唐晓莺,乔东青. 基于 SA-CSA 算法的露天矿卡车调度优化方法[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 2): 176-181.

TIAN Feng, TANG Xiaoqian, QIAO Dongqing. Open-pit truck scheduling optimization method based on SA-CSA[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S2): 176–181.

[17] 刘野, 吉卫喜, 苏璇,等. 多约束下矩形件排样问题的混合求解算法研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(3): 743–755.

LIU Ye, JI Weixi, SU Xuan, et al. Research on hybrid solution algorithm for layout problem of rectangular parts with multiple constraints[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(3): 743–755.

[18] 张盈斐, 李航, 齐玉亮,等. 城市动态灾害环境下多种类多目标路径优化算法[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 217–224.

ZHANG Yingfei, LI Hang, QI Yuliang, et al. Multi-category multi-objective path optimization algorithm in urban dynamic disaster environments[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 217–224.

[19] ROESENER A G, BARNES J W. An advanced tabu search approach to the dynamic airlift loading problem [J]. Logistics Research, 2016, 9(1): 1–18.

[20] 张娜, 赵果. 基于非等值初始量蚁群算法的矩形优化排料[J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2019, 46(6): 72–77.

ZHANG Na, ZHAO Fu. Optimization of a rectangular layout based on a non-equivalent initial pheromone ant colony algorithm[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science, 2019, 46(6): 72–77.

[21] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221–248.

[22] DEB K, JAIN H. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point-based nondominated sorting approach, part I: solving problems with box constraints[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 18(4): 577–601.



作者简介： 唐建勋 （1980—）,男,山东寿光人,博士,讲师,主要从事生产调度优化、飞机装载优化方面的研究。E-mail: jxtang@cauc.edu.cn。