文章编号：1003-1421(2026)02-0130-12
引用格式：李子曈，杨勇，张力丰，等. 基于多维度韧性评估的地铁枢纽瓶颈识别[J]. 铁道运输与经济，2026，48(2)：130-141.
LI Zitong，YANG Yong，ZHANG Lifeng，et al. Identification of Bottlenecks in Metro Hubs Based on Multidimensional Resilience Assessment[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(2)：130-141.

基于多维度韧性评估的地铁枢纽瓶颈识别

李子曈[1]，杨　勇[1]，张力丰[2]，王潇然[2]，包金智[3]

(1.广州地铁设计研究院股份有限公司 创新研究院，广东 广州　510000；2.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；3.北京交通大学 威海校区经济管理学院，山东 威海　264401)

摘　要：为解决突发大客流扰动下既有瓶颈识别方法难以提升枢纽韧性的问题，构建了融合精细化空间建模的多维度韧性评估与瓶颈识别框架。首先，构建“网格-流线-主体”多维度韧性指标体系，量化枢纽能力并且计算各维度韧性值，克服了传统基于网络拓扑的韧性评价无法反映客流及主体的影响，实现了更全面和准确的韧性评估；其次，为满足多主体和现场运营需求，额外考虑设施设备之间的关键区域，对枢纽空间进行精细化建模；然后，基于Anylogic仿真平台，实现精细化建模和多维度评价指标自动计算，进而定量识别出枢纽在相应维度的韧性薄弱环节。以某多运营主体地铁枢纽为例进行验证，结果表明提出的框架能够精准识别出突发大客流下网格、流线和主体各维度的韧性薄弱环节，为车站韧性评估和瓶颈识别提供了技术支撑。

关键词：地铁枢纽；突发大客流；多维度韧性评估；Anylogic仿真；瓶颈识别
中图分类号：U29　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250620006

Identification of Bottlenecks in Metro Hubs Based on Multidimensional Resilience Assessment

LI Zitong[1]，YANG Yong[1]，ZHANG Lifeng[2]，WANG Xiaoran[2]，BAO Jinzhi[3]

(1. Innovation Research Institute, Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Weihai 264401, Shandong, China)

Abstract: To address the challenge that existing bottleneck identification methods struggle to enhance hub resilience under sudden large passenger flow disturbances, a multi-dimensional resilience assessment and bottleneck identification framework incorporating refined spatial modeling was established. Firstly, a multi-dimensional resilience index system comprising “grid, flow, and subject” was established to quantify hub capabilities and calculate resilience values across each dimension. This approach overcame the limitations of traditional network topology-based resilience assessments, which fail to reflect passenger flow and subject impacts, thereby enabling a more comprehensive and accurate resilience evaluation. Secondly, to accommodate the needs of multiple subjects and on-site operations, critical areas between facilities and equipment were additionally considered, enabling detailed modeling of hub spaces. After that, based on the Anylogic simulation platform, it achieved detailed modeling and automated calculation of multi-dimensional evaluation indexes, thereby

收稿日期：2025-06-20　　**修订日期**：2025-09-20
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3005204)

quantitatively identifying the weak links in the hub's resilience across corresponding dimensions. Using a certain multi-operational subject's metro hub as an example for verification, the results demonstrate that the proposed framework is able to accurately identify the resilience weaknesses of the grid, flow, and subject dimensions under sudden large passenger flow. The proposed research framework provides technical support for station resilience assessment and bottleneck identification.
Keywords: Metro Hub; Sudden Large Passenger Flow; Multi-Dimensional Resilience Assessment; Anylogic Simulation; Bottleneck Identification

0　引言

地铁枢纽作为交通系统的核心节点，承载着衔接多种运输方式、服务超大规模客流的关键职能，具有大规模空间立体交通设施、多层次服务网络、超强客流交织强度、多样化用户群体等特点，使其成为交通系统安全防控的重中之重[1]。伴随着城市化进程的加速以及轨道交通网络的发展，常态性通勤潮汐、节假日集中出行以及大型活动等诱发的突发大客流日益频发。然而，当地铁枢纽遭遇突发状况引发的大客流冲击时，由于风险影响范围广、涉及主体多、演化速度快，防控处置难度较大，对运营安全和社会秩序造成恶劣影响。如2023年2月18日，受复工、返校、出游影响，长沙地铁多个站点迎来最大客流，2号线五一广场站、万家丽广场站、长沙火车南站客运量位居线网前3名，3个车站客流总量达62.7万，乘客出现被挤得“脚不沾地，前行数十步”的场景；2025年5月1日晚，大量游客在上海外滩观赏完夜景后集中前往上海地铁10号线豫园站返程，致使豫园站进站量激增，客运压力陡然增大；这些事件凸显出当前地铁枢纽在韧性能力建设上存在不足之处。因此，为提升地铁枢纽应对突发大客流等运营风险的韧性，实现系统在扰动情况下最小化运行损失并保障关键功能有效恢复，亟需通过精准评估大客流冲击下的枢纽运行状况，找出瓶颈薄弱环节，优化运营管理策略，增强枢纽在扰动中的功能稳定性与运营安全性。

在应对突发大客流扰动时，精准识别车站瓶颈是提升枢纽韧性的关键前提，既有研究主要通过仿真建模与网络分析在瓶颈识别方面开展研究[2-4]。陈雷钰等[5]结合Anylogic仿真软件，通过行人密度和疏散时间实现可预见性和不可预见性大客流的车站瓶颈识别；黄令海等[6]提出关联瓶颈与瓶颈簇理论，基于设备服务时间构建车站动态瓶颈识别方法；Huang等[7]提出了一种社会群体感知疏散模型，通过疏散时间、社交群体半径、恐慌指数和期望速度分析地铁站的疏散瓶颈。然而，现有瓶颈识别研究多聚焦于车站设施设备节点的分析，忽视非设施设备功能区域的精细化建模，且未能充分考虑系统韧性的影响。在韧性评估方面，现有研究多聚焦于火灾、洪涝等自然灾害安全风险的韧性评估[8-10]。宋亮亮等[11]从物理、人员、组织和环境子系统建立韧性评估指标体系，构建基于区间云模型的地铁车站运营安全韧性评估方法；Liu等[12]从防护、恢复和适应性3方面识别出影响地铁站恢复能力的评价指标，提出了一种改进的量子粒子群优化投影追踪模型评价地铁站对洪涝灾害的抗灾能力；Xu等[13]提出了一种基于网络的车站韧性模型，定量地评估基础设施的服务特性及乘客出行延误对车站韧性的影响。当前研究存在局限性，一方面，针对地铁枢纽运营过程中突发大客流扰动的韧性研究不足；另一方面，现有的评估框架缺乏对地铁枢纽内多运营主体的系统性考量。因此，亟需建立面向地铁枢纽大客流扰动风险下，融合精细化建模与多主体交互的多维度韧性评估框架，以识别扰动传播中的关键薄弱环节。

针对上述问题，提出了一套融合多维度韧性评估、精细化空间建模与动态客流仿真的创新性研究框架。建立涵盖“网格-流线-主体”3个维度的综合韧性指标评价体系，并且设定基于韧性状态的分级阈值，实现考虑拓扑、客流、主体的综合韧性评估；基于设施设备功能属性与多主体属性特征，对全域空间进行网格离散化建模，通过Anylogic仿真平台动态模拟突发大客流场景，精准捕捉所构建的各韧性指标变化，通过各维度韧性计算和阈值比对定量识别潜在的韧性薄弱环节，为提升地铁枢纽的韧性水平提供科学依据和决策支持。

1　问题描述

结合国内外铁路、地铁等韧性定义[14-16]，将多主体地铁枢纽韧性定义为：由多运营主体、多交通方式配合的综合枢纽系统在不同风险场景下疏散、接驳乘客时所具备的吸收扰动并维持基本功能的能力。

多主体地铁枢纽韧性的数学定义如式(1)所示。

$$R = \frac{1}{t_1 - t_0}\int_{t_0}^{t_1}\frac{Q(t)}{Q_{\max}}\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：R表示系统韧性；t_0表示扰动起始时间，s；t_1表示恢复终止时间，s；$Q_{\max}$表示系统在无扰动下的理想疏散/接驳能力；$Q(t)$表示时间t时系统的实际疏散/接驳能力。

为精细化表征地铁枢纽的空间结构与功能逻辑，借鉴交通线网拓扑建模的思想[17-18]，将枢纽全域划分为离散化的空间网格单元，以这些空间网格单元作为节点，乘客在节点间的实际走行路径作为流线，并且将每个节点关联唯一的运营主体属性。地铁枢纽空间网格模型的公式化表达如式(2)所示。

$$\Pi = (G,\ E,\ \Phi) \tag{2}$$

式中：Π表示基础空间网格模型；G表示空间网格集合；E表示流线拓扑集合；Φ表示属性集合。

为精准量化枢纽系统的疏散、接驳能力，基于枢纽空间拓扑网络模型，构建涵盖网格、流线和主体3个维度的韧性评估体系，通过Anylogic仿真平台获取各维度的指标变化状态，并且计算对应的韧性值，获取各维度的薄弱瓶颈环节，以辅助运营者应急决策。逻辑流程图如图1所示。

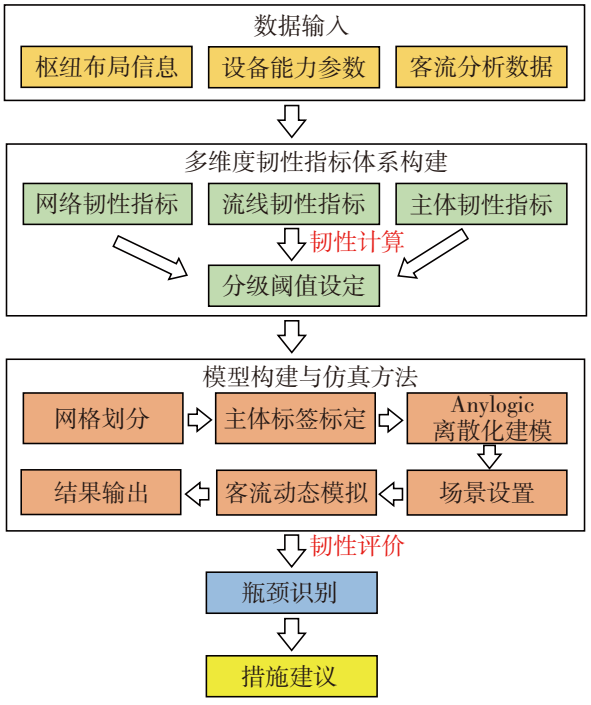

图1　逻辑流程图

Fig.1　Logic flow diagram

2　枢纽多维度韧性评估体系

针对地铁枢纽空间结构复杂、客流动态多变、多运营主体并存等特点，构建了一个多层次、系统化的韧性评价指标体系，该体系以“网格-流线-主体”为3个核心维度，从空间结构、运行路径到功能主体，层层递进、相互关联，全面评估地铁枢纽在面对扰动时维持运行、适应变化和恢复功能的能力[19-20]。网格作为客流活动的物理载体与空间基础，为客流流动提供物理路径支撑，“网格性能”聚焦枢纽离散化空间单元自身的稳健性，评估其在扰动下的基础通行能力；流线是乘客在网格构成的物理空间网络上实际移动的路径，定义为设施设备功能网格间的有向连接关系，是连接静态网格空间与主体功能实现的动态纽带，其状态直接受到所经网格单元状态的影响，同时也直接影响着功能主体的效能，“流线性能”关注扰动下客流路径的动态运行状态、连通性与抗干扰能力；主体反映的是枢纽内承担不同核心功能、由不同运营方负责的物理区域集合，其状态由内部包含的网格单元状态和流经该主体的流线状态共同决定，“主体性能”着眼于功能区域在扰动下的负载状态与疏散效能，是其综合服务能力的体现。在此基础上，依据规范标准、历史运营数据与专家经验等进行各指标对应韧性的阈值分级设定，为提升地铁枢纽瓶颈识别的准确性提供科学依据和决策支持。韧性评价指标体系如图2所示。

2.1　多维韧性指标体系构建

2.1.1　网格层韧性指标与计算

基于网格区域视角的指标有疏散(接驳)平均走行速度[21]。疏散(接驳)平均走行速度是衡量行人在疏散或接驳过程中移动效率的重要指标，直接反映枢纽内突发事件对行人疏散效率的影响，其计算公式如式(3)所示。

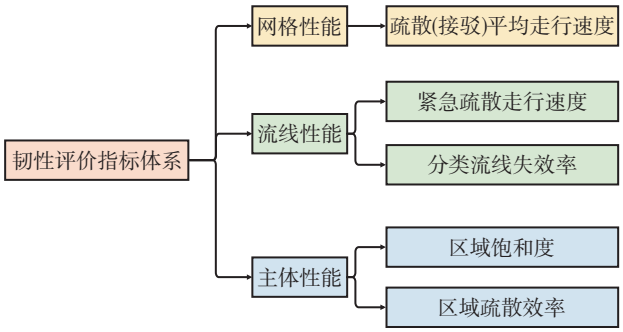

图2　韧性评价指标体系

Fig.2　Resilience evaluation index system

$$V_i^G(t)=\frac{\sum\limits_{p\in P_i^G(t)}D_p^G(t,\ t+\triangle t)}{\sum\limits_{p\in P_i^G(t)}T_p^G(t,\ t+\triangle t)} \tag{3}$$

式中：$V_i^G(t)$表示在时刻t网格i的疏散(接驳)平均走行速度，m/s；$P_i^G(t)$表示在时刻t网格i内的行人集合；p表示一个行人个体；$D_p^G(t,\ t+\triangle t)$表示在时段$[t,\ t+\triangle t]$内行人p在网格中的走行距离，m；$\triangle t$表示一个时间步长，s；$T_p^G(t,\ t+\triangle t)$表示在时段$[t,\ t+\triangle t]$内行人p在网格内走行所花费的时间，s。

基于疏散(接驳)平均走行速度计算得到网格通行韧性，其计算公式如式(4)所示。

$$R_g=\frac{1}{t_1-t_0}\int_{t_0}^{t_1}\frac{V_i^G(t)}{V_{\max}^G}\mathrm{d}t \tag{4}$$

式中：R_g表示网格通行韧性；$V_{\max}^G$表示网格的最大疏散(接驳)平均走行速度，$V_{\max}^G=1.50\ \mathrm{m/s}$[22]。

2.1.2　流线层韧性指标与计算

（1）紧急疏散走行速度。紧急疏散走行速度反映了枢纽内突发事件对流线运行效率的影响[21]。突发事件干扰强度越大，风险沿流线传播的速度越快，影响范围越广，从而对流线的通行能力和有效利用率产生更大的影响，其计算公式如式(5)所示。

$$V_j^E(t)=\frac{\sum\limits_{p\in P_j^E(t)}D_p^E(t,\ t+\triangle t)}{\sum\limits_{p\in P_j^E(t)}T_p^E(t,\ t+\triangle t)} \tag{5}$$

式中：$V_j^E(t)$表示在时刻t流线j的紧急疏散走行速度，m/s；$P_j^E(t)$表示在时刻t流线j上的行人集合；$D_p^E(t,\ t+\triangle t)$表示在时段$[t,\ t+\triangle t]$内行人p在流线上的走行距离，m；$T_p^E(t,\ t+\triangle t)$表示在时段$[t,\ t+\triangle t]$内行人p在流线上走行所花费的时间，s。

基于紧急疏散走行速度计算得到流线通行韧性，其计算公式如式(6)所示。

$$R_e=\frac{1}{t_1-t_0}\int_{t_0}^{t_1}\frac{V_j^E(t)}{V_{\max}^E}\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中：R_e表示流线通行韧性；$V_{\max}^E$表示流线的最大紧急疏散走行速度，$V_{\max}^E=1.50\ \mathrm{m/s}$[22]。

（2）分类流线失效率。分类流线失效率是评估行人在疏散或接驳过程中移动效率的重要指标，直接反映了突发事件对枢纽内部行人疏散效率的影响。随着突发事件干扰强度的增加，行人平均走行速度逐渐降低，导致疏散效率下降，分类流线失效率提高，其计算公式如式(7)所示。

$$\lambda_h(t)=\frac{\tilde{N}_h(t)}{N_h(t)} \tag{7}$$

式中：$\lambda_h(t)$表示在时刻t类别为h的流线所对应的流线失效率，$h\in\{$进站，出站，接驳，换乘$\}$；$\tilde{N}_h(t)$表示在时刻t类别为h的流线中受影响流线数量，条；$N_h(t)$表示在时刻t类别为h的流线数量，条。

用分类流线失效率直接表征流线连通韧性，反映枢纽内客流路径在扰动下的可靠性。

2.1.3　主体层韧性指标与计算

（1）区域饱和度。区域饱和度是反映区域负载程度的重要指标，定义为当前区域内实时行人数量与该区域最大容纳能力的比值[23]，计算公式如式(8)所示。

$$F_k^{\Phi}(t)=\frac{\sum\limits_{i\in G_k^{\Phi}}|P_i^G(t)|}{\sum\limits_{i\in G_k^{\Phi}}C_i^G} \tag{8}$$

式中：$F_k^{\Phi}(t)$表示在时刻t主体k的区域饱和度；G_k^{Φ}表示主体k包含的网格集合；$|P_i^G(t)|$表示在时刻t网格i内的行人数量，人；C_i^G表示网格i的最大容纳能力，人。

基于区域饱和度计算得到主体承载韧性，其计算公式如式(9)所示。

$$R_f=\frac{1}{t_1-t_0}\int_{t_0}^{t_1}\frac{F_k^{\Phi}(t)}{F_{\max}^{\Phi}}\mathrm{d}t \tag{9}$$

式中：R_f表示主体承载韧性；$F_{\max}^{\Phi}$表示主体的最大区域饱和度，$F_{\max}^{\Phi}=1$。

（2）区域疏散效率。区域疏散效率衡量各主体区域内行人通过疏散通道的平均速度，体现疏散路径的畅通程度[23]，计算公式如式(10)所示。

$$W_k^{\Phi}(t)=\frac{\sum_{q\in Q_k^{\Phi}(t)}V_q^{\Phi}(t)}{|Q_k^{\Phi}(t)|} \tag{10}$$

式中：$W_k^{\Phi}(t)$表示在时刻t主体k的区域疏散效率，m/s；$V_q^{\Phi}(t)$表示在时刻t行人q的瞬时走行速度，m/s；$Q_k^{\Phi}(t)$表示在时刻t主体k中的疏散行人集合；$|Q_k^{\Phi}(t)|$表示在时刻t主体k中的疏散行人数量，人。

基于区域疏散效率计算得到主体疏散韧性，其计算公式如式(11)所示。

$$R_w=\frac{1}{t_1-t_0}\int_{t_0}^{t_1}\frac{W_k^{\Phi}(t)}{W_{\max}^{\Phi}}\mathrm{d}t \tag{11}$$

式中：R_w表示主体疏散韧性；$W_{\max}^{\Phi}$表示主体的最大区域疏散效率，$W_{\max}^{\Phi}=1.5$ m/s[22]。

2.2　分级阈值设定

基于构建的“网格–流线–主体”多维韧性指标体系计算对应维度的韧性值，提出一套分层级、可量化的韧性状态评价阈值。

（1）网格韧性。根据《美国公共交通通行能力和服务质量手册》中对于排队和等候区域行人服务水平的划分标准，将通过网格疏散(接驳)平均走行速度计算得到的网格通行韧性划分为5个等级，用于评估网格状态的风险等级，将达到A级状态和B级状态的网格识别为瓶颈网格，网格通行韧性风险等级判别如表1所示。

表1　网格通行韧性风险等级判别

Tab.1　Grid access resilience risk level classification

网格状态	等级	网格通行韧性
严重拥挤	A	[0.40，0.55)
非常拥挤	B	[0.55，0.73)
拥挤	C	[0.73，0.81)
正常	D	[0.81，0.88)
宽松	E	[0.88，1.00)

（2）流线韧性。①流线通行韧性。根据行人步行速度的不同范围，将通过紧急疏散走行速度计算得到的流线通行韧性划分为5个等级，用于判别疏散过程中的风险等级，将达到A级状态和B级状态的流线识别为瓶颈流线，流线通行韧性风险等级判别如表2所示。②流线连通韧性。以分类流线失效率50%为阈值点，超过该阈值表示流线功能严重失效，需要采取相应措施进行优化或调整。

（3）主体韧性。①主体承载韧性。根据饱和度的不同范围，将通过区域饱和度计算得到的主体承载韧性划分为3个等级，用于判别主体内的拥挤程度和风险等级，将达到A级状态的主体识别为瓶颈主体，主体承载韧性风险等级判别如表3所示。②主体疏散韧性。根据疏散效率的不同范围，将通过区域疏散效率计算得到的主体疏散韧性划分为3个等级，用于判别不同主体疏散效率的高低，将达到A级状态的主体识别为瓶颈主体，主体疏散韧性风险等级判别如表4所示。

表2　流线通行韧性风险等级判别

Tab.2　Flow access resilience risk level classification

流线状态	等级	流线通行韧性
严重拥挤	A	[0.40，0.55)
非常拥挤	B	[0.55，0.73)
拥挤	C	[0.73，0.81)
正常	D	[0.81，0.88)
宽松	E	[0.88，1.00)

表3　主体承载韧性风险等级判别

Tab.3　Subject load-bearing resilience risk level classification

主体承载状态	等级	主体承载韧性
高饱和度	A	[0.65，1.00)
中饱和度	B	[0.30，0.65)
低饱和度	C	[0.00，0.30)

表4　主体疏散韧性风险等级判别

Tab.4　Subject evacuation resilience risk level classification

主体疏散状态	等级	主体疏散韧性
低疏散效率	A	[0.00，0.20)
中疏散效率	B	[0.20，0.50)
高疏散效率	C	[0.50，1.00)

基于枢纽内的客流仿真数据，从网格层、流线层和主体层3个维度分别计算韧性指标并转化为对应的系统功能韧性值，然后将计算得到的各维度韧性值与预设的分级阈值进行比对，实现对枢纽薄弱环节的精准定位。

3　模型构建与仿真方法

3.1　枢纽空间建模方法

为地铁枢纽构建精细化空间网格模型，将传统建模中常被忽视的非设备功能区域(如通道、商业区等)纳入建模范围，与设施设备区域共同构成完整的空间网格体系。具体的空间网格模型的公式化表达如式(12)所示。

$$\begin{cases} \Pi = (G,\ E,\ \Phi) \\ G = G_\varepsilon \cup G_\mu \\ E = (\Gamma,\ \boldsymbol{A}) \\ \Phi = (\Omega,\ \Psi) \end{cases} \tag{12}$$

式中：$G_\varepsilon = \{g_i | i = 1, 2, \cdots, n_\varepsilon\}$表示设施设备功能网格集合；$g_i$表示第$i$个设施设备功能网格；$n_\varepsilon$表示设施设备功能网格数量；$G_\mu = \{\bar{g}_i | i = 1, 2, \cdots, n_\mu\}$表示非设施设备功能网格集合；$\bar{g}_i$表示第$i$个非设施设备功能网格；$n_\mu$表示非设施设备功能网格数量；$\Gamma = (\delta_{xy},\ x, y \in \{1, 2, \cdots, n\},\ x \neq y)$表示网格之间的有向边集合；$\delta_{xy}$表示从网格$x$指向网格$y$的有向边；$n$表示总网格数量；$\boldsymbol{A}$表示邻接矩阵，如果存在从网格$x$指向网格$y$的客流路径，则$\boldsymbol{A}_{xy} = 1$，否则$\boldsymbol{A}_{xy} = 0$；$\Omega$表示运营主体集合，主体类型涵盖枢纽主体、地铁主体、铁路主体、航空主体、公交主体和二级开发主体等；Ψ表示网格功能集合，功能类型涵盖服务功能、通行功能、商业功能、集散功能等。

基于“权责清晰、功能导向”的网格划分原则，形成网格划分流程如下。

（1）基于不同的主体归属进行划分。依据物理空间的法定权属边界、实际管理责任主体以及枢纽各运营方签订的管理协议进行初始网格划分，确保每个初始网格单元具有唯一且明确的主体归属标签。其中，枢纽主体负责公共区站厅、换乘大厅及连接通道等非付费区公共区域的运营管理；地铁主体负责地铁付费区、站台及附属设施的运营管理；铁路主体负责铁路客运区域的付费区、站台、候车室及相关设施的运营管理；航空主体负责值机、安检、候机、行李提取等航空专属区域的运营管理；公交主体负责枢纽内公交场站、候车区、上下客区及调度区域的运营管理；二级开发主体负责商业店铺及配套专属空间的运营管理。对于由单一主体统一管理的核心功能区域，无论后续如何细分，均视为归属于同一主体，标注唯一的主体标签。对于位于不同主体管理区域交界处且责任可能交叉的区域，依据主要管理责任方和主导功能进行归属主体判定，标注唯一的主体标签。

（2）基于不同的功能需求进行划分。在划分形成的主体网格内部，根据空间功能特征和客流动态规律，将网格进一步细分为更小的功能性子网格单元。所有的功能性子网格单元，均自动继承其所属主体网格的唯一运营主体属性标签。

3.2　韧性指标仿真计算

采用Anylogic仿真平台对枢纽进行仿真建模，将离散化的网格单元直接转化为Anylogic中的空间建模元素，构建基础设施及行人路径网络，配置行人生成器、最短路径选择逻辑和设备状态机模型。基于Anylogic在设定突发场景下的仿真模拟，通过各韧性指标变化结果计算对应的韧性值。

（1）突发场景设置。首先通过设置符合平峰时段的稳定客流分布模式，构建枢纽系统的基础运行状态；随后通过事件触发机制在设定的时间窗口对关键网格区域注入高强度客流，注入的突发客流行人将依据模型中预设的最短路径选择逻辑，沿着枢纽物理布局所定义的流线网络，流向其预设的目标区域，该过程模拟了客流压力在预设流线上的生成、汇聚与传播；最后设置突发大客流消散，模拟系统状态回归基准水平的动态变化过程[5]。每组场景进行10次重复仿真实验，计算韧性均值，仅当10次仿真实验的标准差小于0.05时认定结果稳定。

（2）结果输出。在突发场景设置的基础上，使用Anylogic进行仿真模拟，得到各指标随时间变化的图表。①网格指标设置。在Anylogic仿真平台中，为每个网格单元配置行人移动轨迹追踪器，记录行人进入网格的时间戳、离开网格的时间戳以及行人在网格内的移动距离，依据时段内移动距离与所用时间的比值计算每个网格的疏散(接驳)平均走行速度，并在Anylogic中输出每个网格在仿真时间段内疏散(接驳)平均走行速度的时间序列变化曲线。②流线指标设置。在Anylogic仿真平台中，针对进站、出站、接驳、换乘4类流线路径，在起点设备设置计时起点触发器，在终点设备设置计时终点触发器，结合行人路径选择记录与时间测量功能，精确捕捉行人在各流线的移动距离与移动时间，通过行人移动距离与移动时间的比值计算紧急疏散走行速度；流线失效率通过受影响流线数量除以全部流线数量获得。③主体指标设置。在Anylogic仿真平台中，为每个主体管辖区域设置聚合监测器，整合同一主体区域内所有网格的数据，通过行人计数器

获取区域的实时人数用于计算区域饱和度，在各主体区域设置速度监测点用于计算区域疏散效率。

4　案例分析

选取某地铁枢纽作为研究对象，该枢纽采用立体化布局设计，包含地上1层和地下6层，有5条地铁线路在该枢纽进行换乘，其中在枢纽B2层实现五线站厅的共享统一。枢纽空间功能复合多元，涵盖值机、行李托运、送客、航空办公、安检、运维保障、配套设施等功能。该枢纽全日上下车总量63万人次，进出站33万人次，换乘量30万人次；早高峰上下车总量12万人次，进出站5.3万人次，换乘量6.4万人次。五线交汇吸引的大量人流、车流都为该枢纽的安全有序运行提出了挑战。

4.1　场景设置

针对该地铁枢纽B2层区域进行仿真研究，进行网格划分，并且标定枢纽主体、地铁主体、航空主体和二级开发主体4类主体标签，为降低随机因素干扰并且全面评估系统的韧性表现，共进行了10次重复仿真实验。每次仿真实验时长为30 min，步长设置为1 s，模拟突发大客流发生在机场线左右出站闸机的情况。从仿真开始到第5分钟模拟枢纽的常态运行状态，机场线出站闸机设置常态客流为2 000人/h；从第6分钟开始在机场线出站闸机处引入突发大客流，设置突发大客流强度为每分钟200人，持续时长为5 min；到第11分钟时突发大客流事件结束，客流恢复为常态水平，机场线出站闸机仍然设置常态客流为2 000人/h，直至仿真结束；在整个仿真过程中，枢纽的进站口和其他区域的出站闸机设置300人/h的恒定客流，案例场景示意图如图3所示。通过10次仿真实验，获取韧性指标数据并且计算韧性均值，得到薄弱网格、流线和主体的分布。

4.2　韧性评估和瓶颈识别结果

（1）网格瓶颈识别。在某次仿真实验的30 min时间内，某次仿真实验网格区域疏散(接驳)平均走行速度变化图如图4所示。基于10次重复实验模拟突发大客流事件的仿真结果，进行网格通行韧性计算，得到该突发场景下的瓶颈网格区域。①客流发生点(O点)：与该机场线闸机处直接相连的网格区域T22和T28容易产生客流拥堵，通道T28韧性值达到A级状态且难以恢复到初始状态，为薄弱区域；②客流消失点(D点)：客流疏散/接驳流出网格区域T9在整个周期内平均速度变化频繁且下降幅度大，韧性值达到B级状态，为薄弱区域，需重点关注；③途经区域：网格区域T18和T20在整个仿真时间段内平均速度下降幅度较大且难以恢复到最初状态，韧性值达到B级状态，为薄弱区域，需着重关注。

综上所述，本次案例表明B2层韧性较差的薄

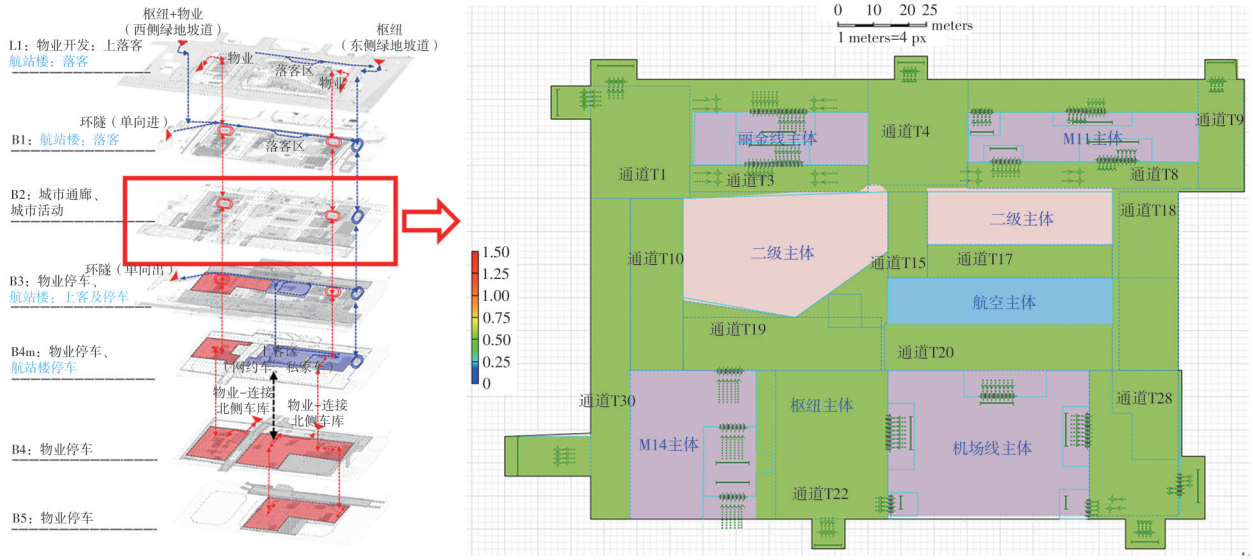

图3　案例场景示意图

Fig.3　Schematic diagram of case scenario

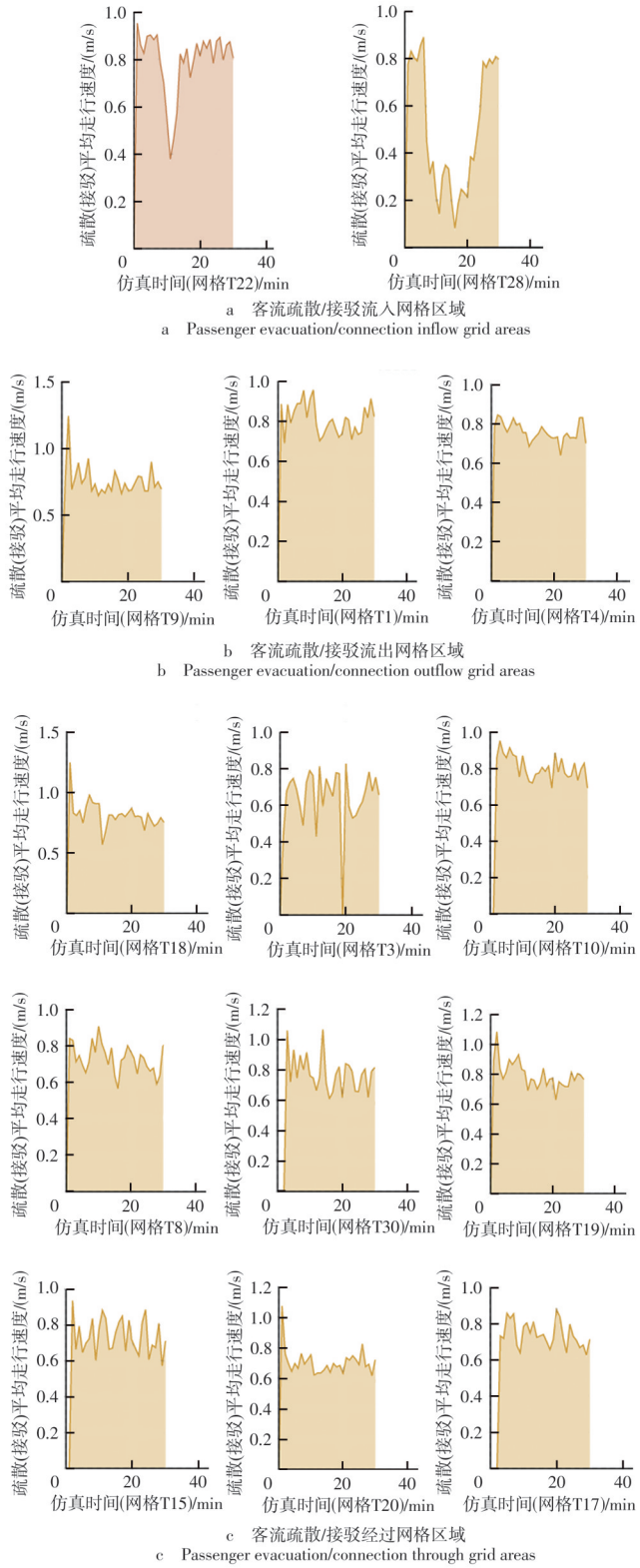

图4　某次仿真实验网格区域疏散(接驳)平均走行速度变化图

Fig.4　Average evacuation (connection) travel speed variation diagram in grid areas in one simulation experiment

弱网格包括：网格区域T28，T9，T18，T20，突发大客流场景下瓶颈网格区域如图5所示。

（2）流线瓶颈识别。重点分析机场线站厅与航空功能区之间的流线拥堵情况，各类流线方向与闸机位置如图6所示。各流线每5 min内的流线通行韧性数值如表5所示。①接驳流线：1~5 min内，闸机3至闸机5、闸机6的接驳流线通行韧性达到B级状态；6~10 min时，拥挤情况扩散至其他接驳流线；10 min后，虽然客流量恢复至2 000人/h，但闸机3至闸机6的流线通行韧性恶化至A级状态，说明接驳流线在大客流情况下极易成为薄弱环节。接驳流线尽管流线失效率低于33.3%，但如不及时进行有效管控，失效情况会加剧，造成更严重的拥堵。②换乘流线：闸机1至闸机3的流线通行韧性持续处于B级状态，属于薄弱流线，如不及时进行有效管控流线通行韧性将升为A级状态。闸机2至闸机3的流线通行韧性维持在C级状态，但随着客流量的增加，可能进一步恶化，属于次薄弱流线，需加强关注。换乘流线未达到流线失效，但闸机1至闸机3流线通行韧性已接近A级状态，需进行重点关注。③进站流线和出站流线的流线通行韧性始终低于B级状态，不作为薄弱流线。

综上所述，机场线站厅与航空功能区之间的接驳流线为薄弱流线，需要进行重点关注。

（3）主体瓶颈识别。分析某次仿真实验区域饱和度的实时变化，区域饱和度指标仿真结果如图7所示。出现突发大客流的机场线主体承载韧性达到A级状态，属于风险薄弱位置；14号线、11号线地铁主体承载韧性处于B级状态，能够维持基本的运营功能；丽金线、二级主体、航空、枢纽主体承载韧性处于C级状态，必要时可作为应急疏散区域。分析某次仿真实验区域疏散效率的实时变化，区域疏散效率指标仿真结果如图8所示。机场线、11号线、14号线地铁主体疏散韧性达到A级状态，属于风险薄弱位置；枢纽主体疏散韧性处于B级状态，疏散效率受到部分影响；丽金线、二级主体疏散韧性处于C级状态，疏散效率较高。

综上所述，机场线、11号线、14号线地铁主体韧性水平较低，邻近的枢纽主体、二级主体、航空主体仍能保持较高韧性，需积极联动配合客流转移疏散。

4.3　方法对比分析

为验证研究提出的“网格–流线–主体”多维度

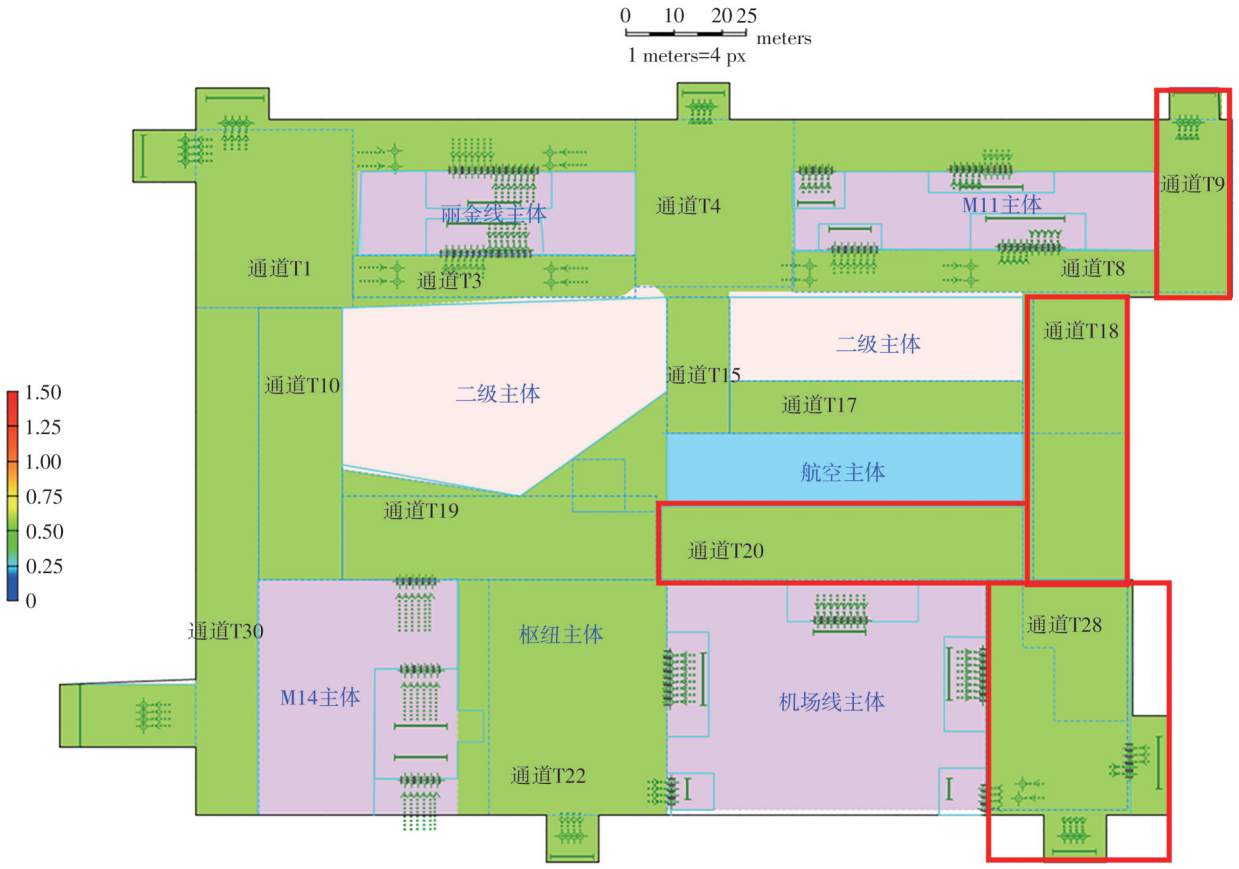

图5　突发大客流场景下瓶颈网格区域

Fig.5　Bottleneck grid area in sudden large passenger flow scenario

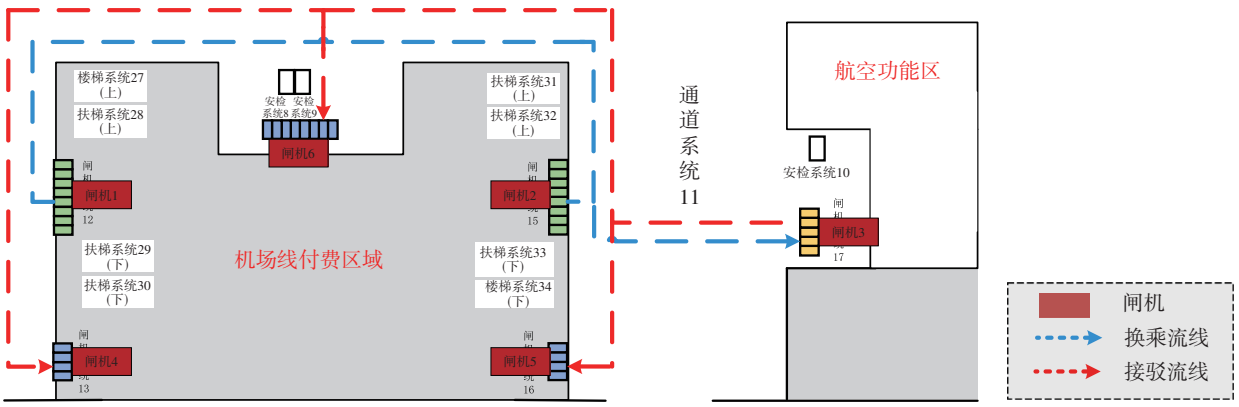

图6　各类流线方向与闸机位置

Fig.6　Various flow directions and gate locations

韧性评价方法的创新性与有效性，设计2组对比实验：分别构建“网格–流线”二维韧性评价方法和“网格–主体”二维韧性评价方法，基于同一仿真数据进行韧性评估与瓶颈识别，将所得结果与“网格–流线–主体”多维度韧性评价方法的识别结果进行对比分析，多维度韧性评价方法对比分析如表6所示。

结果表明，“网格–流线”二维韧性评价方法可捕捉网格与流线状态，但缺乏对主体的建模，仅能反映出物理空间层面的拥堵或效率损失，不能识别运营主体的管理范围，导致管控对象不明确，管理策略缺乏指向性；“网格–主体”二维韧性评价方法虽能反映网格与主体区域的负载与疏散效率，却无法获取行人实际移动路径的动态信息，导致无法识别流线中的关键冲突路径，难以制定疏导客流的精

表5　流线通行韧性数值

Tab.5　Flow access resilience values

分类		1~5 min	6~10 min	11~15 min	16~20 min	21~30 min
进站流线	闸机4	1.00	1.00	1.00	0.93	0.94
	闸机5	0.81	0.81	0.99	0.91	0.95
	闸机3	1.00	0.87	0.96	0.95	0.97
	闸机6	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93
出站流线	闸机2	1.00	0.95	0.91	0.91	0.91
	闸机1	1.00	0.94	0.93	0.93	0.93
	闸机3	1.00	0.97	0.92	0.92	0.85
接驳流线	闸机5	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	闸机6	0.56	0.57	0.54	0.51	0.52
	闸机4	—	0.64	0.65	0.65	0.65
换乘流线	闸机2	0.80	0.80	0.79	0.78	0.78
	闸机1	0.60	0.61	0.61	0.61	0.61

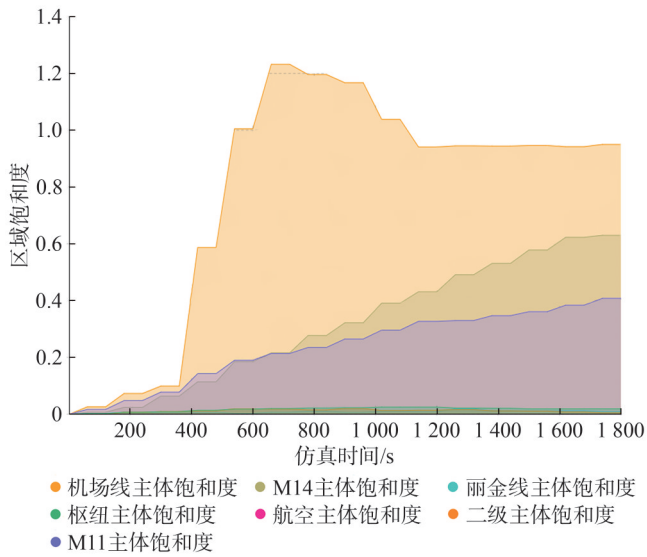

图7　区域饱和度指标仿真结果

Fig.7　Simulation results of regional saturation indexes

细化措施；“网格–流线–主体”多维度韧性评价方法通过整合空间单元、功能路径与管理主体，能够全面、系统地识别出枢纽内的瓶颈薄弱环节，避免了因维度缺失造成的评估盲区与决策链断裂，显著提升了枢纽韧性评估的系统性与可行性。

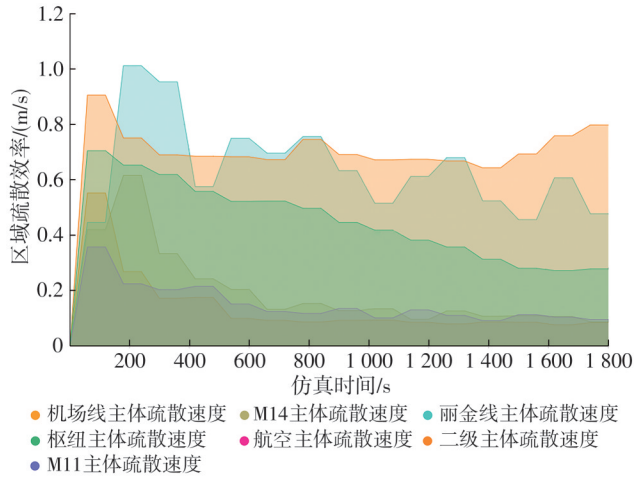

图8　区域疏散效率指标仿真结果

Fig.8　Simulation results of regional evacuation efficiency indexes

4.4　宏观建议

针对得到的网格、流线和主体薄弱点提出与现实需求相符的宏观措施建议，以提升枢纽整体韧性和应对能力[8]。

（1）在网格层面，网格区域T28，T9，T18和T20为薄弱网格，建议调整站内网格区域的开放范围和通行方向，优化网格区域乘客流动性；设置引导标识或移动导向屏，调整并引导客流流向其他能提供相同服务的区域，避免过度拥挤。

（2）在流线层面，机场线站厅与航空功能区之间的接驳流线属于薄弱流线，建议使用隔离栏等针对高风险流线动态调整流线的容量与方向，引导高负载区域的客流向低负载区域转移，减少客流交织点，缓解内部运行压力。

（3）在主体层面，机场线、11号线、14号线地铁主体属于风险薄弱位置，建议加强与枢纽主体的协作、沟通与信息共享[24]，形成跨主体的应急响应机制。

表6　多维度韧性评价方法对比分析

Tab.6　Comparative analysis of multi-dimensional resilience evaluation methods

评估维度	“网格–流线–主体”维度	“网格–流线”维度	“网格–主体”维度
识别薄弱网格	T28，T9，T18，T20	T28，T18，T20	T28，T20
识别薄弱流线	机场线站厅与航空功能区之间的接驳流线	机场线站厅与航空功能区之间的接驳流线	未识别
识别薄弱主体	机场线、11号线、14号线地铁主体	未识别	机场线地铁主体
结果	可全面识别系统在网格、流线和主体的瓶颈	仅可识别部分瓶颈网格和瓶颈流线；无法关联运营责任主体，导致管理干预对象不明，难以制定针对不同运营主体的管控策略	仅可识别部分薄弱网格和薄弱主体；遗漏流线瓶颈，导致管控措施无法定位客流冲突路径，针对性不足

5　结论

针对突发大客流扰动下地铁枢纽韧性评估与瓶颈识别问题，提出了一套创新性的研究方法与评估框架。构建了融合“网格-流线-主体”3个维度的韧性评估体系，通过精细化空间建模方法进行枢纽内网格划分与多主体属性标定，利用Anylogic仿真平台实现扰动场景下枢纽的瓶颈识别。主要结论如下。

（1）构建了网格、流线、主体多维度韧性评价体系，实现了对枢纽系统运行状态的全面刻画，能够突破传统方法的局限性，捕捉非设施设备区域的拥堵风险以及功能主体的薄弱环节；并且设定了科学的阈值分级标准，为关键瓶颈识别提供了决策依据。

（2）提出空间网格化建模方法，对枢纽区域进行精细化网格划分，结合主体属性标签标定，为后续的韧性评估和瓶颈识别奠定了理论基础和数据支撑。

（3）通过Anylogic仿真平台模拟枢纽系统在突发大客流扰动下的动态响应过程，采用重复仿真实验有效消除随机波动影响，精准识别网格、流线和主体的薄弱瓶颈环节。

参考文献：

[1] 钟茂华，陈俊洋，刘晓庆，等. 地铁枢纽车站大客流疏散性能评估及策略优化研究[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(7)：5-11.
ZHONG Maohua，CHEN Junfeng，LIU Xiaoqing，et al. Study on Evacuation Performance Evaluation and Strategy Optimization of Large Passenger Flow in Metro Interchange Hub Station[J]. Journal of Safety Science and Technology，2022，18(7)：5-11.

[2] 汪瑞琪，张　缨. 城市轨道交通车站内客流集散瓶颈识别及排序方法[J]. 交通信息与安全，2017，35(1)：71-79，91.
WANG Ruiqi，ZHANG Ying. Identification and Ranking Approaches of Bottleneck for Gathering and Distributing Capacity in Stations of Urban Rail Transit[J]. Journal of Transport Information and Safety，2017，35(1)：71-79，91.

[3] HUI Y，SU S J，PENG H. Evaluation of Subway Emergency Evacuation Based on Combined Theoretical and Simulation Methods[J]. Applied Sciences，2024，14(24)：11580.

[4] LI Y Z，LIU X. Guidance and Evacuation Research on Passenger Flow of Rail Transit Outbound Bottleneck Based on AnyLogic[C]// IEEE 7th International Conference on Computer Science and Network Technology，ICCSNT 2019，Dalian，China，October 2019 Proceedings. Piscataway：IEEE，2019：26-29.

[5] 陈雷钰，张汝华，马明迪. 基于Anylogic的轨道交通车站大客流瓶颈识别与疏散组织优化[J]. 上海大学学报(自然科学版)，2023，29(4)：694-704.
CHEN Leiyu，ZHANG Ruhua，MA Mingdi. Anylogic-Based Bottleneck Identification and Evacuation Organization Optimization of Large Passenger Flow in Rail Transit Stations[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)，2023，29(4)：694-704.

[6] 黄令海，李海鹰，许心越. 城市轨道交通车站动态瓶颈识别方法研究[J]. 铁道学报，2015，37(7)：1-8.
HUANG Linghai，LI Haiying，XU Xinyue. Identification of Dynamic Bottlenecks of Urban Rail Transit Stations[J]. Journal of the China Railway Society，2015，37(7)：1-8.

[7] HUANG L，LI W H，GONG J H. Simulation of the Emergency Evacuation about Social Groups in a Complex Subway Station[J]. Physica A：Statistical Mechanics and Its Applications，2024，637：129535.

[8] 孙　健，万高乐，康鹏灏，等. 大型综合交通枢纽系统运营韧性评价及障碍因素分析[J]. 安全与环境学报，2025，25(7)：2473-2483.
SUN Jian，WAN Gaole，KANG Penghao，et al. Evaluation of Operational Resilience in Comprehensive Transportation Hub Systems：An Analysis of Obstacle Factors[J]. Journal of Safety and Environment，2025，25(7)：2473-2483.

[9] 杨　苏，霍巧芬. 基于可拓云理论的地铁运营系统韧性评价[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版)，2022，22(3)：44-52.
YANG Su，HUO Qiaofen. Toughness Evaluation of Subway Operation System Based on Extension Cloud Theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Social Sciences Edition)，2022，22(3)：44-52.

[10] TANG Y C，BI W，VARGA L，et al. An Integrated Framework for Managing Fire Resilience of Metro Station System：Identification，Assessment，and Optimization[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction，2022，77：103037.

[11] 宋亮亮，张晓慧，刘思露，等. 基于云模型的地铁车站运营安全韧性评估[J]. 工程管理学报，2025，39(3)：78-84.

SONG Liangliang, ZHANG Xiaohui, LIU Silu, et al. Evaluation of Metro Station Operational Safety Resilience Based on Cloud Model[J]. Journal of Engineering Management, 2025, 39(3): 78-84.

[12] LIU L J, WU H, WANG J W, et al. Research on the Evaluation of the Resilience of Subway Station Projects to Waterlogging Disasters Based on the Projection Pursuit Model[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2020, 17(6): 7302-7331.

[13] XU P C, LU Q C, FENG T, et al. Resilience Analysis of Metro Stations Integrating Infrastructures and Passengers[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 252: 110467.

[14] TANG Y M, LI S, ZHAI C H, et al. Railway Operation Recovery Method of Regional High Speed Railway Based on Optimal Resilience after Earthquakes[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 238: 109400.

[15] WANG Y, ZHAO O, ZHANG L M. Modeling Urban Rail Transit System Resilience under Natural Disasters: A Two-Layer Network Framework Based on Link Flow[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 241: 109619.

[16] 徐玉萍, 侯明超. 地铁网络中断下韧性评估及修复策略[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(6): 198-206, 214.
XU Yuping, HOU Mingchao. Resilience Evaluation and Restoration Strategy for Interrupted Metro Network[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(6): 198-206, 214.

[17] MA Z A, YANG X, WU J J, et al. Measuring the Resilience of an Urban Rail Transit Network: A Multi-Dimensional Evaluation Model[J]. Transport Policy, 2022, 129: 38-50.

[18] 肖　红, 刘书君, 王孝坤. 突发事件下地铁网络韧性评估及恢复策略研究[J]. 铁道运输与经济, 2025, 47(2): 161-171.
XIAO Hong, LIU Shujun, WANG Xiaokun. Resilience Assessment and Recovery Strategy of Metro Network under Emergencies[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(2): 161-171.

[19] 张翕然, 李正中, 张　馨, 等. 城市轨道交通系统韧性研究现状及展望[J]. 交通信息与安全, 2024, 42(4): 1-11.
ZHANG Xiran, LI Zhengzhong, ZHANG Xin, et al. Status and Prospects of Studies on Urban Rail Transit Resilience[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2024, 42(4): 1-11.

[20] 游艳雯, 王道奇, 郑平标, 等. 技术站服务中间站质量评价指标及方法研究[J]. 铁路物流, 2025, 43(11): 46-51.
YOU Yanwen, WANG Daoqi, ZHENG Pingbiao, et al. Quality Evaluation Indicators and Methods for Technical Stations Serving Intermediate Stations[J]. Railway Logistics, 2025, 43(11): 46-51.

[21] 周　聪. 基于仿真的城市轨道交通换乘站韧性评价与优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

[22] 谢家宇. 基于仿真技术的城市轨道交通车站大客流疏运组织研究: 以某车站为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.

[23] 刘宇轩. 区域多制式轨道交通复合网络可靠性分析与评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.

[24] 顾　伟. 烟台站运输组织优化研究[J]. 铁道货运, 2024, 42(10): 33-38, 48.
GU Wei. Research on Optimization of Transportation Organization at Yantai Station[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(10): 33-38, 48.

(责任编辑　魏　然)