文章编号:1673-0291(2026)01-0129-11 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250110

恶劣天气下进场航班运行韧性评估与提升方法

冯小荣[a,b],张 帅[a],王兴隆[a,b]
(中国民航大学a.空中交通管理学院,b.民航飞联网重点实验室,天津 300300)

摘 要:针对恶劣天气引发的进场航班延误与运行效率下降问题,建立了进场航班运行韧性量化评估指标体系,提出一种基于滚动时域控制(Receding Horizon Control,RHC)框架的贪心算法(Greedy Algorithm,GA)以优化受天气影响的进场航班排序,从而在运行韧性恢复阶段实现关键指标的快速提升,增强整体运行韧性.首先,基于进场航班运行性能的动态演化规律(稳定-破坏-恢复-新稳定4阶段),选取恶劣天气下进场航班延误时间,航班正常率与航班着陆架次作为基础指标,并结合实际运行特点,构建融合系统余量与平均恢复性能补偿的进场航班运行韧性综合度量.其次,根据航班机型及延误等待时间,在兼顾经济性与公平性原则下,建立空中等待代价函数.再次,采用RHC+GA方法,通过时域滚动机制分解动态优化问题规模,以最小化航班空中等待代价为目标,运用贪心算法求解局部最优,据此对受恶劣天气影响的航班进行重新排序.最后,以天津滨海国际机场雷暴降雨场景为例进行验证.研究结果表明:在实际调度顺序下,进场航班运行韧性为1.529;采用RHC+GA方法重新排序后,运行韧性提升至2.791,提升幅度达82.5%,平均每架航班延误时间减少6 min,有效加速了运行性能的恢复.

关键词:航空运输;恶劣天气;运行韧性;韧性评估;韧性恢复
中图分类号:V355;U8 **文献标志码**:A

Operational resilience assessment and enhancement methods for approach flights under severe weather conditions

FENG Xiaorong[a,b], *ZHANG Shuai*[a], *WANG Xinglong*[a,b]
(a.School of Air Traffic Management, b. Key Laboratory of Internet of Aircraft, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To address the problem of approach flight delays and reduced operational efficiency caused by severe weather, a quantitative assessment framework for operational resilience in arrival operations is developed. A Greedy Algorithm (GA) embedded within a Receding Horizon Control (RHC) framework is proposed to optimize the sequencing of weather-affected approach flights, enabling rapid improvement of key performance indicators during the resilience recovery phase and enhancing overall operational resilience. First, based on the dynamic evolution pattern of arrival flight performance, comprising four stages: stable, disrupted, recovery, and new stable, delay duration, on-time perfor-

收稿日期:2025-07-17;**修回日期**:2025-10-15
基金项目:国家重点研发计划(2024YFB4303801);国家自然科学基金(62173332);中央高校基本科研业务费专项基金(3122023050,3122020051)
Foundation items: National Key R&D Plan (2024YFB4303801); National Natural Science Foundation of China (62173332); Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122023050,3122020051)
第一作者:冯小荣(1980—),男,陕西韩城人,副教授,硕士.研究方向为智能化空中交通管理.**email**:xrfeng@cauc.edu.cn.

引用格式:冯小荣,张帅,王兴隆.恶劣天气下进场航班运行韧性评估与提升方法[J].北京交通大学学报,2026,50(1):129-139.
FENG Xiaorong, ZHANG Shuai, WANG Xinglong. Operational resilience assessment and enhancement methods for approach flights under severe weather conditions[J].Journal of Beijing Jiaotong University,2026,50(1):129-139.(in Chinese)

mance, and landing throughput under severe weather conditions are selected as fundamental indicators. Incorporating actual operational characteristics, a comprehensive resilience metric is constructed that integrates system redundancy and average recovery performance compensation. Second, an airborne holding cost function is formulated based on aircraft type and delay duration, balancing economic efficiency and fairness principles. Third, the RHC+GA approach decomposes the dynamic optimization problem through a rolling time-domain mechanism. Aiming to minimize flight airborne holding costs, the greedy algorithm yields locally optimal solutions and thereby generates an improved flight sequence under adverse weather conditions. Finally, using a thunderstorm scenario at Tianjin Binhai International Airport for verification. Results show that under the actual scheduling sequence, the operational resilience of arriving flights is 1.529. After reordering with the RHC+GA method, resilience increases to 2.791, an 82.5% improvement, while the average delay per aircraft is reduced by 6 minutes, significantly accelerating operational performance recovery.

Keywords: air transportation; severe weather; operational resilience; resilience assessment; resilience recovery

2023年中国民航全年运输总周转量达1 188.3亿吨公里,旅客运输量突破6.2亿人次,货邮运输量完成735.4万吨,标志着行业进入稳健恢复阶段[1].全国客运航空公司全年执行航班467.17万架次,其中正常航班410.19万班次,航班正常率维持在87.80%的水平.纵向对比2019年至2023年航空安全网络事故数据库记录,天气原因导致的航班异常平均占比58.18%,共发生8起航空安全事故,其中1起(占比12.5%)与气象条件直接相关.恶劣天气显著降低机场起降容量,导致航班动态调整频次增加,已成为制约航空运输效率提升的关键要素.

韧性概念在文献[2]中首次提出,并将其应用在生态学领域中,以韧性视角观测生态系统;文献[3]首次将韧性应用到交通运输系统中,从适应性、安全性、机动性、恢复能力4个维度,提供提高系统韧性的措施;文献[4]提出量化系统韧性的通用指标和公式,将韧性分为稳定的初始阶段、中断阶段和稳定的恢复阶段,根据韧性公式制定了成本和恢复时间指标;文献[5]引入了机场起飞延误、全系统延误(System-Wide Delay,SWD)、准点率和一般韧性指数(General Resilience Index,GRI)量化航空运输系统的性能,研究当机场发生扰动时航空运输网络的运行韧性;文献[6]提出扇区网络韧性的概念,对比分析不同恢复策略下系统的鲁棒性、破坏速率、性能损失等,制定空域扇区网络在外界干扰下的最佳恢复策略;文献[7]构建了机场、航路、扇区3层网络,提出了多层网络的静态韧性测度指标,通过多维度的攻击策略以分析网络静态韧性;文献[8]将韧性的概念引入离港航班的运行中,对系统在恶劣天气条件下的韧性变化进行评估;文献[9]针对降雪天气对机场基础设施的系统韧性影响进行了量化评估,提出了物理、功能、经济和组织4个一级指标评估系统韧性水平变化.现有交通韧性的研究大多基于复杂网络理论,通过网络量化交通系统的韧性[10-12],采取逐个移除交通网络中的节点模拟突发事件场景,并通过恢复节点来模拟突发事件逐渐消散和系统恢复场景,使用连通性和可达性等指标描述韧性的变化过程.

近些年,韧性的研究先后经历了概念框架、指标体系、定量评价3个阶段,目前的研究聚焦于韧性提升.文献[13]针对航路网络修复优化问题,考虑航班运行经济成本,提出了一种恶劣天气下航路网络修复优化策略,并对航路网修复效果进行评估,以最小的修复成本使所有受影响的航班都恢复正常运行;文献[14]为提升暴雨灾害下机场基础设施网络抗灾韧性,建立机场基础设施网络拓扑模型,分析机场基础设施复杂网络特性,对网络中的关键节点进行识别;文献[15]针对烟草物流配送系统在遭遇突发事件时,系统抗干扰和自修复能力不足等问题,构建烟草配送系统恢复优化模型,提升烟草物流配送系统韧性值;文献[16]针对列车运行图冗余时间布局影响列车运行图弹性的问题,在运行图冗余时间总量不变的前提下,调整运行图关键位置和关键列车的冗余时间,有效降低列车晚点时间,提升运行图弹性;文献[17]提出改进的中介中心性算法识别机场现场运营中的漏洞,协助制定应急响应策略,增强机动区域网络在外部干扰期间的安全韧性;文献[18]评估多式联运网络的韧性,考虑一些链路的容量上限,提出了一种基于路由的链路恢复序列,采用功能链路容量扩大的措施补充恢复顺序;文献[19]

将机场消防系统的韧性特征分为稳定性能力、抵抗能力、恢复能力和适应性能力4个维度,提出一种改进的复合权重计算框架,该框架在权重组合过程中引入遗传算法(Genetic Algorithm,GA),从而使排名结果反映顺序和强度信息;文献[20]提出了一种识别拥堵路网中关键路段的方法和基于优化顺序的韧性优化策略,并采用韧性的方法识别关键路段,结合复杂网络方法或分段韧性的比较,证明所提出的韧性优化策略可以显著增强网络韧性.

当前民航系统韧性研究多集中于机场网络韧性优化[4-5,20-21],学者基于韧性强壮特征的指标,选取韧性的多个形成阶段和表现特征着手研究,如网络韧性的稳健性、冗余性、鲁棒性、恢复性等.本文基于运行韧性强度特征的指标,聚焦单个机场,通过灾害事件持续时间内进场航班运行性能的变化情况度量进场航班运行韧性,构建进场航班运行韧性评估模型;整合机型配置及航班动态数据进行精细化分析,针对恶劣天气消散后积压航班疏解问题,提出滚动时域贪心优化算法:将待降航班视为动态系统,通过计算最大起飞重量衍生的个体延误代价,构建系统总代价函数,采用贪心算法实时求解最小代价的航班排序方案.该确定性算法可快速缓解空域拥堵压力,通过航班的排序调度,快速恢复进场航班运行性能,提升进场航班运行韧性.

1　恶劣天气下进场航班运行韧性评估

1.1　进场航班运行指标

恶劣天气严重影响进场航班运行,如雾霾、沙尘、降雪降低机场能见度,雷暴影响终端区进场和进近航路,同时会带来水平和垂直风切变,导致大面积航班延误和不安全事件发生.进场航班运行是一个动态的过程,其性能受到外界因素的影响随时间的变化而变化,通过收集分析恶劣天气持续时间内进场航班运行性能的变化情况,评估进场航班运行韧性,改善进场航班运行效率至关重要.选取进场航班运行指标共3个.

指标1:进场航班延误时间.给定时间段$[t_1,t_2]$内航班i的进场延误t^i_{d,t_1,t_2}为

$$t^i_{\mathrm{d},t_1,t_2}=\begin{cases}t^i_{\mathrm{a}}-t^i_{\mathrm{s}} & t^i_{\mathrm{s}}\geqslant t_1,\ t^i_{\mathrm{a}}\leqslant t_2\\ t^i_{\mathrm{a}}-t_1 & t^i_{\mathrm{s}}\leqslant t_1,\ t^i_{\mathrm{a}}\leqslant t_2\\ t_2-t^i_{\mathrm{s}} & t^i_{\mathrm{s}}\geqslant t_1,\ t^i_{\mathrm{a}}\geqslant t_2\\ t_2-t_1 & t^i_{\mathrm{s}}\leqslant t_1,\ t^i_{\mathrm{a}}\geqslant t_2\\ 0 & \text{其他}\end{cases}\tag{1}$$

式中:t^i_{a}为该航班的实际着陆时间;t^i_{s}为该航班的计划着陆时间;t^i_{d,t_1,t_2}为该航班的延误时间,$t^i_{\mathrm{a}}\geqslant t^i_{\mathrm{s}}$.因此,在给定时间段$[t_1,t_2]$的进场航班总延误表达式为

$$T_{\mathrm{d}}=\sum_{i\in F}t^i_{\mathrm{d},t_1,t_2}\tag{2}$$

式中,F为机场进场航班的集合.

指标2:进场航班正常率(Arrival flight normalization rate,AFN).在最新的民航航班正常统计办法中指出,正常航班是指不晚于计划到港时间后15 min到港的航班,其表达式为

$$\mathrm{AFN}_{t_1,t_2}=\frac{N_{\mathrm{ontime},t_1,t_2}}{N_{\mathrm{schedule},t_1,t_2}}\tag{3}$$

式中:$N_{\mathrm{schedule},t_1,t_2}$代表$[t_1,t_2]$时间段内的计划着陆的航班总数;$N_{\mathrm{ontime},t_1,t_2}$代表实际着陆时间在$[t_1,t_2]$且其进场延误小于15 min的航班总数.

指标3:航班着陆架次(Number of Flight Landing,NFL).与延误时间和正常率相结合可以更好地反映进场航班运行性能,其表达式为

$$\mathrm{NFL}_{t_1,t_2}=\sum_{f\in F}n^i\tag{4}$$

$$n^i=\begin{cases}1 & t^i_a\in[t_1,t_2]\\ 0 & t^i_a\notin[t_1,t_2]\end{cases}\tag{5}$$

式中:NFL_{t_1,t_2}代表$[t_1,t_2]$时间段内着陆的航班架次.

1.2　进场航班运行性能

系统运行性能(System Operating Performance,SOP)一般指系统运行中的某一项属性,其可以反映整个系统运行的状态,目前许多研究认为恶劣天气下系统运行性能的变化可分为稳定、破坏、恢复、新稳定4个阶段[4-5,20-21],如图1所示.

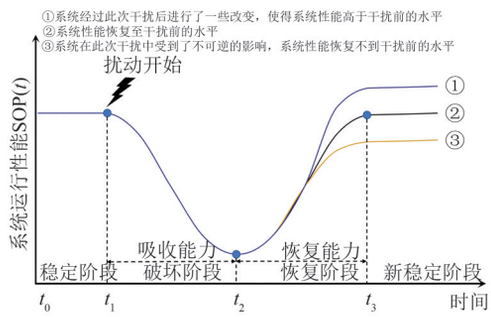


图1　恶劣天气下系统运行性能变化

Fig. 1　Changes in system operating performance under severe weather conditions

恶劣天气影响本场航班运行时,航班着陆架次反映的运行情况最直观,以航班着陆架次代表SOP,通过恶劣天气下航班着陆架次的变化情况反映出进场航班运行性能,度量进场航班运行韧性.恶劣天气下进场航班运行性能变化通常如图2所

示.由图2可知:航班着陆架次受时间的影响,早晚的航班量较少;当航班运行受到恶劣天气影响时,也会出现图1中4个阶段的变化;本场受到恶劣天气影响前,气象部门发布相关报告,签派及管制部门会进行流量控制,进场航班运行性能便开始下降;当恶劣天气影响到本场时,航班着陆受到限制,航班会盘旋等待或备降其他机场,运行性能进一步降低;当恶劣天气消失,运行性能开始恢复,等待的航班、被流量控制的航班及备降返回的航班需要着陆,恢复过程中存在时刻t_a,此时航班着陆架次达到峰值,峰值性能与正常性能的差值称为系统余量;当空域中等待的航班着陆完后,进场的航班数量恢复至正常水平.

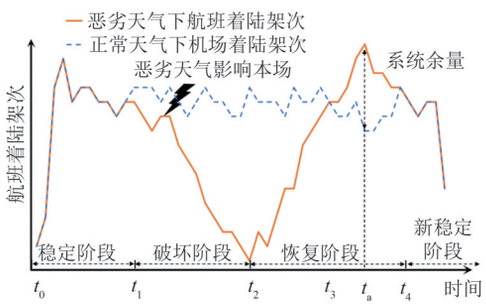


图2 恶劣天气下进场航班运行性能变化

Fig.2 Changes in airport performance in severe weather

1.3 进场航班运行韧性

为评估系统韧性,研究者经常会结合所研究问题定义综合指标度量系统韧性.文献[22]提出了一种综合韧性度量(Resilience Metric,GR),通过反映灾害事件持续时间内系统运行性能的变化情况度量韧性.文献[5]提出了通用韧性指数(General Resilience Index,GRI)用于分析机场网络韧性.进场航班运行韧性是反映一个时间段内,航班面对不确定性扰动时系统自身"抵抗冲击、维持基本运行、快速恢复至稳定状态,甚至优化调整"的综合能力,是航班进场过程中运行情况的综合指数.在恢复阶段,运行性能会先高于正常水平后恢复至影响前的水平,这段时间内的性能变化是不可忽略的,其涉及进场航班运行能否快速缓解恶劣天气带来的影响.为了更准确地刻画恶劣天气下进场航班运行性能的变化情况,对相关指标进行定义,共3条.

定义1:系统余量(System Margin,STM).机场正常运行时,航班到达量不足以达到系统性能的上限,恶劣天气导致机场上空航班拥堵,当恶劣天气消失,航班量会达到机场进场航班运行性能的上限.上限越高,短时间内着陆的航班量就越多,消除恶劣天气带来影响的能力就越强,其表达式为

$$\mathrm{STM}=\mathrm{SOP}_{\max}-\mathrm{SOP}(t_1) \tag{6}$$

定义2:恢复性能补偿$\mathrm{PC}_{\mathrm{RP}}$.在恢复阶段,为快速消除扰动对系统性能的影响,系统性能高于正常性能水平的部分,其表达式为

$$\mathrm{PC}_{\mathrm{RP}}=\int_{t_3}^{t_4}\left[\mathrm{SOP}(t)-\mathrm{SOP}(t_1)\right]\mathrm{d}t \tag{7}$$

定义3:平均恢复性能补偿$\mathrm{TAPC}_{\mathrm{RP}}$.加入了恢复时间的考虑,从时间层面来衡量系统消除影响的能力,其表达式为

$$\mathrm{TAPC}_{\mathrm{RP}}=\frac{\int_{t_3}^{t_4}\left[\mathrm{SOP}(t)-\mathrm{SOP}(t_1)\right]\mathrm{d}t}{t_4-t_3} \tag{8}$$

通过上述分析,构建融合系统余量与平均恢复性能补偿的进场航班运行韧性综合度量$\mathrm{GR}_{\mathrm{AFO}}$,建立进场航班运行韧性量化体系,其表达式为

$$\mathrm{GR}_{\mathrm{AFO}}=f(R,\mathrm{RAPI}_{\mathrm{DP}},\mathrm{RAPI}_{\mathrm{RP}},\mathrm{TAPL},\mathrm{RA},\mathrm{STM})=R\times\left(\frac{\mathrm{RAPI}_{\mathrm{RP}}}{\mathrm{RAPI}_{\mathrm{DP}}}\right)\times(\mathrm{TAPL})^{-1}\times\mathrm{RA}\times\mathrm{STM} \tag{9}$$

$$R=\min\left\{\mathrm{SOP}(t)\right\}\quad t_2\leqslant t\leqslant t_4 \tag{10}$$

$$\mathrm{RAPI}_{\mathrm{RP}}=\frac{\mathrm{SOP}(t_{\mathrm{a}})-\mathrm{SOP}(t_2)}{t_{\mathrm{a}}-t_2} \tag{11}$$

$$\mathrm{RAPI}_{\mathrm{DP}}=\frac{\mathrm{SOP}(t_1)-\mathrm{SOP}(t_2)}{t_2-t_1} \tag{12}$$

$$\mathrm{RA}=\left|\frac{\mathrm{SOP}(t_4)-\mathrm{SOP}(t_2)}{\mathrm{SOP}(t_1)-\mathrm{SOP}(t_2)}\right| \tag{13}$$

$$\mathrm{TAPL}_{\mathrm{DP}}=\frac{\int_{t_1}^{t_2}\left[\mathrm{SOP}(t_1)-\mathrm{SOP}(t)\right]\mathrm{d}t}{t_2-t_1} \tag{14}$$

$$\mathrm{TAPL}_{\mathrm{RP}}=\frac{\int_{t_2}^{t_3}\left[\mathrm{SOP}(t_1)-\mathrm{SOP}(t)\right]\mathrm{d}t}{t_3-t_2} \tag{15}$$

$$\mathrm{TAPL}=\frac{\int_{t_1}^{t_4}\left[\mathrm{SOP}(t_1)-\mathrm{SOP}(t)\right]\mathrm{d}t}{t_4-t_1} \tag{16}$$

式中:R是鲁棒性,指系统在面对干扰或变化时能够保持稳定性的能力;$\mathrm{RAPI}_{\mathrm{RP}}$是恢复速率,指系统性能从最低点恢复至最高点的速率;$\mathrm{RAPI}_{\mathrm{DP}}$是破坏速率,指系统性能从开始下降到最低点的速率;RA是恢复能力,指系统性能达到新稳定阶段后与受扰动前性能的比较;TAPL为平均性能损失指标,指扰动期间系统性能的平均损失,由平均破坏性能损失$\mathrm{TAPL}_{\mathrm{DP}}$、平均恢复性能损失$\mathrm{TAPL}_{\mathrm{RP}}$和上述的恢复阶段平均性能补偿3部分组成.

进场航班运行韧性度量越大,反应进场航班运行在面对扰动时的韧性越强,韧性指标反映在运行性能变化过程中,如图3所示.图3中:$\mathrm{PL}_{\mathrm{DP}}$是破坏

性能损失,指破坏阶段对系统造成的性能下降量;PL_{RP}是恢复性能损失,指恢复阶段对系统造成的性能下降量.

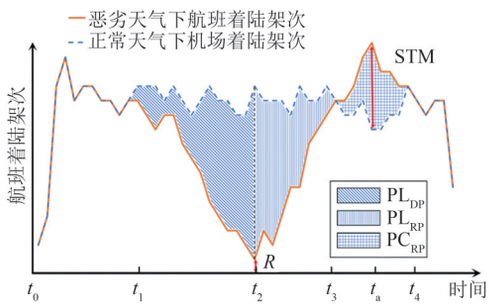


图 3　韧性指标示意图

Fig.3　Schematic diagram of resilience indicators

2　恶劣天气下进场航班运行韧性提升

进场航班运行性能变化共 4 个阶段:①稳定阶段,主要描述航班运行的检测能力,排查进场运行潜在风险,通过主动干预减少后续扰动的冲击,降低扰动概率与影响程度.性能指标包括气象预警监测的准确性、空管态势感知系统的可靠性.②破坏阶段,主要描述航班运行的救援能力,系统性能因外部冲击快速下降,隔离危害并保持进场核心功能,控制下降幅度并防止扩散.性能指标包括备用停机位启用率、进场排序动态调整响应时长、地面保障资源冗余度.③恢复阶段,主要描述航班运行的救援能力,扰动强度减弱至完全消失后,快速提升性能缩短进场航班排队时间,不因地面保障衔接不畅导致已恢复航班再次延误.性能指标包括进场容量恢复时长、航班恢复正常率、航班延误时间.④新稳定阶段,主要描述航班运行的复原能力,优化进场韧性策略以提升未来抗扰能力,更新韧性策略.性能指标包括韧性预案更新覆盖率、备用资源补充完成率.进场航班运行性能变化在各阶段的含义不同,提升进场航班运行性能所关注的指标也不同.韧性指标的关联关系如表 1 所示,本文通过改善恢复阶段(t_2~t_4)的进场航班运行性能、优化韧性指标值,提升进场航班运行韧性.通过优化航班着陆时间和顺序,提高跑道利用率,提升系统余量并加快恢复速率,在恶劣天气得到改善后,让受影响的航班快速着陆,实现韧性提升.

2.1　模型建立

当本场受到恶劣天气影响时,管制人员会将当前天气及跑道情况报告给机组,机组一般有两种选择,一种是降落到备降机场,等待天气恢复后飞回目的机场,另一种是在空中盘旋,等达到着陆条件再进行着陆.这两种情况均会导致恶劣天气后机场空域繁忙,影响航班运行.

表 1　韧性指标关联关系

Tab.1　Relationships among resilience indicators

阶段	时间段	功能	韧性指标	关联性
稳定	$t<t_1$	稳定性	−	−
破坏	$t_1<t<t_2$	吸收能力	R	+
			$RAPI_{DP}$	−
			$TAPL_{DP}$	−
恢复	$t_2<t<t_4$	适应能力	$RAPI_{RP}$	+
			$TAPL_{RP}$	−
		恢复能力	$TAPC_{RP}$	+
			STM	+
新稳定	$t>t_4$	恢复能力	RA	+

注:“+”表示该指标与韧性正相关;“−”表示该指标与韧性负相关;同阶段相同符号指标正相关.

航班在进近的过程中受到前序航班的尾流影响,相邻的航班要满足最小尾流间隔.国际民航组织(International Civil Aviation Organization,ICAO)基于最大起飞重量将航班分类,前序航班产生的尾流会影响后续航班的起飞与降落.文献[23]将尾流间隔转换为尾流时间间隔,如表 2 所示.

表 2　尾流时间间隔

Tab.2　Wake turbulence separation time intervals　　s

前机	后机		
	重型	中型	轻型
重型	96	157	196
中型	60	69	131
轻型	60	69	82

航班在起飞后会给出到达目的机场的预计着陆时间,航班到达目的地机场后有实际着陆时间,航班由于天气等导致的降落延误时间见式(2).

不同机型的航班起飞重量与乘客数量不同,其延误所产生的代价也不同.文献[24]研究了不同机型延误所产的代价,从而给不同机型确定优先级,每架航班的优先级系数 p 如表 3 所示.

表 3　机型优先级

Tab.3　Aircraft type prioritization

机型	最大起飞重量	优先级
L	<7	0.3
M	7~136	4
H	>136	5.7

将空域内的所有航班视为一个系统,根据航班优先级与延误等待时间对进场航班序列进行排序.航班 i 存在代价 P_i,代价随航班延误时间增长为

$$P_i = p_i \times t_i^{\mathrm{d}} \tag{17}$$

式中:p_i 为优先级;t_i^{d} 为航班延误等待的时间.目标

是求解系统代价P_{totle}最小的各航班着陆时间，其表达式为

$$P_{\text{totle}}=\min\sum_{i=1}^{n}\left(P_i\left(t_i^{\text{d}}\right)\right) \tag{18}$$

若仅根据机型优先级与等待时间为航班排序，可能会出现有两架相同型号的航班等待，两架航班的代价随时间增长的幅度相同，哪一架航班优先降落对整个系统代价的增长无影响，可能出现一架航班在空中等待较长时间不安排着陆的情况．若航班代价随等待时间指数增长，则可以消除此类情况，保证航班的公平性．因此在优先级原则的基础上进行优化，等待时间更长的航班代价随时间增长的速度越快，代价P_i为

$$P_i=p_i\times C^{t_i^{\text{d}}} \tag{19}$$

式中：C为常数．

目前主要航线中使用的机型多为中型机与重型机，本文规定若中型机等待时间超过20 min，优先级就会高于新来的重型机，若让其晚着陆对系统代价的影响更大，即$4\times C^{20}>5.7\times C^{0}$，$C$取1.02．若航班延误时间小于等于20 min，则按机型所划分的优先级着陆．代价P_i变为

$$P_i=p_i\times 1.02^{t_i^{\text{d}}} \tag{20}$$

约束条件共6条．

约束条件1：尾流间隔约束．

$$t_{\text{a}}^{i}-t_{\text{a}}^{j}\geqslant\delta_{i,j}S_{i,j}-(1-\delta_{i,j})M \tag{21}$$

$$t_{\text{a}}^{j}-t_{\text{a}}^{i}\geqslant\delta_{j,i}S_{j,i}-(1-\delta_{j,i})M \tag{22}$$

式中：$\delta_{i,j}$、$\delta_{j,i}$为常数，当航班i在航班j之前$\delta_{i,j}$为1，否则为0，$\delta_{j,i}$同理；M为足够大的数，$S_{i,j}$为当航班i在航班j之前时，j需保持的尾流间隔．

约束条件2：跑道占用时间间隔约束．着陆航班需要满足跑道占用时间间隔约束，每架航班占用跑道60 s，前一架航班未脱离跑道时，下一架航班不可进行着陆．

约束条件3：流量控制约束．恶劣天气影响本场时，受到能见度、流量控制等原因的影响，机场保障能力下降，跑道容量受到影响．对不同天气下机场保障航班架次进行假设：天气良好时，机场1.5 min可以保障一架航班着陆；轻雾、阵雨时，机场5 min可以保障一架航班着陆；小雷暴雨时机场30 min可以保障一架航班着陆；大雷暴雨不可着陆．

约束条件4：跑道容量约束．天津滨海国际机场隔离运行时，机场高峰小时容量约为30架次，航班着陆架次不可以超过跑道容量上限．

约束条件5：优先级约束．见式(19)，根据各航班机型及延误等待时间确定航班优先级．

约束条件6：滚动时间窗约束．时间窗为10 min，滚动步长为5 min．每次滚动后，会将下一个5 min内到达的航班加入系统中，并冻结已经完成排序的前5 min的航班．

2.2 模型求解

基于滚动时域控制(Receding Horizon Control，RHC)的贪心算法(Greedy Algorithm，GA)对航班进行排序．传统静态排序方法的核心缺陷是无法应对雷暴后航班动态涌入的场景，而RHC+GA通过滚动时域拆分与实时代价更新实现动态适配．当允许航班着陆时，不同的航班着陆顺序所产生的系统代价也不相同，因此使用贪心算法寻求一个系统代价最小的航班排序．

机场空域为动态系统，随着时间推移会有新的航班到达机场空域．因此引入滚动时域解决此问题，RHC的核心是根据给定窗口将原问题分割为一组小规模子问题，通过时域滚动实时排序，求得局部最优解．两个连续时域的时间差为滚动步长，时间窗内存在两种航班，一种是受天气影响在空域中等待的航班，另一种是时间窗滚动后新到达的航班．时间窗内存在冻结时间，排序后若航班的着陆时间在冻结时间内则其排序与时间会被固定，冻结时间以外的航班参与时间窗滚动后的下一次排序．如图4所示．图4中：航班a、航班b、航班c、航班d等是受恶劣天气影响延误等待的航班，当允许航班着陆时，航班会排序至填满时间窗，在冻结时间内的顺序与着陆时间会被固定，并从待排序的航班序列中删除，如航班a、航班b；其他航班仍为待排序航班，如航班c、航班d；随着时间窗的滚动，航班e、航班f加入系统内，作为新进入机场空域等待着陆的航班，然后进行下一轮的排序，以此类推直到空域中的所有航班着陆．此时，机场上空无航班等待，到达的航班可直接着陆，航班运行恢复正常．

算法流程共包含3个步骤．

步骤1：设置空域航班集合、冻结时间、滚动时域窗口大小等参数，提取当前时域窗口内的航班子集．

步骤2：贪心算法计算各航班的延误代价，使总代价最小的航班进入进场序列．

步骤3：执行冻结时间内排序结果，将已执行航班从总集合中移除，滑动窗口，纳入新的待排序航班，直到空域中不存在未着陆的航班．

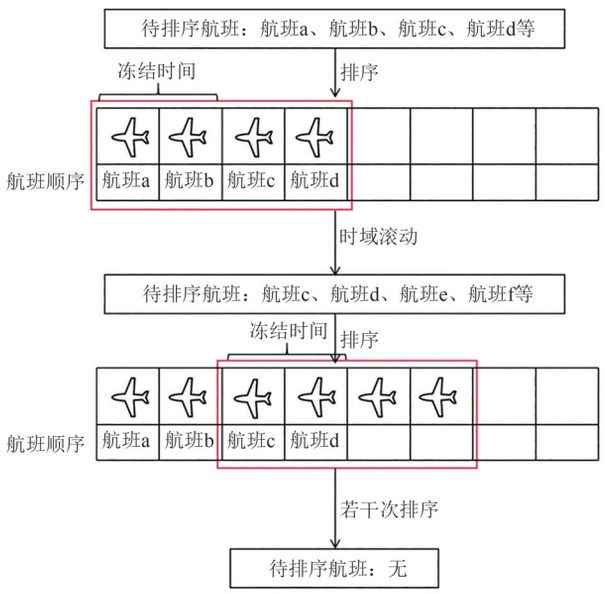


图 4　滚动时域示意图

Fig. 4　Schematic diagram of rolling time-domain framework

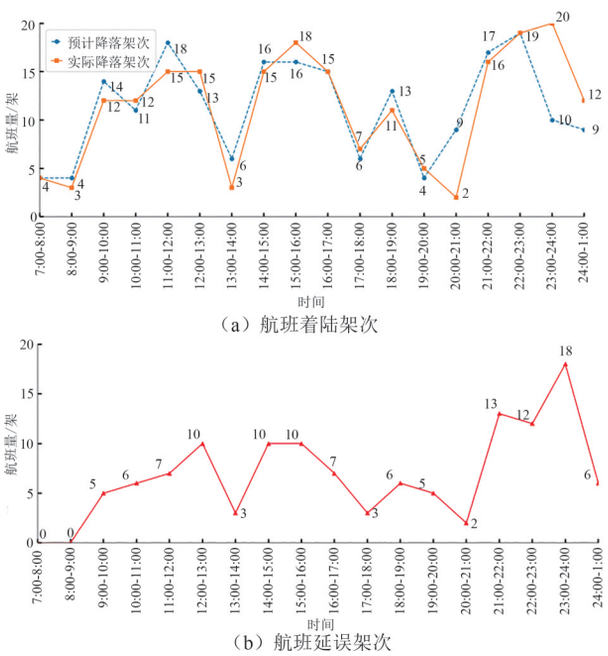
3　实例分析

实验采用天津滨海国际机场 2024 年 8 月 23 日的航班数据与气象数据.天津滨海国际机场为双跑道机场,其采用隔离平行运行的运行模式,天津滨海机场的两条平行跑道间距达 2 100 m,超过 ICAO 规定的 760 m 最低安全间隔.通常东跑道(16L/34R)专门用于起飞,西跑道(16R/34L)专门用于降落,且两条跑道的飞行轨迹在空间上无交叉,认为离场航班不会对进场航班造成影响.航班数据包括 8 月 23 日 7:00 至 8 月 24 日 00:59 在天津滨海国际机场着陆的航班,共计 204 架,11 架重型机,193 架中型机.气象数据为天津滨海国际机场 2024 年 8 月 23 日气象报文数据.19:00 至 19:25 为轻雾;13:03 至 13:14、14:00 至 14:30、21:00 至 21:25 为阵雨和小阵雨;13:14 至 13:40、19:25 至 20:18、20:22 至 21:00 为雷暴和大雷暴雨;13:40 至 14:00、20:18 至 20:22 为小雷暴雨.

3.1　进场航班运行韧性评估

由于航班着陆架次为离散函数无法积分,后续计算中由航班着陆架次曲线所围成的面积代替积分运算.根据式(1)至式(4),分别计算 2024 年 8 月 23 日天津滨海国际机场的航班每小时航班延误时间、航班着陆正常率和航班着陆架次,分析进场航班运行性能.根据天津机场历史数据,1:00 至 6:00 点进港航班较少,因此主要研究 7:00 以后进场航班运行情况.在天气良好时,实际着陆航班等于预计着陆航班,达到平均每小时约 15 架次,若航班达到每小时 15 架次,则认为进场航班运行性能恢复至受影响前.

航班着陆架次统计结果如图 5 所示.由图 5 可知:12:00 至 13:00 着陆航班为 15 架,受到雷暴天气影响在 13:00 至 14:00 和 20:00 至 21:00 着陆航班仅为 3 架和 2 架;13:00 至 15:00 和 20:00 至 22:00 预计着陆架次均高于实际着陆架次,此时未能着陆的航班会在机场空域等待,雷暴降水持续时间越长,空域中拥挤的航班越多;当雷暴天气消失(14:00 之后;21:00 之后),航班量迅速增加,航班量持平甚至多于雷暴天气前;15:00 至 16:00、23:00 至 24:00 着陆架次达到 18 架和 20 架,但延误架次达 10 架和 18 架.雷暴天气造成的影响有滞后性,航班着陆正常率如图 6 所示,图 6 中,23:00 至 24:00 航班正常率仅为 10%,此时着陆的航班多为受天气影响,在空中等待的延误航班,直至 24:00 至 01:00,降水已结束 3 h,航班正常率恢复至 50%,进场航班运行性能才逐渐恢复.



(a) 航班着陆架次

(b) 航班延误架次

图 5　航班着陆架次

Fig. 5　Number of flight landings

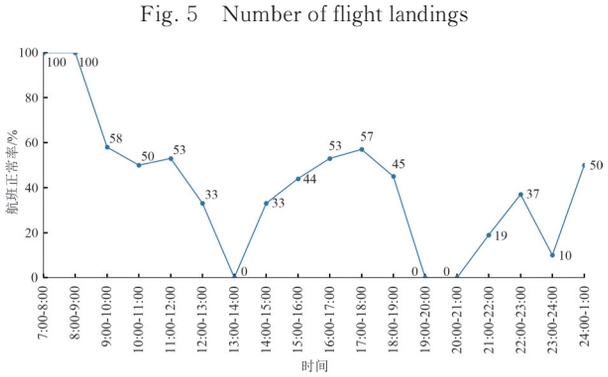


图 6　航班着陆正常率

Fig. 6　On-time landing rate of flights

延误时间分布如图 7 所示. 图 7 中：15:00 至 16:00 各航班延误时间中位数为 14 min，第一四分位数为 5 min，第三四分位数为 24 min，四分位距为 19 min；22:00 至 23:00 中位数为 29 min，第一四分位数为 13 min，第三四分位数为 45.5 min，四分位距为 32.5 min，最大延误超过 60 min，离散程度较大.

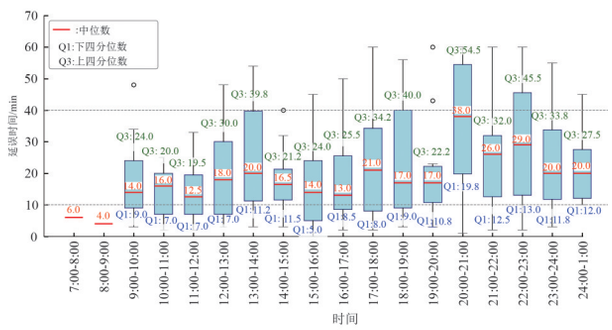


图 7 航班延误时间分布

Fig. 7 Distribution of flight delay time

评估进场航班运行韧性如表 4 所示. 表 4 中，天津滨海国际机场在两次雷暴期间的 $RAPI_{RP}$ 分别为 4 和 2.5，系统余量为 3 和 5 架次，分别计算两次雷暴天气时的韧性指标，得到进场航班运行韧性综合度量 $GR_{AFO}=(GR_{AFO}^{1}+GR_{AFO}^{2})/2=1.529$.

3.2 进场航班运行韧性提升

本文通过滚动时域动态优化不同优先级的航班着陆顺序，减少尾流间隔，实现航班在相同时间内降落更多架次. 优化后的运行性能见图 8、图 9，图 8 中，恢复速率与系统余量较优化前均有提升. 由图 9 可知：优化后在 21:00 至 22:00 实际着陆架次超过了预计着陆架次，优化前在 22:00 至 23:00 实际着陆架次等于预计着陆架次；在 21:00 至 22:00 和 22:00 至 23:00，航班实际着陆架次达到 19 架和 24 架，延误航班高达 19 架和 23 架，优化后可以安排更多的受天气影响延误的航班在此期间着陆，更快消除雷暴天气带来的影响，使运行性能快速恢复.

优化后航班着陆正常率如图 10 所示，由图 10 可知：航班正常率在 14:00 至 15:00、15:00 至 16:00、23:00 至 00:00、00:00 至 01:00 有明显的提高，由 33%、44%、10%、50% 提升至 47%、86%、73%、100%；在 21:00 至 23:00 的航班正常率低于优化前，是由于更多的延误航班在 21:00 至 23:00 着陆，导致此期间航班正常率降低；到 23:00 至 01:00，后续航班不受前序延误航班的影响，航班正常率大幅提升.

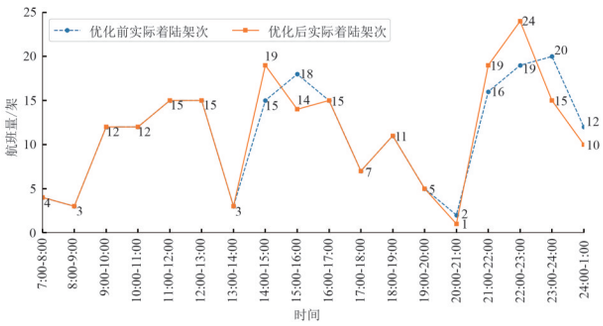
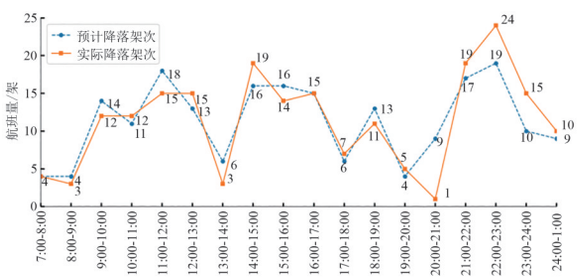
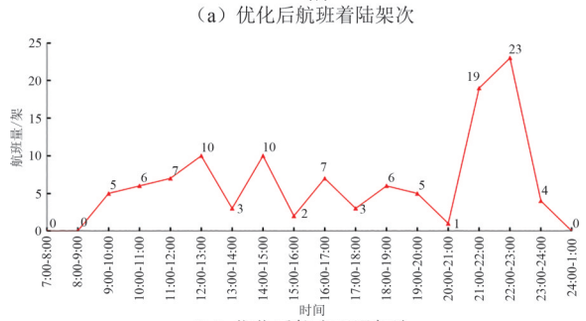


图 8 着陆架次对比

Fig.8 Comparison of landing counts



(a) 优化后航班着陆架次



(b) 优化后航班延误架次

图 9 优化后航班着陆架次

Fig.9 Flight landings after optimization

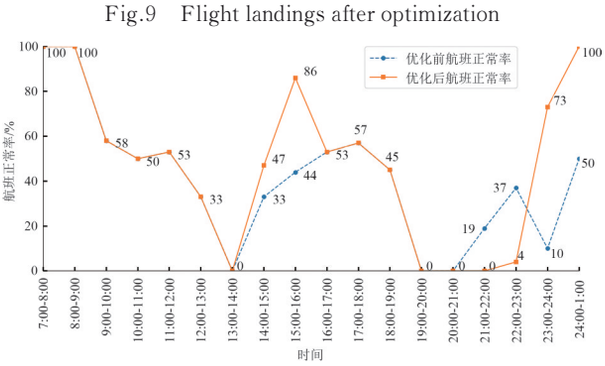


图 10 航班正常率对比

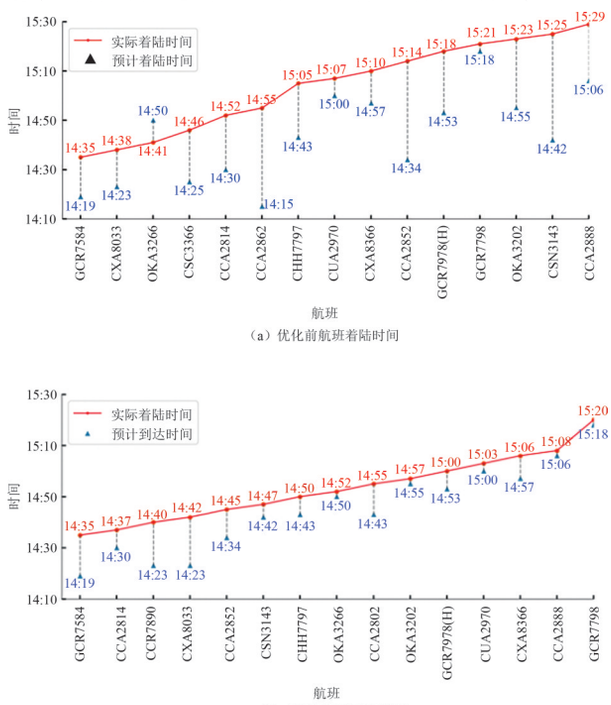
Fig.10 Comparison of flight on-time performance

表 4 进场航班运行韧性指标

Tab.4 Operational resilience indicators for approach flights

时间段	R	$RAPI_{DP}$	$RAPI_{RP}$	RA	PL_{DP}	$TAPL_{DP}$	PL_{RP}	$TAPL_{RP}$	$TAPC_{RP}$	GR_{AFO}	STM
12:00至17:00	3	12	4	1	6	6	6	6	1.5	1.332	3
16:00至01:00	2	3.25	2.5	0.77	28.5	7.125	6.5	6.5	2.5	1.725	5

为更直观地呈现优化效果,选取优化前后14:30至15:30航班的着陆时间进行比较,如图11所示.由图11可知:在实际运行的序列中存在一架重型机GCR7978,在次架重型机着陆的时候(15:18),按优先级排在其后面的两架中型机(OKA3202,CSN3143)已经分别延误了23和36 min,表明航班间的公平性有所缺失;优化后认为这两架延误等待时间超过20 min,优先级高于重型机,让其减少在航路及等待点等待的时间并优先着陆,延误时间减少到2和5 min;在优化排序后,压缩了各航班之间的间隔,通过平衡各航班之间的延误时间保证航班的公平性.



(a) 优化前航班着陆时间

(b) 优化后航班着陆时间

图11　优化前后航班着陆时间对比

Fig.11　Comparison of flight landing times before and after optimization

航班延误时间对比如图12所示,图12中,优化后的延误时间有明显的改善,平均每架航班减少延误6 min.优化后的延误时间分布如图13所示,图13中:15:00至16:00各航班延误时间中位数为6 min,第一四分位数为3.8 min,第三四分位数为20.2 min,四分位距为16.4 min;22:00至23:00中位数为17 min,第一四分位数为12 min,第三四分位数为27 min,四分位距为15 min,相较优化前,各航班的延误时间更集中.

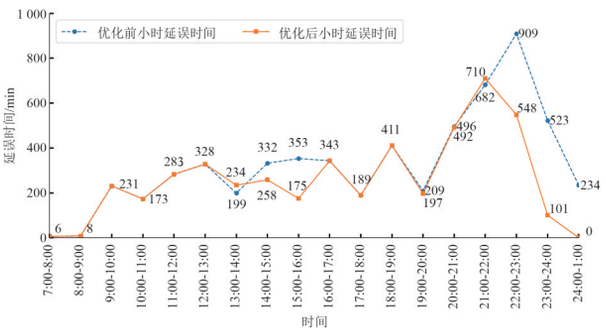


图12　航班小时延误时间对比

Fig.12　Comparison of hourly flight delays

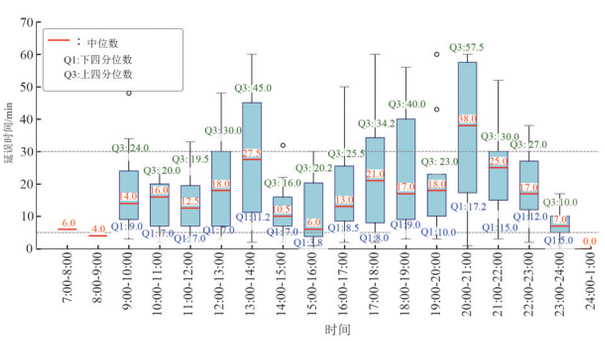


图13　优化后航班延误时间分布

Fig.13　Distribution of flight delays after optimization

由于减少了航班延误时间,缩短了进场航班运行性能恢复时间,使得恢复阶段的韧性指标有不同的提升.优化后的进场航班运行韧性指标如表5所示.表5中:在12:00至17:00和16:00至00:00的$RAPI_{RP}$分别提升了37.5%和86.8%,系统余量从3架和5架航班提升至4架和9架航班;16:00至00:00 $TAPC_{RP}$比优化前提升了106%,有较大的提升.综上,可以计算出优化后的进场航班运行韧性综合度量$GR_{AFO}^{*}=(GR_{AFO}^{1*}+GR_{AFO}^{2*})/2=2.791$,相较于优化前提升了82.5%.

表5　优化后的进场航班运行韧性指标

Tab.5　Operational resilience indicators of approach flights after optimization

时间段	R	$RAPI_{DP}$	$RAPI_{RP}$	RA	PL_{DP}	$TAPL_{DP}$	PL_{RP}	$TAPL_{RP}$	$TAPC_{RP}$	GR_{AFO}	STM
12:00至17:00	3	12	5.5	0.92	6	6	4.5	6	0.75	1.928	4
16:00至00:00	1	3.5	4.67	1	29	7.25	5.46	7	5.15	3.654	9

4　结论

1)在实际运行过程中,通过构建的韧性评估体系对恶劣天气下天津滨海国际机场进场航班运行韧性评估可知:在两次雷暴影响期间的进场航班运行韧性综合度量仅为1.529,其中$RAPI_{RP}$分别为4和2.5,系统余量为3和5架次,进场航班面对恶劣天气扰动时的恢复能力较弱、系统冗余不足,导致航班延误累积严重(部分时段最大延误超60 min),运行韧性处于较低水平.

2)相较于实际运行,采用RHC+GA优化方法,实现进场航班的精细化排序,优化后进场航班运行韧性综合度量提升至2.791,较优化前提升82.5%,$RAPI_{RP}$分别提升37.5%、86.8%,系统余量从3架次、5架次提升至4架次、9架次,表明机场进场系统快速吸收积压航班、恢复正常运行的能力增强;平均每架航班延误时间减少6 min,航班延误时间分布更集中,保证航班公平性;15:00至16:00、23:00至01:00等时段的航班正常率从44%、10%分别提升至86%、100%,有效缓解了恶劣天气对航班运行的滞后影响.

本文构建的韧性评估体系可为进场航班运行韧性水平提供量化依据,以RHC+GA优化方法动态调整航班着陆顺序,在兼顾经济性与公平性的前提下,缓解恶劣天气后的空域拥堵,为机场应对恶劣天气、提升运行韧性提供了思路与方法.在后续的研究中,需要进一步考虑多跑道运行模式、进离场协同等情况.

参考文献(References):

[1] 中国民用航空局.2023年民航行业发展统计公报[EB/OL].(2024-05-31)[2025-10-09].http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202405/t20240531_224333.html.
Civil Aviation Administration of China. 2023 Statistical bulletin on the development of the civil aviation industry [EB/OL]. (2024-05-31) [2025-10-09]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202405/t20240531_224333.html.(in Chinese)

[2] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.

[3] MURRAY-TUITE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]//Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. Monterey, 2006: 1398-1405.

[4] HENRY D, EMMANUEL RAMIREZ-MARQUEZ J. Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2012, 99: 114-122.

[5] WANG Y J, ZHAN J M, XU X H, et al. Measuring the resilience of an airport network[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(12): 2694-2705.

[6] 王兴隆,苗尚飞.空域扇区网络结构特性分析及韧性评估[J].北京航空航天大学学报,2021,47(5):904-911.
WANG Xinglong, MIAO Shangfei. Structural characteristics analysis and resilience assessment of airspace sector network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(5): 904-911.(in Chinese)

[7] 陈舒伟.空中交通运行网络韧性研究[D].南京:南京航空航天大学,2020.
Chen Shuwei. Research on the resilience of air traffic operation network [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2020.(in Chinese)

[8] 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 and Astronautics, 2024, 50(1): 110-121.(in Chinese)

[9] 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.(in Chinese)

[10] TUZUN AKSU D, OZDAMAR L. A mathematical model for post-disaster road restoration: Enabling accessibility and evacuation[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 61: 56-67.

[11] KEPAPTSOGLOU K L, KONSTANTINIDOU M A, KARLAFTIS M G, et al. Planning postdisaster operations in a highway network[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2459(1): 1-10.

[12] TESTA A C, FURTADO M N, ALIPOUR A. Resilience of coastal transportation networks faced with extreme climatic events[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2532(1): 29-36.

[13] 隋东,邢娅萍,涂诗晨.恶劣天气条件下航路网络修复优化[J].航空学报,2021,42(2):324300.
SUI Dong, XING Yaping, TU Shichen. Repair optimization strategy for air route networks under severe weather conditions[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(2): 324300.(in Chinese)

[14] 黄信,杨立志,张永康,等.暴雨灾害下机场基础设施网络韧性恢复策略研究[J/OL].北京航空航天大学学报,2024.doi:10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0396.
HUANG Xin, YANG Lizhi, ZHANG Yongkang, et al. Research on resilience recovery strategy of airport infrastructure network under rainstorm disaster[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024.doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0396.

(in Chinese)

[15] 朱峻,万红波,潘红兴,等.烟草物流配送系统韧性提升策略研究[J].北京交通大学学报,2024,48(3):29－38.
ZHU Jun, WAN Hongbo, PAN Hongxing, et al. Research on strategies for improving the resilience of tobacco logistics distribution systems[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 29－38. (in Chinese)

[16] 华祎旻,孟令云,栾晓洁,等.面向高速铁路列车运行图弹性提升的冗余时间分配方法[J].北京交通大学学报,2024,48(3):64－73.
HUA Yimin, MENG Lingyun, LUAN Xiaojie, et al. Improving timetable resilience for high-speed railways through time supplement allocation[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 64－73. (in Chinese)

[17] MOU R L, KANG R. Network resilience and rehabilitation strategies for an airport movement area considering traffic flow and road class[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2024, 2024(1): 9998215.

[18] MA W X, LIN S C, CI Y S, et al. Resilience evaluation and improvement of post-disaster multimodal transportation networks[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2024, 189: 104243.

[19] ZHU Y L, TIAN W, JIA X H, et al. Optimizing firefighting resilience in airports through genetic algorithms and decision-making frameworks[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2025, 6(2): 212－225.

[20] DONG X S, CUI H J, SU Y, et al. Identifying critical road segments and optimizing resilience strategies based on multi-state congested characteristics[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 258: 110912.

[21] 王兴隆,赵俊妮,贺敏.基于贝叶斯网络的空中交通运输系统韧性评价[J].南京航空航天大学学报,2022,54(6):1121－1130.
WANG Xinglong, ZHAO Junni, HE Min. Resilience evaluation on air transportation system based on Bayesian network[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1121－1130. (in Chinese)

[22] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35－53.

[23] BALAKRISHNAN H, CHANDRAN B G. Algorithms for scheduling runway operations under constrained position shifting[J]. Operations Research, 2010, 58(6): 1650－1665.

[24] 王楠,戴福青,齐雁楠.基于跑道容量的航班恢复优化模型[J].科学技术与工程,2020,20(15):6279－6285.
WANG Nan, DAI Fuqing, QI Yannan. Flight recovery optimization model based on runway capacity[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(15): 6279－6285. (in Chinese)