

吴婷婷, 李鹏, 熊威, 等. 一种基于改进遗传算法的航空集装箱多目标配载优化方法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(9): 19-25. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.240903

一种基于改进遗传算法的航空集装箱多目标配载优化方法

吴婷婷, 李鹏, 熊威, 王晓蕾

(南京林业大学汽车与交通工程学院, 南京 210037)

摘要: 航空运输是重要的交通运输方式之一, 而航空集装箱配载会影响飞机飞行安全和航空公司商业利益。针对此问题, 本文建立以机体轴惯性矩最小和重心偏差最小为目标的航空集装箱装载的混合整数线性规划模型的方法, 通过改进遗传算法中的适应度函数、选择、交叉和变异等操作提高算法的求解能力。实验结果表明, 改进的方法会使重心偏差低于 0.05% MAC, 惯性矩减小 10% 以上。

关键词: 遗传算法; 航空运输; 混合整数线性规划模型; 航空集装箱配载

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)09-0019-07

A multi-objective loading optimization method for aviation unit load devices based on improved genetic algorithm

WU Tingting, LI Peng, XIONG Wei, WANG Xiaolei

(College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Air transport is one of the important modes of transportation, and the carriage of Unit Load Devices (ULDs) affects aircraft flight safety and airline commercial interests. To solve this problem, this paper establishes a methods for mixed integer linear programming model loaded with an aviation container with the goal of minimizing the moment of inertia and the smallest deviation of the center of gravity of the body axis, and improves the solution ability of the algorithm by improving the fitness function, selection, crossing and variation in the genetic algorithm. Experimental results show that the improved method will reduce the deviation of the center of gravity less than 0.05% MAC and the moment of inertia by more than 10%.

Key words: genetic algorithm; air transportation; mix-integer linear programming model; airfreight container load

0 引言

随着航空运输业的发展, 大型飞机和客机转货机的数量不断增加, 对航空货运装载的要求更加严格。航空货物的载重与平衡问题不仅关系到飞机飞行安全, 同时还关系到航空公司的商业利益。根据 Mongeau^[1] 的描述, 空客 A340 的重心偏移 75 厘米可能导致每飞行 10 000 公里浪费 4 吨燃油。

航空集装箱装载优化问题不仅需要提高飞机装载的安全性, 也需要考虑飞机的经济性和机动性。Kaluzny 等^[2] 建立了一个 MILP (Mixed - Integer Linear Programming) 模型, 求解以最小化重心偏差和最大化有效载荷为目标的军机装载问题;

Vancroonenburg 等^[3] 建立装载模型, 以减少飞机重心与目标重心间的偏差和最大化装载货物的价值为目标, 保证飞机飞行的安全性和经济性; Limbourg 等^[4] 以惯性转矩最小化为目标, 减少货物在重心范围内的堆积, 以提高机动性和经济性, 但仅考虑了零燃油重心的约束来保证飞机的安全性; Lurkin 等^[5] 针对一组集装箱装载优化问题, 以降低燃料和装卸的成本为目标进行优化, 提高了经济性; 史永胜^[6] 以实际重心与最优重心偏差最小为目标, 保证飞机的安全性; 谷润平^[7] 和赵向领^[8] 等考虑的目标相似, 以业载量最大和重心偏移量最小为目标, 提高飞机的安全性和经济性。近年来, 载重平衡问题多使用启发式算法和遗传算法等人工智能算法进行求

基金项目: 国家自然科学基金(61403204)。

作者简介: 吴婷婷(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 运输组织与管理。

通讯作者: 李鹏(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 运输组织与管理。Email: dawan007@njfu.edu.cn

收稿日期: 2023-06-06

解,如 Emde^[9] 和 Trivella^[10] 等使用启发式算法进行求解;张丽霞^[11] 设计改进的遗传算法求解空间利用率最大化的问题;张洪^[12] 等针对 C919 的集装箱装载问题,运用改进的蚁群算法进行求解。

综上所述,国内外求解飞机载重平衡问题时,常使用遗传算法、启发式算法等人工智能算法。但是,航空集装箱装载优化问题存在目标函数单一或不全面,很少全面考虑飞机装载的安全性、机动性和经济的问题。本文针对此问题,建立一个多目标装载优化模型,并使用改进的遗传算法进行求解。

1 数学模型

1.1 假设说明

本文所建模型以重心偏移量最小和惯性转矩最小作为目标函数,约束条件依据航空公司货机配载的现实约束,综合考虑位置约束、重量约束、结构约束、重心约束和横向不平衡约束,建立航空集装箱配载优化模型。

基于航空装载问题的复杂性,结合实际装载需要注意的事项,在不影响最终装载结果的情况下,做如下假设:

- (1) 集装箱到达同一站;
- (2) 集装箱在舱位上沿着机身纵向放置;
- (3) 由于货物的不规则性,将其装在集装箱内很难计算其实际重心。为了简化问题,暂时将集装箱看作规则的长方体,将形心位置作为重心位置。

1.2 模型构建

1.2.1 目标函数

飞行安全性、机动性以及经济性是航空集装箱装载问题常见的3个优化目标。本文模型将飞机飞行的安全性、机动性和经济性的优化转化为重心偏差最小和飞机绕俯仰轴(目标重心处)的转动惯量(以下简称为俯仰转动惯量)最小。

通过优化飞机实际起飞重心与目标重心的偏移量,约束实际重心的偏移范围,确保飞机飞行的安全性:

$$f(x)_1 = \min |CG - CG_{OPT}| \quad (1)$$

其中, CG_{OPT} 为目标飞机起飞重量下的最优重心, CG 为飞机的实际重心。

通过最小化飞机的俯仰轴转动惯量,使飞机机动所耗能量最小,在节油的同时,仍然保持较好的操纵性:

$$f(x)_2 = \min \sum_{i \in U} \sum_{j \in P} w_i (a_j - ID)^2 x_{ij} \quad (2)$$

其中, i 为 ULD 编号; j 为舱位编号; w_i 为编号为 i 的 ULD 的重量; a_j 为第 j 个舱位的力臂; ID 为目标重心的力臂值; x_{ij} 为决策变量,取 0 或 1。

通过下式将 $f(x)_1$ 归一化:

$$f(x)'_1 = \frac{f(x)_1}{f(x)_{1max}} \quad (3)$$

其中: $f(x)_{1max}$ 为实际起飞重心与目标重心的偏差最大值。

由于起飞重心必须位于起飞重心包络线中,因此, $f(x)_{1max}$ 的值可以取起飞重心包络线的极限与目标重心的最大差值,以便将目标函数 $f(x)_1$ 归一化。

通过下式将 $f(x)_2$ 归一化:

$$f(x)'_2 = \frac{f(x)_2}{f(x)_{2max}} \quad (4)$$

其中, $f(x)_{2max}$ 为最大转动惯量。

由于种群不停的选择交叉变异,每一代保留最优个体,在收敛情况下 $f(x)_2$ 随着迭代次数增加逐渐减小,比初始种群中计算出最大值要小。因此,在求解时为了便于将目标函数归一化, $f(x)_{2max}$ 可以取初始种群中 $f(x)_2$ 的最大值。

对不同的优化目标设置权重 ρ 和 $1 - \rho$, 可以用于调整两个目标的相对重要性,为优化提供多种选择,将多目标转化为单目标函数:

$$f(x) = \min(\rho f(x)'_1 + (1 - \rho)f(x)'_2), \rho \in [0, 1] \quad (5)$$

1.2.2 约束条件

装载模型包含多个约束:舱位与集装箱的适配约束、位置约束、结构约束、重心包络约束、横向不平衡约束。

1) 位置约束

决策变量 x_{ij} :

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \forall i \in 1, 2, 3, \dots, N_{ULD} \\ 1, & \forall j \in 1, 2, 3, \dots, N_{POS} \end{cases} \quad (6)$$

其中, N_{ULD} 为需要装载的 ULD 的数量。

如果第 i 个集装箱装载到第 j 个舱位上,则决策变量 x_{ij} 为 1, 否则为 0。

每个舱位最多只能装载一个集装箱:

$$\sum_{i \in N_{ULD}} x_{ij} \leq 1, \quad \forall j \in 1, 2, 3, \dots, N_{POS} \quad (7)$$

其中, N_{POS} 为需要装载的位置数量。

每个集装箱只能放置一个舱位上:

$$\sum_{j \in N_{POS}} x_{ij} \leq 1, \quad \forall i \in 1, 2, 3, \dots, N_{ULD} \quad (8)$$

2) 最大业载限制

航空公司在运输货物时的最大可装载货物的重

量限制:

$$\begin{cases} OEW + FW + \sum_{i \in N_{ULD}} \sum_{j \in N_{POS}} w_i \cdot x_{ij} \leq MTOW \\ OEW + RFW + \sum_{i \in N_{ULD}} \sum_{j \in N_{POS}} w_i \cdot x_{ij} \leq MLW \quad (9) \\ OEW + \sum_{i \in N_{ULD}} \sum_{j \in N_{POS}} w_i \cdot x_{ij} \leq MZFW \end{cases}$$

其中, OWE 为飞机空机重量; FW 为起飞油量; $MTOW$ 为飞机最大起飞重量; RFM 为备用油量; MLW 为最大着陆重量; $MZFW$ 为最大零燃油重量。

3) 结构限制

舱位载荷约束: 每个舱位放置的集装箱的重量都不能超过该舱位的最大载荷:

$$w_i \cdot x_{ij} \leq \max w_j, \quad \forall j \in 1, 2, 3, \dots, N_{POS} \quad (10)$$

区域载荷约束: 某区域中舱位上装载的集装箱总重量不能超过该区域的最大载荷:

$$\sum_{j=k}^l w_i \cdot x_{ij} \leq \max w_{lk}$$

$$\forall j \in 1, 2, 3, \dots, N_{POS}; k \in 1, 2, 3, \dots, l \quad (11)$$

其中, w_{lk} 为载荷限重区域中第 k 个区域限重。

上下货舱联合线载荷约束: 由于飞机结构设计的原因, 飞机主货舱和下货舱在不同区域段存在线载荷限值;

$$\sum_{i \in N_{POS}} \sum_{j \in O_t^D} W_{it} \cdot x_{ij} \leq W_t$$

$$\forall j \in 1, 2, 3, \dots, N_{POS}; t \in 1, 2, 3, \dots, D \quad (12)$$

其中, W_{it} 为第 i 个 ULD 落在线载荷限制区域第 t 个区域的线载荷, W_t 为第 t 个线载荷区域的限值。

前货舱(从机头向后)累积载荷约束:

$$\sum_{i \in N_{POS}} \sum_{j \in O_k^F} W_{iFk} \cdot x_{ij} \leq W_{Fk}, \quad \forall k \in 1, 2, 3, \dots, F \quad (13)$$

其中, W_{iFk} 为第 i 个 ULD 落在前货舱第 k 区域的载荷, W_{Fk} 前货舱第 k 个区域的载荷限值。

后货舱(从机尾向后)累积载荷约束:

$$\sum_{i \in N_{POS}} \sum_{j \in O_k^B} W_{iBk} \cdot x_{ij} \leq W_{Bk}, \quad \forall k \in 1, 2, 3, \dots, B \quad (14)$$

其中, W_{iBk} 为第 i 个 ULD 落在后货舱第 k 区域的载荷, W_{Bk} 为后货舱第 k 个区域的载荷限值。

4) 重心约束

通过平衡基点法计算起飞重心 CG_{TOW} 、着陆重心 CG_{LW} 和零燃油重心 CG_{ZFW} :

$$CG_{TOW} = \frac{a_{OEW} \cdot OEW + a_{FW} \cdot FW + \sum_{i \in U} \sum_{j \in P} w_i \cdot x_{ij} \cdot a_j}{OEW + FW + \sum_{i \in U} \sum_{j \in P} w_i \cdot x_{ij}} \quad (15)$$

$$CG_{LW} = \frac{a_{OEW} \cdot OEW + a_{RFW} \cdot RFW + \sum_{i \in U} \sum_{j \in P} w_i \cdot x_{ij} \cdot a_j}{OEW + RFW + \sum_{i \in U} \sum_{j \in P} w_i \cdot x_{ij}} \quad (16)$$

$$CG_{ZFW} = \frac{a_{OEW} \cdot OEW + \sum_{i \in U} \sum_{j \in P} w_i \cdot x_{ij} \cdot a_j}{OEW + \sum_{i \in U} \sum_{j \in P} w_i \cdot x_{ij}} \quad (17)$$

其中, a_{OEW} 为飞机基本空重力臂; a_{FW} 为飞机油箱力臂; a_{RFW} 为飞机备用油箱力臂。

CG_{TOW} 、 CG_{LW} 和 CG_{ZFW} 需要分别保持在各自最大重量限值与 %MAC 组成的包络线范围内:

$$\min CG_{TOW} \leq CG_{TOW} \leq \max CG_{TOW} \quad (18)$$

$$\min CG_{LW} \leq CG_{LW} \leq \max CG_{LW} \quad (19)$$

$$\min CG_{ZFW} \leq CG_{ZFW} \leq \max CG_{ZFW} \quad (20)$$

5) 横向不平衡约束

右装载不平衡约束是指飞机纵向剖面左、右两边货物总重对纵轴产生的力矩不相等, 即在集装箱装载后产生了静态滚转力矩, 可以通过限制左右侧的重量差异来控制飞机横向的平衡。

$$\left| \sum_{i \in U} w_i \left(\sum_{j \in P_R} x_{ij} - \sum_{j \in P_L} x_{ij} \right) \right| \leq \bar{D} \quad (21)$$

其中, P_R 为右舱位集合; P_L 为左舱位集合; \bar{D} 为左右不平衡阈值。

2 算法改进

本文提出改进的遗传算法, 编码采用数字编码的方式, 在适应度函数和交叉变异算子上做出改进, 加入罚函数和最优保存策略提高算法的搜索效率。

2.1 初始种群

本文的优化模型为 0-1 整数规划模型, 其决策变量只能取 0 或 1, 因此种群的个体均采用数字编码方式, 根据集装箱和舱位的关系生成个体, 组成初始种群。

例如, 假设待装载的集装箱有 8 个, 编号分别为 1~8, 舱位个数为 6, 编号分别为 1~6; 根据 ULD 和舱位的关系生成的个体为 3、5、1、6、8、2, 表示舱位 1、2、3、4、5 和 6 上放置的集装箱编号分别为 3、5、1、6、8、2; 根据需求生成多个个体组成种群, 以便后续进行交叉变异操作。

2.2 适应度函数

一般情况下, 个体能否进入下一代与其适应度函数值有关, 根据目标函数建立适应度函数, 其值越小, 说明个体适应能力越高, 首先根据式 (3) 和式

(4) 将两个目标归一化, 分别设置权重 ρ 和 $1 - \rho$, 得到式(5)。

综合考虑位置约束、重量约束、结构约束、重心约束和横向不平衡约束, 设置惩罚项, 若满足约束, 惩罚项为 0, 若不满足约束, 惩罚项则为 1, 得到惩罚项如下:

$$P_i = \begin{cases} 0, & \text{满足第 } i \text{ 个约束} \\ 1, & \text{others} \end{cases} \quad (22)$$

最后, 加入惩罚项的适应度函数为:

$$F(x) = f(x) + \sum_i P(x) \quad (23)$$

当达到最大迭代次数时, 输出最优解。

2.3 选择算子

为了提高算法的全局收敛性和计算效率, 避免由于遗传操作破坏进化过程中适应度最高的染色体, 采用最优保存策略对模型进行优胜劣汰操作。具体操作过程:

(1) 对当前群体按照适应度进行排序, 适应度能力最好的前 10% 直接进入下一代;

(2) 将随机生成 10% 的个体与剩余的 90% 个体对适应度进行排序, 选择适应度前 90% 的个体进行交叉变异, 进化到下一代;

(3) 子代个体由 (1) 中适应度前 10% 的个体和 (2) 中进行交叉变异后的个体组成。

2.4 变异和交叉算子

为了避免交叉过程中出现重复基因, 选择基于位置的交叉 (Position-Based Crossover, PBX) 的方法, 这样每代新的染色体的适应度更高, 且可以避免交叉后染色体中存在重复基因。具体操作过程如下:

Step 1 随机生成一个 0-1 的浮点数, 若该数大于给定的交叉概率, 则父代染色体与配对染色体进行基于位置的交叉;

Step 2 随机选择一个父代中的几个基因, 位置可不连续;

Step 3 生成一个子代, 子代中被选中的位置与父代相同;

Step 4 找出第一步被选中的基于在配对父代染色体的位置, 除去该位置上的基因, 将剩余基因按照顺序放入上一步生成的子代中。

交叉操作流程图如图 1 所示。

如图 2 所示的交叉操作, 生成随机的 0-1 之间的浮点数后, parent1 染色体上第 3、5、8 位上的数值恰好小于给出的交叉率, 则这 4 个基因被选中, 发生交叉, 并生成一个子代, 且交叉到子代中的位置也相

同, 找到 parent2 中和 parent1 中选中的位置, 将剩余位置 9、2、7、1、4、6 按照顺序补充到子代 children 中, 操作后, 子代 children 中不会出现重复基因。

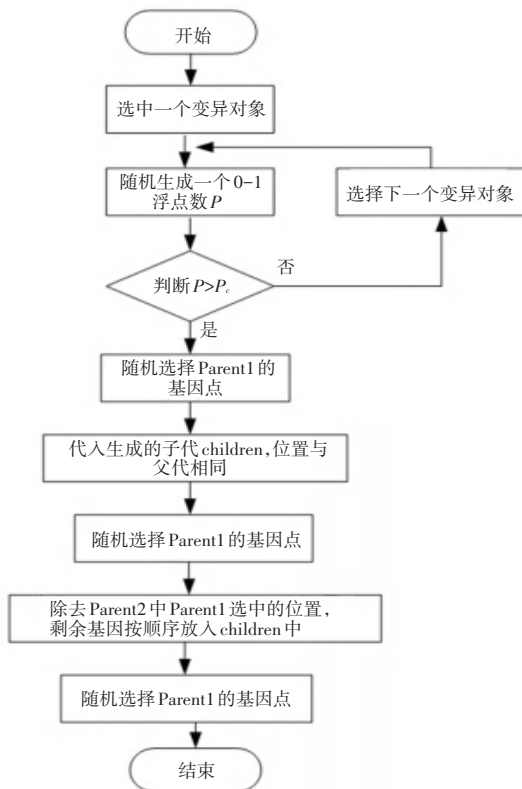


图 1 交叉流程图

Fig. 1 Cross-flowchart

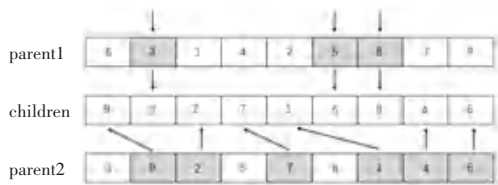


图 2 交叉操作示意图

Fig. 2 Schematic example of cross-operation

变异采用均匀变异的方法, 变异算子的操作过程与交叉算子操作类似, 如图 3 所示。假设有 8 个集装箱要放在 6 个舱位上, 其中 parent1 为其中的一种排列方式。只有随机生成 0-1 的浮点数小于变异概率时, 某位置的基因才发生变化。若其中第三位基因发生变异, 则其有 2 种变异方式, 可能变异为 7 或 8, 即 children1、2。

2.5 改进遗传算法的整体流程

Step 1 根据集装箱与舱位的关系, 生成初始种群;

Step 2 计算适应度函数, 将计算的适应度函

数值按照从优到劣的顺序排列;

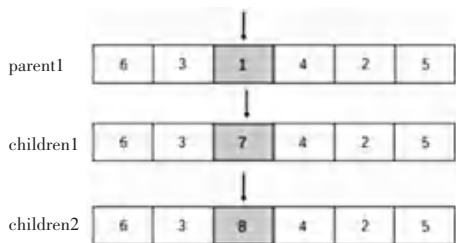


图 3 变异操作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the mutation operation

Step 3 采用最优保存策略,保留最优个体;

Step 4 当随机浮点数 P_1 大于交叉概率 P_c 时,进行基于位置的交叉 (Position-based Crossover, PBX);当随机浮点数 P_2 小于变异概率 P_m 时,进行均匀交叉变异;

Step 5 判断是否达到最大迭代次数,若达到则输出最优解,反之,返回 Step 2;

改进遗传算法流程图如图 4 所示。

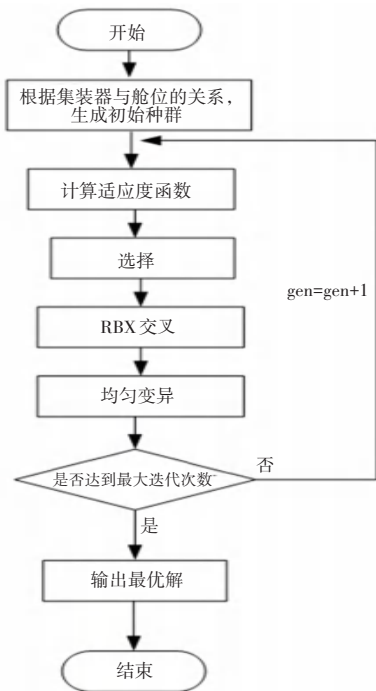


图 4 改进的遗传算法流程图

Fig. 4 Improved genetic algorithm flowchart

3 实例仿真分析

3.1 相关参数

本文装载集装箱使用的货机为 B747-400F,使用的数据均来源于 B747-400F 重量和平衡控制以及装载手册。B747-400F 包括主货舱和下货舱如图 5 所示,主货舱有 30 个基础舱位,可以装载 30 个底板尺寸为 96×125 in 的集装箱;下货舱有 10 个舱

位,可装载 96×125 in 的集装箱。



图 5 B747-400F 上下货舱的俯视图

Fig. 5 Top view of the upper and lower cargo compartments of the B747-400F

飞机每个舱位的位置前后臂、平衡臂、舱位限重以及区域限重见表 1。

表 1 各舱位力臂,以及分区载荷限重

Table 1 Balance arms for each cabin, as well as zone load limits

舱位	前臂/ in	后臂/ in	平衡臂/ in	最大载荷/ kg	区域载荷限值/kg
A1	230.1	326.1	278	3 356	A1, A2, B1 重量和不超过 11 450 kg
A2	339.1	427.1	383	3 356	
B1	428.1	516.1	472	3 356	
CR/CL	525.5	650.5	588	6 123	C-F 重量之和不超过 36 627 kg
DR/DL	651.5	776.5	714	6 123	
ER/EL	777.5	902.5	840	7 529	G-K 重量之和不超过 63 140 kg
FR/FL	903.5	1 028.5	966	7 529	
GR/GL	1 029.5	1 154.5	1 092	7 529	
HR/HL	1 155.5	1 280.5	1 218	7 529	L-S 重量之和不超过 56 907 kg
JR/JL	1 281.5	1 406.5	1 344	7 529	
KR/KL	1 407.5	1 532.5	1 470	7 529	T 重量不超过 2 041 kg
LR/LL	1 533.5	1 658.5	1 596	7 529	
MR/ML	1 659.5	1 784.5	1 722	6 123	
PR/PL	1 804	1 892	1 848	6 123	11P-23P 重量之和不超过 27 669 kg
RR/RL	1 894.6	1 982.6	1 938	6 123	
SR/SL	2 092.5	2 217.5	2 155	6 441	
T	2 230.5	2 355.5	2 293	6 123	31P-45 重量之和不超过 26 081 kg
11P	465.1	561.3	513	4 626	
12P	562.1	658.3	610	4 626	
21P	696.6	792.8	744	4 626	31P-45 重量之和不超过 26 081 kg
22P	793.6	889.8	841	4 626	
23P	890.6	986.8	938	4 626	
31P	1 486.5	1 574.7	1 530	4 626	31P-45 重量之和不超过 26 081 kg
32P	1 575.5	1 663.7	1 620	4 626	
41P	1 664.5	1 752.7	1 708	4 626	
42P	1 753.5	1 841.7	1 798	4 626	31P-45 重量之和不超过 26 081 kg
43P	1 842.5	1 930.7	1 898	4 626	
44P	1 931.5	2 019.7	1 998	4 626	
45	1 914	1 974.5	1 944	1 600	

重量限制数据见表 2。

表 2 B747-400F 重量限制数据

Table 2 B747-400F weight limit data

B747-400F 重量数据	单位/kg
操作空重(OEW)	159 032
最大起飞重量(MTOW)	396 893
最大着陆重量(MLW)	295 742
最大零燃油重量(MZFW)	276 691

上下舱联合线载荷限值见表 3。

表3 上下舱联合线载荷限值

Table 3 Load limit of upper and lower cargo hold combination line

位置/in	限值/(kg·in ⁻¹)
228-464	38.5
464-1 000	90.7
1 000-1 480	131.5
1 480-2 160	90.7
2 160-2 218	77.1
2 218-2 365	16.3

前后货舱累积载荷限值见表4。

表4 前后货舱累积载荷限重

Table 4 Cumulative load limits in front and rear cargo compartments

位置和方向	Balance Arm/in		最大累积负载/kg
	开始	结束	
从机头到飞机中心	228	466	9 176
		525	13 675
		1 000	49 917
从机尾到飞机重心	2 365	1 240	76 044
		2 218	2 041
		1 920	13 825
		1 480	56 930
		1 240	83 057

3.2 算例分析

以某次运输的集装箱为例,随机抽取某航空公司的运输数据,起飞油量 101 500 kg,航程油量 82 300 kg,取其中大、中、小 3 个不同规模的集装箱装载到货舱中;分别进行两次优化,最小化重心偏差及最小化俯仰转动惯量,将未优化和优化转动惯量进行对比,分析对飞机安全性、机动性和经济性的影响。

设置目标重心 26% MAC。种群规模为 100,最大迭代次数 300,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。对重心偏差最小的单目标进行优化,优化结果见表 5,对重心偏差最小和俯仰转动惯量最小的双目标进行优化,优化的结果见表 6,得到的改进的遗传算法迭代曲线如图 6 所示。

表5 3组实验单目标优化结果

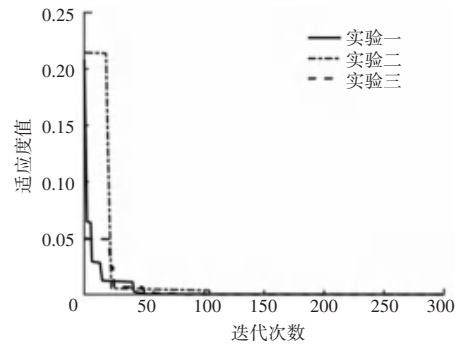
Table 5 Results of single objective optimization in three sets of experiments

编号	数量	重心	转动惯量/(kg·in ²)	时间/s
实验一	30	25.999	1.76×10 ¹⁰	1.52
实验二	60	26.000	2.43×10 ¹⁰	1.23
实验三	100	25.999	2.72×10 ¹⁰	1.42

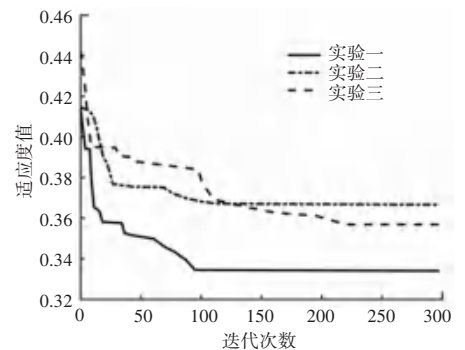
表6 3组实验双目标优化结果

Table 6 Results of double objective optimization in three experimental groups

编号	数量	重心	转动惯量/(kg·in ²)	时间/s
实验一	30	25.987	1.41×10 ¹⁰	1.71
实验二	60	25.962	2.16×10 ¹⁰	2.18
实验三	100	26.013	2.33×10 ¹⁰	2.26



(a) 最小重心偏差的遗传算法迭代曲线



(b) 最小重心偏差和转动惯量的遗传算法迭代曲线

图6 3组实验的遗传算法的迭代曲线

Fig. 6 Iteration curves of the genetic algorithm for three sets of experiments

根据图6、表5和表6的结果对算法有效性、鲁棒性及优化效果进行分析可得出以下结论:

(1) 算法有效性:如图6所示,不管是求解最小重心偏差的单目标函数,还是同时求解最小化重心偏差和俯仰转动惯量的双目标函数,3组实验使用改进遗传算法进行优化,可以在短时间内收敛,得到最优解,虽然随着集装箱数量的增加,计算时间也在增加,但是总体计算时间不超过3s;

(2) 鲁棒性:3组实验的集装箱类型重量均不相同,具有强异构性,但从实验结果可以看出,不管是集装箱数量多还是少,通过建立的数学模型,均能较快的得到实验结果,模型具有较强的鲁棒性;

(3) 优化效果:优化目标的不同,最后得到的重心和转动惯量结果差异较大。仅优化重心时,3组实验优化得到的最优值可以无限接近目标重心

26%MAC,分别为25.999、26.000、25.999;当同时优化重心和俯仰转动惯量时,重心优化的结果相对于仅优化重心产生的结果相对较差,分别为25.987、25.962、26.013,重心偏差分别为0.013%、0.038%和0.013%,偏差控制在0.05%以内;但是得到转动惯量结果较好,相对于仅优化重心得到的转动惯量,减小了19.89%、11.11%、14.34%。飞机的俯仰转动惯量越大,对于姿态的调整和操纵就需要更大的控制力和更长的时间,从而影响飞机的机动性和控制性能。通过同时对重心和俯仰转动惯量的优化,在保证重心达到最优状态的同时,还能减少货物在重心范围内的堆积,减小俯仰转动惯量,提高飞机的机动性和燃油经济性。

4 结束语

本文基于航空集装箱的装载优化问题,建立了转动惯量最小和重心偏差最小的目标函数,并使用不同数量规模的算例运用改进的遗传算法进行优化实验。实验结果表明:改进的遗传算法可将重心偏差限制在0.05%MAC以内,转动惯量减小率可达10%左右且控制计算速度不超过3s。

参考文献

[1] MONGEAU M, BES C. Optimization of aircraft container loading [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems,

2003, 39(1): 140-150.

- [2] KALUZNY B L, SHAW R H. Optimal aircraft load balancing [J]. International Transactions in Operational Research, 2009, 16(6): 767-787.
- [3] VANCROONENBURG W, VERSTICHEL J, TAVERNIER K, et al. Automatic air cargo selection and weight balancing: A mixed integer programming approach [J]. Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review, 2014, 65: 70-83.
- [4] LIMBOURG S, SCHYNS M, LAPORTE G. Automatic aircraft cargo load planning [J]. Journal of the Operational Research Society, 2012, 63(9): 1271-1283.
- [5] LURKIN V, SCHYNS M. Airline container loading problem with pickup and delivery [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 244(3): 955-965.
- [6] 史永胜,王策. 货机主货舱多约束条件下集装箱装载优化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(25): 10517-10522.
- [7] 谷润平,贾旭颖,赵向领,等. 民航货机装载优化准确建模仿真研究[J]. 计算机仿真, 2019, 36(3): 20-26.
- [8] 赵向领,杜有权. 基于遗传算法的民用航空器配载问题[J]. 中国科技论文, 2021, 16(8): 849-854.
- [9] EMDE S, ABEDINNIA H, LANGE A, et al. Scheduling personnel for the build-up of unit load devices at an air cargo terminal with limited space [J]. OR Spectrum, 2020, 42(2): 397-426.
- [10] TRIVELLA A, PISINGER D. Load-balanced multi-dimensional bin-packing problem [J]. Computers & Operations Research, 2016, 74: 152-164.
- [11] 张丽霞. 航空货运飞机装载问题研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [12] 张洪. 面向C919的装载配平模型分析及系统开发[D]. 天津:中国民航大学, 2014.