

转向架临界速度的不确定性研究^{*}

高学军^{1†} 李映辉²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

(2. 西南交通大学 力学与工程学院, 成都 610031)

摘要 铁道车辆临界速度与很多参量有关, 如何准确有效地建立它们之间的函数关系进行不确定性研究是一个比较复杂的问题. 基于此, 推导高维多阶基于正态分布场的 Hermite 正交多项式, 采用拉丁超立方采样的配点方式建立某转向架临界速度与随机参量之间的函数关系; 分析了不同变异系数下转向架悬挂系统部件左/右、前/后均服从独立正态分布时临界速度的变化规律. 可靠性分析的结果表明: 随着变异系数的不断增加, 只有取较低的临界速度限定值, 才能保证转向架系统具有低的失效概率. 灵敏度分析的结果则显示: 二系悬挂横向阻尼对临界速度影响最大, 不同的前/后悬挂部件对临界速度有着不同的重要性影响, 变异系数的变化不会根本性改变参量的灵敏度指标排序.

关键词 转向架, 临界速度, 可靠性, 灵敏度, 傅里叶幅值检验扩展法 (FAST)

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-032

引言

铁道车辆自激振动临界速度的计算与稳定性评价一直是铁路工程师和科研工作者非常关心的话题, 而临界速度与很多因素有关, 如车辆构造、轨道结构、轮轨接触状态等. 传统的临界速度确定方式是在理论计算、振动台实验和线路测试的基础上, 引入一定的安全系数进行折减, 以保证整个车辆系统在使用周期内的安全运行. 实际上, 由于制造、安装、使用等原因, 铁道车辆系统中存在大量的不确定因素, 这些不确定因素导致车辆临界速度实际并不是“一个值”, 而是“一组值”. 在判断车辆临界速度是否可靠时, 采用能充分考虑到车辆系统中存在着诸多不确定性因素的可靠指标或失效概率来表达更具有实际意义.

对铁道车辆稳定可靠性方面的研究, 国内外近些年已开展了一些研究工作. Kewlani 等^[1]采用蒙特卡罗方法、广义多项式混沌方法和多单元广义多项式混沌方法 (multi-element generalized polynomial method) 研究了不确定地形参数或不确定车辆参数下车辆系统的动力学性能, 结果表明多单元广义多项式混沌方法要优于广义多项式混沌方法, 而广义

多项式混沌方法又优于蒙特卡罗方法. Mazzola 等^[2]研究了服从正态分布的悬挂参数不确定对车辆临界速度的影响, 主要采用的是一阶 Taylor 展开方法、拉丁超立方抽样的蒙特卡罗方法和基于实验设计理论 (design of experiment theory) 的蒙特卡罗方法. Bigoni 等^[3]应用蒙特卡罗方法、拟蒙特卡罗方法和基于随机配置法 (stochastic collocation method, SCM) 的广义多项式混沌方法对两自由度 Cooperrider 转向架模型稳定可靠性进行了分析, 主要考查的是横向刚度和阻尼以及摇头刚度服从正态分布的情形, 研究了这三种不确定因素单一或组合作用时车辆临界速度的变化规律, 得出基于随机配置法的广义多项式混沌方法计算效率最高的结论.

另一方面, 不同的不确定参数所引起的铁道车辆临界速度的不确定性程度是不同的, 这就涉及到参数的灵敏度^[4]问题. 在车辆临界速度灵敏度分析方面, Suarez 等^[5]将车体、构架、轮对的质量和惯量及重心的高度看成是随机参量, 共进行了 216 次动力学仿真来计算车辆动力学性能指标的灵敏度, 发现质量和绕垂向轴的转动惯量对车辆动力学性能影响最大. Bigoni^[6]应用一次变化一个的方式计算了

2019-06-16 收到第 1 稿, 2020-03-16 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (11972095, 11872319)

[†] 通讯作者 E-mail: gaouxj3000@sina.com

两轴 Cooperrider 转向架悬挂系统参量对临界速度影响的局部灵敏度,并进一步应用基于随机配置法的代理模型方法、拉丁超立方抽样的蒙特卡罗方法计算临界速度的全局灵敏度.余衍然等^[7]采用傅里叶幅值检验扩展法分析了铁道车辆悬挂系统的刚度与阻尼对沉浮运动影响的全局灵敏度,发现一二系悬挂系统阻尼对沉浮运动影响较大.虽然可靠度理论与灵敏度方法在铁道车辆工程领域得到了较为广泛的应用,但在车辆稳定可靠性及灵敏度方面的研究还很初浅.

本文在前人研究工作的基础上,以一转向架系统为研究对象,先分析确定参量系统的临界速度,后考虑悬挂部件的不确定性,研究不同变异系数时转向架临界速度的统计特征和失效概率,并进一步探讨不同随机参量对临界速度影响的 FAST 全局灵敏度指标.研究结果可为车辆的设计、运行、稳定性综合评价及后期的维护等提供参考和依据.

1 转向架模型描述

考虑一两轴转向架系统如图1所示,整个系统由一个构架(M_t, I_{tx}, I_{tz}),两个轮对(M_w, I_{wx}, I_{wz}),一系悬挂刚度(K_{px}, K_{py}, K_{pz})和阻尼(C_{px}, C_{py}, C_{pz})及二系悬挂刚度(K_{sx}, K_{sy}, K_{sz})和阻尼(C_{sx}, C_{sy}, C_{sz})构成.假设转向架在理想平直,且没有任何不平顺的轨道上运行.

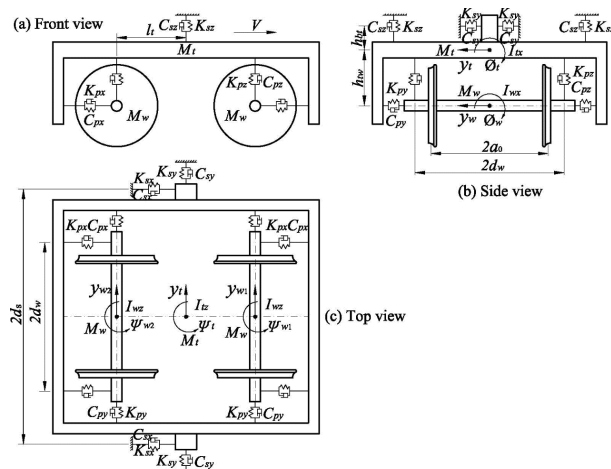


图1 两轴转向架系统

Fig.1 A two-axle railway bogie

为了简化计算,分析中只考虑各个刚体的横向运动,整个系统共有7自由度,即构架的横移、摇头、侧滚运动和两个轮对的横移和摇头运动.如果用 $\mathbf{X}$ 表示由各个刚体运动组成的位移向量,则整个转向架系统的运动可用7个互相耦合的二阶常微

分方程组表示^[8]:

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

式中, $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别代表系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵,可由转向架系统的质量/惯量、刚度/阻尼等计算得到; V 为转向架运行速度; $\mathbf{F}$ 表示荷载向量,主要由轮轨接触力计算并转换得出.

考虑国内常用的 LM 型车轮踏面和 60kg/m 钢轨型面,轨底坡 1/40,标准轨距 1435mm,轮对内侧距 1353mm.采用更切实际的 RSgeo^[9] 计算轮轨接触参量,可以得到轮轨接触点的静态法向力,并进一步通过沈氏蠕滑理论^[10] 计算轮轨接触点的蠕滑力,再将两种力通过坐标变换转换到轨道坐标系内,即可形成荷载向量 $\mathbf{F}$.

由方程(1)表示的转向架系统往往是强非线性、非光滑的,解析方法很难求解,因此可以采用数值积分得到各个刚体的位移响应

$$\mathbf{X} = \mathbf{f}(t, V, \mathbf{X}_0) \quad (2)$$

$\mathbf{X}_0$ 表示初始位移向量.

由式(2)确定的系统解集可能是定常运动、周期运动,也可能是拟周期运动或混沌运动.稳定周期运动存在的最小速度,且小于该速度时定常运动是唯一且渐近稳定的,即为转向架的临界速度^[11].

2 分析方法

对转向架系统进行临界速度的不确定性研究时,需要获得成千上万组参量组合时的临界速度.如果基于蒙特卡罗法进行分析,则计算量非常庞大,可操作性大大受到限制,因此可以考虑借助代理模型的方法进行研究.

当随机参量是独立且正态分布时,可以采用 Hermite 正交多项式方法^[12] 近似表达临界速度输出与输入参量之间的函数关系,用来代替难以直接表达的真实函数关系,再用得到的函数表达式进行可靠性计算及灵敏度分析.在具体计算时,需要先将输入随机变量用一系列标准正态分布随机向量 $\mathbf{U} = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}^T$ (n 为随机变量的个数)表示,并将临界速度 $R(\mathbf{U})$ 也表示为以标准正态分布随机变量为自变量的 Hermite 正交多项式形式

$$R(\mathbf{U}) = a_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} H_1(U_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1, i_2} H_2(U_{i_1}, U_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1, i_2, i_3} H_3(U_{i_1}, U_{i_2}, U_{i_3}) + \dots \quad (3)$$

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, $H_m(U_{i_1}, U_{i_2}, \dots, U_{i_m})$ 为 m 阶 Hermite 正交多项式, 可表示为

$$H_m(U_{i_1}, U_{i_2}, \dots, U_{i_m}) = (-1)^m e^{\frac{1}{2}U^T U} \frac{\partial^m}{\partial U_{i_1} \partial U_{i_2} \dots \partial U_{i_m}} \left(e^{-\frac{1}{2}U^T U} \right) \quad (4)$$

为了求解式(3)中的待定系数, 需要生成标准正态分布随机变量的配点值, 并用确定性分析方法计算配点处的函数值, 然后通过配点值及函数值拟合 Hermite 正交多项式中的待定系数, 即可得到函数的具体表达式, 最后通过表达式可进一步计算系统输出的统计特征值。

在灵敏度分析方法方面, 采用计算量较小, 精度较高的基于方差分解的 FAST 法^[13] 计算转向架临界速度的全局灵敏度指标, 分析各个参量对临界速度的贡献大小。参量 P_i 的 FAST 灵敏度指标 S_i 计算表达式为

$$S_i = \frac{V(E(R|P_i))}{V(R)} \quad (5)$$

式中 $E()$ 和 $V()$ 分别代表均值和方差。

3 数值计算结果与分析

3.1 确定性研究

以某高速客车的转向架为研究对象, 转向架系统各参量的取值可参看文献[14]中的准高速车, 轮轨粘着系数均取为 0.3。

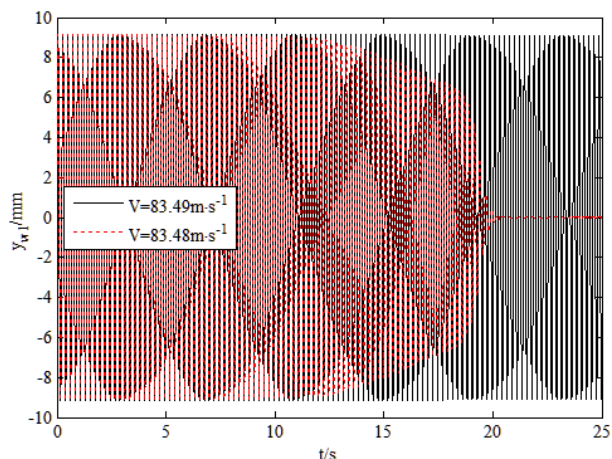


图2 两种速度下前导轮对横向位移时间历程图

Fig.2 Time series of the lateral motion of the leading wheel set at two different speeds

图2给出的是相同初始条件下速度分别为 $V=83.49\text{m/s}$ 和 $V=83.48\text{m/s}$ 时前导轮对横向位移时间历程图。由图可以看出, 当速度 $V=83.49\text{m/s}$ 时, 前导轮对以 9.1635mm 的幅值作周期运动, 即转向架

系统处于蛇行运动状态; 当速度下降到 $V=83.48\text{m/s}$ 时, 前导轮对横向运动随着时间的增加逐渐衰减到定常解的平衡位置。这说明该转向架系统的临界速度为 $V_{cr}=83.49\text{m/s}$ 。

3.2 不确定性研究-可靠性研究

研究转向架系统一系悬挂纵向、横向、垂向刚度, 一系悬挂垂向阻尼左/右、前/后各不相同; 二系悬挂纵向、横向、垂向刚度, 二系悬挂横向、垂向阻尼左/右也各不相同同时临界速度的变化规律, 总共考虑 26 个参量的随机变化。分析中假定这些参量独立且服从正态分布, 均值取其名义值, 通过变异系数确定标准差, 所有随机变量具有相同的变异系数, 是一个典型的高维非线性铁道车辆系统的稳定可靠性问题。

图3给出的是不同变异系数临界速度概率密度曲线, 应用不同颜色表示了变异系数 C_v 分别为 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25 时临界速度的变化规律。首先采用拉丁超立方采样的 5000 个数据点拟合二阶 Hermite 正交多项式式(3)得到转向架系统临界速度输出与输入随机参量之间的 Hermite 正交多项式。之后应用表达式计算 100000 个数据点计算得到的结果。由图可以看出, 由于转向架系统存在许多的不确定参量, 因此临界速度实际是“一组值”。进一步分析发现, 随着变异系数的不断增大, 概率密度曲线从高耸逐渐向平缓变化, 曲线带宽也逐渐变大, 说明临界速度分布范围变得更加离散。

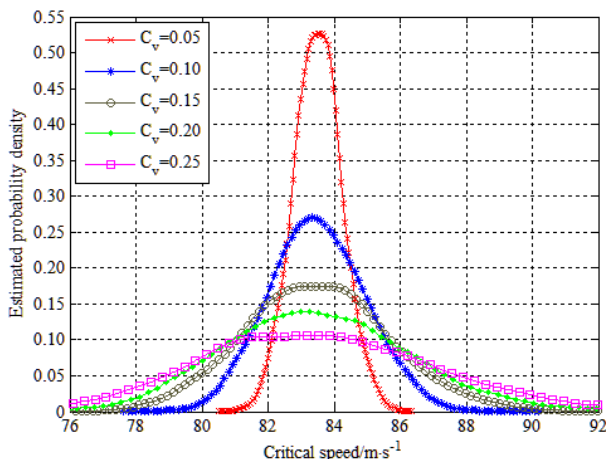


图3 不同变异系数临界速度概率密度曲线

Fig.3 Estimated probability density of the critical speed at different coefficients of variation

表1给出的是不同变异系数临界速度的统计特征。分析发现, 随着变异系数的增加, 临界速度标准差逐渐增大, 最小值越来越小, 最大值越来越大,

两者之间的极差则逐渐加大,进一步说明了临界速度分布范围越来越离散.同时也发现,所有偏度系数都大于零且越来越大,说明临界速度分布右侧具有较长的尾部且越来越长;而峰度系数都大于3,则说明临界速度与正态分布相比更加集中且有比正态分布更短的尾部.由于考虑的是独立正态分布的随机参量变化,因此临界速度的均值无明显变化,当取83.49m/s为失稳临界速度限定值时,失效概率约为0.5左右;若以80.0m/s或75.0m/s为临界速度限定值时,则失效概率降低不少,速度限定值越低,失效概率也越小.对相同的速度限定值,随着变异系数的增大,失效概率则明显增加.

表1 不同变异系数临界速度的统计特征					
Table 1 Statistical characteristics of the critical speed at different variation coefficients					
Statistical characteristics	$C_v=0.05$	$C_v=0.10$	$C_v=0.15$	$C_v=0.20$	$C_v=0.25$
Mean	83.4986	83.4957	83.4972	83.5243	83.5900
Standard deviation	0.7222	1.4475	2.1742	2.9056	3.6593
Range	6.1303	12.7893	20.1380	29.3382	40.1458
Minimum	80.6408	77.6807	74.9845	71.7034	67.8465
Maximum	86.7711	90.4700	95.1224	101.0417	107.9923
Skewness	0.0515	0.1210	0.2059	0.3197	0.4222
Kurtosis	3.0085	3.0561	3.1431	3.3550	3.6216
Failure probability(83.49)	0.4988	0.5065	0.5124	0.5159	0.5163
Failure probability(80.00)	0.0000	0.0061	0.0475	0.1033	0.1530
Failure probability(75.00)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0008	0.0048

3.3 不确定性研究-灵敏度分析

图4给出的是转向架系统变异系数 $C_v=0.05$ 时非零FAST灵敏度指标直方图.按一般情况考虑,利用式(3)共计算了40981个数据点计算得到的结果.图中横坐标轴上标识的字母中,K和C分别代表刚度和阻尼,p和s则分别代表一系悬挂和二系悬挂,L和R则代表转向架左侧和右侧的悬挂部件,1和2代表连接到1位和2位轮对的悬挂部件.由图可以看出,左/右对称型的刚度或阻尼具有基本相同的灵敏度指标,初步说明了计算结果的正确性.进一步的分析发现,绛红色的直方图明显大于其它颜色的图,说明二系悬挂横向阻尼对车辆稳定性影响最大.整个灵敏度指标排序是:二系悬挂横向阻尼(C_{sy})>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})>二系悬挂横向刚度(K_{sy})>二系悬挂纵向刚度(K_{sx}),其它参量在所考察的参量变化区间对临界速度影响很小.

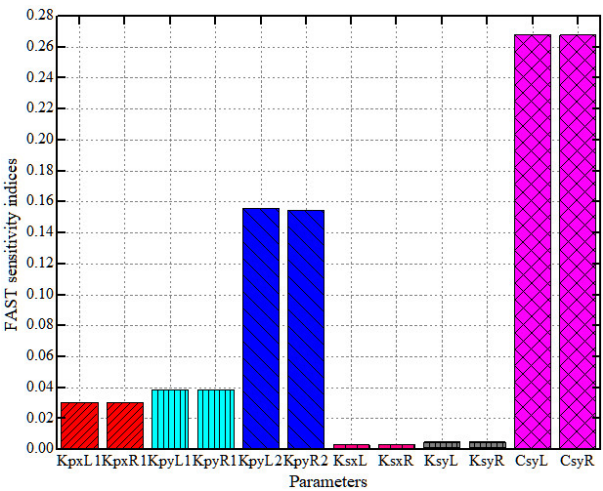


图4 变异系数 $C_v=0.05$ 时非零FAST灵敏度指标直方图
Fig.4 Histogram of the non-zero FAST sensitivity indices at variation coefficient of $C_v=0.05$

图5给出的是不同变异系数时FAST灵敏度指标最大的四个参量直方图.对某个参量,取左右的平均值进行计算绘图.由图可以看出,随着变异系数的增大,二系悬挂横向阻尼(C_{sy})和连接到2位轮对的一系悬挂横向刚度(K_{py2})灵敏度指标有所降低,而连接到1位轮对的一系悬挂横向刚度(K_{py1})和连接到1位轮对的一系悬挂纵向刚度(K_{px1})则有些许升高.

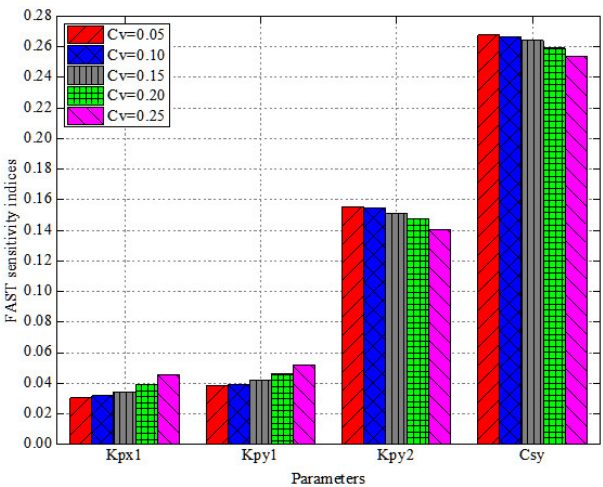


图5 不同变异系数时FAST灵敏度指标最大的四个参量直方图
Fig.5 Histogram of the four largest FAST sensitivity indices at different variation coefficients

表2给出了不同变异系数临界速度的归一化FAST灵敏度指标值.由表可知,除上面提到的参量外,二系悬挂纵向刚度(K_{sx})和二系悬挂横向刚度(K_{sy})也随变异系数的增加而增大,但在确定的变异系数下,灵敏度指标的排序并没有发生根本性变化.进一步分析一系悬挂的刚度部件发现,连接到1位轮对和2位轮对的横向及纵向刚度对临界速度的影响程度是不一样的,连接到1位轮对的纵向刚度对临界速度影响较大,而连接到2位轮对的纵向刚度对临界速度基本没有影响;连接到2位轮对的一系悬挂横向刚度对临界速度的重要性程度要大于连接到1位轮对的一系悬挂横向刚度.单就转向架系统临界速度而言,说明可以采用前后不对称的一系悬挂部件设置来提高车辆临界速度,以降低生产安装成本并达到高的速度安全裕度.

表2 不同变异系数临界速度的归一化FAST灵敏度指标值
Table 2 Normalized FAST sensitivity indices of the critical speed at different variation coefficients

Parameter	$C_v=0.05$	$C_v=0.10$	$C_v=0.15$	$C_v=0.20$	$C_v=0.25$
KpxL1	0.0305	0.0317	0.0342	0.0396	0.0449
KpxR1	0.0305	0.0318	0.0346	0.0388	0.0461
KpxL2	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003
KpxR2	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0003
KpyL1	0.0385	0.0394	0.0417	0.0453	0.0516
KpyR1	0.0386	0.0394	0.0423	0.0465	0.0514
KpyL2	0.1556	0.1546	0.1510	0.1487	0.1407
KpyR2	0.1547	0.1542	0.1515	0.1465	0.1397
KpzL1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
KpzR1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
KpzL2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
KpzR2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
KsxL	0.0029	0.0029	0.0030	0.0030	0.0029
KsxR	0.0029	0.0029	0.0029	0.0026	0.0030
KsyL	0.0049	0.0050	0.0049	0.0053	0.0060
KsyR	0.0049	0.0049	0.0050	0.0048	0.0050
KszL	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
KszR	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CpzL1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CpzR1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CpzL2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CpzR2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CsyL	0.2679	0.2667	0.2642	0.2604	0.2545
CsyR	0.2679	0.2663	0.2646	0.2580	0.2535
CszL	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CszR	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
sum	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

4 小结

本文针对铁道车辆临界速度与随机参量之间的函数关系难以具体表达的问题,推导了高维多阶基于正态分布场的Hermite正交多项式,采用拉丁超立方采样的配点方式建立了转向架临界速度与随机参量之间的二阶Hermite函数表达式.研究了一、二系悬挂含有26个变量的转向架系统临界速度的可靠性和灵敏度,发现如果以参量取平均值时的临界速度作为速度限定值,则转向架系统具有高的失效概率,只有取低一些的速度限定值,才能保证转向架系统具有低的失效概率.变异系数越大,速度限定值也越低.进一步的研究发现,在所考察的参量变化区间,二系悬挂横向阻尼对临界速度影响最大,不同的前/后悬挂部件对临界速度有着不同的影响,可以采用前/后不对称的悬挂部件方式来达到提高车辆临界速度,降低生产安装成本的目的.虽然不同的变异系数会导致灵敏度指标有小幅变化,但在确定的变异系数下,灵敏度指标的排序并没有发生根本性变化.

参 考 文 献

1 Kewlani G, Grawford J, Iagnemma K. A polynomial chaos approach to the analysis of vehicle dynamics under uncertainty. *Vehicle System Dynamics*, 2012, 50(5): 749~774

2 Mazzola L, Bruni S. Effect of suspension parameter uncertainty on the dynamic behaviour of railway vehicles. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 104: 177~185

3 Bigoni D, Engsig-Karup A P, True H. Modern uncertainty quantification methods in railroad vehicle dynamics. In: *Proceeding of the ASME 2013 Rail Transportation Division Fall Technical Conference (RTDF2013)*. Altoona, Pennsylvania, USA, October 15~17, 2013: 1~10

4 吕震宙, 宋述芳, 李洪双, 等. 结构机构可靠性及可靠性灵敏度分析. 北京: 科学出版社, 2009 (Lv Z Z, Song, S F, Li H S, et al. Reliability and reliability sensitivity analysis of structure and institution. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese))

5 Suarez B, Felez J, Maroto J, et al. Sensitivity analysis to assess the influence of the inertial properties of railway vehicle bodies on the vehicle's dynamic behaviour. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(2): 251~279

6 Bigoni D, True H, Engsig-Karup A P. Sensitivity analysis of the critical speed in railway vehicle dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(sup1): 272~286

- 7 余衍然,李成,姚林泉,等.基于傅里叶幅值检验扩展法的轨道车辆垂向模型全局灵敏度分析.振动与冲击, 2014, 33(6): 77~81 (Yu Y R, Li C, Yao L Q, et al. Global sensitivity analysis on vertical model of railway vehicle based on extended Fourier amplitude sensitivity test. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(6): 77~81 (in Chinese))
- 8 Gao X J, Li Y H, Yue Y, et al. Symmetric/asymmetric bifurcation behaviours of a bogie system. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(4): 936~951
- 9 Kik W. RSgeo and RSPR of programme for the simulation of the wheel/rail or the wheelset-roller kinematics. Technical University of Denmark, 2000
- 10 Shen Z Y, Hedrick J K, Elkins J A. A comparison of alternative creep force models for rail vehicle dynamic analysis. In: Proceeding of 8th IAVSD Symposium on Vehicle System Dynamics, Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. MIT, Cambridge: Swets and Zeitlinger, 1984, 591~605
- 11 True H. Multiple attractors and critical parameters and how to find them numerically: the right, the wrong and the gambling way. *Vehicle System Dynamics*, 2013, 51(3): 443~459
- 12 Xiu D B. Numerical methods for stochastic computations-a spectral method approach. Princeton: Princeton University Press, 2010
- 13 Saltelli A, Tarantola S, Chan K P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39~56
- 14 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学(第2版).北京:中国铁道出版社,2002 (Zhai W M. Vehicle-track coupling dynamics (2nd ed.), Beijing: China Railway Publishing House, 2002(in Chinese))

UNCERTAINTY ANALYSIS OF THE CRITICAL SPEED OF A RAILWAY BOGIE *

Gao Xuejun^{1†} Li Yinghui²

(1.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

(2.School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract The critical speed of railway vehicles is relevant to a lot of parameters. It is complicated to accurately and effectively construct functions among them for uncertainty analysis. In this paper, the high-dimensional Hermite orthogonal polynomial with high orders was derived based on the independent normal distribution, and the collocation method of Latin hypercube sampling was applied to construct the function with respect to the critical speed of a railway bogie with random parameters. The regularity of the critical speed with different variation coefficients was investigated on the condition that all the left/right and front/back suspension components of the bogie were independent normal distributions. It was indicated from reliability analysis that a lower limit value of the critical speed is the guarantee for low failure probability of the bogie with increasing variation coefficients. Moreover, the results of sensitivity analysis showed that the secondary lateral damping coefficient is the most important parameter to the critical speed. Different front/back suspension components usually have different influences to the critical speed. The rank order of sensitivity indices cannot be significantly impacted by the variation coefficients.

Key words railway bogie, critical speed, reliability, sensitivity, Fourier amplitude sensitivity test (FAST)

Received 16 June 2019, revised 16 March 2020.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11972095, 11872319)

† Corresponding author E-mail: gaoxj3000@sina.com