

# 基于改进模糊层次分析法对高速列车轮轨等效锥度优化方案的评价研究

肖乾, 徐中旭

(华东交通大学机车车辆铁路行业国家重点实验室, 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, 本研究旨在开发一种基于改进模糊层次分析法的评价方法, 以确定最适宜的等效锥度方案, 确保列车平稳运行。【方法】研究首先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, 并应用改进的三标度层次分析法来确定各指标的权重。随后, 在动力学软件 Simpack 中建立三种不同等效锥度的工况, 计算出各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, 以得出三种方案的综合评价结果。【结果】综合评价结果表明, 三种等效锥度方案的得分分别为: 方案 M1:26.2%, 方案 M2:17.9%, 方案 M3:16.2%, 由此确定方案 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, 并观察后处理模块的直观仿真结果, 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】本研究所提出的基于改进模糊层次分析法的高速列车轮轨等效锥度评价方法是有效的, 能够为高速列车的等效锥度方案优选提供科学依据, 确保列车的稳定性和安全性。

**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

## Study on the evaluation method of high speed train based on improved fuzzy hierarchy analysis

XIAO Qian, XU Zhongxu

(State Key Laboratory of Locomotive and Rolling stock Railway Industry, East China Jiaotong University,  
Nanchang 330013, China;)

**Abstract:** 【AIMS】 In view of the lack of comprehensive evaluation system for high-speed train wheel and rail optimization scheme, this study aims to develop an evaluation method based on improved fuzzy hierarchy analysis method to determine the most appropriate equivalent conicity scheme and ensure the smooth operation of the train. 【Methods】 Firstly, in the light of the main kinetic factors affecting the selection of equivalent conicity, 14 evaluation indexes were selected to construct the index decomposition model, and the improved three-scale hierarchy analysis method was applied to determine the weight of each index. Subsequently, three different working conditions with equivalent conicity were established in the dynamics software Simpack, and the underlying index values were calculated and dimensionless to determine the fuzzy evaluation membership matrix, and the fuzzy theory system evaluation model was constructed to obtain the comprehensive evaluation results of the three schemes. 【Results】 The comprehensive evaluation results show that the scores of the three equivalent conicity schemes are: M1:26.2%, M2:17.9%, and M3:16.2%, from which M1 was determined as the optimal choice. By calculating the kinetic simulation of the two groups and observing the intuitive simulation results of the post-processing module, the results are consistent with the conclusion of the comprehensive evaluation system, and then the reliability of the evaluation method is verified. 【Conclusion】 The method of equivalent conicity evaluation of high-speed train wheel and rail based on improved fuzzy

**收稿日期:** 2024-3-16

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (5237120886)

hierarchy analysis proposed in this study is effective, which can provide scientific basis for the optimization of equivalent conicity scheme of high-speed trains and ensure the stability and safety of trains.

**Key words:**high-speed train;equivalent conicity;improved hierarchical analysis;fuzzy comprehensive evaluation; wheel-rail matchin

【研究意义】随着高速铁路不断发展,我国高速列车在速度逐渐提高过程中出现了诸多动力学性能的问题,对旅客乘坐体验造成影响,因此在列车服役期间保证良好的运行性能尤为重要。轮轨等效锥度作为量化轮轨接触特性、描述其接触状况的关键参数,研究学者一般采用车轮横移量 3 mm 处的等效锥度定义为名义等效锥度<sup>[1]</sup>。在轮轨关系领域,等效锥度被认为与列车运行中的动态响应密切相关,是评价列车动力学性能的关键影响参数。因此开展等效锥度对列车动力学性能影响的系统评价方法研究尤为必要。

【研究现状】近年来,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及稳定性的影响方面作出了许多理论研究及实验验证。Wickens 等<sup>[2]</sup>通过构建车辆系统的动力学模型来探讨磨损踏面对列车稳定性的作用。研究强调了磨损后踏面的锥形度对列车蛇行运动稳定性的显著影响。Polach<sup>[3]</sup>应用 Hopf 分岔理论,探索了等效锥度如何影响轮对的蛇行运动分岔现象。研究揭示了标准等效锥度值及其曲线形态对轮对蛇行运动有着关键作用。张晖等<sup>[4]</sup>通过对比不同车轮踏面动力学特性,探讨了轮径变化对高速列车动力学响应的作用,提出一种优化列车车轮直径及踏面设计的策略。侯茂锐等<sup>[5]</sup>通过构架振动加速度指标入手,设定若干种踏面工况用来进行等效锥度限值研究,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<sup>[6]</sup>通过仿真与现场实测的方式,从服役动车组构架报警、晃车等工况入手,进一步详细分析了列车服役过程中,在不同速度区间下等效锥度最大值及最小限值,并以等效锥度、横向稳定性等指标优化了车轮踏面,提高了列车服役质量。张海等<sup>[6]</sup>通过分析轮轨接触点位置和接触宽度的变化,引入了非

线性接触几何关系参数  $\lambda_{TC}$ , 结合接触区的仿真计算,发现该参数能较为准确的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<sup>[7]</sup>通过 CRH3 动力学模型进行仿真计算,得到高速列车横向稳定性质量的评价指标:脱轨系数、轮重减载率、倾覆系数,依据列车安全性标准,得到了不同状态横风下的安全速度限值。梁志华等<sup>[8]</sup>吸收了先前在车辆动力学评估指标方面的研究成就,构建了一套针对跨座式单轨车辆的动力学评估指标体系。借助于重庆跨座式单轨的结构数据,建立起车辆动力学模型,并对重庆的跨座式单轨车辆进行了动力学性能的仿真分析。贾璐等<sup>[9]</sup>基于 UIC518 标准,采用 5 种评价体系评判车辆蛇行时临界速度,采用了极限环法的结果作为参考,对比了利用轮轨力和构架加速度等不同评估方法得出的临界速度的差异,并分析了多种车辆在蛇行运动稳定性方面的状态。赖森华等<sup>[10]</sup>采用 AHP 层次分析法确定影响地铁列车综合舒适度的指标权重,建立了分析模型并提出地铁列车的舒适性优化方案。综上所述,目前多数研究集中于探索等效锥度与高速列车动力学性能之间的定性关系或单一指标的定量关系,缺乏系统的评价框架来实现等效锥度方案优选的决策。在评估高速列车的服役状态时,现有的评价体系大多依赖于单层次分析法,增加了评价过程的主观性,也导致决策效率低。

【创新特色】故本文以 CRH2 型高速列车为研究对象,利用某动车组镟修周期内实测车轮踏面数据设置三种常见等效锥度工况,引入改进的三标度层次分析法,系统量化各动力学指标的权重,提高了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优选进行综合评价。【关键问题】研究旨在解决高速列车轮轨等效锥度评价体

系缺乏系统性和综合性的关键问题。该评价模型为轮轨动力学领域提供了一种新的评价工具，也为高速列车的安全、稳定运行和维护管理提供了重要支持，具有一定的实用意义。

## 1 轮轨等效锥度评价指标体系构建

为了科学评估不同等效锥度方案的有效性，在构建评价体系时，应遵循以下原则：1) 完整性原则，评价体系应当综合性地覆盖所有可能影响等效锥度性能的因素；2) 合理性原则，评价指标必须建立在理论和实践基础上，确保每个指标都能准确地衡量不同等效锥度工况下的动力学表现；3) 简洁性原则。在确保评价体系完整性的前提下，指标的选取应尽可能简化，避免冗余，使评价结果清晰且针对性强。4) 独立性原则。评价指标之间应当互相独立，避免因指标间的相互影响而使评价结果产生偏差，从而能准确反映每一项技术规格的实际影响。

### 1.1 评价指标分析

轮轨等效锥度是轮轨接触几何中的关键定量参数，与列车动力学性能有着密切联系，因此在进行等效锥度方案综合评价时，应综合考虑动力学性能参数，从运行安全性、运行平稳性（横向平稳性）、运行舒适度（横/垂向）等关键参数进行考虑。中间指标中，车辆动力学参数主要包括安全性、平稳性、舒适度以及轮轨耐磨性指标。在评估安全性的指标体系中，初步选定了脱轨系数、轮轨减载率和构架横向振动加速度作为关键参数，这三个指标在<sup>[11]</sup>中有详尽的定义和要求；依据美国联邦铁路管理局制定标准<sup>[12]</sup>：构架的横向振动加速度在0.5到10赫兹范围内分析，通过2秒的时间窗口进行平滑处理后，取其均方根值。如果这个均方根值超出了重力加速度的30%，则认为列车的运行状态不稳定；运行平稳性指标（Sperling 指标）通过仿真分析不同等效锥度工况下，以不同速度运行的车体横向加速度数值，来获得横/垂向平稳性指标，按照 GB/T5599-1985 标准进行计算<sup>[13]</sup>。舒适性指标依据 ISO2631 得出横/垂向舒适度具体数值<sup>[14]</sup>，并基于改指标

评判等效锥度过低时的晃车现象与过高时的抖车现象；磨损性能的评估指标涵盖了直线轨道磨损率和弯道轨道磨损率，区别对待这两种磨损率的目的在于防止直线轨道上的过度磨损导致车轮内凹，进而对列车的运行稳定性产生负面影响。横向稳定性主要是针对车辆蛇行失稳所提出，选取了临界速度和轮轴横向力、轮轨横向力作为衡量标准，其中临界速度是衡量车辆横向稳定性的关键指标，轮轴横向力和轮轨横向力是影响列车横向稳定性的关键因素。这种力在轨道上的传递和分布决定了列车的横向动力学行为。如果轮轴横向力过大，可能导致轮轨横向力超出安全阈值，增加脱轨风险，降低列车的横向稳定性。因此，控制轮轴横向力和轮轨横向力在安全范围内是确保列车横向稳定的关键。

### 1.2 三标度层次分析法

层次分析法<sup>[15,16]</sup>由运筹学专家 Saaty 于 20 世纪末期提出，是一种易于操作且灵活的决策制定方法，适用于难以用完全定量手段分析的问题。其主要作用为通过融合定性与定量分析的优势，将研究对象视为单一系统，自上而下分解、评价、合成的方法论来进行决策，广泛应用于多种领域，提高了决策过程的实际效用。

依据上述等效锥度方案综合评价体系的指标选择结果建立层次分析指标分解模型如图所示。在决策过程中分配各评价指标的权重时，使用九点标度法的层次分析可能会引入过多的主观性，影响标度的精确性，并可能导致一致性测试不达标。为了改善这一情况，采用了简化的三点标度的层次分析：若一个指标 X1 比另一个指标 X2 更为重要，则赋值为“2”；如果两个指标同等重要，则赋值为“1”；若 X1 不如 X2 重要，则赋值为“0”。这种三标度法的方法简化了重要性评价的判断过程，缩减了一致性检验的复杂度，并减少了因素间的不确定性。此外，这种方法在保证计算精度的同时降低了迭代次数并加快了收敛速度，使得在解决多目标决策问题时，更为直接和高效。

### 1.3 等效锥度方案选取的系统评价体系设计

轮轨间等效锥度是衡量动车轮对与轨道接触面几何形态关系的关键指标，是高速列车运行性能监测的核心参数。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，欧洲铁路界定出等效锥度的测算标准和应用阈值<sup>[17]</sup>。TSI 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<sup>[18]</sup>。因此本研究按照此标准排除等效锥度过高或过低的工况，在等效锥度限值区间内进行三种等效锥度方案工况的设置，定量化研究等效锥度对动力学性能影响的评价分析，完成等效锥度的精细化管理的评价体系构建，总体流程如下。

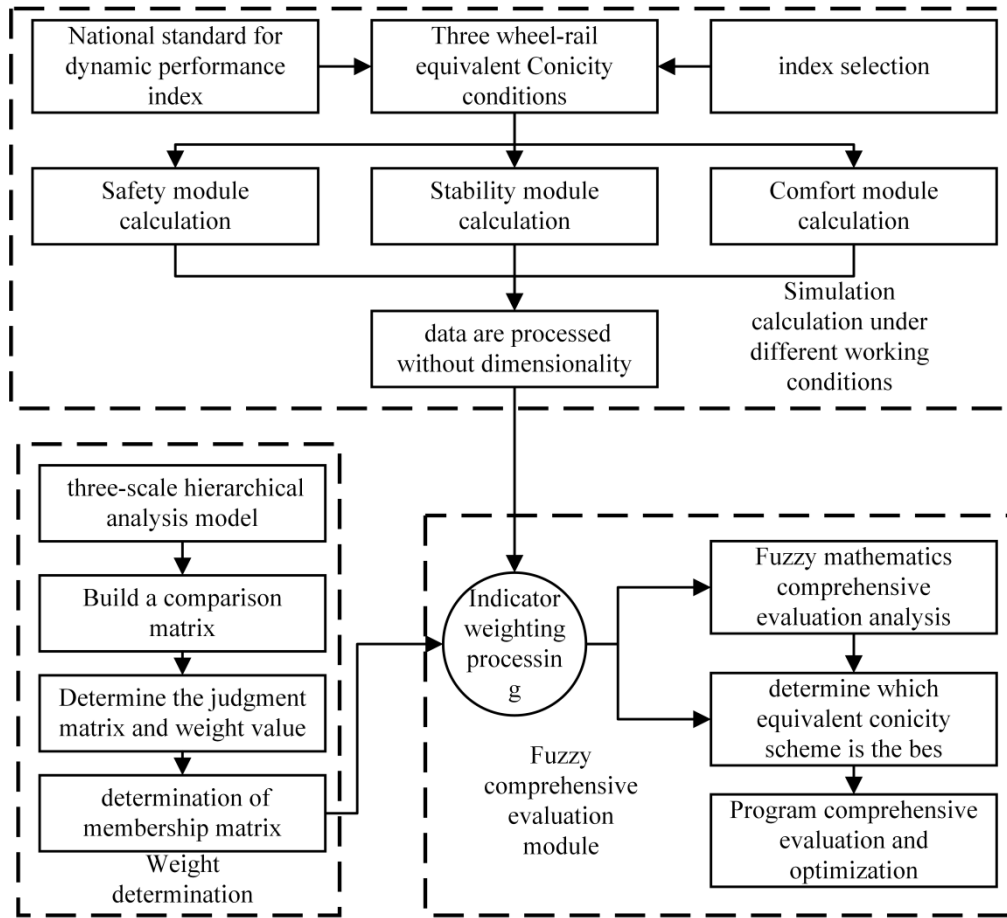


图 1 综合评价体系总体评价模型

Figure 1. Overall evaluation model of the comprehensive evaluation system

总体评价体系分为三个分解模块，分别为仿真计算及工况设置模块、三标度层次分析权重确定模块与模糊数学综合评价模块。通过该系统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

结合改进的三标度层次分析法模型和

模糊数学理论对等效锥度方案进行选择，采用三标度层次分析法为指标赋权，采用线性变换法和个别指标的无量纲变换处理对决策指标进行标准化处理，随后应用模糊数学的原理来综合评价各个方案，以识别出最佳方案选择策略。这一过程的关键步骤涵盖：1) 构建层次结构模型；2) 形成比较矩阵；3) 确定评价矩阵和相应的权重；4) 对决策指标进行标准化并建立隶属函数矩阵；5)

对所有等效锥度方案进行综合评价并进行最优选择。

## 2.1 等效锥度方案评价模型确立

### 2.1.1 建立模型

进行轮轨等效锥度方案选取时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，将等效锥度选取

方案影响因素分为  $h$  个指标  $W_i, i=1, 2, 3, \dots, h$ ，得到决策层指标集合，进一步分解为  $j$  个底层指标集。

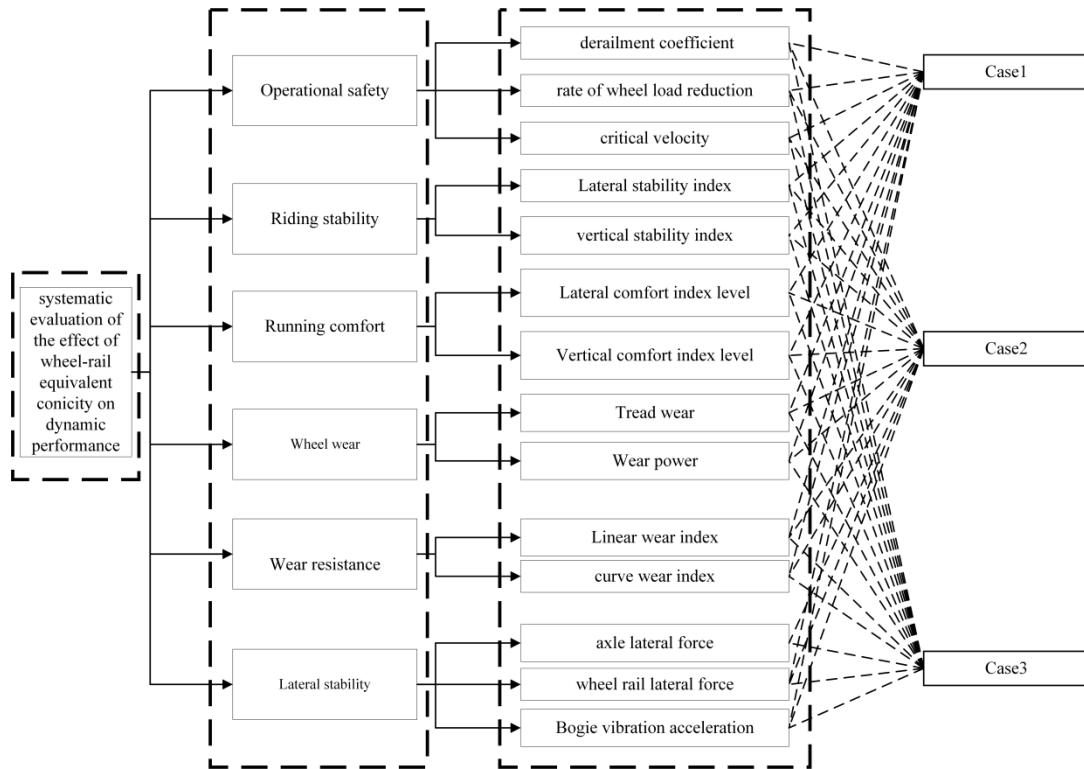


图 2 层次分析法评价模型

Figure 2 Evaluation archarchby hierarchical analysis

### 2.1.2 比较矩阵的建立

通过三标度层次分析法并采用 0、1、2 表示动力学指标之间的重要程度：

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

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

其中，当  $x_{ij}=1$  时，表示两指标具有同等重要程度。

### 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  $q_i$

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

$q_i$  计算标度矩阵第  $i$  行各指标总和以确定其累计重要性，其中，取  $q_{max} = \max\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ ； $q_{min} = \min\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。

### 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  $Y = (y_{ij})_{n \times n}$ ：

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

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 $\omega_i$

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(4)进行计算,  $i=1,2,3,\dots,n$ 。

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

经过公式(5)对权重进行标准化后, 可以获得最终整合的权重值  $\bar{W}_i$ ,  $i=1,2,3,\dots,n$ 。

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

### 2.1.6 判断矩阵一致性检验

为了确保从判断矩阵中得出的解可以有效地作为评估标准, 采用判断矩阵的最大特征值作为评定依据, 并执行一致性测试以确认结果的有效性。设  $\lambda$  代表重要性判断矩阵 A 的特征值, 并计算其特征向量:

$$C_I = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (7)$$

$$C_R = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

在公式中,  $n$  代表判断矩阵的维度; 一致性指标  $CI$  的作用是衡量各评价标准之间的一致性程度。如果  $CI$  值超过 0.1, 意味着一致性检测未通过, 需要调整判断矩阵, 直到对应的权重向量单位化; 而随机一致性比率, 如果在评估过程中  $CR$  超过 0.1, 则判断为一致性不满足要求, 必须对判断矩阵进行

修改;  $RI$  表示各标准间的平均随机一致性指数, 下表显示对应  $RI$  值。

表 1  $RI$  数据

Table 1 RI data						
n	1	2	3	4	5	6
RI	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, 采用以下公式进行计算:

$$Z_{ij} = a_{ij}/a_{j\max} \quad (9)$$

$$Z_{ij} = 1 - a_{ij}/a_{j\max} \quad (10)$$

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。

$$\begin{cases} a_{j\max} = \max \{a_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\} \\ a_{j\min} = \min \{a_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\} \end{cases} \quad (11)$$

定量指标可以分为两大类: 收益性指标和消耗性指标。对于收益性指标, 这类指标通常表示列车性能的正面效益或优势, 这些指标反映了列车性能提升的方面。对于消耗性指标, 反映的是列车性能中需要控制或减少的方面, 如脱轨系数, 轮重减载率, 适用上式。对其进行标准化, 得到目标隶属度矩阵: 采用线性函数法计算, 得到标准化后比较矩阵  $Z_{ij} = (z_{ij})_{m \times n}$ 。

依据国家标准 GB/T5599 与 ISO2631 的舒适度与平稳性要求较为特殊, 即这两种指标既属于收益性指标, 但是在标准中二者的取值是越小越好, 故单独对其进行标准化处理: 设舒适性指标用  $K$  表示则舒适性的归一化指标为:

$$\bar{K} = \begin{cases} 0.793K & K < 0.315 \\ K - 0.065 & 0.315 < K < 0.565 \\ 0.747K + 0.078 & 0.565 < K < 0.9 \\ 0.48K + 0.321 & 0.9 < K < 1.425 \\ 1 & 1.425 < K \end{cases} \quad (12)$$

平稳性指标用  $H$  表示, 横向平稳性指标  $H_1$  的归一化指标为:

$$\bar{H} = \begin{cases} 0.2H_1 & H_1 < 2.5 \\ H_1 - 2 & 2.5 < H_1 < 3 \\ 1 & H_1 > 3 \end{cases} \quad (13)$$

垂向平稳性指标  $H_v$  的归一化指标为:

$$\bar{H}_v = \begin{cases} 0.2H_v & H_v < 2.5 \\ H_v - 2 & 2.5 < H_v < 3 \\ 1 & H_v > 3 \end{cases} \quad (14)$$

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会超过  $600N \cdot m^{-1}$ 。假设每单位长度的磨损指数表示为  $R_M$ , 归一化后的指标为  $R_M/R_{MAX}$ 。

### 2.3 模糊理论综合评判

#### 2.3.1 构建等级评价矩阵

在定义隶属函数之后, 可以确立各评估要素对应不同等级的隶属度值。具体来说, 评估要素集中的第  $i$  个要素  $u_i$  对应于评价等级集中的第  $j$  个等级  $v_j$  的隶属度表示为  $z_{ij}$ 。因此, 要素对所有评价等级的隶属度向量可以表述为  $Z_{ui} = [Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, Z_{i4}]$ 。由此, 选取的  $m$  个评估要素对  $n$  个评价等级的隶属度构成了一个综合的评价等级矩阵  $Z$ 。

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (15)$$

#### 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:

$$G = ZW^T = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = (g_1, g_2, \dots, g_m) \quad (16)$$

式中,  $G_j = \sum_{k=1}^n z_{jk} W_k$ , 反映方案  $A_j$  的

整体满意程度或总体优势度。在方案  $A_j$  评选中,  $G=(g_1, g_2, g_3, \dots, g_n)$  中最优值  $g_{\text{optim}}$  对应的等效锥度方案即为最优解。

## 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

采用 Simpack 动力学软件进行仿真计算, 为保证研究结果的可靠性, 在选取等效锥度方案评估列车动力学性能的影响, 应在仿真时控制实验过程及模拟研究的其它变量和条件, 使等效锥度成为研究中唯一变量。在列车运营期间, 悬挂系统参数保持相对稳定, 车轮的等效锥度因累积行驶里程而发生变化, 直接影响列车与轨道间的动力学交互, 故在设置等效锥度工况时, 选取某动车组 7 号拖车整个镟修里程内的实测 LMA 车轮踏面与 CHN60 钢轨进行匹配, 利用 UIC519 算法计算出各自等效锥度曲线, 基于 TSI 中轮轨等效锥度限值试验条件, 选取三组等效锥度工况分别为: M1(0.126)、M2(0.152)、M3(0.16), 计算标准及工况设置如下 (轨道坡度 1: 40, 轨距 1435mm): 直线工况上, 建立 10000 米的路段, 使高速列车以较高初始速度, 设置适用于高速工况的德国低干扰轨道谱的直线路段, 令列车运行 10s, 随后在平滑路线运行, 根据 30s 后轮对横移量的收敛情况确定列车临界速度。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 260km/h 运营速度通过直线路段进行仿真计算。

曲线工况上, 设置速度为 260km/h, 半径 3500m, 超高 110mm, 缓和曲线 350m, 圆曲线 1000m。综上, 得到等效锥度选取方案的决策层指标。

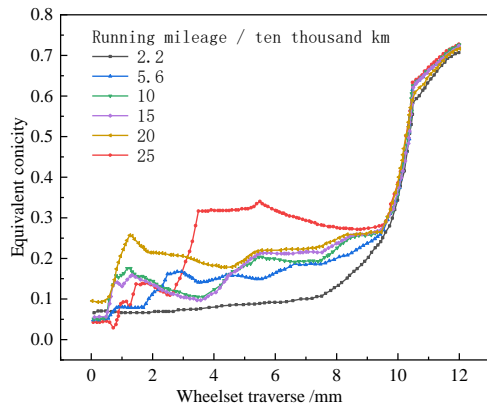


图 3 不同里程下等效锥度曲线计算结果

Figure 3 Calculation results of the equivalent conicity curve for different mileage

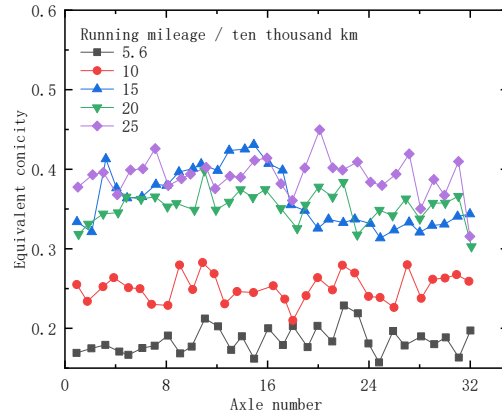


图 4 等效锥度演变散点图

Figure 4 Scatter plot of the equivalent conicity evolution

表 1 高速列车服役状态评价体系及数据

Table 1. Evaluation system and data of the service status of high-speed trains

index	Case		
	M1	M2	M3
Derailment coefficient	0.316	0.232	0.267
rate of wheel load reduction	0.27	0.384	0.369
critical velocity	510	600	520
Horizontal stability index	1.8	1.6	1.38
Vertical stability index	1.82	1.85	1.81
Lateral comfort index grade	1.523	2.1	2.436
Vertical comfort index grade	2.02	2.02	2.02
tread wear	0.3	0.7	0.5
Grinding power consumption	180	300	250
Straight line grinding index	5.169	8.633	9.023
Curve grinding index	90.178	110.627	100.032
Wheel axis transverse force	6.387	6.832	6.896
Wheel rail transverse force	3.16	3.296	3.183
Lateral vibration acceleration of the Bogie	1.513	0.858	1.36

### 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、车轮磨耗、耐磨

性、横向稳定性六大类, 分别用 C1、C2、C3、C4、C5、C6 表示。依据层次结构中的权重指标, 利用三标度层次分析模型构建了决策层间的比较矩阵。同样, 对于指标层也形成了比较矩阵 C1、C2、C3、C4、C5、C6 (见表 2)。其中



$$\begin{aligned}
 C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 C_4 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 3 \end{bmatrix} C_5 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} C_6 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 5 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{17}$$

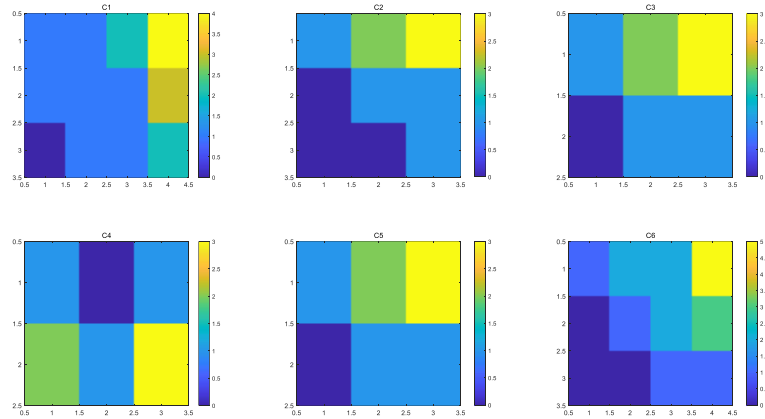


图 5 指标层判断矩阵

Figure 5. Index layer judgment matrix

为增加决策过程中的有效性和效率，并捕捉到哪些因素赋予了更高权重，得到判断矩阵 C1 和 C6 有更广泛的颜色范围，在这些准则或指标中相对重要性的差异较大。矩阵的可视化图像如上所示，从中观察到矩

表 2 中间层 C 比较矩阵

Table 2 The comparison matrix of the middle layer C

evaluation system	operation safety	Running stability	Running comfort	tread wear	resistance	lateral stability	r
operation safety	1	2	2	2	2	2	11
Running stability	0	1	1	2	2	2	8
Running comfort	0	1	1	2	2	1	7
tread wear	0	0	0	1	1	0	2
resistance	0	0	0	1	1	1	3
lateral stability	0	0	1	2	1	1	5

基于所提供的比较矩阵和上公式，可以计算出中级层和指标层的评价矩阵；通过对这些评价矩阵进行处理以确定其权重向量，首先

确定准则层和指标层的权重向量，继而基于这些数据计算出不同等效锥度方案在各评价指标上的标准化权重值（参见表 3）

表 3 决策指标权重计算结果

Table 3. Calculation results of decision index weights

Index layer	Intermediate index						Global weight
	operation	Running	Running	tread	resistance	lateral	
	safety	stability	comfort	wear		stability	
	0.398	0.216	0.168	0.051	0.064	0.103	
Derailment coefficient	0.460						0.183
rate of wheel load reduction	0.319						0.127
critical velocity	0.221						0.088
Horizontal stability index		0.750					0.162
Vertical stability index		0.250					0.054
Lateral comfort index grade			0.750				0.126
Vertical comfort index grade			0.250				0.042
tread wear				0.250			0.013
Grinding power consumption				0.750			0.038
Straight line grinding index					0.750		0.048
Curve grinding index					0.250		0.016
Wheel axis transverse force						0.637	0.066
Wheel rail transverse force						0.258	0.027
Lateral vibration acceleration of the Bogie						0.105	0.011

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，采用上述线性函数法及个

别指标（平稳性、舒适度）的无量纲变换，计算得出下表：

表 4 各等效锥度方案动力学指标隶属度

Table 4 Membership of the dynamics indicators of each equivalent conicity scheme

Index	degree of membership		
	M1	M2	M3
Derailment coefficient	0.139	0.266	0.155
rate of wheel load reduction	0.297	0.000	0.039

critical velocity	0.850	1.000	0.867
Horizontal stability index	0.000	0.111	0.233
Vertical stability index	0.016	0.000	0.022
Lateral comfort index grade	0.375	0.138	0.000
Vertical comfort index grade	0.023	0.023	0.023
tread wear	0.571	0.000	0.286
Grinding power consumption	0.400	0.000	0.167
Straight line grinding index	0.427	0.043	0.000
Curve grinding index	0.185	0.000	0.096
Wheel axis transverse force	0.074	0.009	0.000
Wheel rail transverse force	0.041	0.000	0.034
Lateral vibration acceleration of the Bogie	0.087	0.433	0.101

### 3.2.3 模糊综合评判

在得到模糊评价矩阵和相应权重矩阵之后，应用模糊综合判断法来挖掘方案的最优选择。综合评价结果及雷达图针对三个不同的等效锥度方案展示在表 5 及图 6。利用权重向量和评价指标的隶属度矩阵，可以导出方案集合的总体评价向量：

$$G = Z_{ij} \sum_{i=1}^{14} W^T = (0.375, 0.277, 0.100) \quad (18)$$

综合可得三种等效锥度评价方案的优越度分别为：方案 M1:26.2%；方案 M2:17.9%；方案 M3:16.2%；则方案优劣次序为：方案 M1>方案 M2>方案 M3，故选用方案 M1 时，列车的动力学性能处于最优状态。

表5 模糊综合评价结果表

Table 5. Fuzzy comprehensive evaluation results table

Index	M1	M2	M3	weightW
Derailment coefficient	0.139	0.266	0.155	0.183
rate of wheel load reduction	0.297	0.000	0.039	0.127
critical velocity	0.850	1.000	0.867	0.088
Lateral stability index	0.000	0.111	0.233	0.162
Vertical stability index	0.016	0.000	0.022	0.054
Lateral comfort index grade	0.375	0.138	0.000	0.126
Vertical comfort index grade	0.023	0.023	0.023	0.042
tread wear	0.571	0.000	0.286	0.013
Grinding power consumption	0.400	0.000	0.167	0.038
Straight line grinding index	0.427	0.043	0.000	0.048
Curve grinding index	0.185	0.000	0.096	0.016
Wheel axis transverse force	0.074	0.009	0.000	0.066
Wheel rail transverse force	0.041	0.000	0.034	0.027
Lateral vibration acceleration of the Bogie	0.087	0.433	0.101	0.011
Index	0.262	0.179	0.162	

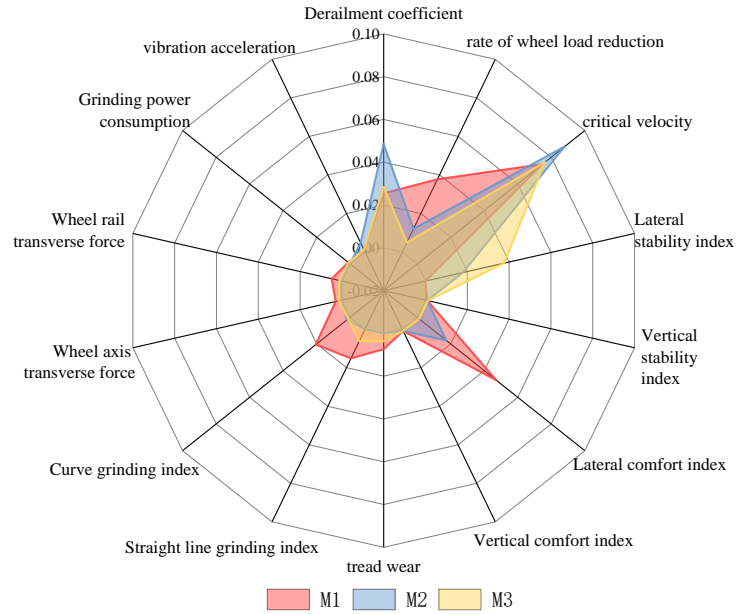


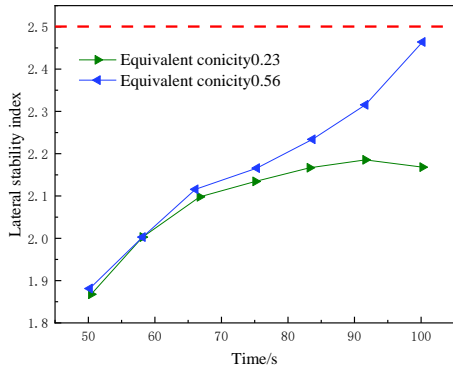
图 6 不同动力学指标相对得分情况雷达图

Figure 6 Radar diagram of the relative scores of different kinetic indicators

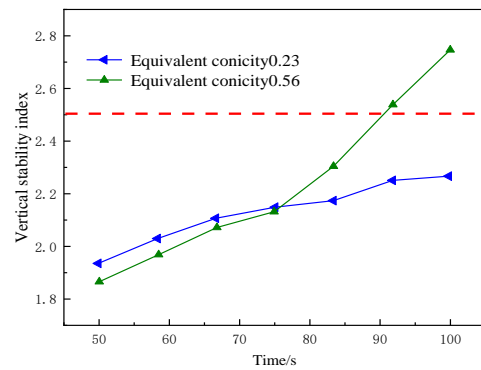
### 3.3 评价模型验证

等效锥度的显著变化会在列车动力学响应方面产生直观可辨的差异，为验证该模型的可靠性和有效性，并评估模型对于输入不确定性的敏感程度，采用动力学仿真的方式进行验证，本次验证选取两组具有显著不

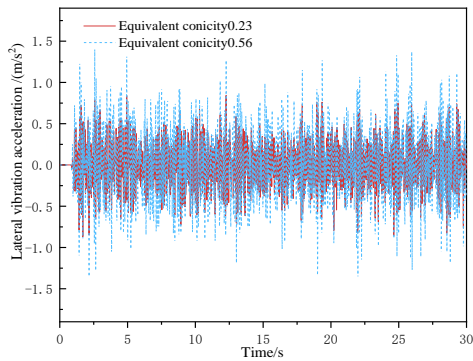
同的等效锥度方案（0.23 和 0.56）进行仿真计算，以动力学软件后处理结果与基于改进模糊层次分析法得出的评分预测结果是否一致来进行模型验证。



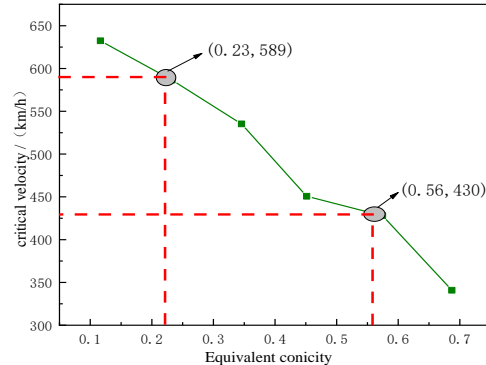
(a) 横向平稳性对比



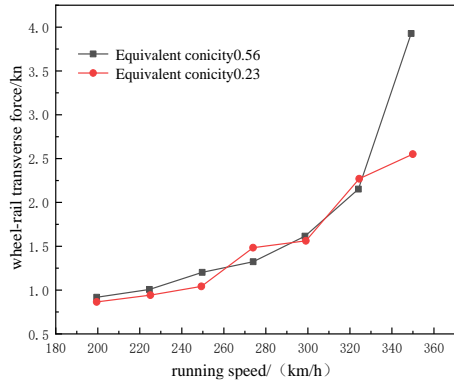
(b) 垂向平稳性对比



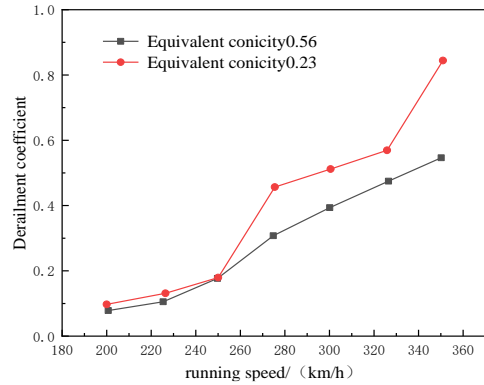
(c) 构架振动加速度对比



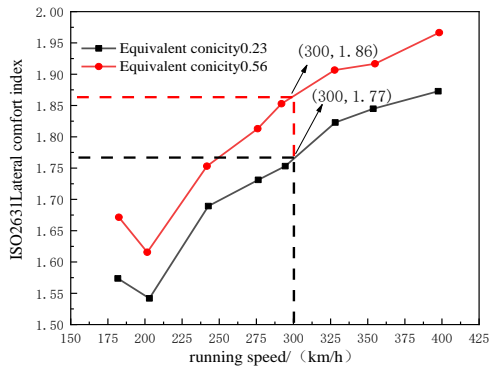
(d) 临界速度对比



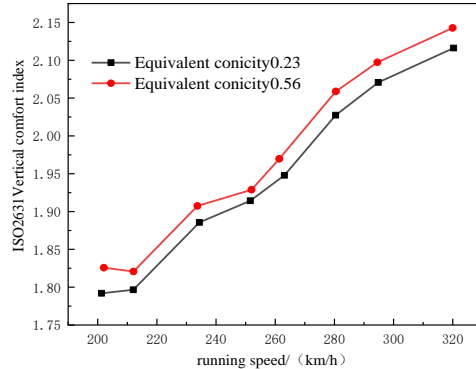
(c) 轮轨横向力对比



(f) 脱轨系数对比



(g) 横向舒适性对比



(h) 垂向舒适性对比

图 7 不同方案下动力学指标差异

Figure 8 Differences in kinetic indicators under different scheme

通过设计两组具有显著差异的等效锥度方案,在 Simpack 输入到车辆动力学模型中进行动力学仿真计算,得出仿真结果如上图所示,两种方案下具有显著差异的是横/垂向平稳性指标、构架横向加速度、非线性临界速度、轮轨横向力、横向舒适性指标及脱轨系数,等效锥度 0.56 时上述指标远大于等效锥度 0.23 时;轮重减载率、直曲线磨损指数、磨损功率等两种方案相差不大。由上述分析,高速列车 300km/h 工况下,等效锥度 0.23 优于等效锥度为 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,表明本文评价模型具有可靠性,确保了在实际决策中提供支持的能力。

## 4 结论

1) 结合影响等效锥度方案选取的关键动力学指标,提出了一种综合评价方法;基

于改进的三标度层次分析法为各决策指标进行赋权处理,采用线性函数法及特定指标的归一化处理得到模糊隶属度矩阵,并构建模糊综合评价模型。此模型参数化程度低,具有较高的稳定性,为选择最合适的等效锥度方案提供了一种有效方法。

2) 选取某动车组拖车整个镟修里程内的实测 LMA 车轮踏面与 CHN60 钢轨进行匹配,利用 UIC519 算法计算出各自等效锥度曲线,选取三组设置等效锥度工况,保证了方案中等效锥度为唯一变量。仿真计算得出三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,得出三种方案的综合优越度为:方案 M1:26.2%;方案 M2:17.9%;方案 M2:16.2%。

3) 最后,设计两组具有显著差异的等效锥度方案(0.23 和 0.56),通过动力学软件后处理界面的直观动力学表现得出高速列车 300km/h 工况下,等效锥度 0.23 优于等效锥度为 0.56。综合评判模型得出结果值分别为 0.390 和 0.132。二者结果相一致,表

明该模型在面对多变输入条件时,仍能保持一定的预测准确性与鲁棒性,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 魏来.高速列车相关运行安全性问题研究[D].西南交通大学,2016.  
WEI Lai.Research on Operation Safety Issues Related to high-speed Trains [D].Southwest Jiaotong University,2016.
- [2] Wickens A H .vehicle system dynamics dynamic stability of articulated and steered railway vehicles guided by lateral displacement feedback dynamic stability of articulated and steered railway vehicles guided by lateral displacement feedback[M].2021.
- [3] Polach O.Wheel profile design for target conicity and wide tread wear spreading[J].Wear,2011,271(1):195-202.
- [4] 侯茂锐,陈秉智,成棣,胡晓依,孙丽霞.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 Maorui,Chen Bingzhi,Cheng Di,H U Xiaoyi, Sun Lixia.Study on Wheel Wear Evolution of Two Typical EMUs and Its Dynamic Effects [J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2022,58(4):191-201.
- [5] 董孝卿,许自强.基于轮轨几何关系的构架报警控制措施深化研究[R].北京:中国铁道科学研究院,2017.  
Dong Xiaoqing, Xu Ziqiang. Deepening research on structural alarm control measures based on wheel-rail geometric Relationship [R].Beijing:China Academy of Railway Sciences,2017.
- [6] 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(02):88-93.  
ZHANG Hai, Jiang Qi, Xiao Qian et al.Contact Geometric Characteristics and Dynamic Stability Analysis of Thin Rim rail [J].Journal of East China Jiaotong University,2021,38(02):88-93
- [7] 毛军,马小云,郗艳红.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):6.  
Mao J,Ma X,Xi Y.Research on the running stability of high-speed trains under the cross wind by means of simulation[J].Beijing Jiaotong Daxue Xuebao(Journal of Beijing Jiaotong University),2011,35(1).
- [8] 梁志华.单轨车辆动力学性能评价指标体系研究[D]重庆:重庆交通大学,2015.  
LIANG Zhihua.Research on Dynamic Performance Evaluation Index System of Mono rail Vehicle [D] Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2015.
- [9] 贾璐,曾京,池茂儒.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):1-7.  
Jia Lu, Zeng Jing, Chi Maoru. Numerical simulation of lateral motion stability evaluation of vehicle system.Railway vehicles,2011,49(9):1-7.
- [10] 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 Senhua,Chen Chunjun,Yan Lei,etc. Evaluation system of subway train passengers based on hierarchical analysis[J].Science,Technology and Engineering,2019,19(36):296-301.
- [11] 石怀龙,罗仁,曾京.国内外高速列车动力学评价标准综述[J].交通运输工程学报,2021,21(01):36-58.  
Shi Huailong,Luo Ren,Zeng Jing.Summary of evaluation standards for high-speed train dynamics at home and abroad [J].Journal of Transportation Engineering,2021,21(01):36-58.

- [12] Federal Railroad Administration, CFR Parts and Vehicle/Track Interaction Safety Standards; High-Speed and High-Capacity Deficiency Operations[J]. [2024-03-13].
- [13] 中华人民共和国铁道部. GB/T5599-1985 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.  
Ministry of Railways, PRC. GB/T5599-1985 Specification for dynamic performance evaluation and test appraisal of railway Vehicles [S]. Beijing: China Standards Press, 1985.
- [14] 张展飞, 周劲松, 孙文静等. 轨道车辆运行平稳性评价算法一致性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(09): 1442-1449.  
Zhang Zhanfei, Zhou Jinsong, Sun Wenjing, etc. Conformity analysis of the operation stability evaluation algorithm of track vehicles [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2023, 51(09): 1442-1449.
- [15] 张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.  
Zhang Bingjiang. Hierarchical analysis and its application cases [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014.
- [16] 耿正霖, 吴佳妮, 程兴华等. 基于权重的 AHP 判断矩阵一致性调整方法[J]. 国防科技大学学报, 2024, 46(01): 179-186.  
Geng Zhenglin, Wu Jiani, Cheng Xinghua, etc. Weight-based AHP judgment matrix consistency adjustment method [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2024, 46(01): 179-186.
- [17] European Committee for Standardization. EN15302:2008 Railway applications-Method for determining the equivalent conicity[S].
- [18] 董孝卿, 王悦明, 倪纯双等. 服役动车组车轮踏面等效锥度运用管理研究[J]. 铁路技术创新, 2015, (2): 83-87.  
Dong Xiaoqing, Wang Yueming, Ni Chunshuang. Research on the application management of service EMU[J]. Railway Technology Innovation, 2015, (2): 83-87.



第一作者: 肖乾 (1977-), 男, 博士, 二级教授, 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。



通信作者: 徐中旭 (2000—), 男, 华东交通大学硕士在读, 研究方向为轮轨关系与车辆动力学。

E-mail: 2723216354@qq.com