

转向架临界速度的区域灵敏度研究

高学军[†], 杨露

(成都理工大学 环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:为了研究随机悬挂参量对铁道车辆横向稳定性的影响规律,量化相关参量对车辆临界速度的影响,采用拉丁超立方采样方式,基于 Hermite 正交多项式建立转向架临界速度与悬挂参量之间的近似函数关系.运用此函数关系对转向架系统进行区域灵敏度分析,给出随机悬挂参量的重要性排序,通过区域均值比函数、区域方差比函数的上边界减小、下边界增大、区间对称缩减、固定在区间某分位点来分别量化悬挂参量的变化对临界速度均值比、方差比的贡献.研究结果表明,在所考察的参量及其变化范围内,二系悬挂横向阻尼、连接2位轮对的一系悬挂横向刚度等参量对转向架临界速度影响最大,通过具体控制这些参量的变化范围,可以达到有效提高车辆临界速度,显著减小临界速度变化方差的目的.

关键词:转向架(铁道车辆);灵敏度分析;临界速度;区域均值比;区域方差比

中图分类号:U260.1

文献标志码:A

Regional Sensitivity Research on Critical Speed of a Bogie

GAO Xuejun[†], YANG Lu

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: To investigate the effect of laws of stochastic suspension parameters on the lateral stability of railway vehicles and quantify the influence of the relevant parameters on the critical speed, the Latin hypercube sampling technology is used, and the Hermite orthogonal polynomials are employed to establish an approximate functional relation between the critical speed and the suspension parameters of a railway bogie. Then this functional relation is applied to regional sensitivity analysis of the bogie system. Not only the importance ranking orders of the stochastic suspension parameters are obtained, but also the contributions of the suspension parameter to the mean ratio and variance ratio of the critical speed are quantified, respectively, by decreasing the upper boundary, increasing the lower boundary, symmetrically shrinking the interval, and fixing it at a certain quartile of the interval of the regional mean ratio functions and variance ratio functions. It is shown that the secondary suspension lateral damper and the primary lateral stiffness connected to 2-position wheelset etc., have the greatest influences on the critical speed of the bogie within the considered suspension parameters and their variable ranges. The critical speed of the vehicle can be effectively improved, and the variance of the critical speed can be significantly reduced by controlling the variable range of these suspension parameters.

* 收稿日期:2024-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11972095), National Natural Science Foundation of China(11972095)

作者简介:高学军(1979—),男,宁夏中卫人,成都理工大学教授,工学博士

[†] 通信联系人, E-mail: gaoxj3000@sina.com

Key words: bogie (railroad rolling stock); sensitivity analysis; critical speed; regional mean ratio; regional variance ratio

随着铁道车辆运行速度的不断提高,车辆动力学的研究^[1-2]也逐渐成为铁路工程师和科研工作者的关注重点. 评定和试验车辆系统动力学性能时,按照国家标准^[3]可通过车辆运行的稳定性、运行品质和运行平稳性等进行分析,而稳定性中的横向稳定性^[4-7]是车辆动力学性能非常重要的方面,可通过车辆的临界速度进行评价. 然而,临界速度受车辆结构、惯性特征、悬挂参量、轮轨接触等很多因素影响,由于制造、安装、运维等原因,这些因素在车辆的全寿命周期内存在许多随机性,因此,研究相关随机因素对车辆临界速度的影响是十分必要的.

在随机车辆系统的稳定性研究方面, Bigoni 等^[8]考虑 3 种悬挂参量的独立正态分布,采用不确定量化方法研究了两自由度 Cooperrider 转向架模型的稳定性可靠性,发现临界速度以概率形式存在分布区间,基于随机配置法的广义多项式混沌方法计算效率最高. 罗仁等^[9]考虑多种参量的正态分布和平稳随机过程的轨道不平顺,应用数值仿真研究高速列车动力学性能的统计特征,得出考虑随机因素的动力学方法可以用于高速列车动力学性能预测,能更加真实全面地反映车辆动力学性能的结论. 高学军等^[10]推导了高维多阶基于正态分布场的 Hermite 正交多项式,应用代理模型方法分析了不同变异系数下转向架悬挂参量服从独立正态分布时临界速度的变化规律,结果表明,只有取较低的临界速度限定值,才能保证转向架系统具有更低的失效概率. Gao 等^[11]研究了乘客不确定性对车辆惯性特征和稳定性的影响,发现随着乘客人数的增加,临界速度先增大后减小,满载后变异性显著降低.

在随机车辆系统稳定性的参数灵敏度研究方面,张兆丰^[12]采用 17 自由度车辆横向振动模型,分析了临界速度对质量参数和悬挂参数的局部灵敏度和极差灵敏度,发现二系纵向向阻尼对临界速度影响显著. 李利军等^[13]基于正交试验方法,采用 3 水平设计,对某铁道车辆转向架进行了悬挂参数的灵敏度分析和稳健性优化,优化后的悬挂参数使车辆具有较高的临界速度和很低的灵敏度. Bigoni 等^[14]应

用代理模型方法研究了 24 个独立正态悬挂参量对 Cooperrider 转向架临界速度的全局灵敏度,发现左右一系后从轮对的纵向刚度影响最大. Gao 等^[15]在应用局部灵敏度、全局灵敏度、区域灵敏度给出悬挂参量对转向架临界速度重要性排序的基础上,采用经典方差比函数 FV 探讨了重要输入参量分布区间对称缩减及固定在分位点时临界速度方差的变化规律. 由于 FV 计算中的剩余方差是相对常数期望计算的,实际当参量区间变化时,其数学期望是变化的,因此, FV 只能用于衡量输入变量区间缩减时的情况,模型输出远离均值.

为了准确量化车辆系统随机悬挂参量对临界速度的影响,本文建立两轴转向架模型,采用 Hermite 正交多项式拟合随机悬挂参量与输出临界速度之间的函数关系式,用此关系式对转向架临界速度的区域灵敏度进行分析,不但可以给出参量的重要性排序,而且可以给出重要输入参量分布区间不同缩减变化时输出均值比和方差比的变化趋势,为提高临界速度并减小其方差提供参考和依据.

1 转向架模型

建立如图 1 所示两轴转向架系统^[16],该系统由 1 个构架(M_b, I_{bx}, I_{bz}), 2 个轮对(M_w, I_{wx}, I_{wz}), 一系悬挂 3 个方向的刚度(K_{px}, K_{py}, K_{pz})和阻尼(C_{px}, C_{py}, C_{pz}), 二系悬挂 3 个方向的刚度(K_{sx}, K_{sy}, K_{sz})和阻尼(C_{sx}, C_{sy}, C_{sz})等组成. 转向架模型自由度相对较少,除不含车体的振动外,基本涵盖了车辆系统的必要部件,当用来进行稳定性的计算时,相关结果与整车模型差别也不大. 分析中假设转向架系统经过充分激励后运行在理想平直、无不平顺的轨道上,悬挂系统具有线弹性特性. 考虑构架的横移 y_b 、摇头 ψ_b 、侧滚 ϕ_b 运动和两个轮对的横移 y_{wi} ($i=1, 2$) 和摇头 ψ_{wi} 运动,整个转向架系统有 7 个自由度,可由 7 个互相耦合的二阶常微分方程组表示.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{S}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{S}} + \mathbf{K}\mathbf{S} = \mathbf{F}(t, \mathbf{S}, \dot{\mathbf{S}}, V) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为转向架系统的质量矩阵、阻尼

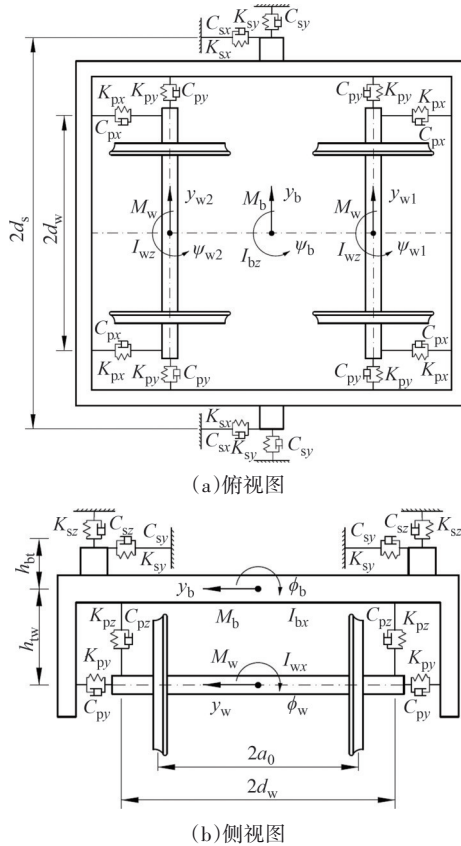


图1 两轴转向架系统

Fig.1 A two-axle railway bogie system

矩阵和刚度矩阵; $S, \dot{S}, \ddot{S}$ 分别为位移、速度、加速度向量; F 为荷载向量; t 为时间; V 为转向架运行速度。

刚度矩阵和阻尼矩阵可通过运动微分方程理论推导得到,质量矩阵 M 、位移向量 S 、荷载向量 F 的表达式分别如下:

$$M = \text{diag}\{M_w, M_w, I_{wz}, I_{wz}, M_b, I_{bz}, I_{bx}\} \quad (2)$$

$$S^T = \{y_{w1}, y_{w2}, \psi_{w1}, \psi_{w2}, y_b, \psi_b, \phi_b\} \quad (3)$$

$$F^T = \{F_{c1}, F_{c2}, F_{M1}, F_{M2}, 0, 0, 0\} \quad (4)$$

式中: $F_{c1}, F_{c2}, F_{M1}, F_{M2}$ 分别为轮轨接触力对轮对横移和摇头的贡献力、力矩大小。

车轮踏面和钢轨型面分别采用标准的国内LM型车轮踏面和60 kg/m的钢轨型面,在轨底坡1/40,标准轨距1 435 mm,轮对内侧距1 353 mm.在轮轨接触力计算中,采用RSSEO^[17]计算轮轨接触参量和接触点的静态法向力,通过接触参量以及轮对的横移速度、摇头角位移、摇头角速度、侧滚角速度、车辆运行速度等计算蠕滑率,采用Kalker线性蠕滑理论计算轮轨接触点的蠕滑力,通过沈氏蠕滑理论对线性蠕滑力进行修正,将法向力和蠕滑力转换到轨道坐标系内的3个坐标轴方向,即可用于运动微分方程的建立。

式(1)表示的转向架系统往往是强非线性的,可以采用数值积分得到各个刚体的响应.当车辆以较低速度运行时,激励引起的振动会衰减收敛到静平衡位置,此时车辆系统是稳定的.当速度逐渐增大至某一值时,振幅不会衰减而形成周期摆振,车辆系统中这种现象称为蛇行运动,蛇行运动出现的最小运行速度就是车辆临界速度.蛇行运动有两种形式^[16]:车体蛇行和转向架蛇行.车体蛇行的临界速度较低,主要表现为车体的大幅摆振与转向架相对较小摆振的耦合共振,振动频率在3 Hz左右,可以通过优化车辆系统参量避免.转向架蛇行的临界速度较高,主要表现为小幅的车体振动和大幅激烈的转向架振动,振动频率在8 Hz左右,这种蛇行运动是车辆系统的固有属性,不能完全消除,本文主要研究的是转向架蛇行临界速度。

临界速度求解时可以采用“降速法”,在确定车辆临界速度的研究中,逐渐形成了两种降速法:第1种是使车辆系统以较大速度充分激振起来以后,让车辆做有加速度的降速运动,通过设置一定的判定标准或人工观察确定临界速度的大小.该方法的优点是耗时少,不足是临界速度的确定标准不统一,且得到临界速度值与真实值存在一定误差.第2种是使车辆系统以较大速度充分激振起来以后,让车辆做恒定速度的运动,如果车辆振动仍然是周期性的摆振,则此时的速度是大于临界速度的,因此在下一次的计算中降低运行速度,重复这个计算过程直至某个速度时车辆的振动开始衰减到静平衡位置,此时对应的速度就是车辆临界速度^[18].该方法的优点是计算精确,缺点是计算相对耗时。

本文为了计算精确,采用第2种降速法计算车辆临界速度,由于涉及大批量的数据计算,采用文献[15]提出的“扩展二分法”自动扩展搜寻区间,通过综合判定幅值的大小和摆振幅值点之间的斜率确定当前速度是否大于临界速度,逐步缩小速度区间范围,达到确定临界速度的目的。

2 分析方法

对转向架系统进行灵敏度分析时,需要大量随机参量组合的临界速度数据,传统的蒙特卡罗法计算量大、效率低.研究表明,当随机参量可以表示成正态分布时,Hermite正交多项式^[19]拟合得到的代理模型具有更高的精度.因此,若用向量 $P =$

$\{P_1, P_2, \dots, P_n\}^T$ (n 为随机变量的个数) 表示标准正态分布输入随机向量, 则用 Hermite 正交多项式拟合的临界速度 $Y(P)$ 表达式为:

$$Y(P) = a_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} H_1(P_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1, i_2} H_2(P_{i_1}, P_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1, i_2, i_3} H_3(P_{i_1}, P_{i_2}, P_{i_3}) + \dots \quad (5)$$

式中: $a_0, a_{i_1}, a_{i_1, i_2}, a_{i_1, i_2, i_3}, \dots$ 为正交多项式的待定系数; $H_m(P_{i_1}, P_{i_2}, \dots, P_{i_m})$ 为 m 阶 Hermite 正交多项式.

$$H_m(P_{i_1}, P_{i_2}, \dots, P_{i_m}) = (-1)^m e^{\frac{1}{2} P^T P} \frac{\partial^m}{\partial P_{i_1} \partial P_{i_2} \dots \partial P_{i_m}} \left(e^{-\frac{1}{2} P^T P} \right) \quad (6)$$

为得到式(5)的具体表达式, 首先需要生成标准正态分布随机变量的配点值, 其次计算各配点处的函数值, 最后用配点值和对应的函数值拟合得出待定系数, 就可得到输入参量与输出临界速度的函数关系式.

将得到的函数关系表达式运用于区域灵敏度分析, 区域均值比函数 HM 和区域方差比函数 HV^[20] 分别为:

$$HM_i(q_{i(1)}, q_{i(2)}) = \frac{E_X(Y|X_i \in U_i)}{E(Y)} \quad (7)$$

$$HV_i(q_{i(1)}, q_{i(2)}) = \frac{V_X(Y|X_i \in U_i)}{V(Y)} \quad (8)$$

式中: $q_{i(1)}, q_{i(2)}$ 为分位点值, 且 $(0 \leq q_{i(1)} < q_{i(2)} \leq 1)$; $E(Y)$ 和 $V(Y)$ 分别为系统输出的期望和方差; $E_X(Y|X_i \in U_i)$ 和 $V_X(Y|X_i \in U_i)$ 分别为随机变量 X_i 分布区间缩减至 U_i 时模型输出的期望和方差. 对独立正态分布的随机变量, 可分别表示为:

$$E(Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} g(X) \prod_{j=1}^n (f_j(x_j) dx_j) \quad (9)$$

$$V(Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} (g(X) - E(Y))^2 \prod_{j=1}^n (f_j(x_j) dx_j) \quad (10)$$

$$E_X(Y|X_i \in U_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{u_{i(1)}}^{u_{i(2)}} g(X) \times \frac{f_i(x_i) dx_i}{\int_{u_{i(1)}}^{u_{i(2)}} f_i(z) dz} \prod_{j=1, j \neq i}^n (f_j(x_j) dx_j) \quad (11)$$

$$V_X(Y|X_i \in U_i) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{u_{i(1)}}^{u_{i(2)}} [g(X) - E_X(Y|X_i \in U_i)]^2 \times \frac{f_i(x_i) dx_i}{\int_{u_{i(1)}}^{u_{i(2)}} f_i(z) dz} \prod_{j=1, j \neq i}^n (f_j(x_j) dx_j) \quad (12)$$

式中: $g(X)$ 为模型响应函数; $f_i(x_i)$ 为 X_i 边缘密度函数; $\frac{f_i(x_i) dx_i}{\int_{u_{i(1)}}^{u_{i(2)}} f_i(z) dz}$ 为 X_i 的密度函数.

通过式(7)和式(8)可分别得到各随机参量的区域均值比函数和区域方差比函数三维图, 从图中可以确定随机参量区间任意缩减时输出均值和方差的变化. 进一步, 区域均值比函数和区域方差比函数的对角线分别为条件期望和方差, 都可以用来求解输入参量的全局灵敏度 Sobol 主指标, 通过对角线上的区域均值比 $HM_i(q_i, q_i)$ 或区域方差比 $HV_i(q_i, q_i)$ 求解 Sobol 主指标, 其表达式^[21] 分别为:

$$S_{iHM} = \frac{V(E(Y|X_i = F_i^{-1}(q_i)))}{V(Y)} = \frac{E^2(Y) \times V(HM_i(q_i, q_i))}{V(Y)} \quad (13)$$

$$S_{iHV} = 1 - \frac{E(V(Y|X_i = F_i^{-1}(q_i)))}{V(Y)} = \frac{1 - E(HV_i(q_i, q_i))}{1} \quad (14)$$

式中: $F_i^{-1}(q_i)$ 表示 q_i 累积分布函数的反函数.

引入全局灵敏度分析的 Sobol 方法^[22] 对通过区域均值比和区域方差比计算得到的区域灵敏度指标进行验证, 其计算主指标 S_i 的表达式为:

$$S_i = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (15)$$

3 结果与分析

以某准高速客车^[1]的转向架为研究对象进行分析, 轮轨黏着系数取常值 0.3. 考虑不安装抗蛇行减振器的工况, 研究转向架系统一系悬挂纵向刚度前左 K_{pxL1} 前右 K_{pxR1} 后左 K_{pxL2} 后右 K_{pxR2} 、横向刚度前左 K_{pyL1} 前右 K_{pyR1} 后左 K_{pyL2} 后右 K_{pyR2} 、垂向刚度前左 K_{pzL1} 前右 K_{pzR1} 后左 K_{pzL2} 后右 K_{pzR2} 、一系悬挂垂向阻尼前左 C_{pxL1} 前右 C_{pxR1} 后左 C_{pxL2} 后右 C_{pxR2} 、二系悬挂纵向刚度左 K_{sxL1} 右 K_{sxR1} 、横向刚度左 K_{syL1} 右 K_{syR1} 、垂向刚度左 K_{szL1} 右 K_{szR1} 、二系悬挂横向阻尼左 C_{syL1} 右 C_{syR1} 、垂向阻尼左 C_{szL1} 右 C_{szR1} , 共计 26 个输入参量服从独立正态分布情况下临界速度的变化规律.

各输入参量的均值取其名义值, 变异系数取 0.05. 根据文献[15]可知采用二阶 Hermite 多项式得到的拟合关系式已经足够精确, 26 维二阶多项式有 378 个未知系数, 采用拉丁超立方抽样的 5 000 个数

据点拟合 Hermite 正交多项式得到转向架临界速度输出和输入参量之间的关系式,然后利用得到的函数表达式进行区域灵敏度分析.

3.1 区域灵敏度指标

转向架系统各参量的灵敏度指标如表 1 所示. 表中第 3 列和第 4 列分别为由式(13)区域均值比 HM 和式(14)区域方差比 HV 计算得到的灵敏度指标,第 2 列给出的经典 Sobol 全局灵敏度指标结果作为参照解. 由表 1 可知,由于车辆系统左右悬挂参量的对称性,因此左右对称型的悬挂参量灵敏度指标基本一致,这也部分印证了区域灵敏度指标计算结果的有效性. 而且,各悬挂参量的灵敏度指标值越大,代表对应参量对输出临界速度的贡献也越大. 由 3 种方法得到的参量重要性排序是一致的,按重要程度

从大到小排序,前 4 组重要参量依次是:二系悬挂横向阻尼(C_{sy1})、连接到 2 位轮对的一系悬挂横向刚度(K_{py2})、连接到 1 位轮对的一系悬挂横向刚度(K_{py1})、连接到 1 位轮对的一系悬挂纵向刚度(K_{px1}).

4 组重要参量的 Sobol 指标与区域灵敏度指标对比直方图如图 2 所示. 由图 2 可知,各重要输入参量的 3 种灵敏度指标几乎一致,即通过与 Sobol 灵敏度指标对比验证,确定了区域均值比和区域方差比计算结果的有效性,通过区域均值比和区域方差比三维图,可以确定各重要参量区间变化引起的临界速度均值和方差的变化规律.

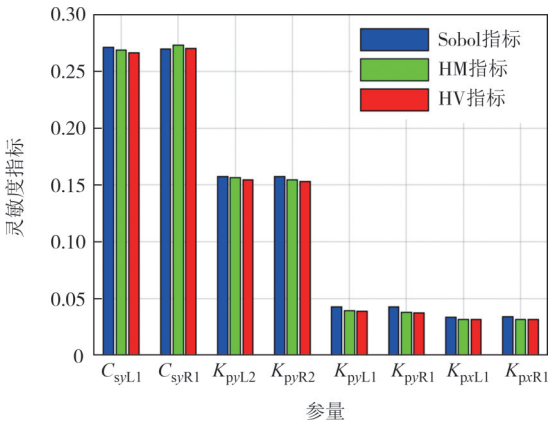


图 2 4 组重要参量的 Sobol 指标与区域灵敏度指标对比直方图

Fig.2 Histogram of Sobol sensitivity indices and regional sensitivity indices for four groups of important parameters

表 1 转向架系统各参量的灵敏度指标

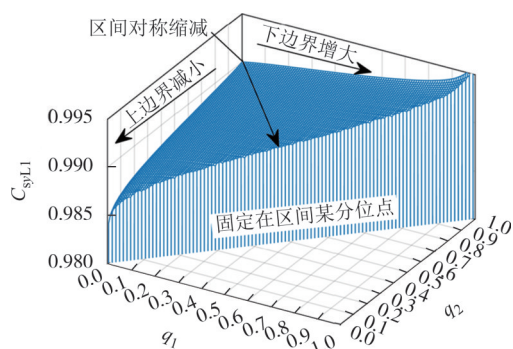
Tab.1 Sensitivity indices of suspension parameters of bogie system

参量	灵敏度指标		
	Sobol	HM	HV
K_{pxL1}	0.033 5	0.031 8	0.031 5
K_{pxR1}	0.034 0	0.031 8	0.031 4
K_{pxL2}	0.003 8	0.000 5	0.000 4
K_{pxR2}	0.003 8	0.000 5	0.000 5
K_{pyL1}	0.042 6	0.039 1	0.038 7
K_{pyR1}	0.042 5	0.037 8	0.037 4
K_{pyL2}	0.157 7	0.156 3	0.154 6
K_{pyR2}	0.157 7	0.154 7	0.153 1
K_{pzL1}	0.003 8	0.000 3	0.000 3
K_{pzR1}	0.003 8	0.000 3	0.000 3
K_{pzL2}	0.003 8	0.000 4	0.000 3
K_{pzR2}	0.003 8	0.000 5	0.000 4
K_{sxL1}	0.006 5	0.003 4	0.003 4
K_{sxR1}	0.006 8	0.003 1	0.003 0
K_{syL1}	0.008 8	0.005 6	0.005 5
K_{syR1}	0.009 0	0.004 8	0.004 7
K_{szL1}	0.003 8	0.000 4	0.000 4
K_{szR1}	0.003 8	0.000 4	0.000 4
C_{pxL1}	0.003 8	0.000 3	0.000 3
C_{pxR1}	0.003 8	0.000 4	0.000 4
C_{pxL2}	0.003 8	0.000 3	0.000 3
C_{pxR2}	0.003 8	0.000 5	0.000 4
C_{syL1}	0.271 3	0.269 1	0.266 4
C_{syR1}	0.269 9	0.273 1	0.270 3
C_{szL1}	0.003 8	0.000 4	0.000 3
C_{szR1}	0.003 8	0.000 4	0.000 4
SUM	1.092 8	1.016 1	1.005 0

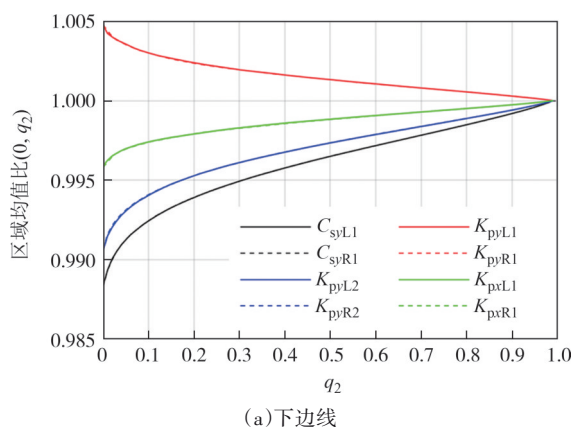
3.2 区域均值比函数 HM

图 3 为左二系横向阻尼(C_{syL1})区域均值比函数三维图. 由图 3 中可以读出任一分位点(q_1, q_2)($0 \leq q_1 < q_2 \leq 1$)对应的区域均值比数值. 为了更进一步说明三维图的含义,可以取不同的截面投影图进行分别说明. 定义曲线 $HM_i(0, q_{i(2)})$ 为下边线,用于描述输入参量分布区间上边界减小时对应的输出均值变化; $HM_i(q_{i(1)}, 1)$ 为上边线,用于描述输入参量分布区间下边界增大时输出均值的变化; $HM_i(q_i, 1 - q_i)$ 为反对角线,此时 $q_{i(1)} = q_i, q_{i(2)} = 1 - q_i, q_i \in [0, 0.5]$,用于描述输入参量分布区间上下边界对称缩减时输出均值的变化; $HM_i(q_i, q_i)$ 为对角线,此时 $q_{i(1)} = q_{i(2)} = q_i$,用于描述输入参量固定在区间某分位点时输出均值的变化.

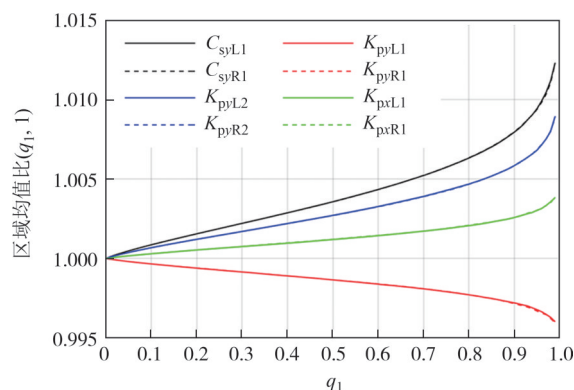
由式(7)计算得到转向架系统临界速度 4 组重要参量的区域均值比 HM 曲线如图 4 所示. 由图 4(a)

图3 左二系横向阻尼(C_{syL1})区域均值比函数三维图Fig.3 3D plot of regional mean ratio function of the left and second lateral damper (C_{syL1})

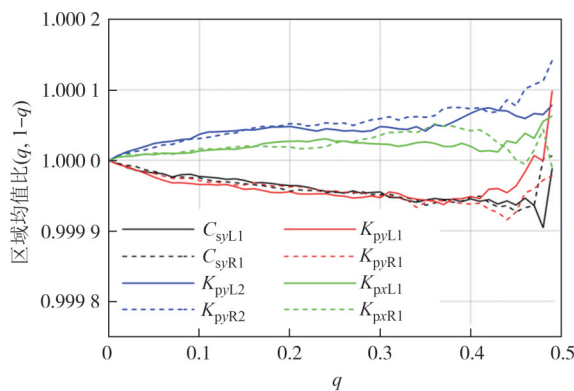
可知,从右向左观察,当4组参量的上边界缩减时,连接到1位轮对的一系悬挂横向刚度 K_{py1} 可使临界速度均值升高,其他3组参量均使其降低,且影响从大到小依次为 C_{sy1} 、 K_{py2} 和 K_{px1} .当 K_{py1} 的上边界减小到 $q_2=0.2$ 时,临界速度均值提高0.23%,此时 C_{sy1} 、 K_{py2} 、 K_{px1} 分别使临界速度均值降低0.61%、0.47%、0.21%.由图4(b)可知,从左向右观察可得,当4组参量的下边界增加时,连接到1位轮对的一系悬挂横向刚度 K_{py1} 可使临界速度均值降低其他3组参量均使临界速度均值升高.当 K_{py1} 的下边界增加到 $q_1=0.8$ 时,临界速度均值降低0.23%,此时 C_{sy1} 、 K_{py2} 、 K_{px1} 分别使临界速度均值升高0.63%、0.47%、0.21%.由图4(c)可知,当4组参量的上下边界对称缩减时, K_{py2} 和 K_{px1} 使临界速度均值升高,而 C_{sy1} 和 K_{py1} 会使其降低,但影响都比较小.由图4(d)可知,当4组参量固定在 $q=0.5$,即参量均值处时,区域均值比为1;当4组参量固定在 $q<0.5$ 的分位点时, K_{py1} 对临界速度均值的增大起正作用效果,而 C_{sy1} 、 K_{py2} 、 K_{px1} 则起负作用效果;当4组参量固定在 $q>0.5$ 的分位点时,作用效果则与 $q<0.5$ 时基本相反.



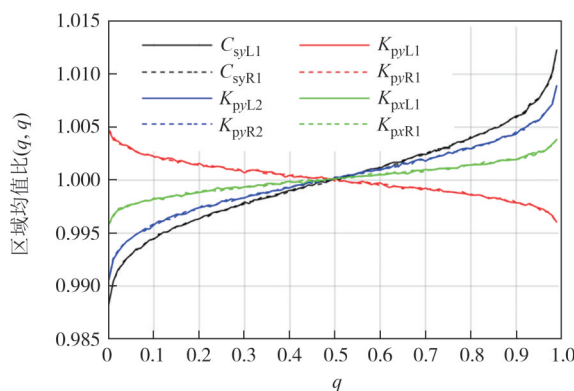
(a)下边线



(b)上边线



(c)反对角线



(d)对角线

图4 转向架系统临界速度4组重要参量的区域均值比HM曲线

Fig.4 Curves of HM of the regional mean ration function for four groups of important parameters of the critical speed of the bogie system

3.3 区域方差比函数HV

由式(8)计算得到转向架系统临界速度4组重要参量的区域方差比HV曲线,如图5所示.由图5(a)可知,当上边界减小时, K_{py1} 会使临界速度方差增大,不利于车辆稳定临界速度的控制,其他3组对减小临界速度的方差的影响从大到小依次是 C_{sy1} 、 K_{py2} 和 K_{px1} .当上边界减小到 $q_2=0.3$ 时, C_{sy1} 、 K_{py2} 、 K_{px1} 可分别使临界速度方差减小22.5%、10.6%、1.7%.由图5(b)

可知,当下边界增加时,4组参量都可以使方差减小,影响从大到小分别是 C_{sy1} 、 K_{py2} 、 K_{py1} 和 K_{px1} . 当 $q_1=0.7$ 时,4组参量分别使临界速度方差减小 16.5%、11.6%、6.3%、3.5%. 由图 5(c)可知,在整个区间对称缩减的范围内, C_{sy1} 和 K_{py2} 对临界速度方差的影响都要大于 K_{py1} 和 K_{px1} . 当 $q=0.4$ 时, C_{sy1} 和 K_{py2} 可使临界速度方差分别减小 26.4% 和 16.0%, K_{py1} 和 K_{px1} 只能使临界速度方差分别减小 3.6% 和 2.9%. 由图 5(d)可知,尽管此区域计算点相对较少,曲线不如前面几幅图平滑,但整体变化趋势仍清晰可见;将 C_{sy1} 固定在 $q=0$ 分位点, K_{py1} 和 K_{px1} 固定在 $q=1.0$ 分位点,对减小临界速度方差比较有利,而对 K_{py2} 来说,固定在任何分位点,对临界速度方差减小影响都不大.

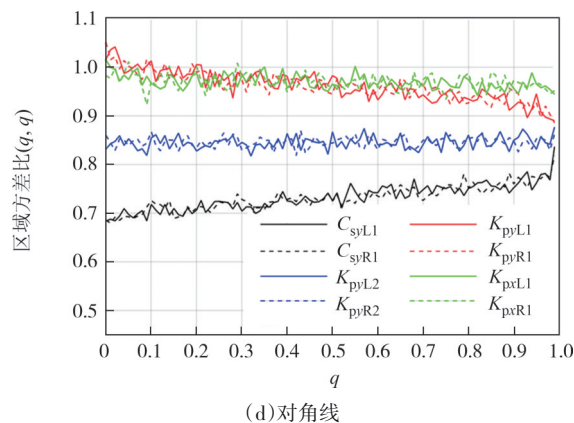
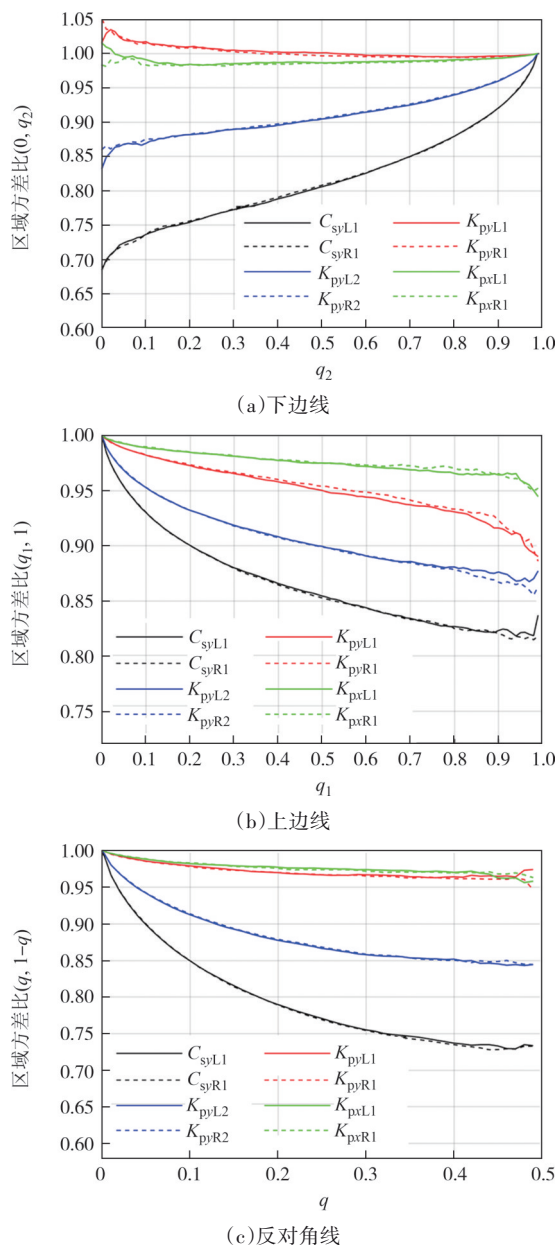


图 5 转向架系统临界速度 4 组重要参量的区域方差比 HV 曲线

Fig.5 Curves of HV of the regional variance ratio function for four groups of important parameters of the critical speed of the bogie system

综合分析区域均值比 HM 和区域方差比 HV 的变化规律,可以达到使临界速度均值增大、临界速度方差减小的目标. 以 C_{sy1} 的下边线为例,减小分布区间上界,会使临界速度均值减小,是不利的,但同时会使输出方差减小,是有利的. 考虑当 C_{sy1} 的上边界减小到 $q_{i(2)}=0.2$ 时,能产生约 25% 的方差减小量,但只产生约 0.6% 的均值减小量,总的来说,减小 C_{sy1} 上边界是有利的. 因此,在设计某一参量具体值和区间控制方案时,若对临界速度均值和方差产生的作用效果并非同时有利,可进行类似分析,确定较有利的参量设计值及其变化范围.

4 结论

为了量化随机悬挂参量对铁道车辆临界速度的影响规律和大小,建立两轴转向架模型,基于 Hermite 正交多项式,采用拉丁超立方抽样拟合确定了转向架临界速度与悬挂随机参量之间的近似函数关系,应用得到的代理模型对转向架系统进行区域灵敏度分析,得到以下结论:

1) 区域灵敏度可以给出和全局灵敏度同样精确的悬挂参量重要性排序结果,对转向架系统的研究表明,二系悬挂横向阻尼对临界速度的影响最为显著.

2) 通过 HM 和 HV 三维图的下边线、上边线、反对角线、对角线等截面投影,可分析悬挂参量在分布区间上边界减小、下边界增大、区间对称缩减、固定在区间某分位点时,临界速度均值和方差相对于原

有区间的变化规律.增大二系悬挂横向阻尼值并减小其变化范围,可以有效提高临界速度并减小其方差,可以为车辆系统的设计和控制等提供理论基础.

参考文献

- [1] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015: 1-115.
ZHAI W M. Vehicle-track coupled dynamics [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015: 1-115. (in Chinese)
- [2] IWNIKI S, SPIRYAGIN M, COLE C, et al. Handbook of railway vehicle dynamics [M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2020: 5-42.
- [3] 机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范: GB/T 5599—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
Specification for dynamic performance assessment and testing verification of rolling stock: GB/T 5599—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019. (in Chinese)
- [4] SUN J F, CHI M R, JIN X S, et al. Experimental and numerical study on carbody hunting of electric locomotive induced by low wheel-rail contact conicity [J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(2): 203-223.
- [5] 朱志辉, 夏禹涛, 王力东, 等. 基于GPU的车辆-轨道-地基土耦合系统3D随机振动并行计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(7): 79-88.
ZHU Z H, XIA Y T, WANG L D, et al. A parallel computing method for three-dimensional random vibration of train-track-soil dynamic interaction based on GPU [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(7): 79-88. (in Chinese)
- [6] 王鹏, 杨绍普, 刘永强, 等. 轮对非线性动力学模型稳定性和分岔特性研究[J]. 力学学报, 2023, 55(2): 462-475.
WANG P, YANG S P, LIU Y Q, et al. Investigation of stability and bifurcation characteristics of wheelset nonlinear dynamic model [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(2): 462-475. (in Chinese)
- [7] ZHENG B, WEI L, ZENG J, et al. Experimental and numerical investigation of bogie hunting instability for railway vehicles based on multiple sensors [J]. Sensors, 2024, 24(12): 4027.
- [8] BIGONI D, ENGSIG-KARUP A P, TRUE H. Comparison of classical and modern uncertainty qualification methods for the calculation of critical speeds in railway vehicle dynamics [C]// Proceeding of 13th Mini Conference on Vehicle System Dynamics, Identification and Anomalies, November 5, 2012. Budapest, Hungary: The Technical University of Denmark, 2012.
- [9] 罗仁, 李然, 胡俊波, 等. 考虑随机参数的高速列车动力学分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 90-96.
LUO R, LI R, HU J B, et al. Dynamic analysis of high-speed train with stochastic parameters [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 90-96. (in Chinese)
- [10] 高学军, 李映辉. 转向架临界速度的不确定性研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(3): 56-61.
GAO X J, LI Y H. Uncertainty analysis of the critical speed of a railway bogie [J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(3): 56-61. (in Chinese)
- [11] GAO X J, YANG L. Effect of passenger uncertainty on the inertial property and stability of a railway vehicle [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2024, 46(10): 626.
- [12] 张兆丰. 铁道客车动力学性能灵敏度分析及稳健设计[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
ZHANG Z F. Sensitivity analysis and robust design of dynamic performance of railway passenger vehicle [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [13] 李利军, 沈文林, 池茂儒. 稳健性优化方法在铁道车辆优化中的应用[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(6): 146-149.
LI L J, SHEN W L, CHI M R. Application of robust optimization method to the optimization of railway vehicle [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(6): 146-149. (in Chinese)
- [14] BIGONI D, TRUE H, ENGSIG-KARUP A P. Sensitivity analysis of the critical speed in railway vehicle dynamics [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(Sup.1): 272-286.
- [15] GAO X J, TRUE H, LI Y H. Sensitivity analysis of the critical speed in a railway bogie system with uncertain parameters [J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(2): 224-244.
- [16] GARG V K, DUKKIPATI R V. 铁道车辆系统动力学[M]. 沈利人, 译. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 57-267.
GARG V K, DUKKIPATI R V. Dynamics of railway vehicle systems [M]. Translated by SHEN L R. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998: 57-267. (in Chinese)
- [17] WALTER K. ACRadSchienen-to create or approximate wheel/rail profiles [R]. Berlin: ArgeCare, 2012.
- [18] TRUE H. Multiple attractors and critical parameters and how to find them numerically: the right, the wrong and the gambling way [J]. Vehicle System Dynamics, 2013, 51(3): 443-459.
- [19] BRAMS C. Spectral methods for uncertainty quantification [D]. Kongens Lyngby: The Technical University of Denmark, 2013.
- [20] WEI P F, LU Z Z, RUAN W B, et al. Regional sensitivity analysis using revised mean and variance ratio functions [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 121: 121-135.
- [21] 魏鹏飞. 结构系统可靠性及灵敏度分析研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
WEI P F. Research on the reliability and sensitivity analysis of structural systems [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015. (in Chinese)
- [22] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2001, 55(1/3): 271-280.