

DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.05.038



引用格式: 李广, 姚远, 陈相旺, 等. 基于全因子 DOE 的机车抗蛇行减振器布置方式及参数优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(5): 2074–2084.

Citation: LI Guang, YAO Yuan, CHEN Xiangwang, et al. Optimization for locomotive yaw damper's layouts and parameters based on full factor DOE[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2023, 54(5): 2074–2084.

基于全因子 DOE 的机车抗蛇行减振器布置方式及参数优化

李广¹, 姚远¹, 陈相旺¹, 沈龙江²

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都, 610031;

2. 株洲电力机车有限公司 转向架研发部, 湖南 株洲, 412001)

摘要: 针对国内某型 160 km/h 高速机车, 归纳出 4 种典型的抗蛇行减振器布置方式, 并通过 SIMPACK 建立机车动力学模型。以提高机车横向平稳性和蛇行稳定性为目标, 采用基于全因子 DOE 方法对抗蛇行减振器阻尼、关节刚度和横向安装角进行优化, 并利用 Pearson 相关性系数分析法研究抗蛇行减振器参数对机车横向动力学性能影响规律。研究结果表明: 布置方式对机车横向动力学性能具有显著影响, 当采用开口向外布置方式时, 机车可实现较优的横向平稳性且可以通过调整横向安装角来消除前后司机室横向平稳性差异。此外, 减小抗蛇行减振器阻尼和关节刚度有利于改善机车横向平稳性和蛇行稳定性, 与布置方式无关; 但横向安装角对横向动力学性能的影响受到布置方式的影响。

关键词: 高速机车; 抗蛇行减振器; 布置方式; 横向平稳性; 蛇行稳定性

中图分类号: U26

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2023)05-2074-11

Optimization for locomotive yaw damper's layouts and parameters based on full factor DOE

LI Guang¹, YAO Yuan¹, CHEN Xiangwang¹, SHEN Longjiang²

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Bogie R&D Department, CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: For a certain type of domestic high-speed locomotive with a top speed of 160 km/h, four types of yaw damper layout schemes were summarized, and the corresponding dynamics models were established by SIMPACK software. Then, in order to improve the lateral ride comfort and hunting stability of the locomotive, the method of full factor DOE was utilized to optimize the damping, series stiffness and lateral installation angle of yaw dampers simultaneously, and the influence law of yaw damper parameters on the locomotive lateral dynamics performance

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-08-20

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(U2268211); 四川省自然科学基金资助项目(2022NSFSC0034, 2022NSFSC1901); 牵引动力国家重点实验室自主研究课题(2022TPL-T02) (Project(U2268211) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects(2022NSFSC0034, 2022NSFSC1901) supported by the Sichuan Natural Science Foundation; Project(2022TPL-T02) supported by the Independent Research and Development Project of State Key Laboratory of Traction Power)

通信作者: 姚远, 博士, 研究员, 从事转向架设计及理论、车辆动力学及控制研究; E-mail: yyuan8848@163.com

was researched through the analysis method of Pearson correlation coefficient. The results show that the layout scheme of yaw dampers has a significant impact on the locomotive lateral dynamics performance. Specifically, when the layout scheme of opening outward is adopted, the locomotive can attain a better lateral ride comfort, and the difference in lateral ride comfort between the front and rear cabs can be eliminated by adjusting the lateral installation angle. In addition, reducing the damping and series stiffness of yaw dampers is conducive to improving the locomotive lateral ride comfort and hunting stability, which is regardless of the layout scheme of yaw dampers, but the influence of the lateral installation angle on lateral dynamics performance is affected by the yaw damper's layout scheme.

Key words: high-speed locomotive; yaw damper; layout scheme; lateral ride comfort; hunting stability

某型高速动力集中动车组自2019年运行以来,在部分线路上出现了不同程度的横向动力学问题,主要表现为直线运行时出现明显的低频横向晃车现象,这引起了机车车辆制造和运营单位以及科研院所的高度重视^[1-2]。随着列车运行速度不断提高,如何保证高速机车又快又稳地运行成为研究的重点。抗蛇行减振器作为高速机车重要组成部件之一,对抑制转向架蛇行、提高机车临界速度和改善乘客舒适性具有重要影响^[3-11]。针对抗蛇行减振器的布置方式和参数分析成为转向架横向动力学设计的重要工作。

国内外很多学者对抗蛇行减振器参数进行了大量研究,充分说明了合理选择抗蛇行减振器参数的重要性。姚远等^[12]针对高速列车27自由度线性动力学模型,以2种轮轨接触状态下横向稳定性为优化目标,对抗蛇行减振器阻尼和关节刚度进行多目标优化并挖掘其匹配和影响规律。白瑾瑜等^[13]建立了抗蛇行减振器分段线性Maxwell模型,分析了抗蛇行减振器节点刚度对抗蛇行减振器动态特性的影响,并研究了节点刚度对高速列车运动稳定性的影响。陈龙等^[14]研究了抗蛇行减振器的动态阻尼和刚度特性对高速列车直线稳定性和曲线通过性能的影响,验证了抗蛇行减振器在高速列车实际运用中的优越性和必要性。ALONSO等^[15]研究了抗蛇行减振器阻尼和刚度对车辆稳定性的影响,并证明了抗蛇行减振器的精确建模对车辆动力学仿真具有重要意义。WANG等^[16]研究了液压抗蛇行减振器在役参数变化对SS9机车的影响,结果表明抗蛇行减振器的有效刚度和串联间隙对机车临界速度和乘坐舒适性具有显著影响。

部分学者针对抗蛇行减振器布置方式也开展

了一些研究。胡敏等^[17]分析了抗蛇行减振器横向和垂向倾斜角度对高速动车组拖车动力学性能的影响,发现抗蛇行减振器横向安装角对车辆横向动力学性能影响较大,指出横向安装角应该取较小值。邓小星等^[18]以3类抗蛇行减振器安装方式为研究对象,分析转向架摇头时构架和车体的受力情况,研究抗蛇行减振器安装方式对机车横向平稳性的影响。以上文献只是对抗蛇行减振器参数或布置方式单独进行分析,有关布置方式与参数之间匹配关系的研究仍较少。

本文针对4种典型的抗蛇行减振器布置方式,以机车横向稳定性和平稳性为优化目标,对抗蛇行减振器阻尼、关节刚度和横向安装角进行优化。分析不同布置方式下抗蛇行减振器参数对机车横向动力学性能影响规律,总结不同布置方式下机车横向动力学性能特征,以期对机车合理选取抗蛇行减振器布置方式及参数提供一定的理论参考。

1 机车动力学模型

通过多体动力学软件SIMPACK建立2B0高速机车动力学模型,如图1所示。该模型由车体、构架、轮对、电机、空心轴、转臂及牵引拉杆等共25个刚体构成。一系悬挂作用于车轮和构架之间,采用转臂式定位;二系悬挂作用于构架和车体之间,由高圆簧、抗蛇行减振器、二系横向和垂向减振器等组成;电机悬挂采用架悬式,布置形式为对置。模型中还通过分段函数的形式来考虑减振器和止挡元件的非线性特性,减振器建模采用Maxwell模型方法。

其中,车体、构架、轮对和电机均考虑6个自

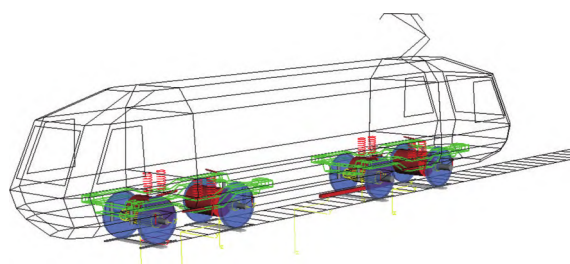


图1 高速机车动力学模型

Fig. 1 Dynamics model of high-speed locomotive

由度, 空心轴具有相对轮对的横移、摇头和侧滚 3 个自由度, 牵引拉杆考虑相对车体的点头和摇头 2 个自由度, 轴箱转臂仅考虑 1 个绕车轴旋转的自由度, 整个模型共 90 个自由度。钢轨采用标准 CHN60 型面, 轨距为 1 435 mm, 踏面采用 JM3 磨损型踏面, 轮轨接触采用 Hertz 接触模型。将武广线路实测轨道不平顺加于直线轨道, 轨底坡度为 1:40。该机车的主要动力学参数见表 1, 且动力学模型的准确性在文献[10]中得到了验证。

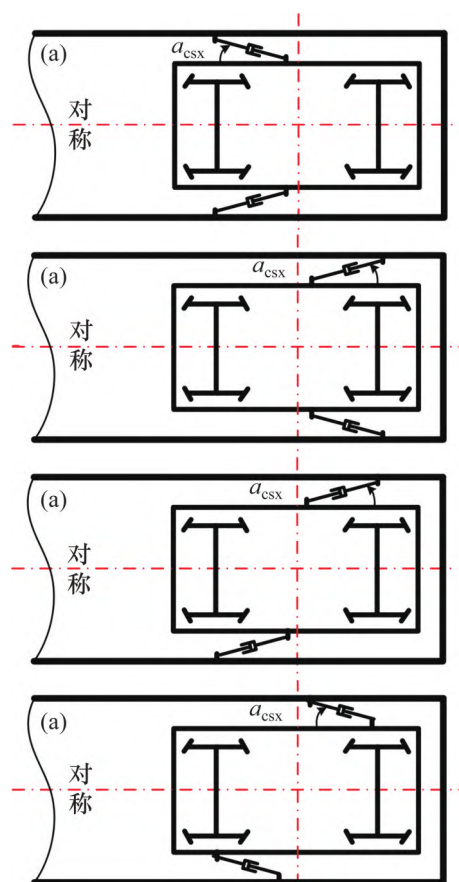
表1 高速机车主要动力学参数

Table 1 Main dynamics parameters of high speed locomotive

参数	数值
轴距/m	2.9
定距/m	9
车体质量/t	42
一系横向刚度/(kN·mm ⁻¹)	3.5
二系横向刚度/(kN·mm ⁻¹)	1.73
抗蛇行减振器阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	800
抗蛇行减振器关节刚度/(kN·mm ⁻¹)	22.5
抗蛇行减振器横向安装角/(°)	4

2 抗蛇行减振器布置方式

通过查阅大量有关抗蛇行减振器布置方式的参考文献, 结合工程实践经验, 将抗蛇行减振器布置方式归纳为 4 种, 如图 2 所示。为了便于对布置方式进行准确描述, 基于对该 4 种抗蛇行减振器布置方式开口形式和连接位置的分析, 对其统一命名。图 2 中, a_{csx} 为抗蛇行减振器横向安装角, 横向安装角初始值为 4°。



(a) 开口向内; (b) 开口向外; (c) 斜对称; (d) 反斜对称

图2 抗蛇行减振器布置方式示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of yaw damper's layout schemes

3 横向平稳性及稳定性优化

3.1 全因子试验设计

本文将基于全因子试验设计的优化方法对机车抗蛇行减振器阻尼(c_{sx})、关节刚度(k_{ncsx})和横向安装角(a_{csx})进行多参数优化, 以机车横向平稳性和稳定性为优化目标, 并考虑不同抗蛇行减振器布置方式。

试验设计(design of experiment, 简称 DOE)中参与优化的参数称为试验因子, 每个优化参数选取的分组为该试验因子水平。根据工程经验, 本文中试验因子设计范围及其水平数见表 2 所示。由于试验因子数和水平数较小, 故选用全因子法 DOE 进行多参数优化, 以获得充分而又全面的数据量, 确保每种组合都能得到检验, 从而得出准确且可靠的结论^[19-20]。

表2 试验因子设计范围及水平数

Table 2 Design range and level number of test factors

试验因子	范围	水平
$c_{sx}/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	400~1 000	4
$k_{ncsx}/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	10~40	4
$a_{csx}/(^{\circ})$	0~10	6

为了便于简化和观察计算结果，引入“中心点”和“代码化”这2个概念对试验设计进行处理。用数字1~4代表 c_{sx} 和 k_{ncsx} 的参数值，其中1和4分别代表这2个参数优化范围内的最小值和最大值；数字1~6代表 a_{csx} 的参数值，其中1和6分别代表该参数优化范围内的最小值和最大值，图3所示为采用全因子法DOE所得优化参数组合情况。图中从上到下共有3张子图，每张子图对应一种优化参数，依次对应 c_{sx} 、 k_{ncsx} 和 a_{csx} 。此外，每张子图的纵坐标代表该优化参数在对应优化范围内取值；横坐标代表优化参数组合序号，每个刻度代表一种参数组合模式，共有96种参数组合模式。

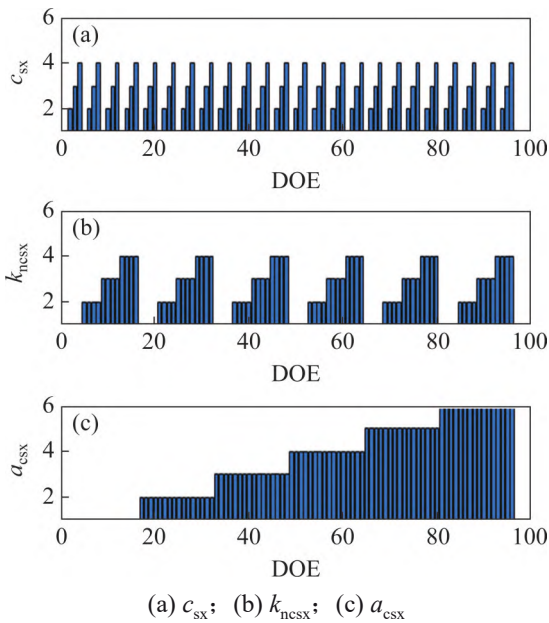


图3 优化参数组合示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of optimized parameter combinations

3.2 横向平稳性

车辆平稳性是用来衡量列车驾驶员或乘客对运行质量的感觉的指标，较为常用的是Sperling平稳性指标。一般情况下，Sperling平稳性指标包括横向平稳性和垂向平稳性指标，这里只研究横向平稳性指标，其公式如下^[21]：

$$W_y=3.57\sqrt[10]{\frac{A_y^3}{f}}F(f)$$

(1)

式中： W_y 为横向平稳性指标； A_y 为测量处横向加速度经频谱分析后所得频域振幅， m/s^2 ，其测量位置一般位于车体底板； f 为其对应的频率， Hz ； $F(f)$ 为频率修正系数，表示人对振动的敏感程度，可通过GB/T 5599—2019中的频率修正系数表得到。

针对安装4种抗蛇行减振器布置方式高速机车，采用全因子DOE分析不同参数组合对机车横向平稳性的影响。其计算方法为机车以160 km/h速度通过一段激励为武广线路谱的500 m直线工况，提取前、后司机室横向平稳性指标，结果如图4所示。图中横坐标为优化参数组合序号，纵坐标为横向平稳性指标，该值越小代表横向平稳性越好。图4(a)~(d)分别对应4种抗蛇行减振器布置方式，图中实线和虚线分别代表前、后司机室横向平稳性指标，分别用 W_{yf} 和 W_{yb} 表示。

由图4可见：随优化参数组合序号逐渐增大，横向平稳性呈一种周期性变化趋势，这证明优化参数对车体横向平稳性存在显著影响，但不同抗蛇行减振器布置方式时优化参数对车体横向平稳性的影响趋势不同。当采用开口向内布置时，横向平稳性指标呈现一种周期性地逐渐上升趋势，这代表增大抗蛇行减振器横向安装角对横向平稳性不利。当采用开口向外布置时，前、后司机室横向平稳性指标整体上分别呈上升和下降趋势，这代表增大横向安装角有利于后司机室横向平稳性，但不利于前司机室横向平稳性；局部的上升和下降是由抗蛇行减振器阻尼和关节刚度周期性变化引起的。当采用斜对称和反斜对称布置方式时，横向平稳性呈周期性规律变化，这说明横向安装角对横向平稳性影响很小。从整体上来看，前、后司机室横向平稳性存在一定差异且后司机室横向平稳性较差，只有当机车采用开口向外布置时，前后司机室横向平稳性差异可以通过优化参数组合得到有效缓解。

3.3 蛇行稳定性

横向稳定性是评估车辆系统能否安全运行的重要指标之一，其包括线性和非线性稳定性。POLACH等^[22-23]对铁路车辆的线性和非线性稳定性进行了比较评估，并指出即使非线性稳定性分

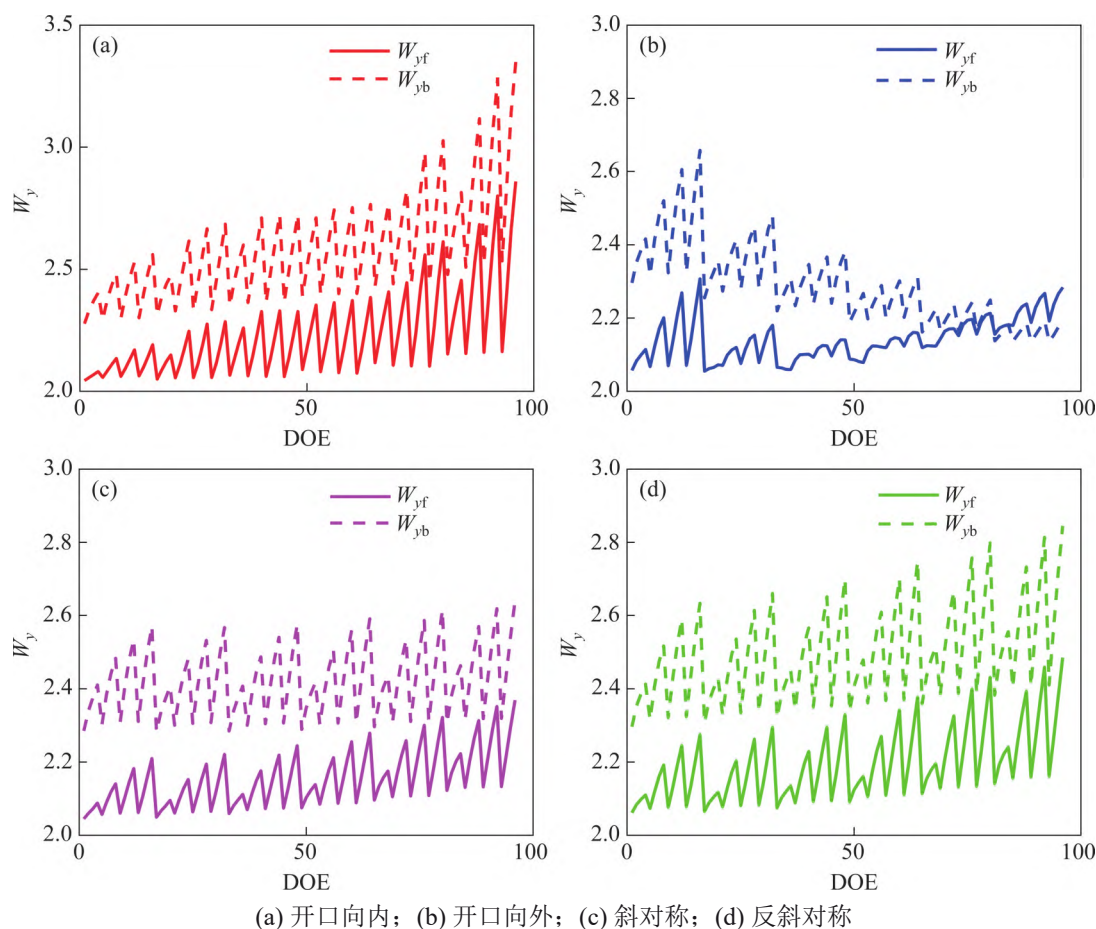


图4 机车横向平稳性结果

Fig. 4 Lateral ride comfort results of high-speed locomotives

析对铁路车辆的稳定性评估更为准确, 但线性稳定性分析对车辆设计仍然是十分重要的。考虑到非线性稳定性计算量较大, 本文采用线性稳定性指标来表征高速机车的横向稳定性。

首先, 对车辆系统一、二系悬挂参数和轮轨接触关系进行线性化处理, 然后求解车辆线性系统雅克比矩阵的特征值和特征向量, 从而获得蛇行模态频率和阻尼比^[10]。蛇行模态频率代表车辆系统发生蛇行运动的振动频率, 该值随速度增加而增大。蛇行模态阻尼比被用来代表线性稳定性, 该值越小代表车辆系统蛇行稳定性越好, 当该值大于0时代表发生蛇行失稳。计算公式如下:

$$\begin{cases} \eta = a + bi \\ f = |b|/(2\pi) \\ \zeta = a/\sqrt{a^2 + b^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: η 为由雅克比矩阵得到的特征值; a 和 b 分别为该特征值的实部和虚部; f 为车辆系统模态频率, Hz; ζ 为车辆系统模态阻尼比。

同样地, 采用全因子 DOE 分析不同优化参数组合对机车蛇行稳定性的影响。设置机车运行速度为 160 km/h, 图 5 所示为蛇行模态频率和阻尼比

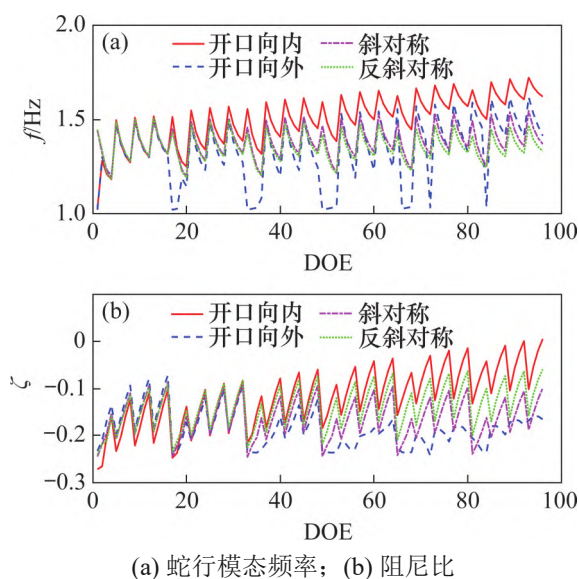


图5 高速机车线性稳定性结果

Fig. 5 Linear stability results of high-speed locomotives

的计算结果。由图5可见: 随优化参数组合序号逐渐增大, 蛇行频率和阻尼比均呈现周期性变化趋势。其中, 蛇行频率基本上均在1.0~1.5 Hz范围内波动, 这说明优化参数对蛇行频率影响不大, 但对蛇行阻尼比影响较大。

4 参数影响分析

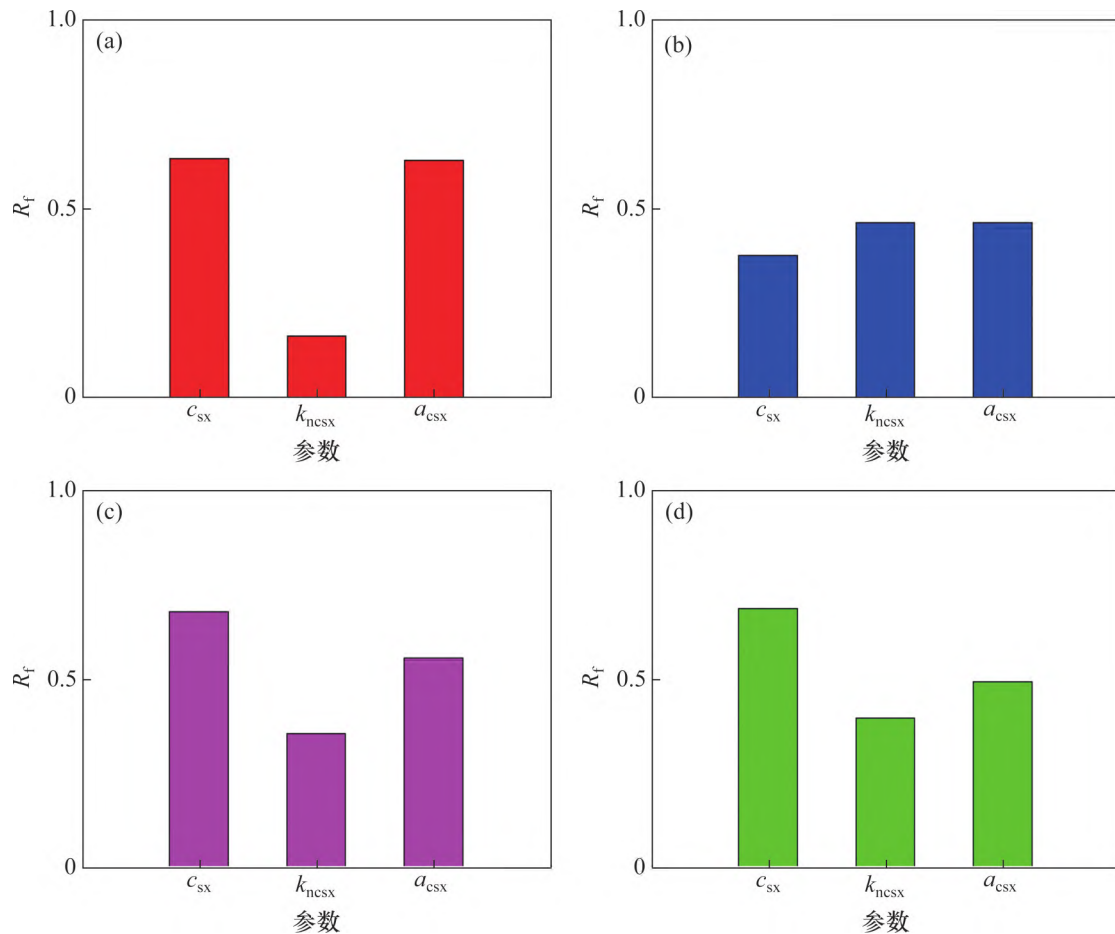
为了研究抗蛇行减振器阻尼、关节刚度和横向安装角对机车横向平稳性及稳定性影响规律, 对上述前、后司机室横向平稳性及稳定性计算结果进行相关性分析, 采用Pearson相关性分析法进行准则量化^[12], 计算公式如下:

$$R(j) = \frac{\sum_{i=1}^N [x_i(j) - \bar{x}(j)](y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [x_i(j) - \bar{x}(j)]^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: N 为参数组合总个数, $N=96$; i 为优化参数组合序号, $i=1, 2, \dots, N$; j 为第 j 个优化参数, $j=1, 2, 3$, 分别对应 c_{sx} 、 k_{ncsx} 和 a_{csx} ; $x_i(j)$ 为第 i 个参数组合时第 j 个参数的取值; y_i 为第 i 个参数组合时优化目标值; $\bar{x}(j)$ 为第 j 个优化参数的平均值; $\bar{y}$ 为优化目标值的平均值; $R(j)$ 为第 j 个优化参数与目标之间相关性系数。

针对前、后司机室横向平稳性与抗蛇行减振器阻尼、关节刚度和横向安装角进行相关性分析计算, 结果分别如图6和图7所示。由图6和图7可见: 无论采用哪种布置方式, 抗蛇行减振器阻尼和关节刚度与机车横向平稳性之间均为正相关, 即减小阻尼和关节刚度都有利于改善前、后司机室横向平稳性, 且大部分情况下阻尼对横向平稳性的影响要大于关节刚度的影响。

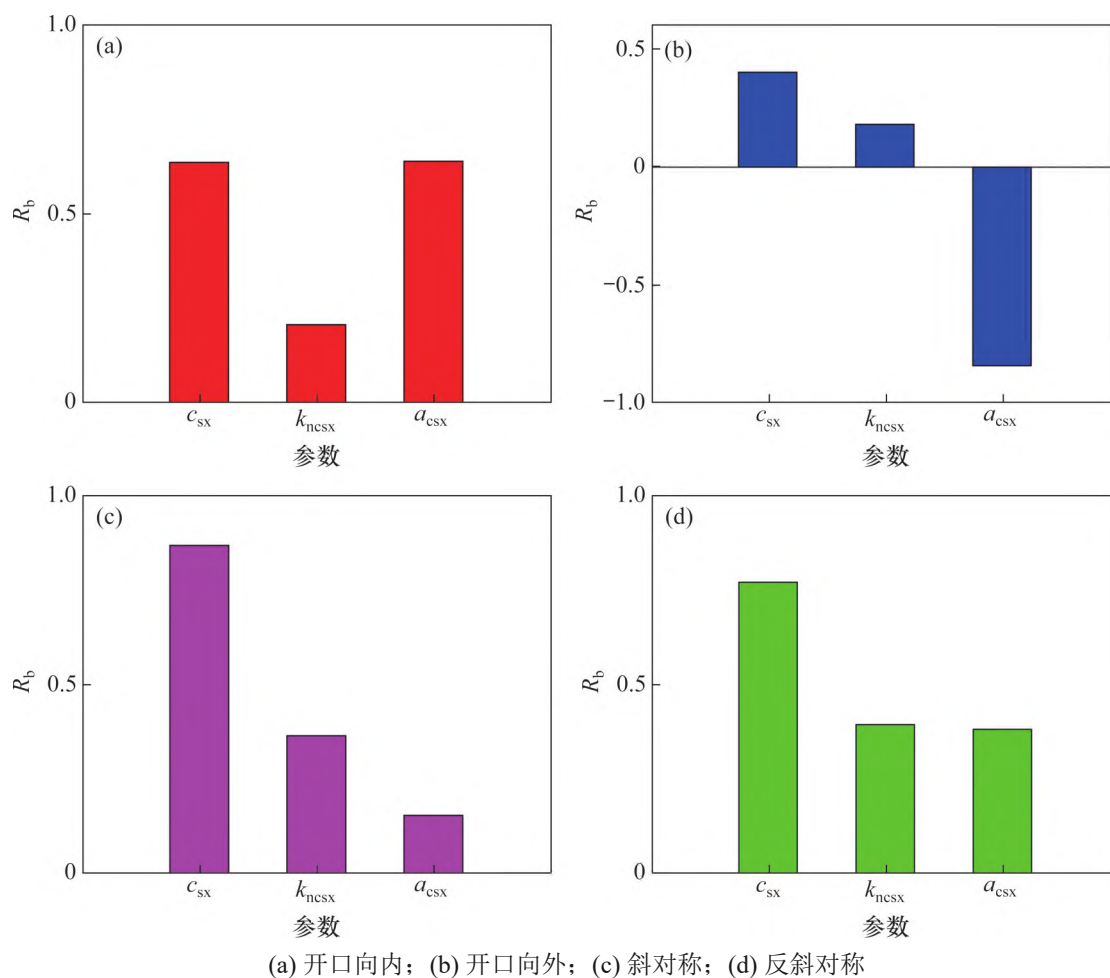
但是, 抗蛇行减振器横向安装角与横向平稳性之间的相关性与布置方式有关。由图6(b)和图7(b)



(a) 开口向内; (b) 开口向外; (c) 斜对称; (d) 反斜对称

图6 优化参数与 W_{yf} 相关性分析结果

Fig. 6 Correlation analysis results between optimized parameters and W_{yf}

图7 优化参数与 W_{yb} 相关性分析结果Fig. 7 Correlation analysis results between optimized parameters and W_{yb}

可知：当采用开口向外布置时，横向安装角与前司机室横向平稳性指标呈正相关，却与后司机室横向平稳性指标呈负相关，即增加横向安装角会增大和减小前、后司机室横向平稳性指标，且由于横向安装角较小时前司机室横向平稳性指标比后司机室的指标小，从而有利于减小前、后司机室横向平稳性差异，这就解释了图4(b)中前、后司机室横向平稳性指标的变化趋势。而对于其余3种抗蛇行减振器布置方式，横向安装角与前、后司机室横向平稳性指标之间均为正相关，即减小横向安装角有利于改善机车横向平稳性，但影响程度有所不同。

图8所示为蛇行模态阻尼比与抗蛇行减振器阻尼、关节刚度和横向安装角之间的 Pearson 相关性系数分析结果。图中横轴为优化参数 c_{sx} 、 k_{ncsx} 和 a_{csx} ，纵轴为优化参数与蛇行稳定性的相关性系数。

由图8可见：抗蛇行减振器阻尼和关节刚度与蛇行模态阻尼比均呈正相关，即减小阻尼和关节刚度有利于提高机车蛇行稳定性，且与布置方式无关。但过小的抗蛇行减振器阻尼会减小机车非线性临界速度，因此，抗蛇行减振器阻尼的选取应兼顾线性稳定性和非线性稳定性。

而横向安装角与蛇行模态阻尼比之间相关性受布置方式影响，由图8(a)和(d)可知：对于开口向内和反斜对称布置方式，横向安装角与蛇行阻尼比呈正相关，即减小横向安装角有利于增强蛇行稳定性。当采用开口向外布置时，横向安装角与蛇行阻尼比呈负相关，即增大横向安装角有利于增强蛇行稳定性，见图8(b)。由图8(c)可知，当采用斜对称布置方式时，横向安装角与蛇行阻尼比之间相关性系数很小，这说明此时横向安装角几乎不影响蛇行稳定性。

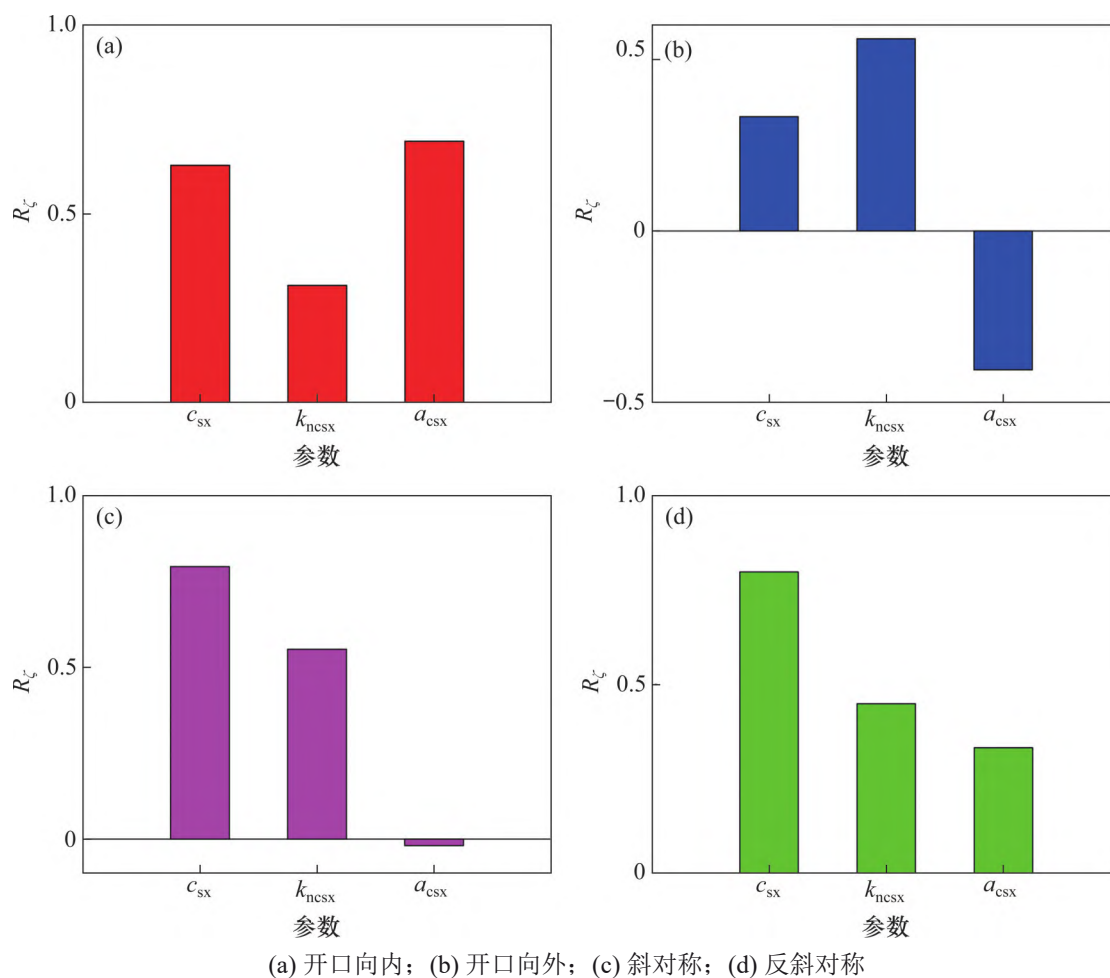


图8 优化参数与蛇行阻尼比相关性分析结果

Fig. 8 Correlation analysis results between optimized parameters and hunting damping ratio

5 横向安装角影响分析

5.1 根轨迹分析

为了深入研究抗蛇行减振器横向安装角对机车横向动力学性能的影响, 针对采用4种抗蛇行减振器布置方式的高速机车, 计算随横向安装角变化的根轨迹曲线, 如图9所示, 其中最小的圆圈代表抗蛇行减振器横向安装角为 0° , 最大的圆圈代表横向安装角为 10° , 共11组; 机车运行速度为160 km/h。

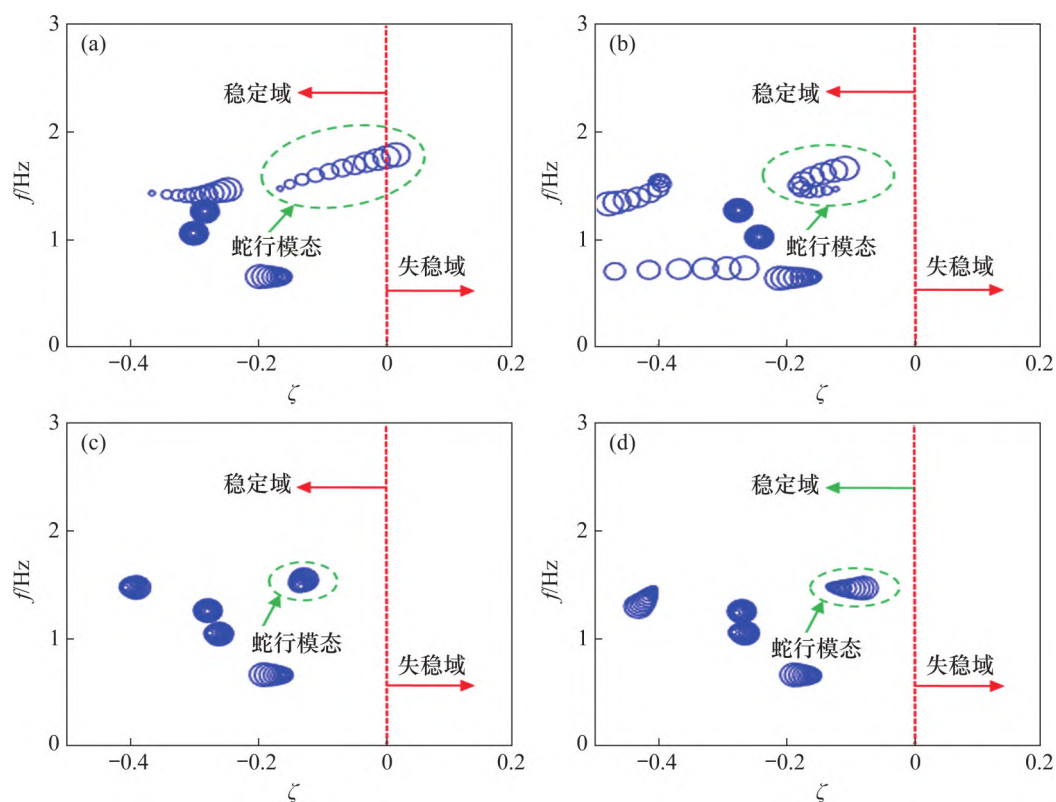
由图9可知: 该机车的蛇行模态频率约为1.5 Hz, 属于一次蛇行模态(车体蛇行), 与车体横向平稳性密切相关。对于开口向内布置方式, 减小抗蛇行减振器横向安装角有利于增强一次蛇行稳定性, 从而有利于改善横向平稳性。当采用开

口向外布置时, 适当的横向安装角有利于增强一次蛇行稳定性, 横向安装角过小或过大都会导致机车横向稳定性变差。当采用斜对称和反斜对称布置时, 横向安装角对机车蛇行稳定性影响很小, 其对横向平稳性影响也很小, 见图9(c)和图9(d)。

5.2 频谱分析

通过时域仿真分析抗蛇行减振器横向安装角对其输出阻尼力的影响情况, 从抗蛇行减振器出力变化方面来验证横向安装角对机车蛇行稳定性的影响。设置车辆运行速度为160 km/h, 轨道激励采用武广线路谱, 直线工况, 仿真时间为9 s, 考虑横向安装角度分别为 0° 、 5° 和 10° 进行时域仿真, 提取后转向架单个抗蛇行减振器输出力, 其频谱分析结果见图10。

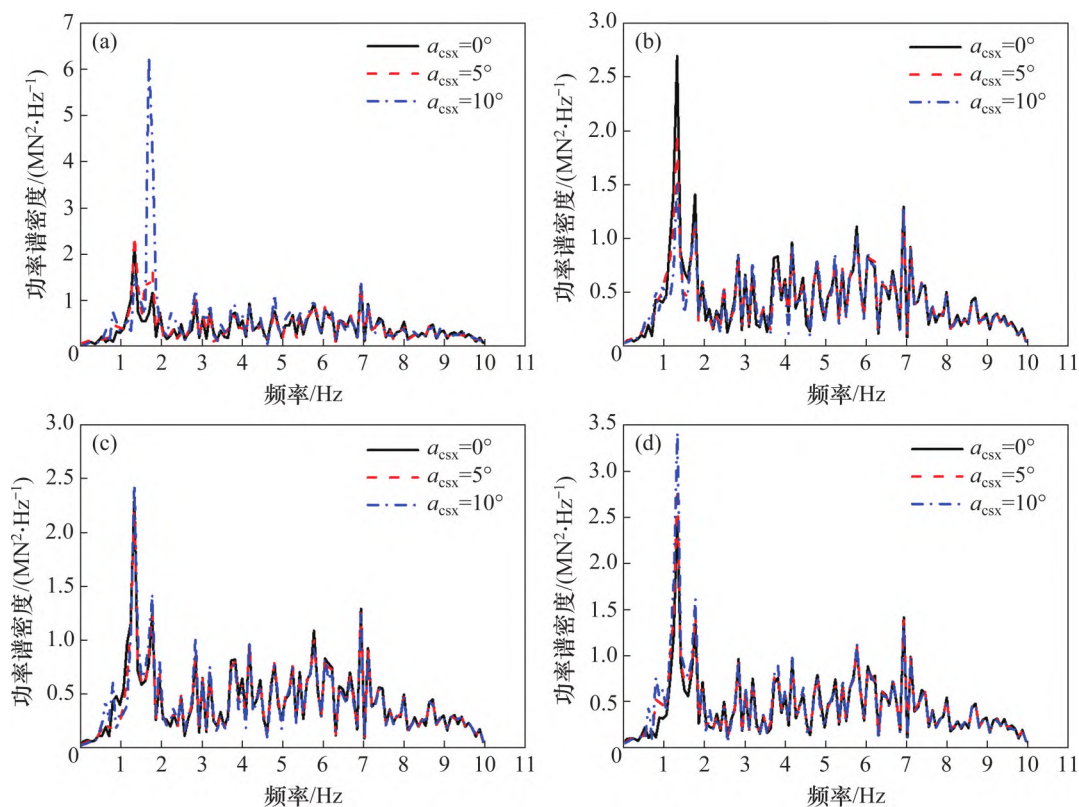
由图10可见: 当采用开口向外布置时, 随抗蛇行减振器横向安装角增大, 减振器输出能量增大, 这说明由于此时机车蛇行稳定性变差, 才会



(a) 开口向内; (b) 开口向外; (c) 斜对称; (d) 反斜对称

图9 随抗蛇行减振器横向安装角变化的根轨迹

Fig. 9 Root locus curves changes with lateral installation angle of yaw damper



(a) 开口向内; (b) 开口向外; (c) 斜对称; (d) 反斜对称

图10 不同横向安装角下抗蛇行减振器作用力的频谱分析结果

Fig. 10 Spectrum analysis results of yaw damper force with different lateral installation angles

导致抗蛇行减振器输出力变大。同理,当采用开口向内布置时,增大横向安装角后,抗蛇行减振器输出能量减小,这是机车蛇行稳定性变好所致。对于斜对称和反斜对称布置方式,横向安装角对减振器输出能量值影响很小,此时横向安装角对机车稳定性影响也很小。

6 结论

1) 与其他3种抗蛇行布置方式相比,当采用开口向外布置方式时,机车横向稳定性较好,且此时可以通过选用适当的横向安装角来减小甚至消除前后司机室横向平稳性差异。因此,建议2B0高速机车采用抗蛇行减振器开口向外布置方式且选取适当的横向安装角。

2) 抗蛇行减振器阻尼和关节刚度对机车横向动力学性能的影响与抗蛇行减振器布置方式无关,减小阻尼和关节刚度均有利于机车横向平稳性;但横向安装角对横向平稳性的影响规律受到布置方式影响。

3) 4种布置方式下横向安装角选取原则如下:当开口向内布置时,横向安装角应取较小值,有利于机车横向平稳性和稳定性;当采用开口向外布置时,横向安装角应取一个折中值,过大或过小的横向安装角对机车蛇行稳定性均不利。当采用斜对称和反斜对称布置时,横向安装角对机车横向平稳性影响很小,但考虑到非线性临界速度,建议此时也应该取较小值。

4) 上述结论是针对2B0轴式高速机车在特定线路上得出的,是否适用于2C0轴式高速机车还有待进一步研究和验证。此外,对于采用开口向外布置方式的机车,当其运行于中小曲线半径线路上时,选择适当的抗蛇行减振器横向安装角同样有利于改善曲线通过能力。

参考文献:

- [1] 雷成,王少聪,郭柏龄,等. 2B0机车车体低频横向晃动现象研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(11): 42-49.
LEI Cheng, WANG Shaocong, GUO Bailing, et al. Study on low-frequency lateral swaying of 2B0 locomotive[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(11): 42-49.
- [2] 张志超,李谷,杜瑞涛,等. 动力集中动车组动力车直线运

行晃车问题研究[J]. 铁道机车车辆, 2020, 40(3): 1-6, 22.

ZHANG Zhichao, LI Gu, DU Ruitao, et al. Research on transverse vibration problem for the power car of power concentrated EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(3): 1-6, 22.

- [3] 姚远,李广,梁树林,等. 基于健壮稳定性的高速列车悬挂参数优化匹配方法[J]. 铁道学报, 2021, 43(8): 35-44.

YAO Yuan, LI Guang, LIANG Shulin, et al. Optimal matching method for suspension parameters of high-speed train bogie based on robust hunting stability[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(8): 35-44.

- [4] 姚远,任铨铭,陈相旺,等. 基于频域平稳性的高速机车悬挂参数优化匹配[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1259-1267.

YAO Yuan, REN Chengming, CHEN Xiangwang, et al. Suspension parameters optimum matching of high-speed locomotive based on frequency domain stationarity[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(6): 1259-1267.

- [5] 吴娜,曾京,王忆佳. 轮轨磨耗状态下悬挂参数失效对车辆动力学性能影响[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 82-87.

WU Na, ZENG Jing, WANG Yijia. Effect of wheel/rail wear and suspension system failure on vehicle dynamic performance[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 82-87.

- [6] 张卫华,李艳,宋冬利. 高速列车运动稳定性设计方法研究[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 1-9.

ZHANG Weihua, LI Yan, SONG Dongli. Design methods for motion stability of high-speed trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 1-9.

- [7] 池茂儒,张卫华,曾京,等. 高速客车转向架悬挂参数分析[J]. 大连交通大学学报, 2007, 28(3): 13-19.

CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing, et al. Study of suspension parameter of high speed passenger car bogies[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2007, 28(3): 13-19.

- [8] 孟宏,翟婉明,王开云,等. 高性能机车转向架的研发[J]. 铁道学报, 2005, 27(2): 35-39.

MENG Hong, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun, et al. Research and development of high performance bogie of locomotive[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(2): 35-39.

- [9] YAO Yuan, LI Guang, WU Guosong, et al. Suspension parameters optimum of high-speed train bogie for hunting stability robustness[J]. International Journal of Rail Transportation, 2020, 8(3): 195-214.

- [10] LI Guang, WU Ruidong, DENG Xiaoxing, et al. Suspension parameters matching of high-speed locomotive based on stability/comfort Pareto optimization[J]. Vehicle System

- Dynamics, 2022, 60(11): 3848–3867.
- [11] CHEN Xiangwang, YAO Yuan, SHEN Longjiang, et al. Multi-objective optimization of high-speed train suspension parameters for improving hunting stability[J]. International Journal of Rail Transportation, 2022, 10(2): 159–176.
- [12] 姚远, 陈相旺, 李广, 等. 高速列车抗蛇行减振器参数的多目标优化研究[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1298–1304.
- YAO Yuan, CHEN Xiangwang, LI Guang, et al. Multi-objective optimization of yaw damper parameters for high-speed train[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1298–1304.
- [13] 白瑾瑜, 曾京, 石怀龙, 等. 抗蛇行减振器对高速列车稳定性的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(23): 78–83.
- BAI Jinyu, ZENG Jing, SHI Huailong, et al. Effects of anti-hunting shock absorber on stability of high-speed train[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(23): 78–83.
- [14] 陈龙, 戴焕云, 郭兆团, 等. 抗蛇行减振器特性与高速列车适应性分析[J]. 机车电传动, 2018(3): 79–81, 84.
- CHEN Long, DAI Huanyun, GUO Zhaotuan, et al. The analysis of characteristics of anti-yaw damper and high-speed trains adaptability[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(3): 79–81, 84.
- [15] ALONSO A, GIMÉNEZ J G, GOMEZ E. Yaw damper modelling and its influence on railway dynamic stability[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(9): 1367–1387.
- [16] WANG W L, YU D S, HUANG Y, et al. A locomotive's dynamic response to in-service parameter variations of its hydraulic yaw damper[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 77(4): 1485–1502.
- [17] 胡敏, 杨行, 郭毅, 等. 抗蛇行减振器倾斜角度对动车组运行性能的影响[J]. 机械工程与自动化, 2019(6): 54–56.
- HU Min, YANG Hang, GUO Yi, et al. Influence of anti-snaking damper tilt angle on running performance of EMU[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(6): 54–56.
- [18] 邓小星, 陈国胜, 陈喜红. 抗蛇行减振器安装方式对机车稳定性和平稳性的影响[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(2): 24–26, 31.
- DENG Xiaoxing, CHEN Guosheng, CHEN Xihong. Influence of yaw damper installation way on locomotive stability and comfort[J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(2): 24–26, 31.
- [19] 宫岛, 刘广宇, 周劲松, 等. 动车组车体异常振动问题分析及治理研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 95–105, 117.
- GONG Dao, LIU Guangyu, ZHOU Jinsong, et al. Research on abnormal vibration issue of car bodies of EMU trains and its treatment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 95–105, 117.
- [20] 赵紫岩. 基于 DOE 和代理模型的结构优化设计方法及应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017: 31–51.
- ZHAO Ziyang. Research on the application and structural optimization design method based on DOE and surrogate model[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017: 31–51.
- [21] GB/T 5599—2019. 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范[S].
- GB/T 5599—2019. Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock[S].
- [22] POLACH O. On non-linear methods of bogie stability assessment using computer simulations[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2006, 220(1): 13–27.
- [23] POLACH O. Comparability of the non-linear and linearized stability assessment during railway vehicle design[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(s1): 129–138.

(编辑 刘锦伟)