文章编号：1003-1421(2026)07-0027-12
引用格式：张如，陶思宇，彭其渊，等. 基于博弈赋权与灰色-TOPSIS的高速铁路综合维修态势评估[J]. 铁道运输与经济，2026，48(7)：27-38.
ZHANG Ru，TAO Siyu，PENG Qiyuan，et al. Comprehensive Maintenance Situation Assessment of High Speed Railway Based on Game Weighting and Grey-TOPSIS[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(7)：27-38.

基于博弈赋权与灰色-TOPSIS的高速铁路综合维修态势评估

张　如[1, 2, 3]，陶思宇[1, 2, 3]，彭其渊[1, 2, 3]，陈立强[1, 2, 3]，冯　涛[1, 2, 3]

(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 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都　611756；3.西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都　611756)

摘　要：高速铁路综合维修态势评估是对综合维修作业的合理性、高效性和可行性进行评估的过程，针对评估中存在的指标碎片化、动态感知能力欠缺及多源数据融合不足等问题，提出融合博弈论组合赋权与灰色关联TOPSIS的评估框架。并基于JDL态势感知理论，构建覆盖微观(天窗作业进度)与宏观(线路能力折减率)的“人-机-环-管-效”五维指标体系。通过博弈论纳什均衡协调主客观权重冲突，并采用灰色关联度修正传统欧氏距离，提升模型对数据波动与非线性的鲁棒性，最终实现基于阈值划分的分钟级态势分级与预警。算例验证表明：评估结果能有效反映维修工区整体态势(相对贴近度0.3~0.7)；决策者偏好系数μ变化(0-1区间内11个值)虽导致部分时段评估差异及μ=0.6时最优时段转变，但相邻μ值下贴近度的Pearson相关系数高达0.936~0.998，证明了方法的可行性与稳定性。

关键词：铁路运输；态势评估；博弈论；灰色关联TOPSIS；维修指标体系
中图分类号：U238　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250604003

Comprehensive Maintenance Situation Assessment of High Speed Railway Based on Game Weighting and Grey-TOPSIS

ZHANG Ru[1, 2, 3]，TAO Siyu[1, 2, 3]，PENG Qiyuan[1, 2, 3]，CHEN Liqiang[1, 2, 3]，FENG Tao[1, 2, 3]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Transportation Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: The comprehensive maintenance situation assessment of high speed railway evaluates the rationality, efficiency, and feasibility of comprehensive maintenance operations. To address the issues of index fragmentation, dynamic modeling deficiency, and insufficient multi-source data adaptation, this paper proposed an evaluation framework that combined game theory combination weighting and grey correlation TOPSIS. Based on the joint directors of laboratories (JDL) situational

收稿日期：2025-06-04　　**修订日期**：2026-06-01
通信作者：陶思宇(1980—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，西南交通大学交通运输与物流学院副教授。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502)；广西创新驱动发展专项资金项目(桂科AA21077011-2)

awareness theory, a five-dimensional index system covering micro (skylight operation progress) and macro (line capacity reduction rate) aspects was constructed, namely "man, machine, environment, management, and efficiency". The game theory Nash equilibrium was used to coordinate subjective and objective weight conflicts, and the grey correlation degree corrected the traditional Euclidean distance to improve the robustness against data fluctuation and nonlinearity. Furthermore, minute-level situation classification early warning based on threshold division was realized. Verification result shows that the evaluation results effectively reflect the overall maintenance section situation (relative closeness of 0.3~0.7). Although the changes in the decision maker preference coefficient μ (11 values in [0−1]) cause differences in the evaluation of some periods and a shift of the optimal period when μ = 0.6, the Pearson correlation coefficient of the closeness degree under adjacent μ value is as high as 0.936~0.998, which proves the feasibility and stability of the method.
Keywords: Railway Transportation; Situation Assessment; Game Theory; Grey Correlation TOPSIS; Maintenance Index System

0　引言

高速铁路综合维修是保障铁路安全稳定运行的重要支撑，其效能评估直接影响基础设施运营的可靠性。近年来，随着《交通强国建设纲要》的实施，高铁线路资源的老旧及维修天窗的压缩与日益增长的运输产品多样化需求间的矛盾加剧，亟需建立融合多维度动态特征的态势评估体系。然而，现有研究多集中于天窗设置优化与列车运行协调研究等方面，少有学者从宏-微观层面构建指标体系对高速铁路综合维修态势进行评估。早期关于综合维修天窗的研究以特定铁路场景为切入点，通过V型天窗利用率优化[1-2]、斜率分析法[3]、灵敏度模型[4]探索天窗与运营的静态协调。随着夜间运营需求增加，学者进一步从宏观层面研究分析天窗时段、形式及时长与线路通过能力的交互影响[5-9]，并在微观层面上对比不同维修模式的成本效益[10-11]。然而，现有指标体系多依赖单维度静态指标(如作业效率[12]、管理模式[13])，缺乏多维度的综合维修评估指标研究。其他领域的综合维修评估方面，冯兵等[14]基于有向图与矩阵理论构建武器系统维修性设计评估模型。由于维修过程的复杂性和维修系统结构的多样化，学者采用关键效能指标来衡量维修系统的效能[15-18]，但多样化的KPI指标易造成关键指标的遗漏，钱彦玲等[19]提出"输入-过程-输出-环境"四维指标框架，综合考虑了综合维修评估的动态性和多因素交互影响；Kirkwood等[20]在铁路维修成本效益评估中引入风险修正的净现值法，验证了经济性指标与维修策略的关联性。

在态势评估领域，JDL实验室的态势感知理论为多源数据融合提供了范式，Endsley的三层次模型进一步推动其向交通管理等领域延伸[21]。国内针对铁路的态势评估主要集中在安全和运营2方面。闫旭等[22]以事故多属性分析为切入点，构建TOPSIS-余弦相似度评估模型对区域铁路运输安全态势进行评估；徐兰花等[23]基于BP神经网络实现高铁运营安全态势预测；余明泽[24]通过双激励模型动态识别列车运行态势及劣化趋势；周俊[25]基于车站客流安全影响因素分析，构建客流安全态势模糊综合评价模型；孙晨冉[26]利用改进XGBoost算法推演货物列车分布态势；陈雅欣等[27]针对编组站运输生产效率提升问题，提出基于集对分析与理想点法相结合的评估方法。国外则主要集中在铁路安全风险、铁路运营事故分析和铁路运输系统风险评估等方面。Huang等[28]基于文本挖掘和模糊规则的弓形图模型，能系统地识别风险因素并清晰展示因果链；Jafarian等[29]改进了模糊故障树分析，提出去模糊化方法和重要性分布函数，将传统指标扩展到模糊环境。Liu等[30]基于网络理论构建事故因果网络，全面捕捉事故原因和规律；Liu等[31]通过文本挖掘和知识图谱构建多维图谱，实现风险关系可视化。Lu等[32]采用定时故障树模型分析铁路运输系统的故障模式及其影响；Leitner等[33]提出基于情景分析的通用风险评估模型，结合FTA和ETA技术评估危险事件的频率和严重性。

对于运营现场的综合评估，欧洲标准委员会发布的《维护—维护关键绩效指标》(EN 15341：2022)给出了覆盖"经济-技术-组织"三维度的维护KPI体系，为维护绩效评估提供了国际通用的框架；我国铁路将"天窗兑现率/利用率"列为刚性量化指

标，并延续“天窗修、预防为主”原则。然而，既有评估制度多侧重于事后静态统计与结果考核，在维修动态态势感知、多源信息融合与实时预警干预方面有待加强。

尽管综合维修与铁路态势评估研究在多领域取得进展，但高铁综合维修态势评估方面仍存在不足，尤其是在指标体系构建、动态感知能力与多因素耦合机制分析方面。因此，从“人-机-环-管-效”协同视角出发，构建融合微观维修效率与宏观运营影响的五维指标，实现综合维修全要素耦合分析。为克服传统评估方法的局限性，采用博弈论纳什均衡协调G1与熵权法赋权冲突，并引入灰色关联分析改进TOPSIS算法，以增强模型对数据波动及非线性关系的鲁棒性，最后基于态势分级阈值设定实现维修状态的动态预警，为维修决策提供实时支持。

1　综合维修态势表征与量化

1.1　综合维修态势表征要素

综合维修作业态势要素是衡量维修作业状态的关键信息集合。从“人-机-环-管-效”协同视角出发，结合高速铁路综合维修的动态交互特征对态势要素进行分析，综合考虑维修作业全流程的动态特征与交互影响，将其态势表征要素归纳为以下几个方面。这些要素通过非线性耦合构成有机整体，例如作业位置分布制约资源配置效率，环境波动触发安全风险升级等，最终影响维修效能输出。

（1）维修人员维度(人)：能力与调度的动态平衡。维修人员是综合维修作业的核心力量，维修人员资质水平、应急响应时间及负荷均衡度直接关联维修任务的执行效率。通过持续优化维修人员资质认证体系，严格实行维修人员持证上岗，可保障作业规范性。但若负荷均衡度超过阈值则会引起维修人员疲劳累积，导致应急响应时间延长，降低天窗作业效率。

（2）维修作业维度(机-管)：流程与管控的协同优化。维修作业类型与进度是衡量施工计划执行效能的核心要素，作业进度能衡量各工种(工务、电务、供电)工作效率和任务完成情况。天窗兑现率反映施工计划刚性，而天窗利用率体现过程管控柔性。当进度偏离指数持续高于标准水平时，表明作业流程存在资源阻塞或调度失序，需启动一定动态校准机制，通过奖惩杠杆调节作业节奏。

（3）维修设备维度(机)：状态与能效的共生关系。维修设备是综合维修作业的重要支撑，直接影响维修作业的效率和质量。其中维修设备完好率是保障作业连续性的物质基础，而大型机械配置强度需与线路特征匹配。且维修设备的效能直接影响着维修效率与延时风险。

（4）维修影响维度(效)：时效与安全的双重博弈。维修影响维度指标用于刻画维修作业期间列车运行状态与线路资源的动态交互影响。其中正点率与延误指数侧重时效性，直接关联维修作业的计划性和响应速度；能力折减率与冲突风险值聚焦安全性，反映基础设施维护质量及风险防控能力。

（5）维修环境维度(环)：外源风险的韧性应对。维修环境是综合维修作业的重要外部条件，其稳定性直接影响维修作业的效率和质量。主要从服务反馈(乘客满意度)、外部风险(天气干扰)和作业管控(质量波动)3个层面构建评估指标。

1.2　综合维修态势表征指标体系构建

高速铁路综合维修态势表征指标体系是由若干个态势要素组成的集合，是对综合维修作业多个维度层面态势水平及作业天窗对列车运行影响情况的整体呈现。基于前文中的维修态势要素构成分析，从宏-微观视角构建高速铁路综合维修态势表征指标体系如图1所示。

1.3　综合维修态势关键指标量化

（1）维修人员维度。

①维修人员资质水平(Q_{skill})。维修人员资质水平反映了维修人员的技能和专业知识，通常通过技能测试、作业效率统计和安全教育培训等进行定性评估，表明了综合维修作业技术能力，量化公式如下。

$$Q_{\text{skill}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} s_i}{n} \times 100\% \tag{1}$$

式中：s_i为第i名维修人员的技能评分；n为维修人员总数，人。

②应急响应时间(T_{response})。应急响应时间是指在突发事件发生时，维修人员从接到通知到开始进行

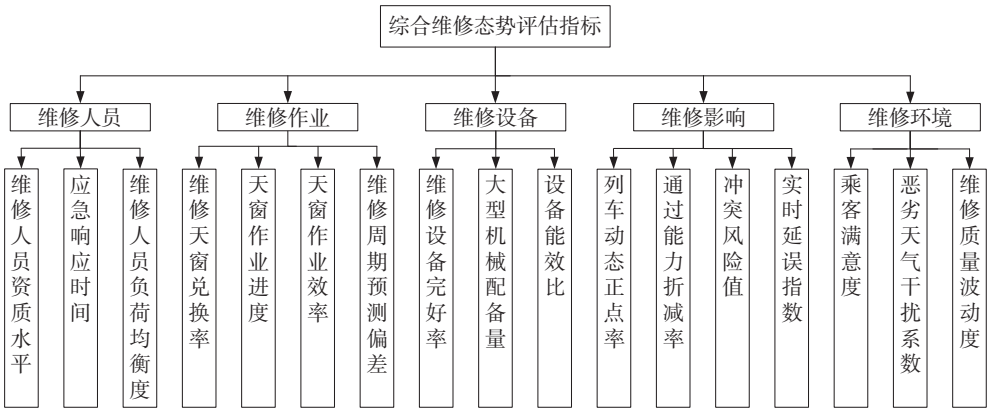

图1　综合维修作业态势表征指标体系

Fig.1　Index system for characterizing comprehensive maintenance situation

应急处理所需的时间，反映了维修团队的反应速度和处理能力，量化公式如下。

$$T_{\text{response}} = \frac{\sum_{j=1}^{m}(T_{\text{start},\,j} - T_{\text{notify},\,j})}{m} \tag{2}$$

式中：$T_{\text{start},\,j}$为第j次开始处理时间；$T_{\text{notify},\,j}$为第j次的通知时间；m为事件总数，件。

③维修人员负荷均衡度(B)。维修人员负荷均衡度指在同一维修工区或区域路网内，不同维修人员承担的工作量与其能力匹配的均衡程度。目的是避免因任务分配不均导致的“过载-闲置”现象，以提升维修作业效率与资源利用率，量化公式如下。

$$B = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left| w_i\mu_i - w_j\mu_j \right|}{2n\sum_{i=1}^{n} w_i\mu_i} \tag{3}$$

式中：n表示维修工区数量，个；w_i为第i个工区任务权重；μ_i为第i个工区的人均任务量。

（2）维修作业维度。

①天窗兑换率(C_t)。天窗兑换率是指运输组织部门实际给点时间、次数与计划时间、次数之比，是铁路维修管理中的核心指标之一，反映了维修工作的执行效率和计划的准确性，量化公式如下。

$$C_t = \left[\alpha \frac{T_{\text{actual}}}{T_{\text{planned}}} + (1-\alpha)\frac{N_{\text{actual}}}{N_{\text{planned}}} \right] \times 100\% \tag{4}$$

式中：T_{actual}为实际完成的维修作业时间，h；T_{planned}为计划的维修天窗时间，h；N_{actual}为实际完成的维修作业次数，次；N_{planned}为计划的维修天窗次数，次。

②天窗作业进度(G)。天窗作业进度是指在天窗时间内，维修作业的实际进展情况，包括作业时间进度与作业里程进度。时间进度反映天窗内实际作业时间与计划总作业时间的匹配程度，作业里程进度反映维修任务在空间范围上的完成比例。二者结合全面刻画了维修作业的时空协同性，是综合维修作业态势“态”的关键表征，量化公式如下。

$$G = \min\left\{ T_s(t),\ M_s \right\} \tag{5}$$

$$T_s(t) = \frac{T_t}{T_{\text{day}} - T_f} \times 100\% \tag{6}$$

$$M_s = \sum_{j=1}^{n}\left(w_j \cdot \frac{L_{\text{actual},\,j}}{L_{\text{plan},\,j}} \right) \times 100\% \tag{7}$$

$$w_j = \frac{t_j}{\sum_{j=1}^{n} t_j} \tag{8}$$

式中：T_t为实际维修作业的纯作业时间，h；T_{day}为维修天窗开设时间，h；T_f为天窗作业前的准备时间及辅助作业时间，h；w_j为第j项维修任务的权重；$L_{\text{actual},\,j}$为第j项维修任务已完成的维修里程，km；$L_{plan,\,j}$为第j项维修任务计划维修里程，km；t_j为第j项任务的计划用时，h；$T_s(t)$为t时刻的作业时间进度；M_s为作业里程进度。

③天窗作业效率(E)。天窗作业效率衡量维修任务在天窗时间内完成的集约化程度，体现资源利用水平。作为“态”指标，效率值直接关联天窗资源占用状态，量化公式如下。

$$E = \sum_{j=1}^{m}\frac{C_{\text{actual},\,j}}{C_{\text{plan},\,j}} \times 100\% \tag{9}$$

式中：C_j为项目j的实际完成量，项；$C_{\text{plan},\,j}$为项目j的计划完成量，项。

④维修周期预测偏差(D_{cycle})。维修周期预测偏

差指设备实际维修周期与计划周期的偏离程度，衡量计划维护周期与实际需求的偏离度，利于预防性维修策略制定，量化公式如下。

$$D_{\text{cycle}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{T_{\text{actual},\,i} - T_{\text{plan},\,i}}{T_{\text{plan},\,i}} \times 100\%\right| \tag{10}$$

式中：$T_{\text{actual},\,i}$为设备实际维修周期，d；$T_{\text{plan},\,i}$为计划维修周期，d。

（3）维修设备维度。

①维修设备完好率(η)。维修设备完好率是指在一定时期内，维修设备处于良好运行状态的比例。它是衡量维修设备可靠性和可用性的关键指标，量化公式如下。

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i \cdot \eta_i}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \tag{11}$$

$$\eta_i = \frac{N_{\text{operational},\,i}}{N_{\text{total},\,i}} \times 100\% \tag{12}$$

式中：L_i为第i工区管辖里程，km；η_i为对应工区i设备完好率；$N_{\text{operational},\,i}$为工区$i$的可用设备数，台；$N_{\text{total},\,i}$为工区$i$的设备总数，台。

②大型机械配备量(E_{equip})。大型机械配备量是衡量维修作业能力的重要指标，其合理配备能够减少人工劳动强度，提高作业精度和效率，直接影响维修作业的效率和质量，量化公式如下。

$$E_{\text{equip}} = \sum_{k=1}^{m} N_k \tag{13}$$

式中：N_k为第k类大型机械的数量，台；m为大型机械的种类数，类。

③设备能效比($R_{\text{efficiency}}$)。设备能效比衡量单位能耗或成本下的维修作业产出，反映设备使用经济性与环境友好性，量化公式如下。

$$R_{\text{efficiency}} = \sum_{i}^{n} \frac{W_{\text{output},\,i}}{W_{\text{input},\,i}} \tag{14}$$

式中：$W_{\text{output},\,i}$为维修作业产出量(如维修里程、故障修复数)；$W_{\text{input},\,i}$为能源或成本投入量(如耗电量、燃油消耗费用)。

（4）维修影响维度。

①列车动态正点率(P)。列车动态正点率是衡量铁路运输效率的核心指标，其高低直接体现了维修作业对运输系统的干扰程度，是评估综合维修作业时空协调性的关键指标，量化公式如下。

$$P = \frac{N_{\text{ontime}}}{N_{\text{total}}} \times 100\% \tag{15}$$

式中：N_{ontime}为观测时段内正点列车数，列；N_{total}为总开行的列车数，列。

②通过能力折减率(CR)。通过能力折减率表征维修作业对线路运输能力的占用效应，量化了天窗设置与行车需求的矛盾，反映维修天窗占用时空资源导致的线路理论通过能力损失，量化公式如下。

$$CR = \left(1 - \frac{C_{\text{actual}}}{C_{\text{theory}}}\right) \times 100\% \tag{16}$$

式中：C_{actual}为无天窗时线路理论通过能力，列/d；C_{theory}为天窗时段实际通过能力，列/d。

③冲突风险值(CT)。冲突风险值用于评估维修作业与行车计划的时空冲突概率，是安全风险管控的核心依据。作为“势”指标，量化公式如下。

$$CT = \frac{T_{\text{overlap}}}{T_{\text{total}}} \times \frac{S_{\text{overlap}}}{S_{\text{total}}} \tag{17}$$

式中：T_{overlap}为维修与行车计划时间重叠时长，min；T_{total}为天窗总时长，min；S_{overlap}为空间重叠区段长度，km；S_{total}为工区管辖总里程，km。

④实时延误指数(Y)。实时延误指数动态反映维修作业引发的延误扩散效应，用于评估运行环境恶化程度，量化公式如下。

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^{m} w_j \left(t_{\text{actual}}^{j} - t_{\text{plan}}^{j}\right)}{T_{\text{total}}} \tag{18}$$

式中：w_j为作业项目j的权重(按计划时长占比分配)；t_{actual}^{j}和t_{plan}^{j}分别为实际与计划耗时，min。

（5）维修环境维度。

①乘客满意度(M)。乘客满意度反映旅客对高速铁路服务质量的综合评价，是运维协同优化的直接体现，量化公式如下。

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i}{n} \times 100\% \tag{19}$$

式中：g_i为乘客i对于当前状态的评分，根据人们对不同维度的重视度并结合当前列车运行状态进行计算。

②恶劣天气干扰系数(W)。恶劣天气干扰系数量化了雨雪、大风等极端气候对维修作业进度与安全的影响强度，反映外部环境的不确定性，量化公式如下。

$$W = \sum_{k=1}^{p}\left(\frac{T_k}{T_{\text{total}}} \cdot \alpha_k\right) \tag{20}$$

式中：T_k为第k类恶劣天气持续时间，min；α_k为天气等级权重。

基于气象灾害风险评估领域相关内容、官方标准及高速铁路综合维修作业的特殊环境，恶劣天气权重系数如表1所示。

表1　恶劣天气权重系数

Tab.1　Bad weather weight coefficient

天气类型	小雨、小雪	中雨、中雪	大雨、大雪、暴雨	冰雹
权重系数	0.1~0.3	0.4~0.6	0.7~0.9	0.8~1.0

③维修质量波动度(G_r)。维修质量波动度表征作业成果符合技术标准的稳定性，通过设备故障率或返工率间接反映，量化公式如下。

$$G_s = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{D_j - \overline{D}}{\overline{D}}\right)^2} \times 100\% \tag{21}$$

$$G_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} L_i \cdot G_s^i}{\sum_{i=1}^{n} L_i} \tag{22}$$

式中：D_j为作业项目j的缺陷数，件；$\overline{D}$为平均缺陷数，件。

2　综合维修态势评估

2.1　基于博弈论组合赋权与灰色关联TOPSIS的态势评估模型

基于既有评估方法及赋权方法，通过“主客观赋权-博弈优化-灰色修正”构建评估模型，有利于提升复杂环境下态势评估的科学性与鲁棒性，具体态势评估流程如图2所示。

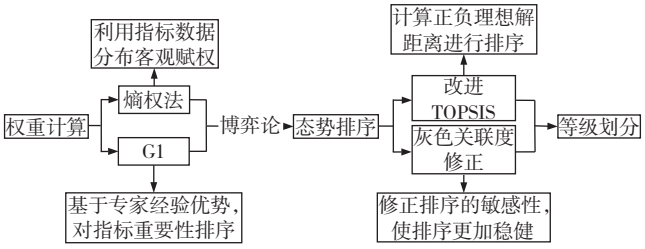

图2　态势评估流程

Fig.2　Situation assessment procedure

2.2　指标权重确定

2.2.1　指标标准化

在评估高铁综合维修态势时，选取了9个时间点作为评估对象，方案集为$M=(M_1, M_2, \ldots, M_m)$，同时确定了17个评价指标，评价指标集$N=(N_1, N_2, \ldots, N_n)$。方案$M_i$对指标$N_j$的评价值记为$x_{ij}$，为消除不同评价指标间量纲和单位的影响，需对初始评价矩阵X进行无量纲化处理，得到标准化矩阵$Z=(z_{ij})_{9\times 17}$，具体量化如下。

对于正值指标

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad j=1, 2, \ldots, n \tag{23}$$

对于负值指标

$$Z_{ij} = \frac{X_{\max} - X_{ij}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad j=1, 2, \ldots, n \tag{24}$$

2.2.2　权重计算

单独使用主观赋权法易导致权重受决策者个人意愿影响而缺乏客观性，而客观赋权法虽能挖掘数据但无法体现专家对指标的重视程度，因此，选择博弈论进行主客观组合赋权，具体流程如下。

（1）G1法(主观赋权)。G1法是在层次分析法基础上改进的主观赋权方法，通过决策者对指标的重要性排序和相邻指标间重要性程度的量化比较，确定各指标的权重。G1法避免了传统AHP法中复杂的成对比较矩阵，同时保留了主观赋权的灵活性，具体步骤如下。

步骤1：确定指标序关系。通过专家研讨分析对所有评价指标按重要性从高到低排序。

$$X_1 > X_2 > \cdots > X_n \tag{25}$$

对相邻指标X_{K-1}与X_K，计算相对重要性程度r_k，通常采用1.0—1.8的标度，从1.0—1.8所代表的重要度分别为同等重要、稍微重要、明显重要、极其重要。

步骤2：权重计算。假设最次要指标X_n的权重为ω_n，则通过逆序递推求得其余权重。

$$\omega_{k-1} = r_k \cdot \omega_k \quad k=n, n-1, \ldots, 2, 1 \tag{26}$$

步骤3：归一化处理得到最终权重。

$$\omega_G = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^{n}\prod_{i=k}^{n} r_i} \quad i=1, 2, \ldots, n \tag{27}$$

其中，r_i表示第$i-1$个指标相对于第i个指标的重要性比率，对于同一个指标，其自身的比值为1。

（2）熵权法(客观赋权)。熵值法是一种基于信息论的客观赋权方法，能够根据评价指标所含信息量确定其权重，不受决策者主观因素影响。

步骤1：计算每个指标的熵。

$$H_j = -k\sum_{i=1}^{m} p_{ij}\ln(p_{ij}) \tag{28}$$

$$p_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} Z_{ij}} \tag{29}$$

其中，k为常数，通常取值为$k=\frac{1}{\ln m}$。

步骤2：计算权重。

$$\omega_E = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^{n}(1-H_j)} \tag{30}$$

其中，H_j取值范围为[0，1]，指标熵值越大，表明该指标离散程度越小，包含信息量越少，熵权也就越小。且$0 \leqslant \omega_E \leqslant 1$，$\sum_{j=1}^{n}\omega_E = 1$。

（3）基于博弈论的组合赋权。博弈论作为研究多方互动与决策的理论，最早源于对游戏的研究。其核心在于分析不同主体的策略互动，找到利益最优的均衡点。通过将G1法和熵权法获得的权重视为2个不同的“主体”，利用博弈论获取一个平衡点，得到更加合理的权重分配方案[34]。不同于传统博弈方法，为简化计算过程，并减少结果误差，以各指标的综合权重设为变量，并以指标权重之和等于1为约束条件，构建模型如下。

$$\begin{cases} \min f = \min\sum_{i=1}^{l}\left(\left\|\omega-\mu^i\right\|\right)^2 \\ \text{s.t.}\ \ \sum_{j=1}^{m}\omega^j = 1 \\ \omega_j \geqslant 0 \quad j=1,2,\ldots,m \end{cases} \tag{31}$$

其中，$\boldsymbol{\omega}=(\omega_1,\omega_2,\ldots,\omega_{17})^{\mathrm{T}}$为组合权重，$\boldsymbol{\mu}^i=(\mu_1^i,\mu_2^i,\ldots,\mu_{17}^i)$为基本权重向量。

由于模型含有最值问题，利用拉格朗日乘数求解，并基于库恩塔克条件(KKT)处理约束，构造拉格朗日函数如下。

$$L=\sum_{i=1}^{l}\left(\left\|\boldsymbol{\omega}-\boldsymbol{\mu}^i\right\|\right)^2+\lambda\left(\sum_{j=1}^{m}\omega_j-1\right)+\sum_{j=1}^{m}\mu_j g_j(\omega_j) \tag{32}$$

其中，μ_j为KKT条件中的乘子，$g_j(\omega_j)=-\omega_j$，l为基本权重向量个数。

令L一阶导数为0，构建KKT条件矩阵。

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{E}\\ \boldsymbol{E}^{\mathrm{T}} & \lambda\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\omega\\ \lambda\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}\\ 1\end{bmatrix} \tag{33}$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} l & & \\ & l & \\ & & \ddots \\ & & & l\end{bmatrix} \tag{34}$$

$$\boldsymbol{B}=\left[\sum_{i=1}^{l}\mu_1^i+\frac{\mu_1}{2},\ \sum_{i=1}^{l}\mu_2^i+\frac{\mu_2}{2},\ \cdots,\ \sum_{i=1}^{l}\mu_m^i+\frac{\mu_m}{2}\right]^{\mathrm{T}} \tag{35}$$

求解矩阵(33)，获得综合权重向量$\boldsymbol{\omega}$。

$$\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{A}^{-1}\cdot\left(\boldsymbol{B}+\frac{1-\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{E}}\cdot\boldsymbol{E}\right) \tag{36}$$

2.3　态势评估及等级划分

2.3.1　灰色关联修正TOPSIS态势评估

构建了基于博弈组合赋权的改进TOPSIS-灰色关联决策模型，用于高速铁路综合维修态势评估。该模型结合了灰色关联分析和TOPSIS法的优势，引入决策者偏好，提高了评估的科学性和准确性。具体流程如下。

步骤1：加权决策矩阵构建。对标准化矩阵$\boldsymbol{Z}=(z_{ij})_{9\times17}$进行赋权，基于博弈组合得出各指标的权向量$\boldsymbol{W}_B=(\omega_1,\omega_2,\ldots,\omega_{17})$，设定$u_{ij}=\omega_j z_{ij}$，获得加权后的决策矩阵$\boldsymbol{U}=(u_{ij})_{9\times17}$。

步骤2：确定正理想解和负理想解。根据标准化后的数据，确定正理想解(最优解)U^+和负理想解U^-，其中对于效益型指标集合J_1取最大值，成本型指标集合J_2取最小值。

步骤3：灰色关联度计算。分别计算各待评价方案第i个时段第j个指标与正理想解U^+和负理想解U^-的灰色关联系数ξ_{ij}^+和ξ_{ij}^-。

$$\xi_{ij}^+=\frac{\min\min\left|u_j^+-u_{ij}\right|+\rho\max\max\left|u_j^+-u_{ij}\right|}{\left|u_j^+-u_{ij}\right|+\rho\max\max\left|u_j^+-u_{ij}\right|} \tag{37}$$

$$\xi_{ij}^-=\frac{\min\min\left|u_j^--u_{ij}\right|+\rho\max\max\left|u_j^--u_{ij}\right|}{\left|u_j^--u_{ij}\right|+\rho\max\max\left|u_j^--u_{ij}\right|} \tag{38}$$

其中，ρ为分辨系数，基于数据的极差计算，根据数据波动性动态调整分辨系数，在数据无明显波动时，使用默认值0.5，当数据波动较大时，减少分辨系数，反之亦然，且ρ处于[0.1，0.9]。

通过加权求和，将多个指标的关联性综合为一个值，以全面反映不同序列之间的整体关联程度，计算公式如下。

$$\gamma_i^+=\sum_{j=1}^{n}\omega_j\xi^+ \tag{39}$$

$$\gamma_i^- = \sum_{j=1}^{n} \omega_j \xi_{ij}^- \tag{40}$$

步骤4：距离计算。计算各待评价方案到正负理想解的欧式距离d^+，d^-。

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (U_{ij} - U_j^+)^2} \tag{41}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (U_{ij} - U_j^-)^2} \tag{42}$$

对γ_i^+，γ_i^-，d_i^+，d_i^-进行规范化处理，公式如下[34]。

$$\begin{cases} C_i^+ = \dfrac{\gamma_i^+}{\max \gamma_i^+} \\ C_I^- = \dfrac{\gamma_i^-}{\max \gamma_i^-} \\ D_i^+ = \dfrac{d_i^+}{\max d_i^+} \\ D_i^- = \dfrac{d_i^-}{\max d_i^-} \end{cases} \tag{43}$$

步骤5：相对贴近度计算。结合灰色关联度和欧式距离，计算相对贴近度。

$$E_i = \frac{\mu D_i^+ + (1-\mu) C_i^+}{\mu (D_i^+ + D_i^-) + (1-\mu)(C_i^+ + C_i^-)} \tag{44}$$

其中，μ是决策者偏好系数，取值范围为[0，1]，常用的值为0.5。决策者可以根据实际情况调整μ的值，以反映对灰色关联度和欧式距离的不同偏好。

2.3.2　等级划分

因现有研究在高速铁路综合维修态势等级划分方面并无统一标准，故结合基于灰色关联修正的TOPSIS评估模型得到的相对贴近度计算结果，对高铁综合维修态势评估结果进行梯度为0.2的等级划分，高速铁路综合维修态势评估等级划分表如表2所示。该分级体系可嵌入维修调度信息系统中，当新时段数据计算出的贴近度落入某一区间时，系统可自动触发相应等级的预警信号(如通过界面颜色闪烁、短信通知等方式)，辅助调度员进行分钟级的决策干预，从而实现“评估-预警-响应”的闭环管理。

3　算例分析

3.1　数据处理

以某高速铁路某段线路在某天的综合维修数据为例，维修天窗开始时段为00:00—04:30，以0.5 h为单位统计时段，将每个综合维修天窗划分为9个时段(记为Per.1—Per.9)，计算评估各时段的高速铁路综合维修态势。按照1.3节给出的指标体系及量化公式计算相关数据，得出高速铁路综合维修态势表征指标值并构建初始评估矩阵，某高速铁路综合维修态势表征指标初始值原始数据如表3所示。

表2　高速铁路综合维修态势评估等级划分表

Tab.2　Classification table of comprehensive maintenance situation assessment levels for high speed railways

贴近度	状态	态势描述
[0.0，0.2]	极差	各项指标均处于较差状态，严重影响列车正点与安全运行，需立即启动应急响应，进行大幅度调整，以尽快恢复列车安全运行
(0.2，0.4]	较差	大多数指标处于较差状态，接近各项指标的负理想解的值，维修作业处于劣化状态，需重点关注并分析原因
(0.4，0.6]	一般	各项指标总体处于中等水平，维修作业状况仅达到一般水平，需加强监视，以防止态势进一步恶化
(0.6，0.8]	良好	大部分指标达到基本标准，少数指标处于一般水平。整体维修作业保持良好状态，但仍需进行局部调度调整以进一步优化
(0.8，1.0]	优秀	各项指标均达到标准要求，接近于正理想解的各指标值，维修态势处于稳定且优良状态，维持当前计划

3.2　模型计算及结果

采用博弈组合赋权法得到各项维修指标的博弈组合权重ω。

$$\omega = \begin{pmatrix} 0.033\,080\,84，0.022\,514\,51，0.057\,722\,95，\\ \quad 0.058\,996\,88，0.060\,600\,37，0.034\,758\,44，\\ 0.088\,342\,47，0.068\,723\,75，0.078\,207\,45，\\ \quad 0.175\,104\,45，0.032\,783\,06，0.041\,112\,74，\\ 0.068\,970\,03，0.060\,497\,11，0.050\,549\,56，\\ \quad 0.038\,928\,06，0.029\,107\,34 \end{pmatrix}$$

为突出不同赋权的差异性，利用折线图展现不同方法赋权的指标权重对比如图3所示，其中WE，WG分别是通过熵权法、G1法获得的权重。

根据构建的综合维修态势评估模型对各时段下综合维修进行评估，并对不同决策者偏好系数下的各时段维修态势进行评估，不同决策偏好系数评估结果如表4所示。

通过不同决策者偏好系数下的相对贴近度指标值进行计算，并用热力图反映不同μ值下的各时段下维修态势的变化情况，其中，μ=0反映灰色关联下的贴近度结果，μ=1反映Topsis评估方法下的各时段态势数值，不同偏好系数下各时段评估结果如图4所示。此外，为进一步衡量态势较差时段下指

表3　原始数据

Tab.3　Raw data

原始数据排序									
指标	per1	per2	per3	per4	per5	per6	per7	per8	per9
维修人员资质水平	0.9	0.92	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.88
乘客满意度	0.9	0.92	0.88	0.91	0.9	0.92	0.91	0.9	0.92
维修人员负荷均衡度	0.85	0.85	0.85	0.87	0.88	0.9	0.87	0.85	0.84
维修设备完好率	0.93	0.92	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
大型机械配备量	5	5	4	5	5	4	5	4	5
设备能效比	0.86	0.87	0.85	0.86	0.86	0.88	0.87	0.86	0.86
天窗兑换率	91	92	90	91	91	93	92	91	91
天窗作业进度	0.86	0.87	0.85	0.86	0.86	0.88	0.87	0.86	0.86
天窗作业效率	0.85	0.87	0.88	0.86	0.9	0.88	0.87	0.86	0.86
列车动态正点率	95	96	95	97	95	96	95	95	96
维修周期预测偏差	5	4	5	5	5	6	5	4	5
通过能力折减率	0.05	0.06	0.07	0.8	0.1	0.09	0.09	0.1	0.12
冲突风险值	0.09	0.08	0.11	0.09	0.09	0.08	0.09	0.1	0.1
实时延误指数	0.05	0.04	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05
应急响应时间	12	10	5	5	8	8	9	10	8
恶劣天气干扰系数	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.25	0.2
维修质量波动度	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.07	0.05	0.06	0.05

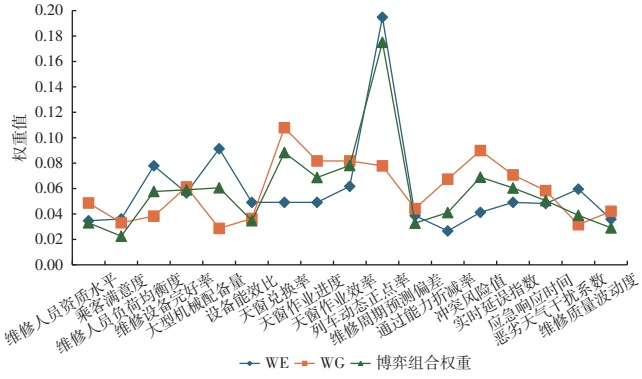

图3　指标权重对比

Fig.3　Comparison of index weights

标的影响度，依据上述评估结果，基于指标加权差异值计算时段per3，per4，per6各指标的影响度，时段3，4，6指标加权差值得分如图5所示。

3.3　结果分析

通过融合博弈论组合赋权与灰色关联TOPSIS模型，实现高速铁路综合维修的态势评估，主要结论如下。

（1）整体趋势分析：研究时段内综合维修态势相对贴近度得分集中于0.3~0.7区间(图3)，整体处于一般至良好等级。但存在阶段性显著波动，典型时段内贴近度值出现骤降(如0.685 21→0.365 962)或跃升(如0.392 523→0.585 542)，反映出劣化与优化的交替过程。

（2）多方法评估的敏感性特征：决策偏好系数μ的调整显著影响评估结果，特别是在时段3，4，6表现出强敏感性，且根据图4来看，当μ=0.6时，

表4　不同决策偏好系数评估结果

Tab.4　Assessment results under different decision preference coefficients

T|μ	per1	per2	per3	per4	per5	per6	per7	per8	per9
0	0.494 097 862	0.511 040 652	0.392 522 764	0.585 542 498	0.538 864 729	0.603 690 859	0.541 972 447	0.489 716 577	0.543 087 494
0.1	0.504 814 9	0.509 298 1	0.418 768 9	0.564 100 8	0.540 014 6	0.586 000 1	0.542 565 5	0.500 893 3	0.536 970 3
0.2	0.515 670 077	0.507 517 914	0.445 624 302	0.542 546 709	0.541 172 071	0.567 930 526	0.543 162 499	0.512 227 497	0.530 734 103
0.3	0.526 666 188	0.505 698 856	0.473 110 511	0.520 879 445	0.542 337 134	0.549 469 989	0.543 763 63	0.523 722 64	0.524 375 538
0.4	0.537 805 96	0.503 839 641	0.501 249 99	0.499 098 079	0.543 509 891	0.530 605 61	0.544 368 888	0.535 382 14	0.517 890 92
0.5	0.549 092 226	0.501 938 924	0.530 066 309	0.477 201 708	0.544 690 42	0.511 323 99	0.544 978 315	0.547 209 547	0.511 276 464
0.6	0.560 527 9	0.499 995 3	0.559 584 2	0.455 189 4	0.545 878 8	0.491 611 1	0.545 592	0.559 208 5	0.504 528 2
0.7	0.572 115 956	0.498 007 301	0.589 829 557	0.433 060 286	0.547 075 102	0.471 452 406	0.546 209 849	0.571 382 806	0.497 642 118
0.8	0.583 859 472	0.495 973 388	0.620 829 651	0.410 813 38	0.548 279 414	0.450 832 511	0.546 832 044	0.583 736 288	0.490 613 859
0.9	0.595 761 593	0.493 891 951	0.652 613 075	0.388 447 756	0.549 491 813	0.429 735 439	0.547 458 585	0.596 272 948	0.483 439 006
1	0.607 825 555	0.491 761 307	0.685 209 898	0.365 962 462	0.550 712 381	0.408 144 433	0.548 089 517	0.608 996 89	0.476 112 923

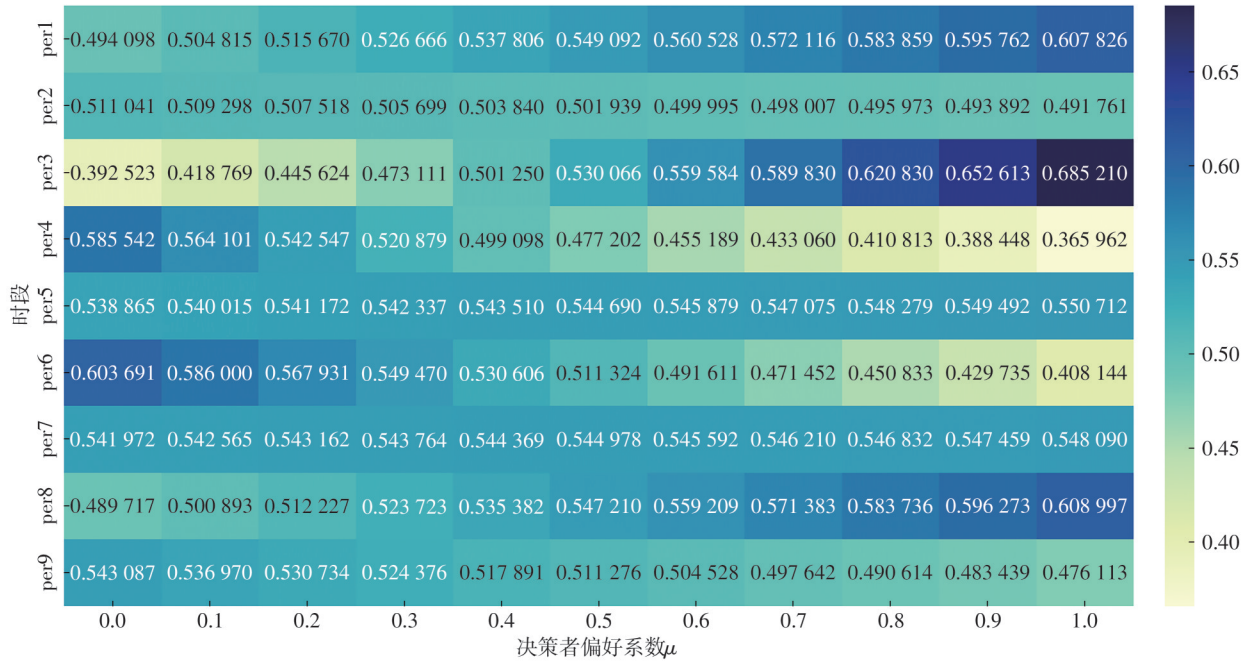

图4　不同偏好系数下各时段评估结果

Fig.4　Results for different periods under varying preference coefficients

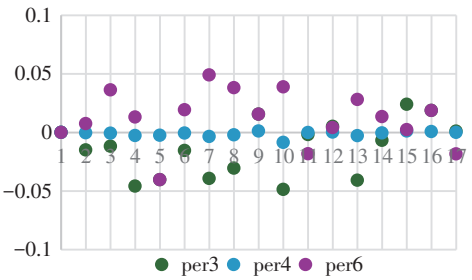

图5　时段3，4，6指标加权差值得分

Fig.5　Index's weighted scores for periods 3, 4, and 6

评估结果会发生质变，在$\mu\in[0,\ 0.6]$时，per3态势最差，per1，per8较优；在$\mu\in[0.6,\ 1]$范围内，per4态势转为最劣，而per6态势跃居最优，表明不同偏好系数下各时段的优劣有显著差异。时段3的TOPSIS评估($\mu\to1$)与灰色关联评估($\mu\to0$)结果呈现反向趋势，印证了多方法协同分析的必要性及不同决策场景决策者偏好系数选取的重要性。

（3）关键指标识别与优化路径：通过指标加权差异值分析(图5)，Per3的维修设备完好率、列车动态正点率、冲突风险值指标加权差异值较小，显示这些指标处于较差状态，应当优先检修设备与列车计划优化；Per4各指标处于平均水平，但列车动态正点率略差，需强化运输调度与维修作业的协同；Per6的大型机械配备量、维修周期预测偏差、维修质量波动指标较差，建议增配机械、优化维修周期预测模型、加强质量过程控制。综上，在实际维修过程中，应优先优化差异值小与权重大的指标，这些指标严重影响了维修态势的状态等级。

（4）模型鲁棒性：为检验模型输出对决策者偏好变化的敏感度，分析了相邻μ值下贴近度序列的Pearson相关系数(图5)。结果表明，相关系数普遍较高(0.936~0.998)，仅在μ=0.4至0.5区间出现明显下降(0.780)。这证明尽管μ值变化会导致部分时段评估结果发生跃迁(如时段3，4，6)，但评估结果整体序列在大多数情况下保持稳定，具有较强的鲁棒性。

4　结束语

从“人-机-环-管-效”5个维度构建了高速铁路综合维修态势表征指标体系，并提出了基于博弈论组合赋权与灰色关联TOPSIS的评估模型，实现了对维修作业过程的动态感知与定量评估。研究结果表明，该模型不仅能有效识别维修态势的整体水平与阶段性波动，还能敏锐识别出影响态势的关键薄弱指标，为现场维修决策提供定量化支持。为促进本研究模型与现有维修评价制度的深度融合，未来可建立“动态校验与反馈机制”，通过将模型输出的“相对贴近度”与现场既有评估指标(如天

窗利用率、设备完好率)进行持续的相关性分析与校验，不断优化模型参数与权重分配，使其更贴合运营现场管理的实际需求，从而构建起“模型优化-制度落地-效果反馈”的闭环管理。在工程应用层面，可将本模型嵌入既有的安全信息管理系统(SMIS)或调度指挥系统，开发维修态势智能看板模块，实现数据的实时可视化、态势自动分级与风险预警，最终形成“评估-预警-干预-优化”的运维闭环。此外，后续研究还可探索与数字孪生、深度学习等先进技术的融合，实现维修态势的预测性推演与自主决策优化，并致力于推动跨专业、跨铁路局集团公司的维修数据共享与协同评估机制建设。

参考文献：

[1] 杨复华，张　健. 双线电气化铁路Ⅴ型综合维修天窗在工务部门的应用[J]. 铁道建筑，1986，26(6)：8-9，2.

[2] 王培生. 石太线综合维修“天窗”的利用[J]. 铁道工程学报，1986，3(3)：144-149.

[3] 陶思宇，黄树明，屈明月. 基于周期天窗的高速铁路夕发朝至列车通过能力研究[J]. 铁道运输与经济，2014，36(1)：9-13.
TAO Siyu，HUANG Shuming，QU Mingyue. Study on Carrying Capacity of Evening-Departure & Morning-Arrival High Speed Trains Based on Periodical Maintenance Window[J]. Railway Transport and Economy，2014，36(1)：9-13.

[4] 王进勇，闫海峰，许绍兴. Ⅴ型天窗对线路通过能力的影响[J]. 西南交通大学学报，2003，38(2)：196-200.
WANG Jinyong，YAN Haifeng，XU Shaoxing. Influence of V Form Skylight on Carrying Capacity of Railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，2003，38(2)：196-200.

[5] 刘　波. 双线自动闭塞电化区段接触网维修“天窗”对区间通过能力的影响[J]. 铁道运输与经济，1990，12(3)：27-28.

[6] 徐小勇. 客运专线维修天窗与夕发朝至列车协调研究[J]. 城市轨道交通研究，2010，13(10)：77-79.
XU Xiaoyong. Coordination between Skylight Setting and Evening-Morning Train on Passenger Dedicated Lines[J]. Urban Mass Transit，2010，13(10)：77-79.

[7] 赵　鹏. 双线电气化铁路综合维修“天窗”开设相关问题研究[D]. 成都：西南交通大学，2008.

[8] 王相平，花　伟，李　博，等. 基于矩型天窗下客运专线开行夕发朝至列车的可行性研究[J]. 铁道运输与经济，2007，29(11)：16-17，48.
WANG Xiangping，HUA Wei，LI Bo，et al. Feasiblity Study on Operating Sunset-Departure and Sunrise-Arrival Passenger Trains under the Rectangular Sky-Light[J]. Railway Transport and Economy，2007，29(11)：16-17，48.

[9] 赵丽珍，赵映莲，杨岳勤，等. 高速铁路综合维修“天窗”开设形式与行车组织协调问题的研究[J]. 中国铁道科学，2002，23(2)：127-131.
ZHAO Lizhen，ZHAO Yinglian，YANG Yueqin，et al. Ways of Opening Comprehensive Maintenance “Window” and Its Coordination with Traffic Organization for High Speed Railway[J]. China Railway Science，2002，23(2)：127-131.

[10] 侯　倩，姚树金. 高铁综合维修天窗内不同行车方式的同效比较法[J]. 铁道运营技术，2013，19(1)：12-15.

[11] 聂　磊，胡必松，付慧伶，等. 客运专线夜间行车与天窗的相互影响分析[J]. 交通运输系统工程与信息，2010，10(5)：66-72.
NIE Lei，HU Bisong，FU Huiling，et al. Interaction Analysis between Night Train Operation and Maintenance Time on Passenger Dedicated Railway Line[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2010，10(5)：66-72.

[12] 朱国栋. 高速铁路综合维修作业态势的表征与评估[D]. 成都：西南交通大学，2021.

[13] 徐伟昌，张家海. 基于流程再造的高速铁路基础设施综合维修管理模式[J]. 中国铁路，2019(4)：9-14.
XU Weichang，ZHANG Jiahai. Comprehensive HSR Maintenance Management Mode Based on Process Reengineering[J]. Chinese Railways，2019(4)：9-14.

[14] 冯　兵，张静平. 关于武器系统维修性设计评估方法的研究[J]. 兵工学报，2003，24(2)：222-225.
FENG Bing，ZHANG Jingping. A Study on the Method of Evaluation in the Maintainability Design of Weapon Systems[J]. Acta Armamentarii，2003，24(2)：222-225.

[15] PARIDA A，CHATTOPADHYAY G. Development of a Multi-Criteria Hierarchical Framework for Maintenance Performance Measurement (MPM)[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering，2007，13(3)：241-258.

[16] EN：15341. Maintenance Key Performance Indicators[S]. Brussels，Belgium：European Committee for Standardization (CEN)，2007：9-14.

[17] WEBER A，THOMAS R. Key Performance Indicators：

Measuring & Managing the Maintenance Function[R]. Burlington: Ivara Corporation, 2006.

[18] ROSQVIST T, LAAKSO K, REUNANEN M. Value-Driven Maintenance Planning for a Production Plant[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(1): 97-110.

[19] 钱彦岭, 李廷鹏, 李　磊, 等. 维修系统评价指标体系及确定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(6): 1088-1095.
QIAN Yanling, LI Tingpeng, LI Lei, et al. Evaluation Index Framework of Maintenance System and Its Selection Method[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(6): 1088-1095.

[20] KIRKWOOD L, SHEHAB E, BAGULEY P, et al. Uncertainty of Net Present Value Calculations and the Impact on Applying Integrated Maintenance Approaches to the UK Rail Industry[J]. Procedia CIRP, 2015, 38: 245-249.

[21] ENDSLEY M R. Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement[J]. Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, 1988, 32(2): 97-101.

[22] 闫　旭, 彭其渊, 殷　勇, 等. 区域铁路运输安全态势表征与评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4): 33-40.
YAN Xu, PENG Qiyuan, YIN Yong, et al. Characterization and Assessment of Safety Situation for Regional Railway Transportation[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(4): 33-40.

[23] 徐兰花, 曹福才, 高宁波. 基于神经网络的高速铁路安全态势预测方法研究[J]. 交通科技与经济, 2016, 18(6): 35-38.
XU Lanhua, CAO Fucai, GAO Ningbo. On the Safety Operation State Prediction of High Speed Railway Based on Neural Network[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2016, 18(6): 35-38.

[24] 余明泽. 基于双激励动态综合评价模型的普速铁路列车运行态势评估方法[J]. 综合运输, 2023, 45(12): 109-113, 186.
YU Mingze. Evaluation Method of Train Running Situation of Conventional Railway Based on Dynamic Comprehensive Evaluation Model of Double Incentives[J]. China Transportation Review, 2023, 45(12): 109-113, 186.

[25] 周　俊. 铁路客运站客流安全态势评价[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(S2): 126-133.
ZHOU Jun. Evaluation of Passenger's Safety in Urban Rail Transit Station[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(S2): 126-133.

[26] 孙晨冉. 基于XGBoost算法的铁路货物列车分布态势推演方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

[27] 陈雅欣, 彭其渊, 刘晓薇, 等. 基于SPA-TOPSIS方法的编组站运输态势表征与评估[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(6): 15-23.
CHEN Yaxin, PENG Qiyuan, LIU Xiaowei, et al. Characterization and Assessment of Transportation Situation in Marshalling Stations Based on SPA-TOPSIS Method[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(6): 15-23.

[28] HUANG Y J, ZHANG Z P, TAO Y, et al. Quantitative Risk Assessment of Railway Intrusions with Text Mining and Fuzzy Rule-Based Bow-Tie Model[J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 54: 101726.

[29] JAFARIAN E, REZVANI M A. Application of Fuzzy Fault Tree Analysis for Evaluation of Railway Safety Risks: An Evaluation of Root Causes for Passenger Train Derailment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2012, 226(1): 14-25.

[30] LIU J T, SCHMID F, ZHENG W, et al. Understanding Railway Operational Accidents Using Network Theory[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 189: 218-231.

[31] LIU C, YANG S W. Using Text Mining to Establish Knowledge Graph from Accident/Incident Reports in Risk Assessment[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 207: 117991.

[32] LU Y, PENG Z G, MILLER A, et al. Timed Fault Tree Models of the China Yongwen Railway Accident[C]//2014 8th Asia Modelling Symposium. September 23-25, 2014. Taipei, China. IEEE, 2014: 128-133.

[33] LEITNER B. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis[J]. Procedia Engineering, 2017, 187: 150-159.

[34] 李贞涛, 李　媛, 刘守恒. 基于改进博弈论组合赋权-逼近理想解排序法的综合能源系统评价[J]. 现代电力, 2024, 41(5): 926-934.
LI Zhentao, LI Yuan, LIU Shouheng. Evaluation of Integrated Energy System Based on Improved Game Theory Combination and Weighted TOPSIS Method[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(5): 926-934.

(责任编辑　吴文娟)