

文章编号:1671-1637(2026)06-0221-18

考虑动态接收效率的机场枢纽震后 物资接收性能评估

侯宗昊, 李 钢*

(大连理工大学 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:为科学评估震后机场枢纽的应急物资接收能力,针对传统静态评估方法在时变性和系统动态响应方面的不足,提出了机场物资接收效率指数(MREI),结合工程系统韧性理论与动态效率,构建了全周期机场震后应急物资接收能力评估框架;基于MREI量化实际与理想物资接收累积量的时变偏差,实现震后机场物资接收能力的动态评估,实时反映设备损伤、动态调度及资源交互对接收效率的影响;构建了多智能体模型,通过模拟设备损伤、动态调度及资源交互对物资接收的影响,实现MREI的量化计算;模型集成了贝叶斯网络以量化子系统功能,并采用蒙特卡洛方法模拟地震不确定性。案例分析表明:借助MREI,可有效揭示地面峰值加速度、机型比例及进场间隔时间对接收能力的影响规律;机场震后物资接收能力随强度增加逐渐降低,且4E机场普遍优于4D机场;当4E机场大型机占比超0.7、4D机场超0.4时,各自接收能力均显著衰减;4E机场在2 000 t理想物资接收需求下,存在最优进场间隔区间(16~19 min),可使MREI维持在0.8以上,且物资接收总用时较最小间隔(3 min)缩短了23%。MREI弥补了传统吞吐量、备降航班等静态指标的不足,可为震后应急决策提供“损伤评估-功能计算-动态模拟-策略优化”一体化量化工具,其动态评估能力亦可为交通枢纽韧性研究提供有益的方法支撑。

关键词:航空运输;物资接收效率指数;多智能体模型;机场应急物资接收系统;地面峰值加速度;机场枢纽

中图分类号:U115

文献标志码:A

DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.028

Performance evaluation of post-earthquake material reception in airport hubs considering dynamic receiving efficiency

HOU Zong-hao, LI Gang*

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: To scientifically evaluate the emergency material reception capacity of airport hubs after earthquakes, the material receiving efficiency index (MREI) was proposed in response to the shortcomings of traditional static evaluation methods in terms of time-varying characteristics and system dynamic response. Combined with engineering system resilience theory and dynamic efficiency, a full-cycle evaluation framework for post-earthquake airport emergency material

出版历程:2025-04-03 收稿,2025-07-04 修回,2025-08-25 录用

基金项目:国家自然科学基金项目(52225804,52038002);中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT25RW305)

作者简介:侯宗昊(1995-),男,黑龙江齐齐哈尔人,工程博士研究生,E-mail:housh@mail.dlut.edu.cn.

*通信作者:李 钢(1979-),男,辽宁大连人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:gli@dlut.edu.cn.

引用格式:侯宗昊,李 钢.考虑动态接收效率的机场枢纽震后物资接收性能评估[J].交通运输工程学报,2026,26(6):221-238.

Citation:HOU Zong-hao, LI Gang. Performance evaluation of post-earthquake material reception in airport hubs considering dynamic receiving efficiency[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(6): 221-238.

reception capacity was established. The dynamic evaluation of post-earthquake airport material reception capacity was realized by quantifying the time-varying deviation between actual and ideal cumulative material received based on MREI. The impact of equipment damage, dynamic scheduling, and resource interaction on receiving efficiency was reflected in real time. A multi-agent model was constructed to enable the quantitative calculation of MREI by simulating the impact of equipment damage, dynamic scheduling, and resource interaction on material reception. The model integrates a Bayesian network to quantify the functional status of subsystems, and adopts the Monte Carlo method to simulate seismic uncertainty. The case analysis shows that based on MREI, the impact law of peak ground acceleration, aircraft type ratio, and arrival interval on reception capacity can be effectively revealed. Post-earthquake airport material reception capacity decreases gradually with higher strength, and 4E airports are generally superior to 4D ones. When the proportion of large aircraft exceeds 0.7 (for 4E airports) and 0.4 (for 4D airports), the reception capacity attenuates significantly. For 4E airports with an ideal material reception demand of 2 000 t, there exists an optimal arrival interval range (16 - 19 min). This range allows MREI to be maintained above 0.8, and shortens the total material reception time by 23% compared with the minimum interval (3 min). MREI overcomes the limitations of traditional static indexes such as throughput and the number of flight diversions, and provides an integrated quantitative tool of “damage assessment-function calculation-dynamic simulation-strategy optimization” for post-earthquake emergency decision-making. Its dynamic evaluation capability also offers valuable methodological support for research on transportation hub resilience.

Keywords: air transportation; material reception efficiency index; multi-agent model; airport emergency material reception system; peak ground acceleration; airport hub

Publication history: Received 2025-04-03; Received in revised form 2025-07-04; Accepted 2025-08-25

Funding: National Natural Science Foundation of China (52225804, 52038002); Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT25RW305)

* **Corresponding author:** LI Gang, professor, PhD, E-mail: gli@dlut.edu.cn.

0 引 言

机场作为城市对外物资运输的关键枢纽,在震后应急救援中发挥核心作用^[1],强震作用下,其设施易产生物理损坏,进而引发功能失效的连锁反应。例如,2023 年土耳其地震中,哈塔伊机场因跑道断裂、土壤液化导致运输中断^[2];2010 年海地地震中,太子港机场因设备损坏引发机坪拥堵,导致接收效率骤降^[3]。这类设施失效(跑道断裂、设备损坏等)不仅阻断救援通道,还可能引发城市物资短缺、调配混乱等次生风险^[4]。因此,量化设备物理损伤对接收效率的影响、构建震后物资接收性能评估方法、提出效率优化策略,对提升应急救援网络韧性、保障城市安全运行和震后快速恢复具有重要意义。

机场作为物资运输网络的核心节点,其效率评估在常规运营与应急响应场景中均具有重要意义。

现有研究针对机场效率提出了多维度的评估指标体系,主要包括吞吐量、延误时间、航班正常率等核心指标。例如,在常规运营场景下,吞吐量(单位时间内处理的货物或旅客数量)与航班正常率(实际准点航班占比)是衡量机场运行效率的关键指标^[5-6]。而在应急响应阶段,研究进一步引入了吸收能力、适应能力与恢复速度等动态指标,王兴隆等^[7]构建的韧性评估框架包含吸收能力、恢复速度等维度,用于评估恶劣天气下航班运行韧性;Zhou 等^[8]通过恢复时间量化机场在恶劣天气中的适应与抵御能力。此外,部分研究结合人道主义物流需求,提出了物资处理效率、应急设施利用率等针对性指标,强调了应急设施利用率对物资处理效率的影响^[1]。随着研究深入,学者们开始关注多目标协同优化问题。例如,Huang 等^[9]提出将资源分配公平性纳入评估体系,通过基尼系数量化不同物资类型的处理优先级差

异;Wang等^[10]则引入环境效率指标,评估机场运行对碳排放的影响。在应急响应场景中,研究进一步扩展了指标维度。陈仔燕^[11]提出了应急响应速度指数,结合物资到达时间与需求紧迫性进行动态评估;Veatch等^[3]开发了系统脆弱性指数,通过分析设备故障概率与影响范围量化机场抗风险能力。然而,现有评估体系在震后应急物资接收场景中存在一定的局限性。首先,现有研究多基于静态或周期性数据采集,难以实时反映应急物资需求激增、设备损伤随时间演化、航班调度动态调整等多因素耦合对接收效率的影响,需要实时量化效率波动。其次,指标依赖既有航班时刻表。现有评估框架通常假定航班按计划执行,未考虑应急状态下航班调度的灵活性与随机性。最后,指标缺乏横向对比能力。不同研究采用的指标体系差异较大,且未充分考虑机场规模、地理位置及基础设施差异,导致评估结果难以跨场景或跨区域比较。

机场运行模拟是量化机场效率指标的重要内容,近年来,机场运行模拟方法的研究主要聚焦于高精度仿真、智能算法与动态优化、多主体协同建模等领域,广泛采用离散事件模拟、系统动力学模型及多主体仿真等技术对机场运行进行模拟。Comes等^[5]通过离散事件仿真构建了机场灾害冲击下的性能恢复曲线,揭示了吸收能力与适应能力的动态变化规律;Zámková等^[12]基于分类数据统计分析,通过离散事件模拟优化了机场货站资源配置,验证了仿真方法在流程效率评估中的有效性;Gołda等^[13]使用AnyLogic仿真工具,量化了机场流程的效率与可靠性,为动态指标评估提供了技术支持。在应急场景中,研究进一步引入了灾害冲击下的动态响应模型。Hanaoka等^[14]通过东日本大地震案例验证了系统动力学模型在分析机场应急容量恢复中的应用潜力;Damgacioglu等^[15]提出基于路线的机场地面系统中断网络仿真框架,量化了局部设备故障对于整体运行效率的影响。此外,智能算法与实时数据融合技术开始被应用于模拟优化,如通过遗传算法优化离场航班排序,使延误时间大幅下降^[7],还有通过实时非迭代排序模型有效缩短了飞机的起飞等待时间^[16]。然而,目前机场运行模拟方法在地震情境下的应急功能模拟仍有欠缺。首先,设备损伤建模粗糙,已有模型多假设设备完全可靠或仅考虑随机故障,未在模拟中纳入物理损伤对系统的影响,如跑道裂缝、设备损坏对运行效率的影响。其次,级联失效效应简化。现有研究基于线性假设,难以捕

捉局部设备故障引发的连锁反应。最后,微观交互机制的缺失。模拟框架多从宏观流程出发,忽略了设备设施状态和航空器等微观要素之间的动态交互,导致模型的精度不足。

针对上述问题,本文构建了基于全周期接收效率的震后物资接收能力评估框架。该框架将工程系统韧性理论与多主体协同建模技术相结合,可弥补传统静态评估方法的不足:首先,提出机场物资接收效率指数(Material Receiving Efficiency Index, MREI),通过量化震后动态物资接收效率,实现对机场响应能力的时变评估;其次,构建包含设备损伤演化、航班调度策略与地面服务资源交互机制的智能体仿真模型,实现从设备损伤、机位分配到货物处理的全流程动态模拟;最后,建立“损伤评估-功能计算-动态模拟-策略优化”四阶段的4级评估流程,形成从物理损伤到功能损失的递进式评估体系。研究结果可为震后机场应急物资接收调度提供理论支撑与决策依据,对提升机场枢纽韧性及区域应急物流网络的可靠性具有重要科学价值。

1 机场震后物资接收能力计算方法

机场作为现代交通网络的核心枢纽,是高度复杂的基础设施系统。其功能依赖能源供应、机坪、导航通信、货物处理及跑道系统等多子系统协同运作,各子系统通过滑行道系统物理连接形成拓扑网络,共同支撑震后物资接收流程。因此,梳理震后物资接收关键环节、分析失效原因并构建科学评估指标,是准确衡量机场震后物资接收能力的重要前提。

1.1 机场震后物资接收失效分析

地震灾害对机场物资接收能力的破坏机理主要体现在两方面:一方面,跑道、滑行道、通信导航、货物处理等子系统的设备设施在地震波作用下发生结构损伤与功能失效,是导致物资接收中断的关键致灾因子;另一方面,航空器起降、地面保障车辆调度等运行流程需严格遵循塔台管制指令,科学制定包含空域调配、应急起降规则和地面交通管制的运行策略体系,是提升震后物资接收系统韧性的核心环节。

1.1.1 地震作用影响

机场物资接收依赖于子系统之间的共同作用,其协同关系见图1。地震引发的结构破坏或设备故障,会触发“底层设备故障→上层系统功能异常→整体功能丧失”的非线性传导路径,导致局部损伤演变为全局性服务中断,具体表现为物资接收耗时延长、航班起降延误与地面拥堵加剧,最终显著降低机场

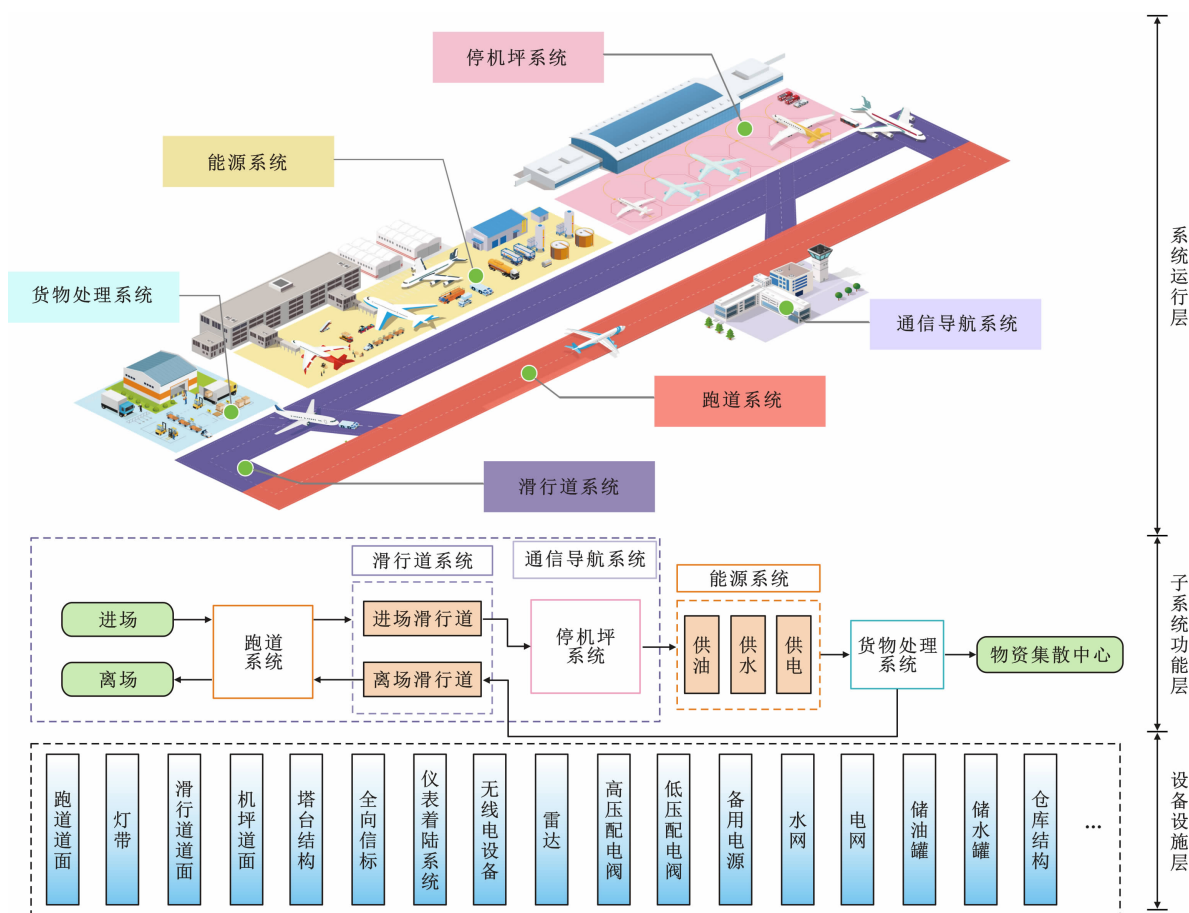


图1 机场震后物资接收流程

Fig. 1 Post-earthquake airport material receiving process

物资接收能力。例如,跑道震后裂缝或隆起会导致飞机无法安全起降^[17];滑行道塌陷或错位会中断机坪与跑道的连通性,延误航班降落^[18];机坪破损或沉降可能造成飞机倾斜,影响加油与装卸作业^[19];供电系统中断或设备损坏会导致雷达信号丢失、空管指挥失灵。

1.1.2 震后策略影响

在地震灾害中,机场物资接收能力与航班调度决策密切相关,不同机型比例、震后进场间隔时间等因素直接影响运行效率。根据美国联邦航空局在联邦航空特别条例中指出,震后设施损坏时,合理安排起降顺序、调整机型比例、优化航班进场间隔时间等措施可提升物资接收能力^[20]。适当调整机型比例或延长进场间隔时间,能减少拥堵、提升接收效率。进场间隔时间是指连续进港航空器相继到达跑道入口的平均时间间隔,考虑到震后物资需求的不确定性与及时性,本文以进场间隔时间作为飞机进场的关键影响因素。

1.2 基础数据选取与计算方法

准确衡量机场震后物资接收能力需依托精确的

运行数据。本文选取物资接收累积量作为关键评估数据,其定义为震后仓库实际接收货物的累积数量,可以综合反映飞机降落、滑行、停靠及物资卸载等全流程效率。相较于传统以航班为单位的数据,该数据更能真实全面地展现震后机场物资接收状态,既能直观体现特定时段内的接收规模,也能揭示自然或人为因素导致的运行失效、延误、拥堵等问题。

震后响应时间 t 时的物资接收累积量 $F(t)$ 刻画了物资接收量与飞机周转时间的关联,为数据获取与计算提供了技术手段,其计算为

$$F(t) = \sum_{i=1}^n q_i \beta_{\{t \geq T_{i,\text{total}}\}} \quad (1)$$

$$T_{i,\text{total}} = A_i + \sum_i T_{i,\text{phase}} \quad (2)$$

式中: q_i 为飞机 i 的载货量; n 为飞机总量; $\beta_{\{t \geq T_{i,\text{total}}\}}$ 为指示函数,条件满足时为1,否则为0; $T_{i,\text{total}}$ 为飞机 i 的总流程时间; A_i 为飞机 i 到达机场的初始时间; $T_{i,\text{phase}}$ 为飞机 i 在震后不同流程中所用的时间。

为全面客观衡量机场震后真实运行状态与理想状态的差距,引入理想状态物资接收累积量作为对比数据,其计算方法为

$$F'(t) = \sum_{i=1}^n q'_i \beta_{\{t \geq T_{i, \text{total}}\}} \quad (3)$$

$$T'_{i, \text{total}} = A_i + \sum_i T'_{i, \text{phase}} \quad (4)$$

式中: $F'(t)$ 为未受地震破坏时响应时间 t 的物资累积量; q'_i 为理想状态下飞机 i 的载货量; $T'_{i, \text{phase}}$ 为各流程用时理想值。

理想状态下, 机场设施完好、流程高效、环节协同, 物资可快速完成接收。理想物资接收累积量为震后接收能力评估提供了关键参照, 可量化地震对机场物资接收的影响程度。

实际与理想状态下的物资累积量随时间变化的函数关系如图2所示。由图2可知: 震后初期因机场设施损坏、接收流程受阻, 实际状态下的物资累积量增长缓慢; 随着应急措施推进, 接收效率提升, 曲线逐步上升, 但始终与理想状态存在差距; 理想状态下的物资累积量呈稳定快速上升趋势, 体现了无地震干扰时机场高效的物资接收能力。

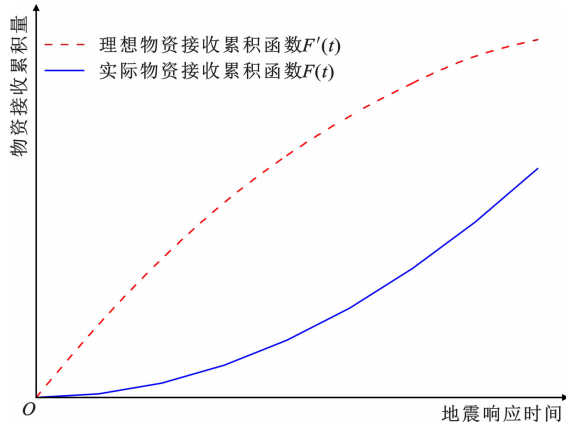


图2 物资接收累积曲线

Fig. 2 Cumulative material receiving curves

1.3 数据特征分析与韧性理论应用

实际与理想物资接收曲线的时变关系可直观反映机场震后物资接收能力, 两曲线越接近表明接收时效性越强, 各环节效率越高。受设施损伤、调度策略调整及地服资源限制等因素影响, 单位时间物资接收能力呈动态波动, 导致接收能力显著变化, 因此评估两者的时变偏差是衡量接收能力的关键。通过动态物资接收效率表征接收过程的时变属性, 即通过震后全周期内实际与理想物资接收累积量的时变偏差反映机场物资接收的实时效能。动态物资接收效率具有2点特征: 一是体现机场空侧交通拥堵、中断等的动态时变性; 二是体现设施损伤、调度变更、资源受限等多因素耦合性。

为量化该偏差, 引入工程系统韧性理论。工程

系统韧性是指系统遭遇突发扰动后迅速恢复关键功能的能力^[21], 通过系统功能曲线可定量分析扰动响应阶段的恢复能力^[22], 其对于量化机场物资接收过程的时变偏差具有先天优势(图3)。实线从功能低谷回升至理想状态($Q=1.0$)的贴近程度反映韧性强弱, 其不仅可以刻画性能时变规律, 还可揭示波动原因与风险点, 与本文动态评估需求高度契合。工程系统韧性计算为

$$R = \frac{1}{T} \int_0^T Q(t) dt \quad (5)$$

式中: R 为工程系统韧性, 表示响应阶段单位时间的平均功能状态; T 为响应总时间; $Q(t)$ 为系统功能状态。

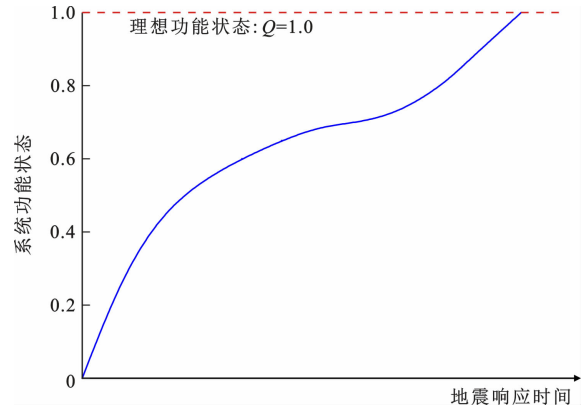


图3 工程系统功能状态曲线示意

Fig. 3 Schematic of engineering system function state curve

1.4 机场震后物资接收能力评估指标

基于上述分析, 机场震后物资接收能力可通过工程系统韧性方法计算, 但该方法采用恒定理想状态($Q=1.0$), 通过计算单位时间的功能状态评估整体系统表现, 难以实现动态目标的系统功能评估。所以本文在传统方法的基础上, 针对每个单位时间设定独立理想状态 $F'(t)$, 以满足物资接收过程中的动态目标需求, 如图4所示。 F_{total} 为物资总接收量。

因此, 物资接收效率指数 R_{MREI} 将韧性计算公式中的恒定理想状态($Q=1.0$)转换成动态理想状态 $F'(t)$, 当单位时间趋近于无限小时, 通过积分实际物资接收效率的比值并计算平均值, 其物理意义为震后全周期内单位时间的平均物资接收率, 可动态量化机场不同响应阶段的物资接收表现。其计算为

$$R_{\text{MREI}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{F(t)}{F'(t)} dt \quad (6)$$

为简化计算, 本文对机场物资接收累积曲线进行坐标转换, 将时间参数隐含于理想物资接收量 x 中, 以归一化物资累积接收率作为积分变量, 即

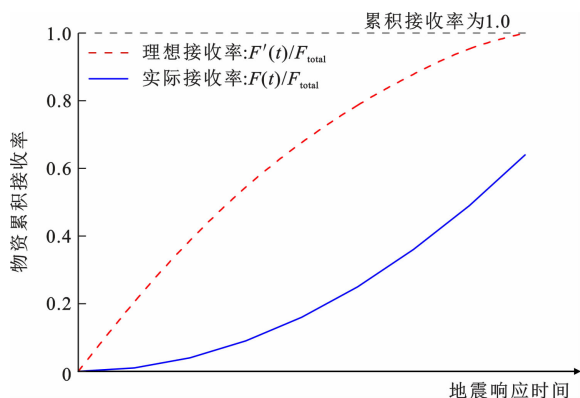


图4 基于时间维度的机场理想与实际物资累计接收率曲线

Fig. 4 Ideal and actual cumulative material reception rate curves for the airport based on the time dimension

$$R_{MREI} = \int_0^1 \frac{F(x)}{x} dx \quad (7)$$

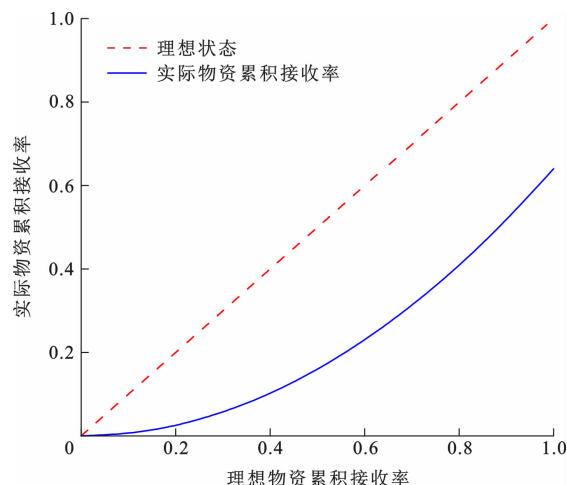
坐标转换后的机场 R_{MREI} 简化计算示意图如图5所示,该方法将理想物资接收总量归一化,其中 $x=0$ 处不参与积分,积分面积反映全周期接收效率与理想状态的偏差。通过将绝对时间转化为相对物资接收率,既消除了不同规模机场因设施差异导致的时间尺度不可比问题,又使 R_{MREI} 聚焦于实际与理想进度的偏差轨迹,在保留时间维度信息的同时,更直接地反映接收效率的动态情况,避免时间参数对评估的干扰。直线 $y=x$ 为理想状态,代表实际与理想物资接收总量时刻一致、接收零延误。该方法可直观反映震后物资接收能力变化,辅助优化运输策略。

2 机场震后物资接收模拟方法

为开展机场震后物资接收能力评估,精准量化设备损伤、调度策略及资源交互对接收效率的动态影响,本章构建了分层递进的震后物资接收模拟方法。该方法首先从机场物理损伤的微观刻画入手,量化关键设备设施的震后状态;再通过系统功能建模将设备损伤转化为子系统的剩余功能;随后依托多智能体技术搭建全流程动态仿真环境,模拟物资接收的实际运行过程;最后结合蒙特卡洛方法模拟地震不确定性,为 R_{MREI} 的精准计算提供数据与模型支撑。具体将依次开展设备设施损伤模拟、子系统功能损伤分析、物资接收全流程动态仿真及不确定性数据处理,形成从“物理损伤”到“功能表现”的完整模拟链条。

2.1 机场关键设备设施损伤模拟

地震作用下,机场跑道、滑行道等道面损伤及照明、通信导航等设备损坏,是震后物资接收性能损失

图5 坐标转换后的机场 R_{MREI} 简化计算示意Fig. 5 Simplified diagram for calculating airport R_{MREI} after coordinate transformation

的根本原因。国内外关于机场道面与特殊设备易损性的研究已积累丰富数据,为子系统功能量化奠定基础。目前,设备设施震后状态通过结构动力时程分析结合易损性分析确定。结构动力分析获取地震作用下的结构响应,如层间位移角、地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)等,这些工程需求参数用 e 表示,用于衡量跑道道面、滑行道道面等关键设施的震后损伤;将参数代入易损性函数,计算不同损伤状态 d 的超越概率 $F_d(e)$ 为

$$F_d(e) = \Phi \left[\frac{\ln(e/x_m)}{\beta} \right] \quad (8)$$

式中: x_m 和 β 分别为损伤状态 d 的易损性函数中位数和标准差; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的累积分布函数。

在某一确定工程需求参数下,各损伤状态的超越概率服从对数正态分布,进而可计算某一地震响应 e 和某设备设施处于损伤状态 d 的概率区间为

$$P(D=d|E=e) = \begin{cases} (F_1(e), 1] & d=0 \\ (F_{d+1}(e), F_d(e)] & 1 \leq d \leq N-1 \\ (0, F_d(e)] & d=N \end{cases} \quad (9)$$

式中: E 为地震工程需求参数; D 为设施的离散损伤状态; N 为损伤状态的最高等级; $F_1(e)$ 为 1 级损伤的超越概率,计算出的部件损伤状态概率可为机场震后损伤虚拟环境提供数据支持。

由于地震的不确定性,机场设备损伤具有随机性,故假定损伤状态服从 $[0, 1]$ 随机分布,通过随机数生成部件损伤状态。

2.2 机场物资接收子系统功能损伤分析

子系统震后功能水平由上述设备设施功能状态共同决定,可通过可靠性分析方法计算功能损失。

鉴于故障树分析与贝叶斯网络常联合用于复杂系统分析^[23],本文结合二者优势构建评估模型:故障树降低了系统贝叶斯网络的构建难度,贝叶斯网络弥补了故障树计算与推理的缺陷。相较于传统故障树,T-S故障树可处理事件多状态情况,通过 T-S 门及其 IF-THEN 规则替代传统逻辑门^[24],以表征事件失效状态关系。

图 6 为机场震后物资接收系统 T-S 故障树模型,可知:顶事件为机场震后物资接收系统功能损

伤(即物资接收功能受损);中间事件涵盖跑道、滑行道等多个系统,是致使顶事件发生的关键功能损失环节,且由多个底事件构成;底事件为设备设施故障状态,见表 1,部分底事件存在多种损伤情形。在逻辑关系上,中间事件下的底事件通过 T-S 门关联,部分底事件间呈逻辑或门关系,即任意底事件失效会引发对应系统失效,还有部分底事件遵循逻辑与门关系,需同时发生才会导致系统失效。

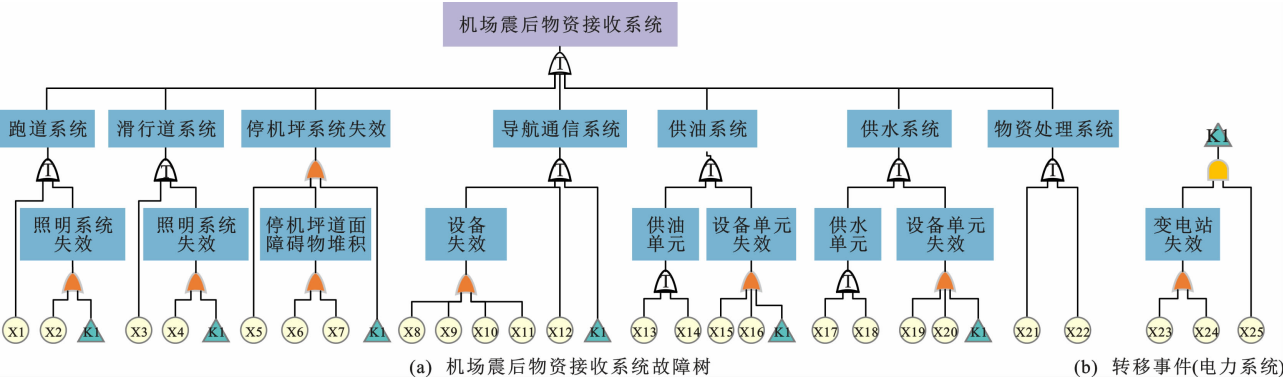


图 6 机场震后物资接收系统 T-S 故障树模型
Fig. 6 T-S fault tree model of airport post-earthquake material receiving system

表 1 底事件对应序号

Table 1 Serial number corresponding to the basic event

编号	底事件	编号	底事件	编号	底事件
X1	跑道道面裂缝、隆起	X10	全向信标损坏	X19	水泵损坏
X2	跑道灯带损坏	X11	测距仪损坏	X20	供水车损坏
X3	滑行道道面裂缝、隆起	X12	塔台结构损伤	X21	仓库结构损伤
X4	滑行道灯带损坏	X13	储油罐损坏	X22	货运车损坏
X5	机坪道面损坏	X14	外部供油管网损坏	X23	高压配电网损坏
X6	航站楼结构倒塌	X15	油泵损坏	X24	低压配电网损坏
X7	航站楼玻璃幕墙倒塌	X16	供油车损坏	X25	备用电源损坏
X8	无线电设备损坏	X17	储水罐损坏	K1	供电系统失效
X9	仪表着陆系统损坏	X18	市政供水管网损坏		

本文引用 Song 等^[25]提出的 T-S 故障树和贝叶斯网络的一般转换规则,其中事件失效状态之间的逻辑关系由 T-S 门的规则定义。在将故障树转换为贝叶斯网络时,故障树中的事件与贝叶斯网络有向无环图中的节点一一对应,当同一事件出现时,在贝叶斯网络中只需构建一个节点。

条件概率表是根据 T-S 门规则进行赋值得到的,这里引用 Røed 等^[26]提出的条件概率计算方法。该方法是基于相互耦合的父节点彼此的权重 w_i 以及节点状态与加权平均父节点状态之间的距离 Z_j ,计算父节点不同状态组合下的条件概率 P_j ,距离度量计算及条件概率计算如下

$$Z_j = \sum_{i=1}^n |Z_{ij}| \cdot w_i \quad Z_j \in [0,3] \tag{10}$$

$$P_j = e^{-\beta Z_j} / \sum_{j=a}^d e^{-\beta Z_j} \quad P_j \in [0,1] \tag{11}$$

式中: Z_{ij} 为父节点 i 与子节点 j 状态间的“距离”; n 为父节点数量; $j=1,2,3$; $e^{-\beta Z_j}$ 为子节点 j 状态的未归一化概率权重项,决定了各状态的概率质量分布, β 越高,子节点处于远离父节点状态的概率越低,在本研究中 $\beta=1.2$ 。

以跑道系统为例各子节点条件概率 (Conditional Probability, CP) 计算结果见表 2。

依据贝叶斯网络结构、某 PGA 下底事件发生

表 2 跑道系统条件概率

Table 2 CP of runway system

底事件状态		跑道系统条件概率		
跑道 道面	跑道照 明系统	$P(0)$	$P(2)$	$P(3)$
0	0	0.894 421 041	0.081 140 046	0.024 438 912
0	3	0.432 828 874	0.307 714 747	0.259 456 379
2	0	0.353 325 877	0.496 985 090	0.149 689 033
2	3	0.046 909 580	0.517 092 574	0.435 997 846
3	0	0.245 410 476	0.345 192 230	0.409 397 295
3	3	0.020 567 071	0.226 714 449	0.752 718 480

概率及 CP, 运用链式法则计算 n 个变量的联合概率分布 $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P[x_i | P_a(x_i)] \quad (12)$$

式中: $P_a(x_i)$ 为变量 x_i 的父节点集合; $P(x_i)$ 取决于父节点取值。

本文父节点状态概率参考多项研究数据, 如储水罐^[27]、储油罐^[24]、货物仓库^[28]、交通管制塔^[29]、

导航通信设备^[30]等, 跑道等设施参考欧洲书籍 *Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk*, 部分数据参考《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020), 最终得出机场物资接收系统的多态贝叶斯网络计算结果(图 7)。其中, State0 为节点的震后完好, State1 为节点轻微损伤, State2 为节点中等损伤, State3 为节点严重损伤。

2.3 机场震后物资接收模拟

本文采用多智能体模型模拟机场震后物资接收过程, 并测算接收能力指标。作为复杂系统模拟工具, 该模型通过微观个体互动动态反映功能恢复, 弥补了传统评估方法的不足。在交通枢纽场景中, 其可模拟人员疏散、调度、设备修复等环节, 结合部件损伤演化分析精准评估功能恢复效率, 从而适应震后环境的不确定性^[31-33]。构建多智能体仿真模型的关键在于明确空间环境与关键映射, 以及智能体震后行为规则, 构建真实震后环境, 最终开展机场震后物资接收模拟。

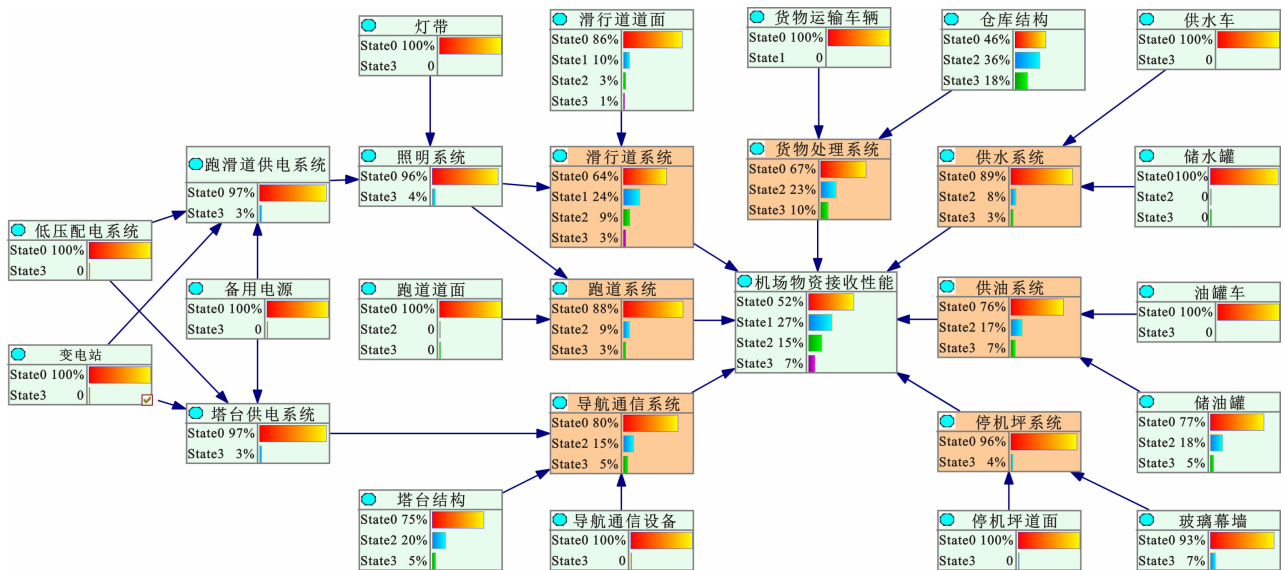


图 7 机场震后物资接收能力贝叶斯网络(PGA 为 0.2g)

Fig. 7 Bayesian network of airport post-earthquake material receiving capacity (PGA is 0.2g)

2.3.1 空间环境与关键映射

在多智能体模型中, 空间环境是飞机、地服车辆等智能体活动的专属领域, 本质上限定了智能体行为的边界。针对机场震后物资接收场景, 本文构建了与关键子系统关联的物理场景, 通过深度剖析各场景损伤状态, 梳理其对智能体的限制条件, 并与子系统震后功能状态建立精确映射。例如, 跑道系统损伤会制约飞机起降流量、限定机型用途; 机坪系统损伤直接影响飞机进港及地面服务; 货物处理系统

严重损伤会降低存储上限, 触发仓库容量阈值时将禁止飞机降落。表 3 为子系统的功能状态与环境映射对应关系。功能状态分类是通过既有设施易损性分析中的损伤状态等级, 并结合其损伤后的使用和修复标准共同确定的。以跑道系统为例, 震后跑道道面的损伤状态等级分为完好、轻微损坏、中等损坏和严重损坏。基于《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T 5004—2025) 及桃园机场、首都机场等工程案例, 轻微损坏通常表现为跑道裂缝宽度小

表 3 子系统功能状态
Table 3 Subsystem functional states

子系统	功能状态	属性
跑道系统	State0	跑道系统正常运行
	State2	此时跑道系统中等损坏,需要短期抢修,12 h 后飞机可进离场
	State3	此时跑道系统严重损坏,需长期修复,假设修复周期为 7 d,7 d 后恢复进离场功能
滑行道系统	State0	滑行道系统正常运行
	State1	滑行道道面出现轻微裂缝等问题,飞机通过时需要减速前进
	State2	滑行道道面出现中度损坏等问题,限小型、中型飞机通过
	State3	滑行道道面严重损坏,导致此段滑行道无法使用,需绕路滑行
通信导航系统	State0	通信导航系统正常运行
	State2	通信导航系统内相关设备或塔台轻微损坏,轻微影响通信导航效率,此时需限流进离场
	State3	通信导航系统的关键设备无法使用或塔台倒塌,通信导航系统无法正常工作
停机坪系统	State0	机坪系统正常,机位可停靠
	State3	机坪路面严重损伤,或地面出现建筑倒塌的瓦砾,导致机位无法使用
供油系统	State0	供油系统正常运行,供油速度为 $1\ 020\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
	State2	此时供油系统中的关键储油设施损坏,但供油车运行正常,可进行部分供油工作。设置供油速度为 $600\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
	State3	供油系统中储油设施和部分供油车损坏,但依旧可以进行小部分供油工作。设置供油速度为 $200\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
供水系统	State0	供水系统正常运行,供水速度为 $60\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
	State2	此时供水系统中的关键储水设施损坏,但供水车运行正常,可进行部分供水工作。设置供水速度为 $40\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
	State3	供水系统中储水设施和部分供水车损坏,但依旧可以进行小部分供水工作。设置供水速度为 $20\ \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$
货物处理系统	State0	货物处理系统正常运行,货物处理上限为 2 500 t,且当物资处理量达到处理上限的 400%时,停止飞机进港 ^[5]
	State2	仓库结构部分损坏,导致货物处理上限降低为 1 500 t
	State3	仓库结构完全损坏,需要在露天条件下进行货物处理,此时货物处理的上限为 500 t

于 3 mm,此时无需进行修复即可使用;中等损坏(如裂缝宽度 3~10 mm、局部错台小于 10 mm)采用快速修补材料或铣刨换填技术,通常可在 12~24 h 内修复;严重损坏(如贯穿性裂缝、基础变形)需通过全厚度换板或基础加固,修复周期一般为 7 d 以上。由于跑道的 State1 对应轻微损坏,不会对其实际运行功能产生影响,可将 State1 归为完好,用 State0 代替,因此在跑道系统分析中仅考虑 3 种破坏状态。

2.3.2 智能体分类与定义

在震后机场物资接收环境中,智能体指能感知环境信息、基于设定程序分析处理并自主决策执行动作的实体。本文智能体均为人工控制载具,其环境分析与处理逻辑基于机场运行实际逻辑,按功能和操作分为飞机、地服车辆 2 类。飞机智能体按翼展等级分为 B 类轻型、C 类中型、D 类大型,按应急

属性分为应急与非应急飞机,其载货量、燃油需求量等自身属性影响震后物资接收效率。地服车辆智能体包括升降平台车、货物拖车等,其工作速率、容量和最大行驶速度影响物资卸载和接收效率,不同类型飞机和地服车辆的智能体属性见表 4、5。为便于计算,用货物单位表示货物数量,其中 1 个货物单位相当于 2.5 t 货物。相关参数参考《民用航空图编绘规范》(MH/T 4019—2012)、《民用机场飞行区技术标准》(MH 5001—2021)与《中国民用航空空中交通管理规则》(CCAR-93TM—R2)制定。

2.3.3 智能体行为规则与交互机制

智能体的行为规则与交互机制是其核心“行动指南”,不仅决定智能体对环境信息的适应性反应,还规范其与其他智能体的协作或竞争关系^[34]。强烈地震等灾害发生后,机场功能从常规客运枢纽根

表 4 飞机智能体属性
Table 4 Aircraft agent attributes

智能体类型	代表机型	载货量/ 货物单位	燃油需求量/L	需水量/L	最短起降 距离/m	地面最大滑行速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
D 类大型货机	波音 767-300F	14	14 000	300	3 000	30
C 类中型货机	波音 737-700C	8	3 500	200	约 1 400	30
B 类轻型货机	DHC-6	2	700	100	约 600	30

本转变为应急物资转运中心,运营模式显著变化:应急物资航班取代客运航班,原有机位分配表与航班时刻表失效,地面服务资源调度原则和顺序从“先到先得”转为“统一分配”。因此,常规行为规则与交互模式无法适应灾后应急需求。本研究聚焦震后应急响应阶段,深入探究飞机与地服车辆的行为模

式及交互机制,通过构建震后应急场景的行为函数与交互函数,为机场震后智能体运行机制提供支撑。

本文从机位选择和路径选择两部分对飞机智能体在震后应急情境下的行为规则进行约束。约束函数为

$$A(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) = \begin{cases} A_s(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) & \text{轻型机} \\ A_m(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) & \text{中型机} \\ A_h(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) & \text{大型机} \end{cases} \quad (13)$$

$$A_s(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) = \begin{cases} g^s & B_{\text{avail}}^s > 0, g^s \in B_{\text{avail}}^s \\ A_m(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) & B_{\text{avail}}^s = 0, B_{\text{avail}}^m > 0 \text{ 且 } C_{s-m} \\ A_h(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) & B_{\text{avail}}^s = 0, B_{\text{avail}}^h > 0 \text{ 且 } C_{s-h} \\ \emptyset & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$A_m(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) = \begin{cases} g^m & B_{\text{avail}}^m > 0, g^m \in B_{\text{avail}}^m \\ A_h(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) & B_{\text{avail}}^m = 0, B_{\text{avail}}^h > 0 \text{ 且 } C_{m-h} \\ \emptyset & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

$$A_h(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h) = \begin{cases} g^h & B_{\text{avail}}^h > 0, g^h \in B_{\text{avail}}^h \\ \emptyset & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $A(G, B_{\text{avail}}^s, B_{\text{avail}}^m, B_{\text{avail}}^h)$ 为震后情景机位分配函数; G 为飞机机型集合, 包括轻型、中型、大型飞机; B_{avail}^s 、 B_{avail}^m 、 B_{avail}^h 分别为轻型、中型、大型飞机的可用机位集合; C_{s-m} 为轻型飞机能够使用中型机位的条件; C_{s-h} 为轻型飞机能够使用大型机位的条件; C_{m-h} 为中型飞机能够使用大型机位的条件; g^s 、 g^m 、 g^h 分别为分配给轻型、中型、大型飞机的机位。

表 5 地服车辆智能体属性

Table 5 Ground service vehicle agent attributes

智能体类型	工作速率	容量	最大行驶速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
升降平台车	0.2 个货物 单位 $\cdot \text{min}^{-1}$		25
客梯车	12 人 $\cdot \text{min}^{-1}$		25
供油车	1 020 L $\cdot \text{min}^{-1}$	22 000 L	25
供水车	20 L $\cdot \text{min}^{-1}$	6 000 L	25
货物拖车		2 个货物单位	25

该函数可以分别针对不同机型对应的可用机位数量集合, 优先从本机型可用机位中分配, 若本机型无可用机位, 在满足如轻型机适配中型机位、中型机适配大型机位等特定条件时, 尝试跨机型分配。通过这种分层判断和条件筛选, 以在震后复杂且资源有限的情况下, 尽可能合理地为各类飞机分配机位, 实现震后高效机位利用。

震后情景路径选择函数 $L(G, U, D)$ 可以使飞机需根据滑行道的状态信息自主选择最优路径, 快

速驶向指定机位, 即

$$L(G, U, D) = \begin{cases} L_s(G, U, D) & \text{轻型机} \\ L_m(G, U, D) & \text{中型机} \\ L_h(G, U, D) & \text{大型机} \end{cases} \quad (17)$$

$$L_s(G, U, D) = \begin{cases} P_{\text{Shortest}}(U_{\text{avail}}^s) & U_{\text{avail}}^s \neq \emptyset \\ \emptyset & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$U_{\text{avail}}^s = \{u_i \in U \mid D(u_i) = 0 \text{ 且 } C_{s-u}(u_i) = 1\} \quad (19)$$

$$L_m(G, U, D) = \begin{cases} P_{\text{Shortest}}(U_{\text{avail}}^m) & U_{\text{avail}}^m \neq \emptyset \\ \emptyset & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

$$U_{\text{avail}}^m = \{u_i \in U \mid D(u_i) = 0 \text{ 且 } C_{m-u}(u_i) = 1\} \quad (21)$$

$$L_h(G, U, D) = \begin{cases} P_{\text{Shortest}}(U_{\text{avail}}^h) & U_{\text{avail}}^h \neq \emptyset \\ \emptyset & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

$$U_{\text{avail}}^h = \{u_i \in U \mid D(u_i) = 0 \text{ 且 } C_{h-u}(u_i) = 1\} \quad (23)$$

式中: U 为滑行道集合, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$; $D(u_i)$ 为滑行道 u_i 的损坏状态, $D(u_i) = 0$ 为滑行道完好; $C_{s-u}(u_i)$ 、 $C_{m-u}(u_i)$ 、 $C_{h-u}(u_i)$ 分别为轻型、中型、大型飞机能够使用滑行道 u_i 的条件; $P_{\text{Shortest}}(\cdot)$ 为可通行滑行道集合中的最短路径函数。

该函数根据机型, 结合滑行道集合及各滑行道的损坏状态, 依据各机型能使用对应滑行道的判断条件, 筛选出各机型可通行的滑行道集合, 并找出最短路径, 提升震后地面运行效率。对于飞机与地服车辆的交互模型, 结合震后资源集中再分配原则, 提出了飞机服务请求函数 $S_{\text{request}}(i, j)$, 即

$$S_{\text{request}}(i, j) = \begin{cases} 1 & E_i = 1 \text{ 或 } E_i = 0 \text{ 且 } S_i \cap C \neq \emptyset \text{ 且 } \\ & Q_j \neq 0 \text{ 且 } W_i \geq D_{\min} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

式中: S_i 为飞机 i 的服务需求集合, 例如包括加油、注水、装卸货物等服务项目; E_i 为飞机 i 的应急状态, $E_i = 1$ 为应急状态, 反之 $E_i = 0$ 为非应急状态; C 为地服车辆的服务能力集合 (如每辆车可提供的服务项目); Q_j 为地服车辆 j 的剩余资源 (如燃油量、储水量等); W_i 为飞机 i 所需资源总量 (根据服务需求集 S_i 计算得出); $D_{\min}$ 为执行飞机 i 最低限度服务需求所需资源量。

式(24)表明, 当飞机为应急救援飞机, 或虽非应急救援飞机但服务需求集与地服车辆服务能力集有交集, 且地服车辆处于可用状态, 剩余资源不少于最低服务需求资源时, 可通过服务请求。

2.3.4 机场震后物资接收模型

在震后物资接收模拟中, 模型通过多规则协同保障物资高效运转, 这些规则均来自行业规则或通行做法, 如:《运输机场运行安全管理规定》(交通运输部令 2022 年第 7 号)、《一般运行和飞行规则》(CCAR—91R4) 等。调度层面, 执行“应急优先”原则, 赋予应急物资运输航班最高优先级, 可插队使用跑道与停机位; 跑道调度遵循“降落优先”, 减少航班空中等待时间与燃油消耗。

机位分配以“本机优先”为基础, 跨机型调配需满足尺寸适配。货物处理环节, 升降平台车将货物卸载至拖车, 拖车经滑行道可行路线 (结合损坏状态筛选) 运至仓库, 验收后计入累积量。当仓库存储量达上限 400% 时, 启动禁降机制暂停非应急航班, 优先处理在港物资。模型运行至所有航班完成进港与物资接收后结束, 每 5 min 统计仓库处理量生成物资接收累积量, 用于计算 R_{MREI} 分析接收能力。机场震后物资接收多智能体模型见图 8。

2.4 考虑地震不确定性的数据处理

由于震后机场设施功能状态存在较大不确定性, 本文采用蒙特卡洛模拟法对 R_{MREI} 开展多次计算。通过随机生成震后各子系统功能状态并开展仿真模拟, 构建子系统功能状态样本池, 随机选取设施功能状态系数作为输入参数, 经多次模拟得到各次的 R_{MREI} , 最终以模拟结果的中位数作为该 PGA 下的 R_{MREI} 评估值。计算过程及结果如图 9 所示 (以 PGA 为 0.2g 下 4E 机场数据为例, $\mathbf{x}_i$ 为智能体模型环境参数向量)。模拟中运用重要性采样方法优化采样策略, 引入第 2.2 节贝叶斯网络计算的子系统功能状态概率作为辅助分布, 对重要性区域加大采样权重, 使模拟聚焦关键状态组合, 提升效率与关键部分覆盖程度。

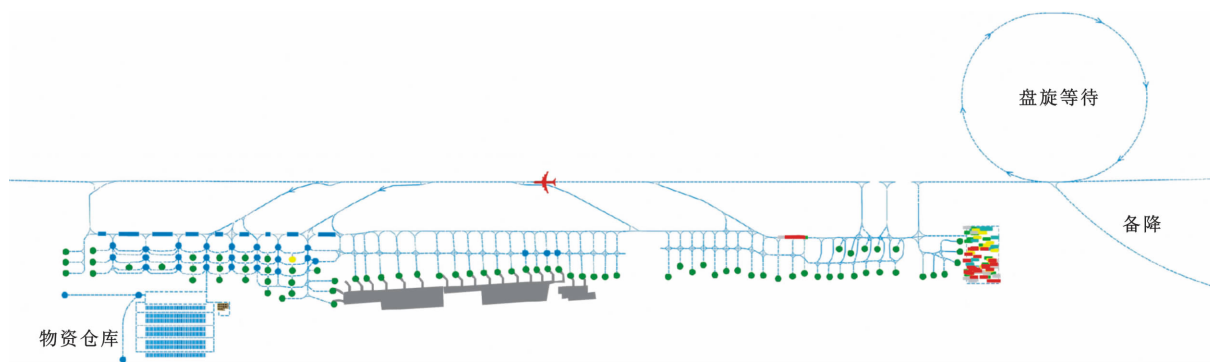


图 8 机场震后物资接收模型

Fig. 8 Airports post-earthquake material receiving model

3 机场震后物资接收能力评估框架

为系统评估地震对机场应急物资接收性能的影响, 本文构建了融合物理损伤分析、系统功能建模与动态性能量化的全链条评估流程 (图 10)。该流程以物资接收累积量为核心数据, 通过“损伤评估-功能计算-动态模拟-策略优化”四阶段实现从设备物理损伤到物资接收系统效能的递进式评估。

(1) 损伤评估。基于非线性动力时程分析获取

跑道、滑行道等关键设施的地震响应参数, 结合易损性函数量化设备损伤概率。采用蒙特卡洛方法生成多组随机损伤状态组合, 建立包含设备设施损伤状态的虚拟环境池, 通过概率分布描述地震不确定性对设备的破坏效应。

(2) 功能计算。构建 T-S 故障树与贝叶斯网络耦合模型, 通过条件概率量化子系统功能状态。采用链式法则计算联合概率, 生成子系统功能状态矩阵。创新引入多态贝叶斯网络技术, 实现从设备损

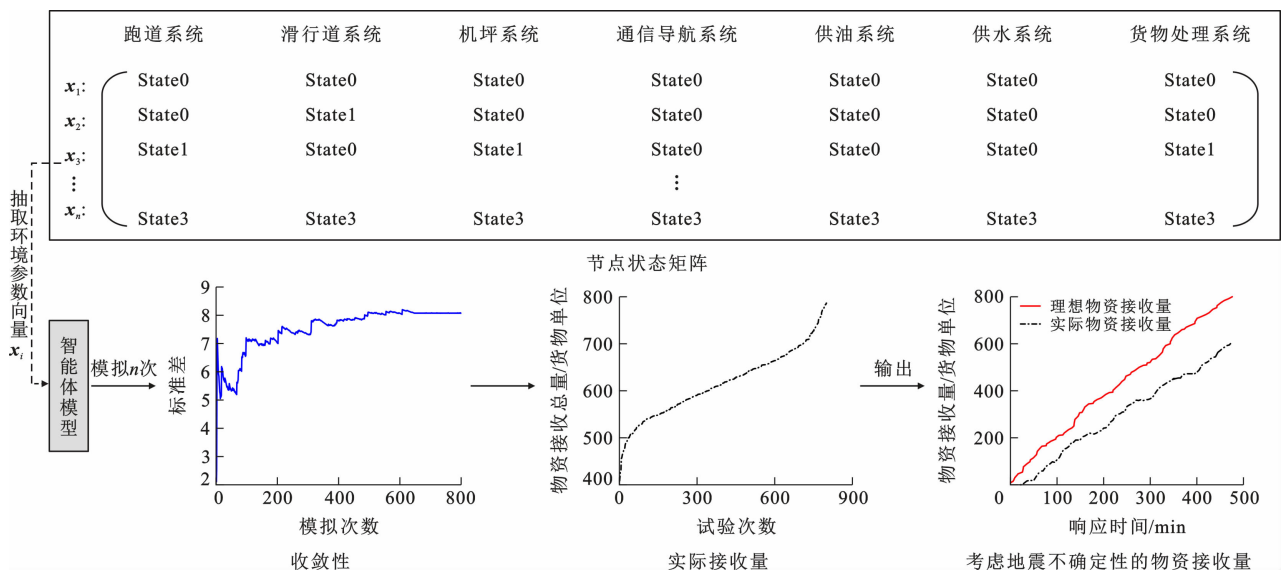


图 9 考虑地震不确定性数据处理流程

Fig. 9 Data processing workflow considering earthquake uncertainty

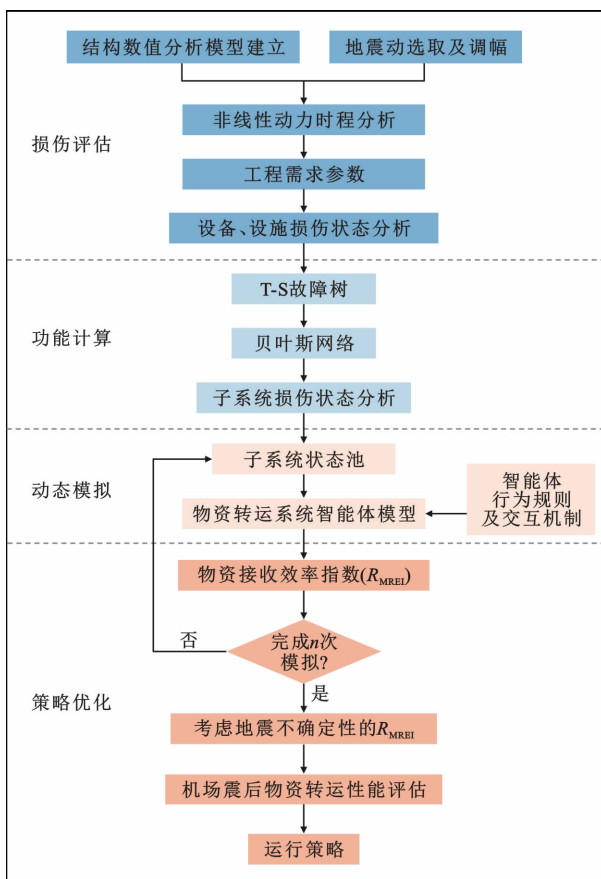


图 10 机场震后物资接收能力评估流程

Fig. 10 Assessment process of airport post-earthquake material reception capacity

伤到系统功能的递进式评估。

(3)动态模拟。将子系统功能状态映射为智能体运行约束,定义飞机机位分配、路径选择及地服车辆服务请求的动态规则。通过 AnyLogic 平台构建

震后物资接收全流程仿真模型,模拟不同损伤场景下的物资接收曲线,实现震后物资接收过程的动态可视化。

(4)策略优化。采用提出的机场物资接收能力评估指标 R_{MREI} ,结合物资接收总用时构建多目标优化模型,为震后应急决策提供可操作的策略支持。

4 算例分析

为深入评估震后机场物资接收能力,本文结合实例分析与模拟运算,针对不同规模机场在多种 PGA 场景下的接收能力展开系统研究。通过综合分析震后运行数据,精准刻画物资接收动态变化并量化不确定因素的影响机制。研究选取中国某 4E 级与 4D 级机场为典型算例,2 类机场因运行保障能力强、基础设施完善,在震后可满足大型运输机起降需求,对大规模物资运输具有战略意义。研究通过设置机型比例、航班进场间隔等关键参数,模拟不同场景下的接收过程,揭示震后接收能力变化规律,为应急救援方案的制定提供科学依据。

本文选取的机场均为 7 度设防:4E 机场采用单跑道双向起降网络结构,配备长度为 3 300 m、宽度为 45 m 的水泥混凝土跑道,可支持四发远程宽体飞机及以下机型起降,设 80 个停机位(25 个大型、35 个中型、20 个轻型),地面服务设施包括 10 辆升降平台车、15 辆客梯车、15 辆加油车、15 辆供水车及 60 辆货物拖车;4D 机场同样采用单跑道双向起降结构,跑道长 2 600 m、宽 45 m,支持双发中程宽体飞机及以下机型起降,设 34 个停机位(6 个大型、

20个中型、8个轻型),地面服务设施包括4辆升降平台车、7辆客梯车、7辆加油车、7辆供水车及15辆货物拖车。

4.1 PGA对机场物资接收能力的影响

地震导致机场设备设施严重损坏,可能使机场在震后初期丧失物资接收能力。不同PGA对机场接收能力的影响存在差异,且不同规模机场在相同PGA下的表现也各不相同。因此,本文通过计算不同PGA下不同规模机场的 R_{MREI} ,探究PGA对机场物资接收能力的影响。设定震后理想物资接收量为2000t,机型比例为大型机0.3、中型机0.5、轻型机0.2,航班进场间隔时间为8min。基于历史数据,当PGA超过0.6g时,机场跑道严重损伤概率显著

上升,可能导致短期停运,此时物资接收能力评估的实际意义有限。因此,本文选取PGA在0~0.6g,评估机场在可运行状态下的最大物资接收能力。

图11、12分别为4E和4D级机场考虑地震不确定性后的实际与理想物资接收曲线,可以看出:震前(PGA为0)2类机场实际接收量与理想状态接近,接收效率较高;地震发生后,随PGA增大,2类机场实际接收量增长放缓,与理想状态差距逐渐扩大且曲线斜率变小,反映出接收效率下降、拥堵中断问题加剧;相同强度下,4E机场实际接收量始终高于4D机场,与理想状态差距更小,体现出其资源冗余带来的震后接收能力优势。

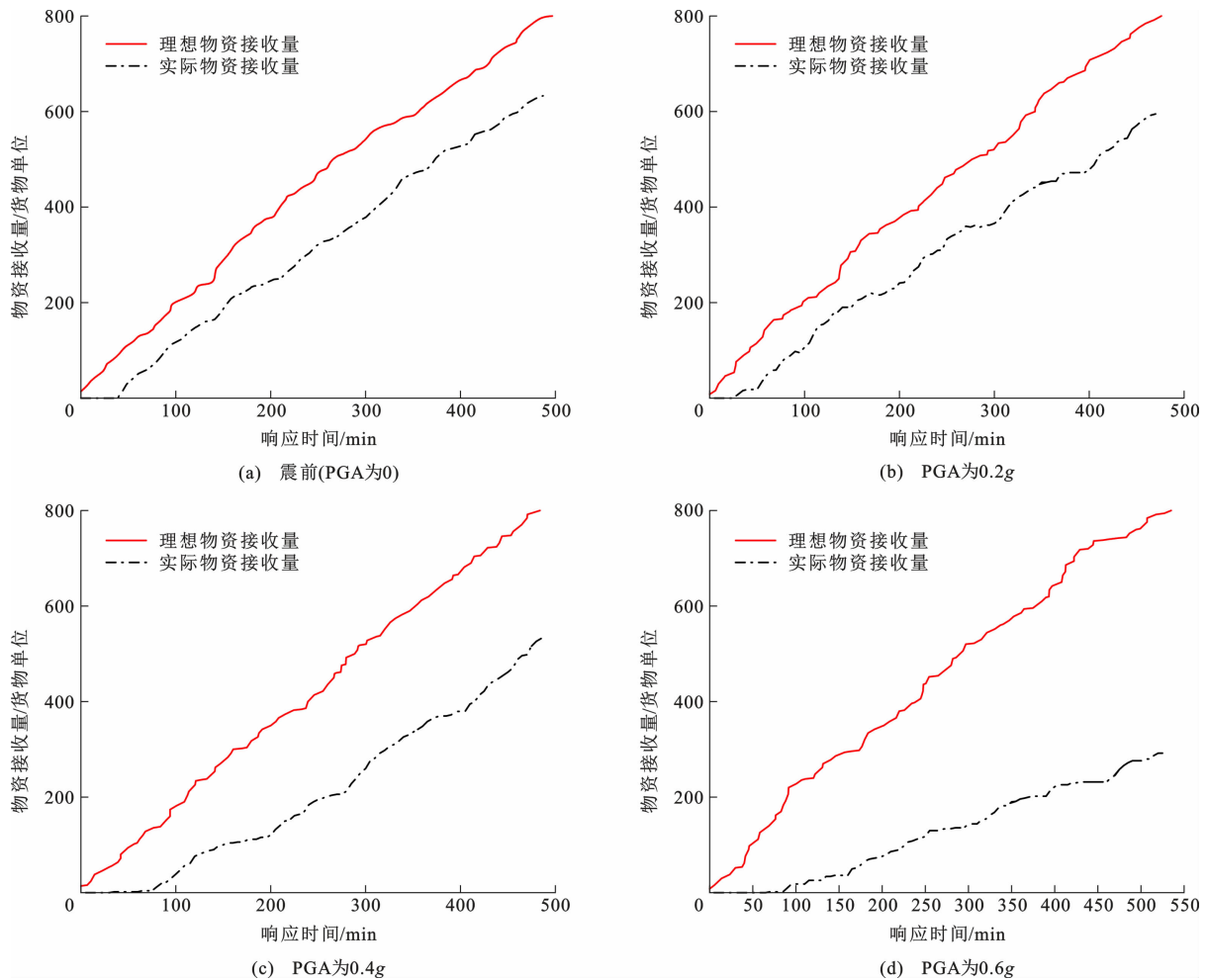


图11 4E机场物资接收曲线

Fig. 11 Material receiving curves of 4E airport

图13(a)、(c)为4E和4D机场坐标转换后的物资接收曲线,为了分析机场震后物资接收的动态性,本文通过理想与实际物资接收率的差距来体现这一特征[图13(b)、(d)]。可以看出:震前2类机场实际与理想物资差距先增后减,显示出一定自适应能

力;地震发生后(0.2g~0.6g),随PGA增大,差距不断增大且曲线斜率变大,拥堵、中断等问题持续时间更久,物资保障遭遇严重阻碍;对比而言,4E机场的差距均小于4D机场,震后物资接收表现更出色,这得益于其规模优势,4E机场因其具有更多可用地

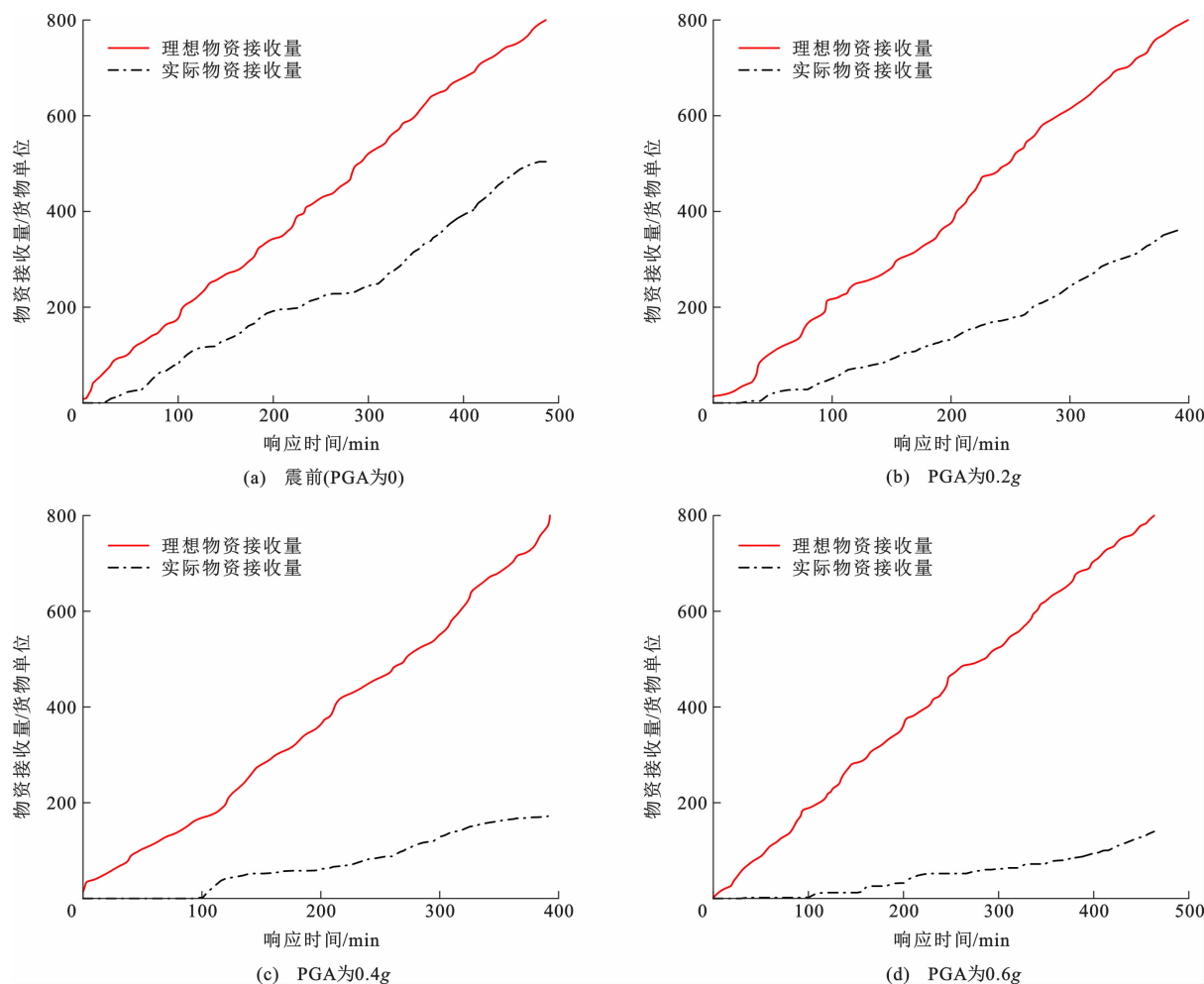


图 12 4D 机场物资接收曲线

Fig. 12 Material receiving curves of 4D airport

面资源,可通过应急调度策略,降低设备设施损坏对其物资接收能力的影响。由此可见, R_{MREI} 可揭示机场震前震后物资接收动态变化规律,为优化震后应急物资管理策略提供支撑。

图 14 为机场 R_{MREI} 与实际接收物资量随 PGA 变化曲线。当 PGA 从 0 增至 0.6g 时,4E 机场 R_{MREI} 由 0.64 降至 0.20,实际接收量从 1 602 t 降至 800 t(理想物资接收需求为 2 000 t),表明其在最低可运行状态下($R_{MREI}=0.20$)仍能保证 0.4 以上的物资接收率;4D 机场 R_{MREI} 由 0.45 降至 0.09,实际接收量由 1 260 t 降至 350 t,显示其在较强地震下虽然具备一定接收能力,但物资时效性低。整体来看,2 类机场的 R_{MREI} 均随 PGA 增大呈下降趋势,且 4E 机场的物资接收能力与实际接收量始终优于 4D 机场。当 PGA 为 0 时,4E 机场 $R_{MREI}=0.63$,4D 机场 $R_{MREI}=0.45$,两者均小于 1,这是由于 $R_{MREI}=1.00$ 为零延误的理想状态;而实际中持续高密度航班待降会导致空中与地面交通拥堵,加之地面服务资源

短缺,这都会降低接收效率。综上,PGA 对机场震后物资接收能力影响显著,强度越大接收能力越低,并且在同一强度下,对 4E 机场接收能力影响更小。

4.2 机型比例对机场物资接收能力影响

在震后应急阶段,应急物资运输航班数量迅速激增,且具有流量大、持续性强等特点。此时,机型比例与机场规模(如空域容量、机坪数量等)密切相关。调整飞机机型配比有助于提升机场机坪和地面服务资源的利用率,从而提高机场震后物资运输效率。本文针对 4D 和 4E 级机场,在面临 2 000 t 货物接收需求和 PGA 为 0.2g 的情况下,探讨了大型机、中型机和轻型机的机型配比对机场 R_{MREI} 的影响。通过建立机型配比与 R_{MREI} 的三维曲面,展示机型配比因素的影响(图 15)。由于大型机和中型机比例固定时,轻型机比例随之确定,因此,通过调整大型机和中型机的比例即可代表 3 种机型的配比。

从图 15 中可见,不同机型配比对机场物资接收能力影响显著。4D 机场 R_{MREI} 变化为 0.12~0.53,

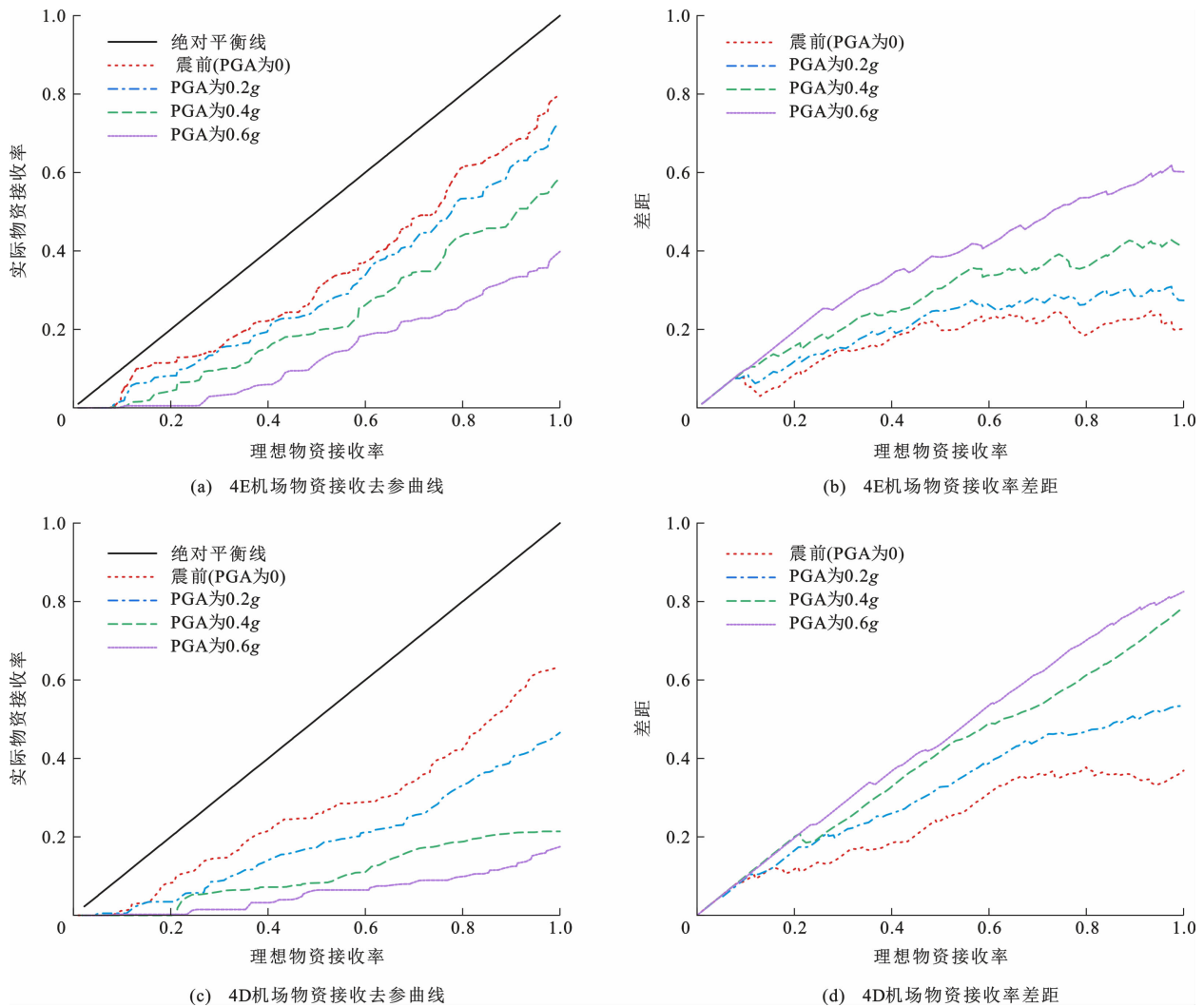
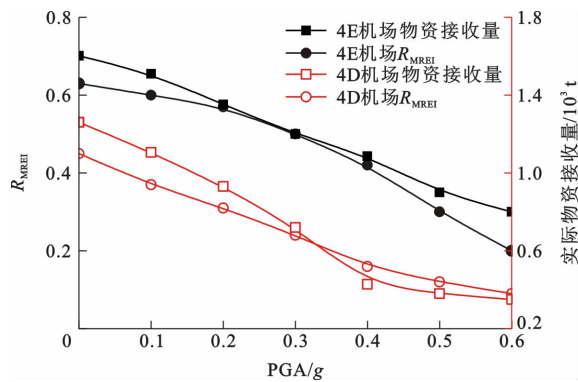


图13 坐标转换后的物资接收曲线

Fig. 13 Material receiving curves after converted coordinates

图14 机场 R_{MREI} 与实际物资接收量随 PGA 的变化Fig. 14 Variations in airport R_{MREI} and actual received material quantity with PGA

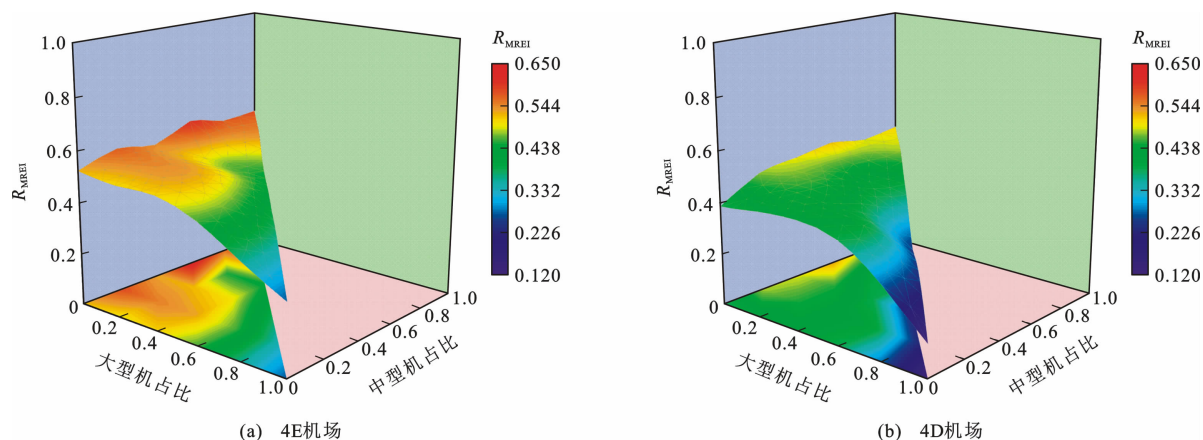
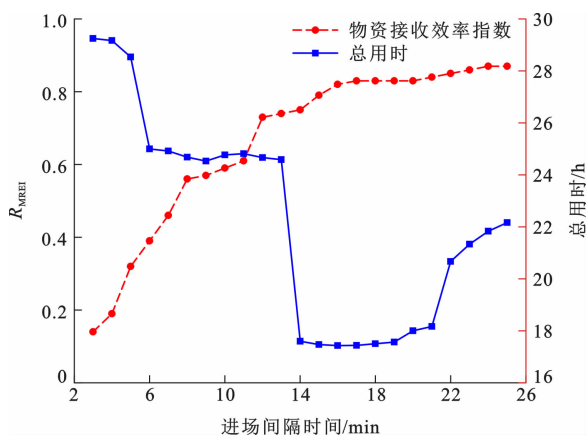
4E 机场为 0.27~0.63,且震后任意配比下 4E 机场接收能力均优于 4D 机场。大型机比例对接收能力影响极大,其比例增加会导致 R_{MREI} 减小;当大型机比例较低时,中型机比例对接收能力影响不显著(R_{MREI} 波动约为 0.10)。具体而言,4D 机场大型机

比例低于 0.4 时可维持较高接收能力,此时将中型机比例控制在 0.2~0.6 可提升效率;4E 机场大型机比例低于 0.7 时接收能力较高,且在任意中、轻型机比例组合下 R_{MREI} 均保持在 0.50 以上。因此,震后调配机型比例时,优先控制大型机比例是提升机场物资接收能力的关键。

4.3 飞机进场间隔时间对机场物资接收能力的影响

本文从整体角度通过进场间隔时间规范震后应急物资航班的进场频率,从而提供可操作的运行决策。以 4E 机场为例,研究了不同机场进场间隔时间对机场应急物资接收能力的影响。假设应急物资接收量为 2 000 t,机型配比为大型机 0.3、中型机 0.5、轻型机 0.2。 R_{MREI} 随进场间隔时间变化的曲线如图 16 所示。

由图 16 可知:进场间隔时间取值为 3~25 min (3 min 为前后航班进场最小时间间隔);随着间隔时间增加,机场震后 R_{MREI} 逐渐提高,表明间隔增大

图 15 考虑机型比例的机场 R_{MREI} 曲面Fig. 15 Airport R_{MREI} surface considering aircraft type proportion图 16 考虑进场间隔时间的机场 R_{MREI} Fig. 16 Airport R_{MREI} considering approach interval

可减少接收延误、提升效率。但 R_{MREI} 仅反映整体接收效率及某阶段接收时效性,无法准确体现应急阶段物资接收速度。为此,研究通过物资接收总用时对运行策略施加时间约束,以兼顾物资接收用时最短与接收效率最优(图 16 红色虚线)。

进场间隔过小会因航班集中降落引发机位与地服资源拥堵,导致备降和二次调度,延长总用时;间隔过大则降低资源利用率、影响接收及时性,致使 R_{MREI} 下降。16~19 min 区间实现多目标平衡,当理想物资接收率为 0.5 时,15 min 间隔对应实际接收量为 650 t,而 16~19 min 间隔下实际接收量均超 800 t,且总用时相比最小间隔(3 min)缩短 23%,展现出更优的运输及时性。

4.4 R_{MREI} 与传统指标对比分析

在震后机场物资接收效能评估中, R_{MREI} 在捕捉运输过程时序动态特征方面展现出显著优势。传统动态评估指标依赖既有航班时刻表对机场进行评估,难以适配震后应急航班灵活调度的随机性特征,因此本文选取静态指标与 R_{MREI} 开展对比分析。

表 6 系统呈现了传统评估指标与 R_{MREI} 的核心差异。以吞吐量 (Throughput, TP) 和备降航班数 (Number of Flight Diversions, NFD) 为代表的传统指标,仅能反映震后物资接收总量或离散事件结果,无法捕捉接收过程中的时序波动特征。以 4E 机场为例(图 17),在 PGA 为 0.2g、机型比例一定(大型机 0.3、中型机 0.5、轻型机 0.2)、进场间隔 10 min 的条件下,对比先到先得(策略 1)与航班优先级(策略 2)2 种调度策略的物资接收效率,发现 2 种策略的 TP(1 120 t)和 NFD(22 架)完全一致,但这 2 个指标仅能提供静态总量数据与离散事件统计结果,无法体现不同调度策略对接收时效性的影响差异。与之形成对比的是, R_{MREI} 通过积分实际接收曲线与理想状态曲线的时变偏差,精准量化了策略差异带来的效率变化。策略 2 的 R_{MREI} 为 0.49,较策略 1 的 0.42 提升了 16.67%,直观揭示了应急调度对缩短物资接收时间、减少延误的优化作用。此对比展现了 R_{MREI} 作为连续时间序列动态评估指标的

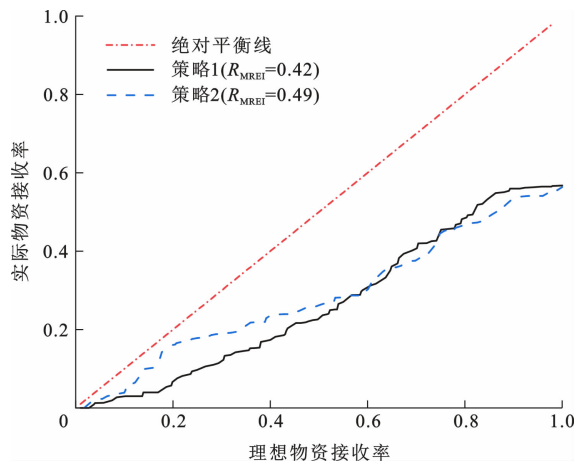
图 17 R_{MREI} 指标对比Fig. 17 R_{MREI} indicators comparison

表 6 传统指标与 R_{MREI} 对比
Table 6 Comparison of traditional indicators and R_{MREI}

指标名称	定义与计算方式	核心功能	数据特征
吞吐量	震后 24 h 实际物资接收量	反映物资接收规模	静态总量统计
备降航班数	因机场损坏被迫备降其他机场的航班总数	体现机场运行可靠性	离散事件统计
R_{MREI}	全周期实际物资接收率曲线与理想物资接收率曲线的时变偏差积分	整合设备损伤、调度策略、物资交互的综合影响	连续时间序列动态评估

独特价值,其动态量化能力有效弥补了传统指标在捕捉震后接收过程中资源交互、调度响应等微观机制变化上的固有缺陷。

5 结 语

(1)本文提出的机场物资接收效率指数 R_{MREI} 通过考虑应急过程中任意时刻的供需关系,能有效评估 PGA 对不同规模机场灾害全周期物资接收能力的影响。随 PGA 增加, R_{MREI} 逐渐下降,且在同一强度下,对 4E 机场接收能力影响更小。

(2)物资需求一定时,机型对比对机场物资接收能力影响显著,其中大型机比例影响最大,其比例增大时 R_{MREI} 下降。震后适当控制大型机比例可提升物资接收及时性。

(3)机场进场间隔时间对震后应急物资接收能力至关重要, R_{MREI} 随间隔时间增加而提高,但间隔时间过大可能降低运输时效性。需结合物资接收总用时,对进场间隔时间进行多目标优化,选择缩短用时与提高效率的最佳区间。

(4)通过构建多智能体模型模拟机场震后物资接收过程并量化计算 R_{MREI} ,本文可量化不同规模机场在震后不同强度下的物资接收效率与实际接收量,基于不同情景需求给出机型配比和进场间隔时间的优化建议,为震后应急调度提供科学评估工具与策略支持。

(5)本文仍存在两点局限性:一是设备设施易损性数据主要基于现有文献[26]~[30]的通用参数,未考虑不同机场因设施老化程度、日常维护水平差异导致的易损性系数偏差;二是评估指标的有效性验证与仿真模型的案例验证范围均较窄,缺乏大规模试验数据支撑,模型适用性需进一步通过多场景实证验证。

(6)后续研究可开展区域应急运输网络震后性能评估,基于本研究成果替代传统网络评估中的节点功能状态评价模型,以实现更精确、全面的城市震

后应急物资运输网络性能评价。

参 考 文 献 :

References :

[1] POLATER A. Airports' role as logistics centers in humanitarian supply chains: A surge capacity management perspective[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 83: 101765.

[2] CETIN K O, SOYLEMEZ B, GUZEL H, et al. Soil liquefaction sites following the February 6, 2023, Kahramanmaraş-Türkiye earthquake sequence[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2025, 23(3): 921-944.

[3] VEATCH M, GOENTZEL J. Feeding the bottleneck: Airport congestion during relief operations [J]. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2018, 8(4): 430-446.

[4] 赵 栋. 基于网络鲁棒性和多目标优化模型的高速公路应急物流中心选址研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2024. ZHAO Dong. Study on the site selection of expressway emergency logistics center based on network robustness analysis[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2024.

[5] 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.

[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] 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 Xing-long, ZHAO Jun-ni, 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.

[8] ZHOU L, CHEN Z H. Measuring the performance of airport resilience to severe weather events [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 83: 102362.

[9] 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.

- [10] WANG X L, CHEN Z Y, LI K N. Quantifying the resilience performance of airport flight operation to severe weather[J]. *Aerospace*, 2022, 9(7): 344.
- [11] 陈仔燕. 恶劣天气下机场航班运行韧性评估及预测[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
CHEN Zi-yan. Evaluation and prediction of airport flights operational system resilience under severe weather [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022.
- [12] ZÁMKOVÁ M, PROKOP M, STOLÍN R. A review of flight delay causes at Spanish airports based on statistical analysis of categorical data [J]. *Central European Symposium on Thermophysics 2019(Cest)*, 2019, 2133: 400009.
- [13] GOŁDA P, ZAWISZA T, IZDEBSKI M. Evaluation of efficiency and reliability of airport processes using simulation tools [J]. *Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2021, 23(4): 659-669.
- [14] HANAOKA S, INDO Y, HIRATA T, et al. Lessons and challenges in airport operation during a disaster: Case studies on Iwate Hanamaki Airport, Yamagata Airport, and Fukushima Airport during the great east Japan earthquake [J]. *Journal of JSCE*, 2013, 1(1): 286-297.
- [15] DAMGACIOĞLU H, CELIK N, GULLER A. A route-based network simulation framework for airport ground system disruptions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 124: 449-461.
- [16] FERNANDES H F, MÜLLER C. Optimization of the waiting time and makespan in aircraft departures: A real time non-iterative sequencing model [J]. *Journal of Air Transport Management*, 2019, 79: 101686.
- [17] HATA Y, ICHII K, NOZU A. Seismic damage assessment of an airport runway based on non-linear FEM analysis with special reference to crack occurrence [M] // SEIICHI M, TATSUYA I, NOBUYUKI Y. *Advances in Transportation Geotechnics 2*. London: CRC Press, 2012: 207-212.
- [18] TSUBOKAWA Y, KAWAMURA N, MIZUKAMI J, et al. Study on bearing capacity of airport pavement damaged due to the 2011 Tohoku region Pacific coast earthquake [J]. *Journal of JSCE*, 2017, 5(1): 58-67.
- [19] TSUBOKAWA Y, MIZUKAMI J, HATA I, et al. Report on damages of pavement at Sendai Airport due to Tohoku region Pacific coast earthquake [J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser E1 (Pavement Engineering)*, 2012, 68(3): 123-129.
- [20] SAHADEVAN D, AL ALI H, NOTMAN D, et al. Optimising airport ground resource allocation for multiple aircraft using machine learning-based arrival time prediction [J]. *Aerospace*, 2023, 10(6): 509.
- [21] PARK J, SEAGER T P, RAO P S C, et al. Integrating risk and resilience approaches to catastrophe management in engineering systems [J]. *Risk Analysis*, 2013, 33(3): 356-367.
- [22] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [23] WANG C, WANG L D, CHEN H, et al. Fault diagnosis of train network control management system based on dynamic fault tree and Bayesian network [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 2618-2632.
- [24] DE BIAGI V, CHIAIA B, FIORENTINI L, et al. Seismic vulnerability assessment of fuel storage tanks in Italy [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2019, 141: 010905.
- [25] SONG H, ZHANG H Y, CHAN C W. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model with application to INS/GPS navigation system [J]. *Soft Computing*, 2009, 13(1): 31-40.
- [26] RÖED W, MOSLEH A, VINNEM J E, et al. On the use of the hybrid causal logic method in offshore risk analysis [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, 94(2): 445-455.
- [27] ZHAO Z, LU X W, GUO Y, et al. Seismic fragility assessment of base-isolated steel water storage tank [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 8835943.
- [28] 温佳年, 危丽燕, 张望欣, 等. 考虑电力设施失效的区域路网桥梁震后修复决策方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2025, 25(6): 61-74.
WEN Jia-nian, WEI Li-yan, ZHANG Wang-xin, et al. A post-earthquake repair decision method for bridges in regional road networks considering power facility failures [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, 25(6): 61-74.
- [29] VAFAEI M, ALI H S C. Seismic vulnerability of air traffic control towers [J]. *Natural Hazards*, 2018, 90(2): 803-822.
- [30] 尚庆学, 韩 镒, 孙国良, 等. 基于振动台试验的通信机柜地震易损性分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(5): 57-63.
SHANG Qing-xue, HAN Di, SUN Guo-liang, et al. Seismic fragility analysis of telecommunication cabinets based on shaking table tests [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(5): 57-63.
- [31] SHI Z L, DONG Z Q, LI G, et al. Quantitative evaluation method for post-earthquake functionality loss of pedestrian flow pathways within a complex building using evacuation and rescue simulation [J]. *Engineering Structures*, 2024, 317: 118604.
- [32] YANG S, ZHANG Y, LU X Z, et al. Multi-agent deep reinforcement learning based decision support model for resilient community post-hazard recovery [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 242: 109754.
- [33] HOOSHANGI N, ALESHEIKH A. Developing an agent-based simulation system for post-earthquake operations in uncertainty conditions: A proposed method for collaboration among agents [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(1): 27.
- [34] LESLIE D. Multi-agent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations [J]. *The Journal of the Operational Research Society*, 2010, 61(6): 1066.