

基于鲸鱼优化算法的机场航站楼港区平面布局优化设计

欧阳杰, 乔雪晴, 李晓蔚, 朱长青
(中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 为优化机场航站楼港区平面布局设计, 本文基于范数灰关联度分析筛选出关键影响因素, 并结合布局规则建立约束条件, 构建以上层港区平面布局综合效能指数最优和下层港区运行时间最短为目标的双层规划模型, 并采用鲸鱼优化算法进行求解。以中国某机场航站楼港区进行实例验证, 结果表明: 该模型得到的平面布局方案相比原始方案, 上层港区平面布局综合效能指数提高了 26.8%, 下层港区运行时间减少了 13.1%, 提升了机场的空侧运行效率, 验证了该模型的有效性, 可为后续机场航站楼港区的设计与建设提供理论参考。

关键词: 航站楼港区; 平面布局; 双层规划; 鲸鱼优化算法

中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)02-0054-06

Optimization design of plane layout of airport terminal bay area based on whale optimization algorithm

OUYANG Jie, QIAO Xueqing, LI Xiaowei, ZHU Changqing
(College of Transportation Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to optimize the plane layout design of the airport terminal bay area, this paper identifies key influencing factors using the norm grey relational analysis and establishes constraints based on layout rules. A two-level programming model is constructed to maximize the comprehensive efficiency index of the upper bay area's plane layout and minimize the lower bay area's operation time, which is solved using the whale optimization algorithm. Taking an airport terminal bay area in China as an example, the results show that the proposed scheme improves the comprehensive efficiency index of the upper-level layout by 26.8% and reduces the operation time of the lower bay area by 13.1% compared with the original plan, thus improving the airside operation efficiency of the airport and verifying the effectiveness of the model. The proposed method can provide a theoretical reference for the subsequent design and construction of airport terminal bay area.

Key words: terminal bay area; plane layout; two-level planning; whale optimization algorithm

为满足枢纽机场业务量日益增长及近机位比例提高的双重需求, 机场航站楼呈现出“主楼+多指廊”平面构型的发展趋势。指廊将机坪分割成多个具有一定纵深的港区, 指廊长度、底部纵深和指廊夹角的变化会对港区内航空器的运行效率产生一定影响。因此, 通过合理规划港区平面布局, 有效利用机坪资源, 同时考虑其运行因素, 满足运行时间需求, 以提升总体运行容量, 是当前亟待解决的问题。

目前国内外对于港区平面布局优化的相关研究较少, 现有的港区平面布局优化研究大多集中在航站楼的整体构型, 或是从跑道、滑行道构型等角度

开展研究, 较少涉及港区。文献[1]为提升近机位供给能力构建了航站楼构型优化模型, 从数理角度对航站楼构型进行解析, 但该模型较为简单。文献[2]针对放射状指廊型航站楼的指廊夹角提出了一种最优度方案, 经验证, 该方案设计出的构型评价指标更优。文献[3]对航站楼构型设计进行系统性研究, 得出了更为高效的构型生成方法。文献[4]以靠桥率、旅客步行距离等 5 个指标为优化目标, 确定了最优中小型航站楼构型, 但缺乏普适性。文献[5]以飞机地面滑行油耗为研究目标, 应用改进遗传算法得出最优飞行区布局形式。文献[6]以机位数量最大为目标函数对停机位

及滑行通道进行了规划。文献[7]建立混合整数规划模型对停机坪布局进行规划,使得分配到远机位的航空器数量最少。以上研究仅针对飞行区整体,未涉及港区,而当前针对港区的研究也多从运行优化的角度出发,较少关注设计方面的因素。指廊夹角通常选择 90°的 U 型区等,如文献[8]提出了单通道 U 型区离港航班推出等待点设置方法,以优化航班运行效率;文献[9]采用建筑信息模型对 U 型机坪建模,进而得到相对最优的布局方案;文献[10]采用滑动时间窗和频谱分析设计了港区的动态编组运行优化模型和算法;文献[11]基于安全的机坪分组运行规则,构建了 U 型机坪停机位分配模型。

综上,目前缺乏对港区平面布局优化的相关研究,且在设计优化上多偏重旅客步行距离及近机位数量方面,较少考虑运行相关影响,也缺乏更为完善的指标体系;在运行优化上仅从运行角度出发,缺乏对港区构型等设计因素的考虑。基于此,本文将港区的设计和运行相融合,拟通过分析港区平面布局特点,并结合运行效率建立港区平面布局优化双层规划模型,可为后续港区的设计与建设提供理论参考。

1 港区平面布局问题描述

1.1 港区平面布局要素分析

港区布局如图 1 所示,主要由停机位、滑行通道、机坪调度滑行道及服务车道构成。

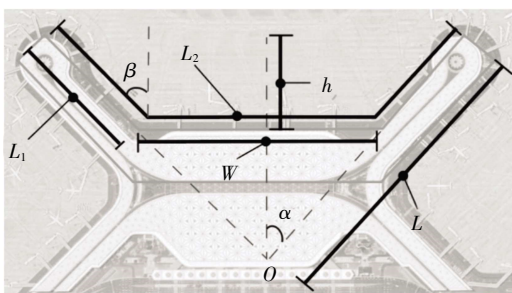


图 1 港区平面布局要素示意图

Fig.1 Schematic diagram of plane layout elements of the bay area

由图 1 可知,港区内的平面布局主要包括以下要素:指廊半径 L 为以两侧指廊端连线的中垂线与右侧指廊延长线交点为圆心,其到指廊端部的距离;右侧指廊角度 α 为右侧指廊与上述中垂线的夹角;左侧指廊角度 β 为左侧指廊与垂直线的夹角;港区纵深 h 为两侧指廊端连线与港区底部的垂直距离;港区底部宽度 W 为两侧指廊与港区底部交点之间的

距离;指廊侧边长度 L_1 为指廊端部到指廊与港区底部交点的距离;航站楼岸线长度 L_2 为港区底部宽度与两侧指廊侧边长度之和。

通过对港区平面布局各要素进行分析^[12],分别从静态构型及动态设施 2 个维度建立港区平面布局评估指标体系。其中,静态构型维度主要考虑指廊侧边长度、港区底部宽度、指廊角度、港区纵深、航站楼岸线长度 5 个因素;动态设施维度主要考虑机位总数量、滑行通道数量、运行区域面积及停机位面积 4 个因素。

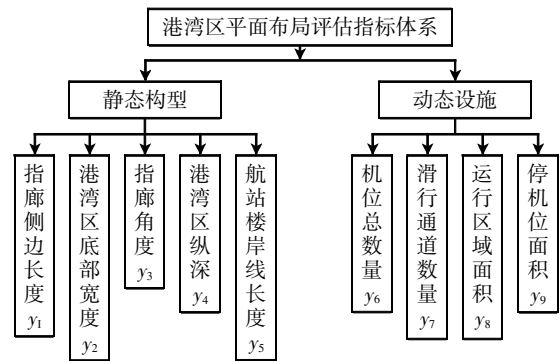


图 2 港区平面布局评估指标体系

Fig.2 Indicator system for assessing the plane layout of the bay area

影响港区机坪布局的因素较多,且各因素间相互影响^[13],因此,可以将影响港区布局的要素视为一个灰色系统,采用范数灰色关联法对港区布局进行客观赋权评价,进而得出各指标的权重,其计算流程如图 3 所示。

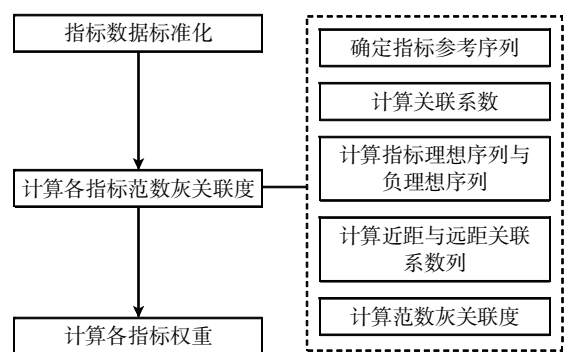


图 3 指标权重计算流程图

Fig.3 Flow chart of indicator weight calculation

各指标权重的主要计算步骤如下。

1) 规范化处理

采用 Z-Score 法对数据进行标准化处理,计算公式可表示为

$$y_s'(\kappa) = \frac{y_s(\kappa) - \mu_s}{\sigma_s} \quad s = 1, 2, \dots, 9 \quad \kappa = 1, 2, \dots, 17 \quad (1)$$

式中： $y_s'(\kappa)$ 为第 κ 个机场第 s 个指标的标准化数据； $y_s(\kappa)$ 为第 κ 个机场第 s 个指标的原始数据值； μ_s 为第 s 个指标的均值； σ_s 为第 s 个指标的方差。

本研究收集了中国17个机场航站楼港区平面布局9个指标的相关数据,经过Z-Score标准化后,所得数据如表1所示。

表1 标准化后的指标数据
Tab.1 Standardized indicator data

机场航站楼	指廊侧边长度	港区底部宽度	指廊角度	港区纵深	航站楼岸线长度	滑行通道数量	机位总数量	停机位面积	运行区域面积
贵阳龙洞堡	-0.009 7	-0.007 3	-0.010 5	-0.009 6	-0.002 7	-0.989 2	-0.296 7	-0.419 0	-0.273 4
重庆江北 T2	-0.005 9	0.001 1	-0.010 5	-0.005 7	-0.002 1	-0.989 2	-0.296 7	-0.185 1	-0.201 2
成都双流 T1	-0.006 1	-0.004 1	-0.010 5	-0.005 9	-0.002 1	-0.989 2	-0.296 7	-0.267 1	-0.217 8
长沙黄花	-0.017 2	-0.009 4	-0.010 5	-0.017 4	-0.003 8	-0.989 2	-0.296 7	-0.631 4	-0.336 1
西安咸阳 T3	-0.003 0	-0.002 2	-0.010 5	-0.001 8	-0.001 7	-0.989 2	-0.158 5	-0.230 8	-0.152 7
成都双流 T2	-0.005 0	-0.004 6	-0.010 5	-0.004 9	-0.002 0	-0.258 1	-0.158 5	-0.253 6	-0.220 1
广州白云 T1	-0.002 8	0.000 2	-0.010 5	-0.002 6	-0.001 7	-0.258 1	-0.158 5	-0.189 1	0.026 0
杭州萧山 T3	-0.006 8	0.003 8	-0.010 5	-0.006 7	-0.000 9	-0.258 1	-0.227 6	-0.064 1	-0.242 6
武汉天河 T3	-0.004 9	-0.003 7	-0.010 5	-0.004 8	-0.002 0	-0.258 1	-0.020 3	-0.310 1	-0.144 4
海口美兰	-0.004 8	0.007 9	0.108 8	-0.007 9	-0.000 7	-0.258 1	0.048 8	0.103 9	-0.233 2
深圳宝安	0.000 5	0.015 7	-0.010 5	0.000 8	0.000 8	0.473 1	0.256 1	0.274 6	0.139 7
北京大兴	0.015 3	-0.021 8	0.049 1	0.013 2	0.004 0	0.473 1	0.394 3	0.284 0	-0.024 9
上海虹桥	0.008 4	0.027 1	-0.010 5	0.008 9	0.002 6	0.473 1	0.256 1	0.573 0	0.174 0
成都天府	0.014 0	-0.010 3	-0.010 5	0.014 7	0.003 9	1.204 3	0.048 8	0.239 7	0.067 5
昆明长水	0.013 0	0.005 9	-0.010 5	0.013 6	0.003 6	1.204 3	0.463 4	0.684 6	0.955 1
广州白云 T2	-0.001 0	-0.003 3	-0.010 5	-0.000 7	0.000 4	1.204 3	0.117 9	-0.049 3	0.017 8
重庆江北 T3	0.016 0	0.004 8	-0.010 5	0.016 7	0.004 3	1.204 3	0.325 2	0.439 9	0.666 3

2) 计算各指标的范数灰关联度

分别测量 κ 个机场的 s 个指标数据,获取指标序列,记为 $\vartheta_s = (y_s'(1), y_s'(2), \dots, y_s'(\kappa))$ 。

随后确定不同指标的参考序列, $\vartheta_{0s} = (y_{0s}'(1), y_{0s}'(2), \dots, y_{0s}'(\kappa))$ 。

计算各机场的每个指标对参考序列的关联系数,计算公式可表示为

$$\chi_s(\kappa) = \frac{\left(\min_s \min_{\kappa} |y_{0s}'(\kappa) - y_s'(\kappa)| + \zeta \max_s \max_{\kappa} |y_{0s}'(\kappa) - y_s'(\kappa)| \right)}{\left(|y_{0s}'(\kappa) - y_s'(\kappa)| + \zeta \max_s \max_{\kappa} |y_{0s}'(\kappa) - y_s'(\kappa)| \right)} \quad (2)$$

式中： $\chi_s(\kappa)$ 为 ϑ_s 对 ϑ_{0s} 在第 κ 点的灰关联系数； $y_{0s}'(\kappa)$ 、 $y_s'(\kappa)$ 分别为第 κ 个机场第 s 个指标在参考序列与比较序列的对应标准化值； ζ 为分辨系数,一般取0.5。

计算指标理想序列与负理想序列,计算公式可表示为

$$\eta^+ = \{ \max_s \chi_s(\kappa) \} \quad (3)$$

$$\eta^- = \{ \min_s \chi_s(\kappa) \} \quad (4)$$

式中： η^+ 表示距参考序列距离最近的比较序列,即理想

序列;反之则为负理想序列 η^- 。

计算指标比较序列的近距和远距,计算公式分别表示为

$$D_s^+ = \sqrt{\sum_{\kappa=1}^{17} (\chi_s(\kappa) - \eta^+(\kappa))^2} \quad (5)$$

$$D_s^- = \sqrt{\sum_{\kappa=1}^{17} (\chi_s(\kappa) - \eta^-(\kappa))^2} \quad (6)$$

式中, D_s^+ 、 D_s^- 分别为第 s 个指标的近距和远距,由此可以确定港区布局评估不同指标的关联关系,当近距大、远距小时,则该指标与港区布局的关联性强,反之则越弱。

计算指标的范数灰关联度 ε_s ,计算公式可表示为

$$\varepsilon_s = \frac{D_s^-}{D_s^- + D_s^+} \quad (7)$$

3) 计算各指标的权重

$$\omega_s = \frac{\varepsilon_s}{\sum_{s=1}^9 \varepsilon_s} \quad (8)$$

式中, ω_s 为第 s 个指标的权重系数。

各指标权重与范数灰关联度计算结果如表2所示。结合不同指标的排序可知,静态构型维度中,指廊侧边长度(y_1)、港区纵深(y_4)、指廊角度(y_3)、港区底部宽度(y_2)这4个指标对港区布局影响较大;考

表 2 指标权重与范数灰关联度计算结果

Tab.2 Calculation results of indicator weights and norm grey relational degree

指标	权重	权重排序	范数灰关联度	范数灰关联度排序
y_1	0.153 9	1	0.892 1	1
y_2	0.112 4	4	0.730 4	4
y_3	0.117 2	3	0.761 5	3
y_4	0.122 8	2	0.798 3	2
y_5	0.092 8	8	0.603 1	8
y_6	0.095 5	7	0.620 9	7
y_7	0.101 7	6	0.661 2	6
y_8	0.091 5	9	0.594 8	9
y_9	0.112 2	5	0.728 3	5

虑运行区域的影响,动态设施维度中停机位面积(y_9)对港区布局影响较大。因此,重点选取以上 5 个指标并重新按照上述方法计算其权重,以此计算港区平面布局综合效能指数 Y ,计算公式可表示为

$$Y = 0.249y_1 + 0.198y_4 + 0.189y_3 + 0.183y_2 + 0.181y_9 \quad (9)$$

1.2 港区运行时间分析

港区运行效率主要从单位时间内港区入位或滑出的航空器数量或港区内航空器运行时间 2 个指标进行评价,二者主要取决于滑行路径的长短或因港区的特殊构型导致航空器在港区实际运行时受到多种因素制约(如航空器的推出等待等运行限制)而导致的运行延误,因此,对运行方面的优化主要从港区内航空器运行时间进行考虑。

航空器在港区内运行一般有 4 个流程:滑入、入位、推出、滑出。根据内部设置的滑行通道数量将港区分为单通道、双通道、三通道和四通道 4 种类型,滑行路径的长短主要由机位所处位置、所选滑行通道决定,港区内单架航空器从机位推出并滑行至港区出口的时间可表示为

$$t = t_1 + t_2 + \Delta t \quad (10)$$

式中: t_1 为推出时间,与航空器的转弯半径、所选滑行通道及推出方式相关,不同机型推出时的转弯半径不同,不同的推出方式决定不同的推出速度,目前在港区内航空器主要由牵引车推出,故 t_1 主要由机位类型所确定; t_2 为滑出时间,与飞机机位所在位置相关; Δt 为航空器在推出点的等待时间。

2 港区平面布局优化模型及算法设计

2.1 模型构建

2.1.1 模型假设

为了便于研究,针对港区平面布局优化问题给

出如下假设:

(1) 已知机位数量等布局所需的基本信息;

(2) 将港区出口定义为指廊端部机位延长线与滑行通道交点处;

(3) 本文侧重于研究航空器进出港区停机位的问题,故不考虑机位占用时间;

(4) 航空器在机坪滑行道、滑入和滑出机位的过程中,分别按照规定速度保持匀速运动。

2.1.2 参数设置

将港区拓扑为二维平面,以两侧指廊交点为原点,构建坐标体系,各参数设置如下:

S 为运行区域面积;

I 为飞机类别, $I = \{1, 2, 3\}$, 按飞机尺寸升序排序分别对应航空器机型 C、D、E;

a_i 为第 i 类航空器机身长度, $i \in I$;

b_i 为第 i 类航空器机身宽度, $i \in I$;

r_i 为第 i 类航空器转弯半径, $i \in I$;

e_i 为第 i 类航空器与相邻航空器及物体间距, $i \in I$;

d_i 为第 i 类航空器对应的滑行通道宽度, $i \in I$;

m_i 为第 i 类航空器所对应的机位滑行通道中线之间的距离, $i \in I$;

c 为指廊底部端点到指廊最内侧近机位的距离;

w_1 为机位安全线与航站楼间距;

w_2 为服务车道边线距飞机净距;

w_3 为服务车道宽度;

N_{Ri} 为右侧指廊边可停放飞机数量;

N_{Li} 为左侧指廊边可停放飞机数量;

N_{Gi} 为指廊底部可停放飞机数量;

v_1 为航空器在机坪内滑行速度;

v_2 为航空器从机位推出速度;

l_{ku} 为底部机位 k 在滑行通道 u 的滑行距离; l_{ju}^L 、 l_{ju}^R 分别为指廊两侧机位 j 在滑行通道 u 的滑行距离,其中, $k = 1, 2, \dots, K$, $j = 1, 2, \dots, J$, $u = 1, 2, \dots, U$;

r_{ku} 、 r_{ju} 分别为底部机位 k 、指廊机位 j 在滑行通道 u 的转弯半径;

C_1 、 C_1' 分别为港区底部端点;

C_2 、 C_2' 分别为港区端部端点;

C_3 、 C_3' 分别为港区车道边底部端点;

C_4 、 C_4' 分别为港区滑行通道中线底部端点;

N_{Rj}^R 为指廊右侧(从下往上)第 j 个机位顶点;

N_{Lj}^L 为指廊左侧(从下往上)第 j 个机位顶点;

N_{Gk} 为指廊底部(从右至左)第 k 个机位顶点;

Δt_n 为航空器在机坪内等待时间,与港区内运行航空器数量 n 相关;

$$\varphi = \begin{cases} 1 & \text{当港湾区底部设置机位,即 } N_{Gi} \neq 0 \text{ 时} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$x_{j,u} = \begin{cases} 1 & \text{指廊机位 } j \text{ 上的航空器} \\ & \text{从滑行通道 } u \text{ 滑行} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$x_{k,u} = \begin{cases} 1 & \text{底部机位 } k \text{ 上的航空器} \\ & \text{从滑行通道 } u \text{ 滑行} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$\frac{c \sin \beta}{m_i \cos \alpha} - \frac{2(a_i + e_i + w_1 + w_2 + w_3 + r_i)}{m_i} \quad (16)$$

$$l_{(N_{Fi}^R, N_{Fj}^R)} \geq b_i + e_i \quad l_{(N_{Fi}^L, N_{Fj}^L)} \geq b_i + e_i \quad (17)$$

$$l_{(N_{Gi}, N_{Gk})} \geq b_i + e_i \quad (18)$$

$$0 \leq h \leq L \cos \alpha \quad (19)$$

$$N_{Fi} + N_{Fi}' + N_{Gi} = n \quad (20)$$

$$2hL \sin \alpha - h^2(\tan \alpha + \tan \beta) = S \quad (21)$$

$$\sum_{u=1}^U x_{k,u} = 1 \quad \sum_{u=1}^U x_{j,u} = 1 \quad (22)$$

$$0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (23)$$

2.1.3 目标函数

将港湾区平面布局优化问题建模为双层规划模型,其中上层模型主要考虑设计层面指标,选取港湾区平面布局综合效能指数作为上层目标函数,如式(11)所示,以此进行设计层面的优化得出综合水平较高的初始布局方案;下层模型基于上层布局方案,考虑运行层面指标,最终选取港湾区运行时间最短为优化目标,如式(12)所示。上层和下层模型整合在一起,上层模型输出的港湾区设计方案作为下层模型的输入,下层模型输出的运行时间作为上层模型的评价标准,形成一个完整的双层规划模型,通过反复迭代优化,直到找到既满足设计层面最优又使得运行效率较高的最优解。

$$\max Z_1 = Y \quad (11)$$

$$\min Z_2 = \varphi \sum_{k=1}^{N_{Gi}} \sum_{u=1}^U x_{k,u} \left(\frac{\pi r_{ku}}{2v_2} + \frac{l_{ku}}{v_1} \right) + \sum_{j=1}^{N_{Fi}} \sum_{u=1}^U x_{j,u} \frac{\pi r_{ju}}{2v_2} + \sum_{j=1}^{N_{Fi}'} \sum_{u=1}^U x_{j,u} \frac{l_{ju}}{v_1} + \sum_{j=1}^{N_{Fi}'} \sum_{u=1}^U x_{j,u} \left(\frac{\pi r_{ju}}{2v_2} + \frac{l_{ju}'}{v_1} \right) + \Delta t_n \quad (12)$$

式中: $\max Z_1$ 为上层目标函数; $\min Z_2$ 为下层目标函数。

基于公式(9),港湾区平面布局综合效能指数 Y 可进一步表示为

$$Y = 0.249 \frac{h}{\cos \alpha} + 0.198h + 0.189\alpha + 0.183(L \sin \alpha - h \tan \alpha) + 0.181S \quad (13)$$

2.1.4 约束条件

根据港湾区平面构型要素分析,约束条件可表示为

$$0 \leq N_{Fi} \leq \frac{h}{\cos \alpha} - c; 0 \leq N_{Fi}' \leq \frac{h}{\cos \beta} - c \quad (14)$$

$$0 \leq N_{Gi} \leq \frac{2L \sin \alpha - h(\tan \alpha + \tan \beta)}{b_i + e_i} - \frac{(a_i + s_i + w_1 + w_2)(\cos \alpha + \cos \beta)}{b_i + e_i} \quad (15)$$

$$0 \leq u \leq \frac{2L \sin \alpha - h(\tan \alpha + \tan \beta) + c \sin \alpha}{m_i \cos \alpha} +$$

式(14)为指廊侧机位数量约束;式(15)为指廊底部机位数量约束;式(16)为滑行通道数量约束;式(17)为指廊侧机位安全间距约束;式(18)为指廊底部机位安全间距约束;式(19)为港湾区底部纵深约束,其最大值受指廊长度与指廊间夹角限制;式(20)为港湾区机位总数量约束;式(21)为港湾区面积约束;式(22)表示航空器只能选择1条滑行通道;式(23)为指廊夹角取值约束。

2.2 模型求解

为提升寻优的搜索效率,将港湾区平面布局优化问题拆分为构型优化问题和滑行路径优化问题,一是求解确定面积下设计水平最优构型,二是求解该构型下最优运行方案使得航空器运行时间最短,两个子问题是具有上下层关系的组合优化问题。由于鲸鱼优化算法^[14]具备强大的局部最优跳出能力,在特征选择^[15]、组合优化^[16]问题上具有较好的求解效果,故采用鲸鱼优化算法进行求解,模型求解思路如图4所示。

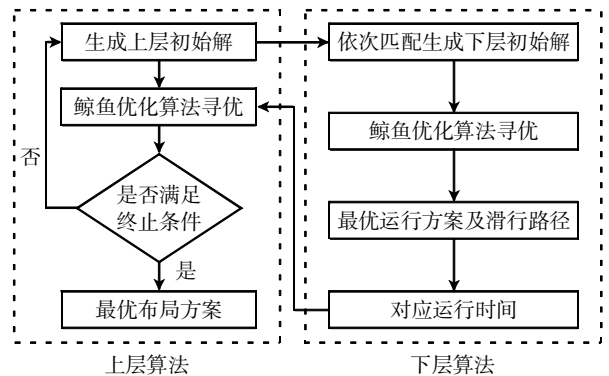


图4 模型求解基本思路

Fig.4 Basic idea of model solving

3 实例验证

3.1 算例设计

以中国某大型机场双通道港湾区为例,进行港湾

区平面布局优化设计。由于港湾区的机坪空间范围有限,在设计时仅考虑 C 类航空器运行的情况。基于此,参照《民用机场飞行区技术标准》中 C 类机型分类标准对参数进行设置,结果如表 3 所示。

表 3 机型分类标准及各类安全限制

Tab.3 Criteria for classification of aircraft types and various safety restrictions

机型	航空器机身宽度	相邻航空器及物体间距	转弯半径	滑行通道宽度	滑行通道中线间距	服务车道边线距飞机净距
C	24~36	4.5	25	15	40.5	3
D	36~52	7.5	30	23	59.5	3
E	52~65	7.5	35	23	72.5	3

3.2 结果分析

本文主要采用 Python 编程求解双层规划问题,通过鲸鱼优化算法进行求解,迭代次数选择 100 次,迭代曲线如图 5 所示。

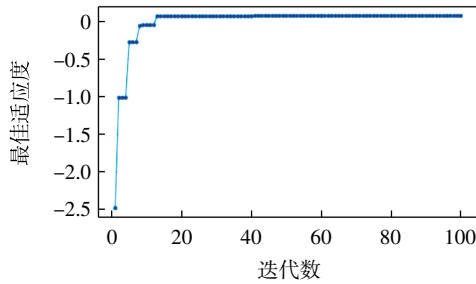


图 5 迭代曲线图

Fig.5 Iterative cure chart

由图 5 可以看出,在 1~11 次迭代过程中,优化结果增长得很快,表明算法在这一阶段中找到了能够显著改善目标函数值的解,最后在经历 44 次迭代后,目标函数值趋于稳定,适应度结果良好,表明所选取的迭代次数是足够的。

将港湾区拓扑为二维平面,以两指廊交点为原点,构建坐标系,港湾区平面布局优化图如图 6 所示,其中关键点位坐标如表 4 所示。从表 4 可以看出,与原方案相比,优化后的港湾区指廊长度、指廊夹角有所增加,指廊底部宽度及港湾区纵深有所减少,随着基本构型数据的变化,相对应的港湾区运行区域面积也随之增大。

为进一步验证模型有效性,将通过鲸鱼优化算法求解的结果与机场原布局方案进行对比,对比结果如图 7 所示。由图 7 可知,优化后所得的港湾区平面布局方案中,上层平面布局综合效能指数为 0.904,与原方案的 0.713 相比提高了 26.8%,表明综合设计水平有所提升且优化效果较为明显。优化后下层港湾区运行时间为 47.12 min,与原方案 54.24 min 相比减少了

13.1%,一定程度提升了机场的空侧运行效率。

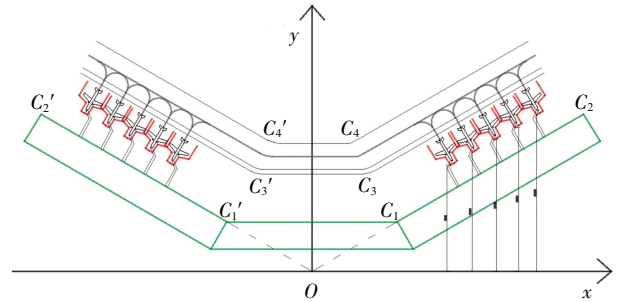


图 6 优化布局图

Fig.6 Optimized layout diagram

表 4 关键点位坐标值

Tab.4 Coordinate values of key point

坐标点	x	y
C_1/C_1'	± 125.40	73.24
C_2/C_2'	± 406.70	234.34
C_3/C_3'	± 80.20	144.89
C_4/C_4'	± 67.40	171.30
N_{F1}^R/N_{F1}^L	± 212.81	158.90
N_{F2}^R/N_{F2}^L	± 240.03	177.67
N_{F3}^R/N_{F3}^L	± 272.31	196.32
N_{F4}^R/N_{F4}^L	± 304.51	215.15
N_{F5}^R/N_{F5}^L	± 336.70	233.68

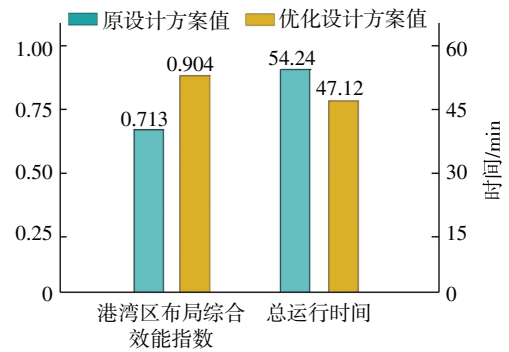


图 7 优化前后对比图

Fig.7 Comparison chart before and after optimization

4 结语

针对机场航站楼港湾区平面布局,首先对其影响较大的关键因素进行筛选,提升设计综合水平;然后通过双层规划模型的相互反馈,优化运行方案,实现设计与运行整体最优。算例结果表明,本文所提出的港湾区平面布局优化模型相比原始方案在港湾区布局综合效能指数上提高了 26.8%,在总运行时间上减少了 13.1%,具备一定的有效性。

(下转第 87 页)