文章编号：1003-1421(2026)08-0086-12
引用格式：李铠罡，詹丛茵，王蔚，等. 基于CRITIC-TOPSIS的高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评估[J]. 铁道运输与经济，2026，48(8)：86-97.
LI Kaigang，ZHAN Congyin，WANG Wei，et al. Resilience Evaluation of Arrival-Departure Track Utilization Scheme at High Speed Railway Passenger Hub Station Based on CRITIC-TOPSIS[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(8)：86-97.

基于CRITIC-TOPSIS的高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评估

李铠罡，詹丛茵，王　蔚，鲁工圆

(西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都　611756)

摘　要：为合理应对干扰和中断高铁客运枢纽站运行的突发事件、保障运输安全和提升铁路运输组织效率与服务质量，研究到发线运用方案的韧性意义重大。基于传统的铁路韧性理论，结合扰动对高铁客运枢纽站的影响过程，定义到发线运用方案韧性，并构建了到发线运用方案韧性评价指标体系。考虑到韧性指标的对比强度和冲突性，提出了一种基于CRITIC-TOPSIS的高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评价方法。最后，以郑州东站14:00—17:00时间段的160列车为实例进行分析。结果表明，在FCFS调度策略下，郑州东站的到发线运用方案在面对短时扰动时，韧性评价等级为良；面对中时扰动时，韧性评价等级为一般；面对长时扰动时，韧性评价等级为较差。其中无论对列车79施加短时或长时扰动，到发线运用方案的韧性值都相对较低，对到发线运用方案影响较大，属于到发线运用方案的薄弱环节，严重影响车站作业组织。

关键词：高铁客运枢纽站；到发线运用方案；韧性理论；评价体系；特定场景
中图分类号：U292.12　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251218001

Resilience Evaluation of Arrival-Departure Track Utilization Scheme at High Speed Railway Passenger Hub Station Based on CRITIC-TOPSIS

LI Kaigang，ZHAN Congyin，WANG Wei，LU Gongyuan

(School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: To properly respond to emergencies disrupting and interrupting the operation of high speed railway passenger hub stations, ensure transportation safety, and improve railway transportation organization efficiency and service quality, it is of great significance to study the resilience of the arrival-departure track utilization scheme. Based on the traditional railway resilience theory and combined with the disturbance impact process on high speed railway passenger hub stations, the resilience of the arrival-departure track utilization scheme was defined, and a resilience evaluation index system for the arrival-departure track utilization scheme was constructed. By considering the contrast intensity and conflict of resilience indicators, an evaluation method based on CRITIC-

收稿日期：2025-12-18
通信作者：王蔚(1982—)，男，河南尉氏人，西南交通大学交通运输与物流学院副研究员。
基金项目：国家自然科学基金项目(52232011)；四川省科技计划资助项目(2025YFHZ0125)；四川省科学技术厅科技计划项目(2025HJPJ0011)

TOPSIS for the resilience of the arrival-departure track utilization scheme at high speed railway passenger hub stations was proposed. Finally, a case analysis was conducted taking 160 trains in the 14:00–17:00 time period at Zhengzhoudong Station as an example. The results show that under the FCFS dispatching strategy, the resilience evaluation grade of the arrival-departure track utilization scheme at Zhengzhoudong Station is good when facing short-duration disturbance, moderate when facing medium-duration disturbance, and poor when facing long-duration disturbance. Among them, whether a short-duration or long-duration disturbance is applied to Train 79, the resilience values of the arrival-departure track utilization scheme are relatively low, which has a large impact on the arrival-departure track utilization scheme. It is a weak link of the arrival-departure track utilization scheme and seriously affects the station's operation organization.

Keywords: High Speed Railway Passenger Hub Station; Arrival-Departure Track Utilization Scheme; Resilience Theory; Evaluation System; Specific Scenario

0　引言

目前，我国高铁营业里程突破5万km，已形成“四纵四横”网络，未来将形成“八纵八横”为骨干通道的高速铁路网。高铁客运枢纽站位于高速铁路网的关键节点，衔接多条高铁线路，规模庞大，站内作业组织复杂。到发线作为高铁客运枢纽站的重要资源，其运用方案是行车作业组织的核心，从到发线运用的角度来评估方案的韧性，对于合理应对突发干扰和运行中断的事件、保障运输安全、提升铁路运输组织效率和服务质量有着十分重要的现实意义。

传统的到发线运用问题研究主要集中在列车到发时刻确定条件下的到发线运用方案编制优化问题[1]，以及在扰动导致列车运行时刻表发生变化情况下的到发线运用调整问题[2]，围绕到发线分配、冲突疏解、进路约束和到发线通过能力提升等方面展开，一般采用数学规划[3]、仿真分析[4]或启发式算法[5]对问题进行求解。

系统韧性的概念最早由生态学家Holling[6]提出并用于生态系统的恢复力和稳定性描述中，随后逐渐扩展到工程学和社会学的多个领域。在交通运输领域，Murray-Tuite[7]首次明确定义了交通运输系统韧性，提出了交通运输系统韧性的10个特征。Besinovic[8]明确定义了铁路韧性，总结出对于铁路韧性的研究分为全网络韧性评估和特定情景韧性评估，可以从拓扑理论、历史数据挖掘、建模优化和仿真模拟4个角度入手。基于拓扑理论，Adjetey-Bahunk等[9]提出了考虑铁路系统运行条件的铁路运输网络性能指标，并使用随时间变化的图来形象化这些指标。此外，一些学者利用网络效率[10]、连通性[11]、可达性[12]等拓扑指标从不同维度表征网络韧性。Knoester等[13]提出退化时间、响应时间、恢复时间、性能损失值等指标，结合交通强度和晚点率的综合指标重新构建了韧性曲线，并对一系列单个扰动场景进行了量化。在韧性评价体系构建方面，肖红等[14]基于复杂网络理论，构建地铁网络拓扑结构，对网络特征指标进行分析，并提出基于网络全局效率的地铁网络韧性评估方法和基于遗传算法的地铁网络恢复时序优化模型。徐玉萍等[15]提出一种综合考虑网络连通水平和冗余水平的网络性能函数，并构建网络韧性评价指标体系，采用遗传算法求解模型。除了利用拓扑指标表征韧性，白莹[16]归纳出设备设施安全状态与性能、运营恢复的投入等16类指标，进行了恶劣天气下的高铁运营系统韧性评价。李磊等[17]根据韧性的准备性、鲁棒性、恢复性、适应性特征确定恢复能力、适应能力等7项指标，设计了基于云模型和MAIRCA的韧性评价方法。

综上所述，现有的文献多数是从铁路系统网络的角度评估韧性，考虑特定场景的韧性评估尤其是对车站作业组织韧性的研究相对较少，针对到发线运用方案韧性评估的相关研究尚为空白。因此，研究从车站作业组织层面出发，基于传统铁路韧性理论，结合扰动对高铁客运枢纽站的影响过程，将韧性评价对象细化至到发线运用方案，界定其韧性内涵，提炼其韧性特征，在此基础上，构建面向到发线运用方案韧性评价指标体系，并引入一种基于CRITIC-TOPSIS的韧性评价方法[18-19]，实现了在统一调度规则下特定扰动场景的到发线运用方案韧性的定量对比分析。

1　到发线运用方案韧性内涵与特征

高铁客运枢纽站运行环境复杂多变，很容易发生各种扰动和中断事件。由于人为因素、设备因素和环境因素而导致的、影响铁路运营的意外变化称为扰动，其中导致列车出现运行大规模延误和取消的意外变化称为中断。在高铁客运枢纽站，依据扰动对象的不同，扰动可以分为列车运行扰动和车站设备扰动。由于铁路网络的内在特征，若扰动得不到有效的吸收，扰动很容易在时间和空间上通过铁路网络传播，形成扰动的站内传播和扰动的站间传播，影响列车运行、到发线运用和车站设备的正常工作，高铁客运枢纽站扰动影响过程如图1所示。

铁路运输系统的韧性被定义为铁路系统在正常条件下提供有效服务的能力，以及在面对扰动和中断时抵抗、吸收、适应并快速恢复的能力[8]，其核心在于铁路系统在遭受干扰、冲击、故障等不确定性情形下，保持核心功能、快速适应变化并恢复运行的能力。

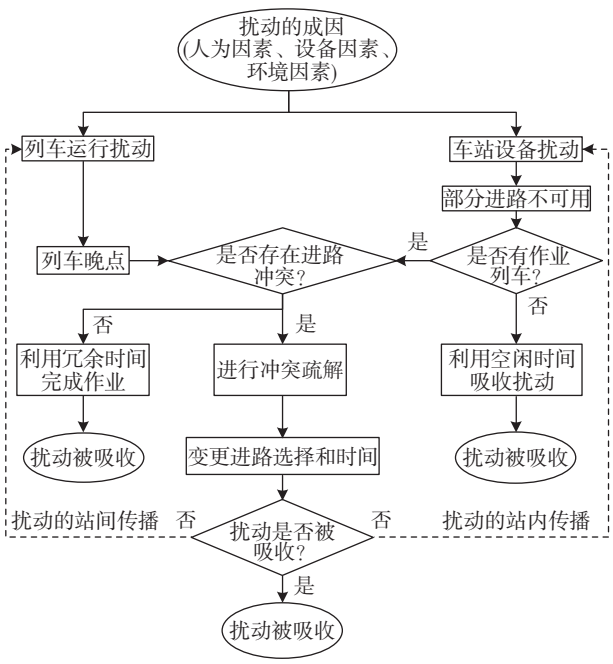


图1　高铁客运枢纽站扰动影响过程

Fig.1　Disturbance impact process on high speed railway passenger hub station

对高铁客运枢纽站到发线运用方案而言，其韧性是指高铁客运枢纽站面对突发事件(如突发客流、设备故障、极端天气等)造成列车运行扰动和车站设备扰动时，维持到发线核心功能稳定、快速恢复运行效率，并适应未来不确定性的综合能力。其核心在于在复杂动态环境中，确保列车到发作业的连续性与可靠性。高铁客运枢纽站到发线运用方案的韧性特征主要体现在稳定性、脆弱性、适应性、恢复性4个方面，高铁客运枢纽站到发线运用方案的韧性特征如表1所示[20-21]。

2　到发线运用方案韧性评价体系

2.1　到发线运用方案韧性评价指标体系

根据综合评价体系的构建原则，结合高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性的内涵和特征，以高铁客运枢纽站到发线运用方案的韧性A为评价目标，确定稳定性B_1、脆弱性B_2、适应性B_3、恢复性B_4为一级评价指标和C_1—C_{10}等10个二级评价指标，综合构建了高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评价指标体系，高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评价指标体系如表2所示。

(1) 稳定性指标。

①到发线使用均衡系数。各条到发线的占用时间与平均每条到发线占用时间的平均绝对偏差，称为到发线使用均衡系数。到发线使用均衡系数越小，对到发线的使用越均衡稳定，避免了部分到发线过度使用而部分到发线空闲的情况。

表1　高铁客运枢纽站到发线运用方案的韧性特征

Tab.1　Resilience characteristics of arrival-departure track utilization scheme at high speed railway passenger hub station

韧性特征	特征说明
稳定性[20]	正常运行状态和在扰动运行状态下，高铁系统有能够维持既有到发线运用方案或通过调整调度快速恢复有序运行的能力
脆弱性[8]	指高铁客运枢纽站到发线运用方案在面对扰动时发生变化的敏感程度，到发线运用方案中某列车与相邻列车之间的冗余时间较小，且该列车与较多后续列车存在到发线资源占用冲突和进路资源占用冲突时，可以认为该列车为到发线运用方案的薄弱环节，其对扰动的敏感性大，且扰动的影响范围也相对较大
适应性[21]	扰动发生后到发线运用方案利用冗余时间吸收扰动减少扰动传播的自适应性能
恢复性[8]	在扰动发生后，通过运营管理人员制定应急计划、合理分配资源配置，调整到发线运用方案，尽可能快地恢复到安全稳定的运行状态的能力

表2　高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评价指标体系

Tab.2　Resilience evaluation index system for arrival-departure track utilization scheme at high speed railway passenger hub station

评价目标	一级指标	二级指标
高铁客运枢纽站到发线运用方案的韧性A	稳定性B_1	到发线使用均衡系数C_1
		冗余时间空间分布均衡系数C_2
	脆弱性B_2	扰动易传播的列车对数C_3
		关键到发线通过能力利用率C_4
	适应性B_3	平均冗余时间C_5
		受扰动到发线冗余时间利用率C_6
		到发线通过能力利用率受扰动影响率C_7
	恢复性B_4	受影响列车数C_8
		列车晚点平均时间C_9
		恢复时间C_{10}

$$C_1=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left|\sum_{i=1}^{n}t_{ij}x_{ij}-\frac{1}{m}\sum_{j'=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}t_{ij'}x_{ij'}\right| \tag{1}$$

式中：C_1为到发线使用均衡系数；n表示列车数量，列；m为到发线数量，条；x_{ij}为由到发线按运用方案确定的0-1参数，用于刻画列车i与到发线j之间的占用关系，列车i占用到发线j为1，否则为0；t_{ij}表示列车i对到发线j的占用时间，s。

②冗余时间空间分布均衡系数。到发线冗余时间是指在不引发级联延误的前提下，可吸收的单列车延误时间，以各列车之间的冗余时间的倒数和表征冗余时间在空间上的分布均衡程度。在面对扰动时，各列车间都预留有充足的时间吸收扰动，冗余时间分布得越均衡，到发线运用方案越稳定。

$$C_2=\sum_{i_1=1}^{n-1}\sum_{i_2=i_1+1}^{n}\frac{1}{t_{i_1i_2}^{r}} \tag{2}$$

式中：C_2为冗余时间空间分布均衡系数；$t_{i_1i_2}^{r}$表示列车i_1与列车i_2之间的冗余时间，s。

（2）脆弱性指标。

①扰动易传播的列车对数。列车之间冗余时间越小，在车站扰动发生时，相关联列车之间越容易发生扰动的传播，反映了高铁客运枢纽站到发线运用方案薄弱环节。扰动易传播的列车对数越多，到发线运用方案越脆弱。

$$C_3=\sum_{i_1=1}^{n-1}\sum_{i_2=i_1+1}^{n}I\left(t_{i_1i_2}^{r}<\tau\right) \tag{3}$$

式中：C_3为扰动易传播的列车对数，对；$I\left(t_{i_1i_2}^{r}<\tau\right)$为示性函数，若$t_{i_1i_2}^{r}<\tau$时，取1，反之取0；$\tau$为冗余时间阈值，s，取$\tau=120$ s，当$t_{i_1i_2}^{r}<120$ s，认为该列车对在扰动发生时易产生延误传播。

②关键到发线通过能力利用率。关键到发线通过能力利用率是指车站较为繁忙的几条到发线的通过能力利用率。关键到发线通过能力利用率越高，表明这几条关键到发线承担的列车到发任务越重，若这几条到发线出现故障，则导致大量列车需要更换到发线，甚至导致车站大面积列车延误，到发线运用方案就越脆弱。

$$C_4=\frac{\sum_{j=1}^{k}T_j^{\text{占用}}}{\sum_{j=1}^{k}T_j^{\text{可用}}}\times 100\% \tag{4}$$

式中：C_4为关键到发线通过能力利用率；k为关键到发线的数量，条，取值为5，即选择到发线通过能力利用率最高的5条到发线作为关键到发线；$T_j^{\text{占用}}$表示第j条到发线被列车占用的时间，s；$T_j^{\text{可用}}$表示第j条到发线可用总时间，s。

（3）适应性指标。

①平均冗余时间。平均冗余时间是指所有到发线上各列车之间的冗余时间的平均值，反映到发线运用方案的整体适应扰动的能力，平均冗余时间越大，到发线吸收扰动的能力越强，适应性越强。

$$C_5=\frac{\sum_{i_1=1}^{n-1}\sum_{i_2=i_1+1}^{n}t_{i_1i_2}^{r}}{n^{r}} \tag{5}$$

式中：C_5为平均冗余时间，s；n^{r}为存在冗余时间的列车对数量，对。

②受扰动到发线冗余时间利用率。受扰动到发线冗余时间利用率是指在车站发生扰动后，用来吸收扰动的冗余时间占受扰动的到发线总冗余时间的比例，是衡量高铁到发线运用方案中冗余时间被实际用于吸收扰动的效率指标，若冗余时间利用率低，表明到发线运用方案能利用冗余时间有效吸收扰动，对扰动的适应性强。

$$C_6=\frac{\sum_{j\in\varphi}t_j^{r,\ \text{实际}}}{\sum_{j\in\varphi}t_j^{r}}\times 100\% \tag{6}$$

式中：C_6为受扰动到发线冗余时间利用率；$\sum_{j\in\varphi}t_j^{r,\ \text{实际}}$表示实际用于吸收扰动的冗余时间之和，s；$\sum_{j\in\varphi}t_j^{r}$表示扰动发生的到发线$j$总的冗余时间之和，s；$\varphi$表示受扰动到发线集合。

③到发线通过能力利用率受扰动影响率。到发线通过能力利用率受扰动影响率是衡量高铁到发线运用方案在扰动事件中动态调整负荷能力的指标，反映到发线从干扰前的负荷状态快速适应并吸收额外负荷的潜力。若到发线通过能力利用率受扰动影响率较小，表示扰动未显著增加到发线负荷，到发线运用方案仍保有充足的缓冲能力，对扰动的适应性强。

$$C_7 = \frac{\left| T_{后}^{占用} - T_{前}^{占用} \right|}{T_{可用} - T_{前}^{占用}} \times 100\% \tag{7}$$

式中：C_7为到发线通过能力利用率受扰动影响率；$T_{后}^{占用}$为干扰后到发线被列车占用的时间，s；$T_{前}^{占用}$为干扰前到发线被列车占用的时间，s；$T_{可用}$表示到发线可用总时间，s；值得注意的是，若有多条到发线受到影响，则计算到发线通过能力利用率受扰动影响率的平均值。

（4）恢复性指标。

①受影响列车数。受影响列车数指车站发生扰动后受扰动影响的列车数量，若受影响的列车数少，说明到发线运用方案有效吸收了扰动，避免了大规模的延误传播，恢复能力较强。

$$C_8 = n_{受影响} \tag{8}$$

式中：C_8表示受影响列车数，列；$n_{受影响}$表示受扰动影响的列车数量，列。

②列车晚点平均时间。列车晚点平均时间指所有晚点列车的平均延误时长。列车晚点平均时间越大，表明列车晚点延误的程度越大，到发线运用方案恢复越慢。

$$C_9 = \frac{1}{n_{晚点}} \sum_{i=1}^{n_{晚点}} \Delta t_i \tag{9}$$

式中：C_9为列车晚点平均时间，s；Δt_i表示列车i的晚点时间，s；$n_{晚点}$为晚点的列车数，列。

③恢复时间。恢复时间是指从到发线运用方案受到扰动影响时开始，到完全恢复到正常运营状态所需的时间。恢复时间越长，表明到发线运用方案的恢复能力越差。

$$C_{10} = T_{恢复} - T_{扰动} \tag{10}$$

式中：C_{10}表示恢复时间，s；$T_{恢复}$为铁路到发线恢复正常运营的时刻；$T_{扰动}$表示到发线运用方案受扰动影响的开始时刻。

2.2　基于CRITIC-TOPSIS的韧性评价方法

CRITIC权重法通过基于评价指标的对比强度和指标间的冲突性来综合确定评价指标的权重。对比强度是指同一指标在各方案中取值的差距，以标准差的形式来表现。标准差越大，说明指标在不同方案的取值差距越大，意味着该指标包含的信息量越多，能更好地区分不同的评价方案，因此该指标应赋予的权重越大。冲突性反映一个指标与其他指标之间的相关性，用相关系数表示。该指标与其他指标的相关性越强，意味着它们传递的信息存在重叠，说明它所包含的“独特”信息量相对较少，其被赋予的权重应相对降低。CRITIC权重法将指标间的相关性纳入权重计算，既避免了因主观因素而导致权重确定与实际情况可能存在偏差的情况，又克服了仅考虑客观数据变异性的方法(如熵权法)在指标高度相关时可能高估某些指标权重的缺点。

TOPSIS法通过先确定各指标的正理想解和负理想解，然后计算各个方案与正理想解和负理想解之间的距离，最后计算相对接近度来进行综合评价。TOPSIS法基于距离概念，容易理解，步骤简单明确，评价结果全面稳健，目前已被广泛应用于铁路系统韧性评价、交通规划等领域。

综上所述，采用基于CRITIC-TOPSIS的韧性评价方法对高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性水平进行评估，首先用CRITIC法确定指标的权重，然后使用TOPSIS法对不同到发线运用方案的韧性进行排序和综合评价，具体算法步骤如下。

步骤1：构建决策矩阵。假设有a个不同的到发线运用方案，每个方案有b个评价指标，各指标的计算值形成决策矩阵。

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1b} \\ \vdots & & \vdots \\ y_{a1} & \cdots & y_{ab} \end{bmatrix} \tag{11}$$

其中，y_{pq}为第p个到发线运用方案中第q个二级指标的值。

步骤2：指标数据标准化。为消除不同量纲和数量级差异对评价结果的影响，采用极差法将通过公式(1)—(10)计算得到的指标数据标准化处理，把指标的数值均变换到[0，1]区间上。

正向指标标准化公式为

$$z_{pq}=\frac{y_{pq}-\min(y_q)}{\max(y_q)-\min(y_q)} \tag{12}$$

逆向指标标准化公式为

$$z_{pq}=\frac{\max(y_q)-y_{pq}}{\max(y_q)-\min(y_q)} \tag{13}$$

式中：z_{pq}为标准化后的指标值。

标准化后的决策矩阵为

$$Z=\begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1b} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{a1} & \cdots & z_{ab} \end{bmatrix} \tag{14}$$

步骤3：计算对比强度(标准差)。计算每个指标q的标准差σ_q，反映数据的变异程度。

$$\sigma_q=\sqrt{\frac{1}{a-1}\sum_{p=1}^{a}(z_{pq}-\bar{z}_q)^2} \tag{15}$$

其中，$\bar{z}_q$是第q列指标的均值。

$$\bar{z}_q=\frac{1}{a}\sum_{p=1}^{a}z_{pq} \tag{16}$$

步骤4：计算相关系数矩阵。使用指标间的皮尔逊相关系数来表示指标间的相关性。

$$r_{ql}=\frac{\sum_{p=1}^{a}\left(z_{pq}-\bar{z}_q\right)\left(z_{pl}-\bar{z}_l\right)}{\sqrt{\sum_{p=1}^{a}\left(z_{pq}-\bar{z}_q\right)^2}\times\sqrt{\sum_{p=1}^{a}\left(z_{pl}-\bar{z}_l\right)^2}} \tag{17}$$

式中：r_{ql}为同一到发线运用方案中指标q与指标l之间的相关系数。

相关系数矩阵为

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1b} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2b} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{b1} & r_{b2} & \cdots & r_{bb} \end{bmatrix},\ \text{其中}r_{qq}=1,\ q=1,\ 2,\ \cdots,\ b \tag{18}$$

步骤5：计算冲突量。对指标q，计算其与其他指标的冲突量c_q。

$$c_q=\sum_{l=1}^{b}\left(1-\left|r_{ql}\right|\right) \tag{19}$$

式中：$\left|r_{ql}\right|$越接近于0，指标q与l的相关性越弱，指标q与l的冲突性越强，指标q与l的信息重叠度越小；相反$\left|r_{ql}\right|$越接近于1，指标q与l的相关性越强，指标q与l的冲突性越弱，指标q与l的信息重叠度越大。

步骤6：计算信息承载量。根据对比强度σ_q和冲突量c_q，得到指标q的信息量。

$$I_q=\sigma_q\times c_q \tag{20}$$

步骤7：计算指标权重。归一化信息量，得到指标q的权重ω_q。

$$\omega_q=\frac{I_q}{\sum_{l=1}^{b}I_l} \tag{21}$$

步骤8：加权调整后的决策矩阵。利用指标的权重对标准化的决策矩阵进行调整。

$$Z_{\text{调整}}=\begin{bmatrix} \omega_1 z_{11} & \omega_2 z_{12} & \cdots & \omega_b z_{1b} \\ \omega_1 z_{21} & \omega_2 z_{22} & \cdots & \omega_b z_{2b} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_1 z_{a1} & \omega_2 z_{a2} & \cdots & \omega_b z_{ab} \end{bmatrix} \tag{22}$$

步骤9：确定正理想解与负理想解。

正理想解为各指标的最优值。

$$f_q^+=\max\left(\omega_q z_{1q},\ \omega_q z_{2q},\ \cdots,\ \omega_q z_{aq}\right) \tag{23}$$

负理想解为各指标的最劣值。

$$f_q^-=\min\left(\omega_q z_{1q},\ \omega_q z_{2q},\ \cdots,\ \omega_q z_{aq}\right) \tag{24}$$

步骤10：计算每个方案各指标到理想解的距离。

方案p到正理想解的距离为

$$D_p^+=\sqrt{\sum_{q=1}^{b}\left(\omega_q z_{pq}-f_q^+\right)^2} \tag{25}$$

式中：D_p^+为第p个方案到正理想解的距离。

方案p到负理想解的距离为

$$D_p^-=\sqrt{\sum_{q=1}^{b}\left(\omega_q z_{pq}-f_q^-\right)^2} \tag{26}$$

式中：D_p^-为第p个方案到负理想解的距离。

步骤11：计算相对接近度。

$$Z_p=\frac{D_p^-}{D_p^++D_p^-} \tag{27}$$

式中：Z_p为p方案的相对接近度。

步骤12：韧性评价。韧性取值范围为[0，1]，将区间[0，1]划分为6个等级，以相对接近度作为韧性评价值，值越大则表明该车站到发线运用方案韧性水平越高，韧性评价标准如表3所示。

表3　韧性评价标准

Tab.3　Resilience evaluation criteria

等级	A	B	C	D	E	F
状况	优	好	良	一般	较差	差
韧性	0.84~1.00	0.68~0.83	0.51~0.67	0.34~0.50	0.18~0.33	0~0.17

3　实例分析

3.1　车站基本数据

选取郑州东站为实例，郑州东站到发线示意图如图2所示，设有32条到发线，选取2024年12月26日14:00—17:00的到发线运用方案中的160列车，其中包括1列始发列车、1列终到列车、120列停站通过列车和20对本线立即折返列车(其中有2列折返前列车不在所选取的时间窗口内)。将20对本线立即折返列车视作20列停站通过列车，则郑州东站到发线运用方案中一共有142列车，包括1列始发列车、1列终到列车和140列停站通过列车，郑州东站到发线运用图定方案如图3所示。

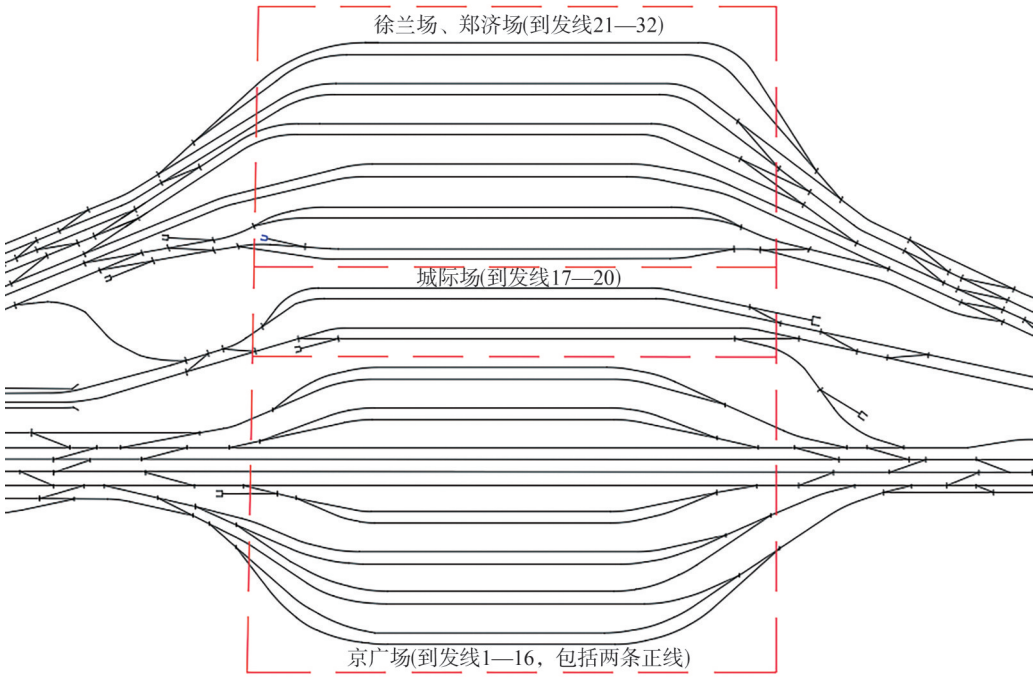


图2　郑州东站到发线示意图

Fig.2　Schematic diagram of arrival-departure tracks at Zhengzhoudong Station

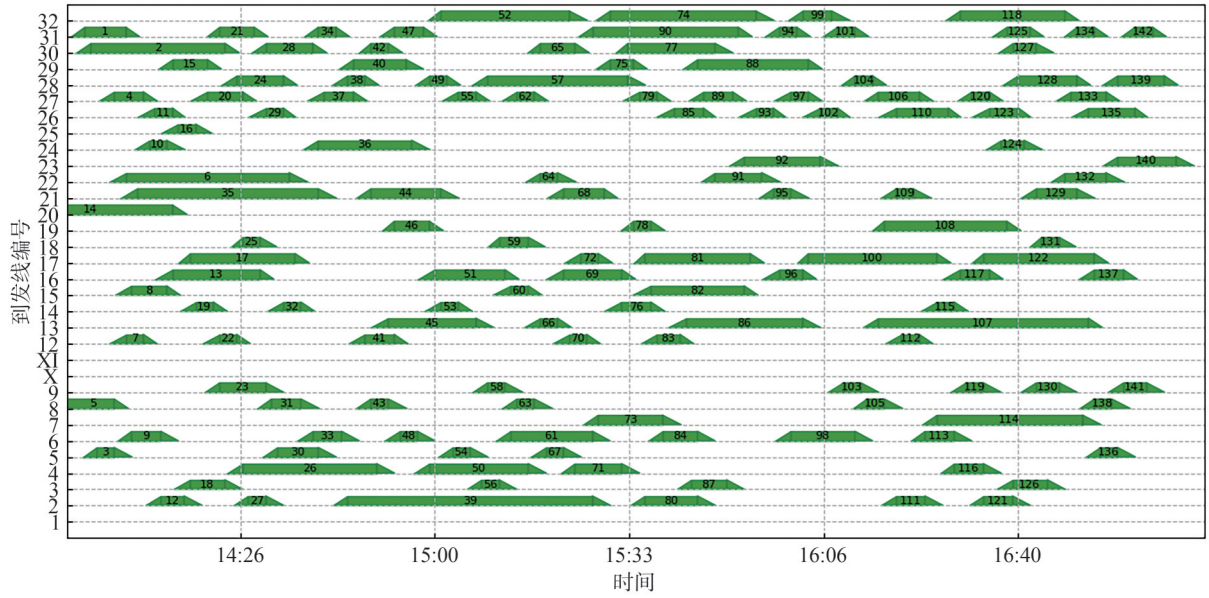


图3　郑州东到发线运用图定方案

Fig.3　Timetabled arrival-departure track utilization scheme for Zhengzhoudong Station

3.2　特定扰动场景的到发线运用方案韧性评估

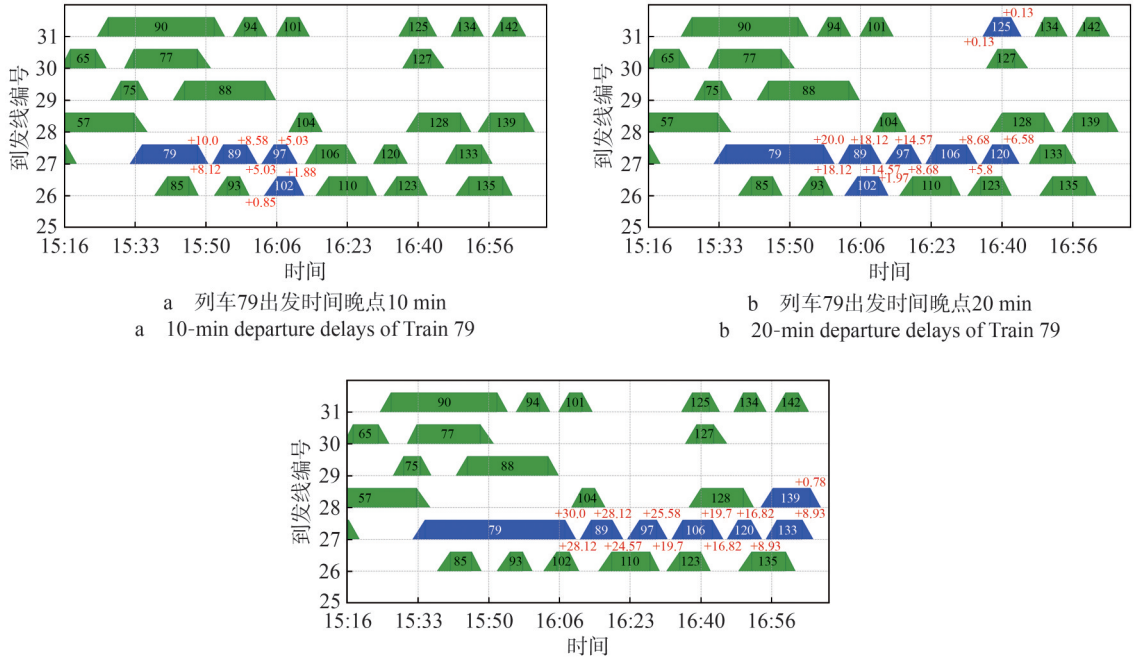
随机选取不同时段和不同到发线的9列车作为扰动列车，扰动列车表如表4所示。设置各列车分别晚点10 min，20 min和30 min出发，对应短时扰动、中时扰动和长时扰动3种特定扰动场景。根据《车站行车工作细则》及高铁车站技术作业时间标准，两列车占用同一到发线的安全时间间隔取60 s[22]。选择最基础、最常用的FCFS策略作为统一的调度规则，利用冗余时间吸收扰动且考虑列车占用进路时间关系、进路连通性、进路相容性和进路占用唯一性等咽喉区进路冲突相关约束[22]，按照其原定到达顺序，优先恢复先到的列车。对列车72和列车85出发时间施加晚点30 min的扰动时，晚点延误传播会超出所选取时间窗口，可能影响后续时间窗口的列车，所以去除这2个到发线运用方案，最终得到25个特定扰动场景下的到发线运用方案。以列车79为例，列车79出发时间晚点10 min、20 min和30 min的到发线运用方案如图4所示，该图仅展示了晚点列车周围一定范围内的列车及其停靠到发线，其余列车不会被晚点影响，故未展示。

表4　扰动列车表

Tab.4　Disturbed train table

扰动列车	列车到达时段	扰动列车占用的到发线编号
列车2	14:00—14:20	30
列车12	14:00—14:20	2
列车35	14:00—14:20	21
列车24	14:20—15:00	28
列车33	14:20—15:00	6
列车34	14:20—15:00	31
列车72	15:00—15:40	17
列车79	15:00—15:40	27
列车85	15:00—15:40	26

图4中蓝色的列车为晚点的列车，蓝色图形左下角红色数字表示该列车到达晚点的时间，右上角红色数字表示该列车出发晚点的时间。列车79出发晚点10 min会造成列车89、列车97、列车102共4列车晚点，影响26道到发线和27道到发线的列车接发作业，总共晚点2 370 s；列车79出发晚点20 min会造成列车89、列车97、列车102、列车106、列车120和列车125共7列车晚点，影响26道到发线、27道到发线和31道到发线的列车接发作业，总共晚点7 041 s；列车79出发晚点30 min会造成列车89、列车97、列车106、列车120、列车133和列车139共7列车晚点，影响27道到发线和28道到发线的列车接发作业，总共晚点13 684 s。



a　列车79出发时间晚点10 min
a　10-min departure delays of Train 79

b　列车79出发时间晚点20 min
b　20-min departure delays of Train 79

c　列车79出发时间晚点30 min
c　30-min departure delays of Train 79

图4　列车79出发时间晚点10 min、20 min和30 min的到发线运用方案

Fig.4　Arrival-departure track utilization schemes with departure time delays of 10 min, 20 min, and 30 min for Train 79

根据所得的25个扰动后的到发线运用方案，再结合初始的到发线运用图定方案，计算高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评价指标体系中的C_1—C_{10}的指标值，韧性指标计算结果如表5所示，其中各指标的最差值及最差值源自的扰动场景如表6所示。利用基于CRITIC-TOPSIS的韧性评价方法先确定指标权重，权重计算结果如表7所示，指标C_9的对比强度较大且与其他指标的相关性较低，冲突性较高，所含的信息量最大，所以指标C_9的权重最大，即列车晚点平均时间对最终的韧性评价值影响较大。再计算各方案的韧性值，韧性值计算结果如表8所示，韧性评价结果如表9所示。根据计算结

表5　韧性指标计算结果

Tab.5　Calculation results of resilience indicators

扰动场景	C_1	C_2	C_3/对	C_4/%	C_5/s	C_6/%	C_7/%	C_8/列	C_9/s	C_{10}/s
无晚点	851.13	0.290 6	9	55.03	1 098.61	0	0	0	0	0
列车2出发晚点10 min	876.17	0.315 0	10	55.20	1 091.73	12.82	9.97	6	422.17	2 117
列车2出发晚点20 min	896.92	0.325 6	10	56.64	1 086.04	25.65	19.94	5	1 094.60	2 782
列车2出发晚点30 min	915.19	0.341 3	12	57.49	1 081.02	38.56	29.98	7	1 306.86	5 040
列车12出发晚点10 min	870.47	0.308 6	10	56.08	1 093.30	20.22	11.40	2	645.00	1 376
列车12出发晚点20 min	890.29	0.332 4	12	57.13	1 088.64	40.44	22.81	7	734.00	5 842
列车12出发晚点30 min	909.13	0.331 1	12	58.18	1 082.68	60.67	34.21	4	2 261.00	6 442
列车24出发晚点10 min	871.95	0.325 0	11	55.96	1 092.89	15.82	11.47	4	387.50	3 754
列车24出发晚点20 min	889.80	0.325 2	11	56.93	1 087.99	29.39	21.31	4	1 357.00	4 308
列车24出发晚点30 min	909.29	0.325 8	11	57.98	1 082.94	44.09	31.97	5	1 926.60	4 908
列车33出发晚点10 min	870.47	0.306 4	10	55.15	1 093.30	17.43	9.92	2	713.00	1 378
列车33出发晚点20 min	889.62	0.333 1	12	56.26	1 087.33	35.91	19.84	6	769.50	4 161
列车33出发晚点30 min	911.10	0.352 6	14	57.31	1 082.14	53.34	29.76	6	1 540.83	5 687
列车34出发晚点10 min	870.47	0.307 8	10	56.08	1 093.30	13.09	12.74	3	459.33	1 408
列车34出发晚点20 min	889.80	0.305 3	10	57.13	1 087.99	26.19	25.49	2	1 561.00	2 008
列车34出发晚点30 min	906.50	0.336 8	11	58.18	1 082.35	39.28	38.23	9	655.33	5 669
列车35出发晚点10 min	870.47	0.303 2	10	56.08	1 093.30	14.49	10.88	2	775.00	1 930
列车35出发晚点20 min	889.01	0.318 0	11	57.13	1 087.29	28.99	21.75	5	783.80	3 438
列车35出发晚点30 min	909.13	0.318 4	11	58.18	1 082.68	43.48	32.63	3	2 280.00	3 930
列车72出发晚点10 min	870.47	0.327 8	12	56.08	1 093.69	16.64	11.60	4	493.50	5 296
列车72出发晚点20 min	891.12	0.327 8	12	57.20	1 093.69	16.64	23.99	4	1 574.25	5 937
列车79出发晚点10 min	870.10	0.322 0	12	56.13	1 092.50	15.35	12.59	4	592.50	2 109
列车79出发晚点20 min	890.35	0.349 3	13	57.21	1 086.53	30.49	24.99	7	1 005.86	3 995
列车79出发晚点30 min	912.61	0.355 9	14	58.29	1 086.88	32.40	37.29	7	1 954.86	5 415
列车85出发晚点10 min	872.68	0.335 2	12	55.34	1 091.74	10.92	9.23	6	459.33	2 860
列车85出发晚点20 min	887.26	0.346 9	13	55.52	1 091.04	15.57	19.42	6	1 469.00	4 383

表6　各指标最差值及最差值源自的扰动场景

Tab.6　Worst values of each indicator and corresponding disturbance scenarios

指标	最差值	扰动场景
C_1	915.19	列车2出发晚点30 min
C_2	0.355 9	列车79出发晚点30 min
C_3	14	列车79出发晚点30 min/列车33出发晚点30 min
C_4	58.29%	列车79出发晚点30 min
C_5	1 081.02	列车2出发晚点30 min
C_6	60.67%	列车12出发晚点30 min
C_7	38.23%	列车34出发晚点30 min
C_8	9	列车34出发晚点30 min
C_9	2 280	列车35出发晚点30 min
C_{10}	6 442	列车12出发晚点30 min

表7　权重计算结果

Tab.7　Calculation results of weights

指标	标准化均值	标准差	冲突性	信息量	权重
C_1	0.428 3	0.270 8	3.019 5	0.817 8	0.077 9
C_2	0.463 1	0.249 2	4.224 4	1.052 5	0.100 3
C_3	0.530 8	0.258 9	4.956 5	1.283 1	0.122 3
C_4	0.491 4	0.313 7	3.792 3	1.189 5	0.113 4
C_5	0.448 4	0.268 0	3.584 7	0.960 5	0.091 5
C_6	0.557 6	0.239 3	3.735 1	0.893 9	0.085 2
C_7	0.463 4	0.263 3	3.109 1	0.818 7	0.078 0
C_8	0.487 2	0.231 1	5.103 2	1.179 4	0.112 4
C_9	0.540 8	0.271 7	4.730 2	1.285 2	0.122 5
C_{10}	0.425 8	0.272 9	3.709 4	1.012 2	0.096 5

表8　韧性值计算结果

Tab.8　Calculation results of resilience values

到发线运用方案序号	扰动对象	扰动时长/min	单方案韧性值	韧性等级
0	无	0	1.000 0	优
1	列车2	10	0.678 2	好
2	列车12	10	0.729 1	好
3	列车24	10	0.631 1	良
4	列车33	10	0.761 8	好
5	列车34	10	0.733 2	好
6	列车35	10	0.727 7	好
7	列车72	10	0.567 9	良
8	列车79	10	0.611 3	良
9	列车85	10	0.586 8	良
10	列车2	20	0.515 9	良
11	列车12	20	0.390 2	一般
12	列车24	20	0.463 0	一般
13	列车33	20	0.453 7	一般
14	列车34	20	0.549 1	良
15	列车35	20	0.497 8	一般
16	列车72	20	0.426 6	一般
17	列车79	20	0.341 9	一般
18	列车85	20	0.437 9	一般
19	列车2	30	0.279 1	较差
20	列车12	30	0.249 7	较差
21	列车24	30	0.316 1	较差
22	列车33	30	0.204 5	较差
23	列车34	30	0.331 4	一般
24	列车35	30	0.352 3	一般
25	列车79	30	0.176 4	差

表9　韧性评价结果

Tab.9　Evaluation results of resilience

序号	扰动类型	扰动时间/min	韧性平均值	韧性等级
1	短时扰动	10	0.669 7	良
2	中时扰动	20	0.452 9	一般
3	长时扰动	30	0.272 8	较差

果可知在面对短时扰动时，韧性平均值为0.669 7，韧性等级为良；面对中时扰动时，韧性平均值为0.452 9，韧性等级为一般；面对长时扰动时，韧性平均值为0.272 8，韧性等级为较差。

由计算结果可知，无论对列车79施加短时扰动还是长时扰动，到发线运用方案的韧性值都相对较低，该处属于该车站到发线运用方案的薄弱环节。尤其是对列车79出发时间施加30 min的晚点扰动后，到发线运用方案中扰动易传播的列车对数C_3从9列增加到14列，受扰动影响的列车C_8增加到7列，到发线通过能力利用率受扰动影响率C_7达到37.29%，列车总晚点时间13 684 s，平均晚点时间C_9为1 954.86 s，恢复时间C_{10}为5 415 s，韧性值为0.176 4，属于差的韧性等级，该扰动对到发线运用方案影响较大，严重影响车站作业组织，车站应重点关注列车79，提前采取调度调整措施，例如调整列车79及其后续有资源占用冲突的列车的到发线，避免车站到发线和进路资源被短时间集中占用，适当增加相邻列车的冗余时间，使扰动影响降至最低，提高到发线运用方案整体韧性水平。

3.3　参数τ和参数k的灵敏度分析

在进行韧性评价过程中，参数冗余时间阈值τ和参数关键到发线数量k是基于高铁客运枢纽站运行组织的经验设定，因此具备一定的主观性。考虑到不同参数τ和参数k的取值可能对到发线运用方案韧性的评价结果产生影响，为探究韧性评价结果对相关参数的依赖程度，分别对参数τ和参数k进行小规模灵敏度分析，以τ=120 s，k=5条时的韧性值计算结果为基准，韧性平均值的相对变化量如表10所示，韧性最差值的相对变化量如表11所示。

由表10和表11可知，当冗余时间阈值τ和关键到发线数量k在合理范围内变化时，到发线运用方案在短、中、长时扰动下的韧性平均值及韧性最差值的相对变化量均小于5%，且韧性最差值始终对应列车79出发时间晚点30 min的扰动场景。结

表10　韧性平均值的相对变化量

Tab.10　Relative change of mean value of resilience

参数τ取值/s	扰动类型	韧性平均值	相对变化量/%	参数k取值/条	扰动类型	韧性平均值	相对变化量/%
90	短时扰动	0.663 8	0.88	4	短时扰动	0.676 4	1.00
	中时扰动	0.442 9	2.22		中时扰动	0.463 5	2.34
	长时扰动	0.259 5	4.88		长时扰动	0.279 5	2.46
150	短时扰动	0.670 0	0.04	6	短时扰动	0.656 4	1.99
	中时扰动	0.448 0	1.08		中时扰动	0.450 3	0.57
	长时扰动	0.274 5	0.62		长时扰动	0.264 4	3.08

表11　韧性最差值的相对变化量

Tab.11　Relative change of worst value of resilience

参数τ取值/s	韧性最差值	扰动场景	相对变化量/%	参数k取值/条	韧性最差值	扰动场景	相对变化量/%
90	0.178 8	列车79出发晚点30 min	1.36	4	0.174 7	列车79出发晚点30 min	0.96
150	0.177 3	列车79出发晚点30 min	0.51	6	0.176 4	列车79出发晚点30 min	2.66

果表明，研究构建的高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评价指标体系和基于CRITIC-TOPSIS的韧性评价方法具备较好的稳健性和鲁棒性，对到发线运用方案进行韧性评估时受到参数τ和参数k取值的影响较小，能够可靠地对到发线运用方案的韧性进行评价。

4　结束语

以高铁客运枢纽站到发线运用方案为研究对象，从铁路系统韧性的视角出发，结合扰动对高铁客运枢纽站作业组织的影响机理，定义了到发线运用方案的韧性。基于到发线运用方案韧性所体现的稳定性、脆弱性、适应性和恢复性4大特征，建立了高铁客运枢纽站到发线运用方案韧性评价指标体系。同时设计了一种基于CRITIC-TOPSIS的韧性评价方法，从评价指标的对比强度和指标间的冲突性2个方面综合确定指标权重，既避免了因主观因素而导致权重确定与实际情况可能存在偏差的情况，又克服了仅考虑客观数据变异性可能高估某些指标权重的不足。最后在统一的FCFS调度策略下，通过设定特定场景的短、中、长时扰动对到发线运用方案的韧性进行评估，并对部分参数进行了灵敏度分析，验证了评价体系的可行性和有效性。研究为到发线运用层面韧性的深入研究奠定了基础，通过构建稳健的韧性评价体系，为高铁客运枢纽站管理者提供了识别到发线运用薄弱环节的有效方法，并为单列车特定扰动场景下的应对策略提供了有力的支持，同时也为后续高密度运营环境下的调度优化和韧性提升提供了量化评估的前提。未来的研究可以扩展至更大规模的扰动场景，并结合韧性曲线分析高铁客运枢纽站受扰动后到发线性能的动态变化情况，同时，可对现有评价指标体系进行拓展，将车站调度措施和作业组织水平等因素纳入考虑，使对到发线运用方案韧性的评价更加立体、全面和客观，并结合数学模型提出韧性优化策略，为高铁客运枢纽站的韧性优化和运行组织优化提供决策支持。

参考文献：

[1] CAPRARA A，GALLI L，TOTH P. Solution of the Train Platforming Problem[J]. Transportation Science，2011，45(2)：246-257.

[2] LI X J，HAN B M，ZHANG Q. Delay Adjustment Method at Transfer Station of High Speed Railway[J]. Advances in Mechanical Engineering，2013，5：752632.

[3] 张　毅，李季涛，孙婉婷，等. 考虑行调冲突的大型高铁站到发线运用优化研究[J]. 铁道运输与经济，2025，47(3)：111-121.
ZHANG Yi，LI Jitao，SUN Wanting，et al. Optimization of Departure and Arrival Track Utilization in Large High Speed Railway Stations Considering Conflicts between Train Movement and Shunting Activities[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(3)：111-121.

[4] 郭　苗，张宏翔，鲁工圆，等. 高速铁路车站到发线运用仿真模型及调整策略[J]. 综合运输，2025，47(2)：102-109，121.
GUO Miao，ZHANG Hongxiang，LU Gongyuan，et al.

Simulation Model and Real-Time Rescheduling Strategy for the High Speed Railway Stations[J]. China Transportation Review，2025，47(2)：102-109，121.

[5] 吕红霞，何大可，陈　韬. 基于蚁群算法的客运站到发线运用计划编制方法[J]. 西南交通大学学报，2008，43(2)：153-158.
LYU Hongxia，HE Dake，CHEN Tao. Method of Arrival and Departure Tracks Utilization Plan in Railroad Passenger Station Based on Ant Colony Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2008，43(2)：153-158.

[6] HOLLING C S. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics，1973，4 (1973)：1-23.

[7] MURRAY-TUITE P M. A Comparison of Transportation Network Resilience under Simulated System Optimum and User Equilibrium Conditions[C]//Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. December 3-6，2006，Monterey，CA，USA. IEEE，2007：1398-1405.

[8] BEŠINOVIĆ N. Resilience in Railway Transport Systems：A Literature Review and Research Agenda[J]. Transport Reviews，2020，40(4)：457-478.

[9] ADJETEY-BAHUN K，PLANCHET J L，BIRREGAH B，et al. Railway Transportation System's Resilience：Integration of Operating Conditions into Topological Indicators[C]//NOMS 2016 - 2016 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium. April 25-29，2016，Istanbul，Turkey. IEEE，2016：1163-1168.

[10] ZHANG D M，DU F，HUANG H W，et al. Resiliency Assessment of Urban Rail Transit Networks：Shanghai Metro as an Example[J]. Safety Science，2018，106：230-243.

[11] XU Z Z，ZHANG Q P，CHEN D J，et al. Characterizing the Connectivity of Railway Networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2020，21(4)：1491-1502.

[12] WANG Z J，JIA L M，MA X P，et al. Accessibility-Oriented Performance Evaluation of High Speed Railways Using a Three-Layer Network Model[J]. Reliability Engineering & System Safety，2022，222：108411.

[13] KNOESTER M J，BEŠINOVIĆ N，AFGHARI A P，et al. A Data-Driven Approach for Quantifying the Resilience of Railway Networks[J]. Transportation Research Part A：Policy and Practice，2024，179：103913.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 白　莹. 长吉高铁运营安全风险分析与韧性评价[D]. 长春：吉林大学，2020.

[17] 李　磊，陈斯烨，李晨蕾，等. 基于云模型和MAIRCA的高速铁路系统韧性评估[J]. 铁道学报，2025，47(3)：10-15.
LI Lei，CHEN Siye，LI Chenlei，et al. High Speed Rail System Resilience Evaluation Based on Cloud Model and MAIRCA Method[J]. Journal of the China Railway Society，2025，47(3)：10-15.

[18] AKRAM M，ZAHID S，DEVECI M. Enhanced CRITIC-REGIME Method for Decision Making Based on Pythagorean Fuzzy Rough Number[J]. Expert Systems with Applications，2024，238：122014.

[19] ZHANG Y F，NG S T. Identification and Quantification of Node Criticality through EWM-TOPSIS：A Study of Hong Kong's MTR System[J]. Urban Rail Transit，2021，7(3)：226-239.

[20] CHEN H R，ZHOU R Y，CHEN H，et al. Static and Dynamic Resilience Assessment for Sustainable Urban Transportation Systems：A Case Study of Xi'An，China[J]. Journal of Cleaner Production，2022，368：133237.

[21] XU Z Z，CHOPRA S S. Network-Based Assessment of Metro Infrastructure with a Spatial-Temporal Resilience Cycle Framework[J]. Reliability Engineering & System Safety，2022，223：108434.

[22] LU G Y，NING J，LIU X B，et al. Train Platforming and Rescheduling with Flexible Interlocking Mechanisms：An Aggregate Approach[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2022，159：102622.

(责任编辑　吴文娟)