

中文引用格式: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.

英文引用格式: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.

降雪天气对机场基础设施系统韧性恢复的影响*

黄信教授, 徐平, 吴堃** 副教授

(中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号: X915.5 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1526

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600500)。

【摘要】 为量化评估降雪天气对机场基础设施系统韧性影响, 将机场基础设施系统分为物理、功能、经济和组织4个一级指标, 提出降雪天气对各二级指标的破坏强度系数, 建立机场基础设施系统韧性量化分析模型; 采用蒙特卡罗方法分析4种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。结果表明: 机场基础设施系统功能受损程度和恢复时间与降雪强度呈正相关; 小雪、中雪、大雪和暴雪天气下, 系统恢复时间分别为13、14、16和23 h; 暴雪天气下机场基础设施系统韧性相对于大、中、小雪下分别降低9.65%、17.01%和20.27%; 当破坏强度系数降低20%时, 机场基础设施系统的恢复速度从0.053%/h提升至0.061%/h, 恢复时间由12 h降低至9 h。

【关键词】 降雪天气; 机场基础设施; 系统韧性; 一级指标; 恢复时间

Influence of snowfall weather on resilience recovery of airport infrastructure system

HUANG Xin, XU Ping, WU Kun

(College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the influence of snowfall on the resilience of airport infrastructure system, the airport infrastructure system was divided into four first-level indicators, including physical system, functional system, economic system and organizational system. The damage intensity coefficient of snowfall weather to the second-level indicators was put forward, and a quantitative analysis model of airport infrastructure system resilience was established. The variation of resilience level of airport infrastructure system was simulated by the Monte Carlo Method under four different levels of snowfall. The simulation result show that the functional damage degree and recovery time of the airport infrastructure system are positively correlated with snowfall intensity. The system recovery time is 13, 14, 16 and 23 respectively under the conditions of light snow, moderate snow, heavy snow and blizzard. The resilience of the airport infrastructure system under the condition of blizzard is 9.65%, 17.01% and 20.27% lower than that under the conditions of heavy, medium and light snow, respectively. The recovery speed of the airport infrastructure system increases from 0.053%/h to 0.061%/h, and the recovery time reduces from 12 h to 9 h when the failure strength coefficient reduces by 20%.

Keywords: snowfall; airport infrastructure; system resilience; first-level indicators; recovery time

* 文章编号: 1003-3033(2024)04-0175-08; 收稿日期: 2023-12-10; 修稿日期: 2024-01-11

** 通信作者: 吴堃(1991—), 男, 安徽巢湖人, 博士, 副教授, 主要从事工程结构防灾减灾研究。E-mail: k_wu@cauc.edu.cn。

0 引言

机场基础设施是保证飞机安全运行的基础。我国气候条件复杂,尤其是北方地区和高原地区,冰雪等恶劣天气对飞行安全和航班延误造成严重隐患^[1]。降雪天气对机场基础设施的正常运行有巨大影响。韧性是系统抵御灾害的能力,基于韧性视角研究降雪天气对机场基础设施的影响,对保障机场安全运行具有重要意义。

目前,在公路、轨道及航运等领域,学者们基于韧性理念研究了系统的抗灾性能和恢复能力,主要是从网络层面提出系统的韧性评价方法和恢复策略,如伍静^[2]从复杂网络理论角度分析了海上丝绸之路航运网络的拓扑结构和港口重要度;唐少虎等^[3]采用模糊层次分析法,评估了暴雨灾害下城市轨道交通系统韧性;张雯婕等^[4]以网络平均效率度量城市轨道交通网络韧性,并提出一种新的恢复策略。在基础设施韧性评价方面,BRUNEAU等^[5-6]从工程韧性、组织韧性、经济韧性及社会韧性4个角度分析了韧性系统;毕玮等^[7]指出基础设施系统韧性研究主要集中在公路交通、能源和水资源基础设施;李瑞奇等^[8]通过建模方法开展了城市在地震灾害下韧性定量分析研究;LABAKA等^[9]考虑了核电站基础设施内部和外部因素,建立了韧性框架模型;FRANCHIN等^[10]基于基础设施网络,建立了一种地震灾害下基础设施韧性评估框架。已有韧性研究主要从基础设施网络层面分析,针对基础设施本体韧性研究较为分散。

在民航韧性评估方面,ZHOU Lei等^[11]用航班恢复时间衡量机场整体在各种恶劣天气条件下的韧性;BAO Danwen等^[12]基于历史数据建立了大型机场在突发事件下韧性的评估框架;王兴隆等^[13]基于机场航班运行情况分析了机场韧性;GUO Jiuxia等^[14]基于功能共振分析法,提出一种半定量的机场运行系统安全韧性评价的方法;李龙海等^[15]基于构建的韧性指标评估机场整体运行韧性。综上可知:在民航韧性研究方面,现有研究主要针对天气灾害对航班和机场整体的影响,而针对降雪天气对机场基础设施韧性影响的研究还较少。

鉴于此,笔者拟构建机场基础设施的韧性指标体系,提出降雪天气对各系统指标的破坏强度系数,建立机场基础设施系统的韧性量化分析模型;基于蒙特卡罗方法,研究不同等级降雪下机场基础设施系统的韧性水平变化特征;分析物理、功能、经济和

组织4个一级指标对韧性的影响,以期提升机场基础设施韧性水平,为量化分析机场基础设施韧性提供参考。

1 机场基础设施系统韧性模型

建立降雪天气下机场基础设施系统的韧性分析模型,分析模型包括机场系统模型、韧性函数模型、降雪灾害模型和恢复函数模型^[16-17]。

1.1 韧性指标体系

将机场基础设施系统定义为一级指标和二级指标2个层级指标体系,其中,一级指标包括物理系统、功能系统、经济系统和组织系统。各二级指标如下:

1) 物理系统。指降雪天气下受到影响的机场重要基础设施。根据《民用机场工程项目建设标准》(建标105—2008)中的机场基础设施分类,设定二级指标为主体设施和其他设施。主体设施即核心飞行区道面,包括跑道、停机坪、滑行道、联络道等;其他设施包括空管设施、目视助航及灯光设施、机场排水系统及机场供电设施。

2) 功能系统。指保障旅客通行效率并能够为飞机提供补给和维护的设施。其二级指标主要包括驱鸟车、行李传送车和摆渡车等保障设施、航站区路侧通行区、航站区空侧通行区。

3) 经济系统。指机场运行产生的经济效益及运维费用。在降雪天气下会因航班延误和物资使用产生直接或间接经济损失,其二级指标主要包括机场客货运盈利、除雪设备及物资。

4) 组织系统。指能够及时应对各种灾害和事件引起的内外部环境变化的系统。保障飞机进离场服务和地面保障服务效率;参考城市韧性中组织韧性,即管理网络和制度体系^[18],二级指标主要包括机场人员工作效率、场监系统,场监系统是机场灾害预警系统,通过实时监控为人员提供处理灾害的能力。

1.2 韧性函数模型

机场基础设施系统韧性水平由各一级指标的功能水平确定,系统韧性函数定义为:

$$R(t) = R(F(t)) = R(F(f_1(t), f_2(t), \dots, f_4(t))) \quad (1)$$

$$f_i(t) = f(f_{i1}(t), f_{i2}(t), \dots, f_{ij}(t), \dots, f_{im}(t)) \quad (2)$$

式中: $R(t)$ 为机场基础设施系统韧性函数; $F(t)$ 为机场基础设施系统的整体功能水平; $f_i(t)$ 为第*i*($i=1, 2, \dots, 4$)个一级指标的功能水平; $f_{ij}(t)$ 为第*i*个一级指

标的第 j ($j=1,2,\dots,m$) 个二级指标的功能水平。

机场的物理、功能、经济和组织 4 个一级指标的功能水平分别为各二级指标功能水平的平均值,见下式:

$$f_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij}(t)}{m} \quad (3)$$

式中 m 为第 i 个一级指标下的二级指标数。

机场基础设施系统的整体功能水平见下式,其中,一级指标的权重系数由民航基础设施韧性水平量化分析得到,物理系统对整体系统的功能水平权重系数 $w_1 = 0.254$,功能系统权重系数 $w_2 = 0.265$,组织系统权重系数 $w_3 = 0.238$,经济系统权重系数 $w_4 = 0.243$ ^[19]。

$$F(t) = \sum_{i=1}^4 w_i \cdot f_i(t) \quad (4)$$

式中 w_i 为一级指标的权重系数。

采用 CIMELLARO 等^[20] 提出的韧性量化方法计算机场基础设施系统韧性水平,其物理意义为图 1 中阴影部分面积占矩形面积比例,见下式:

$$R(t) = \frac{\int_{t_0}^t F(t) dt}{F(t_0) \cdot (t - t_0)} \quad (5)$$

式中 $F(t_0)$ 为初始时刻 t_0 时机场基础设施系统的功能水平,韧性曲线如图 1 所示,图中 t_1 为灾害开始时刻; t_2 为系统功能水平降至最低值时刻; t_3 为恢复到正常水平时刻; t_E 为模拟时间段结束时刻。

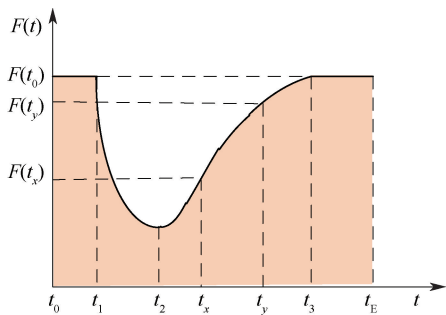


图 1 韧性曲线

Fig. 1 Resilience conceptual curve

恢复力定义为恢复阶段的系统机能累积量与总时间内系统正常运转时的机能累积量之比^[21],见下式:

$$r_b = \frac{\int_{t_2}^{t_3} F(t) dt}{\int_{t_1}^{t_E} F_s(t) dt} \quad (6)$$

式中: $F_s(t)$ 表示系统正常运转情况下的功能曲线; $F(t)$ 表示系统在灾害下的功能曲线。

灾害下系统平均恢复速度定义为单位时间内功能恢复水平,见下式:

$$v = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} = \frac{F(t_y) - F(t_x)}{t_y - t_x} \quad (7)$$

式中: v 为恢复速度; t_x 和 t_y 分别为恢复计算的起始时刻和截止时刻; $F(t_x)$ 为 t_x 时刻的功能水平; $F(t_y)$ 为 t_y 时刻的功能水平; $\Delta F(t)$ 表示时间间隔 Δt 内功能变化情况。

1.3 降雪破坏函数

不同等级降雪对机场基础设施影响方式和程度有所差别。依据中国气象局对降雪等级的划分标准,降雪等级定义见表 1。

表 1 降雪等级定义

| 降雪等级 | 降雪量/mm |
|------|------------|
| 小雪 | [0.1, 2.5) |
| 中雪 | [2.5, 5.0) |
| 大雪 | [5.0, 10) |
| 暴雪 | [10, +∞) |

为确定降雪天气下机场基础设施二级指标的破坏强度系数,向民航从业人员发放降雪天气对机场基础设施韧性影响的调查问卷,问卷采用李克特 5 级量表方法。根据各二级指标在不同降雪等级下的影响程度评价和频数结果,确定不同等级降雪对各系统二级指标的破坏强度系数,见表 2。其中, $U(x, y)$ 代表取值为 $[x, y]$ 的均匀分布; $B(1, p)$ 表示概率为 p 的 0~1 分布。

表 2 降雪天气对各二级指标的破坏强度系数

Tab. 2 Damage intensity coefficient of snow weather on second-level indicators

| 一级指标 | 二级指标 | 小雪 | 中雪 | 大雪 | 暴雪 |
|------|-----------|--------------|----------------|----------------|--------------|
| 物理 | 核心飞行区道面 | $U(0, 0.25)$ | $U(0.25, 0.5)$ | $U(0.75, 1)$ | $U(0.75, 1)$ |
| | 空管设施 | $U(0, 0.25)$ | $U(0.25, 0.5)$ | $U(0.5, 0.75)$ | $U(0.75, 1)$ |
| | 目视助航及灯光设施 | $U(0, 0.25)$ | $U(0.25, 0.5)$ | $U(0.5, 0.75)$ | $U(0.75, 1)$ |
| | 机场排水系统 | $B(1, 0.26)$ | $B(1, 0.42)$ | $B(1, 0.48)$ | $B(1, 0.72)$ |
| | 机场供电设施 | $B(1, 0.28)$ | $B(1, 0.38)$ | $B(1, 0.52)$ | $B(1, 0.7)$ |

续表 2

| 一级指标 | 二级指标 | 小雪 | 中雪 | 大雪 | 暴雪 |
|------|----------|-------------|---------------|---------------|-------------|
| 功能 | 保障设施 | $U(0,0.25)$ | $U(0.25,0.5)$ | $U(0.5,0.75)$ | $U(0.75,1)$ |
| | 航站区陆侧通行区 | $U(0,0.25)$ | $U(0.25,0.5)$ | $U(0.5,0.75)$ | $U(0.75,1)$ |
| | 航站区空侧通行区 | $U(0,0.25)$ | $U(0.25,0.5)$ | $U(0.5,0.75)$ | $U(0.75,1)$ |
| 经济 | 机场盈利 | $U(0,0.25)$ | $U(0.25,0.5)$ | $U(0.5,0.75)$ | $U(0.75,1)$ |
| | 除雪设备及物资 | $B(1,0.28)$ | $B(1,0.46)$ | $B(1,0.7)$ | $B(1,0.88)$ |
| 组织 | 机场人员工作效率 | $U(0,0.25)$ | $U(0.25,0.5)$ | $U(0.5,0.75)$ | $U(0.75,1)$ |
| | 场监系统 | $B(1,0.28)$ | $B(1,0.4)$ | $B(1,0.6)$ | $B(1,0.78)$ |

定义降雪灾害事件 e^N 二级指标功能的累计破坏强度函数 $D_{ij}(t)$ 与 $d_{ij}(t)$ 关系,见下式:

$$D_{ij}(t) = \int_{t_1}^t d_{ij}(t) dt \quad (8)$$

式中: $D_{ij}(t)$ 为 e^N 从灾害发生时刻 t_1 到时刻 t 对机场基础设施第 i 个一级指标下的第 j 个二级指标的累积破坏强度函数; $d_{ij}(t)$ 为在时刻 t 降雪灾害对机场基础设施第 i 个一级指标的第 j 个二级指标的破坏强度函数。

考虑降雪演进过程特征为降雪、积雪和融雪 3 个阶段,选取双指数信号函数作为降雪的累积灾害能量表征函数,构建 e^N 对二级指标的破坏强度函数^[8]:

$$d_{ij}(t|e^N) = c_{ij}^N \cdot \sigma(t) \cdot f_{ij}(t_0) \quad (9)$$

式中: $N = 1, 2, 3, 4$ 分别对应 4 种不同降雪等级; c_{ij}^N 为破坏强度系数,取值见表 2; $\sigma(t)$ 为累积灾害能量函数。由于累积破坏强度函数 $D(t)$ 的取值范围为 $[0, 1]$, 所以,降雪事件的累积灾害能量函数如下:

$$\sigma(t) = \begin{cases} \exp(2t - 12), & 0 < t < 6 \\ 1, & t = 6 \\ \exp(-2t + 12), & t > 6 \end{cases} \quad (10)$$

1.4 恢复函数模型

暴雪灾害发生后,为缩短航班起飞延迟时间,减少机场基础设施系统损失,应及时采取恢复措施,因此,定义 t 时刻机场基础设施系统功能恢复函数为 $B(t)$ 满足下式:

$$F(t) = F(t_1) - D(t) + \int_{t_1}^t B(t) dt \quad (11)$$

式中 $B(t)$ 为机场基础设施系统功能恢复函数。

机场基础设施系统功能恢复函数 $B(t)$ 受系统功能水平影响,则 $B(t)$ 可表示为:

$$B(t) = B(f_1(t), f_2(t), \dots, f_n(t)) \quad (12)$$

4 个一级指标之间的功能水平恢复相互依赖,物理系统是机场的核心设施,受损后修复依赖于辅

助设施和工作人员,涉及到功能和组织系统功能水平;功能系统主要考虑保障设施的功能和航站区的通行效率,依赖于物理和组织系统;由于降雪可能造成航班延误,除雪也会消耗设备及物资,使得经济系统受损较大,其恢复依赖于其他 3 个系统;组织系统与人员和设备的工作效率有关,考虑其恢复依赖于经济系统。因此,将各一级指标功能恢复函数定义如下:

$$B_1(t) = r_1 \cdot \frac{f_2(t-1) \cdot f_4(t-1)}{f_2(t_0) \cdot f_4(t_0)} \cdot f_1(t_0) \quad (13)$$

$$B_2(t) = r_2 \cdot \frac{f_1(t-1) \cdot f_4(t-1)}{f_1(t_0) \cdot f_4(t_0)} \cdot f_2(t_0) \quad (14)$$

$$B_3(t) = r_3 \cdot \frac{f_1(t-1) \cdot f_2(t-1) \cdot f_4(t-1)}{f_1(t_0) \cdot f_2(t_0) \cdot f_4(t_0)} \cdot f_2(t_0) \quad (15)$$

$$B_4(t) = r_4 \cdot \frac{f_3(t-1)}{f_3(t_0)} \cdot f_4(t_0) \quad (16)$$

式中 $r_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为各一级指标的功能恢复系数,将机场基础设施系统视为一个整体,考虑物理系统恢复效果最为直接,故设定各系统的功能恢复系数为 $r_1 = 0.3, r_2 = 0.2, r_3 = 0.1, r_4 = 0.4$ 。

2 降雪对设施系统韧性的影响

为分析降雪天气对机场基础设施韧性恢复的影响,设定研究时间为 40 h,初始时刻 $t_0 = 0$,降雪灾害发生时间为 $t_1 = 1$,对该机场基础设施系统功能水平函数 $F(t)$ 、各系统功能水平函数 $f_i(t)$ 、二级指标功能水平函数 $f_{ij}(t)$ 的取值归一化处理,取值范围为 $[0, 1]$, $F(t_0) = 1, f_i(t_0) = 1, f_{ij}(t_0) = 1$ 。

由于机场基础设施二级指标的破坏强度系数服从均匀概率分布和 0-1 概率分布,每次模拟计算结果具有一定随机性,故采用蒙特卡罗方法统计模拟,针对小雪、中雪、大雪和暴雪 4 种等级降雪情景进行 10 000 次模拟计算,分析得到 4 种等级降雪下的机场基础设施的功能水平和韧性水平。

2.1 机场基础设施功能水平变化

为分析机场基础设施一级指标在不同降雪等级下的功能水平变化情况,将 10 000 次模拟结果求均

值得到各一级指标及整体系统的功能水平变化曲线,如图 2 所示。

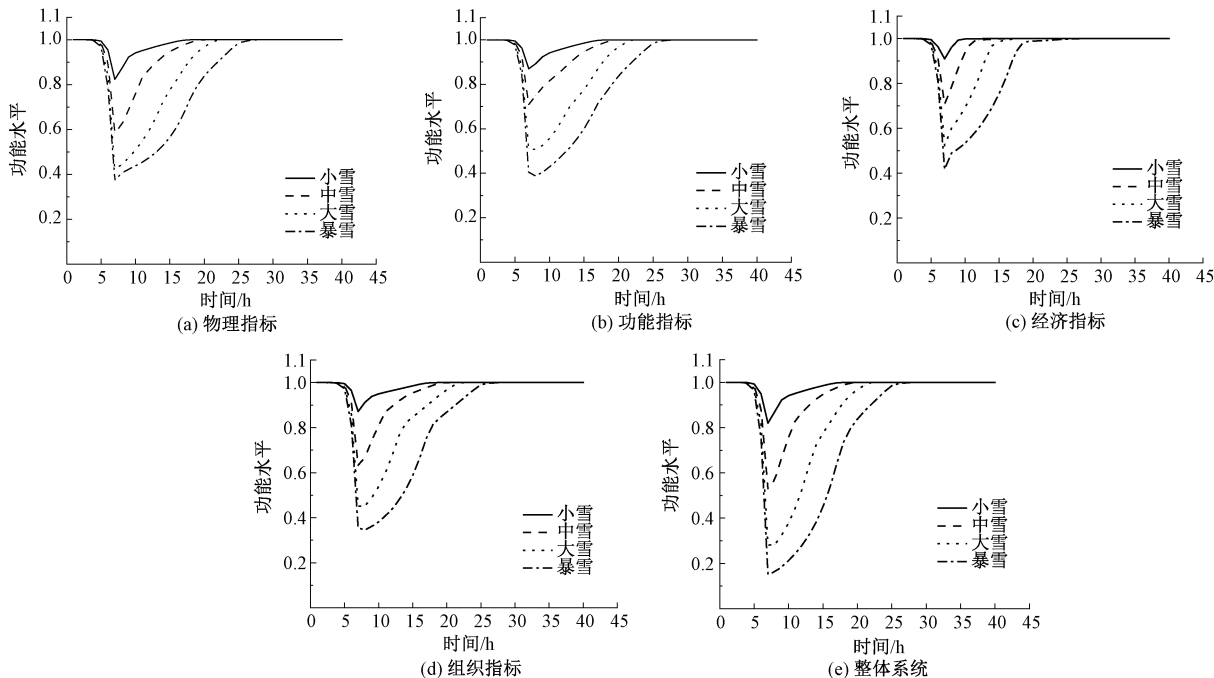


图 2 机场基础设施系统功能水平变化

Fig. 2 Changes in functional level of airport infrastructure systems

各一级指标受到降雪灾害后,功能水平逐渐降低至最低值,随后在互相影响的恢复机制下恢复到灾前正常水平,最低功能水平及恢复时间见表 3。

表 3 降雪天气下机场基础设施最低功能水平及恢复时间

Tab. 3 Minimum functional level and recovery time of airport infrastructure under snowfall

| 一级指标 | 最低功能水平 | | | | 恢复时间/h | | | |
|------|--------|-------|-------|-------|--------|----|----|----|
| | 小雪 | 中雪 | 大雪 | 暴雪 | 小雪 | 中雪 | 大雪 | 暴雪 |
| 物理 | 0.823 | 0.587 | 0.426 | 0.374 | 13 | 14 | 16 | 23 |
| 功能 | 0.869 | 0.709 | 0.507 | 0.388 | 13 | 14 | 15 | 22 |
| 经济 | 0.909 | 0.708 | 0.523 | 0.418 | 9 | 11 | 13 | 23 |
| 组织 | 0.871 | 0.633 | 0.451 | 0.346 | 13 | 14 | 16 | 22 |
| 整体 | 0.819 | 0.531 | 0.281 | 0.153 | 13 | 14 | 16 | 23 |

由图 2 和表 3 可知:随着降雪强度增加,机场基础设施系统的功能水平逐渐降低,恢复时间逐渐增加,说明机场基础设施系统功能受损程度和恢复时间与降雪强度呈正相关,如小雪、中雪、大雪和暴雪下物理系统功能最低水平分别为 0.823、0.587、0.426 和 0.374,功能水平降低幅值为 28.7%、27.4%和 12.0%,可以看出,相对大雪至暴雪而言,小雪至中雪、中雪至大雪的过程中系统功能水平降低更为明显;在小雪、中雪、大雪和暴雪下物理系统

恢复时间分别为 13、14、15 和 22 h,增加幅值为 7.7%、7.1%和 46.7%,说明相对小雪至中雪、中雪至大雪的过程,大雪至暴雪恢复时间明显增加。

由图 2e 可知:小雪、中雪、大雪和暴雪下,整体系统功能最低水平分别为 0.819、0.531、0.281 和 0.153,恢复时间分别为 13、14、16 和 23 h。

不同降雪等级下,由于降雪强度不同,各二级指标的破坏强度系数不同,各一级指标受影响程度不同。在小雪和暴雪天气下,各一级指标对机场基础设施功能影响程度由大至小分别为物理、组织、功能和经济;在暴雪天气下,各一级指标对机场基础设施功能影响程度由大至小分别为组织、物理、功能和经济。说明降雪天气下,相对功能和经济一级指标而言,物理和组织一级指标对机场基础设施韧性影响更大。

同一降雪等级下,各一级指标受破坏强度不同,并且在恢复过程中各一级指标会相互影响,各一级指标受影响程度也存在差异。例如:在暴雪天气下,组织、物理、功能和经济功能受损程度大小分别为 0.654、0.626、0.612 和 0.582,恢复时间均大于 22 h,说明在后续恢复措施中,在有限恢复资源条件

下,应优先考虑组织系统和物理系统的恢复。

2.2 机场基础设施韧性分析

机场基础设施系统韧性水平在不同降雪等级下模拟结果如图3和图4所示,其中,累计密度是韧性水平的累积频数与总模拟次数的比值。

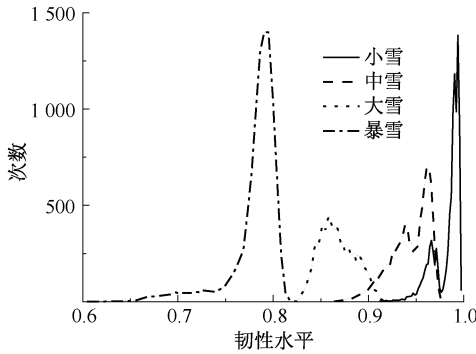


图3 机场基础设施系统韧性水平

Fig. 3 Resilience level of airport infrastructure system

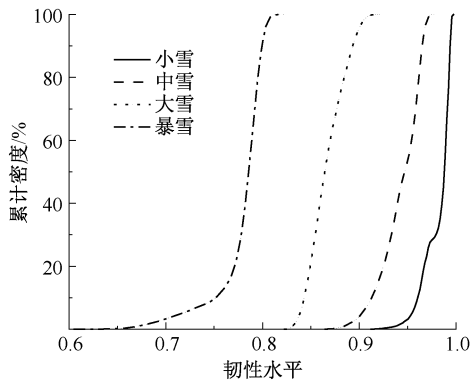


图4 机场基础设施系统韧性水平累计密度曲线

Fig. 4 Cumulative density curve of resilience level of airport infrastructure system

由图3和图4可知:小雪天气下,机场基础设施系统韧性平均值为0.9839,最大值为0.9992,最小值为0.9121,韧性水平值超过0.9661的概率为81.45%;中雪天气下,机场基础设施系统的韧性平均值为0.9453,最大值为0.9794,最小值为0.8648,韧性水平值超过0.9244的概率为80.56%。可以看出,小雪和中雪下机场基础设施系统仍保持较好的韧性水平。大雪天气下,机场基础设施系统的韧性平均值为0.8683,最大值为0.9227,最小值为0.8229,韧性水平值超过0.8489的概率为81.01%,可见:大雪天气对机场基础设施韧性功能影响明显。暴雪天气下机场基础设施系统的韧性平均值为0.7845,最大值为0.826,最小值为0.6054,韧性水平值超过0.7684的概率为82.49%,说明暴雪天气对机场基础设施

系统的韧性影响较大。

综上可知:暴雪天气下机场基础设施系统韧性受损程度显著,相对大雪、中雪和小雪天气而言,其韧性水平分别降低9.65%、17.01%和20.27%。

2.3 机场基础设施韧性提升分析

考虑优化除雪时间和经济成本等措施,将二级指标在暴雪天气下的破坏强度系数分别降低5%、10%和20%,对功能水平变化情况进行10000次模拟,分析优化措施对机场基础设施韧性提升效果,结果如图5所示,图中破坏强度系数为0%时表示未采取任何优化措施。

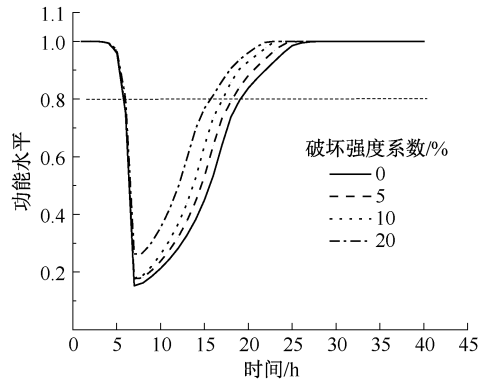


图5 不同破坏强度下机场基础设施系统功能水平曲线

Fig. 5 Functional level curve of airport infrastructure system under different failure intensity

由图5可知:当考虑优化措施将破坏强度系数分别降低0、5%、10%和20%后,暴雪天气下机场基础设施系统功能水平由最低水平恢复到灾前80%水平所用时间分别为12、11、10和9h,说明通过优化恢复措施可以缩短机场基础设施系统功能恢复时间。不同破坏强度下机场基础设施系统恢复速度和恢复力见表4。

表4 不同破坏强度系数下机场基础设施系统恢复情况

Tab. 4 Recovery of airport infrastructure system under different damage intensities

| 破坏强度系数降低工况/% | 0 | 5 | 10 | 20 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| $V/(% \cdot h^{-1})$ | 0.053 | 0.056 | 0.062 | 0.061 |
| r_b | 0.352 | 0.368 | 0.374 | 0.432 |

由表4可知:破坏强度系数降低5%、10%和20%后,平均恢复速度 v 分别为0.056、0.062和0.061,相对于破坏强度系数未降低而言,恢复速度增幅为5.7%、17.0%和15.1%,说明破坏强度降低10%后,恢复效果最佳;同样,破坏强度系数降低5%、10%和20%后,恢复力 r_b 有较明显的提升,分别

为0.368、0.374和0.432,相对于未降低破坏强度系数而言,恢复力增幅为4.5%、6.3%和22.7%,说明从韧性角度考虑,破坏强度系数降低20%时恢复力最高。

3 结 论

1) 暴雪天气下机场基础设施系统韧性受损程度显著,机场基础设施系统功能受损程度和恢复时间都与降雪强度呈正相关,小雪、中雪、大雪和暴雪下机场基础设施的恢复时间分别为13、14、16和23 h;相对大雪、中雪和小雪天气而言,暴雪下机场韧性水平分别降低9.65%、17.01%和20.27%。

2) 物理系统、功能系统、经济系统和组织系统

对机场基础设施的韧性影响存在差异,如暴雪下物理、功能、经济和组织系统对应的功能水平分别为0.374、0.388、0.418和0.346;机场基础设施系统在同等级降雪下,物理系统和组织系统受损程度大于功能系统和经济系统,说明降雪天气下应优先对物理系统和组织系统采取恢复措施。

3) 考虑优化除雪时间等措施,可以提升暴雪天气下机场基础设施系统韧性的恢复速度,如当破坏强度系数降低20%可使系统恢复速度从0.053%/h提升至0.061%/h,恢复力从0.352提升至0.432,对应恢复时间由12 h降低至9 h。文中重点研究了降雪天气下机场韧性变化特征,未来在各指标下具体恢复措施方面,将进行更深入地探索。

参 考 文 献

- [1] 陈斌,焦琳青,杨亚磊,等. 复杂多约束条件下航班除冰延误机理及资源优化配置[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1069-1079.
CHEN Bin, JAO Linqing, YANG Yalei, et al. Flight deicing delay mechanism and resource optimization configuration under complex and multiple constraints[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(5): 1069-1079.
- [2] 伍静,张笛,万程鹏. 基于复杂网络的海上丝绸之路沿线港口地位评价[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(3): 101-108.
WU Jing, ZHANG Di, WAN Chengpeng. Status evaluation of ports along the "Maritime Silk Road" based on complex network[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(3): 101-108.
- [3] 唐少虎,朱伟,程光,等. 暴雨内涝下城市道路交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 143-150.
TANG Shaohu, ZHU Wei, CHENG Guang, et al. Safety resilience assessment of urban road traffic system under rainstorm waterlogging[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 143-150.
- [4] 张雯婕,胡军红,闻成维,等. 考虑网络韧性的城市轨道交通故障恢复研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 179-186.
ZHANG Wenjie, HU Junhong, WEN Chengwei, et al. Research on urban rail failure recovery considering network resilience[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 179-186.
- [5] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [6] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(1): 41-62.
- [7] 毕玮,汤育春,冒婷婷,等. 城市基础设施系统韧性管理综述[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 14-28.
BI Wei, TANG Yuchun, MAO Tingting, et al. Review on resilience management of urban infrastructure system[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 14-28.
- [8] 李瑞奇,黄弘,周睿. 基于韧性曲线的城市安全韧性建模[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2020, 60(1): 1-8.
LI Ruiqi, HUANG Hong, ZHOU Rui. Resilience curve modelling of urban safety resilience[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2020, 60(1): 1-8.
- [9] LABAKA L, HERNANTES J, SARRIEGI J M. Resilience framework for critical infrastructures: an empirical study in a nuclear plant[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 141: 92-105.
- [10] FRANCHIN P, CAVALIERI F. Probabilistic assessment of civil infrastructure resilience to earthquakes[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015, 30(7): 583-600.

- [11] ZHOU Lei, CHEN Zhenhua. Measuring the performance of airport resilience to severe weather events[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 83(6): 1-19.
- [12] BAO Danwen, ZHANG Xiaoling. Measurement methods and influencing mechanisms for the resilience of large airports under emergency events[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2018, 14(10): 855-880.
- [13] 王兴隆,赵俊妮,王进. 恶劣天气下机场离场航班运行韧性评估及恢复[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(1): 110-121.
WANG Xinglong, ZHAO Junni, WANG Jin. Resilience assessment and recovery of airport departure flights under severe weather[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics*, 2024, 50(1): 110-121.
- [14] GUO Jiuxia, LI Hongyi, YANG Changqi. A semi-quantitative method of safety resilience assessment for airport operation system based on FRAM model[C]. *2022 8th International Symposium on System Security, Safety, and Reliability (ISSSR)*, 2022: 6-13.
- [15] 李龙海, 杨力源, 常鑫, 等. 基于贝叶斯 BWM-VIKOR 法的机场运行韧性评估方法[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(25): 11 014-11 020.
LI Longhai, YANG Liyuan, CHANG Xin, et al. Airport operation resilience assessment method based on Bayesian BWM-VIKOR Method [J]. *Science Technology and Engineering*. 2023, 23(25): 11 014-11 020.
- [16] 许慧, 李杨, 邓宁辉, 等. 城市复杂公共空间系统韧性建模研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(7): 1 964-1 978.
XU Hui, LI Yang, DENG Ninghui, et al. Resilience modeling of complex urban public space system[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2022, 42(7): 1 964-1 978.
- [17] 李杨. 城市复杂公共空间韧性评估模型研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2021.
LI Yang. Resilience assessment model of complex urban public spaces[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [18] 石龙宇, 郑巧雅, 杨萌, 等. 城市韧性概念、影响因素及其评估研究进展[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 6 016-6 029.
SHI Longyu, ZHENG Qiaoya, YANG Meng, et al. A review of definitions, influence factors and assessment of urban resilience[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 6 016-6 029.
- [19] 谭成松. 自然灾害下民航基础设施韧性功能恢复模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2023.
TAN Chengsong. Research on resilience recovery model of civil aviation infrastructure under natural disasters [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2023.
- [20] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3 639-3 649.
- [21] 陈长坤, 何凡, 赵冬月, 等. 基于系统机能曲线的城市道路公共交通系统韧性评估方法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2022, 62(6): 1 016-1 022.
CHENG Changkun, HE Fan, ZHAO Dongyue, et al. Urban public transport system resilience evaluation based on a system function curve[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2022, 62(6): 1 016-1 022.

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: huangxin1395602@163.com。