

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0825

基于离散事件模拟的航站楼运行韧性分析

程国勇*, 陈实

(中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 提高航站楼运行韧性是减少偶然事件下人员财产损失、减轻破坏程度、尽快恢复功能的最佳办法。目前, 对航站楼缺乏基于运行性能指标时变过程的韧性定量分析理论与技术。基于此, 提出综合体现鲁棒性、快速性与系统性能损失的航站楼系统综合韧性指标的航站楼运行韧性理论框架, 基于离散事件模拟, 得出航站楼运行系统在设备损坏、人员缺席2种扰动情景及不同扰动时间、旅客到达率下的韧性变化规律, 并提出提高安检效率及设备冗余率2种韧性提升策略。结果表明: 系统鲁棒性指标、性能损失指标均与扰动时间及旅客到达率呈负相关; 对于设备损坏和人员缺席2种情景, 提升安检效率使系统综合韧性水平分别从原有的0.325、0.054提升至0.834、0.913, 提升设备冗余率使系统综合韧性水平从0.22提升至0.638。

关键词: 航站楼运行; 离散事件模拟; 韧性理论; 综合韧性指标; 提升策略

中图分类号: U8; V351.17

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2024)11-3310-09

机场航站楼是机场安全运行的物质基础。极端天气或灾变等偶然事件会造成航站楼部分设备损坏及部分工作人员无法到达岗位, 同时, 作为救援枢纽, 航站楼旅客流量将长时间维持在高位, 影响服务效率。在以上事件不能绝对避免的情况下, 提高航站楼等基础设施的韧性是减少损失、减轻破坏程度、尽快恢复功能的最佳办法。韧性设计也越来越被视为关键基础设施设计的原则和政策要求, 其目标是: 确保在受到重大灾害或突发事件影响时, 关键基础设施能够维持最低功能, 并快速安全地恢复全面运营^[1]。

当前, 民航领域对韧性问题的关注点主要集中于航空运输网络。Clark等^[2]研究美国机场网络拓扑特征, 从鲁棒性及恢复策略2方面对机场网络韧性进行定量描述。王兴隆和刘洋^[3]创建了航空多层网络模型, 对航空多层网络在失效条件下的韧性进行测度。郭九霞^[4]采用基于拓扑和数据驱动的方法

对中国机场网络韧性、网络节点强度进行韧性评估, 研究不同预防和控制策略对机场网络安全韧性的影响。在机场航站楼等民航基础设施韧性研究上, Huang等^[5]从检测能力、抵抗能力、救援能力、恢复能力4个维度构建评价指标体系, 通过计算各方案与期望水平之间的差距, 计算中国台湾某机场的韧性。Bao和Zhang^[6]从脆弱性和应急响应能力2方面选取指标, 使用集对分析法分别计算机场空侧及陆侧韧性水平。黄润建^[7]从自然环境、技术设施、服务链条和管理体系4个维度构建评价指标体系, 通过集对分析法进行机场灾害韧性评价。可见, 民航基础设施韧性研究尚处于起步阶段, 且多是借助指标体系从多个维度评价系统抵御、吸收扰动的能力, 缺乏以系统性能指标时变过程为数值表征的韧性定量评价理论方面的研究。而系统性能指标时变过程的分析对航站楼运行韧性的定量分析、薄弱环节的甄别及韧性的提升技术具有重要

收稿日期: 2022-09-29; 录用日期: 2023-04-22; 网络出版时间: 2023-05-05 16:04

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230505.1154.004

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600500)

*通信作者. E-mail: gy_cheng@126.com

引用格式: 程国勇, 陈实. 基于离散事件模拟的航站楼运行韧性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(11): 3310-3318.

CHENG G Y, CHEN S. Terminal operation resilience analysis based on discrete event simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(11): 3310-3318 (in Chinese).

的理论价值和指导意义。

航站楼作为旅客办理各种手续的场所, 具有旅客行动路线序列性强的特点, 其系统性能指标可通过离散事件模拟行人交通微观仿真方法获得。离散事件模拟能准确模拟客流, 将旅客活动分为旅客生成源、步行目标、使用服务(值机、安检)等过程, 并进一步连成旅客活动链, 从而分析得到旅客排队时间、客流密度等航站楼性能指标数值^[8]。离散事件模拟的方法在航站楼旅客流程优化中被大量应用, 但在航站楼运行韧性定量分析方面并不常见。

基于上述背景, 本文以北方某机场 T2 航站楼为研究对象, 提出基于离散事件模拟的航站楼运行韧性分析理论。该理论可通过航站楼性能指标时变情况分析航站楼运行韧性的演化规律、薄弱环节及提升策略。本文方法可为航站楼运行韧性分析、定量评价及韧性提升提供参考。

1 航站楼系统综合韧性指标

“韧性”一词最早来源于拉丁语“resilio”, 意为恢复到原始的状态。随着韧性在不同学科领域的应用, 其由最初表示系统应对扰动时保持自身状态的能力, 到系统吸收扰动而依旧维持运转的能力^[9], 发展到包括学习、适应、自组织的能力^[10]等更广泛的、不断演进的内涵。结合不同领域韧性研究现状, 本文将航站楼运行韧性定义为: 在受到突发事件或自然灾害影响时, 航站楼系统能够维持其基本服务功能, 并用最短时间和最小代价恢复甚至超过其原有功能的能力。相比其他韧性, 航站楼运行韧性侧重研究在突发事件或自然灾害影响下, 在人、机、环、管相互作用及约束下, 航站楼保持基本服务功能、维持运行状态的能力, 而不过多关注航站楼建筑工程构件的物理韧性。

航站楼运行韧性可用如图 1 所示的韧性三角形进行表征。系统初始性能水平为 P_0 , 在 t_1 时刻, 系统遭受扰动, t_2 时刻系统性能水平达到最低点 P_{\min} , t_3 时刻系统性能水平恢复到扰动前水平 P_0 , $P(t)$ 为系统性能水平时变函数。参考以往研究, 本

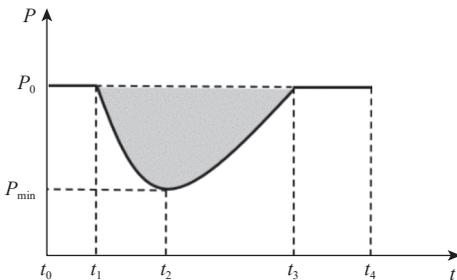


图 1 航站楼运行韧性三角形

Fig. 1 Terminal operation resilience triangle

文提出改进的鲁棒性指标 R_a 、快速性指标 R_b 、性能损失指标 R_c , 用于定量表征航站楼运行韧性, 表示为

$$R_a = \frac{P_{\min}}{P_0} \quad (1)$$

$$R_b = \frac{t_3 - t_2}{t_3 - t_1} \quad (2)$$

$$R_c = 1 - \frac{\int_{t_1}^{t_3} P(t) dt}{P_0(t_3 - t_1)} \quad (3)$$

改进的鲁棒性指标反映系统的受损程度, 弥补了传统指标只能反映系统最小性能水平的问题, 但也同时存在不能反映恢复时间的缺点; 改进的快速性指标不再采用系统性能损失时间与总时间的比值, 而采用系统恢复时间占性能损失时间的比值, 更能反映系统的恢复速度; 改进的性能损失指标用系统性能损失部分与正常部分面积的比值表示, 避免了传统指标直接用性能损失部分面积表示韧性时可能出现的性能损失相同、系统韧性却不同的情况, 但存在不能反映系统恢复快慢及受扰动情况大小的缺点。因此, 将 R_a 、 R_b 、 R_c 这 3 个指标进行调整, 使其值在 0~1 之间, 且 0 代表低韧性, 1 代表高韧性, 得到新的鲁棒性指标 R_1 、快速性指标 R_2 、性能损失指标 R_3 , 并提出综合考虑以上指标, 能反映系统受损情况、恢复快慢及性能损失大小的综合韧性指标 R , 4 个指标表示为

$$R_1 = R_a = \frac{P_{\min}}{P_0} \quad (4)$$

$$R_2 = 1 - R_b = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1} \quad (5)$$

$$R_3 = 1 - R_c = \frac{\int_{t_1}^{t_3} P(t) dt}{P_0(t_3 - t_1)} \quad (6)$$

$$R = R_1 R_2 R_3 = \frac{P_{\min}(t_2 - t_1) \int_{t_1}^{t_3} P(t) dt}{P_0^2(t_3 - t_1)^2} \quad (7)$$

2 航站楼运行韧性仿真分析

2.1 建模方法及研究对象

航站楼运行仿真采用 AnyLogic 软件进行。AnyLogic 行人库建模包含“环境”与“逻辑”。环境部分通过点、线画出图像, 用功能模块定义图像, 将所要模拟的行为图像化; 逻辑部分将行人库模块连接成流程图以实现模型所要模拟的旅客行为流程。建模步骤如下:

步骤 1 导入底图, 设置墙壁, 建立模型图像环境。

步骤 2 配置值机柜台、安检柜台等设施。

步骤3 建立行为流程图。使用 pedSource、pedService、selectOutput 等模块构建行为流程图,设置旅客属性、行走路线、旅客产生地、旅客目的地等。

步骤4 建立数据统计模块。使用 timeMeasure-Start、timeMeasureEnd 等模块读取值机、安检服务平均用时等数据。

研究对象选取北方某机场 T2 航站楼离港层。平面范围为国内离港旅客进入航站楼至离开安检区部分,该部分参数如表 1 所示。建模区域环境如图 2 所示,旅客离港逻辑如图 3 所示。该机场 T2 航站楼的设计旅客吞吐量为 24 000 000 人/a,由高峰日平均旅客量 \approx 年旅客量/300^[11]可得,T2 航站楼高峰日离港旅客量为 40 000/d=33 人/min。而航站楼离港旅客平均到达率可近似认为呈泊松分布^[12],故在模型中设置 pedSource = poisson(33),即旅客到达率为 33 人/min 且服从泊松分布。通过实地调研,得到模型其他基础数据如表 2 所示。

表 1 仿真区域相关参数

Table 1 Relevant parameters of simulation area

| 参数 | 数值 |
|----------|-----|
| 航站楼入口/个 | 5 |
| 自助值机设备/台 | 28 |
| 人工值机设备/台 | 72 |
| 安检通道/条 | 20 |
| 行李安检仪/台 | 40 |
| 仿真区域宽度/m | 150 |
| 仿真区域长度/m | 318 |

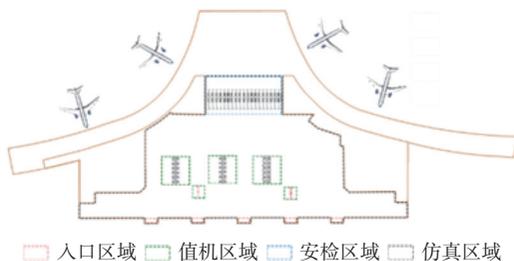


图 2 仿真区域环境

Fig. 2 Environment of simulation area

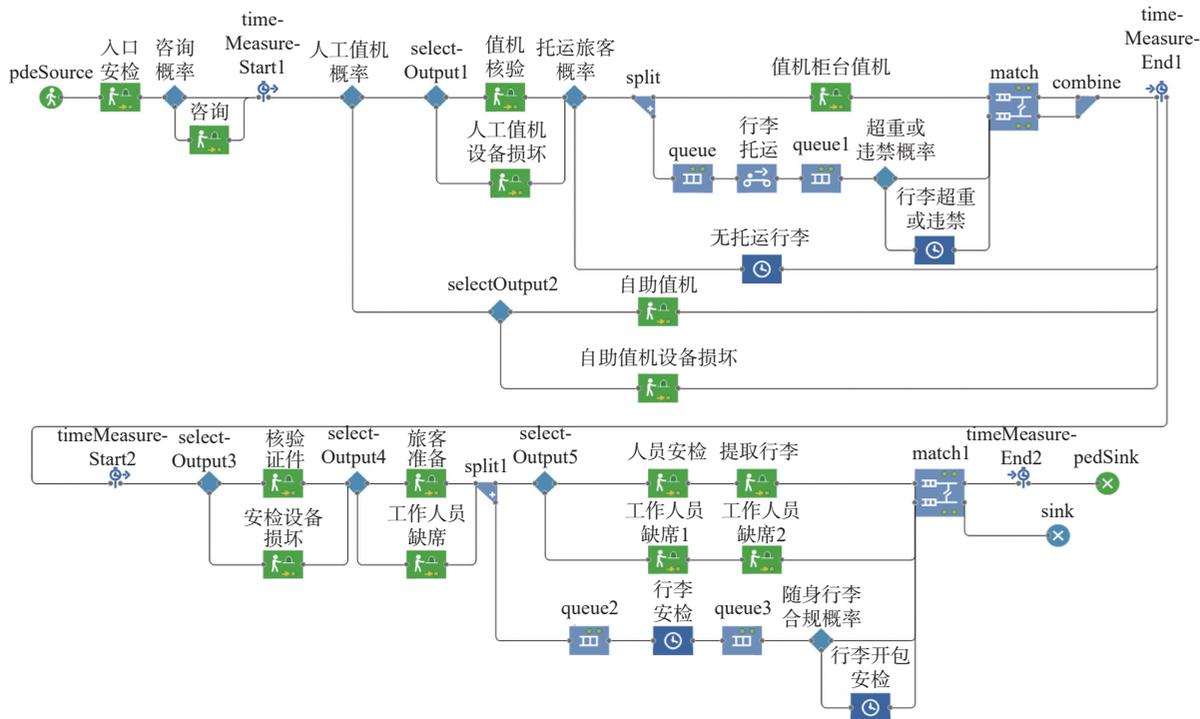


图 3 旅客离港逻辑

Fig. 3 Passenger departure logic

为提高模型运算效率,结合实际情况作如下假设:

- 1) 开始运算前,航站楼内的旅客数为 0,且各设备运转正常。
- 2) 仿真运算时间为航站楼一天内的运行时间 20 h。
- 3) 旅客没有性别、年龄之分,旅客的步行速度

和尺寸统一为标准成人属性。

- 4) 进入航站楼的旅客均属办理登机手续且熟悉值机和安检所有服务流程的旅客,不考虑其他非乘机旅客的流程情况。
- 5) 值机和安检的服务方式均为先到先服务。
- 6) 值机柜台、安检通道无普通旅客和 VIP 旅客之分,值机柜台无航空公司值机岛之分。

表 2 旅客行为相关参数

Table 2 Relevant parameters of passenger behavior

| 服务流程 | 参数名称 | 服务时间/s | 产生比例/% |
|------|-----------|----------------------|--------------|
| 入口检测 | 航站楼入口 | uniform(2,3) | |
| | 爆炸物检测 | | |
| 咨询服务 | 咨询时间 | uniform(30,90) | 5 |
| 值机服务 | 是否自助值机 | | 是, 20; 否, 80 |
| | 自助值机时间 | triangular(30,75,40) | |
| | 值机核验时间 | uniform(15,20) | |
| | 行李是否托运 | | 是, 70; 否, 30 |
| | 等待取票时间 | uniform(10,15) | |
| | 办理行李托运及取票 | uniform(30,40) | |
| | 行李是否超重或违禁 | | 是, 20; 否, 80 |
| | 超重或违禁行李处理 | triangular(25,45,30) | |
| 安检服务 | 核验登机牌及证件 | uniform(10,15) | |
| | 旅客准备 | uniform(10,15) | |
| | 人员安检 | uniform(30,55) | |
| | 行李是否合规 | | 是, 85; 否, 15 |
| | 违规行李检查 | triangular(25,45,35) | |
| | 提取行李 | uniform(20,45) | |

7) 不考虑候机和登机流程及中转旅客, 仅把离开安检区作为离港服务流程的终点。

2.2 模型验证

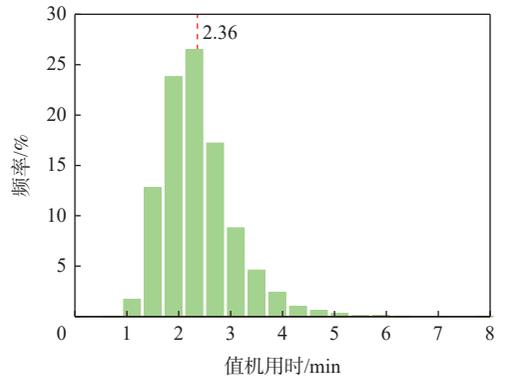
运行仿真模型, 通过 10 000 个事件模拟得出离港旅客值机平均用时为 2.36 min, 安检平均用时为 4.44 min(见 图 4)。与文献 [13-15] 仿真结果相比(见 表 3), 值机平均用时最大误差为 -5.97%, 安检平均用时最大误差为 -5.53%, 输出结果误差较小, 仿真模型可靠。

2.3 航站楼运行韧性仿真方案

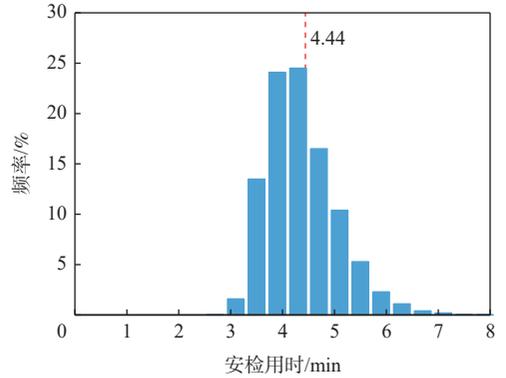
基于航站楼灾害背景, 设定航站楼主要扰动情景为安检和值机设备损坏 30%、主要工作人员缺席 30%(30% 大致对应灾难中的历史记录, 且该值足够大, 可以与正常情景进行对比)[16]。选取旅客系统时间(离港旅客从进入航站楼到离开安检区所用时间)、安检出口每小时通过旅客数量、航站楼内旅客数量(指航站楼入口至安检出口范围内旅客数量)为系统性能指标, 对不同扰动情景下的航站楼离港旅客流程进行仿真, 仿真方案如下:

1) 方案 1。对航站楼系统在不同旅客到达率下, 遭受部分设备损坏、部分人员缺席 2 种扰动情景, 且扰动时间不同时的运行情况进行模拟, 得出系统各韧性指标数值。研究系统韧性在不同扰动情景、扰动时间与旅客到达率下的演化规律。

2) 方案 2。对航站楼系统在不同安检效率及设备冗余率下的运行情况进行模拟, 研究提高安检效率、设备冗余率 2 种韧性提升策略对系统韧性的影响。



(a) 值机用时直方图



(b) 安检用时直方图

图 4 值机和安检服务用时直方图

Fig. 4 Histograms of service time of check-in and security check

表 3 仿真输出结果对比

Table 3 Comparison of simulation output results

| 仿真软件 | 样本数 | 服务名称 | 平均服务 用时/min | 输出 误差/% | 数据来源 |
|----------|--------|------|----------------|------------|--------|
| iGrafx | 10 000 | 值机服务 | 2.51 | | 文献[13] |
| | 2 500 | 值机服务 | 2.38 | | 文献[14] |
| AnyLogic | 10 000 | 值机服务 | 2.36 | -5.98 | 本文 |
| | 20 000 | 安检服务 | 4.7 | -0.84 | 文献[15] |
| | 10 000 | 安检服务 | 4.44 | -5.53 | 本文 |

3 韧性演化规律分析

依据初步仿真结果, 设定扰动时间为 1, 2, 3, 4 h, 旅客到达率为 27, 30, 33, 36, 39 人/min, 所有扰动均在仿真开始后的第 6 h 通过控制按钮施加。设定旅客系统时间达到 90 min 或 3 个性能指标无法恢复到初始值时系统崩溃, 韧性值为 0。

3.1 未采取恢复措施情景

图 5~图 7 表示在高峰日旅客到达率(33 人/min)下, 不采取恢复措施(即扰动时间无限长)时, 设备损坏、人员缺席及正常情景下航站楼性能指标的时变情况。结果表明, 无论扰动情景为设备损坏还是人员缺席, 在不采取恢复措施的情况下, 航站楼系统都会崩溃, 无法恢复到扰动前水平; 且相较设备

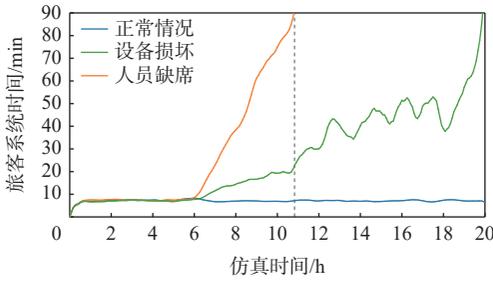


图5 旅客系统时间变化

Fig. 5 Variation of passenger system time

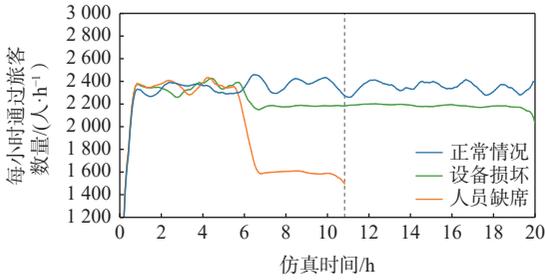


图6 每小时通过旅客数量变化

Fig. 6 Variation of number of passengers passing through per hour

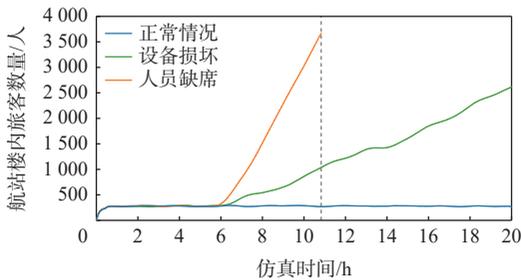


图7 航站楼内旅客数量变化

Fig. 7 Variation of number of passengers in terminal

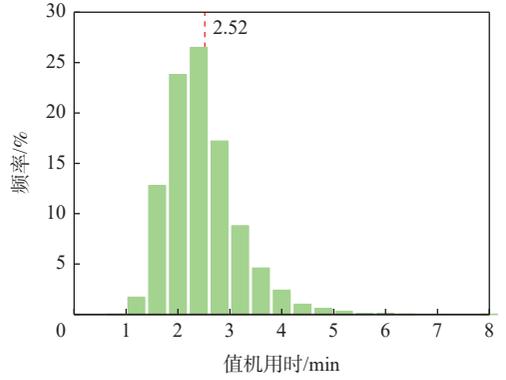
损坏,人员缺席使系统崩溃的速度更快。2种情景的系统崩溃时间分别在扰动开始后的13.92 h和4.83 h。

图8和图9分别表示设备损坏和人员缺席情景下值机服务与安检服务用时。结果表明,安检服务用时在受扰动后有大幅提升,航站楼旅客离港流程的瓶颈在于安检服务。

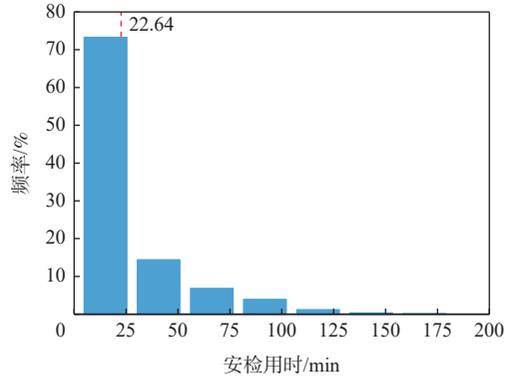
3.2 采取恢复措施情景

选取旅客系统时间为主要性能指标,安检出口每小时通过旅客数量、航站楼内旅客数量为系统恢复辅助判断指标。通过仿真得到旅客系统时间时变图,并将其转化为韧性三角形,以此为基础,计算系统的鲁棒性指标 R_1 、快速性指标 R_2 、性能损失指标 R_3 及系统综合韧性指标 R 。以人员缺席情景为例,旅客系统时间时变图如图10所示,韧性三角形如图11所示。

如图12和图13所示,系统鲁棒性指标和性能损失指标均随扰动时间和旅客到达率的升高而降



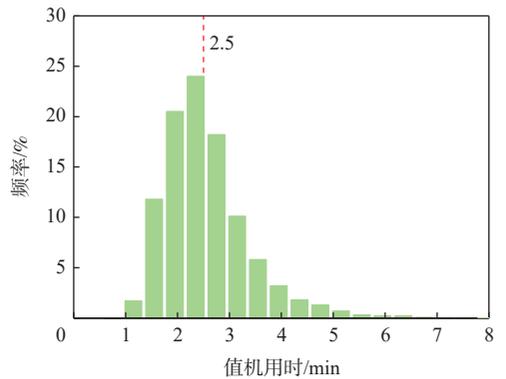
(a) 值机用时直方图



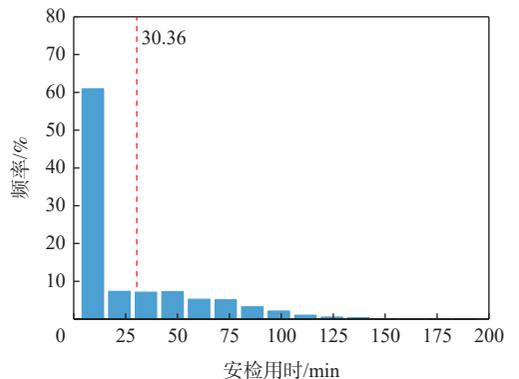
(b) 安检用时直方图

图8 设备损坏服务用时直方图

Fig. 8 Histograms of service time for equipment damage



(a) 值机用时直方图



(b) 安检用时直方图

图9 人员缺席服务用时直方图

Fig. 9 Histograms of service time for personnel absence

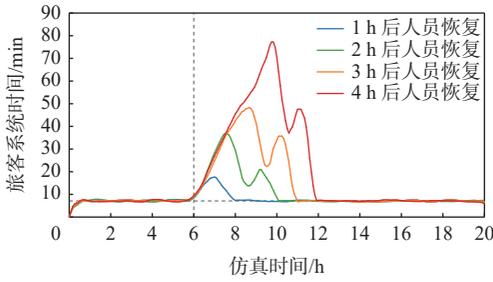


图 10 人员缺席情景下旅客系统时间曲线

Fig. 10 Curves of passenger system time during personnel absence

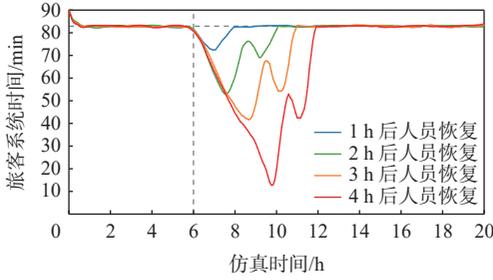


图 11 人员缺席情景下系统韧性三角形

Fig. 11 System resilience triangle during personnel absence

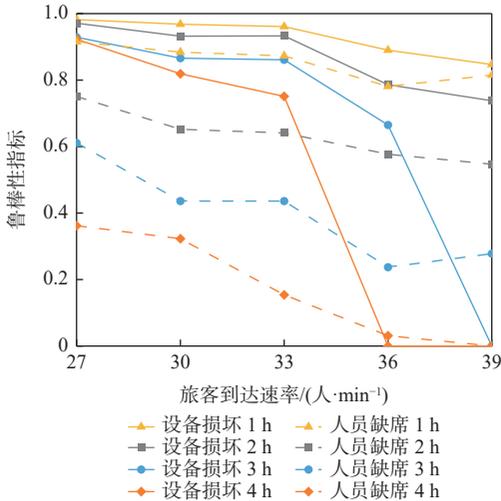


图 12 鲁棒性指标变化

Fig. 12 Variation of robustness index

低;且相比设备损坏,人员缺席情景造成的损坏更大,受扰动时间的影响更大。去除系统崩溃情景,设备损坏和人员缺席2种情景的鲁棒性指标变化范围分别为0.982~0.665、0.915~0.031,不同扰动时间之间的平均差值分别为0.062、0.225;性能损失指标的变化范围分别为0.99~0.878、0.98~0.501,不同扰动时间之间的平均差值分别为0.027、0.121。

如图 14 所示,快速性指标与扰动时间无明显关系,扰动情景为设备损坏时则会随旅客到达率升高而降低。去除系统崩溃情景,设备损坏和人员缺席2种扰动下系统快速性指标的变化范围分别为0.687~0.184、0.725~0.333。

如图 15 所示,扰动情景为设备损坏时,综合韧性指标随旅客到达率升高而降低,与扰动时间无明显

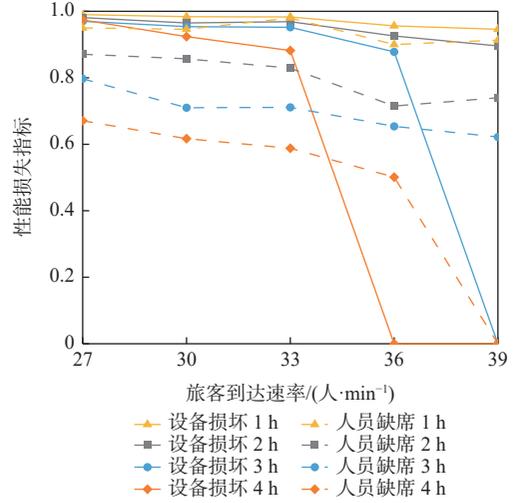


图 13 性能损失指标变化

Fig. 13 Variation of performance loss index

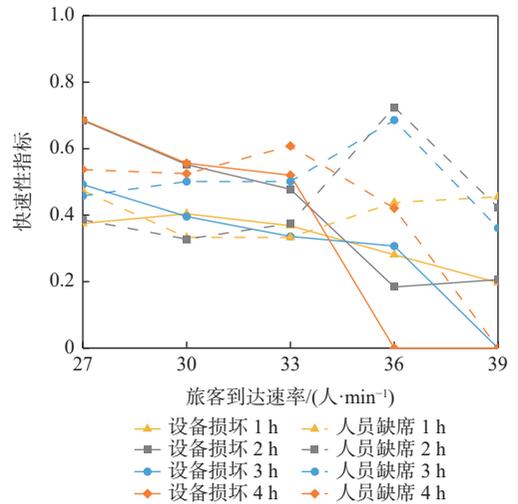


图 14 快速性指标变化

Fig. 14 Variation of rapidity index

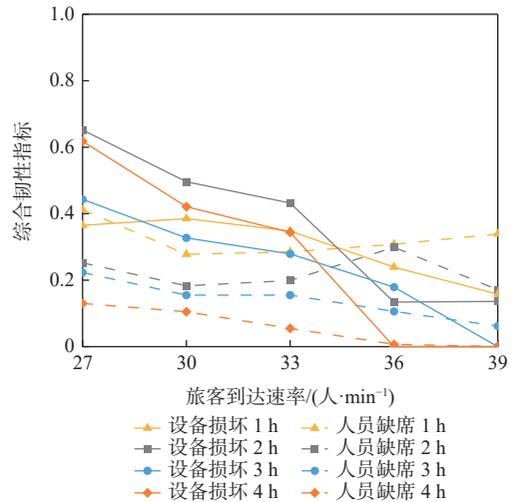


图 15 综合韧性指标变化

Fig. 15 Variation of comprehensive resilience index

显相关性。扰动情景为人员缺席时,其随扰动时间和旅客到达率的升高而降低。去除系统崩溃情景,设备损坏时系统综合韧性的最大值为0.652,最小值为0.134,人员缺席时系统综合韧性最大值为0.412,最小值为0.007。此外,综合韧性指标受系统快速性指标影响很大,提高系统尤其是其在受扰动程度较小时的恢复速度对提升系统韧性具有重要意义。

4 韧性提升策略分析

选取航站楼离港旅客按高峰日到达率到达、扰动时间为4h的极端情况,对系统采取提升安检效率及设备冗余率2种策略后的韧性情况进行分析。

4.1 提升安检效率策略

航站楼旅客离港流程的瓶颈在于安检服务,提高安检服务效率对提升系统韧性具有重要意义。对安检效率分别提升至原有水平的10%、20%、30%这3种情景进行模拟,不同安检效率下系统各韧性指标变化情况如图16所示。结果表明,安检效率提升对系统各韧性指标都有显著提升作用。对于设备损坏和人员缺席2种扰动情景,安检效率提升30%,系统综合韧性分别从原有的0.325、0.054提升至0.834、0.913。

的极端情景,分别对设备冗余率为0%、10%、20%、30%、40%这5种情景进行模拟,系统性能指标时变及韧性指标分别如图17和图18所示。

结果表明,当设备损坏率为50%且没有冗余时,系统会直接崩溃。除快速性指标外,系统鲁棒性指标、性能损失指标及综合韧性指标均会随冗余率提升而大幅升高,设备冗余率从10%到40%能使系统综合韧性水平从0.22提升到0.638。

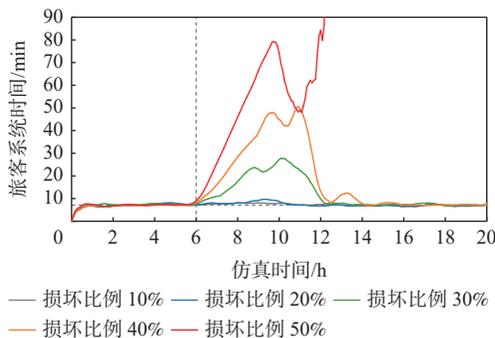


图17 系统性能指标变化

Fig. 17 Variation of system performance index

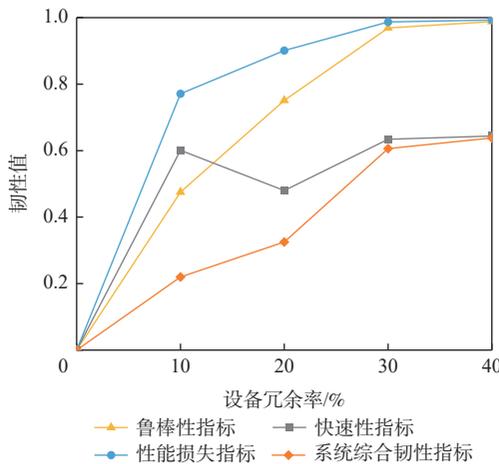


图18 系统韧性指标变化

Fig. 18 Variation of system resilience index

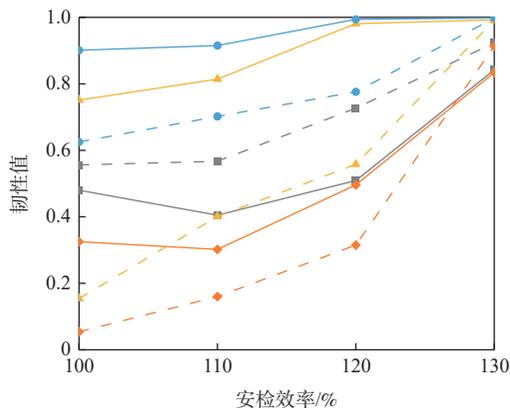


图16 提升安检效率后系统韧性指标变化

Fig. 16 Variation of system resilience index after improving security check efficiency

4.2 提升设备冗余率策略

在受扰动事件影响时,采用备用设备及人员直接替换受损部分能极大缩短恢复时间,大幅提升系统韧性。由于工作人员以班组的形式进行安检服务,其缺席率在10%~50%时对安检服务的影响相同,不对人员冗余率进行研究。设定设备损失50%

5 结论

1) 系统鲁棒性指标、性能损失指标均与扰动时间及旅客到达率呈负相关,快速性指标与其无明显相关性,综合韧性指标受快速性指标影响,与旅客到达率呈负相关,与扰动时间无明显相关性;系统韧性的最大值为0.652,最小值为0.007,分别对应旅客最大系统时间为9.32 min、87.43 min。

2) 航站楼离港旅客服务流程的瓶颈在于安检服务,对于设备损坏和人员缺席2种扰动情景,安检效率提升30%可使系统综合韧性分别从原有的0.325、0.054提升至0.834、0.913。

3) 备份设备能极大缩短恢复时间,大幅提升系

统韧性, 设备冗余率从 10% 提升到 40% 可使系统综合韧性水平从 0.22 提升至 0.638。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] CLARK K L, BHATIA U, KODRA E A, et al. Resilience of the U. S. national airspace system airport network[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(12): 3785-3794.
- [3] 王兴隆, 刘洋. 航空多层网络弹性测度与分析[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2020, 17(2): 31-38.
WANG X L, LIU Y. Resilience measurement and analysis of aviation multi-layer network[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2020, 17(2): 31-38(in Chinese).
- [4] 郭九霞. 新一代民航运输系统安全韧性理论与方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
GUO J X. Research on safety resilience theory and method for next generation air transportation system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021(in Chinese).
- [5] HUANG C N, LIOU J J H, LO H W, et al. Building an assessment model for measuring airport resilience[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2021, 95: 102101.
- [6] BAO D W, ZHANG X L. Measurement methods and influencing mechanisms for the resilience of large airports under emergency events[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2018, 14(10): 855-880.
- [7] 黄润建. 基于风险交互分析的 4F 机场灾害韧性评价研究[D]. 广州: 暨南大学, 2020.
HUANG R J. Research on 4F airport disaster resilience evaluation based on risk interaction analysis[D]. Guangzhou: Jinan University, 2020(in Chinese).
- [8] 胡明伟, 黄文柯. 行人交通仿真方法与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 75-79.
HU M W, HUANG W K. Pedestrian traffic simulation method and technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 75-79(in Chinese).
- [9] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [10] 欧阳虹彬, 叶强. 弹性城市理论演化述评: 概念、脉络与趋势[J]. *城市规划*, 2016, 40(3): 34-42.
OUYANG H B, YE Q. A review on the evolution of resilient city theory: Concept, context and tendency[J]. *City Planning Review*, 2016, 40(3): 34-42(in Chinese).
- [11] 李明捷. 机场规划与设计[M]. 北京: 中国民航出版社, 2015: 280-282.
LI M J. Airport planning and design[M]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2015: 280-282(in Chinese).
- [12] 王加冕, 陶翼飞, 罗俊斌, 等. 基于蒙特卡洛仿真的机场值机系统优化研究[J]. *软件导刊*, 2021, 20(8): 82-86.
WANG J M, TAO Y F, LUO J B, et al. Optimization of airport check-in system based on Monte Carlo simulation[J]. *Software Guide*, 2021, 20(8): 82-86(in Chinese).
- [13] 吴忠君. 航站楼旅客离港服务流程建模与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 61-63.
WU Z J. The departing service processes in terminal modeling and simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 61-63 (in Chinese).
- [14] 张浩. 航站楼离港旅客流程仿真及优化研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2018: 34-36.
ZHANG H. Simulation and optimization of passenger flow in terminal building[D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2018: 34-36(in Chinese).
- [15] 赵振武, 李新源. 基于 Anylogic 的机场旅客安检流程仿真与优化[J]. *中国民航大学学报*, 2018, 36(5): 52-55.
ZHAO Z W, LI X Y. Simulation and optimization of airport passenger security screening process based on Anylogic[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2018, 36(5): 52-55(in Chinese).
- [16] COMES T, WARNIER M, FEIL W, et al. Critical airport infrastructure disaster resilience: A framework and simulation model for rapid adaptation[J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(5): 04020059.

Terminal operation resilience analysis based on discrete event simulation

CHENG Guoyong^{*}, CHEN Shi

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

Abstract: Improving the operation resilience of the terminal is the best way to reduce the loss of people and property in an accident, mitigate the damage, and restore its function as soon as possible. At present, there is a lack of theories and techniques for quantitatively analyzing the resilience of the terminal based on the time-varying process of operation performance indicators. First, a theoretical framework of terminal operation resilience was proposed, with a comprehensive resilience index of the terminal system, which comprehensively reflected the robustness, rapidity, and system performance loss. Then, based on discrete event simulation, the resilience variation law of the terminal operation system under two disturbance scenarios of equipment damage and personnel absence, different disturbance time, and passenger arrival rates was obtained. In addition, two resilience improvement strategies were put forward to improve security check efficiency and equipment redundancy rate. The results show that the system robustness index and performance loss index are negatively correlated with disturbance time and passenger arrival rate. For the two scenarios of equipment damage and personnel absence, improving the security check efficiency increases the comprehensive resilience level of the system from the original 0.325 and 0.054 to 0.834 and 0.913, respectively, and improving the equipment redundancy rate increases the comprehensive resilience level of the system from 0.22 to 0.638.

Keywords: terminal operation; discrete event simulation; resilience theory; comprehensive resilience index; improvement strategies