

中文引用格式:齐麟,陈小林. 考虑冗余性的机场航站楼运行韧性分析方法[J]. 中国安全科学学报,2025,35(10):82-90.

英文引用格式:QI Lin, CHEN Xiaolin. Analysis method of airport terminal operation resilience considering redundancy[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 82-90.

考虑冗余性的机场航站楼运行韧性分析方法^{*}

齐麟教授,陈小林

(中国民航大学 交通科学与工程学院,天津 300300)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1768

资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600500)。

【摘要】 为保障航站楼系统的正常运行,以航站楼安检通道故障和值机柜台人员缺席事件为例,分析冗余性对航站楼运行韧性的影响。提出覆盖航站楼系统从遭受扰动到恢复全过程的韧性定义与量化方法;选取某千万级机场 T1 航站楼,基于 Anylogic 构建航站楼运行模型,分析系统有无冗余时,安检通道的故障数量、故障时长、恢复措施强度以及人工值机柜台人员缺席数量对航站楼运行韧性的影响。结果表明:当系统无冗余时,航站楼运行韧性随安检通道故障数量和人员缺席数量的增加而降低,与故障时长无明显关系,但随着恢复措施强度的增大而增大;当系统有冗余时,系统功能水平不降低或降低程度较无冗余时小,且系统韧性较无冗余性时大;而当系统具备冗余性且冗余度大于扰动强度时,系统功能水平不降低,系统韧性接近 1.0。因此,在分析系统韧性时,冗余性是不可忽视的关键要素。

【关键词】 冗余性; 机场航站楼; 运行韧性; 扰动; 恢复措施

Analysis method of airport terminal operation resilience considering redundancy

QI Lin, CHEN Xiaolin

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

Abstract: To ensure the normal operation of the airport terminal system, the impact of redundancy on operation resilience was analyzed by taking incidents such as security checkpoint failures and staff absenteeism at check-in counters as examples. A definition and quantification method for resilience, covering the entire process from system disruption to recovery, was proposed. T1 terminal of a major airport handling tens of millions of passengers annually was selected as a case study. An operation model of the terminal was constructed based on Anylogic. The influence of the number of security checkpoint failures, failure duration, recovery measure intensity, and the number of absent staff at manual check-in counters on terminal operation resilience was analyzed under scenarios with and without redundancy. The results indicate that when the system redundancy is lacking, the operation resilience of the terminal decreases as the number of security checkpoint failures and absent staff increases, shows no significant

correlation with failure duration, but improves with the enhancement of recovery measure intensity. In contrast, when the system incorporates redundancy, the functional level either remains unaffected or declines less significantly compared to the non-redundant scenario, and the system resilience is higher. Moreover, if the system possesses redundancy and the redundancy degree exceeds the disruption intensity, the functional level remains unchanged, and the system resilience approaches 1.0. Therefore, redundancy is a critical factor that cannot be overlooked in resilience analysis.

Keywords: redundancy; airport terminal; operation resilience; disruption; recovery measure

0 引言

机场航站楼是机场运行的关键环节之一,研究突发事件扰动下机场航站楼的运行韧性,对于提高机场的应急能力具有重要意义。

系统韧性为系统在受到扰动时,吸收破坏性事件的影响并从中恢复的能力^[1]。系统韧性包括抵抗性、鲁棒性、恢复性和冗余性^[2]。目前,对韧性的研究主要集中在系统的抵抗性、鲁棒性和恢复性上。MURRAY-TUITE^[3]在适应性、安全性、移动性和恢复性方面研究了交通流量分配的韧性。BERDICA^[4]基于道路交通系统的脆弱性研究了系统韧性。BRUNEAU^[5]、BAO Danwen^[6]、JANIC^[7]等基于系统脆弱性和应急响应能力分析了系统的脆弱性、应急响应能力和恢复力。HUANG Chunnen 等^[8]结合贝叶斯最佳最差法和改进的富集评价偏好排序组织法,分析了机场系统的恢复力。程国勇等^[9]建立航站楼旅客离港流程仿真模型,基于航站楼系统的鲁棒性、恢复快速性和性能损失分析航站楼系统的韧性。COMES 等^[10]研究了系统快速适应新的稳定状态的能力,提出结合短期和长期措施提高系统韧性的方法。既有研究对改进系统结构、过程和行为来提高其韧性做了大量工作,但系统冗余性的作用尚未开展充分研究。冗余性可提供额外支持^[11-12],在系统受到扰动时,系统功能水平可不降低或较少降低。

鉴于此,笔者拟基于突发事件扰动中航站楼系统功能水平的变化,提出航站楼系统的运行韧性评价方法;选取某千万级机场 T1 航站楼,基于 Anylogic 建立航站楼运行仿真模型,以安检通道、人工值机柜台与旅客流量关系为例,分析冗余性对航站楼系统的运行韧性的影响;分析安检通道故障数量、故障时长、恢复措施强度以及人工值机柜台人员缺席数量造成的冗余性变化对航站楼系统的运行韧性的影响,以期提升机场航站楼运行能力。

1 机场航站楼运行韧性

将系统功能水平在突发事件扰动下随时间变化的过程用 $P(t)$ 表示如下:

$$P(t)=\frac{\int_{t-x}^t q_d(t) dt}{\int_{t-x}^t q_a(t) dt}$$

(1)

式中: t 为时间,s; x 为间隔时间,s; $q_d(t)$ 为 t 时航站楼离港的旅客人数; $\int_{t-x}^t q_d(t) dt$ 为 $t-x$ 时到 t 时航站楼离港的旅客数量之和; $q_a(t)$ 为 t 时进入航站楼系统的旅客人数; $\int_{t-x}^t q_a(t) dt$ 为 $t-x$ 到 t 时刻到达航站楼系统的旅客数量之和。

若机场系统冗余性不足,则扰动作用下其功能水平 $P(t)$ 随时间的变化特征如图 1 所示。

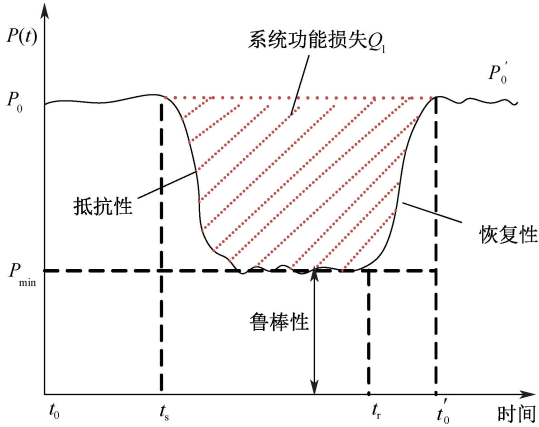


图 1 冗余性不足系统的功能水平曲线
Fig. 1 Performance level curve of redundancy insufficient system

图 1 中, t_0 时系统未受到扰动,此时系统功能水平在 P_0 上下波动, t_s 时扰动,系统功能水平下降在 $P_{\min}$ 上下波动, t_r 时系统采取恢复措施,在 t'_0 时达到新的状态 P'_0 ,与 P_0 相比 P'_0 可能更低、相等或更高。 Q_1 的计算如下:

$$Q_1=\int_{t_s}^{t'_0} P_0-P(t) dt$$

(2)

图 1 显示,出航站楼系统在突发事件扰动下表现出的抵抗性、鲁棒性和恢复性,以 R 量化航站楼的运行韧性,如下式:

$$R = \frac{\int_{t_s}^{t'_0} P(t) dt}{P_0(t'_0 - t_s)} \tag{3}$$

若系统具有冗余性,则图 1 中 $P(t)$ 曲线在扰动下不降低或降低较少,如图 2 所示。

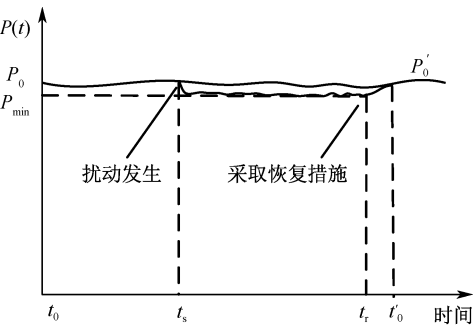


图 2 具有冗余性系统的功能水平曲线
Fig. 2 Performance level curve of redundant system

2 机场航站楼运行仿真

航站楼系统涉及旅客流量、值机、安检等复杂流程,基于 Anylogic 仿真航站楼运行的物理模型和逻辑模型。物理模型是基于航站楼的建筑平面图构建物理空间分布,各流程节点距离与航站楼实际情况相同;逻辑模型基于 Anylogic Agent(智能体),并根据航站楼各节点功能属性采用相关随机过程进行仿真。航站楼旅客离港流程如图 3 所示。

为了解突发事件对航站楼的影响,根据航站楼运行状态评估航站楼的运行韧性,在航站楼运行模型中输入旅客到达数量 q_a ,运行仿真后输出离港旅客 q_d 。

3 考虑冗余性的航站楼运行韧性分析

以某千万级机场的 T1 航站楼为例进行分析,该航站楼年旅客吞吐能力 1 500 万人次,航站楼投入使用时间较长,容易发生设备故障,而影响航站楼的运行。

3.1 模型参数

机场航站楼旅客到达服从泊松过程 Poisson

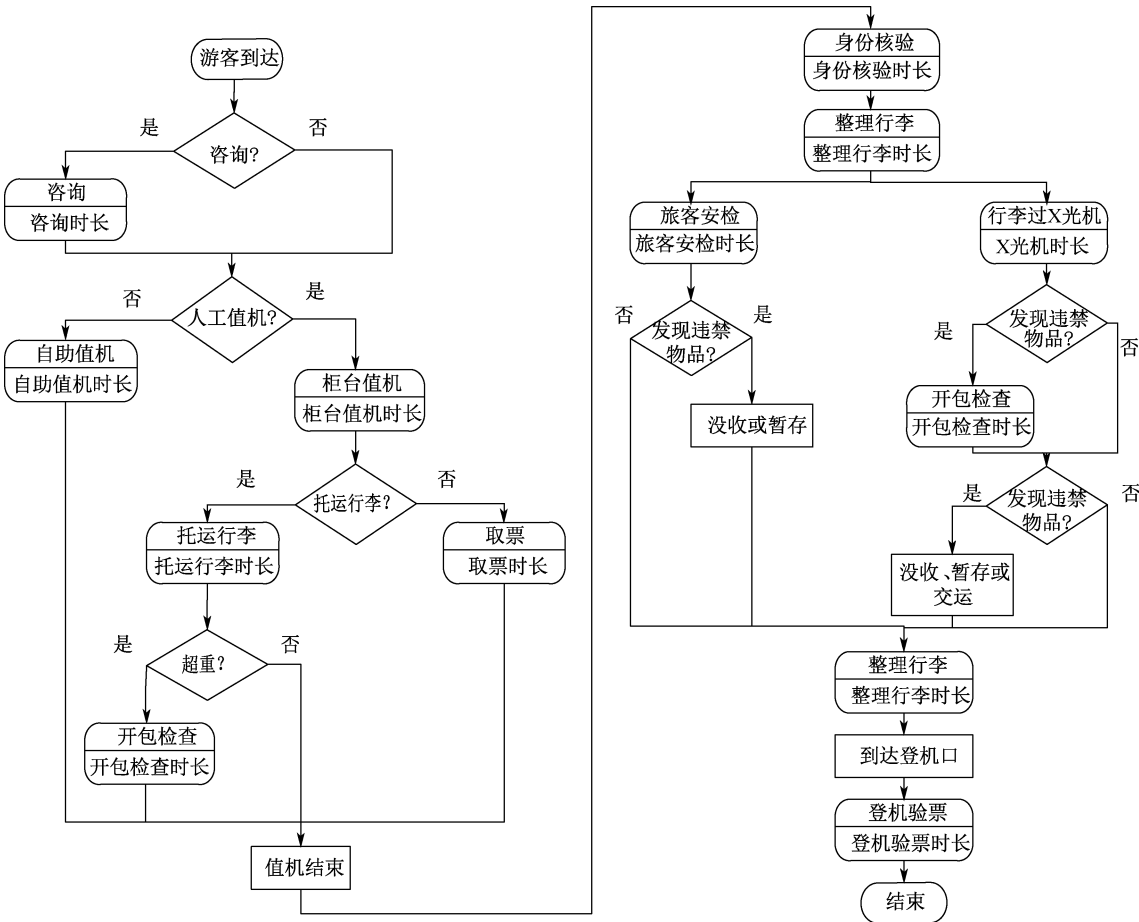


图 3 旅客离港流程
Fig. 3 Passenger departure process

(λ), 其中, λ 为一定时间内进入航站楼的旅客量^[13]。其他模型参数的概率分布以及产生比例, 通过观察法并参照文献[14]确定, 具体参数见表 1。

表 1 航站楼内基本信息及流程详细参数

Table 1 Basic information and detailed process parameters in terminal building

服务流程	数量	参数	服从分布/s	产生比例/%
自助值机服务	28	是否自助值机	—	是 20; 否 80
		自助值机时长	triangular (25, 75, 30)	
人工柜台值机服务	72	柜台值机时长	uniform(10, 15)	
		是否托运行李	—	是 65; 否 40
		托运行李时长	uniform(10, 40)	
		取票时长	uniform(5, 10)	
		行李是否超重或违禁		是 5; 否 95
		超重或违禁行李处理时长	uniform (60, 120)	

续表 1

服务流程	数量	参数	服从分布/s	产生比例/%
安检通道	13	核验登机牌及证件时长	uniform (10, 15)	
		整理行李时长	triangular (20, 30, 25)	
		旅客安检时长	uniform (25, 40)	
		行李是否开包	—	是 95; 否 5
		行李再次安检时长	triangular (30, 70, 40)	
		提取行李时长	triangular (20, 30, 25)	
登机口	30	登机验票时长	uniform(5, 15)	

表 1 中, $\text{triangular}(t_1, t_2, t_3)$ 代表三角分布, 其中, t_1, t_2, t_3 为旅客服务时长的最小值、最大值以及众数, 在区间 $[t_1, t_3]$ 为线性增加, 在区间 $[t_3, t_2]$ 为线性减少; $\text{uniform}(t_4, t_5)$ 代表均匀分布, 其中, t_4, t_5 为旅客服务时间最小值和最大值。

仿真运行从 4:00:00 到第 2 天 0:00:00 共 20 h,旅客在航班起飞前 40 min 开始登机,Anylogic

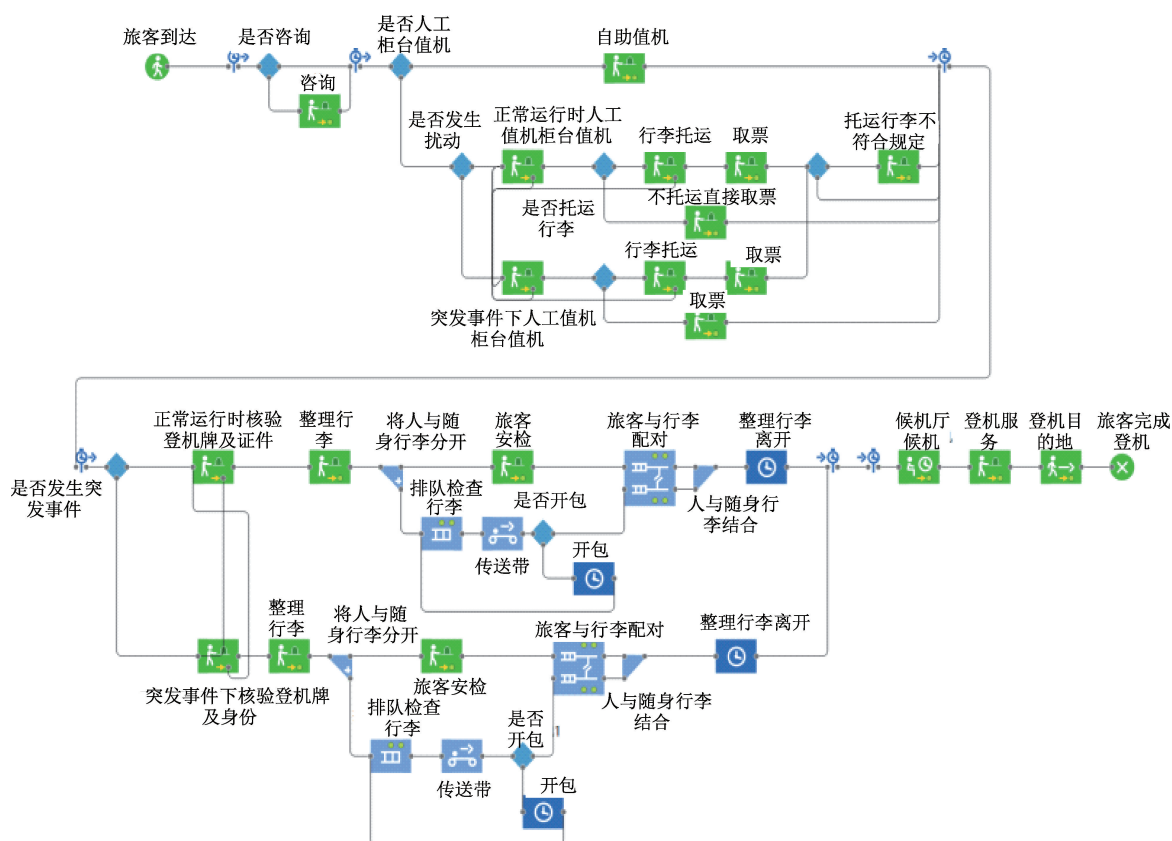


图 4 Anylogic 模型

Fig. 4 Anylogic model

模型如图4所示。

3.2 航站楼系统运行能力的冗余性分析

航站楼系统的冗余性与旅客到达数量和航站楼运行能力相关。系统冗余性使航站楼在突发事件中保持功能水平(图2),当旅客流量达到或超过航站楼系统最大运行能力时,系统冗余性丧失,在扰动下功能水平下降,此时系统韧性主要体现为抵抗性、鲁棒性和恢复性(图1)。

通过不断增加到达旅客数量来确定航站楼系统的最大运行能力。 λ 初始值设定为30,增量为0.2,旅客以 q_a 到达航站楼系统,通过仿真模拟,记录单位时间输出的旅客量 q_d ,航站楼系统的运行能力如图5所示。

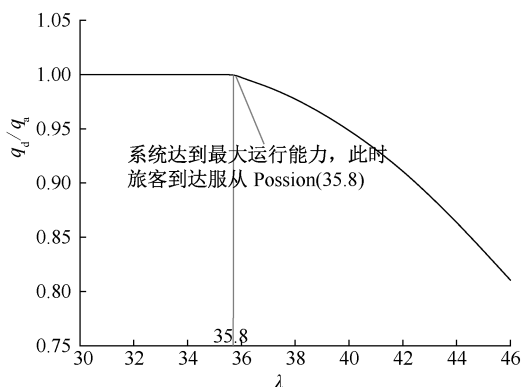


图5 航站楼系统的运行能力

Fig.5 Operation capacity of terminal system

由图5可知:当 $\lambda \leq 35.8$ 时, $q_d/q_a = 1.0$,说明此时航站楼系统运行能力有冗余,旅客到达人数低于航站楼系统的最大运行能力;当 $\lambda > 35.8$ 时, $q_d/q_a < 1.0$,此时航站楼系统运行能力无冗余,旅客到达人数超过航站楼系统的最大运行能力,产生排队,此时安检通道数量为13条,人工值机柜台开放数量为30台。

到达旅客流量不变,以安检流程为例,设置安检通道总数量分别为11、12、13、14、15,利用式(1)计算系统功能水平函数 $P(t)$ 随时间变化的情况,结果如图6所示。

由图6可知:当安检通道数量小于13条时,安检通道无冗余, $P(t)$ 小于1.0,产生排队,曲线波动小,安检通道数量越少系统功能水平 $P(t)$ 越小;安检通道数量等于或超过13条时, $P(t)$ 在1.0上下波动,波动幅度变大,由于安检通道有冗余,系统旅客数量随旅客到达数量变化。综上所述,冗余性对航站楼系统的功能水平有较大影响,当系统无冗余时,

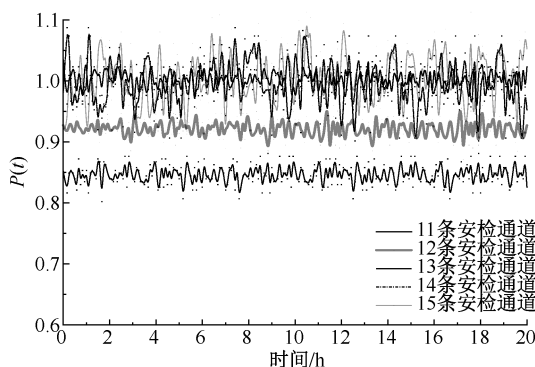


图6 系统功能水平曲线

Fig.6 System performance level curve

即使不发生扰动,系统功能水平 $P(t)$ 也小于1.0。

3.3 考虑冗余性的航站楼系统运行韧性

通过安检通道数量和值机柜台数量变化讨论冗余性对航站楼系统运行韧性影响,分析可知:拥有13条安检通道、开放30台人工值机柜台的算例,航站楼在到达旅客服从Poisson(35.8)时达到最大运行能力,通过改变安检通道故障数量、安检通道故障时长、安检通道故障时间、恢复措施强度以及人工值机柜台人员缺席数量,分析冗余性对航站楼系统的运行韧性影响。

3.3.1 不同安检通道故障数量下冗余性影响

系统到达旅客服从Poisson(35.8),设置安检通道分别为13、16,安检通道为13时系统没有冗余性;安检通道为16时系统具有冗余性。2个系统安检通道故障数量均设置为1、2、3、4、5条,均在仿真第4h发生故障,2h后全部恢复。根据仿真数据利用式(1)得到航站楼系统功能水平函数 $P(t)$ 的变化情况如图7所示。

由图7a可知:正常运行时,系统功能水平 P_0 在1.0上下波动;安检通道发生故障后, $q_a > q_d$,安检产生排队,系统功能水平 $P(t)$ 下降,随安检通道故障数量增加,航站楼系统功能水平曲线下降程度增大;采取恢复措施后,系统功能水平 $P(t)$ 恢复,在1.0上下波动,排队不会消减。由图7b可知:正常运行时,系统功能水平 P_0 在1.0上下波动;安检通道发生故障后,系统功能水平 $P(t)$ 不降低或降低程度较无冗余时小;采取恢复措施后,系统功能水平 $P(t)$ 大于1.0,排队消减后,系统功能水平 $P(t)$ 恢复到1.0上下波动。综上所述,系统无冗余时,系统功能水平下降程度随扰动强度增大而增大,而系统有冗余时,系统功能水平不降低或降低程度较无冗余时小。

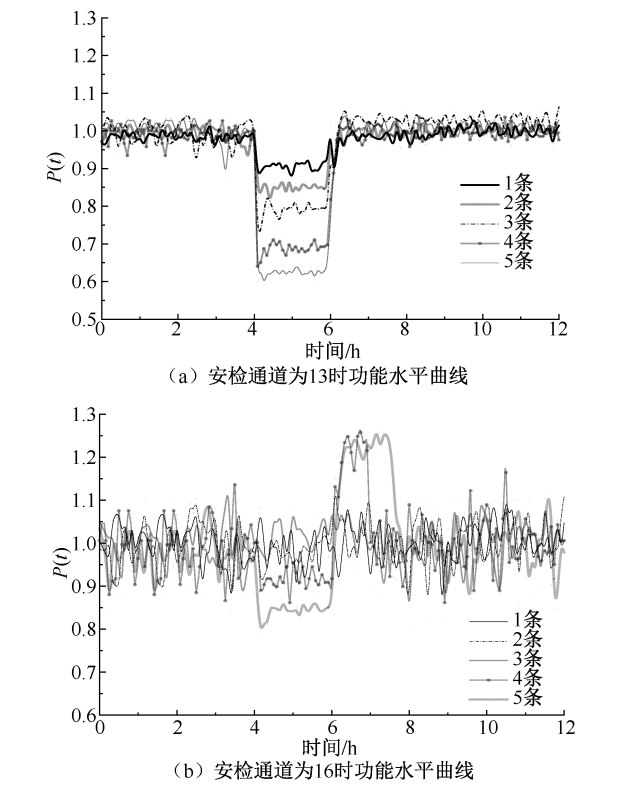


图 7 不同安检通道下功能水平曲线

Fig. 7 Performance level curve under different security channels

根据功能水平曲线,分析航站楼系统的运行韧性,得到不同安检通道故障数对应的 Q_1 、 R 值,见表 2。

表 2 不同数量安检通道故障下航站楼系统的 Q_1 、 R 值
Table 2 Q_1 and R values of terminal system under different number of security channel failures

安检通道故障数/条	1	2	3	4	5
无冗余 Q_1	0.167	0.296	0.622	0.768	0.933
有冗余 Q_1	0.004	0.042	0.03	0.161	0.295
无冗余 R	0.923	0.863	0.797	0.713	0.645
有冗余 R	0.998	0.981	0.986	0.926	0.864

由表 2 可知:无冗余情况下, R 值随安检通道故障数量增加呈现下降趋势, Q_1 逐渐增大。在安检通道有 3 条冗余通道的情况下,当安检通道故障总数量小于等于 3 条时, R 值和 Q_1 没有明显变化, R 值接近 1.0, Q_1 值接近 0;当安检通道故障总数量大于 3 条时, R 值随安检通道故障数量增加呈现下降趋势, Q_1 逐渐增大。综上所述,在安检通道有冗余时,航站楼系统的运行韧性 R 值较无冗余时大,系统功能损失 Q_1 较无冗余时小。

3.3.2 安检通道故障不同时长下冗余性影响

系统旅客到达服从 Possion(35.8),在安检通道

总数量为 13、16,安检通道故障数量 4 台,在仿真第 4 h 发生故障,故障通道分别在 1、2、3、4 h 后全部恢复,系统功能水平函数 $P(t)$ 的变化情况如图 8 所示。

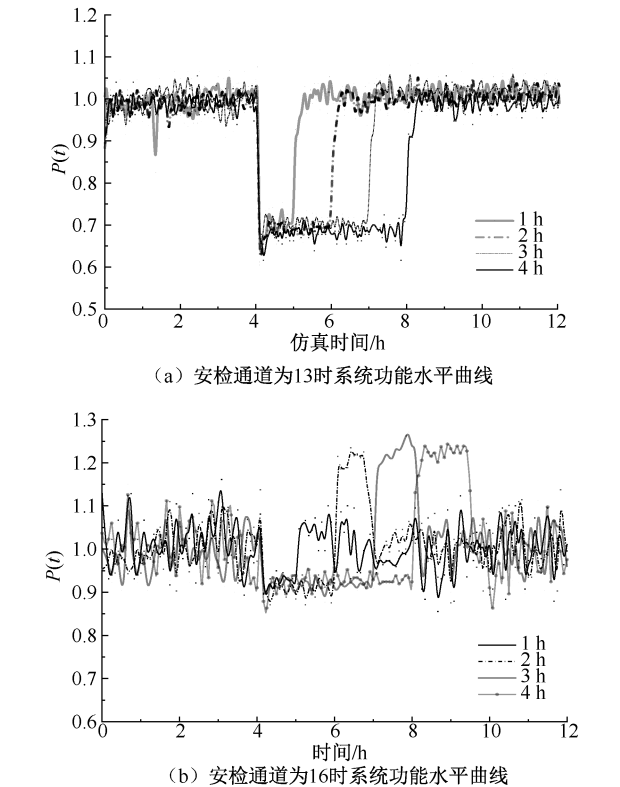


图 8 不同安检通道下系统功能水平曲线

Fig. 8 System performance level curves under different security channels

由图 8 可知:安检通道发生故障后, $q_d < q_a$,产生排队,系统功能水平 $P(t)$ 下降。在安检通道无冗余的情况下,系统功能水平下降程度与故障时长无关,但系统功能低水平运行时长随故障时长增加而增加;在安检通道有冗余的情况下,系统功能水平下降程度较无冗余时小,采取恢复措施后,由于安检通道有冗余,此时 $q_d > q_a$,系统功能水平 $P(t)$ 大于 1.0,排队旅客逐渐消减,系统功能水平 $P(t)$ 在 1.0 上下波动。

利用式(2)一式(3)评估 2 种情况下的韧性,结果见表 3。

表 3 不同故障时长下航站楼系统的 Q_1 、 R 值
Table 3 Q_1 and R values of terminal system under different fault durations

故障时长/h	1	2	3	4
无冗余 Q_1	0.301	0.622	0.909	1.211
有冗余 Q_1	0.059	0.165	0.242	0.284
无冗余 R	0.731	0.713	0.720	0.715
有冗余 R	0.949	0.924	0.923	0.932

由表3可知: Q_1 随扰动时长增加而增加,说明系统旅客滞留量随故障时长增加而增加。在扰动程度相同情况下,系统运行韧性 R 值与故障时长没有明显关系。原因是选取的 t'_0 为采取恢复措施后首次达到新稳定状态 P'_0 时对应的时刻,且 R 值是故障与正常运行情况下的系统功能水平 $P(t)$ 的面积之比,是一个相对值。此外,安检通道无冗余时, R 值在0.713~0.731波动,安检通道冗余时, R 值在0.923~0.949波动,说明在安检通道有冗余情况下, R 值较系统无冗余时大。

3.3.3 不同安检通道故障时间下冗余性影响

系统旅客到达服从Poisson(35.8),安检通道总数量为13、16,在仿真第4h发生2条安检通道故障,在仿真第5h再发生2条安检通道故障,故障通道在第6、7h分别恢复2条,进行仿真模拟,得到系统功能水平函数 $P(t)$ 的变化情况如图9所示。

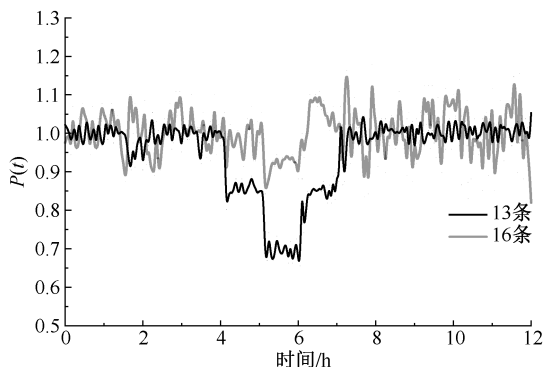


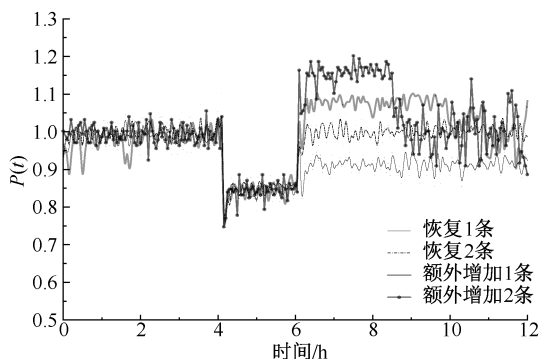
图9 系统功能水平曲线

Fig. 9 System performance level curve

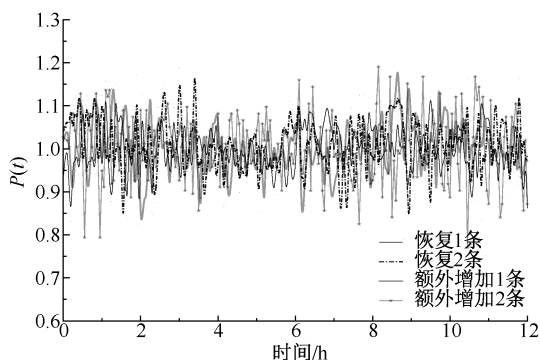
由图9可知:在安检通道故障总数量为2的情况下,无冗余时, $P(t)$ 下降;有冗余时, $P(t)$ 不降低。1h后安检通道故障增加为4的情况下,无冗余时, $P(t)$ 下降程度更大;有冗余时, $P(t)$ 才下降且下降程度较无冗余时小。计算 Q_1 、 R 值,当安检通道无冗余时, Q_1 、 R 值分别为0.807、0.596;当安检通道有冗余时, Q_1 、 R 值分别为0.991、0.028,所以在不同时刻发生相同程度故障情况下,系统有冗余性时, R 值较系统无冗余性时大, Q_1 较系统无冗余性时小。

3.3.4 不同恢复措施强度下冗余性影响

系统旅客到达服从Poisson(35.8),安检通道总数量为13、16,安检通道故障数量2条,在仿真第4h发生故障,2h后采取恢复措施,恢复原故障安检通道1、2条以及额外增加1、2条安检通道,通过仿真数据得到系统功能水平函数 $P(t)$ 的变化情况如图10所示。



(a) 安检通道为13时系统功能水平曲线



(b) 安检通道为16时系统功能水平曲线

图10 不同安检通道下系统功能水平曲线

Fig. 10 System performance level curves under different security channels

由图10b可知:在安检通道有冗余且冗余度大于安检通道故障数量的情况下,发生扰动后,系统功能水平 $P(t)$ 无明显变化。由图10a可知:在安检通道无冗余情况下,扰动发生后,系统功能水平 $P(t)$ 下降, $q_d < q_a$,产生排队现象,在2h后采取不同强度的恢复措施,当恢复安检通道故障数量小于2时,系统功能水平 $P(t)$ 上升,此时 $P'_0 < P_0$,排队旅客持续增加,但增加速度减小;当恢复安检通道数量等于2时,系统功能水平 $P(t)$ 恢复到原有水平1.0,即 $P'_0 = P_0$,排队旅客量保持平衡且不会消减;当故障安检通道完全恢复且额外增加安检通道时,系统功能水平 $P(t)$ 大于1.0,即 $P'_0 > P_0$,排队旅客逐渐消减,额外增加安检通道数量越多排队旅客消减越快。

根据功能水平函数 $P(t)$, t'_0 取相同值,分析航站楼系统性能见表4。

由表4可知:冗余情况下, R 值在0.976~1.0波动,接近1.0, Q_1 在0~0.083波动,接近0。无冗余情况下,随着恢复措施强度增大, R 值增大, Q_1 减小。综上所述,当系统无冗余性时,不同恢复措施强度对航站楼系统的功能水平恢复效果不同。随着恢复措施强度不断增大,航站楼系统的运行韧性 R 值

表 4 不同强度恢复措施下航站楼系统的 Q_1 、 R 值

Table 4 Q_1 and R values of terminal system under different strength restoration measures

恢复措施	恢复 1 条	恢 复 2 条	额外增加 1 条	额外增加 2 条
无冗余 Q_1	0.442	0.296	0.207	0.104
有冗余 Q_1	0.000	0.042	0.083	0.000
无冗余 R	0.863	0.874	0.941	0.970
有冗余 R	1.000	0.981	0.976	1.000

随之增大,系统功能损失 Q_1 会减小。只有恢复措施强度大于扰动强度时,才能逐渐消减突发事件扰动所带来的负面影响,并且恢复措施强度越大,负面影响消减的速度越快。当系统有冗余性且冗余度大于扰动强度时,系统功能水平 $P(t)$ 不降低,航站楼系统的运行韧性 R 值接近 1.0,航站楼系统的运行韧性增大。

3.3.5 不同数量人员缺席下冗余性影响

系统到达旅客服从 $Possion(35.8)$,开放人工值机柜台数量分别为 30、32 台,人工值机柜台 30 时,系统无冗余性;人工值机柜台 32 时,系统具有冗余性。人员缺席数量为 0、2、4、6、8 人,均在仿真第 2 h 发生故障,2 h 后全部恢复。根据仿真数据利用式(1)得到航站楼系统功能水平函数 $P(t)$ 的变化情况,如图 11 所示。

由图 11 可知:系统扰动发生后,无冗余情况下,随着人员缺席数量增加, $P(t)$ 下降程度增大,采取恢复措施后, $P(t)$ 恢复到初始水平;冗余情况下,当人员缺席少于 4 人时, $P(t)$ 不降低,在 1.0 上下波动,只有当人员缺席大于 4 时, $P(t)$ 降低,降低程度较无冗余时小,值机产生排队,采取恢复措施后, $P(t)>1.0$,此时旅客排队逐渐消减直至达到初始水平, $P(t)$ 恢复到初始水平。利用式(2)一式(3)评估 2 种情况下的韧性计算结果,见表 5。

表 5 不同数量人员缺席下航站楼系统的 Q_1 、 R 值

Table 5 Q_1 and R values of terminal system under scenarios of different numbers of personnel absence

人员缺席数量/人	0	2	4	6	8
无冗余 Q_1	0	0.018	0.125	0.270	0.467
有冗余 Q_1	0	0.010	0.001	0.164	0.312
无冗余 R	1	0.991	0.937	0.865	0.766
有冗余 R	1	0.995	0.999	0.925	0.858

由表 5 可知:无冗余情况下,随着人员缺席数量增多, R 值减小, Q_1 增大。冗余情况下,当人员缺席小于 4 人时, R 值在 1.0 上下波动, Q_1 接近 0,说明

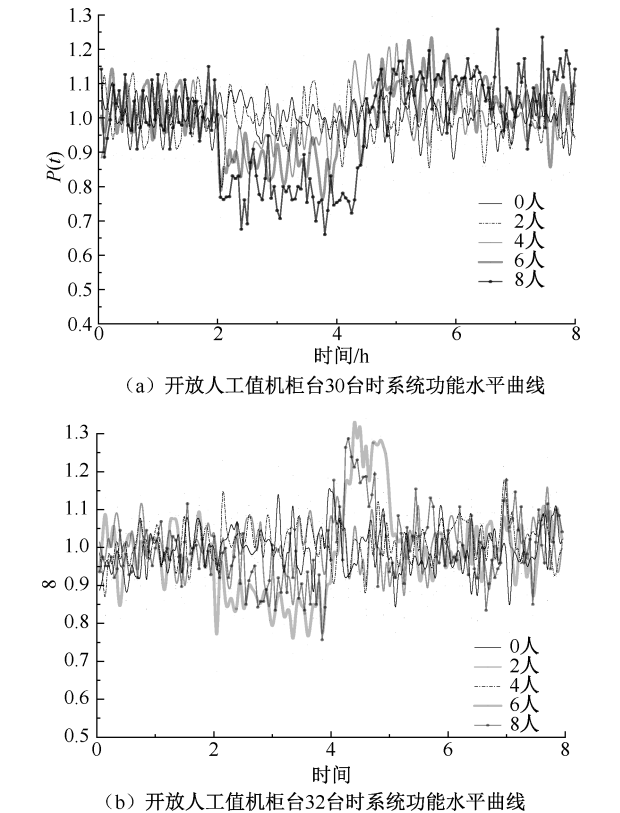


图 11 不同开放人工值机柜台下系统功能水平曲线
Fig. 11 System performance level curve under different numbers of open manual check-in cabinets

人工值机柜台冗余消减了人员缺席带来的影响;当人员缺席数量大于 4 人时, R 值从 0.999 下降到 0.858, Q_1 从 0.001 增加到 0.312,说明冗余性不足,航站楼系统的运行韧性 R 值随人员缺席数量增加而降低,系统功能水平 Q_1 增加。

基于上述分析方法,通过调研发现,该机场 20:00—24:00 点旅客到达量约为 600 人/h,服从泊松分布 $Possion(10)$,基于此旅客到达流量,多次模拟,得到开放 4 条安检通道、8 台人工值机柜台就能够满足系统功能水平 $P(t)$,达到最佳运行状态且系统冗余度足够大,系统运行韧性 R 值为 1.0,系统功能损失 Q_1 为 0。综上所述,航站楼系统运行韧性分析方法可用于指导航站楼人员安排和设备运行。

4 结 论

1) 冗余性可明显提升航站楼的运行韧性。当系统具备冗余性(如安检通道数量或开放值机柜台数量超过运行需求)时,遭遇扰动(如通道故障或人员缺席)下系统功能水平下降幅度显著小于无冗余系统;在冗余度大于扰动强度时系统功能水平维持不变,从而使系统韧性值显著高于无冗余状态,功能

损失显著降低。

2) 恢复措施强度对无冗余系统的韧性恢复具有重要作用。对于无冗余系统,恢复措施强度(如修复故障通道数量或额外增开通道数量)直接影响韧性恢复效果。恢复措施强度越大,系统韧性恢复值越高,功能损失越小。当恢复措施强度超过扰动强度时,可有效消减扰动累积的负面影响(如排队旅客),且强度越大消减速度越快。

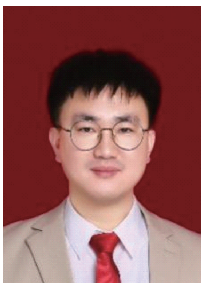
3) 冗余度与扰动强度匹配方能发挥最大效用。

当扰动强度(如故障通道数或缺席人员数)超过系统冗余度时,系统功能水平仍会下降,韧性值降低,功能损失增加,但其下降幅度和损失程度仍优于同等扰动下的无冗余系统。

4) 基于功能水平曲线和韧性量化指标,能够有效评估不同资源配置(冗余度)和应急策略(恢复强度)下的航站楼运行韧性,可用于指导航站楼在不同旅客到达率下的人员安排和设备运行优化策略,在保障运行的同时实现资源高效利用。

参考文献

- [1] 齐麟,怀永成,戴克娟,等. 气象灾害下民航机场韧性指数研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 20-28.
QI Lin, HUAI Yongcheng, DAI Kejuan, et al. Study on resilience index of civil aviation airports under meteorological disasters[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 20-28.
- [2] HOSSEINI S, BARKER K, RAMIREZ-MARQUEZ J E. A review of definitions and measures of system resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2016, 145: 47-61.
- [3] MURRAY-TUITTE P M. A comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions[C]. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. IEEE, 2006: 1 398-1 405.
- [4] BERDICA K. An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy, 2002, 9(2): 117-127.
- [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] 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.
- [7] JANIC M. Analysis and modelling of airport resilience, robustness, and vulnerability: impact of COVID-19 pandemic disease[J]. The Aeronautical Journal, 2022, 126(1305): 1 924-1 953.
- [8] HUANG Chunnen, LIU J J H, LO Huaiwei, et al. Building an assessment model for measuring airport resilience[J]. Journal of Air Transport Management, 2021, 95; DOI:10. 1016/j. jairtraman. 2021. 102101.
- [9] 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): 3 310-3 318.
CHENG Guoyong, CHEN Shi. Terminal operation resilience analysis based on discrete event simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(11): 3 310-3 318.
- [10] COMES M, 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): DOI:10. 1061/(ASCE)ME. 1943-5479. 0000798.
- [11] OSDER S. Practical view of redundancy management application and theory[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1999, 22(1): 12-21.
- [12] GRONAU Q F, MORAN R, EIDELS A. Efficiency in redundancy[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): DOI: 10. 1038/s41598-024-68127-x.
- [13] 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 Jiamian, TAO Yifei, LUO Junbin, et al. Optimization of airport check-in system based on Monte Carlo simulation[J]. Software Guide, 2021, 20(8): 82-86.
- [14] 史佳洁. 机场航站楼旅客保障流程仿真优化研究[D]. 天津:天津理工大学, 2022.
SHI Jiajie. Simulation and research on passenger support process of airport terminal[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.



作者简介: 齐麟 (1982—),男,山西太原人,博士,教授,主要从事机场工程方面的研究。E-mail:qilin1208@vip. 163. com。