

中文引用格式:王起全,冯炜翔,杨松立. 基于 SD-MEE 模型的地铁拥挤踩踏事故韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 187-195.

英文引用格式:WANG Qiquan, FENG Weixiang, YANG Songli. Resilience assessment of subway crowd stampede accidents based on SD and MEE model [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 187-195.

基于 SD-MEE 模型的地铁拥挤踩踏事故韧性评估*

王起全 教授, 冯炜翔, 杨松立

(中国劳动关系学院 安全工程学院, 北京 100048)

中图分类号: X928.9

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.0798

资助项目: 中国劳动关系学院一般项目(24XYJS006)。

【摘要】 为进一步避免地铁拥挤踩踏事故发生, 提高地铁站安全管理水平, 基于韧性理论提出地铁拥挤踩踏韧性理念。首先, 以吸收能力、抵抗能力、恢复能力和适应能力为核心, 重点分析地铁拥挤踩踏事故韧性发展阶段, 围绕人群密度核心影响因素构建地铁拥挤踩踏韧性评估指标体系; 然后, 将系统动力学(SD)与物元可拓(MEE)模型相结合, 构建地铁拥挤踩踏韧性评估模型; 最后, 以北京西直门地铁站为例验证该模型。结果表明: 该模型突破传统静态评估模型难以刻画地铁系统韧性能力随时间动态演变过程的局限, 实现韧性能力动态变化的定量化评估; 西直门地铁站总体韧性等级为Ⅱ级(较高韧性), 但由于实时监测滞后和应急响应不足, 在早高峰期间降为Ⅲ级(一般韧性), 适应性受限于智能系统覆盖率较低。

【关键词】 系统动力学(SD); 物元可拓(MEE)模型; 地铁拥挤踩踏事故; 韧性评估; 人群密度

Resilience assessment of subway crowd stampede accidents based on SD and MEE model

WANG Qiquan, FENG Weixiang, YANG Songli

(School of Safety Engineering, China University of Labor Relations, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to further prevent subway crowd stampede accidents and improve the safety management of metro stations, a metro crowd stampede resilience concept was proposed based on resilience theory. Centered on absorption capacity, resistance capacity, recovery capacity, and adaptation capacity, the developmental stages of metro crowd stampede resilience were analyzed, and a resilience evaluation index system was constructed by identifying core influencing factors related to crowd density. By integrating SD with MEE model, a metro crowd stampede resilience evaluation model was developed. This model was then applied to analyze the Beijing Xizhimen Metro Station. Results show that the model overcomes the limitation of traditional static evaluation models in depicting the dynamic evolution of the metro system's resilience capacity over time, enabling a quantitative assessment of dynamic resilience changes. The overall resilience level of Xizhimen Station is Grade II (relatively high resilience). However, due to delays in real-time monitoring and insufficient emergency response, it drops to Grade III (moderate

resilience) during morning peak hours, with adaptability constrained by the low coverage rate of intelligent systems.

Keywords: system dynamics (SD); matter-element extension (MEE) model; subway crowd stampede accidents; resilience assessment; crowd density

0 引言

地铁作为城市发展的关键环节,对建设韧性城市有着重要作用。据统计,北京城市轨道交通系统2025年的日均客运量已经处于连续高位运行且呈动态变化,日均客运量已攀升至988.84万人次,尤其是通勤早高峰时期,其在工作日一天最大客流量已达到1118.71万人次,比2024年同期增长13.62%,地铁拥挤踩踏事故的风险也逐渐增大^[1]。因此,对地铁拥挤踩踏事故进行韧性评估,可为地铁系统动态风险管理决策提供更加精确的支持,并对提升地铁系统韧性能力有着重要意义。

当前,国内外学者大量研究了地铁拥挤踩踏事故。在风险评估方法方面,张立茂等^[2]运用数据包络分析的方法,构建地铁站风险控制有效性评估模型,定量分析了拥挤踩踏风险;霍宇芒等^[3]通过层次分析法-熵权法结合模糊物元模型量化评估了8个北京地铁站的拥挤踩踏事故风险,指出人群密度和逆行对冲人数比属于关键风险因子。在致因机制方面,HELBING^[4]详细剖析了导致发生人群拥挤踩踏事故的一个主要诱因——人群恐慌,并提出社会力模型;FRUIN^[5]使用步行人流服务水平表示了人群密度标准,进而评价了人群踩踏事故风险;LU Ying等^[6]聚焦拥挤踩踏事故风险因素,研究得到组织模式差异通过调控人群动因-空间耦合强度,逐级放大拥挤踩踏事故的致灾阈值与触发概率。在韧性理论应用方面,王震等^[7]从韧性视角出发,以人员、设备、管理为核心设立一级指标,并细化21项二级指标,构建地铁运营系统评估框架;YALDA等^[8]通过脆弱性量化、环形拓扑冗余与成本最优恢复策略整合为闭环框架,以华盛顿地铁案例证实可用最小成本提升网络抗毁韧性;WANG Jiaoe等^[9]利用昆明地铁实证揭示通勤族与老年群体在疫情后出行恢复差异,为公共交通管理与城市韧性提升提供了“分群施策”的新依据。在以上众多研究中,均是对地铁拥挤踩踏事故全生命周期单个阶段或单一因素进行模型构建及风险评估,进行事故全过程的动态量化分析研究较少。

鉴于此,笔者拟提出地铁拥挤踩踏事故韧性能

力的概念,并构建地铁拥挤踩踏事故韧性评估指标体系,提出融合系统动力学模型(System Dynamics Model, SD)与物元可拓模型(Matter-Element Extension Model, MEE)的新评估模型,并以北京西直门地铁站进行实例验证,以期为精确提升地铁安全管理水平提供技术保障。

1 地铁拥挤踩踏事故韧性影响因素

1.1 地铁拥挤踩踏事故韧性概念

1973年,霍林首次把韧性的概念引入到生态学领域,把韧性定义为当生态系统受到干扰以后能够保持其基本结构和功能,且可以回复原有状态或转移到新的稳定状态的一种特性。随后在研究过程中进行不断延展,不断挖掘韧性的内涵。黄浪等^[10]将韧性的理论运用到安全科学领域中,认为系统的安全性是在一定的时空条件下,为避免或消除系统的风险而对系统安全状况进行维持、恢复和优化的过程。

地铁站具有客流量大、人员密集、空间环境密闭、系统间相互关联与复杂等特点。因此,一旦发生拥挤踩踏事故,在相对密闭的地铁空间内,人员疏散和救援难度增大,易造成大面积的人员伤亡。地铁是由多个复杂子系统相互关联构成,任意一个环节发生故障都可能导致地铁系统停止运行,进一步加剧发生地铁拥挤踩踏事故的风险。

以韧性理论为基础,结合地铁拥挤踩踏事故的特点,将地铁拥挤踩踏事故韧性定义为:在客流密度冲击下,系统能够吸收和抵抗客流密度增长对地铁站的影响,维持地铁功能平稳运行,并在拥挤踩踏事故扰动后能够迅速恢复地铁正常运行,并采取措施不断优化以应对不同客流密度状况的能力。

1.2 地铁拥挤踩踏事故韧性评估指标体系建立

地铁拥挤踩踏事故是由多种因素交织而成,其中,客流量作为韧性各个阶段的风险演化过程中的核心,可很好地表征该阶段的韧性变动情况,通过分析韧性理论可知:地铁拥挤踩踏事故发生过程主要分为吸收、抵抗、恢复以及适应4个阶段,对应在地铁拥挤踩踏事故中进一步表现为吸收能力、抵抗能力、恢复能力、适应能力。基于韧性能力围绕人群密度构建地

铁拥挤踩踏事故韧性评估框架,如图 1 所示。

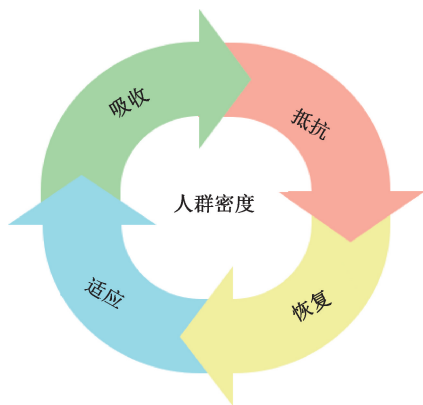


图 1 地铁拥挤踩踏事故韧性评估框架
Fig. 1 Subway crowd stampede resilience assessment framework

依据地铁拥挤踩踏事故韧性评估框架,参考现有地铁拥挤踩踏事故风险脆弱性研究^[11-14],结合国家颁布的地铁相关法规,梳理归纳影响地铁拥挤踩踏事故的各韧性指标,以吸收能力、抵抗能力、恢复能力、适应能力为核心,围绕人群密度识别地铁拥挤踩踏韧性影响因素,建立地铁拥挤踩踏韧性评估指标体系,见表 1。

表 1 地铁拥挤踩踏韧性评估指标体系及定义

Table 1 Evaluation indicator system and definitions for metro crowding and stampede resilience		
一级指标	二级指标	定义
吸收能力	站内通道宽度 C_1/m	指站台主要通道(含出入口、换乘通道最窄部门)的宽度
	实时密度监测响应时间 C_2/s	从监测到人群密度超标到系统/人员作出响应的耗时
	疏散指标覆盖率 $C_3/\%$	疏散指示标志(含地面标识、电子屏等)覆盖关键区域的比例
	动态限流策略适配性 C_4	地铁站是否根据人流量快速调整限流措施(如关闸机、分批进站)
	障碍物空间压缩系数 C_5/m^2	障碍物(如广告牌、垃圾桶设施)占用通道空间多少面积
抵抗能力	应急通道开放时间 C_6	紧急情况下,所有逃生通道多久能全部打开
	广播覆盖率 $C_7/\%$	应急广播覆盖关键区域(站台、通道、出入口)的比例
	工作人员现场引导效率 $C_8/\%$	工作人员接到警报后,多久能抵达现场指挥,指挥的正确率
	多部门协同响应时间 C_9/min	从事件发生到各部门(公安、消防、医疗)抵达现场的总耗时

续表 1

一级指标	二级指标	定义
恢复能力	疏散路径修复效率 C_{10}/min	受损疏散路径(如故障电梯、封闭通道)恢复通行的耗时
	设备设施快速修复效能 C_{11}/min	关键设备(如监控、闸机)故障后恢复运行的耗时
	运营重启与班次调整效能 C_{12}/min	事故后恢复正常运行及调整班次的总耗时
适应能力	动态客流风险地图更新频率 C_{13}	显示人流热点的地图多长时间更新一次
	限流策略动态调整周期 C_{14}	根据人流量变化,多长时间调整一次限流措施
	智能密度调控系统覆盖率 $C_{15}/\%$	智能系统(如人工智能监控、自动报警)覆盖关键区域的比例

2 SD-MEE 模型构建

使用 SD 模型模拟客流的动态变化对韧性能力按时间顺序的变化,利用这种变化转换为 MEE 模型的实测值动态调整,从而实时更新物元矩阵。基于 SD 模型的输出结果,通过经典域划分与综合关联度计算,动态构建物元矩阵,计算韧性等级,实现韧性等级的实时量化与动态调整。

2.1 SD 模型构建

- 1) 确定系统边界与组成部分。在建立 SD 模型时,系统的边界定义了模型的分析范围,系统的边界包括地铁单日运营周期内客流量数据,而组成部分包括 4 个子系统在内的所有影响评估地铁韧性能力的指标。
- 2) 建立因果关系图。综合分析影响地铁拥挤踩踏事故各指标之间的关联耦合关系,将吸收能力、抵抗能力、恢复能力、适应能力以及人群密度视为子系统,共同构建地铁拥挤踩踏事故韧性因果关系,如图 2 所示。其中,主要回路有:①吸收能力→抵抗能力→恢复能力→适应能力,该回路反映各阶段韧性能力之间正向反馈作用;②吸收能力、抵抗能力、恢复能力、适应能力→人群密度,该回路反映各阶段韧性能力与人群密度的相互作用机制。
- 考虑到各子系统内部关联耦合关系,构建地铁拥挤踩踏事故系统流图,如图 3 所示。
- 3) 组合赋权法确定指标权重。地铁拥挤踩踏是一个复杂、多因素的系统,采用层次分析法可根据

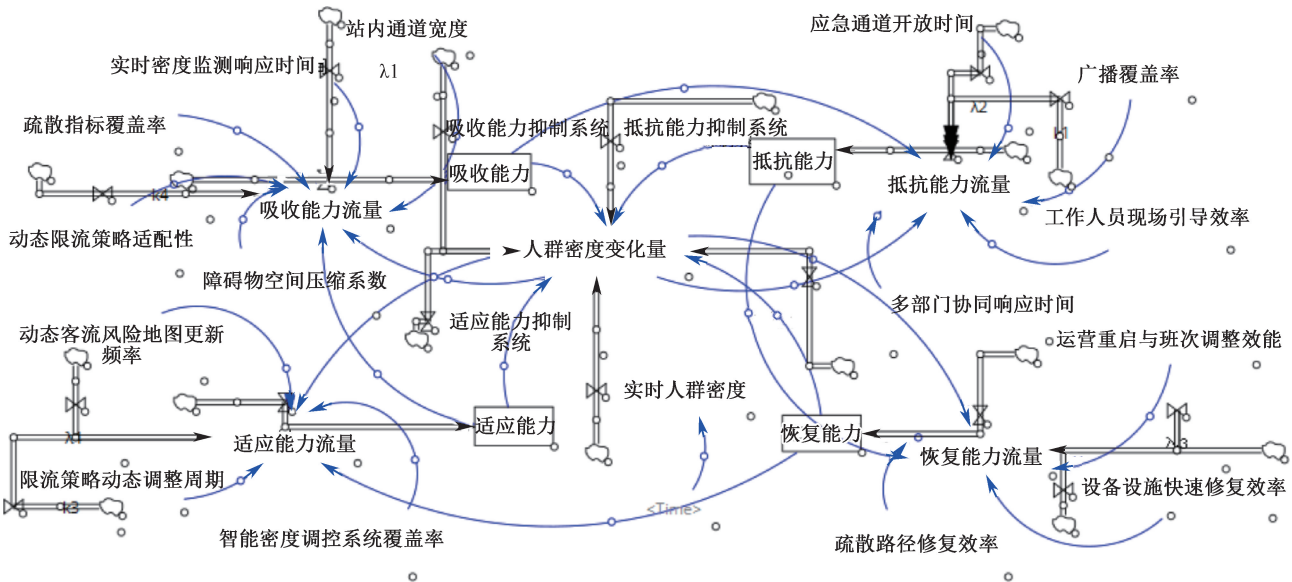


图 2 因果关系

Fig. 2 Causal loop diagram

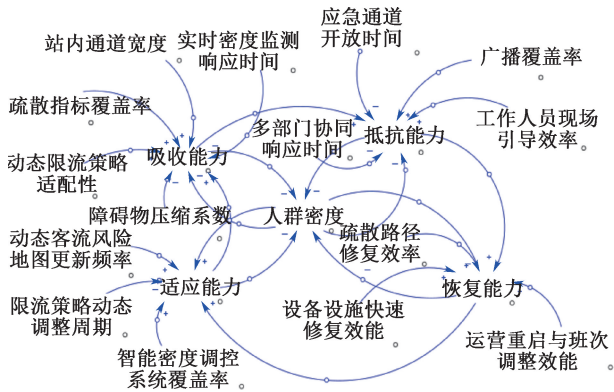


图 3 系统流图

Fig. 3 Stock and flow diagram

专家经验得到难以量化的管理措施,熵权法通过客观计算数据信息熵反映指标离散程度,避免了主观赋权偏差,能够平衡系统复杂性与数据随机性,为SD模型提供可靠数据支撑。

4) 建立数学方程。通过文献[15]以及专家咨询建议建立数学方程反映地铁拥挤踩踏事故各指标间函数关系,见表2。

2.2 MEE 模型构建

1) 确定经典域物元矩阵。地铁拥挤踩踏事故中经典域表示各韧性等级下吸收能力、抵抗能力、恢复能力、适应能力及其指标的取值范围。将韧性等级划分为 j 个等级,则经典域物元矩阵 R_j 表示为:

表 2 SD 模型主要变量和方程

Table 2 Key variables and equations of SD model

变量	变量方程
实时人群密度	$D_0(t) = \frac{P_i + P_o + P_t}{S_e}$
人群密度变化量	$D(t) = D_0(t) \cdot (1 - \alpha_1 \times R_1 - \alpha_2 \times R_2 - \alpha_3 \times R_3 - \alpha_4 \times R_4)$
吸收能力流量	$0.119 \times C_1 + 0.059 \times C_2 + 0.053 \times C_3 + 0.203 \times C_4 + 0.056 \times C_5 - \lambda_1 \times D(t) + k_4 \cdot R_4$
抵抗能力流量	$0.061 \times C_6 + 0.034 \times C_7 + 0.045 \times C_8 + 0.020 \times C_9 - \lambda_2 \times D(t) + k_1 \cdot R_1$
恢复能力流量	$0.058 \times C_{10} + 0.031 \times C_{11} + 0.055 \times C_{12} - \lambda_3 \times D(t) + k_2 \cdot R_2$
适应能力流量	$0.035 \times C_{13} + 0.101 \times C_{14} + 0.063 \times C_{15} + \lambda_4 \times D(t) + k_3 \cdot R_3$

注: P_i 为地铁进站量人数, P_o 为地铁出站量人数, P_t 为地铁换乘量人数, S_e 为地铁车站有效面积, m^2 ; R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为变量吸收能力、抵抗能力、恢复能力、适应能力; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 为各能力对人群密度的抑制系数; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 分别为吸收能力、抵抗能力、恢复能力、适应能力前者对后者的调节系数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 分别为人群密度对吸收、抵抗、恢复、适应能力的衰减系数。

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & c_2 & (a_{j2}, b_{j2}) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

2) 构建待评物元矩阵。针对待评价地铁站,根据 SD 模型输出的韧性能力随时间变化的数据作为实际测量值构成待评价物元矩阵 R_x :

$$R_x = \begin{bmatrix} N_x & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: N_x 为待评价地铁站; v_i 为指标 c_i 的实际值。

2.3 SD-MEE 模型检验

使用 Vensim PLE 软件检验模型的适应性,系统结果显示为“Model is ok”,表明构建模型成立。

2.4 计算单指标关联度

通过关联函数量化待评价地铁站韧性能力各影响因素与韧性等级的接近程度。为识别关键指标对各自韧性能力的薄弱环节,关联函数定义为:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(v_i, v_{ji})}{|v_{ji}|} & v_i \in v_{ji} \\ \frac{\rho(v_i, v_{ji})}{\rho(v_i, v_{pi}) - \rho(v_i, v_{ji})} & v_i \notin v_{ji} \end{cases} \quad (3)$$

式中: v_{ji} 为第 j 个韧性等级下,第 i 个指标 C_i 的经典域区间; v_{pi} 为指标 C_i 所有可能的韧性等级下,其测量值可以取到的整个范围; $\rho(v_i, v_{ji}) = \left| v_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \right| - \frac{b_{ji} - a_{ji}}{2}$ 为点 v_i 到区间 v_{ji} 的距离, $|v_{ji}| = b_{ji} - a_{ji}$; a_{ji} 为第 j 个韧性等级下,第 i 个指标 C_i 的经典域下限; b_{ji} 为第 j 个韧性等级下,第 i 个指标 C_i 的经典域上限。

2.5 计算综合关联度

综合关联度反映待评价地铁站对韧性等级 j 的整体隶属度,在地铁拥挤踩踏事故中,综合关联度反映整个地铁系统在特定时间段内(如早晚高峰)应对拥挤踩踏事故的能力,同时,揭示地铁系统的韧性各阶段能力的优势与短板。计算公式为:

$$K_j(N_x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot K_j(v_i) \quad (4)$$

式中 ω_i 为用于衡量该指标 C_i 在其所属的上一级能力中,相对于其他指标的重要程度。

2.6 确定韧性等级

依据最大关联度原则,确定最终韧性等级:

$$K = \max \{ K_j(N_x) \} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

若 $K = K_j$, 则判定该韧性等级为 j 。

3 SD-MEE 模型实例验证

3.1 地铁车站概况

北京西直门地铁站是北京市轨道交通网络中的重要枢纽节点,站体采用地下三层立体交叉设计,其中,2 号线为地下二层岛式站台,13 号线为两岛一侧三线站台,4 号线采用分离式侧式站台。作为 2 号线、4 号线与 13 号线的换乘站,西直门站日均客流量超 30 万人次,早高峰时段换乘客流峰值可达每小时 4.2 万人次,形成典型的时空聚集性风险。西直门地铁站已部署智能视频监控系统、动态限流装置,并实施分时段差异化客流管控策略。以该地铁站作为研究对象,利用 SD-MEE 模型,动态评估地铁站韧性能力,验证模型有效性。

3.2 数据收集及模型参数说明

1) 数据收集及说明。北京市西直门地铁站拥挤踩踏相关数据主要来源于《地铁设计规范》(GB50157—2013)、《城市轨道交通运营管理规定》《城市轨道交通运营指标体系》《城市轨道交通工程项目规范》《城市轨道交通设备设施维护与更新技术规范》等法规。政府部门统计公告、铁路管理部门记录报告、新闻报道以及相关文献。

北京市西直门地铁站客流数据主要来源于地铁站运营方提供自动检票系统实时采集乘客进出站、换乘刷卡记录,结合闸机、摄像头等设备统计的当日实时客流量。

2) 模型主要参数说明。建立 SD 模型,通常需要确定常量的初始值,通过对变量的合理赋值可有效提高模型仿真分析的精准性。根据数据收集的结果,设计调查问卷,与西直门地铁的实际情况相结合,通过西直门地铁站 6 位专家,其中,1 位是西直门地铁站副站区长,另外 5 位分别包括 1 位值班组长、1 位技术主管、1 位副区站长、1 位站务员、1 位自动化综合控制员,工作年限均在 10 年以上,凭借自身工作经验,针对设计问卷,获取对地铁拥挤踩踏各韧性指标的看法,以及对模型初始值参数的建议,在变量的不同变化中,选取最合适的模型参数。为保证打分的客观性,取 6 位专家打分数据的均值,最大-最小值归一化后作为指标初始参数值,并利用

加权综合评价法,得到韧性能力指标初始值。

3.3 SD 模拟结果

将数据初始值输入 Vensim PLE 软件中运行,得到吸收、抵抗、恢复、适应能力随时间变化曲线,如图 4 所示,从图 4 中可以看出,吸收能力在早晚高峰显著下降,晚高峰波动可控;抵抗能力在早高峰下跌严重,有造成地铁拥挤踩踏事故的风险;恢复能力水平稳步提升,但同样需要优化客流密度高峰时恢复能力措施;适应能力晚高峰提升显著,数据驱动学习效果发挥显著。

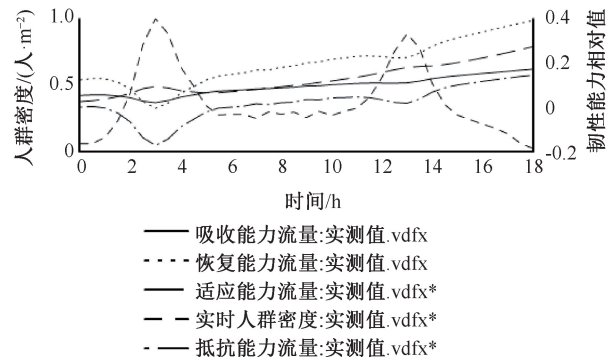


图 4 韧性能力随时间变化

Fig. 4 Resilience capacity time-variation diagram

3.4 确定经典域物元矩阵

依据西直门地铁站人群密度拥挤踩踏安全管理的实际情况,借鉴韧性等级划分方法,将地铁拥挤踩踏事故韧性划分为 5 个等级,分别为:Ⅰ级(高韧性)表示地铁具有极强的韧性能力,能够在极端情况下应对拥挤踩踏事故,使人群密度始终保持在安全范围内;Ⅱ级(较高韧性)表示地铁具备较强的韧性能力,能够在大多数情况下应对拥挤踩踏事故,使人群密度基本保持在安全范围内;Ⅲ级(一般韧性)表示地铁具备一定的韧性能力,在通常情况下能够应对拥挤踩踏事故,但极端情况人群密度超标韧性能力不足;Ⅳ级(较低韧性)表示地铁韧性能力较弱,人群密度容易超标;Ⅴ级(低韧性)表示地铁韧性能力极弱,极易造成拥挤踩踏事故。通过梳理现行地铁运营规范标准,并结合公共安全领域专家的建议,确定各韧性等级经典域和节域,最终确定各等级经典域值Ⅰ—Ⅴ级分别为[90,100]、[80,90)、[70,80)、[60,70)、[0,60),节域为[0,100]。其次,根据 SD 输出的西直门地铁站韧性能力随时间变化结果,结合专家经验与《地铁设计规范》等法律法规,确定各韧性能力及指标等级经典域划分。

3.5 确定待评物元矩阵

根据专家对各指标的实测值打分,分析整理数据,求取平均值作为西直门地铁韧性评价指标物元矩阵的量值,将 SD 输出的韧性能力随时间变化结果作为物元矩阵的量值。确定待评物元为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} N & C_1 & 80.17 \\ & C_2 & 82.17 \\ & C_3 & 86.83 \\ & C_4 & 84.33 \\ & C_5 & 82.17 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} N & C_6 & 87.33 \\ & C_7 & 88.33 \\ & C_8 & 81.50 \\ & C_9 & 67.67 \end{bmatrix}$$
$$R_3 = \begin{bmatrix} N & C_{10} & 84.00 \\ & C_{11} & 79.67 \\ & C_{12} & 71.50 \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} N & C_{13} & 60.00 \\ & C_{14} & 72.17 \\ & C_{15} & 69.50 \end{bmatrix}$$
$$R = \begin{bmatrix} \text{西直门地铁站} & R_1 & Va_{0-18} \\ & R_2 & Vr_{0-18} \\ & R_3 & Vb_{0-18} \\ & R_4 & Vj_{0-18} \end{bmatrix}$$

3.6 计算单指标关联度

将待评物元输入物元模型,根据建立的经典域和节域,以及得到的各指标权重,代入式(3),计算各韧性能力指标对应二级指标的关联度,各韧性能力二级指标关联度计算结果,见表 3。

表 3 吸收、抵抗、恢复、适应能力二级指标关联度

Table 3 Correlation degree of secondary indicators for absorption、resistance、recoveryand adaptation capacity

韧性等级	N1	N2	N3	N4	N5
$K(C_1)$	-0.331	0.017	-0.009	-0.339	-0.504
$K(C_2)$	-0.418	-0.137	0.283	-0.287	-0.491
$K(C_3)$	-0.194	0.317	-0.341	-0.561	-0.671
$K(C_4)$	-0.190	0.306	-0.347	-0.565	-0.674
$K(C_5)$	-0.137	0.189	-0.406	-0.604	-0.703
$K(C_6)$	-0.269	0.416	-0.208	-0.472	-0.604
$K(C_7)$	-0.364	-0.125	0.334	-0.222	-0.416
$K(C_8)$	-0.260	0.350	-0.159	-0.422	-0.560
$K(C_9)$	-0.349	-0.067	0.155	-0.282	-0.461
$K(C_{10})$	-0.273	0.400	-0.200	-0.467	-0.600
$K(C_{11})$	-0.291	0.306	-0.153	-0.435	-0.576
$K(C_{12})$	-0.321	-0.109	0.350	-0.186	-0.367
$K(C_{13})$	-0.444	-0.375	-0.286	-0.167	0.118
$K(C_{14})$	-0.390	-0.220	0.217	-0.072	-0.304
$K(C_{15})$	-0.455	-0.402	-0.337	-0.256	0.131

3.7 计算综合关联度和韧性等级判定

对于指标吸收、抵抗、恢复、适应能力的关联度

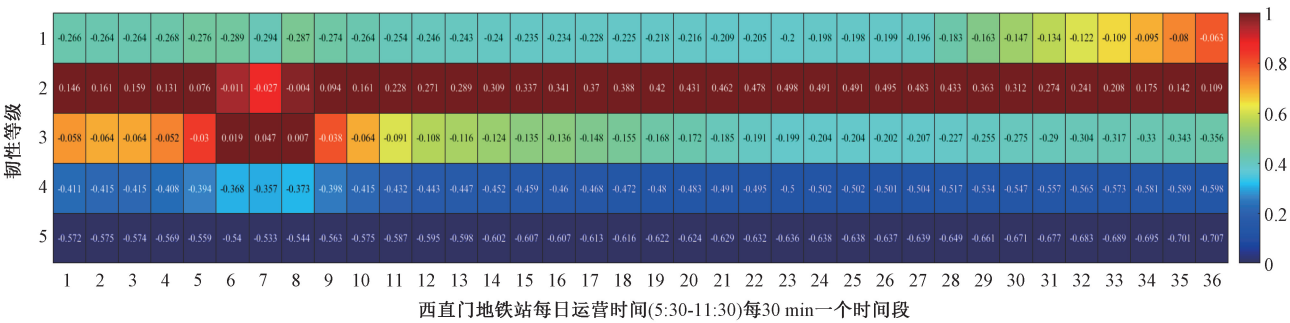


图 5 吸收能力动态关联度热图

Fig. 5 Dynamic correlation heatmap of absorption capacity indicators

会随着时间发生动态的变化,通过 SD 模型计算吸收、抵抗、恢复、适应能力随时间变化的动态实测值,并代入式(3),通过 Matlab 软件得到吸收(图 5)、抵抗、恢复、适应能力的动态关联度。

将表 3 中的数值代入式(5)中,可得到西直门地铁站韧性等级动态变化情况。

3.8 韧性评估结果分析

3.8.1 吸收能力:实时密度监测方式影响韧性等级

从图 5 可以看出,西直门地铁站吸收能力多数时段与Ⅱ级关联度较高,韧性等级总体维持在Ⅱ级(较高韧性),表明疏散指标覆盖率对吸收能力具有重要影响。早高峰时段(7:30—9:30),吸收能力与Ⅱ级关联度显著降低至-0.027,韧性等级随之降至Ⅲ级(一般韧性)。结合表 3 可以看出,实时密度监测响应时间与该等级关联密切,其响应延迟是韧性下降的主要原因。调研发现,该站采用人工目测方式进行密度监测,每半小时估算一次乘客数量。早高峰期间人流急剧增加,导致监测响应滞后,与分析结果相符。该阶段属事故孕育期,需依赖吸收能力进行监测与限流,但响应延迟使吸收能力提前达到上限,进而加重后续系统抵抗压力。早高峰后韧性等级恢复至Ⅱ级,而在晚高峰(17:00—19:00),尽管关联度仍为Ⅱ级,但数值出现波动下降,其中,通道宽度和障碍物压缩系数 2 指标虽属Ⅱ级但趋近Ⅲ级,显示其在应对二次高峰时韧性略显不足。

3.8.2 抵抗能力:广播覆盖率与协同响应时间影响韧性等级

抵抗能力在 5:30—7:30 及 10:00—16:00 时段与Ⅲ级关联度较高,韧性等级为一般。结合表 3,广播覆盖率和多部门协同响应时间是主要影响因素。非高峰时段广播能有效传递疏散指令、分散客流,但高峰时段存在盲区或音量不足问题;在平时多部门协同可基本满足初步物资部署,高峰时响应仍待提

升。早高峰 7:30—9:00 期间,抵抗能力降至Ⅳ级(较低韧性),为系统最薄弱环节,易发生拥挤踩踏事故。此时广播覆盖与协同响应指标虽未达Ⅳ级,但关联度已趋近该级,需重点加强。该阶段对应事故发展期,抵抗能力不足将显著放大事故风险。晚高峰 17:00—19:00 时段,韧性等级恢复至Ⅱ级。尽管客流有所增长,但应急通道开放迅速、工作人员疏导有效,缓解了抵抗压力。

3.8.3 恢复能力:运营效能与客流密度适配程度影响韧性等级

恢复能力总体呈上升趋势。在 5:30—8:00,其与Ⅲ级关联度最高,韧性等级为一般。结合表 3,该时段内运营重启与班次调整总耗时为 30~60 min,表明事故后能较快恢复运营,避免客流积压,但其恢复速度与客流适应能力在同等级指标中仍显不足。至 8:00—10:00 早高峰期间,恢复能力关联度降至Ⅳ级,显示客流高峰对恢复能力产生明显冲击。此时运营重启与班次调整效能虽未达Ⅳ级,但关联度已趋近该级,反映出该指标在高密度客流下易失效,需重点关注。此阶段对应事故发展阶段,若前期抵抗能力不足,将使恢复压力倍增,易引发二次事故。10:00 后,随着客流下降,恢复能力逐步回升至Ⅲ级。晚高峰(17:30—19:00)期间关联度数值虽略有下降,但仍维持在Ⅲ级,说明现有措施可缓解高峰压力,但仍有优化空间。直至夜间(21:00—23:30),恢复能力进一步提升至Ⅱ级,表明西直门站已能实现快速、高效的运营恢复。

3.8.4 适应能力:数据驱动智能设备与限流策略效能影响韧性等级

在 6:00—8:00 时段,适应能力处于Ⅳ级(较差韧性)。这主要由于该能力依赖数据驱动的学习机制,而早间初始客流密度低,难以为动态客流风险地图等智能系统提供足够数据,导致适应能力不足。随着客流上升,7:30—10:00 期间适应能力逐步提

升至Ⅲ级(一般韧性)。结合表3,限流策略动态调整周期处于该等级,表明车站的高峰期间已能较快调整限流措施,但应对持续增长的客流仍需进一步提速。10:00后客流回落,适应能力短暂小幅下降,反映出学习过程存在滞后。此后系统通过早高峰数据积累,在11:30后提升至Ⅱ级,具备对晚高峰的预判与提前应对能力。因此,在17:00—19:00晚高峰期间,适应能力未出现明显下降。

整体而言,西直门地铁站大部分时段的韧性等级稳定Ⅱ级(较高韧性),表明西直门地铁站在常规客流下具备较强的应对拥挤踩踏事故风险的能力。在早高峰7:30—9:00,显示西直门地铁韧性能力最弱,达到Ⅲ级(一般韧性),原因是早高峰客流密度对吸收能力和抵抗能力冲击较大,而晚高峰因适应能力优化韧性表现更稳定,维持在Ⅱ级。结合图5,发现吸收能力是抵抗能力的基础,吸收能力不足时会增加密度对抵抗能力的压力,吸收能力下降时同时抵抗能力也在下降,二者呈现正相关。恢复能力依赖灾前以及灾中的措施,恢复能力在非高峰时段表现稳定,但早高峰因吸收能力和抵抗能力不足,恢复能力有所下降,表明灾前灾中措施直接影响灾后恢复。最终,适应能力通过早高峰密度数据优化了晚高峰的限流策略。验证了模型中“预防→响应→恢复→改进”的反馈回路。

3.8.5 措施建议

从整体评价情况来看,需要继续采取措施降低西直门地铁站的拥挤踩踏风险,提高地铁系统安全性。

1) 吸收能力。引入基于人工智能摄像头的动态客流监测系统,结合热力图分析,实时监测站台、换乘通道等重点区域人群密度。仿真结果显示,监测频率从每30 min一次提升至每3 min一次,早高峰吸收能力可提高约15%。

2) 抵抗能力。升级广播系统,覆盖换乘通道转角、站台立柱背后等盲区,实现95%系统覆盖率。模型验证表明:此举可使抵抗能力提升30%。

3) 恢复能力。应用深度学习列车动态调配系统,整合监控视频、闸机数据等实时优化调度。测试

表明:发车间隔压缩至90 s后,站台等待时间下降40%。同时,对电梯、照明等关键系统实行并行备份,故障时可通过增强现实技术辅助维修,5 min内完成修复,平均修复时间缩短65%,恢复能力提高18%。

4) 适应能力。构建“多源感知—智能决策”风险管控平台,融合人工智能摄像头、Wi-Fi探针、闸机数据等,每5 min生成3 D风险热力图;在重点区域铺设智能感应地砖,实时监测局部拥挤压力,增强动态风险响应能力。

4 结 论

1) 依据韧性理论分析地铁拥挤踩踏事件的本质特点,从吸收能力、抵抗能力、恢复能力以及适应能力4个方面辨识地铁拥挤踩踏的韧性因素,重点关注人群密度因素的影响,选择15项相关指标建立地铁拥挤踩踏的韧性评价指标体系。

2) 将SD与MEE模型结合,利用SD模型描述客流密度与韧性能力之间的动态交互作用关系,通过MEE模型量化描述每一阶段地铁拥挤踩踏事故韧性能力的韧性等级,并在此基础上构建地铁拥挤踩踏韧性评价模型,实现地铁拥挤踩踏事故韧性评估从静态到动态的转变,经实例验证,该模型能精准识别地铁系统各阶段关键薄弱环节,为地铁安全管理提供科学、高效的技术工具。

3) 利用SD-MEE模型对北京西直门地铁站进行实例验证,结果表明:西直门地铁站大部分时间处于Ⅱ级,较高韧性等级,各时段韧性能力的大小与客流密度高度相关,早晚高峰时段韧性能力显著下降;吸收能力短板密度监测滞后会引发抵抗、恢复能力的连锁失效,需优先提升吸收能力水平,使用SD-MEE模型可使吸收能力提升15%,抵抗能力提升30%;适应能力需要西直门地铁站增加智能设备进一步提升。

4) 未来可进一步扩大研究范围,将更多影响地铁拥挤踩踏事故的因素纳入评估指标体系,同时探索模型在不同城市、不同类型地铁站的适用性,以推动该模型的广泛应用和不断完善。

参 考 文 献

[1] 交通运输部. 2024年城市轨道交通运营数据速报[EB/OL]. (2025-01-15). <https://mp.weixin.qq.com/s/qgwt21W4LZfpHDX3JFIWQ>.

[2] 张立茂,刘梦洁,吴贤国,等. 基于 DEA 的地铁站拥挤踩踏风险分析[J]. 土木工程与管理学报,2014,31(4): 76-82.
ZHANG Limao, LIU Mengjie, WU Xianguo, et al. Risk analysis of crowded stampede accident in subway stations based on DEA method[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2014,31(4): 76-82.

[3] 霍宇芒,宋守信,顾一波. 基于组合权重的地铁车站拥挤踩踏事故风险评价[J]. 安全与环境工程,2016,23(5): 139-143.
HUO Yumang, SONG Shouxin, GU Yibo. Risk assessment of crowd crushing and trampling accidents in subway stations based on combined weights[J]. Safety and Environmental Engineering,2016,23(5): 139-143.

[4] HELBING D. Traffic and related self-driven many-particle systems[J]. Reviews of Modern Physics, 2001, 73(4): 1 067-1 141.

[5] FRUIN J. Pedestrian planning and design[M]. New York:Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners,1971:24-27.

[6] LU Ying, WANG Jingwen, DAI Weihui, et al. Research on risk factors of human stampede in mass gathering activities considering organizational patterns[J]. Front. Public Health,2025,13: DOI:10. 3389/fpubh. 2025. 1555735.

[7] 王震,王汉霖. 基于因子分析和熵权-TOPSIS 的地铁运营系统韧性评价[J]. 智能城市,2024,10(8): 73-76.
WANG Zhen, WANG Hanlin. Resilience evaluation of subway operation systems based on factor analysis and entropy-TOPSIS[J]. Intelligent City, 2024, 10(8): 73-76.

[8] YALDA S, BIAL M A, ZHANG Yanjie,et al. Resilience-based strategies for topology enhancement and recovery of metro rail transit networks[J]. Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 2020, 6(2): DOI:10. 1061/ajrua6. 0001057.

[9] WANG Jiaoe, HUANG Jie, YANG Haoran,et al. Resilience and recovery of public transport use during COVID-19[J]. NPJ Urban Sustain, 2022,2(1): DOI:10. 1038/s42949-022-00061-1.

[10] 黄浪,吴超,杨冕,等. 韧性理论在安全科学领域中的应用[J]. 中国安全科学学报,2017,27(3): 1-6.
HUANG Lang, WU Chao, YANG Mian, et al. Application of resilience theory in field of safety science[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 1-6.

[11] 王起全. 地铁拥挤踩踏事故脆弱性区域智能化预警研究[J]. 中国安全科学学报,2018,28(11): 162-167.
WANG Qiquan. Research on intelligent early-warning of crowded stampede accidents vulnerabe areas in subway[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 162-167.

[12] 王起全,杨鑫刚,蓝军,等. 多源流理论视域下的地铁拥挤踩踏事故应急管理策略[J]. 中国安全科学报,2023, 33(11): 181-188.
WANG Qiquan, YANG Xin'gang, LAN Jun, et al. Emergency management strategy of subway stampede accidents based on multiple-streams theory[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(11): 181-188.

[13] 袁欣. 基于仿真优化的地铁站行人踩踏风险控制研究[D]. 武汉:中南财经政法大学,2023.
YUAN Xin. Risk control of pedestrian trampling in subway station based on simulation optimization[D]. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law, 2023.

[14] 王维莉,薛雪. 人群聚集场所拥挤踩踏风险评估[J]. 灾害学,2024,39(1): 146-151,157.
WANG Weili, XUE Xue. Risk assessment of stampede accident in crowd gathering place[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 146-151,157.

[15] 张旭. 城市轨道交通运营系统安全韧性评价[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022.
ZHANG Xu. Safety resilience evaluation of urban rail transit operation systems [D]. Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University, 2022.



作者简介: 王起全 (1976—),男,山东齐河人,博士,教授,主要从事公共安全应急管理、风险评价、大数据预警分析等方面的研究。E-mail: wqq_100@163.com。