

中文引用格式:黄信,李茹,徐平,等. 机场灾前除雪资源配置优化策略[J]. 中国安全科学学报,2025,35(11):56-64.

英文引用格式:HUANG Xin, LI Ru, XU Ping, et al. Optimization strategy of snow removal resources allocation before airport disaster[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(11): 56-64.

机场灾前除雪资源配置优化策略^{*}

黄信¹教授, 李茹¹, 徐平^{1,2}, 吴堃¹副教授

(1 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300;

2 巴中恩阳机场有限责任公司, 四川 巴中 636066)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.11.1572

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600500); 国家自然科学基金资助(52278542); 中国民航大学科研启动基金资助(2020KYQD40)。

【摘要】 为提升灾前机场除雪资源配置效率,考虑机场设备除雪和人工除雪协同作业,引入除雪恢复力考虑除雪效率,建立机场灾前除雪资源配置多目标优化分析模型,采用非支配排序遗传算法Ⅱ(NSGA-Ⅱ)求解得到最优解集和 Pareto 前沿,引入连续有序加权平均(C-OWA)算子计算除雪恢复力和成本的客观权重,并结合主观权重确定综合权重,基于优劣解距离法(TOPSIS)分析得到灾前除雪资源配置的最佳方案,并分析除雪恢复力的主观权重对决策结果的影响。结果表明:考虑恢复力和成本的多目标优化模型的最优解集的最大和最小恢复力分别为 108 600 和 93 928 m³/h,成本分别为 111.8 万元和 79.86 万元,灾前除雪资源配置最优解集中最佳方案的除雪恢复力为 97 200 m³/h,除雪成本为 92.07 万元,相对最优解集而言,采用优化分析得到的最优方案的恢复力增加了 31.5%,说明建立的灾前除雪资源配置方法可行;除雪恢复力与主观权重呈正相关关系,如主观权重为 0、0.2 和 0.4 时对应的除雪恢复力分别为 85 496、89 600 和 97 200 m³/h。

【关键词】 机场除雪资源配置; 多目标优化; 非支配排序遗传算法Ⅱ(NSGA-Ⅱ); 连续有序加权平均算子(C-OWA 算子); 优劣解距离法(TOPSIS)

Optimization strategy of snow removal resources allocation before airport disaster

HUANG Xin¹, LI Ru¹, XU Ping^{1,2}, WU Kun¹

(1 School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2 Bazhong Enyang Airport, Bazhong Sichuan 636066, China)

Abstract: To improve the efficiency of pre-disaster airport snow removal resource allocation, collaborative operations between equipment and artificial snow removal were considered. Snow removal resilience was introduced to represent snow removal efficiency, and a multi-objective optimization analysis model of airport pre-disaster snow removal resource reserve was established. The NSGA-Ⅱ was used to solve the optimal solution set and Pareto frontier. The C-OWA operator was introduced to calculate the objective weights of snow removal resilience and cost, and composite weight was determined by combining the subjective weight. Based on the TOPSIS method, the best scheme of pre-disaster snow removal

* 文章编号:1003-3033(2025)11-0056-09; 收稿日期:2025-06-16; 修稿日期:2025-09-21

resource reserve was obtained, and the influence of the subjective weight assigned to snow removal resilience on the decision results was analyzed. The results show that the maximum and minimum resilience of the optimal solution set of the multi-objective optimization model considering resilience and cost are 108 600 and 93 928 m³/h, respectively, and the costs are 1.118 million yuan and 798 600 yuan, respectively. The snow removal resilience of the best solution in the optimal solution set of pre-disaster snow removal resource reserve is 97 200 m³/h, and the snow removal cost is 920 700 yuan. Compared with the optimal solution set, the resilience of the optimal solution obtained by optimization analysis is increased by 31.5%, indicating that the established pre-disaster snow removal resource allocation method is feasible. Snow removal resilience is positively correlated with the subjective weight. For example, when the subjective weight is 0, 0.2 and 0.4, the corresponding snow removal resilience are 85 496, 89 600 and 97 200 m³/h, respectively.

Keywords: airport snow removal resource allocation; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II); continuous ordered weighted averaging operator (C-OWA operator); technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

0 引 言

机场是交通运输体系中的重要节点,冬季积雪会对飞机起降产生影响。除雪资源优化是机场功能和韧性恢复过程中的重要措施,现有研究主要聚焦设备除雪效率提升等方面,而在除雪优化分析时尚未考虑局部区域的人工除雪影响^[1-2]。在机场除雪工作中,权重分配是关键环节,直接影响着资源分配的合理性和除雪效率的优化。根据设备除雪和人工除雪条件建立机场除雪资源配置多目标优化分析模型,提出灾前除雪资源配置策略,对提升机场除雪经济效益具有重要意义。

目前,除雪研究主要集中于道路工程和铁路工程领域,如刘状壮等^[1]综合分析了近年道路除冰雪领域的研究,认为道路除雪主要针对电加热除雪、融雪抑冰路面等新型除雪技术,而在工程应用方面不足。丁东等^[2]围绕列车车体冰雪积聚问题,从结构设计、防护方案和除冰作业 3 方面梳理了列车车体结构优化和抗雪优化措施。欧阳鹏等^[3]分析了严寒地区沈阳局、哈尔滨局动车组融雪除冰设施技术,认为铁路除冰雪作业方式繁多,标准不统一且人员投入大。在除雪方法研究中,谢秉磊等^[4]通过遗传算法优化了路网结构中融雪车的路径,使车辆总行驶里程更小。王晶等^[5]通过改进的禁忌搜索模型解决了极端冰雪天气下的城市路网除雪应急物资布局问题及其除雪作业优化问题。KARAA 等^[6]提出了用人工智能方法估计道路上的积雪深度和交通量,并对除雪车辆路径的优先级排序。

NGUYEN 等^[7]提出了具有约束的除雪机优化模型,优化了车辆路径和车队规模。可见,已有道路除雪研究主要基于路网结构,并基于算法优化除雪车辆路径。

在机场除雪方面,邢志伟等^[8]建立了具有时间约束的除冰雪作业模型,针对实际的雪情得出最优作业方案,考虑多辆除冰雪车的协同作业,设计了除冰雪车辆队形控制模型。谭忆秋等^[9]为解决机场道面除冰雪方法除雪效率低等问题,开展了基于热管技术的机场道面融雪性能试验,分析了不同热管埋深及间距、气温以及积雪特性对机场道面融雪效率的影响。ZHANG Yaping 等^[10]将机场道面划分为不同的除雪区域,采用灰色差分网络法预测机场道面除雪作业时间,建立机场道面动态优先级模型。WANG Liwen 等^[11]采用广度优先搜索算法优化除雪车调度,提升机场除雪效率。黄信等^[12-13]从韧性角度对暴雪灾害下的机场进行韧性评价与恢复力分析,采用蒙特卡罗方法分析得出不同等级降雪天气下机场基础设施系统韧性水平变化特征。综上,目前机场除雪研究较少,且缺少对算法结果的优化和对人工除雪的考虑。

鉴于此,笔者拟构建机场除雪资源配置多目标优化模型,采用非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II) 求解得到最优解集和 Pareto 前沿,引入连续有序加权平均算子^[14] (Continuous Ordered Weighted Averaging operator, C-OWA 算子) 计算除雪恢复力和成本的客观权重,结合机场管理人员的主观权重确定综合权

重,基于优劣解距离法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)分析得到灾前机场除雪资源配置的最佳方案,以期为机场除雪资源的灾前配置提供依据。

1 机场除雪效率与成本分析模型

1.1 除雪效率

现有机场除雪设备种类型号繁多,工作原理、适用条件及工作效率均有差异,选取推雪车、吹雪车和抛雪车3种主力设备构建除雪恢复力模型,假设在机场除雪工作中,采取分区域并行作业,除雪设备能够一次作业达到除雪标准且不需要在已作业区域往复行驶,在分析中不考虑气温、除雪顺序等因素对除雪效率的影响。机场除雪设备实际作业能力需要考虑设备、人员及作业能力修正。考虑到机场除雪设备中具有同一功能的设备具有不同型号,按下式确定设备效率:

$$D_{ij} = D'_{ij} \cdot f_i \cdot f_c \quad (1)$$

式中: D_{ij} 为第*i*种设备的第*j*种型号除雪设备的实际作业效率, m^3/h ; D'_{ij} 为第*i*种设备的第*j*种型号除雪设备的理论作业效率, m^3/h ; f_i 为设备修正系数; f_c 为作业人员修正系数。

人工除雪效率受管理因素和天气因素的影响较大,由下式计算人工除雪效率:

$$L_p = L_t \cdot f_c \quad (2)$$

式中: L_p 为人工除雪的实际作业效率, m^3/h ; L_t 为人工除雪的理论作业效率, m^3/h 。

引入机场除雪恢复力*R*表述机场整体除雪能力,定义除雪恢复力为设备除雪效率和人工除雪效率之和。

$$R = \sum X_{ij} D_{ij} + Y_k L_p \quad (3)$$

式中: X_{ij} 为第*i*种设备第*j*种型号的除雪设备数量,辆, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$; Y_k 为除雪人员数量。

1.2 除雪成本

除雪成本是除雪资源模型中的重要指标。考虑除雪设备成本由固定成本和浮动成本构成,固定成本即设备购入成本,浮动成本即设备运维成本。目前,大多数除雪资源分析并未考虑人工成本,实际当机场除雪的人工数量较大时,其对机场除雪资源配置模型的最终效率和成本影响是不容忽视的。考虑人工成本因地区、工种和工作环境不同而有较大差异,难以统一,参考民航专业工程概、预算编制办法及费用标准,考虑直接人工、规费、措施费及材料费。

机场除雪总成本按下式计算:

$$C = \sum C_{aij} \cdot X_{ij} + \sum C_{bij} \cdot T_{ij} + C_L \quad (4)$$

式中: C 为除雪总成本,万元; C_{aij} 为第*i*种设备的第*j*种型号除雪设备的固定成本,万元; C_{bij} 为第*i*种设备的第*j*种型号除雪设备的浮动成本,万元; T_{ij} 为第*i*种设备的第*j*种型号除雪设备的运行时长, h; C_L 为人工成本,元/人。

2 除雪资源配置多目标优化模型

基于上述定义的设备及人工除雪效率、除雪成本,引入除雪约束条件,建立考虑恢复力和成本的机场除雪资源配置多目标优化模型,并在后续研究中分析恢复力和成本的综合权重。第1个目标函数表示使除雪资源的恢复力最大;第2个目标函数表示使除雪成本最小。

目标函数:

$$\max R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} D_{ij} + Y_k L_p \quad (5)$$

$$\min C = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} C_{aij} + Y_k C_k +$$

$$S_Q \cdot q_{ij} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} D_{ij} \quad (6)$$

式中: C_k 为单个作业人员成本,元/人; S_Q 为设备除雪面积, m^2 ; S_Z 为总需求除雪面积, m^2 ; p_{ij} 为第*i*种设备的第*j*种型号除雪设备的油耗, L/h ; q_{ij} 为第*i*种设备的第*j*种型号除雪设备的燃油价格,元/L。

下式分别表示设备除雪和人工除雪面积满足总需求以及除雪设备和人工数量限定在合理范围内。

约束条件:

$$S_Q + S_L \geq S_Z \quad (7)$$

$$X_{ij, \min} \leq X_{ij} \leq X_{ij, \max} \quad (8)$$

$$Y_{k, \min} \leq k Y_k \leq Y_{k, \max} \quad (9)$$

式中 S_L 为人工除雪区域面积, m^2 。

下式表示设备除雪和人工除雪时间相近,以满足各区域同时开放,避免因局部原因影响机场运行。

$$\frac{S_L}{\sum_{k=1}^l Y_k L_p} = \frac{S_Q}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} D_{ij}} \quad (10)$$

3 机场除雪资源配置优化策略分析

选取某4E级机场为研究对象,采用NSGA-II算法^[15-16]进行除雪资源优化分析。机场有2条近距跑道,机场布置如图1所示,航空器及航站楼邻近区域采用人工除雪,根据机场布置图确定设备除雪区

域和人工除雪区域。跑道、滑行道采用机械设备除雪;由于设备除雪对飞行器存在一定安全隐患,因此飞行器 5 m^[17] 范围内采取人工除雪;考虑航站楼边线一定范围内由于设备冗杂,为避免设备除雪操作造成设备损坏,设定航站楼 5 m 范围内采取人工除

雪;多目标优化模型涉及的参数设置见表 1,其中设备取值范围参考《民用运输机场航班保障专用设备配置指南》(AC-139-CA-2015-01),人员费等参考《民航空管专业工程概、预算编制办法及费用标准》(2023-征求意见稿)。

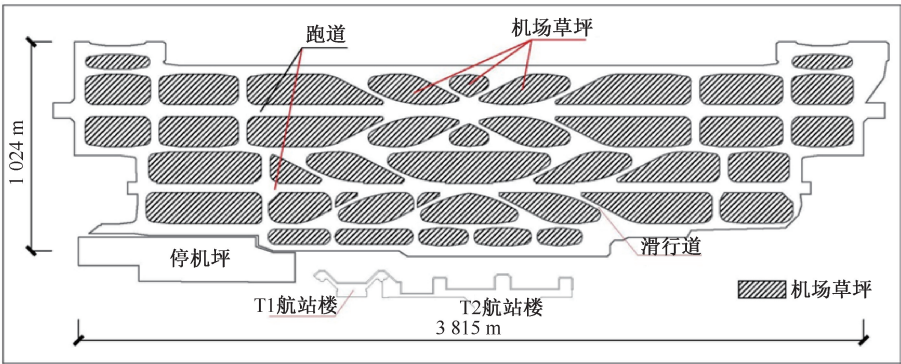


图 1 机场布置
Fig. 1 Airport layout diagram

表 1 多目标优化模型参数设置

Table 1 Multi-objective optimization model parameter setting	
参数	取值
f_i	0.50~1.50
f_e	0.95~1.00
$C_L/(\text{元}\cdot\text{人}^{-1})$	300
S_0/m^2	1 451 016
S_L/m^2	72 766
$X_{ij}(i=1,2,3)$	下限为(7,4,4) 上限为(10,6,6)
Y_k	[60,100]

NSGA-II 算法通过在 NSGA 算法中引入快速排序、拥挤度比较并改进精英策略,提高解集多样性,适用于复杂多目标优化问题。NSGA-II 算法首先随机生成初始种群,通过非支配排序分层并计算拥挤度,利用遗传操作生成子代,将父代与子代合并后再次排序并依据拥挤度筛选优质个体,循环迭代直至满足终止条件。设定 NSGA-II 算法交叉概率为 0.8,交叉分布指数为 20,变异概率为 0.05,变异分布指数为 20,种群数量为 50,迭代代数 为 100,文中不考虑交叉概率和变异概率的变化,利用 Matlab R2016b 编程求出 Pareto 前沿,如图 2 所示。

利用该算法得出的最优解集中前 10 的解集见表 2,其中, X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别表示推雪车、吹雪车、抛雪车和除雪人员的数量。

由表 2 可知:由 NSGA-II 算法得出的最优解集中,最大除雪恢复力为 108 600 m³/h,成本为 111.8

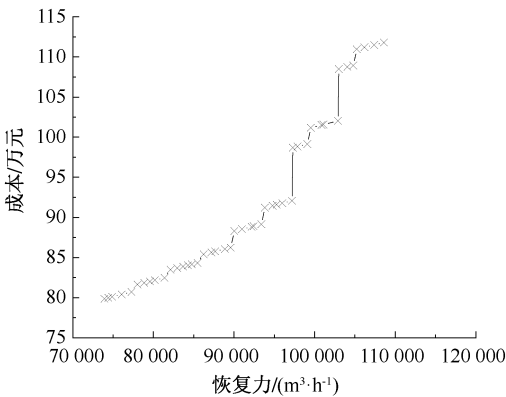


图 2 Pareto 前沿
Fig. 2 Pareto front

表 2 最优解集中前 10 的解集

Table 2 Top ten solutions of the optimal solution set					
X_1 /辆	X_2 /辆	X_3 /辆	X_4 /人	除雪恢复力/ (m ³ ·h ⁻¹)	成本/ 万元
7	4	4	60	73 928	79.86
10	6	6	88	108 600	111.80
10	5	6	88	102 900	102.03
10	4	6	88	97 200	92.07
10	5	5	73	97 300	98.69
10	6	5	74	103 120	108.52
10	4	4	88	89 600	86.24
10	5	5	88	99 100	99.14
10	6	5	88	104 800	108.94
9	4	4	88	85 496	84.32

万元,最低除雪恢复力为 73928 m³/h,成本为 79.86 万元,推雪车、吹雪车、抛雪车和除雪人员数量均有

变化,除雪恢复力和成本变化幅度较大,综合除雪效率和经济成本难以直接得出最佳方案。

4 基于 TOPSIS 的除雪资源决策

除雪优化涉及恢复力和经济成本 2 方面因素,为分析得到除雪资源的最佳方案,需要评估除雪恢复力和经济成本 2 个优化目标的权重。权重综合考虑主观因素和客观因素影响,考虑机场管理人员的主观因素影响,因此,需主观评估 2 个优化目标重要性大小,得到 2 个优化目标的主观权重。同时引入 C-OWA 算子计算 2 个指标的客观权重。

邀请 10 位专家对除雪恢复力和除雪成本 2 个指标进行重要度打分,专家信息见表 3,其中,1 分为不重要,2 分为一般,3 分为较重要,4 分为重要,5 分为很重要,指标重要度结果见表 4。

表 3 专家信息

Table 3 Expert information

单位性质	机场	研究机构	民航高校
占比/%	50	20	30
从业年限/a	<10	10~20	≥20
占比/%	10	50	40

表 4 除雪恢复力和除雪成本重要度

Table 4 Scoring the importance of the two indicators

专家序号	恢复力指标	成本指标
1	5	3
2	5	4
3	4	5
4	5	3
5	4	5
6	5	3
7	5	4
8	4	5
9	5	3
10	5	4

利用下式计算得到 2 个指标的主观权重,得出恢复力指标主观权重为 0.546 5,成本指标主观权重为 0.453 5。

$$\theta_n = \frac{\sum_{a=1}^g A_{an}}{\sum_{a=1}^g \sum_{n=1}^2 A_{an}} \quad (11)$$

式中: θ_n 为第 $n(n=1,2)$ 个指标主观权重; g 为专家数量; A_{an} 为第 a 位专家对第 n 个指标的打分。

Pareto 最优解集共有 s 个解,将 t 个目标函数作为优化指标,将优化指标下数据作降序处理,得到指

标矩阵 H 。

$$H = H_{st} = \begin{pmatrix} 108 & 600 & 111.8 \\ 104 & 800 & 108.94 \\ 103 & 120 & 108.52 \\ 102 & 900 & 102.03 \\ 99 & 100 & 99.14 \\ 97 & 300 & 98.69 \\ 97 & 200 & 92.07 \\ 89 & 600 & 86.24 \\ 85 & 496 & 84.32 \\ 73 & 928 & 79.86 \end{pmatrix} \quad (12)$$

引入 C-OWA 算子计算 2 个优化指标的客观权重,用下式计算加权向量。

$$\beta_m = C_{s-1}^{m-1} / \sum_{i=0}^{s-1} C_{s-1}^i = C_{s-1}^{m-1} / 2^{s-1} \quad (13)$$

式中: β_m 为第 m 个解的加权向量; C_{s-1}^m 为从 $s-1$ 个元素中任意抽取 m 个元素的组合数。

利用下式计算得到 2 个指标的绝对权重值:

$$w'_{ni} = \sum_{i=1}^{10} \beta_i g_{ni} \quad (14)$$

$$g_{ni} = \frac{H_{ni}}{H_{\max}} \quad (15)$$

式中: w'_{ni} 为第 $n(n=1,2)$ 行第 $i(i=1,2,\cdots,10)$ 列元素的绝对权重值; g_{ni} 为标准化处理指标矩阵的各个元素; H_{ni} 为指标矩阵 H 中第 n 列指标第 i 行的元素; $H_{\max}$ 为各列最大元素。

通过上述计算公式得到指标的标准化处理结果和绝对权重值计算结果,见表 5。

表 5 指标绝对权重值和相对权重值

Table 5 Absolute weight value and relative weight value of indicators

标准化		绝对权重值	
恢复力指标	成本指标	恢复力指标	成本指标
1.000 0	1.000 0	0.002 0	0.002 0
0.965 0	0.974 4	0.017 0	0.017 1
0.949 5	0.970 7	0.066 8	0.068 3
0.947 5	0.912 6	0.155 5	0.149 7
0.912 5	0.886 8	0.224 6	0.218 2
0.895 9	0.882 8	0.220 5	0.217 2
0.895 0	0.823 5	0.146 8	0.135 1
0.825 0	0.771 4	0.058 0	0.054 2
0.787 3	0.754 3	0.013 8	0.013 3
0.680 7	0.714 3	0.001 3	0.001 4

利用下式计算 2 个优化指标的客观权重值:

$$w_n = \sum_{i=1}^{10} w_{ni} / \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^{10} w_{ni} \tag{16}$$

式中 w_n 为第 $n(n=1,2)$ 个指标客观权重值。

计算出恢复力指标的客观权重为 0.508 3,成本指标的客观权重为 0.491 7。优化指标的综合权重计算见下式:

$$\varphi_n = \delta_1 w_n + \delta_2 \theta_n \tag{17}$$

式中: δ_1 和 δ_2 为线性组合系数,取 0.5; φ_n 为第 $n(n=1,2)$ 个指标的综合权重。

利用式(17) 计算得到恢复力和成本 2 个优化指标的综合权重分别为 0.527 4、0.472 6。

利用 TOPSIS 法^[18] 将 Pareto 最优解集中前 10 的解进行排序。对指标矩阵的各个元素赋权,得到赋权矩阵 S :

$$S = S_{mn} \tag{18}$$

确定最优和最劣解见下式。将赋权矩阵中恢复力最大元素作为最优解 X_n^+ ,最小元素作为最劣解 X_n^- ;将赋权矩阵中成本最小元素作为最优解 Y_n^+ ,最大元素作为最劣解 Y_n^- 。

$$\begin{cases} X_n^+ = \max(k_{11}, k_{21}, \cdots, k_{i1}) \\ X_n^- = \min(k_{11}, k_{21}, \cdots, k_{i1}) \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} Y_n^+ = \max(k_{12}, k_{22}, \cdots, k_{i2}) \\ Y_n^- = \min(k_{12}, k_{22}, \cdots, k_{i2}) \end{cases} \tag{20}$$

计算欧氏距离。按下式计算赋权矩阵中各元素

与最优解和最劣解的距离 Z^+ 和 Z^- 。

$$Z^+ = \sqrt{(S_{mn} - X_n^+)^2 + (S_{mn} - Y_n^+)^2} \tag{21}$$

$$Z^- = \sqrt{(S_{mn} - X_n^-)^2 + (S_{mn} - Y_n^-)^2} \tag{22}$$

采用下式计算得到 Pareto 最优解集中第 m 个解与最优水平的接近指数 R_m :

$$R_m = \frac{z^-}{z^+ + z^-} \tag{23}$$

其中, $0 \leq R_m \leq 1$, Z^+ 越小,即该方案与最优解的距离越小, R_m 越大;相反, Z^- 越小,该方案与最劣解的距离越小, R_m 越小。由于 R_m 越大说明方案与最优解越接近,计算每个方案的 R_m 评分,并按降序排序,即可得到解的排序,决策结果见表 6。

由表 6 可知:通过 TOPSIS 法得到结果排序为 1 的方案,接近指数 R_m 为 0.649 8,以排序为 1 的方案作为除雪资源配置优化策略的最佳方案。将最优解集中排序第 1 的方案(最佳方案)与排序第 10 的方案对比,结果见表 7,其中方案排序号来自表 6 的排序结果。

由表 7 可知:最优解集中第 1 方案(最佳方案)的推雪车、吹雪车、抛雪车和数量分别配置为 10 辆、4 辆、6 辆和 88 人时,除雪恢复力为 97 200 m³/h,相对于最优解集中排序中的第 10 方案而言,其恢复力提高 31.5%,除雪成本为 92.07 万元,除雪成本比最优解集中排名第 10 的方案高 15.3%,通过此方法可以获得机场基础设施除雪资源最佳配置方案。

表 6 Pareto 最优解集中前 10 的解排序

Table 6 Sort the top ten solutions in the Pareto optimal solution set

解的序号	赋权值		解的距离		R_m	排序
	恢复力指标	成本指标	最优解距离	最劣解距离		
1	0.359 0	0.337 6	0.168 4	0.135 0	0.445 0	10
2	0.527 4	0.472 6	0.135 0	0.168 4	0.55 5 0	6
3	0.499 7	0.431 3	0.097 7	0.146 6	0.600 1	2
4	0.472 0	0.389 2	0.075 7	0.140 5	0.649 8	1
5	0.472 5	0.417 2	0.096 7	0.126 3	0.566 4	5
6	0.500 8	0.458 7	0.124 0	0.142 4	0.534 5	8
7	0.435 1	0.364 6	0.096 1	0.132 1	0.578 9	4
8	0.481 3	0.419 1	0.093 6	0.133 4	0.587 6	3
9	0.509 0	0.460 5	0.124 3	0.150 4	0.547 5	7
10	0.415 2	0.356 5	0.113 8	0.129 0	0.531 4	9

表 7 最佳优化后的方案与排序最低方案对比

Table 7 Comparison of the best optimized scheme with the lowest ranking scheme

方案排序	X_1 /辆	X_2 /辆	X_3 /辆	X_4 /人	恢复力/(m ³ · h ⁻¹)	成本/万元
第 10 方案	7	4	4	60	73928	79.86
第 1 方案	10	4	6	88	97 200	92.07

5 主观权重分析

除雪资源多目标优化分析需要确定除雪恢复力和除雪成本 2 个指标的综合权重,通过考虑机场管理人员的主观因素影响,引入 C-OWA 算子计算 2 个指标的客观权重,结合主观权重得出 2 个指标的综合权重。在实际运行中,机场管理人员引起的

主观权重变化对综合权重影响较大,有必要分析主观权重对除雪资源优化的影响。为此,得到不同情况下的最佳方案,改变除雪恢复力的主观权重分别为 0,0.2,0.4,0.6,0.8 和 1,并与算例对比分析。当考虑除雪恢复力的主观权重变化时,计算得到最佳方案中各变量及目标函数值如图 3 所示,主观权重对最佳方案影响结果见表 8。

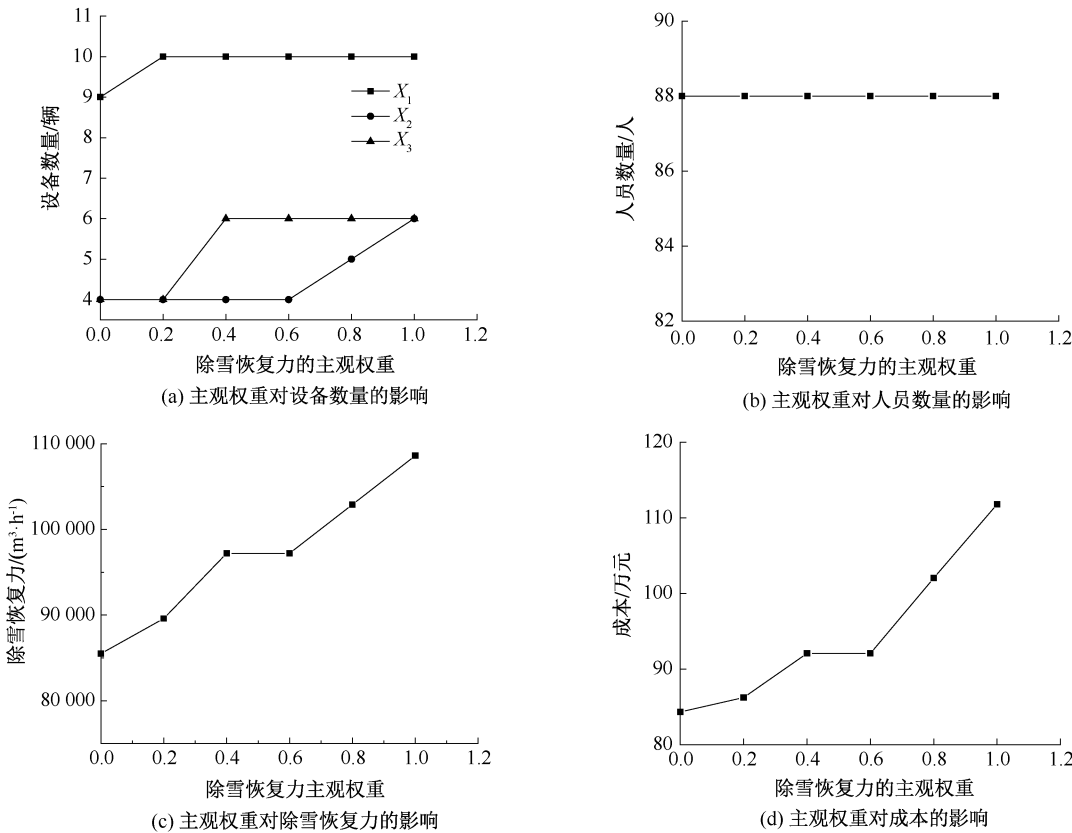


图 3 主观权重对设备和人员数量及除雪恢复力与成本的影响

Fig. 3 Influence of subjective weights on the number of equipment and personnel and the resilience and cost of snow removal

表 8 主观权重对最佳方案的影响

Table 8 Influence of subjective weights on the best solution

主观权重	X_1 / 辆	X_2 / 辆	X_3 / 辆	X_4 / 人	效率/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	成本/ 万元
0	9	4	4	88	85 496	84.32
0.2	10	4	4	88	89 600	86.24
0.4	10	4	6	88	97 200	92.07
0.6	10	4	6	88	97 200	92.07
0.8	10	5	6	88	102 900	102.03
1.0	10	6	6	88	108 600	111.80

由图 3a 可知:当除雪恢复力的主观权重大于 0.2 时,最佳方案中推雪车数量均为 10 辆;当除雪

恢复力的主观权重大于 0.4 时,最佳方案中抛雪车为 6 辆;当除雪恢复力的主观权重小于 0.6 时,最佳方案中吹雪车为 4 辆;当除雪恢复力的主观权重取 0.4 和 0.6 时,最佳方案中 3 种除雪车的数量没有变化。由图 3 b 可知:除雪恢复力的主观权重变化,不会使最佳方案中人员配置数量变化,均为 88 人。

同时,由图 3 c 可知:最佳方案的除雪恢复力与主观权重呈正相关关系,如主观权重为 0、0.2 和 0.4 时对应的除雪恢复力分别为 85 496、89 600 和 97 200 m^3/h ;主观权重取 0.4 和 0.6 时,最佳方案除雪恢复力均为 97 200 m^3/h 。由图 3 d 可知:随着除雪恢复力主观权重增加,最佳方案的成本变化趋势与除雪恢复力变化趋势相同。

6 结 论

- 1) 利用 NSGA-II 算法求解基于恢复力和成本的机场除雪多目标优化模型得出最优解集,考虑恢复力和成本的多目标优化模型的最优解集的最大和最小恢复力分别为 108 600 和 93 928 m³/h,成本分别为 111.8 万元和 79.86 万元。
- 2) 引入 C-OWA 算子计算恢复力和成本的客观权重,与主观权重结合得到 2 项指标的综合权重,除雪恢复力综合权重为 0.527 4,除雪成本综合权重分

别为 0.472 6;通过 TOPSIS 法决策得出除雪资源配置的最佳方案,除雪恢复力为 97 200 m³/h,最佳方案的除雪恢复力比最优解集中排名第 10 的方案高 31.5%,除雪成本比最优解集中排名第 10 的方案高 15.3%。

3) 除雪恢复力的主观权重小于 0.4 时,最佳方案中的除雪恢复力与主观权重呈正相关关系,除雪恢复力主观权重取 0.4 和 0.6 时,最佳方案一致,随着除雪恢复力主观权重的增加,最佳方案中的除雪恢复力也会进一步增加。

参 考 文 献

[1] 刘状壮,季鹏宇,张有为,等. 基于可视化文献计量分析的道路除冰雪技术研究进展[J]. 冰川冻土, 2023, 45(3):1 180-1 194.

LIU Zhuangzhuang, JI Pengyu, ZHANG Youwei, et al. Research progress of road snow and ice removal technology based on visualized bibliometric analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023,45(3):1 180-1 194.

[2] 丁东,李智,刘丹,等. 严寒地区列车车体抗冰除雪措施研究综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3 798-3 805.

DING Dong, LI Zhi, LIU Dan, et al. Review on anti-ice and snow removal measures of train body in severe cold region[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022,19(12):3 798-3 805.

[3] 欧阳鹏,李豫. 严寒地区动车组融冰除雪设施配置探讨[J]. 铁道标准设计, 2025,69(4):199-204,228.

OUYANG Peng, LI Yu. Discussion on configuration of ice melting and snow removal facilities for electric multiple units in severe cold regions [J]. Railway Standard Design, 2025,69(4):199-204,228.

[4] 谢秉磊,李颖,刘敏. 带临时补充点的融雪剂撒布车辆路径问题[J]. 系统工程理论与实践, 2014,34(6): 1 593-1 598.

XIE Binglei, LI Ying, LIU Min. Vehicle routing problem with temporary supplementary points for spreading deicing salt[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014,34(6):1 593-1 598.

[5] 王晶,刘昊天,朱建明. 基于韧性城市视角的冰雪天气下路网恢复问题研究[J]. 中国管理科学, 2018,26(3): 177-187.

WANG Jing, LIU Haotian, ZHU Jianming. Study on road network recovery under snow and ice conditions based on the perspective of resilient city[J]. Chinese Journal of Management Science, 2018,26(3):177-187.

[6] KARAA M, GHAAZZAI H, MASSOUD Y, et al. A computer vision-based framework for snow removal operation routing [J]. IEEE Open Journal of Circuits and Systems, 2024,5: 81-91.

[7] NGUYEN P H D, TRAN D. Optimizing snow and ice route removal operations using vehicle routing problems and geographic information system[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2024,38(2): DOI: 10.1061/JCRGEI.CRENG -721.

[8] 邢志伟,李斯,罗谦. 机场道面除冰雪车辆队形控制模型[J]. 交通运输工程学报, 2019,19(4):182-190.

XING Zhiwei, LI Si, LUO Qian. Formation control model of airport pavement deicing vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019,19(4):182-190.

[9] 谭忆秋,张驰,陈凤晨,等. 基于热管技术的机场道面融雪性能试验研究[J]. 中国公路学报, 2019,32(4): 137-147.

TAN Yiqiu, ZHANG Chi, CHEN Fengchen, et al. Snow melting performance experimental study of airport pavement with heat pipe technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019,32(4):137-147.

[10] ZHANG Yaping, ZHANG Yu, XING Xiaoqing, et al. The method of division and classification quantification for snow and iceremoval on airport pavement [C]. Proceedings of the 11th International Conference on Green Intelligent

Transportation Systems and Safety, 2020: 649–664.

[11] WANG Liwen, YAO Guopeng, WEI Jianglong, et al. Design of airport snow removal operation optimization and dispatch system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,52–54:54–58.

[12] 黄信, 谭成松, 吴堃, 等. 暴雪灾害下机场基础设施韧性研究[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(12): 198–205. HUANG Xin, TAN Chengsong, WU Kun, et al. Study on resilience of airport infrastructure under blizzard weather[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(12):198–205.

[13] 黄信, 徐平, 吴堃. 降雪天气对机场基础设施系统韧性恢复的影响[J]. 中国安全科学学报, 2024,34(4): 175–182. HUANG Xin, XU Ping, WU Kun. Influence of snowfall weather on resilience recovery of airport infrastructure system[J]. China Safety Science Journal, 2024,34(4): 175–182.

[14] YAGER R R. OWA aggregation over a continuous interval argument with applications to decision making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B, 2004,34(5):1 952–1 963.

[15] CHEN Xiaoqiang, MENG Jianjun, XU Ruxun, et al. Research on multi-objective optimization methods of urban rail train automatic driving based on NSGA-II[J]. Electronics, 2024,13(19): 3 971–3 971.

[16] FAROQI H. Multiobjective route finding in a multimode transportation network by NSGA-II[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 2024,71:DOI:10.1186/s44147-024-00417-7.

[17] CCAR-140-R2, 运输机场运行安全管理规定(2022版)[S]. CCAR-140-R2, Safety management regulations of transport airport operations(2022 edition)[S].

[18] 张东, 张彬, 张瑞, 等. 基于熵权-TOPSIS的多能互补联供系统优化配置研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2022,50(10):136–142. ZHANG Dong, ZHANG Bin, ZHANG Rui, et al. Study of optimal allocation of multi-energy complementary cogeneration system based on entropy weight-TOPSIS[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology:Natural Science Edition, 2022,50(10):136–142.

作者简介： 黄 信 （1983—）,男,安徽六安人,博士,教授,主要从事机场基础设施与工程结构等方面的研究。E-mail: x_huang@cauc.edu.cn。