

基于碰撞检测的最小起降带决策方法

赵鸿铎^{1,2}, 夏昶^{1,2}, 高达辰^{1,2}, 马鲁宽^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海, 201804; 2. 民航飞行区设施耐久与运行安全重点实验室, 上海, 201804)

摘要 面向应急救援场景下机场跑道产生毁损后如何快速确定最小起降带, 提出了基于毁损外接圆与矩形碰撞检测的最小起降带决策模型, 同时在决策模型搜索得到的最小起降带方案库内, 建立了包括修复时间、任务需求和安全性能等11种指标在内的最小起降带决策指标体系, 使用模糊层次分析法和TOPSIS法相结合辅助最小起降带进行优选决策。在相关算法的基础上, 基于阿富汗Al Taqaddum机场的2号跑道的实际毁损分布, 通过碎屑模拟算法形成跑道范围内的碎屑分布情况, 在该场景下使用最小起降带搜索算法得到了250个最小起降带方案, 并决策出该场景和任务条件下的最优最小起降带方案, 验证了基于毁损外接圆与矩形碰撞检测的最小起降带决策模型适用性。

关键词 机场跑道; 最小起降带; 跑道毁损; 碰撞检测

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.02.013

中图分类号 U416 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)02-0112-07

A Decision-Making Method of Minimum Operating Strip Based on Collision Detection

ZHAO Hongduo^{1,2}, XIA Chang^{1,2}, GAO Dachen^{1,2}, MA Lukuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Infrastructure Durability and Operation Safety in Airfield of CAAC, Shanghai 201804, China)

Abstract At the scene of emergency rescue, how to determine minimum operating strip (MOS) is still a question after runway is being damaged, and this paper proposes a decision model based on collision detection between damage bounding circles and rectangles. This model helps quickly identify MOS, and establish an evaluation system with 11 indicators, including repair time, mission requirements, and safety. Using the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) and TOPSIS, optimal decisions are made for MOS selection. This model is applied to runway 2 at Al taqaddum airport to simulate debris distribution. This algorithm enables the generation of 250 potential minimum strip solutions, and the best one is selected based on the scenario and mission conditions. This approach demonstrates that the model is suitable for determining the minimum strip post-runway damage.

Key words airport runway; minimum operating strip; runway damage; collision detection

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(52308462); 上海市浦江人才项目(23PJ1412500)

作者简介: 赵鸿铎(1976-), 男, 浙江宁海人, 教授, 博士生导师, 研究方向为机场道面。E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn

引用格式: 赵鸿铎, 夏昶, 高达辰, 等. 基于碰撞检测的最小起降带决策方法[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(2): 112-118. ZHAO Hongduo, XIA Chang, GAO Dachen, et al. A Decision-Making Method of Minimum Operating Strip Based on Collision Detection[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(2): 112-118.

当地震等特殊因素对机场跑道造成毁损后,需要短时间内完成受损道面的修复工作,快速恢复机场应急使用功能^[1]。最小起降带(minimum operating strip, MOS)是不同任务和机型条件下,可在毁损跑道中满足飞行器起降要求的最小范围^[2]。通过最小起降带可以快速恢复机场跑道的起降能力,并指导受损道面修复^[3]。

由于最小起降带的范围远小于道面区域,同时机场跑道在毁损后会存在多个最小起降带方案,其决策优化需要考虑复用时间、任务需求、安全性能等多个目标^[4-6],需要开展最小起降带的综合决策,选取出符合任务条件的最优方案。

针对最小起降带的搜索与决策,黄广炎等^[7]通过构建具有扩展范围的机场最小起降带,采用窗口检测法判断是否有毁损在最小起降带范围内,从而确定出无毁损的最小起降带位置。计宏磊等^[8]基于各检测窗口稀疏编码的响应,得到一种基于图像分析的机场最小起降带搜索方法。美国空军土木工程中心^[9]开发了标准化的快速机场损坏修复与最小起降带建立流程,可以在 6 h 内完成毁损跑道的及时修复。孙威等^[10]通过构建包括角点、旋转角度特征在内的最小起降带范围,运用移动窗口法搜索最小起降带。现有的方法在搜索最小起降带时大多使用穷举计算,计算量较大。张兵等^[11]使用粒子群算法搜索修复道面时间最短的最小起降带,确保评估结果有较高的可信度,同时兼顾了评估效率。张舵等^[12]提出了一种最小起降带方向搜索算法,可计算出机场功能的恢复时间,并评估毁伤等级。

最小起降带搜索后通常会得到多个方案,需要面向修复需求综合决策最优方案。Zhang 等^[13]将道面平整度和原有道面的标志标线作为机场最小起降带决策指标。蒋进等^[14]面向机场排爆抢修,提出了一种基于遗传算法的最小起降带规划方法,提升了规划的实时性。在完成最小起降带搜索决策后,Broshkevitch 等^[15]基于深度相机开发了最小起降带标记系统,通过计算机视觉实现最小起降带搜索与飞行器引导。

对于最小起降带决策这样的多目标优化问题,常用的综合评价方法有优劣解距离法、层次分析法、模糊分析法和主成分分析法等,相关算法的比较见表 1。

基于已有研究,针对最小起降带搜索与决策问题,基于矢量碰撞检测的方法,选择修复施工效率、毁损面积等指标作为最小起降带的优化目标,对多种最小起降带方案开展决策优化,提出了基于碰撞检测的最小起降窗口搜索决策算法。

表 1 不同综合评价方法比较表

Tab. 1 Comparison table of different comprehensive evaluation methods

评价方法	优点	不足	适用范围
优劣解距离法 ^[13]	计算简便	当不同评价对象到理性点的距离相等时难以进行决策	适用于多指标、多方案的评价问题
主成分分析法 ^[16]	数据分析计算量小	会丢失部分评价信息	适用于评价对象较多的情况
层次分析法 ^[17]	便于理解,系统化层次化	评价目标假设过于理想	主要用于确定指标权重
模糊分析法 ^[18-20]	将定性问题量化,适用性强	主观性较强	适用于“亦此亦彼”的模糊评价问题

1 最小起降带决策模型

1.1 决策几何参数

跑道的基本几何构型为矩形,其几何坐标系以跑道的左下角点 O 为坐标系原点,跑道的基本参数包括长度 L , 宽度 W , 如图 1 所示。

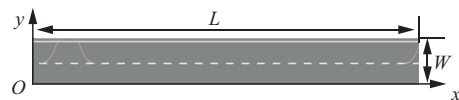


图 1 跑道基本几何参数

Fig. 1 Basic geometric parameters of the runway

最小起降带同样由矩形构成,坐标系与跑道坐标系相同,其主要几何参数包括 4 个边框顶点坐标,最小起降带长度 l 和宽度 w , 以及最小起降带与跑道的夹角 θ , 如图 2 所示。

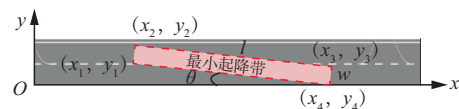


图 2 最小起降带基本几何参数

Fig. 2 Basic geometric parameters of MOS

由于跑道的长度远大于宽度,最小起降带与跑道的夹角在 3° 以内,可以使用跑道宽度与最小起降带宽度的差值近似为 y 轴方向的垂直差,从而近似计算二者的夹角,其中最小起降带与跑道的夹角 θ 最大值满足关系式:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{W-w}{l}\right) \quad (1)$$

式中: θ 为最小起降带与跑道的夹角; W 为跑道宽度; w 为最小起降带宽度; l 为最小起降带长度。

在实际计算中,当跑道长度在 3 000 m 以上,且最小起降带长度在 1 000 m 左右时,最小起降带与

跑道的最大偏转角 θ 一般只有 $1^\circ \sim 2^\circ$, 对机场原有的导航设备的使用影响较小。

1.2 碰撞检测模型

将道面毁损区域进行外接圆包围, 利用毁损外接圆与矩形碰撞检测相关的原理, 判断跑道范围内是否存在最小起降带。具体计算模型如图 3 所示。

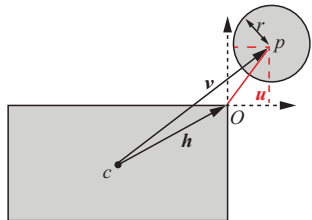


图 3 最小起降带碰撞检测模型

Fig. 3 MOS collision detection model

其中 c 为最小起降带中心, h 为最小起降带中心到角点的向量, p 为毁损外接圆的圆心, r 为毁损外接圆的半径, 以最小起降带右上角点为坐标系原点 O , 由几何关系开展毁损与最小起降带碰撞检测。

利用绝对值将毁损外接圆转移到第 1 象限, 按式 (2) 计算最小起降带中心到毁损外接圆的圆心向量 v 。

$$v = (|p_x - c_x|, |p_y - c_y|) \quad (2)$$

式中: (p_x, p_y) 、 (c_x, c_y) 分别为毁损外接圆和最小起降带中心的坐标。

图 4 展示了毁损外接圆不同位置的 4 种情况。按照式 (3) 计算毁损外接圆与最小起降带的最小距离矢量 u 。

$$u = v - h \quad (3)$$

式中: v 为最小起降带中心到毁损外接圆的圆心向量; h 为最小起降带中心到角点的向量。

通过比较最小距离矢量 u 的绝对值与毁损外接圆的半径 r , 即满足式 (4) 的要求时, 毁损外接圆与最小起降带相交。

$$|u| > r \quad (4)$$

式中: u 为最小距离矢量; r 为毁损外接圆的半径。

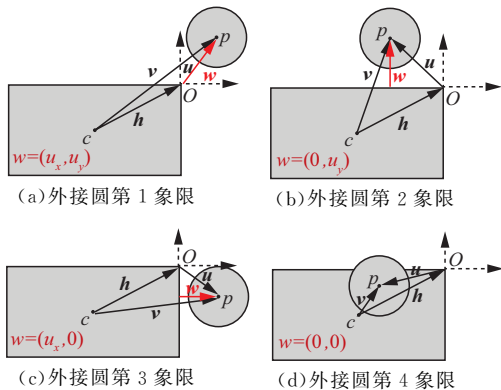


图 4 最短距离矢量不同情况

Fig. 4 Different situations of shortest distance vectors

2 最小起降带决策流程

2.1 最小起降带搜索

最小起降带搜索使用窗口检测结合碰撞检测模型的方式进行。首先按照不同任务状况下的飞行器起降条件确定一个最小起降带窗口, 大小为 $l \times w$, 如图 5 所示。

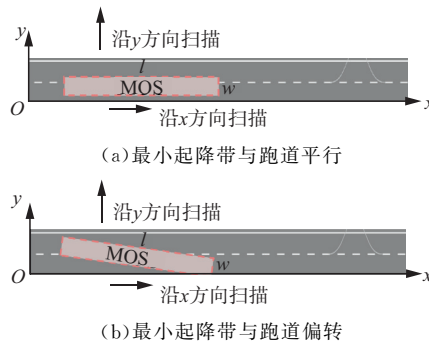


图 5 最小起降带扫描法示意图

Fig. 5 Diagram of MOS scanning method

在扫描过程中, 首先将最小起降窗口从跑道左下顶点 O 开始沿 x 方向扫描, 判断是否有毁损外接圆落点 (p_x, p_y) 在最小起降带窗口范围内。同时, 还需考虑最小起降带与跑道成偏转角 θ 的情况, 由于起降带偏转角度较小, 采取每 0.5° 等差偏转的方式开展窗口扫描检测。具体流程如下:

1) 如果有毁损外接圆落在最小起降带检测窗口内, 则说明该候选最小起降带不可使用, 需要进行下一个候选起降带的计算。下一窗口平移距离 $c_x = p_x + r$ 。

2) 在 x 轴方向重复 1) 中的流程, 不断判断、平移, 直至最小起降带窗口超出跑道横向范围。

3) 将最小起降窗口从跑道左下顶点开始沿 y 轴方向扫描, 判断是否有毁损外接圆落在最小起降带范围内。如有, 则放弃该最小起降带, 下一窗口平移距离 $c_y = p_y + r$ 。

4) 重复 3) 的流程沿 y 方向平移判断, 直至最小起降带窗口超出跑道纵向范围。

将内部没有毁损外接圆的最小起降带决策结果进行存储, 形成最小起降带方案库, 开展相应的优化选取工作。

2.2 最小起降带优选

最小的起降带属于典型的多属性决策问题, 按照现有的相关研究, 主要考虑以下因素:

1) 起降带投用应保证碎屑清理和毁损抢修工程量最小, 同时决策出的最小起降带范围内道面标线等附属设施的损坏应尽可能轻微。

2) 飞行器任务需要使用滑行道和停机坪时, 最

小起降带需要存在与滑行道的连接线路,当最小起降带不满足掉头需求,滑行道与跑道联络道应尽可能位于飞行器着陆方向的最小起降带端部。

3)在机场存在进近灯光系统,最小起降带在投用后其中线宜与原跑道中线重合,以高效地利用原有跑道助降设备和紧急条件下的着陆拦阻系统。

4)最小起降带的四周应设置一定的安全范围,长度方向 100 m 内、宽度方向 5 m 内尽量保证没有毁损,且应对周围碎屑进行清理。

5)保证最小起降带在投用过程中施工所需的机械、设备设施以及材料能够尽可能快速地到达指定地点。

面对最小起降带优选对时效性要求较高,且缺乏先验数据指导综合评价的开展。因此可以结合优劣解距离法计算简便、层次分析法指标明细以及模糊分析法在多指标消除模糊性方面的特点,使用结合优劣解距离的模糊层次综合评价法开展最小起降带决策方案综合评价,建立的模糊层次分析法的结构层次矩阵如图 6 所示。

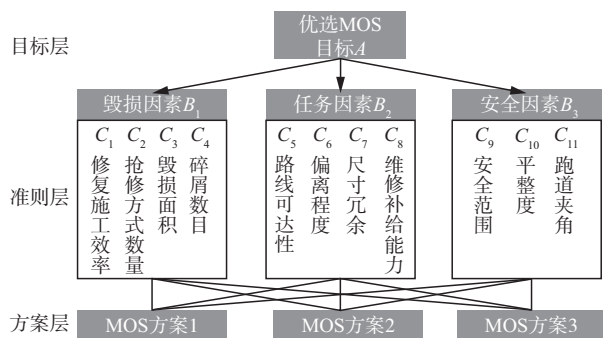


图 6 模糊层次分析法结构层次

Fig. 6 Structure hierarchy of FAHP

层次结构中各指标的具体评价方式如表 2 所示,其中修复施工效率、维修补给能力等属于经济型指标,可修复毁损数目、中心偏离程度等属于效益型指标。

表 2 最小起降带指标与量化方法

Tab. 2 MOS indicators and quantitative methods

指标名称	量化方法
修复施工效率	根据可使用的修复方法确定
修复方式数量	道面毁损种类数目
MOS 毁损面积	MOS 范围内可修复毁损数目
MOS 碎屑	MOS 范围内碎屑数
MOS 路线可达性	MOS 滑行道出入口距离
MOS 偏离程度	MOS 中心线与跑道中心线的距离
MOS 尺寸冗余	MOS 中心线与道面边缘距离
维修补给能力	MOS 中心与停机坪的距离和
MOS 安全范围	MOS 边界周围 10 m 内的毁损数目
MOS 平整度	道面整体毁损面积
MOS 跑道夹角	MOS 与跑面中心线的夹角

在最小起降带位置评价层次结构模型建立的基础上,需要建立各层次间的优先关系矩阵。考虑到最小起降带设计指标多样,采用“五分”标度法比较各元素之间的关系重要性,并建立相应的层间优先关系矩阵 $P=(p_{ij})_{n \times n}$ ，“五分”标度法的规则见表 3。

表 3 “五分”标度法的规则

Tab. 3 Rules of the “Five-Point” scale method

重要程度	说明
0	前者相对于后者而言,一点也不重要
0.25	前者没有后者重要
0.5	前者与后者同等重要
0.75	前者比后者重要些
1.0	前者相对于后者而言,前者极其重要

按照式(5)的要求将层间优先关系矩阵 $P=(p_{ij})_{n \times n}$ 转化为模糊一致性关系矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$ 。

$$\begin{cases} r_i = \sum_{k=1}^n p_{ik}, i = 1, 2, \dots, n \\ r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

式中： p_{ik} 为层间优先关系矩阵元素； r_{ij} 为模糊一致性关系矩阵元素。

分别计算模糊一致矩阵 11 个评价指标与其对应的上一层目标的相对权重,并利用权重大小进行排序,排序值 ω_i 的计算方法见式(6)：

$$\omega_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2\alpha} + \frac{1}{n\alpha} \sum_{k=1}^n r_{ik}, i = 1, 2, \dots \quad (6)$$

式中： $\alpha \geq \frac{n-1}{2}$

通过计算排序向量可得：准则层指标 $B_1 \sim B_3$ 相对于目标 A 的权重 $W_{B \sim A}$ ；指标 $C_1 \sim C_4$ 相对于目标 B_1 的权重 $W_{C \sim B1}$ ；指标 $C_5 \sim C_8$ 相对于目标 B_2 的权重 $W_{C \sim B2}$ ；指标 $C_9 \sim C_{11}$ 相对于目标 B_3 的权重 $W_{C \sim B3}$ 。

由于 MOS 位置评价层次模型包含了准则层 $B_1 \sim B_3$ 和子准则层 $C_1 \sim C_{11}$,故而在求得单层指标权重后需要计算综合权重,即确定 11 个评价指标 $C_1 \sim C_{11}$ 相对于其总目标方案的综合权重 $W_{C \sim A} = (W_{C \sim B1} \times W_{B1 \sim A}, W_{C \sim B2} \times W_{B2 \sim A}, W_{C \sim B3} \times W_{B3 \sim A})$ 。决策者结合该综合权重,通过对各个方案层的指标进行损伤评估,便可以得到最佳的 MOS 修复方案。

3 最小起降带决策验证

3.1 机场跑道模型

为验证最小起降带决策模型的准确性,构建了基于 Al Taqaddum 机场的 2 号跑道参数的模拟假

损状况的跑道模型,跑道的基本参数为长度 $L = 4\ 000\text{ m}$ 、宽度 $W = 60\text{ m}$,飞行区范围内包括 1 块停机坪和 1 条滑行道和 7 条联络道,其基本形式如图 7 所示,该机场跑道的坐标系原点为跑道左下角。

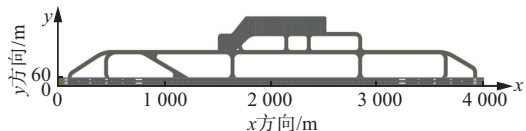


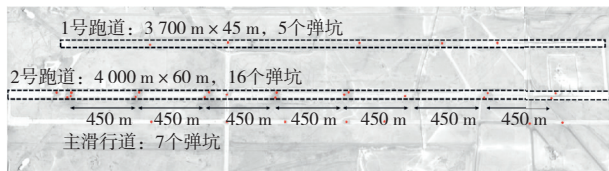
图 7 机场跑道模型

Fig. 7 Airport runway model

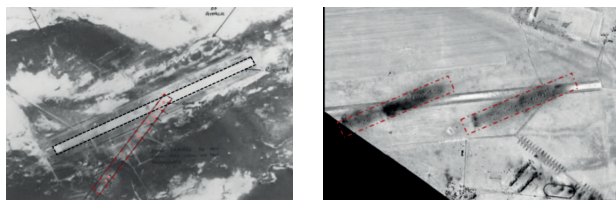
按照轻型飞机起降时的任务需求,最小起降带的基本参数信息为最小起降带宽度 $w = 20\text{ m}$,最小起降带长度 $l = 800\text{ m}$ 。在该几何参数下,最小起降带的最大偏转角度为 2.87° 。

3.2 机场跑道毁损分布

现有的机场跑道宏观毁损分布主要分为分块毁损分布和分段毁损分布 2 种。分块毁损分布指的是在地震等灾害作用下,形成了区域的毁损集中点,多个毁损集中区域将跑道的切割成了不同小块,每个毁损区域间隔无法满足正常情况下的飞行器起降需要。分段毁损分布是毁损形成链式状态横向切割跑道,将跑道划分为若干小段,每一个分段的实际长度小于飞行器执行任务的需求。毁损案例如图 8 所示。



(a) 分段毁损分布



(b) 分块毁损分布

图 8 常见跑道毁损案例图

Fig. 8 Common runway damage cases

本文采用 Al Taqaddum 机场的 2 号跑道的毁损情况作为案例。该机场 2 号跑道长度 $L = 4\ 000\text{ m}$,宽度 $W = 60\text{ m}$,共有 16 处毁损,具体分布如图 9 所示。通过卫星图像识别的毁损位置信息与毁损外接圆半径见表 4。

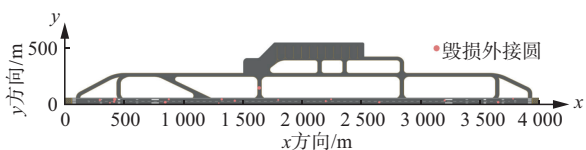


图 9 模拟跑道毁损情况示意图

Fig. 9 Simulated runway damage situation

表 4 毁损外接圆位置信息

Tab. 4 Position information of circumcircle of runway damage

毁损序号	x 方向/m	y 方向/m	外接圆半径/m
1	300	40	10.0
2	385	15	8.0
3	420	25	9.6
4	425	45	13.0
5	850	20	12.0
6	880	45	9.0
7	1 300	12	7.0
8	1 325	45	10.0
9	1 435	33	10.0
10	1 800	40	8.0
11	2 200	30	9.0
12	2 245	45	8.0
13	2 650	20	10.0
14	3 200	36	9.0
15	3 650	20	11.0
16	3 775	50	7.0

机场跑道产生的毁损附近还存在相关的碎屑,在最小起降带决策过程中,清扫碎屑所产生的工程量同样作为决策指标中的影响因素,通过在毁损外接圆处,以 8 倍毁损外接圆半径为范围,按相关算法随机生成相应的碎屑位置,模拟碎屑的分布情况,碎屑与毁损外接圆分布如图 10 所示。

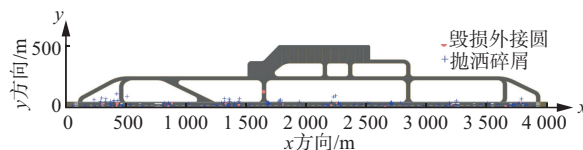


图 10 毁损外接圆与模拟碎屑分布图

Fig. 10 Circumcircle of runway damage and simulated debris

3.3 最小起降带算法验证

将最小起降带方案的几何参数,以及毁损外接圆与模拟碎屑分布数据导入最小起降带碰撞检测模型,开展相关计算后可以得到最小起降带方案库的基本数据,包括多个符合决策要求的最小起降带 4 个边框顶点坐标,不同角度的最小起降带方案数量见表 5。

表 5 最小起降带决策结果数量

Tab. 5 Number of MOS decision results

最小起降带偏转角度/ $^\circ$	决策结果数量/个
-2.867 8	9
-2.150 8	1
-1.433 9	15
-0.716 9	45
0.000 0	132
0.716 9	41
1.433 9	7

当最小起降带与原跑道平行时,符合最小起降带决策要求的数目最多,偏转角度越大,符合要求的最小起降带数目越小,不同偏转角度的最小起降带如图 11 所示。

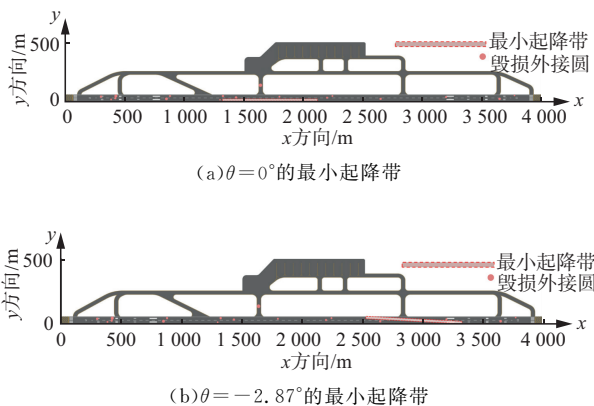


图 11 不同偏转角度的最小起降带示意图
Fig. 11 MOS with different deflection angles

得出最小起降带方案库的相关指标数据后,通过算法检测最小起降带修复时间、任务需求和安全性能的相关指标,并对指标进行归一化处理,使用 2.2 中所描述的模糊层次分析法 (FAHP) 和 TOPSIS 法确定最优的最小起降带位置。

该评分模型计算得到的最优最小起降带结果见图 12,其综合评分为 0.6918 分,相应角点坐标为 (2780,5)、(2780,25)、(3580,25)、(3580,5)。最优最小起降带与原跑道中心线的夹角为 0°,可以最大程度利用原有跑道的导航设备和标志标线。集体指标数据见表 6。

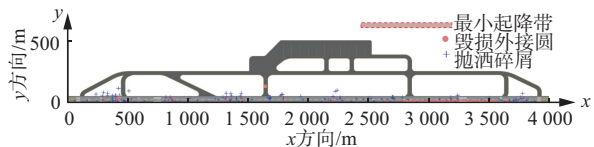


图 12 最优最小起降带示意图
Fig. 12 Diagram of optimal MOS

表 6 最优最小起降带部分相关指标

Tab. 6 Relevant indicators of optimal MOS

可修复 毁损/个	碎屑 数目/个	滑行道 距离和/m	中心偏离 程度/m
0	4	30.479	15.000
扩展范围 毁损数目/个	道面总体 毁损面积/%	最小起降带 偏转角/(°)	机场边线 距离/m
1	1.919	0.000	32.068

4 结论

1)通过对影响最小起降带位置的修复时间、任

务需求和安全性能等相关指标因素进行分析,使用基于外接圆与矩形碰撞检测的方法确定了一种可以快速得到毁伤最轻的最小起降带位置的算法,用以在机场跑道受到毁损后开展最小起降带决策。

2)在基于外接圆与矩形碰撞检测方法确定的最小起降带方案库中,使用模糊层次分析法 (FAHP) 和 TOPSIS 法相结合辅助最小起降带进行优选,参考了 11 种影响最小起降带决策的指标,实现多目标条件下的最小起降带优化选择。

3)使用外接圆的方式对毁损进行包围,主要面向特殊毁损场景,后续研究可以对道面毁损的包围模式进行细分,以实现更精准的最小起降带搜索。本文建立的最小起降带搜索和决策模型是基于二维平面,后续研究可将跑道毁损评估提升至三维形态,提供更加全面的跑道毁损评估。

参考文献

[1] 赵鸿铎,成可,高达辰. 机场道面装配式修复技术研究综述[J]. 空军工程大学学报,2024,25(5):2-9,18.
ZHAO H D,CHENG K,GAO D C. A Review of Precast Technology for Airfield Concrete Pavement Repairs[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024,25(5):2-9,18. (in Chinese)

[2] Air Force Civil Engineer Center. AFPAM 10-219: Airfield Damage Repair Operations[S]. Washington D C: United States Air Force Publishing House,2008.

[3] SAMUEL M. United States Air Force Applications of Unmanned Aerial Systems: Modernizing Airfield Damage Assessment [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology,2018.

[4] 王治,蔡良才. 战时机场跑道抢修保障资源优化技术研究[J]. 国防交通工程与技术,2006,4(4): 32-34.
WANG Z,CAI L C. Study of the Optimization Technique of Guaranty Resources for Runway Rush-Repairs in Wartime[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2006, 4 (4): 32-34. (in Chinese)

[5] 张震,王建国,高银峰,等. 机场道面抢修应急起降带的确定[J]. 后勤工程学院学报,2007,23(2): 14-17.
ZHANG Z,WANG J G,GAO Y F, et al. Confirmation of Minimum Operating Strip in Airfield Pavement Rapid Repair[J]. Journal of Logistical Engineering University,2007,23(2):14-17. (in Chinese)

[6] 何苗,董玉杰,王强,等. 基于累积前景理论的机场最小起降带方案决策[J]. 山西建筑,2017,43(10): 143-145.
HE M,DONG Y J,WANG Q, et al. Airport Pavement Repair Solutions of Minimum Operating Strip Decision-Making Based on Cumulative Prospect Theory

- [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(10):143-145. (in Chinese)
- [7] 黄广炎,邹浩,王成龙,等.反跑道与区域封锁子母弹联合封锁效能的评估方法[J].弹道学报,2013,25(1):42-46,58.
HUANG G Y,ZOU H,WANG C L,et al. Evaluation Method of Combined Blockage Efficiency of Anti-Runway Warhead and Zone Blockage Warhead Carried by Dispenser[J]. Journal of Ballistics,2013,25(1):42-46,58. (in Chinese)
- [8] 计宏磊,杨清文.基于图像分析的机场跑道功能性毁伤评估[J].计算机应用,2016,36(S1):165-168,173.
JI H L,YANG Q W. Airport Runway Functional Damage Assessment Based on Image Analysis[J]. Journal of Computer Applications,2016,36(S1):165-168,173. (in Chinese)
- [9] Air Force Civil Engineer Center. Introduction to Rapid Airfield Damage Recovery (RADR) [J]. Air Force Tactics, Techniques and Procedures, 2019: 3-32.
- [10] 孙威,戎晓力,韩松彤,等.基于模糊层次分析法最小起降带算法研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2021,43(5):459-465.
SUN W,RONG X L,HAN S T,et al. Research on Algorithm of Minimum Takeoff and Landing Zone Based on Fuzzy AHP[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2021, 43(5): 459-465. (in Chinese)
- [11] 张兵,王晓琨.机场跑道打击预案评估方法研究[J].信息化研究,2023,49(3):25-30.
ZHANG B,WANG X K. Research on the Evaluation Method of Attack Plan to Airport Runway[J]. Informatization Research, 2023, 49(3): 25-30. (in Chinese)
- [12] 张舵,宋歌,陈琨,等.基于功能恢复时间的机场跑道目标毁伤评估方法[J].指挥控制与仿真,2023,45(3):94-98.
ZHANG D,SONG G,CHEN K,et al. Damage Assessment Method for Airport Runway Targets Based on Functional Recovery Time[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(3): 94-98. (in Chinese)
- [13] ZHANG T,XUE Z Y,XU Y Y. An Airfield Minimum Operating Strip Selection Method Based on the TOPSIS Method[C]//Proceedings of the Canada Conference on Management Science and Engineering. Vancouver:Springer,2014:70-73.
- [14] 蒋进,靳超,常慧媛,等.面向机场排爆抢修的多智能体调度规划研究[C]//第八届中国指挥控制大会论文集.北京:兵器工业出版社,2020.
JIANG J,JIN C,CHANG H Y,et al. Research on Multi-Agent Scheduling Planning for Airport Explosion and Emergency Repair[C]//Proceedings of the 8th China Command and Control Conference. Beijing: Weapons Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [15] BROSHKEVITCH A,HANCOCK A,PETERS A,et al. An Autonomous System for the Rapid Airfield Damage Repair Mission [C]//AIAA SCITECH 2023 Forum. Reston, Virginia: AIAA, 2023: 0605.
- [16] LEVER J,KRZYWINSKI M,ALTMAN N. Principal Component Analysis[J]. Nature Methods, 2017, 14(7):641-642.
- [17] 宋晓丽.机场最小起降带的评价方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
SONG X L. Study on Evaluation Method of Airport Minimum Landing Zone[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [18] ZHANG P,FENG G Q. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation to Evaluate the Effect of Water Flooding Development[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2018, 8(4): 1455-1463.
- [19] HOU J,GAO T,YANG Y,et al. Battery Inconsistency Evaluation Based on Hierarchical Weight Fusion and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84: 110878.
- [20] ZHOU C H,CHEN M,CHEN J T,et al. A Multi-Hazard Risk Assessment Model for a Road Network Based on Neural Networks and Fuzzy Comprehensive Evaluation[J]. Sustainability, 2024, 16(6):E2429.

(编辑:韩茜)