

文章编号: 1005-0523(2024)06-0090-09



基于改进模糊层次分析法的高速列车轮轨 等效锥度优化方案评价研究

肖乾, 徐中旭

(华东交通大学机车车辆智能运维铁路行业重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】针对当前缺乏高速列车轮轨等效锥度优化方案综合评价体系的问题, 提出基于改进模糊层次分析法的综合评价方法。【方法】结合影响等效锥度选取的主要动力学因素, 选取了14个评价指标构建指标分解模型, 采用改进的三标度层次分析法确定权重。在动力学软件Simpack中建立3种等效锥度的模型, 计算底层指标值并进行无量纲化处理, 确定模糊评价隶属度矩阵, 并构建模糊理论系统评价模型, 得出3种方案的综合评价结果。【结果】3种等效锥度方案的得分分别为: 方案M1为26.2%, 方案M2为17.9%, 方案M3为16.2%, 方案M1为最优选择。通过对两组具有显著差异的等效锥度方案进行动力学仿真计算, 发现结果与综合评价体系的结论相一致, 验证了评价方法的可靠性。【结论】可有效评价高速列车轮轨等效锥度方案, 能够为高速列车的等效锥度方案优选提供科学依据。

关键词: 高速列车; 等效锥度; 改进的层次分析法; 模糊综合评价; 轮轨匹配

中图分类号: U271.91

文献标志码: A

本文引用格式: 肖乾, 徐中旭. 基于改进模糊层次分析法的高速列车轮轨等效锥度优化方案评价研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 90-98.

Research on Optimization Scheme Evaluation of Wheel-Rail Equivalent Conicity for High-Speed Trains Based on Improved Fuzzy Analytic Hierarchy Process

Xiao Qian, Xu Zhongxu

(Railway Industry Key Laboratory of Intelligent Operation and Maintenance of Rolling Stock,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】To address the lack of a comprehensive evaluation system for the optimization of equivalent conicity schemes for high-speed train wheel-rail interaction, a method based on an improved fuzzy analytic hierarchy process is proposed. 【Method】Fourteen evaluation indicators were selected based on key dynamic factors influencing equivalent conicity and used to construct an indicator decomposition model. The improved three-scale fuzzy analytic hierarchy process was applied to determine the indicator weights. Three equivalent conicity models were established in the dynamic simulation software Simpack, with baseline indicator values computed and dimensionless normalization performed. A fuzzy evaluation membership matrix was constructed to develop a fuzzy theoretical evaluation system, and the comprehensive scores of the three schemes were obtained.

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52372327)

【Result】The scores for the three equivalent conicity schemes are as follows: Scheme M1 scored 26.2%, outperforming Scheme M2 (17.9%) and Scheme M3 (16.2%), making M1 the optimal choice. Dynamic simulation comparisons between two significantly different schemes further validate the consistency of the evaluation system's conclusions with the simulation results, confirming the reliability of the proposed method. **【Conclusion】** The proposed method effectively evaluates equivalent conicity schemes for high-speed trains and provides a scientific basis for optimizing scheme selection.

Key words: high-speed train; equivalent conicity; improved analytic hierarchical process; fuzzy comprehensive evaluation; wheel-rail matching

Citation format: XIAO Q, XU Z X. Research on optimization scheme evaluation of wheel-rail equivalent conicity for high-speed trains based on improved fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 90–98.

【研究意义】高速列车是典型的移动装备,轮轨关系直接影响其运行品质、安全,特别是随着列车速度提高,影响更为突出。轮轨等效锥度作为描述轮轨接触特性的重要参数,通常以车轮横移量3 mm处的等效锥度定义为名义等效锥度^[1]。研究表明,等效锥度与列车运行的动态响应密切相关,系统研究其对列车动力学性能的影响具有重要意义。

【研究现状】国内外诸多学者对轮轨关系领域展开了深入研究,在分析轮轨接触关系对列车动力学性能影响方面作出了许多理论研究及实验验证。Wickens等^[2]构建了车辆动力学模型,研究了磨损踏面的等效锥度对列车蛇行运动稳定性的影响。Polach^[3]利用Hopf分岔理论研究了等效锥度对轮对蛇行运动的影响,揭示了标准等效锥度值及其曲线形态的关键作用。李艳等^[4]通过比较不同车轮踏面的动力学特性,提出了优化车轮直径及踏面设计的策略。侯茂锐等^[5]通过构架振动加速度指标研究了等效锥度限值,减少构架报警现象。针对轮轨匹配等效锥度不合理问题,董孝卿等^[6]结合仿真与实测数据,分析了不同速度下等效锥度的限值范围,并通过提升横向稳定性优化了车轮踏面设计。张海等^[7]通过分析轮轨接触点位置及宽度变化,引入非线性接触几何参数,可准确反映轮轨匹配对车辆稳定性的影响。动力学性能综合评价方面,Mao等^[8]利用CRH3动力学模型仿真,提出脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数作为横向稳定性评价指标,并确定了不同横风条件下的速度限值。Hao等^[9]对车辆动态响应进行卡尔曼滤波处理,建立包括非线性等效锥度函数的线性化仿真模型,较好地实现了轮

轨接触状态的评估。贾璐等^[10]通过5种评价体系评估车辆蛇行临界速度,并以极限环法为参考,比较了轮轨力和构架加速度等评估方法的差异。赖森华等^[11]采用层次分析法确定地铁列车舒适性指标权重,建立分析模型并提出优化方案。综上所述,现有研究多聚焦于等效锥度与高速列车动力学性能的定性或单一指标的定量分析,缺乏系统的评价框架用于等效锥度方案优选。现有评价体系依赖单一层次分析法,增加了主观性并降低了决策效率。

【创新特色】以某型高速列车为研究对象,基于一个镟修周期内实测车轮踏面数据,设置3种典型等效锥度工况,采用改进的三标度层次分析法系统化各动力学指标权重,提高评价的客观性和准确性,并结合模糊数学理论对等效锥度方案进行综合优选。

【关键问题】研究旨在解决高速列车轮轨等效锥度评价体系缺乏系统性与综合性的问题。所构建的评价模型为轮轨动力学提供了新的工具,并为高速列车的安全运行、稳定性优化和维护管理提供了重要支持,具有显著的实用价值。

1 轮轨等效锥度综合评价体系构建

1.1 评价指标分析

等效锥度是轮轨接触几何的关键参数,与列车动力学性能密切相关。综合评价应涵盖运行安全性、平稳性和舒适度。安全性评价选用脱轨系数、轮重减载率和构架横向振动加速度作为关键指标^[12]。运行平稳性通过仿真分析不同工况下车体横向加速度,依据《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)标准计算。舒适性指标

基于《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价》(ISO 2631)计算。磨损性能指标涵盖直线和曲线轨道磨损指数。横向稳定性通过临界速度及轮轴、轮轨横向力评估^[13,14]。

1.2 三标度层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)由Saaty提出^[15],是一种融合定性与定量分析的决策方法,其通过将研究对象分解为系统层级,自上而下进行评价与合成,广泛应用于各领域,提高了决策的科学性与实用性。

传统九点标度法在分配指标权重时易引入主观性,影响精确性并增加一致性测试难度。为改善这一问题,采用简化的三点标度法。简化了重要性判断,降低了一致性检验复杂度,同时提升了计算效率,更适用于多目标决策问题。

1.3 等效锥度方案选取的评价体系设计

等效锥度是衡量列车轮对与轨道接触面几何形态关系的重要指标,其取值过高或过低会导致列车出现低频晃车或高频抖车等异常振动现象,

基于长期的试验研究,欧洲铁路界定了等效锥度的测算标准和应用阈值。该标准中附录的表格列出了轮轨等效锥度的设计阈值和测试条件^[16]。按照此标准,在限值区间内进行3种等效锥度方案的设定,定量研究等效锥度对动力学性能影响的评价分析,完成精细化管理的评价体系构建,总体流程如图1所示。

评价体系分为3个分解模块,分别为仿真计算及工况设置模块、权重确定模块与模糊数学综合评价模块。通过该模型对动力学性能进行综合评价从而实现轮轨等效锥度方案优选。

2 基于改进层次分析法与模糊数学的等效锥度评价模型

2.1 等效锥度方案评价模型确立

2.1.1 建立模型

轮轨等效锥度选取方案不仅要考虑轮轨接触的静态特性,也要考虑列车运行时的动态特性(平稳性、舒适性等)。针对动力学性能最优的目的,将等效锥

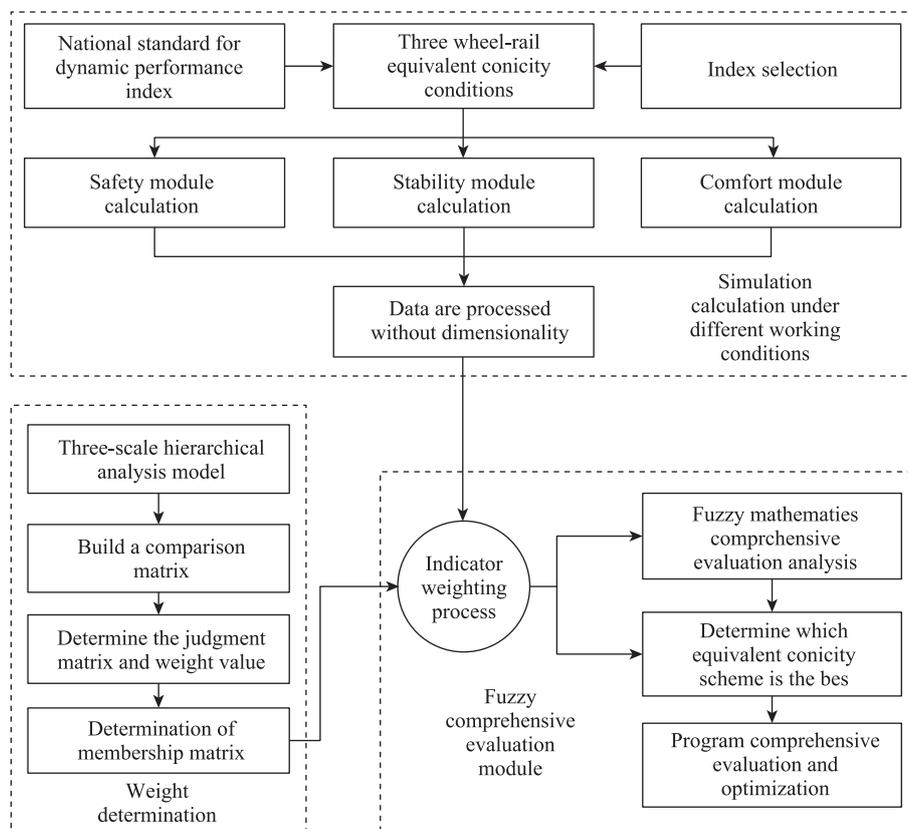


图1 综合评价体系总体流程

Fig. 1 Overall process of the comprehensive evaluation system

度选取方案影响因素分为若干个决策层指标(记作 W_i),将决策层指标集进一步分解为若干个底层指标(记作 H_j),建立层次分析法评价模型如图2所示。

2.1.2 比较矩阵的建立

通过三标度层次分析法表示动力学指标之间的重要程度

$$X=(x_{ij})_{n \times n}, \quad i, j=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{指标} H_j \text{比} H_i \text{重要} \\ 1, & \text{指标} H_i \text{与} H_j \text{同等重要} \\ 2, & \text{指标} H_i \text{比} H_j \text{重要} \end{cases} \quad (2)$$

当 $x_{ij}=1$ 时,即指标自身比较重要性相同。

2.1.3 计算重要性排序指数

利用上式确定各项指标的优先级排序值 q_i

$$q_i = \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

式(3)表示将第 i 项指标的所有影响因子得分相加,计算出综合得分 q_i ,通过找出 q_{\max} 和 q_{\min} 可以分别确定优先级最高和最低的指标。

2.1.4 构建判断矩阵

采用下式进行矩阵转化: $X=(x_{ij})_{n \times n}$ 转化为

$$Y=(y_{ij})_{n \times n},$$

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{q_i - q_j}{q_{\max} - q_{\min}}(y_m - 1) + 1, & q_i \geq q_j \\ \left[\frac{|q_i - q_j|}{q_{\max} - q_{\min}}(y_m - 1) + 1 \right] - 1, & q_i < q_j \end{cases} \quad (4)$$

式中: $y_m = q_{\max}/q_{\min}$,该式相对于九标度法,给出了 y_m 的明确公式,简化了计算过程,并确保 $q_{\max} = q_{\min}$ 的情况依然适用。

2.1.5 计算权重 ω_i

AHP通常采用求和法、对数最小二乘法、几何均值法和特征向量法来确定权重,而本研究选用了几何均值法,采用式(5)进行计算, $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

$$\omega_i = \left(\prod_{j=1}^n y_{ij} \right)^{1/n} \quad (5)$$

经过对权重进行标准化后,可以获得最终整合的权重值 $\bar{W}_i, i=1, 2, 3, \dots, n$,如式(6)所示。

$$\bar{W}_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (6)$$

$$W^T = (\bar{W}_1, \bar{W}_2, \dots, \bar{W}_i)^T \quad (7)$$

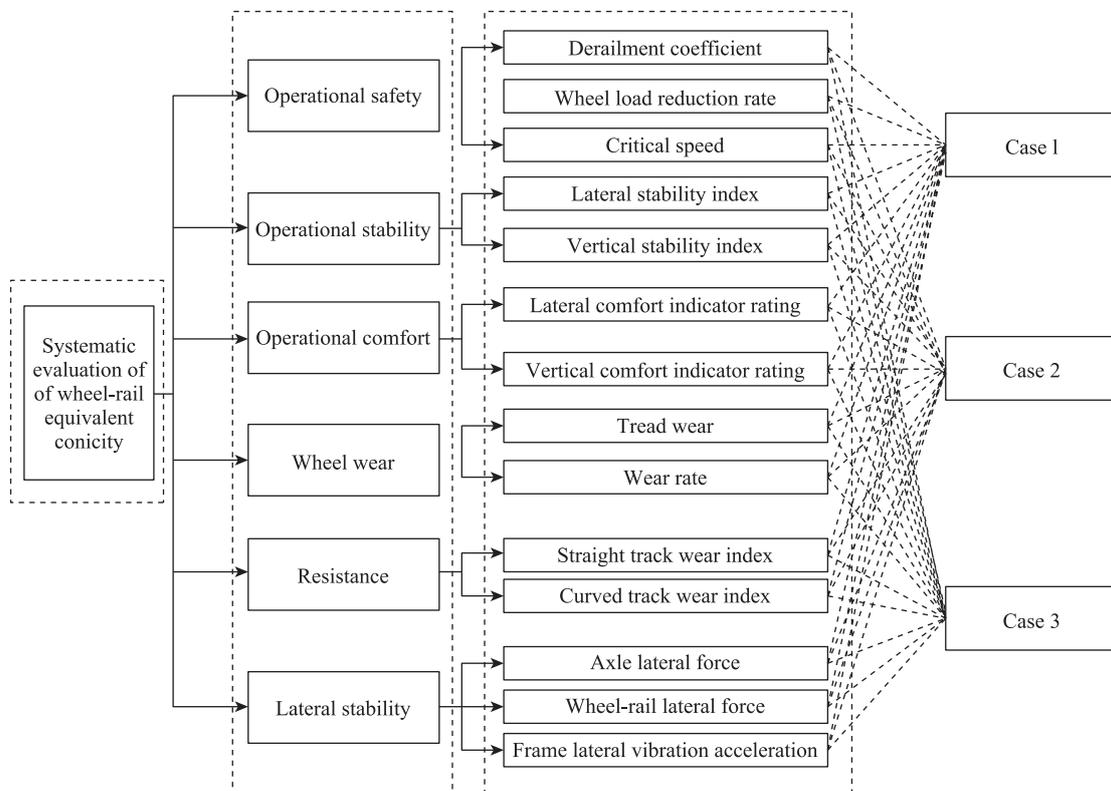


图2 层次分析法评价模型

Fig. 2 Analytic hierarchy process evaluation model

式中： W^T 为权重值向量的转置。

2.1.6 判断矩阵一致性检验

采用判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 作为评定依据,执行一致性测试以确认结果的有效性。其计算公式如下

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(XW^T)_i}{n\bar{W}_i} \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

式中： n 代表判断矩阵的维度； C_1 用于衡量各评价标准的一致性。若 $C_1 > 0.1$,需要调整判断矩阵,直到对应的权重向量单位化；检验系数 $C_R = C_1/R_1$ 。若在评估过程中 C_R 超过0.1,则判断为一致性不满足要求； R_1 表示随机一致性指数,表1对应 R_1 值。

表1 R_1 数据

Tab.1 R_1 data

n	1	2	3	4	5	6
R_1	0	0	0.58	0.96	1.12	1.24

2.2 定量决策指标标准化处理

线性函数法作为一种将定量指标转化为模糊概念的数学表达方式,指标类型不同,使用的标准化方法就不同,其中,成本型指标表示越小越重要的指标；收益性指标表示越大越重要的指标。对于成本型指标,其标准化公式表达为采用以下公式进行计算

$$z_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (10)$$

对于收益型指标,标准化公式

$$z_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})} \quad (11)$$

式中： z_{ij} 为第 i 种方案 j 指标的隶属度； a_{ij} 为第 i 种方案 j 指标的实际值。通过标准化处理,得到目标隶属度矩阵：采用线性函数法计算得到矩阵 $Z_{ij} = (z_{ij})_{m \times n}$ 。根据《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019),对平稳性指标标准化处理。

平稳性指标用 H 表示,其归一化指标为

$$\bar{H} = \begin{cases} 0.2H_1, & H_1 \leq 2.5 \\ H_1 - 2, & 2.5 < H_1 < 3 \\ 1, & H_1 \geq 3 \end{cases} \quad (12)$$

经分析,针对高速列车的动力学性质,每单位长度的磨损指标通常不超过600 N/m。假设每单位长度

的磨损指数表示为 R ,其最大值 R_{\max} 设为600 N/m。

2.3 模糊理论综合评判

2.3.1 构建等级评价矩阵

评估要素集中的第 i 个要素 u_i 对应于第 j 个等级 v_j 的隶属度表示为 z_{ij} 。因此,第 i 个评估要素的隶属度向量可表示为 $Z_i = [Z_{i1}, Z_{i2}, \dots, Z_{in}]$ 。由此, m 个评估要素在 n 个等级上的隶属度构成综合评价矩阵。

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.3.2 模糊数学综合评判

通过上述公式确立各个动力学指标权重因子 W 及由评价矩阵转换得到的隶属度矩阵,得出综合模糊评价为

$$G = ZW^T = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

由此计算得出综合评分 $G_j = \sum_{k=1}^n z_{jk} W_k$,反映方案的总体优势度。通过计算所有方案的综合评分 $G = [g_1, g_2, g_3, \dots, g_n]$ 评分最高的方案对应的等效锥度即为最优解。

3 高速列车轮轨等效锥度方案评价研究

3.1 仿真计算及工况设置

在使用Simpack动力学软件进行仿真计算时,在评估等效锥度对列车动力学性能的影响时将等效锥度设置为唯一变量。列车运行中,悬挂系统参数相对稳定,车轮的等效锥度随行驶里程增加而变化,直接影响列车与轨道的动力学交互。因此,选取某动车组拖车的LMA踏面与CHN60钢轨匹配,根据《等效锥度计算方法规范》(UIC 519)计算等效锥度曲线,同时拟合出不同里程下列车各车轴等效锥度变化规律如图3和图4所示。

依据等效锥度限值条件,选择3组工况:M1(0.126)、M2(0.152)、M3(0.16)。实验标准及条件设置为:轨道坡度1:40,轨距1 435 mm。

模型仿真工况设置为:直线工况上,建立10 000 m的路段,使高速列车以较高初始速度,设置有轨道激励的直线路段,令列车运行10 s,随后在平滑路线运行,根据30 s后轮对横移量的收敛情况确定列车

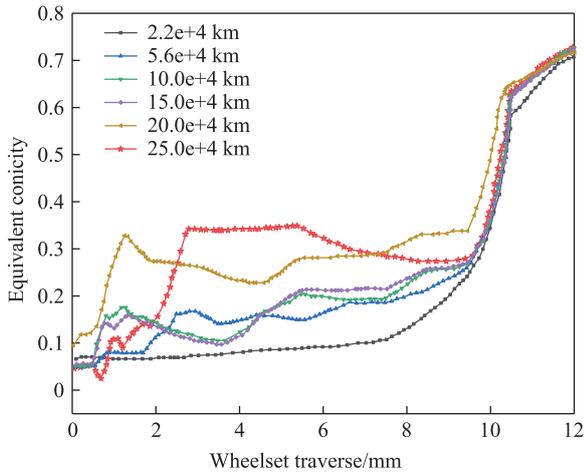


图3 不同里程下等效锥度曲线计算结果

Fig. 3 Calculation results of the equivalent conicity curve for different mileage

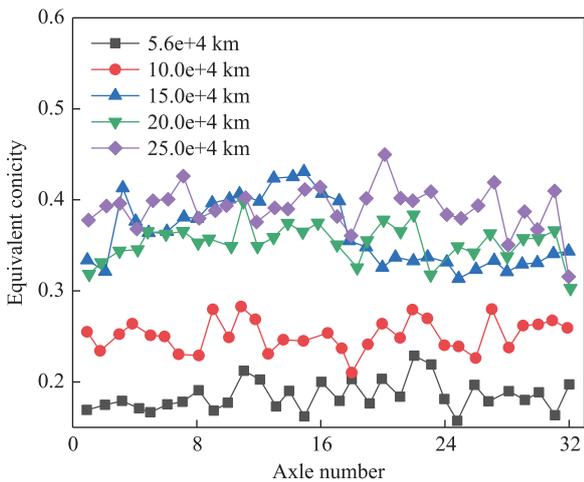


图4 等效锥度演变散点图

Fig. 4 Scatter plot of the equivalent conicity evolution

临界速度。轮轨横向力、垂向力、脱轨系数、磨损指数、构架振动加速度等动力学指标均按照列车以260 km/h运营速度通过直线路段进行仿真计算。为保证仿真结果接近实际,采用线路实测轨道激励,仿真时间设置30 s;曲线工况上,设置速度为260 km/h,半径3 500 m,超高110 mm,缓和曲线350 m,圆曲线1 000 m。综上,得到动力学指标仿真计算数据如表2所示。

3.2 最优等效锥度方案确定

3.2.1 判断矩阵及指标赋权

将上表中14个指标归为运行安全性、运行平稳性、运行舒适度、车轮磨损、耐磨性、横向稳定性6大

表2 动力学指标仿真计算数据

Tab.2 Dynamics index simulation calculation data

Index	M1	M2	M3
Derailment coefficient	0.316	0.232	0.267
Rate of wheel load reduction	0.27	0.384	0.369
Critical velocity/(km/h)	510	600	516
Lateral stability index	1.8	1.6	1.4
Vertical stability index	1.82	1.85	1.81
Lateral comfort index	1.523	2.100	2.436
Vertical comfort index	2.02	2.02	2.02
Tread wear/mm	0.3	0.7	0.5
Wear rate(N/m)	186.7	306.9	252.6
Straight track wear index	5.169	8.633	9.023
Curved track wear index	90.178	110.627	100.032
Wheel axis lateral force/kN	6.387	6.832	6.896
Wheel-rail lateral force/kN	3.16	3.296	3.183
Bogie lateral acceleration/(m/s ²)	1.513	0.858	1.360

类。依据层次分解模型和三标度层次分析法模型,构建决策层的比较矩阵,对各指标的相对重要性进行权重分配。将比较矩阵归一化处理,计算准则层和指标层的权重向量,进一步确定各等效锥度方案决策层指标权重,如表3所示。最终综合各方案在所有指标上的得分进行排序,为方案优选提供了量化的评价依据。

3.2.2 模糊隶属度矩阵

对于列车平稳性、舒适度、构架振动加速度等定量指标,采用线性函数法及个别指标的无量纲变换,并结合式(13),得出指标隶属度如表4所示。

3.2.3 模糊综合评判

得到模糊评价矩阵和权重矩阵后,应用模糊综合判断法选取最优方案。图5展示了3种不同等效锥度方案的动力学指标得分雷达图。

$$G = Z_{ij} \sum_{r=1}^{14} W^T = (0.375, 0.277, 0.100) \quad (15)$$

如式(15)所示,结合权重向量与的隶属度矩阵,导出方案集合的总体评价向量G,综合可得3种等效锥度评价方案的优越度分别为:方案M1为26.2%;方案M2为17.9%;方案M3为16.2%。则方案优劣次序为:方案M1>方案M2>方案M3,故等效锥度为M1时,列车的动力学性能处于最优。

表3 决策层指标权重计算结果

Tab.3 Calculation results of the decisionlevel index weights

Operation safety	Running stability	Running comfort	Tread wear	Resistance	Lateral stability
0.398	0.216	0.168	0.051	0.064	0.103

表4 各等效锥度方案动力学指标隶属度

Tab.4 Membership of the dynamics indicators of each equivalent conicity scheme

Index	M1	M2	M3
Derailment coefficient	0.139	0.266	0.155
Rate of wheel load reduction	0.297	0.013	0.039
Critical velocity	0.850	0.936	0.867
Lateral stability index	0.360	0.320	0.276
Vertical stability index	0.364	0.370	0.362
Lateral comfort index	0.375	0.138	0.012
Vertical comfort index	0.023	0.023	0.023
Tread wear	0.571	0.363	0.286
Wear rate	0.398	0.027	0.167
Straight track wear index	0.427	0.098	0.040
Curved track wear index	0.185	0.274	0.096
Wheel axis lateral force	0.017	0.867	0.493
Wheel-rail lateral force	0.041	0.310	0.034
Bogie lateral acceleration	0.087	0.433	0.101

3.3 评价模型验证

等效锥度的显著变化会导致列车动力学响应的明显差异。为验证模型的可靠性和对输入不确定性的敏感度,采用动力学仿真对两组等效锥度显著不同的方案(0.23和0.56)进行计算。通过比较仿真后处理结果与基于改进模糊层次分析法的评分预测是否一致,来验证模型有效性。

设计两组等效锥度显著不同的方案并将其输入车辆动力学模型进行仿真,结果如图6所示。两种方案在横/垂向平稳性、构架横向加速度、非线性临界速度、轮轨横向力、横/垂向舒适性和脱轨系数上存在显著差异,等效锥度为0.56时上述指标均显著高于0.23;其余指标差异不大。综上,高速列车在300 km/h工况下,等效锥度0.23优于0.56。

对两组方案评价指标值进行定量指标标准化处理,按照三标度层次分析法进行赋权处理,并采用模糊理论综合评判得出结果值分别为0.390和0.132,评价结果与动力学仿真直观结果一致,确保了在实际决策中提供支持的能力。

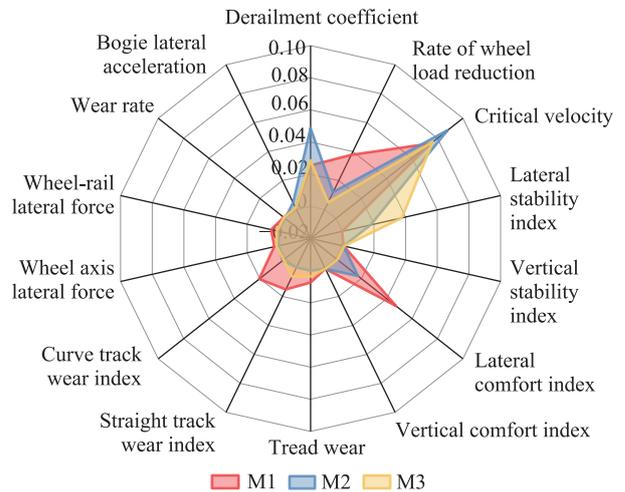


图5 动力学指标得分情况雷达图

Fig. 5 Radar diagram of the dynamic indicator scores

表5 模糊综合评价结果

Tab.5 Fuzzy comprehensive evaluation results

Index	M1	M2	M3	Weight
Derailment coefficient	0.139	0.266	0.155	0.183
Rate of wheel load reduction	0.297	0.013	0.039	0.127
Critical velocity	0.850	0.936	0.867	0.088
Lateral stability index	0.360	0.320	0.276	0.162
Vertical stability index	0.364	0.370	0.362	0.054
Lateral comfort index	0.375	0.138	0.012	0.126
Vertical comfort index	0.023	0.023	0.023	0.042
Tread wear	0.571	0.363	0.286	0.013
Wear rate	0.398	0.027	0.167	0.038
Straight track wear index	0.427	0.098	0.040	0.048
Curved track wear index	0.185	0.274	0.096	0.016
Wheel axis lateral force	0.017	0.867	0.493	0.066
Wheel-rail lateral force	0.041	0.310	0.034	0.027
Bogie lateral acceleration	0.087	0.433	0.101	0.011
Index	0.262	0.179	0.162	

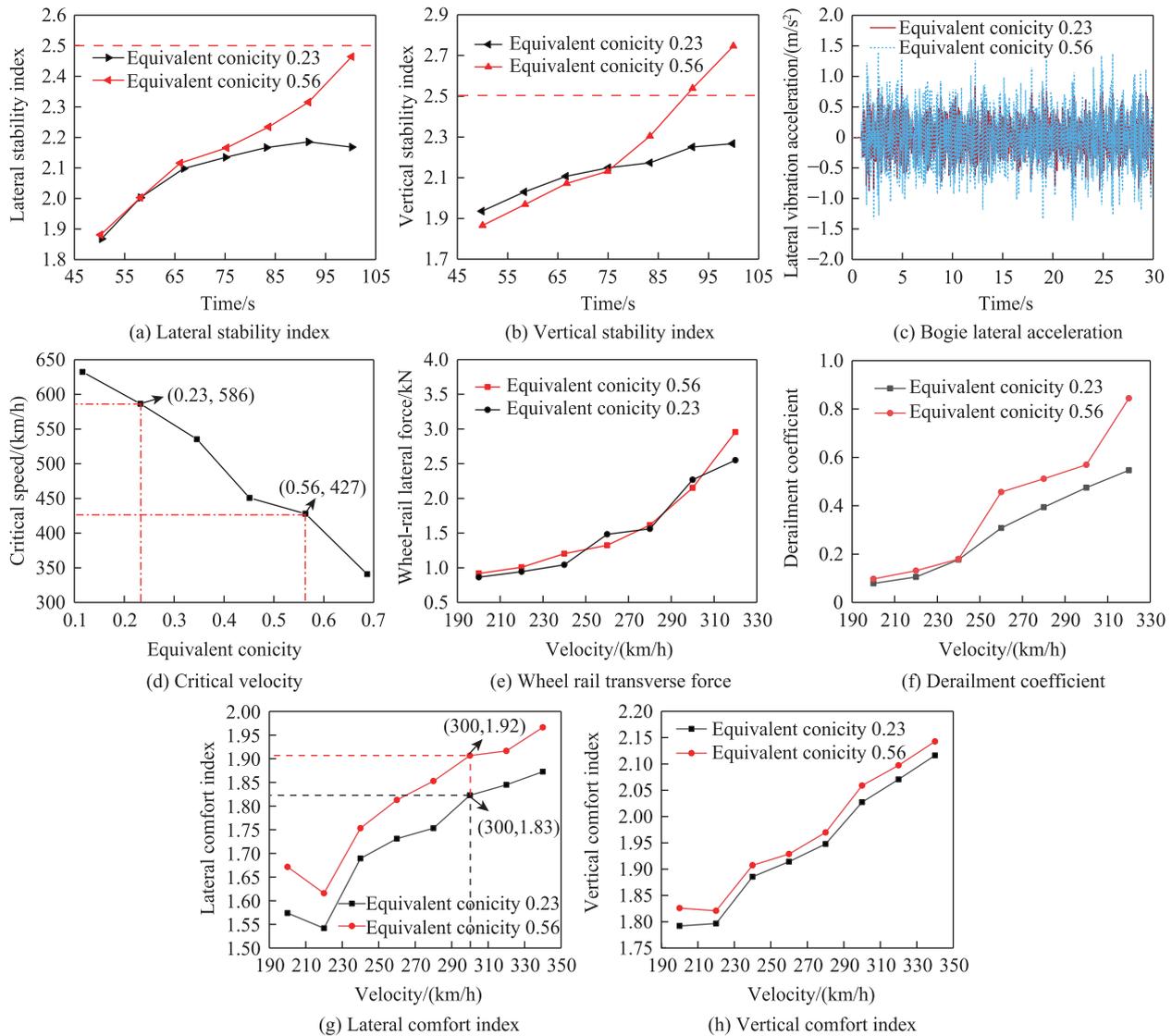


图6 不同方案下动力学指标差异

Fig. 6 Differences in dynamic indicators under different schemes

4 结论

1) 结合关键动力学指标,提出一种等效锥度方案的综合评价方法。基于改进的三标度层次分析法对各决策指标赋权,采用线性函数和特定指标归一化处理生成模糊隶属度矩阵,构建模糊综合评价模型。

2) 依据实测车轮数据设定3组等效锥度模型。仿真计算得出3种方案的对应指标值,结合上述模糊层次分析法进行综合评价,得出3种方案的综合优越度为:方案M1为26.2%,方案M2为17.9%,方案M3为16.2%。

3) 设计两组等效锥度差异显著的方案(0.23和

0.56),仿真结果表明,在300 km/h工况下,等效锥度0.23的表现优于0.56。综合评判模型的得分分别为0.390和0.132,二者相一致,表明该模型在多变输入条件下具有良好的预测准确性,具备工程应用价值。

参考文献:

[1] 干锋,戴焕云,高浩,等. 铁道车辆不同踏面等效锥度和轮轨接触关系计算[J]. 铁道学报, 2013, 35(9): 19-24.
GAN F, DAI H Y, GAO H, et al. Calculation of equivalent conicity and wheel-rail contact relationship of different railway vehicle treads [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(9): 19-24.

[2] WICKENS A H. Stephenson's 'long boiler' locomotive

- and the dawn of railway vehicle dynamics[J]. The International Journal for the History of Engineering & Technology, 2017, 87(1): 42-63.
- [3] POLACH O. Wheel profile design for target conicity and wide tread wear spreading[J]. Wear, 2011, 271(1/2): 195-202.
- [4] 李艳, 张卫华, 池茂儒, 等. 车轮踏面外形及轮径差对车辆动力学性能的影响[J]. 铁道学报, 2010, 32(1): 104-108.
LI Y, ZHANG W H, CHI M R, et al. Influence of wheel tread profile and rolling diameter difference on dynamic performance of vehicles[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 104-108.
- [5] 侯茂锐, 陈秉智, 成棣, 等. 两种典型动车组车轮磨耗演变规律及其动力学影响研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 191-201.
HOU M R, CHEN B Z, CHENG D, et al. Two typical wheel wear evolution characteristics and influence on dynamic performance of high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4): 191-201.
- [6] 董孝卿, 许自强, 史峰宝, 等. 构架报警动车组运行稳定性的线路试验研究[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(5): 1-5.
DONG X Q, XU Z Q, SHI F B, et al. The field test research for running stability of EMU in bogie alarm[J]. Railway Locomotive & Car, 2017, 37(5): 1-5.
- [7] 张海, 姜琦, 肖乾, 等. 薄轮缘车轨接触几何特性与动力学稳定性分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(2): 88-93.
ZHANG H, JIANG Q, XIAO Q, et al. Analysis of geometrical characteristics and dynamic stability of wheel-rail contact on LMB thin flange tread[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2): 88-93.
- [8] 毛军, 马小云, 郝艳红, 等. 基于流动模拟和动力学仿真的高速列车横风运行稳定性研究[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(1): 44-53.
MAO J, MA X Y, XI Y H, et al. Research on the running stability of high-speed trains under the cross wind by means of simulation [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(1): 44-53.
- [9] HAO C, WANG P, XU J, et al. Investigation of transient wheel-rail interaction and interface contact behaviour in movable-point crossing panel[J]. Vehicle System Dynamics, 2024, 62(5): 1103-1121.
- [10] 贾璐, 曾京, 池茂儒, 等. 车辆系统横向运动稳定性评判的数值仿真研究[J]. 铁道车辆, 2011, 49(9): 1-5.
JIA L, ZENG J, CHI M R, et al. The numerical simulation research on judgment of lateral motion stability of the vehicle system[J]. Rolling Stock, 2011, 49(9): 1-5.
- [11] 赖森华, 陈春俊, 闫磊, 等. 基于层次分析法的地铁列车乘客综合舒适度评价体系[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(36): 296-301.
LAI S H, CHEN C J, YAN L, et al. Comprehensive comfort evaluation system of metro passengers based on analytic hierarchy process[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(36): 296-301.
- [12] POLACH O, NICKLISCH D. Wheel-rail contact geometry parameters in regard to vehicle behaviour and their alteration with wear[J]. Wear, 2016, 366: 200-208.
- [13] YAO Y, CHEN X, LI H, et al. Suspension parameters design for robust and adaptive lateral stability of high-speed train[J]. Vehicle System Dynamics, 2023, 61(4): 943-967.
- [14] LIN H F. An application of fuzzy AHP for evaluating course website quality[J]. Computers & Education, 2010, 54(4): 877-888.
- [15] LEE S H. Using fuzzy AHP to develop intellectual capital evaluation model for assessing their performance contribution in a university[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(7): 4941-4947.
- [16] 董孝卿, 任尊松, 许自强, 等. 等效锥度曲线非线性特性及影响研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(11): 91-97.
DONG X Q, REN Z S, XU Z Q, et al. Research on non-linear characteristics and effect of equivalent conicity curve[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(11): 91-97.



第一作者: 肖乾(1977—), 男, 二级教授, 博士, 江西省“井冈学者”特聘教授, 研究方向为轨道交通车辆智能运维。E-mail: jxralph@foxmail.com。



通信作者: 徐中旭(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轮轨关系与车辆动力学。E-mail: 2723216354@qq.com。

(责任编辑: 龚凯, 吴海燕)