

文章编号: 1003-1421(2026)09-0035-12

引用格式: 李力, 郭阳, 章雨昂, 等. 基于场景划分的高速铁路列车晚点恢复质量评价方法[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(9): 35-46.
LI Li, GUO Yang, ZHANG Yuang, et al. Quality Evaluation Method of High Speed Railway Train Delay Recovery Based on Scene Division[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(9): 35-46.

基于场景划分的高速铁路列车晚点恢复质量评价方法

李 力^{1, 2}, 郭 阳^{1, 2}, 章雨昂³, 邢志鹏^{1, 2}, 王浩舞^{1, 2}, 唐子涵⁴

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学 综合交通运输国家地方联合工程实验室, 四川 成都 611756; 3. 中国铁路广州局集团有限公司 岳阳站, 湖南 岳阳 414000; 4. 中国铁路成都局集团有限公司 计划统计部, 四川 成都 610081)

摘 要: 针对因忽略运行条件差异导致的高铁晚点恢复质量评价失真问题, 提出一种基于场景划分的高速铁路列车晚点恢复质量评价方法。利用模糊C均值聚类将晚点数据划分为4类典型场景, 通过随机森林识别各场景关键影响因素。构建不同场景下列车晚点恢复质量评价体系, 设计“晚点恢复时长得分”和“考虑重要车站的列车综合晚点恢复质量得分”2个动态评价指标, 划分评价结论等级, 确定评价流程。根据设计的评价流程, 以列车运行实绩数据为例进行方法验证。结果显示: G1031, G6159次列车综合得分分别为0.81, 0.86, 恢复质量等级为“优秀”; 其余列车得分在0.64~0.76之间, 恢复质量“良好”。该方法充分考虑了运行场景差异, 实现了基于历史数据驱动的客观、动态评价, 为高铁调度质量评价提供了科学依据。

关键词: 高速铁路; 晚点恢复; 质量评价; 场景划分; 随机森林; FCM聚类

中图分类号: U292 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20260120006

Quality Evaluation Method of High Speed Railway Train Delay Recovery Based on Scene Division

LI Li^{1, 2}, GUO Yang^{1, 2}, ZHANG Yuang³, XING Zhipeng^{1, 2}, WANG Haowu^{1, 2}, TANG Zihan⁴

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Integrated Transportation Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. Yueyang Railway Station, China Railway Guangzhou Group Co., Ltd., Yueyang 414000, Hunan, China; 4. Planning and Statistics Department, China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: In response to the distortion of the quality evaluation of high speed railway delay recovery caused by the ignored difference in operating conditions, a method for quality evaluation of high speed railway delay recovery based on scene division was proposed. Firstly, fuzzy C-means clustering was used to divide the delay data into four types of typical scenes. The key influencing factors of each scene were identified through random forests. Secondly, the quality evaluation system for the delay recovery of trains under different scenes was constructed. Two dynamic evaluation indicators, namely, “score for delay recovery duration” and “score for comprehensive train delay recovery quality considering important stations” were designed. The conclusion level was divided to determine the

收稿日期: 2026-01-20

通信作者: 郭阳(2002—), 女, 黑龙江七台河人, 西南交通大学交通运输与物流学院硕士研究生。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4300502)

evaluation process. Then, according to the designed evaluation process, the method was verified using the train operation performance data as an example. The results show that the comprehensive scores of train G1031 and G6159 are 0.81 and 0.86, respectively, with the recovery quality grade as “excellent”. The scores for the rest of the trains are between 0.64 and 0.76, with the recovery quality as “good”. Fully considering the differences in operation scenes, the method realizes objective and dynamic evaluation based on historical data, providing a scientific basis for the evaluation of high speed railway scheduling quality.

Keywords: High Speed Railway; Delay Recovery; Quality Evaluation; Scene Division; Random Forest; FCM Clustering

0 引言

高速铁路列车晚点恢复质量直接影响调度效率与铁路服务水平。传统评价方法忽略列车运行条件的动态差异,难以真实反映调度人员的处置能力。

国内外在高速铁路列车晚点恢复、运行场景划分和行车调度评价领域已有相关研究。针对晚点恢复预测,随机森林模型可解析多因素耦合关系。黄平等^[1]以初始晚点时长、总车站缓冲时间、总区间缓冲时间等为自变量,构建了随机森林模型以预测晚点恢复时间;胡雨欣等^[2]使用多层感知器和循环神经网络建立了晚点恢复时间预测模型。在运行场景划分上,FCM模糊聚类能优化场景区分效果。刘梦雨等^[3]选取故障发生时刻、持续时长和影响列车数聚类划分非正常事件场景;侯亚飞等^[4]结合不同的运行调整策略,以晚点时长、计划冗余时间和晚点恢复时长完成聚类。行车调度评价现有研究多聚焦调度员的应急处置能力^[5-6]和综合业务能力评价^[7-8]。评价手段涵盖定量分析^[9-10]、定性分析^[11-12]及综合评价^[13-14],但评价指标多为静态,缺乏基于列车运行实绩,量化测评调度员晚点恢复能力的方法。闫迪^[15]以列车晚点恢复能力作为衡量铁路调度指挥工作质量的评判标准,选取时段、位置、晚点强度约束下的增晚率、增晚程度、恢复率、恢复程度等指标开展评价。李力等^[16]利用列车实际运行数据构建基于列车晚点及恢复环境的调度质量评价方法,考虑了时段、位置及晚点时长的影响,对一定时间范围内的行车调度水平提供了一种相对客观的评价结论。现有晚点恢复评价研究未纳入缓冲时长、线路条件等动态特征,难以区分不同场景恢复难度,难以客观衡量复杂工况下的调度员真实水平。

铁路调度指挥需兼顾晚点的时长以及线路工况、外部环境等多因素构成的场景,场景因素差异

直接决定调度工作难度。为此,研究提出一种基于场景划分的高速铁路列车晚点恢复质量动态评价方法。通过采集列车实际运行数据,构建涵盖晚点状态、运行条件与恢复情况的多维指标体系,运用FCM聚类划分晚点恢复场景,利用随机森林识别各场景关键影响因素,构建基于历史数据驱动的动态评价指标,实现不同场景下的差异化评价。研究可为客观衡量调度员晚点处置能力、推进高铁行车调度科学化提供理论依据与实践参考。

1 多重影响因素下的列车晚点恢复场景划分

1.1 列车晚点恢复场景划分指标体系构建

(1) 数据说明。研究采用武广高速铁路(武汉—广州南)赤壁北—广州北段(14站)和厦深铁路(厦门北—深圳北)诏安—深圳北段(12站)共125 d的列车实绩与图定运行数据,包括车次、站名、日期、列车实际与图定到发时刻、股道等。将“晚点完全恢复”定义为:车站到达晚点时间或车站出发晚点时间恢复至0或小于0 min。

选取武广高速铁路和厦深铁路的依据:一是线路条件的多样性,武广高速铁路为高标准高铁干线,厦深铁路属沿海客运专线,两线在速度等级、车站分布及行车组织模式上存在显著差异;二是运行环境的差异性,枢纽衔接、客流波动、外部气象特征各不相同,能够覆盖较多不同场景下的晚点恢复规律。样本代表性强,数据的选择具有合理性。

(2) 场景划分指标体系构建。列车晚点恢复效果受列车晚点状态、运输组织和设备条件、外部环境三类因素耦合作用,关联关系复杂,晚点恢复场景划分指标体系如表1所示,初始晚点程度取值如表2所示,高低峰时段取值如表3所示。

表1 晚点恢复场景划分指标体系
Tab.1 Delay recovery scene division index system

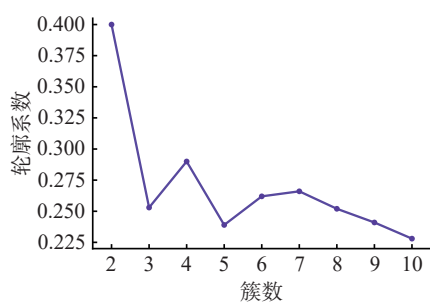
指标分类	指标名称	符号	指标说明
列车晚点 状态	初始晚点程度	X_1	初始晚点程度取值见表2
	实时晚点时长	X_2	若前方为车站,则取列车在车站的到达晚点时间,若前方为区间,则取列车在区间起点车站的出发晚点时间, min
	线路条件	X_3	武广高速铁路取值为0,厦深铁路取值为1
列车运行 条件	缓冲时间大小	X_4	车站:列车图定停站时间与最小停站时间的差值 区间:列车在区间的图定运行时间与实际最小运行时间的差值
	高低峰时段	X_5	两线路高低峰时段取值见表3
	节假日状态	X_6	取值1时为节假日;取值0时为非节假日
晚点恢复 情况	晚点恢复时长	Y	Y 为负值表示晚点列车在对应区间或车站晚点增强; Y 为正值表示晚点恢复; Y 取值0时表示晚点保持

表2 初始晚点程度取值 min
Tab.2 Values of initial delay level

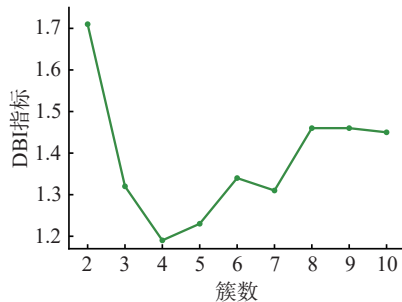
等级	时长	等级	时长
1	5~6	6	31~40
2	7~10	7	41~50
3	11~15	8	51~60
4	16~20	9	60及以上
5	21~30		

表3 高低峰时段取值
Tab.3 Values of high and low peak hours

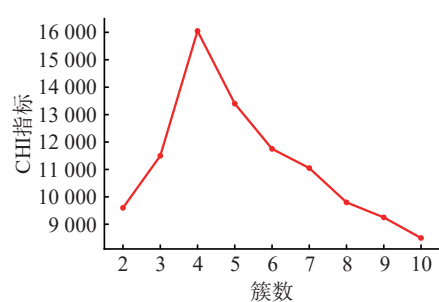
武广高速铁路				厦深铁路			
X_5	时段	X_5	时段	X_5	时段	X_5	时段
0	0:00—5:59	5	20:00—21:59	0	0:00—5:59	5	20:00—21:59
1	6:00—7:59	6	16:00—17:59	1	6:00—7:59	6	16:00—17:59
2	22:00—23:59	7	12:00—13:59	2	22:00—23:59	7	12:00—13:59
3	8:00—9:59	8	18:00—19:59	3	8:00—9:59	8	18:00—19:59
4	10:00—11:59	9	14:00—15:59	4	10:00—11:59	9	14:00—15:59



a 基于SC的簇数选择折线图
a SC-based cluster selection line chart



b 基于DBI的簇数选择折线图
b DBI-based cluster selection line



c 基于CHI的簇数选择折线图
c CHI-based cluster selection line chart

图1 簇数选择折线图

Fig.1 Cluster selection line chart

1.2 基于FCM聚类的场景划分

(1) 聚类簇数确定。FCM算法依靠模糊指标 m 控制聚类模糊程度,此处设定 $m = 2$ 。FCM算法中的初始值 K 值为聚类簇数,目前常见的 K 值确定方法包括轮廓系数(Silhouette Score, SC)、戴维斯-鲍尔丁指数(Davies-Bouldin Index, DBI)和卡林斯基-哈拉巴兹指数(Calinski-Harabasz Index, CHI)3种。以武广高速铁路、厦深铁路晚点列车数据作为场景划分的聚类建模数据集,将预处理后的场景划分指标数据代入FCM算法中,设置簇数为2~10,簇数选择折线图如图1所示。

由轮廓系数SC的变化趋势可知, $K = 2$ 时聚类效果最优, $K = 4$ 时次之。DBI指标结果表明, $K = 4$ 时DBI值最小,聚类效果最优; $K = 2$ 时DBI值最大,聚类效果相对较差。CHI值变化结果同样显示, $K = 4$ 时聚类效果最佳。

综合3种方法在各簇数下的指标,考虑聚类效果 and 实际应用需求,最佳聚类簇数 K 值设置为4。

(2) 聚类结果。取 $K = 4$,采用FCM算法,结合场景划分指标数据,对2018年3—5月武广高速铁路下行、厦深铁路下行全部晚点高速铁路列车数据(区间运行数据、车站停站数据)聚类,样本总量

36 443。划分得到 A, B, C, D 4 类晚点恢复场景。A 类场景缓冲时间充足, 属于恢复难度最低的代表性场景; B 类场景初始晚点较严重, 需调度介入, 属于重度初始晚点下恢复难度极大的代表性场景; C 类场景初始干扰较弱, 恢复情况较好, 属于轻度初始晚点下恢复难度偏低的代表性场景; D 类场景初始晚点程度较轻, 恢复能力受限, 属于轻度初始晚点下恢复难度偏大的代表性场景。高速铁路列车晚点恢复场景聚类结果如图 2 所示。各聚类中心之间的距离如表 4 所示。

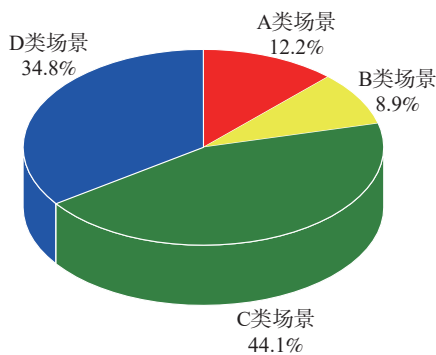


图2 高速铁路列车晚点恢复场景聚类结果
Fig.2 Clustering results of high speed railway train delay recovery scenes

表4 各聚类中心之间的距离
Tab.4 Distance between clustering centers

场景类别	A类	B类	C类	D类
A类	0	35.744 02	9.830 98	10.290 41
B类	35.744 02	0	35.534 9	33.535 65
C类	9.830 98	35.534 9	0	2.186 7
D类	10.290 41	33.535 65	2.186 7	0

基于距离的划分方法更依赖数据的空间分布特征, 难以准确反映各类场景内部的差异性和晚点恢复难度以及效果上的细微差别。为进一步提升晚点恢复质量评价的针对性和有效性, 需要对场景进行精细划分。

1.3 特征重要性识别与子场景划分

(1) 特征重要性计算原理。随机森林(Random Forest, RF)是一种基于 Bagging 的集成分类器, 由多棵决策树构成, 适用于连续型目标变量预测, 并可根据各特征对预测误差降低的贡献评估其重要性。常见的特征重要性计算方法包括基于信息增益的方法和基于均方误差(MSE)减少的方法 2 种。因变量晚点恢复时长属于连续型变量, 可采用随机森林模型, 并基于 MSE 减少量计算特征重要性。计算

分 4 个步骤: ①构建随机森林模型; ②计算单棵树的特征重要性; ③计算整个随机森林的特征重要性; ④特征重要性归一化。

(2) 各场景关键因素识别。分场景构建随机森林模型, 以识别各场景下的关键影响因素。不同场景下特征的重要性如表 5 所示。分析 4 类场景下特征重要性。

表5 不同场景下特征的重要性
Tab.5 Importance of features in different scenes

场景类别	初始晚点程度	实时晚点时长	线路条件	缓冲时间大小	高低峰时段	节假日状态
A类	0.109	0.257	0.009	0.465	0.136	0.024
B类	0.122	0.587	0.018	0.115	0.143	0.015
C类	0.101	0.252	0	0.464	0.144	0.039
D类	0.101	0.278	0.288	0.146	0.160	0.027

① 缓冲时间大小在 A 类场景和 C 类场景中的重要性显著高于其他因素, 重要性分别为 0.465 和 0.464。表明在这 2 类场景下, 列车的晚点恢复能力在很大程度上依赖于列车运行图中预留的缓冲时间。

② 实时晚点时长在 B 类场景中的特征重要性最高, 为 0.587。表明在 B 类场景中实时晚点时长为影响晚点恢复效果的最关键因素。

③ 线路条件在 D 类场景中的重要性较高, 为 0.288, 表明在 D 类场景下不同的线路条件对晚点恢复的影响较为突出。

④ 高低峰时段和节假日状态在各场景中的重要性都较低。其中, 高低峰时段的重要性均在 0.13~0.16, 表明其影响相对有限; 节假日状态在所有场景中的重要性最低, 可能与原始数据中节假日样本较少有关。

⑤ 初始晚点程度在 4 类场景中的重要性介于 0.1~0.12 之间, 表明其对晚点恢复效果有一定影响, 但不是重要的影响特征。

(3) 子场景精细划分。由于列车运行数据已经按照区间及车站进行拆解, 子场景的划分不再考虑用以表征晚点发生位置的特征指标 X_3 。

在 A 类和 C 类场景中, 缓冲时间大小和实时晚点时长为晚点恢复的关键特征。缓冲时间大小约束晚点恢复时长上限, 以 2 min 为间隔划分子场景; 实时晚点时长采用分位数法确定区间。在 B 类和 D 类场景中, 实时晚点时长和高低峰时段为关键特征, 其子场景区间采用分位数法划分。各类场景下

子场景的划分如表6所示。

2 不同场景下列车晚点恢复质量评价体系构建

2.1 场景识别规则制定

采用最小欧氏距离匹配法,结合特征指标计算待评价列车运行特征与4类场景聚类中心之间的距离,列车运行场景为对应距离最小的场景。

设聚类过程使用的特征指标为 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 4类聚类中心分别记为 $c_k = (c_{k1}, c_{k2}, c_{k3}, c_{k4})$, 则待评价列车与第 k 类中心的欧式距离为

$$D_k = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - c_{ki})^2} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

式中: x_i 为待评价列车在第 i 个特征指标上的取值, c_{ki} 为第 k 类场景中心在第 i 个特征指标上的值。

将待评价列车分配到距离其最近的场景中心所代表的类,识别规则如式(2)所示。

$$S(x) = \arg \min_{k \in \{1, 2, 3, 4\}} D_k \quad (2)$$

在场景识别过程中,仅提取特征 $X_1 \sim X_6$ 作为待评价晚点列车的运行特征指标。

2.2 动态评价指标设计

2.2.1 列车在区间或车站的晚点恢复时长得分

构建“晚点恢复时长得分”作为一个动态评价指标,定义为晚点列车在区间或车站的晚点恢复时长 y 在历史同场景数据中的百分位数,取值范围为 $[0, 1]$, 记为 $f(y)$, 其计算公式如式(3)及式(4)所示。

$$f(y) = \frac{\text{Count}(y)}{n} \quad (3)$$

$$\text{Count}(y) = \sum_{i=1}^n I(y_i \in S | y_i \leq y) \quad (4)$$

式中: y_i 为第 i 个样本的值; n 为该场景下样本的总数; $\text{Count}(y)$ 为满足条件的样本的计数; $I(y_i \in S | y_i \leq y)$ 为指示函数,当样本 y_i 满足 $y_i \leq y$ 时, $I(y_i \in S | y_i \leq y) = 1$, 否则为0。

不同场景下评价指标的样本集为式(5)。

$$S_c^{u, v, w} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (5)$$

式中: c 为待评价对象列车所处的场景编号, $c \in \{A, B, C, D\}$; u, v, w 分别为评价对象所处的区间或车站编号、第1个特征子场景的编号及第2个特征子场景的编号。

2.2.2 考虑重要车站的列车综合晚点恢复质量得分

按照车站是否为枢纽站、是否与地铁或机场相衔接,以及是否为一等及以上车站这3项条件,将沿线车站分为重要车站和一般车站。如果车站满足以上3项条件中的任何一项,则为重要车站;否则,划为一般车站。

在进行综合晚点恢复质量得分的计算时,采用线性加权的权重分配方法,对列车在到达重要车站前的运行区间赋予更高的权重系数,计算公式如式(6)所示。

$$f' = \frac{\sum_{k=1}^K \omega_k \cdot f(y_k)}{\sum_{k=1}^K \omega_k} \quad (6)$$

式中: f' 为列车综合晚点恢复质量得分; k 为列车的运行位置,代表晚点列车发生后经由的第 k 个车站或区间; K 为该次列车晚点恢复过程中所包含的

表6 各类场景下子场景的划分
Tab.6 Division of sub-scenes under various scenes

A类		B类				C类				D类			
缓冲时间大小子场景		实时晚点时长子场景		实时晚点时长子场景		高低峰时段子场景		缓冲时间大小子场景		实时晚点时长子场景		实时晚点时长子场景	
编号	区间	编号	区间	编号	区间	编号	区间	编号	区间	编号	区间	编号	区间
1	[5, 6]	1	[1, 4]	1	[8, 32]	1	[0, 3]	1	[0, 1]	1	[1, 4]	1	[1, 4]
2	[7, 8]	2	[5, 6]	2	[33, 40]	2	[4, 6]	2	[2, 3]	2	[5, 6]	2	[5, 6]
3	[9, 10]	3	[7, 10]	3	[41, 50]	3	[7, 9]	3	[4, 5]	3	[7, 10]	3	[7, 10]
4	[11, 12]	4	[11, 30]	4	[51, +∞]			4	[6, 7]	4	[11, 26]	4	[11, 26]
5	[13, 14]	5	[31, +∞]					5	[8, +∞]				
6	[15, 16]												
7	[17, 18]												
8	[19, 20]												
9	[21, +∞]												

区间及车站的总数； ω_k 代表列车在晚点发生后的第 k 个车站或区间的权重； $f(y_k)$ 为列车在第 k 个车站或区间的晚点恢复时长得分； $\sum_{k=1}^K \omega_k$ 用于计算列车在所有区间及车站的权重总和，用于归一化得分。

2.3 评价结论等级划分

列车的实际晚点恢复时长得分 $f(y)$ 的取值范围为 $[0, 1]$ ，按照以下方式划分评价结论等级。

优秀： $f(y) \in [0.8, 1]$ ，列车的晚点恢复时长超过了历史同场景下的至少80%列车的晚点恢复时长，表现出色。

良好： $f(y) \in [0.6, 0.8)$ ，列车的晚点恢复时长优于60%~80%的历史数据，恢复质量良好。

中等： $f(y) \in [0.4, 0.6)$ ，列车的晚点恢复时长超过40%~60%的历史数据，恢复质量中等。

较差： $f(y) \in [0.2, 0.4)$ ，列车的晚点恢复时长超过20%~40%的历史数据，恢复质量较差。

差： $f(y) \in [0, 0.2)$ ，晚点恢复时长仅优于20%以下的历史数据，恢复效率较低，需要重点考核。

2.4 评价流程

根据上述对评价对象、动态评价指标、不同场景下评价样本集调整的说明以及评价结论等级的划分，不同场景下高速铁路列车晚点恢复质量评价流程图如图3所示。

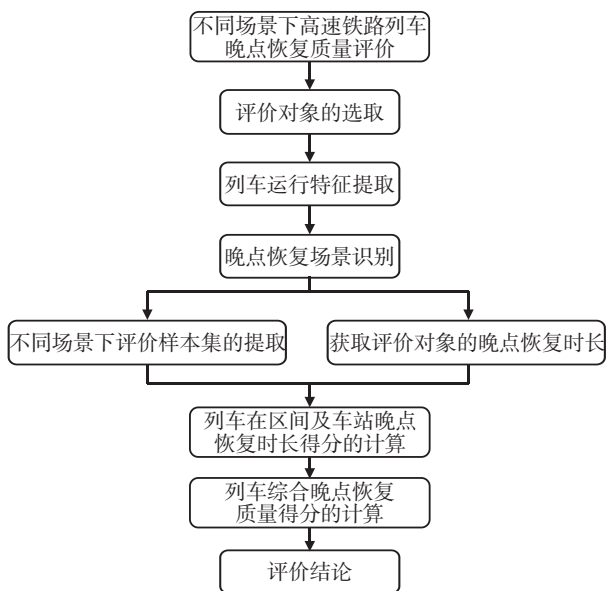


图3 不同场景下高速铁路列车晚点恢复质量评价流程图
Fig.3 Flow of quality evaluation of high speed railway train delay recovery in different scenes

3 实例分析

根据评价流程进行实例分析，以验证基于场景划分的不同场景下高速铁路列车晚点恢复质量评价方法，及所构建的动态评价指标的合理性和科学性。

3.1 评价对象选取

选取武广高速铁路为评价对象，武广高速铁路站点图如图4所示，其中长沙南站及衡阳东站为跨线枢纽站。选择武广高速铁路下行赤壁北—广州北的晚点列车运行数据作为评价的数据集，其中晚点时长大于4 min的列车共414列，包含自赤壁北站接入或从长沙南及衡阳东转线就已处于晚点状态的晚点列车。

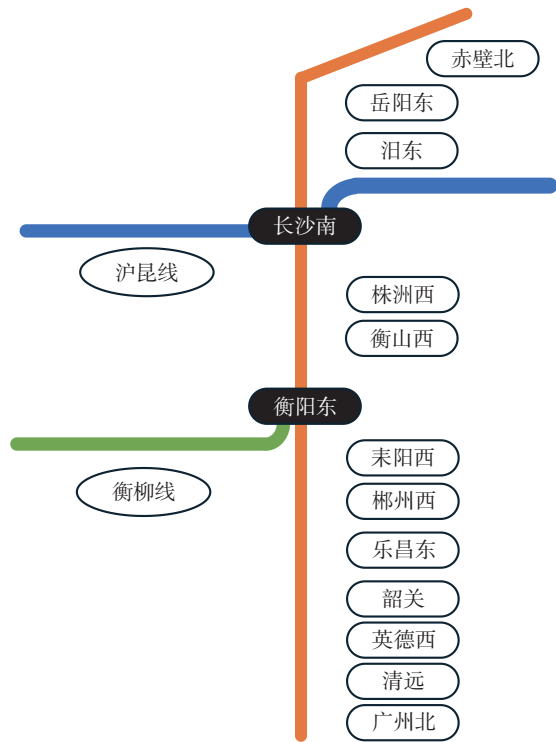


图4 武广高速铁路站点图

Fig.4 Station map along the Wuhan-Guangzhou High Speed Railway

选取武广高速铁路某一白班下出现的所有晚点列车为评价对象，从工作日和节假日(端午节)2个日期进行对比评价。武广高速铁路某日共出现29次晚点列车，其中白班出现晚点列车12次，包括G1031, G1113, G1117, G1403, G1505, G401, G549, G6111, G6151, G6159, G847, G85。

3.2 晚点列车运行过程的场景识别

(1) 列车晚点恢复场景特征提取。提取武广高

表7 晚点列车运行单元评价样本集提取示例
Tab.7 Example of evaluation sample set extraction of delayed trains operating units

车次	车站/区间	场景识别	特征子场景 1 编号	特征子场景 2 编号	评价样本集
G1XXX	赤壁北			\	
G1XXX	赤壁北—岳阳东	D	3	2	$S_D^{2, 3, 2}$
G1XXX	岳阳东	D	3	2	$S_D^{3, 3, 2}$
G1XXX	岳阳东—汨罗东	D	3	2	$S_D^{4, 3, 2}$
G1XXX	汨罗东	D	3	2	$S_D^{5, 3, 2}$
G1XXX	汨罗东—长沙南	D	3	2	$S_D^{6, 3, 2}$
G1XXX	长沙南	D	4	3	$S_D^{7, 4, 3}$
G1XXX	长沙南—株洲西	D	4	3	$S_D^{8, 4, 3}$
G1XXX	株洲西			\	
G1XXX	株洲西—衡山西	D	4	3	$S_D^{10, 4, 3}$
G1XXX	衡山西			\	
G1XXX	衡山西—衡阳东	D	3	3	$S_D^{12, 3, 3}$
G1XXX	衡阳东	D	3	3	$S_D^{13, 3, 3}$
G1XXX	衡阳东—耒阳西	D	3	3	$S_D^{14, 3, 3}$
G1XXX	耒阳西			\	
G1XXX	耒阳西—郴州西	D	4	3	$S_D^{16, 3, 3}$
G1XXX	郴州西	D	3	3	$S_D^{17, 3, 3}$
G1XXX	郴州西—乐昌东	D	3	3	$S_D^{18, 3, 3}$
G1XXX	乐昌东			\	
G1XXX	乐昌东—韶关	D	4	3	$S_D^{20, 4, 3}$
G1XXX	韶关			\	
G1XXX	韶关—英德西	D	4	3	$S_D^{22, 4, 3}$
G1XXX	英德西			\	
G1XXX	英德西—清远	D	4	3	$S_D^{24, 4, 3}$
G1XXX	清远	D	4	3	$S_D^{25, 4, 3}$
G1XXX	清远—广州北	D	4	3	$S_D^{26, 4, 3}$
G1XXX	广州北			\	

注：\表示在对应车站不停站，下同。

表8 列车晚点恢复时长
Tab.8 Train delay recovery duration min

车站/区间	G1031	G1113	G1117	G1403	G1505	G401	G549	G6111	G6151	G6159	G847	G85
赤壁北		\				\	\					
赤壁北—岳阳东		-1				-3	-1					
岳阳东		2				\	\					
岳阳东—汨罗东		-2				0	2					
汨罗东		1				\	\					
汨罗东—长沙南		-2				0	0					
长沙南		-1		-5	-1	1	0					-2
长沙南—株洲西		1		0	0		0					-1
株洲西		\		0	-5		0					\
株洲西—衡山西		1		-1	0		1			1		1
衡山西		\		\	\		\					\
衡山西—衡阳东		0		0	-1		0			-1		0
衡阳东		0		0	1		0		\	1	\	\
衡阳东—耒阳西		-1		1			1		-1	1	-2	1
耒阳西		\		\			\		\		1	\

续表

车站/区间	G1031	G1113	G1117	G1403	G1505	G401	G549	G6111	G6151	G6159	G847	G85
耒阳西—郴州西		1		0			-1		0	0	1	-1
郴州西	1	0	2	1			\		1	5	\	\
郴州西—乐昌东	-2	-2	-3	-3			-3		-3	*	-2	-2
乐昌东	\	\	\	\			\		\		-1	\
乐昌东—韶关	-2	0	-2	0			0		1		0	-1
韶关	1	\	1	\			0		\		1	\
韶关—英德西	0	1	0	0			0		0		0	0
英德西	\	\	\	\			\	\	1		\	\
英德西—清远	0	0	1	0			1	-1	-1		0	-1
清远	\	-1	\	1			\	\	\		\	\
清远—广州北	0	-1	0	0			0	1	1		0	0
广州北	\	\	\	\			\	0	\		\	\

注：*表示在对应位置实现了晚点的完全恢复，下同。

表9 晚点列车评价样本集
Tab.9 Evaluation sample set of delayed trains

车站/区间	G1031	G1113	G1117	G1403	G1505	G401	G549	G6111	G6151	G6159	G847	G85
赤壁北		\				\	\					
赤壁北—岳阳东		$S_D^{2, 3, 2}$				$S_B^{2, 4, 3}$	$S_B^{2, 3, 2}$					
岳阳东		$S_D^{3, 3, 2}$				$S_B^{3, 4, 3}$	\					
岳阳东—汨罗东		$S_D^{4, 3, 2}$				$S_B^{4, 4, 3}$	$S_B^{4, 3, 3}$					
汨罗东		$S_D^{5, 3, 2}$				\	\					
汨罗东—长沙南		$S_D^{6, 3, 2}$				$S_B^{6, 4, 3}$	$S_B^{6, 3, 3}$					
长沙南		$S_D^{7, 4, 3}$		$S_D^{7, 2, 3}$	$S_D^{7, 4, 3}$	$S_B^{7, 4, 3}$	$S_B^{7, 3, 3}$					$S_D^{7, 2, 3}$
长沙南—株洲西		$S_D^{8, 4, 3}$		$S_D^{8, 4, 3}$	$S_D^{8, 4, 3}$		$S_B^{8, 3, 3}$					$S_D^{8, 3, 3}$
株洲西		\		$S_D^{9, 4, 3}$	$S_D^{9, 4, 3}$		$S_B^{9, 3, 3}$			\		\
株洲西—衡山西		$S_D^{10, 4, 3}$		$S_D^{10, 4, 3}$	$S_D^{10, 4, 3}$		$S_B^{10, 3, 3}$			$S_D^{10, 2, 3}$		$S_D^{10, 3, 3}$
衡山西		\		\	\		\			\		\
衡山西—衡阳东		$S_D^{12, 3, 3}$		$S_D^{12, 4, 3}$	$S_D^{12, 4, 3}$		$S_B^{12, 3, 3}$			$S_D^{12, 1, 3}$		$S_D^{12, 3, 3}$
衡阳东		$S_D^{13, 3, 3}$		$S_D^{13, 4, 3}$	$S_D^{13, 4, 3}$		$S_B^{13, 3, 3}$		\	$S_D^{13, 2, 3}$	\	\
衡阳东—耒阳西		$S_D^{14, 3, 3}$		$S_D^{14, 4, 3}$			$S_B^{14, 3, 3}$		$S_D^{14, 3, 3}$	$S_D^{14, 1, 3}$	$S_D^{14, 2, 3}$	$S_D^{14, 3, 3}$
耒阳西		\		\			\		\	\	$S_D^{15, 3, 3}$	\
耒阳西—郴州西		$S_D^{16, 3, 3}$		$S_D^{16, 4, 3}$			$S_B^{16, 3, 3}$		$S_D^{16, 3, 3}$	$S_D^{16, 1, 3}$	$S_D^{16, 3, 3}$	$S_D^{16, 2, 3}$
郴州西	$S_D^{17, 2, 3}$	$S_D^{17, 3, 3}$	$S_D^{17, 2, 3}$	$S_D^{17, 4, 3}$			\		$S_D^{17, 3, 3}$	$S_A^{17, 2, 1}$	\	\
郴州西—乐昌东	$S_D^{18, 2, 3}$	$S_D^{18, 3, 3}$	$S_D^{18, 1, 3}$	$S_D^{18, 4, 3}$			$S_B^{18, 3, 2}$		$S_D^{18, 3, 3}$	*	$S_D^{18, 2, 3}$	$S_D^{18, 3, 3}$
乐昌东	\	\	\	\			\		\		$S_D^{19, 3, 3}$	\
乐昌东—韶关	$S_D^{20, 3, 3}$	$S_D^{20, 4, 3}$	$S_D^{20, 2, 3}$	$S_D^{20, 4, 3}$			$S_B^{20, 3, 2}$		$S_D^{20, 3, 3}$		$S_D^{20, 3, 3}$	$S_D^{20, 3, 3}$
韶关	$S_D^{21, 3, 3}$	\	$S_D^{21, 3, 3}$	\			$S_B^{21, 3, 2}$		\		$S_D^{21, 3, 3}$	\
韶关—英德西	$S_D^{22, 3, 3}$	$S_D^{22, 4, 3}$	$S_D^{22, 3, 3}$	$S_D^{12, 4, 3}$			$S_B^{22, 3, 2}$		$S_D^{22, 3, 3}$		$S_D^{22, 3, 3}$	$S_D^{22, 3, 3}$
英德西	\	\	\	\			\	\	$S_D^{23, 3, 3}$		\	\
英德西—清远	$S_D^{24, 3, 3}$	$S_D^{24, 4, 3}$	$S_D^{24, 3, 3}$	$S_D^{24, 4, 3}$			$S_B^{24, 3, 2}$	$S_D^{24, 2, 3}$	$S_D^{24, 3, 3}$		$S_D^{24, 3, 3}$	$S_D^{24, 3, 3}$
清远	\	$S_D^{25, 4, 3}$	\	$S_D^{25, 4, 3}$			\	\	\		\	\
清远—广州北	$S_D^{26, 3, 3}$	$S_D^{26, 4, 3}$	$S_D^{26, 2, 3}$	$S_D^{26, 4, 3}$			$S_B^{26, 3, 2}$	$S_D^{26, 2, 3}$	$S_D^{26, 3, 3}$		$S_D^{26, 3, 3}$	$S_D^{26, 4, 3}$
广州北	\	\	\	\			\	$S_D^{27, 2, 3}$	\		\	\

表 10 列车在区间或车站的晚点恢复时长得分
Tab.10 Score for train delay recovery duration in a section or station

区间/车站	G1031	G1113	G1117	G1403	G1505	G401	G549	G6111	G6151	G6159	G847	G85
赤壁北		\				\	\					
赤壁北—岳阳东		0.68				0.38	0.6					
岳阳东		1				0.6	\					
岳阳东—汨罗东		0.14				0.71	0.95					
汨罗东		1				\	\					
汨罗东—长沙南		0.17				1	0.57					
长沙南		0.60		0.03	0.6	0.08	0.71					0.2
长沙南—株洲西		1		0.8	0.8		0.5					0.17
株洲西		\		0.85	0.1		0.8			\		\
株洲西—衡山西		1		0.2	0.67		1			1		1
衡山西		\		\	\		\			\		\
衡山西—衡阳东		0.95		0.99	0.78		1			0.73		0.95
衡阳东		0.70		0.68	0.93		0.64		\	0.96	\	\
衡阳东—耒阳西		0.24		0.99			0.88		0.24	0.98	0.06	0.99
耒阳西		\		\			\		\	\	1	\
耒阳西—郴州西		1		0.81			0.35		0.8	0.71	1	0.22
郴州西	0.99	0.58	1	0.94			\		0.97	1	\	\
郴州西—乐昌东	0.75	0.81	0.4	0.41			0.45		0.42	*	0.75	0.81
乐昌东	\	\	\	\			\		\		0.27	\
乐昌东—韶关	0.11	0.88	0.05	0.88			0.88		0.99		0.83	0.28
韶关	1	\	1	\			0.62		\		1	\
韶关—英德西	0.80	1	0.80	0.9			0.81		0.8		0.8	0.8
英德西	\	\	\	\			\	\	1		\	\
英德西—清远	0.43	0.55	0.98	0.55			1	0.15	0.15		0.43	0.15
清远	\	0.39	\	1			\	\	\		\	\
清远—广州北	0.81	0.43	0.74	0.8			0.75	0.99	1		0.81	0.8
广州北	\	\	\	\			\	0.76	\		\	\

是否为枢纽站、是否衔接地铁或机场、是否为一等及以上车站 3 种条件，将沿线车站划分为重要车站及一般车站，若车站以上 3 种条件均不满足，则为一般车站，权重记为 1；若车站满足以上 3 种条件的任意一种，则划分为重要车站，3 个条件均满足，权重记为 3，满足 1 个或 2 个条件，权重记为 2。武广高速铁路重要车站及权重如表 11 所示。

(2) 武广高速铁路 6 月 7 日调度白班列车综合晚点恢复质量评价。岳阳东、长沙南、衡阳东及广州北站为重要车站，考虑重要车站的列车综合晚点恢复质量得分如表 12 所示。根据得分情况，可以

表 11 武广高速铁路重要车站及权重
Tab.11 Important stations and weights of Wuhan-Guangzhou High Speed Railway

车站	权重	是否为重要车站	车站	权重	是否为重要车站
赤壁北	1	否	耒阳西	1	否
岳阳东	2	是	郴州西	1	否
汨罗东	1	否	乐昌东	1	否
长沙南	3	是	韶关	1	否
株洲西	1	否	英德西	1	否
衡山西	1	否	清远	1	否
衡阳东	3	是	广州北	2	是

认为该调度班内 G1031，G6159 次列车的晚点恢复质量“优秀”，其余列车晚点恢复质量“良好”。

表 12 考虑重要车站的列车综合晚点恢复质量得分
Tab.12 Score for train delay recovery quality considering important stations

车次	G1031	G1113	G1117	G1403	G1505	G401	G549	G6111	G6151	G6159	G847	G85
得分	0.81	0.66	0.71	0.76	0.68	0.64	0.74	0.72	0.74	0.86	0.71	0.65

4 结论

提出了一种基于场景划分的高速铁路列车晚点恢复质量评价方法,并基于武广高速铁路实际运行数据验证了所提出的方法对于高铁晚点恢复质量评价的有效性。

(1) 基于多维运行特征的FCM聚类能有效划分晚点恢复场景。实例中将36 443条运行数据划分为4类典型场景,其中B类场景初始晚点程度与实时晚点时长显著高于其他类,表明其恢复环境更为严峻,验证了场景化区分的必要性。

(2) 不同场景下影响晚点恢复的关键因素存在显著差异。随机森林特征重要性分析表明,缓冲时间在A、C类场景中起主导作用,重要性大于0.46,而实时晚点时长在B类场景中最为关键,重要性为0.587,说明评价体系需针对场景动态调整评价重点。

(3) 动态评价指标以及评价方法能够实现跨场景的公平、客观评价。实例中,尽管G1031与G1113在郴州西—乐昌东区间均增晚2 min,但因场景不同其得分分别为0.75与0.81,体现了评价方法对运行条件差异的适应性。考虑重要车站权重后,12列晚点列车的综合得分分布于0.64~0.86之间,其中2列为“优秀”,10列为“良好”,评价结果合理且具有区分度。

参考文献:

- [1] 黄 平, 彭其渊, 文 超, 等. 武广高速铁路列车晚点恢复时间预测的随机森林模型[J]. 铁道学报, 2018, 40(7): 1-9.
HUANG Ping, PENG Qiyuan, WEN Chao, et al. Random Forest Prediction Model for Wuhan-Guangzhou HSR Primary Train Delays Recovery[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(7): 1-9.
- [2] 胡雨欣, 彭其渊, 鲁工圆, 等. 基于初始晚点和冗余时间的列车晚点恢复时间预测模型[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(2): 93-102.
HU Yuxin, PENG Qiyuan, LU Gongyuan, et al. Train Delay Recovery Time Prediction Model Based on Initial Late Point and Redundant Time[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18(2): 93-102.
- [3] 刘梦雨, 李建民, 石 睿, 等. 高速铁路非正常事件时长

分布及场景划分研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(S1): 105-110, 143.

LIU Mengyu, LI Jianmin, SHI Rui, et al. A Study on Duration Distribution and Scenario Classification of Abnormal Events in High Speed Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(S1): 105-110, 143.

- [4] 侯亚飞, 王 斌, 黄 平, 等. 高速列车运行调整策略的晚点恢复聚类[J]. 中国铁路, 2021(5): 39-46.

HOU Yafei, WANG Bin, HUANG Ping, et al. Delay Recovery Clustering of High Speed Train Operation Adjustment Strategy[J]. China Railway, 2021(5): 39-46.

- [5] 陈振华. 高速铁路列车调度应急处置能力模糊评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2014, 36(4): 66-70.

CHEN Zhenhua. Study on Fuzzy Evaluation of Emergency Treatment Ability of High Speed Trains Traffic Control[J]. Railway Transport and Economy, 2014, 36(4): 66-70.

- [6] 郭峤枫, 刘君喜, 杜敏齐, 等. 高速铁路调度员应急处置能力评价体系构建及应用[J]. 铁道学报, 2022, 44(4): 1-8.

GUO Qiaofeng, LIU Junxi, DU Minqi, et al. Construction and Application of Evaluation System for Emergency Response Ability of High Speed Railway Dispatchers[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(4): 1-8.

- [7] 方立海, 陈南江. 铁路列车调度员工作质量评价系统研究[J]. 铁道货运, 2022, 40(6): 54-58.

FANG Lihai, CHEN Nanjiang. Research on the Work Quality Evaluation System of Railway Train Dispatchers[J]. Railway Freight Transport, 2022, 40(6): 54-58.

- [8] 彭 强. 基于日常生产作业绩效的普速列车调度员作业能力测评方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 17(4): 88-96.

PENG Qiang. Research on Evaluation Method of Dispatcher's Operational Capability Based on Daily Production Performance[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2019, 17(4): 88-96.

- [9] MASKELIŪNAITĖ L, SIVILEVIČIUS H, PODVEZKO V. Research on the Quality of Passenger Transportation by Railway[J]. Transport, 2009, 24(2): 100-112.

- [10] 韩霏然, 孟令云, 王道奇, 等. 高速铁路列车运行图弹性评价方法[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(8): 58-64.

HAN Peiran, MENG Lingyun, WANG Daoqi, et al. Train Working Diagram Resilience Evaluation Method for High Speed

- Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(8): 58–64.
- [11] 戎亚萍, 申宏楠, 昌 晶, 等. 基于TOPSIS熵权法的高速铁路动车组运用水平评价方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(6): 1–7.
- RONG Yaping, SHEN Hongnan, CHANG Jing, et al. Research on the Utilization Level Evaluation Method of High Speed Railway EMU Based on TOPSIS and Entropy Weight Method[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(6): 1–7.
- [12] AWASTHI A, CHAUHAN S S, OMRANI H, et al. A Hybrid Approach Based on SERVQUAL and Fuzzy TOPSIS for Evaluating Transportation Service Quality[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(3): 637–646.
- [13] 马 芳. 基于群体灰色层次分析法的列车运行图质量评价[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(10): 105–110.
- MA Fang. Quality Evaluation of Train Operation Diagram Based on Group Grey AHP Method[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(10): 105–110.
- [14] 孙延浩, 张 琦, 任禹谋, 等. 高速铁路列车调度员应急处置能力评价研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 19–25.
- SUN Yanhao, ZHANG Qi, REN Yumou, et al. Evaluation of Emergency Disposal Ability of Train Dispatcher of High Speed Railway[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2021, 40(5): 19–25.
- [15] 闫 迪. 基于晚点恢复的高速铁路行车调度工作质量评价方法[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [16] 李 力, 闫 迪, 田 锐, 等. 基于晚点恢复的高速铁路行车调度质量评价[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(S2): 118–125.
- LI Li, YAN Di, TIAN Rui, et al. Train Dispatching Quality Evaluation Based on Train Delay Recovery in High Speed Railway[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(S2): 118–125.
- (责任编辑 汪沁莹)

(上接第10页)

- 01–20][2026–07–21]. <http://dx.doi.org/10.1109/SMC54092.2024.10831914>.
- [15] 马 羊, 王书易, 张家钰, 等. 基于车载LiDAR数据的公路竖向净空自动化评估[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 44–59.
- MA Yang, WANG Shuyi, ZHANG Jiayu, et al. Automated Estimation of Highway Vertical Clearance Using Mobile LiDAR Data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5): 44–59.
- [16] HSU C P, LI B D, SOLANO-RIVAS B, et al. A Review and Perspective on Optical Phased Array for Automotive LiDAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(1): 8300416.
- [17] 刘永强, 姜 维, 蔡伯根, 等. 面向列控系统的全息感知与互操作验证平台设计与实现[J]. 铁道运输与经济, 2026, 48(7): 39–46, 57.
- LIU Yongqiang, JIANG Wei, CAI Baigen, et al. Design and Implementation of a Holographic Perception and Interoperability Verification Platform for Train Operation Control Systems[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(7): 39–46, 57.
- [18] 曾 祥, 蒋国涛, 潘文波, 等. 基于车载激光雷达的列车前方侵限障碍物检测[J]. 控制与信息技术, 2023(1): 72–77.
- ZENG Xiang, JIANG Guotao, PAN Wenbo, et al. Detection of Obstacle Intrusion in Front of Train Based on Vehicle-Borne LiDAR[J]. Control and Information Technology, 2023(1): 72–77.
- [19] 郭子明. 激光雷达辅助的列车轨道占用识别方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [20] 陈志伟, 潘文波, 黄文宇, 等. 一种地铁隧道退化环境下的地图构建方法[J]. 控制与信息技术, 2023(4): 47–53.
- CHEN Zhiwei, PAN Wenbo, HUANG Wenyu, et al. A Method for Map Construction in Degraded Environments of Subway Tunnels[J]. Control and Information Technology, 2023(4): 47–53.
- [21] MMAJIMA D, SURANTHA N. Object Detection of Train Line Equipment Using SSD and YOLOv7[EB/OL]. (2024–12–27) [2026–07–21]. <https://doi.org/10.1109/ICITDA64560.2024.10810078>.
- [22] 徐 岩, 陶慧青, 虎丽丽. 基于Faster R-CNN网络模型的铁路异物侵限检测算法研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(5): 91–98.
- XU Yan, TAO Huiqing, HU Lili. Railway Foreign Body Intrusion Detection Based on Faster R-CNN Network Model[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(5): 91–98.
- (责任编辑 金 晶)