

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.051



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于可靠度理论的中低速磁浮车-桥系统轨道梁动力系数研究

王力东^{1a,1b,2}, 黎清蓉^{1a}, 卜秀孟^{1a}, 韩艳^{1a,1b}, 李凯²

(1. 长沙理工大学 a. 土木与环境工程学院; b. 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 长沙 410114;
2. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410004)

摘要:受轨道不平顺影响,磁浮车辆运行时轨道梁动力系数具有明显的不确定性。为准确计算轨道梁动力系数,建立由磁浮车辆、简支梁桥、悬浮控制系统组成的中低速磁浮列车-桥梁竖向耦合振动模型;结合正交随机函数思想和数论选点理论,提出轨道不平顺降维模拟方法,使得对不平顺代表样本的模拟仅需两个随机变量;基于概率密度演化理论和等价极值原理,提出轨道梁动力可靠性评估方法,该方法能准确获取动力系统的概率密度函数、累积分布函数以及轨道梁的动力可靠度。以长沙中低速磁浮线路为例,通过现场实测结果和蒙特卡罗法的计算结果对比,验证了计算方法的可靠性;进一步探讨车速、车重和轨道不平顺粗糙度对轨道梁动力系数和可靠度的影响。结果表明:60~140 km/h 车速范围内,轨道梁动力可靠度计算结果均为 1;车体重量对轨道梁动力系数影响较小,但轨道不平顺粗糙度影响显著。总体而言,长沙中低速磁浮 25 m 简支梁桥动力性能良好,安全富余度较大。

关键词:中低速磁浮;车-桥耦合振动;概率密度演化理论;动力系数;可靠度

中图分类号:U213.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)03-0190-11

Study on dynamic factors of the guideway beam of low and medium speed maglev vehicle-bridge system based on reliability theory

WANG Lidong^{1a,1b,2}, LI Qingrong^{1a}, BU Xiumeng^{1a}, HAN Yan^{1a,1b}, LI Kai²

(1a. School of Civil and Environmental Engineering; 1b. Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410004, P. R. China)

Abstract: Affected by the randomness of track irregularity, the dynamic factor of the guideway beam caused by the maglev vehicle has obvious uncertainty. In order to accurately calculate the reliability of the dynamic factors

收稿日期:2023-01-01

基金项目:国家自然科学基金(52208459、52178452);湖南省自然科学基金(2022JJ40496);中国博士后科学基金(2022M723004);长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金(22KB02)

作者简介:王力东(1990-),男,博士,副教授,主要从事轨道交通环境振动和风-车-桥耦合振动研究,E-mail:wangld@csust.edu.cn。

Received: 2023-01-01

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52208459, 52178452); Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2022JJ40496); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2022M723004); Open Fund of Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Ministry of Education (Changsha University of Science & Technology) (No. 22KB02)

Author brief: WANG Lidong (1990-), PhD, associate professor, main research interests: railway induced environmental vibration and wind-vehicle-bridge coupling vibration, E-mail: wangld@csust.edu.cn.

of the guideway beam, a vertical coupling vibration model of the medium and low speed maglev train-bridge system was established, which was composed of the maglev vehicle, the simply supported girder and the suspension control system. Then, combined with the idea of orthogonal random function and the strategy of selecting points by the number theory method, the reduced-dimension simulation method of track irregularity was developed, which repaired only two random variables to simulate the representative samples of the track irregularity. Finally, based on the probability density evolution method and the equivalent extreme-value principle, a reliability evaluation method for the guideway beam was proposed, by which the probability density function, the cumulative distribution function of the dynamic system and the dynamic reliability of the guideway beam can be accurately obtained. The Changsha low-medium speed maglev line, as a case study, was numerically analyzed. The reliability of the calculation model was verified by comparing with the results of field measurement and Monte Carlo method. Furthermore, the effects of vehicle speed, vehicle weight and track irregularity roughness on the dynamic factors and the reliability of the guideway beam were discussed. The results indicate that the reliability of the guideway beam is 1 within the speed range of 60 to 140 km/h. The weight of vehicle has a small effect on the dynamic coefficient of the guideway beam, but the effect of the track irregularity roughness is significant. Overall, the Changsha low and medium speed maglev 25 m simply supported girder bridge has good dynamic performance and a large safety margin.

Keywords: low and medium speed maglev; vehicle-bridge coupled vibration; probability density evolution method; dynamic factor; reliability

因具有环境友好、爬坡能力强、转弯半径小等优势,中低速磁浮交通系统在多个城市得到了推广和应用^[1]。该类型磁浮系统通过主动悬浮控制产生电磁吸力,使磁浮列车稳定悬浮在额定悬浮间隙(8~10 mm)附近。当磁浮列车在桥梁上运行时,桥梁结构会产生变形,悬浮间隙发生改变,影响电磁悬浮力,导致磁浮列车-桥梁系统间发生耦合振动^[2]。相比传统轮轨交通的桥梁,磁浮轨道梁刚度小、质量轻,因此,研究轨道梁系统在磁浮车辆动载作用下的冲击效应显得尤为重要^[3]。

工程上常采用动力系数(冲击系数)^[4]表示移动车辆对桥梁的动力效应,并在设计规范中给出相应限值^[5]。《磁浮铁路技术标准(试行)》(TB 10630—2019)规定,不考虑竖向附加加速度情况下,桥梁动力系数限值为1.15。然而,现行规范对动力系数的规定大都基于对有限座桥梁的实测数据统计回归得到,样本数较少且种类单一^[6],因此,有必要对移动车辆引起的桥梁冲击系数做进一步研究,尤其在目前对于中低速磁浮交通的设计和运营管理经验还相对较少的情况下^[7]。通过建立5自由度车辆-轨道梁耦合振动模型, Lee等^[8]探讨了车速、轨道不平顺、挠跨比等多种参数对悬浮间隙和轨道梁动力系数的影响。基于磁浮列车-轨道梁竖向耦合振动分析模型,杨平等^[9]分析了车速、车重及桥梁阻尼比对20 m简支梁动力系数的影响,并与规范限值进行了对比。敖建安等^[10]以某磁浮旅游线25 m简支梁为

研究对象,讨论了轨排前后高低和接缝允许偏差对桥梁跨中动力系数的影响。王亚朋等^[3]通过建立中低速磁浮列车-F轨-钢轨枕-轨道梁系统动力相互作用模型,分析了车速、车重、扣件刚度及轨枕间距对双线简支轨道梁动力系数的影响,发现部分工况计算结果高于规范值。

受多种因素影响,动力系数具有很大的随机性,其中轨道不平顺是重要影响因素之一^[6,10]。然而,已有研究均采用确定性模型对桥梁动力系数进行分析^[3,8,10],即计算模型中使用单一轨道不平顺样本作为输入,未体现轨道不平顺随机性对计算结果的影响。考虑轨道不平顺随机激励,朱志辉等^[11]基于车-轨-桥耦合振动模型和虚拟激励法获取了中承式拱桥吊杆的应力冲击系数最大值。姜金凤^[12]则结合概率密度演化理论(PDEM)对尼尔森体系拱桥进行了研究。徐文涛等^[13]建立了考虑路面高低随机不平顺的车-桥耦合振动影响因素正交设计方法,有效识别了影响桥梁冲击系数的主要参数。以上研究主要针对铁路桥梁^[11-12]和公路桥梁^[13],目前,鲜有学者基于车-桥随机振动模型对中低速磁浮轨道梁动力系数进行研究。

笔者以长沙中低速磁浮线路为背景,考虑轨道高低不平顺的随机性,通过建立磁浮车-桥耦合振动模型,从等价极值事件的角度分析轨道梁动力系数及可靠度,并探讨车速、车重和轨道不平顺粗糙度对轨道梁动力系数和可靠度的影响。

1 磁浮车-桥耦合系统竖向振动模型

图 1 为常导电磁悬浮(EMS)5 模块中低速磁浮列车,主要部件是车体、空气弹簧、悬浮架、电磁铁等。每节车有 5 对悬浮架,每个悬浮架包含 4 对悬浮电磁铁和 2 对悬挂系统^[14]。实际上,每个电磁铁产生的悬浮力是一个短距离的连续荷载,考虑到相邻电磁铁之间的距离较大(0.7 m),每个悬浮力的作用面积足够小,因此,将每个悬浮力简化为集中荷载。图 2 为采用多体动力学方法建立的车辆计算模型,其中车体和悬浮架为刚体,悬挂系统为线性弹簧-阻尼器元件。假设车辆在竖向平面内运动,车体和每个悬浮架包含沉浮和点头运动,故每节车辆有 12 个自由度,考虑三车编组,磁浮列车共有 36 个自由度。



图 1 5 模块中低速磁浮列车

Fig. 1 5-module low and medium speed maglev train

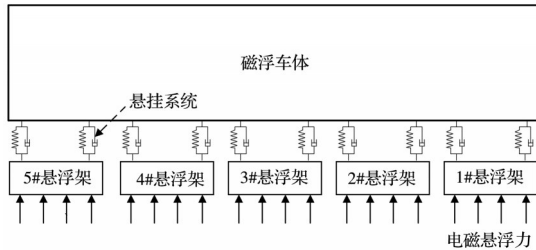


图 2 磁浮车辆计算模型

Fig. 2 Calculation model of maglev vehicle

磁浮高架桥一般由主梁、桥墩、支座和轨道组成,采用有限元方法建立其计算模型。由于磁浮轨道与主梁之间连接刚度较大,因此,假设轨道与桥面之间无相对位移,在桥梁模型中将轨道结构以参振质量形式加以考虑。

磁浮列车是一个多电磁铁悬浮系统,通过解耦,磁浮车的悬浮控制可以分解为单个电磁铁的悬浮控制问题^[15]。图 3 所示为单磁铁悬浮系统的结构图。由于磁悬浮系统是一个先天开环不稳定的系统,故需引入控制器来维持车辆和轨道梁之间的磁浮间隙。采用基于位移-速度-加速度反馈的 PD 主动悬浮控制模型,悬浮控制器可通过传感器反馈的信号控制电磁力,从而调整磁浮列车。最终作用的电磁悬浮力可表示为^[14]

$$f(t) = \frac{\mu_0 A n^2}{4} \times \left[\frac{i_0 + K_{sp} \Delta c(t) + K_{sv} \Delta \dot{z}(t) + K_{sa} \Delta \ddot{z}(t)}{c_0 + \Delta c(t)} \right]^2 \quad (1)$$

式中: μ_0 为磁导率; A 为电磁铁磁极面积; n 为电磁线卷匝数; i_0 为额定电流; K_{sp} 、 K_{sv} 、 K_{sa} 分别为位移、速度、加速度反馈系数; $\Delta \ddot{z}(t)$ 为实际的电磁铁绝对加速度增量; $\Delta \dot{z}(t)$ 为重构的电磁铁绝对速度增量; c_0 、 $\Delta c(t)$ 分别为额定悬浮间隙和悬浮间隙增量。

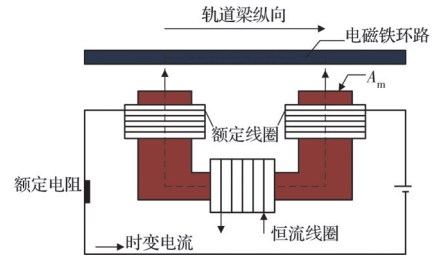


图 3 电磁铁模型

Fig. 3 Electromagnet model

当磁浮列车在轨道梁上运行时,列车子系统和桥梁之间会发生动力相互作用,因此,可建立磁浮列车-桥梁耦合振动方程

$$\begin{Bmatrix} M_V & 0 \\ 0 & M_B \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_V \\ \ddot{X}_B \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} C_V & C_{VB} \\ C_{BV} & C_B \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_V \\ \dot{X}_B \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_V & K_{VB} \\ K_{BV} & K_B \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_V \\ X_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_V \\ F_B \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: M 、 K 、 C 分别为质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; X 、 \dot{X} 、 \ddot{X} 、 F 分别为位移向量、速度向量、加速度向量和力向量;下标 V 和 B 分别代表列车子系统和桥梁子系统对应的项;下标 VB 和 BV 则代表由车桥动力相互作用引起的项。需要说明的是, F_V 和 F_B 是由轨道不平顺引起的荷载向量。

2 轨道随机不平顺降维模拟

2.1 轨道不平顺的谱表示——随机函数模拟方法

实测结果统计分析表明,轨道不平顺可以看作具有零均值的各态历经平稳随机过程。因此,基于谱表示方法的轨道不平顺样本 $V(t)$ 可以写作^[16]

$$V(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{S_r(\omega_k) \Delta \omega} \times [\cos(\omega_k t) \alpha_k - \sin(\omega_k t) \beta_k] \quad (3)$$

式中: ω 为激励圆频率,当已知车速 v 和轨道不平顺波长时 λ , $\omega = 2\pi v / \lambda$; $\omega_k = \omega_1 + (k-1)\Delta\omega$; $\Delta\omega = (\omega_N - \omega_1) / (N-1)$; N 为频率截断项数; ω_1 和 ω_N 分别为下截止频率和上截止频率; $S_r(\omega)$ 为轨道不平

顺功率谱密度函数; $\{\alpha_k, \beta_k\}$ 为一组标准的正交随机变量,满足式(4)所示基本条件。

$$\begin{aligned} E[\alpha_k] &= E[\beta_k] = 0, E[\alpha_k \beta_k] = 0 \\ E[\alpha_k \alpha_l] &= E[\beta_k \beta_l] = \delta_{kl} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: k 和 l 均为1到 N 的整数; δ_{kl} 为Kronecker-delta符号; $E[\cdot]$ 为数学期望。在式(3)中,如果取 $\alpha_k = \sqrt{2} \cos \varphi_k, \beta_k = \sqrt{2} \sin \varphi_k$,其中 φ_k 为在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布且相互独立的随机变量,则可得到经典的谱表示模拟方法。

$$V(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N \sqrt{S_r(\omega_k) \Delta \omega} \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad (5)$$

显然,式(5)中需要 N 个随机变量来模拟轨道不平顺。 N 通常被认为是1 024或更大,以确保令人满意的精度。如此,概率空间变得高维,随机分析需要大量的计算。为了减少随机变量的维数,采用降维方法,具体步骤如下:

1)在区间 $[0, 2\pi] \times [0, 2\pi]$ 中生成均匀分布的二维独立随机变量的代表样本点集 $\{\theta_1, \theta_2\}$ 。

2)构造独立正交函数

$$\begin{cases} \hat{\alpha}_k = \sin(k\theta_1) + \cos(k\theta_1) \\ \hat{\beta}_k = \sin(k\theta_2) + \cos(k\theta_2) \end{cases}, k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

3)执行随机排列 $\{\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k\} \Rightarrow \{\alpha_k, \beta_k\}$ 。中间正交随机变量 $\hat{\alpha}_k$ 和 $\hat{\beta}_k$ 是基本随机变量的正则函数。为了保证模拟轨道不平顺的随机性,需要采用随机排列的方法,从中间正交随机变量 $\hat{\alpha}_k$ 和 $\hat{\beta}_k$ 中确定目标正交随机变量 α_k 和 β_k 。这可以通过MATLAB工具箱函数rand('state',)和temp=randperm(2×n×N)实现。具体实施过程可参考文献[17]。因此,通过上述两个步骤可以唯一地确定目标正交随机变量 α_k 和 β_k 。

4)根据式(3)生成轨道高低不平顺代表样本 $V(t)$ 。

通过上述步骤,随机变量的维数减少到只有两个。

2.2 基本随机变量的代表点集

基本随机向量的代表点集 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2\}$ 在模拟轨道不平顺的代表性样本中起着重要作用。

根据数论方法,一个好格子点集(GLP)= $\{X_l = (x_{l1}, x_{l2}, \dots, x_{ld})\}$ 可通过式(7)获得^[17]。

$$\begin{cases} q_{li} = lh_i \pmod{n_s} & l = 1, 2, \dots, n_s \\ x_{li} = (2q_{li} - 1)/2n_s & i = 1, 2, \dots, d; d < n_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: $0 \leq x_{li} \leq 1 (l = 1, 2, \dots, n_s; i = 1, 2, \dots, d)$; n_s 为在 $d (d \geq 2)$ 维单位超立方体中均匀分布的代表点的数量; q_{li} 为 lh_i/n_s 的余部,其中 h_i 为整矢量 $\mathbf{h} =$

$(h_1, h_2, \dots, h_d) (h_i < n_s, h_i \neq h_j, i, j = 1, 2, \dots, d)$ 的元素,其作用在于控制所选GLP集合的偏差。对于 n_s 是素数的情况,整矢量按式(8)取值。

$$(h_1 \ h_2 \ \dots \ h_d) = (1 \ a \ a^2 \ \dots \ a^{d-1}) \pmod{n_s} \quad (8)$$

式中: a 表示 n_s 的原根,即满足条件 $a^i \pmod{n_s} \neq a^j \pmod{n_s}, 1 \leq i < j < n_s$ 。关于 n_s 的取值,Yu等^[18]研究表明,当 n_s 取300~600组时,车-桥系统随机振动分析可以达到良好的计算精度。因此,综合计算精度和效率, n_s 设定为383组。

基于生成的二维GLP集,通过从 $[0, 1]$ 到 $[0, 2\pi]$ 的线性变换,可以得到基本随机变量的代表点集。由于GLP集均匀地分布在单位超立方体内,每个代表点集的初始赋得概率为 $1/n_s$ 。

3 轨道梁动力系数及可靠性分析

3.1 动力系数计算方法

动力系数特指轨道梁跨中位移动力系数,定义为车辆荷载作用下轨道梁跨中最大竖向动挠度 R_{dmax} 与列车静止作用在桥上时跨中最大竖向静挠度之比 R_{smax} ,即

$$1 + \mu = \frac{R_{dmax}}{R_{smax}} \quad (9)$$

式中: $1 + \mu$ 为轨道梁动力系数。根据《磁浮铁路技术标准(试行)》(TB 10630—2019)规定,不考虑竖向附加加速度情况下, $1 + \mu$ 的限值为1.15。

3.2 基于PDEM和等价极值原理的动力可靠性分析

根据式(9)的定义可知,轨道梁动力系数为车辆过桥过程中轨道梁竖向挠度与 R_{smax} 比值的最大值。因此,以动力系数作为轨道梁动力性能评估指标,结合等价极值原理计算轨道梁可靠度。设 $Z_{max}(\theta, t)$ 为通过轨道不平顺代表样本获取的轨道梁动力系数,因此,根据等价极值原理,轨道梁动力可靠度可表示为

$$R(T) = P_r\{Z_{max} < z_B\} = \int_{-\infty}^{z_B} p_{Z_{max}}(z) dz \quad (10)$$

式中: z_B 为界限值; $p_{Z_{max}}$ 为 Z_{max} 的概率密度函数(PDF)。显然,求解动力可靠度转化为对 $p_{Z_{max}}$ 的一维积分。

为推导得到 $p_{Z_{max}}$,需构造一个关于时间参数 τ 的虚拟随机过程 $Z(\tau)$,且满足式(11)所示条件。

$$Z(\tau) \Big|_{\tau=0} = 0, Z(\tau) \Big|_{\tau=\tau_c} = Z_{max} \quad (11)$$

式中: τ_c 为给定的参考时间。参考以往研究^[19],选用式(12)所示形式虚拟随机过程。

$$Z(\tau) = \varphi[Z_{max}, \tau] = Z_{max} \sin(\omega \tau) \quad (12)$$

式中: $\omega=5\pi/2, \tau_c=1$ 。

由于虚拟随机过程 $Z(\tau)$ 的随机性来源于随机参数 Θ , 因此, $(Z(\tau), \Theta)$ 构成一个概率保守系统。相应地, $(Z(\tau), \Theta)$ 的联合概率密度函数满足式(13)广义概率密度演化方程。

$$\frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)}{\partial \tau} + \dot{\varphi}(\theta, \tau) \frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

对应的初始条件为

$$p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau)|_{\tau=0} = \delta(z) p_{\Theta}(\theta) \quad (14)$$

式中: δ 为狄拉克函数; p_{Θ} 为随机向量 Θ 的联合概率密度函数。

利用有限差分格式求解式(13)和式(14), 可以得到 $Z(\tau)$ 的概率密度函数, 即

$$p_Z(z, \tau) = \int_{\Omega_{\Theta}} p_{Z\Theta}(z, \theta, \tau) d\theta \quad (15)$$

式中: Ω_{Θ} 为 Θ 的分布区域。因此, 根据式(12)可知, Z_{\max} 的概率密度函数为

$$p_{Z_{\max}}(z) = p_Z(z, \tau)|_{\tau=\tau_c} \quad (16)$$

最后, 将式(16)带入式(10)即可获得动力可靠度。

根据上述理论推导, 基于 MATLAB 平台编制了相应的计算程序, 图 4 给出了磁浮车-桥系统轨道梁动力可靠度计算流程图。

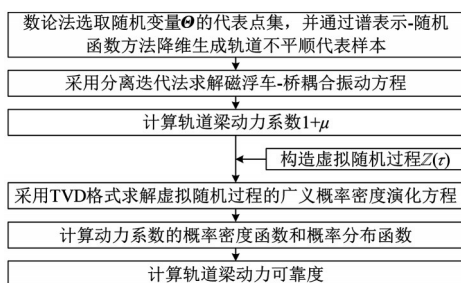


图 4 磁浮车-桥系统轨道梁动力可靠度计算流程图

Fig. 4 Flow chart for calculating the dynamic reliability of the guideway beam of the maglev vehicle-bridge system

4 数值算例

4.1 计算参数

以长沙中低速磁浮线某 25 m 预应力混凝土简支梁桥为研究对象。该桥采用左右双箱梁设计, 梁高 2.1 m, 中心间距 4.4 m, 中间用横隔板连接, 纵向间距 5 m。桥梁跨中横截面如图 5 所示, 左右箱梁截面相同, 横隔板为 0.8 m (高) \times 0.3 m (宽) 的矩形截面。桥墩采用圆端形实体墩形式, 墩高为 10 m, 横截面面积为 11.14 m², 截面惯性矩 $I_{yy}=3.44$ m⁴, $I_{zz}=29.34$ m⁴。桥梁采用 C50 混凝土浇筑, 单线二期恒载为 20 kN/m。图 6 给出了基于 ANSYS 平台建立的桥梁有限元模型。其中, 箱梁、横隔板和桥墩均

采用铁木辛柯梁单元模拟, 桥墩支座采用弹簧阻尼器单元模拟。忽略混凝土桩基与土体之间的相互作用, 将桥墩底部设置为固定约束。基于建立的有限元模型, 得到桥梁一阶竖弯频率为 5.83 Hz, 与实测值接近。

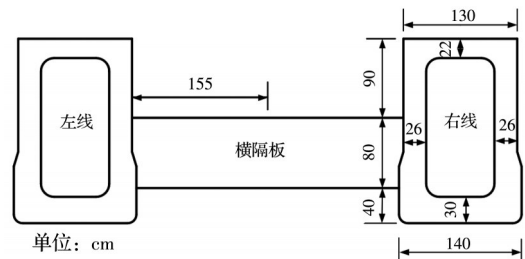


图 5 跨中截面尺寸

Fig. 5 Mid-span section of the bridge

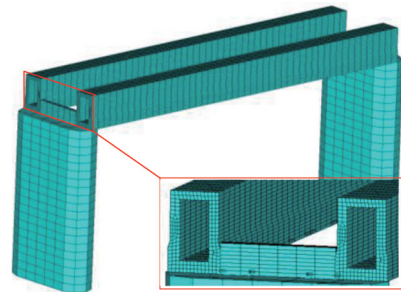


图 6 25 m 简支梁桥 ANSYS 模型

Fig. 6 ANSYS model of the 25 m simply-supported girder bridge

磁浮列车模型采用 3 车编组, 其中车辆参数与悬浮控制参数如表 1 和表 2 所示。轨道不平顺功率谱密度函数采用文献[20]推荐的模型, 具体表达式为

$$S_r(\Omega) = aA/\Omega^n \quad (17)$$

式中: a 为功率谱系数, 取为 1; Ω 是空间波数, n 是频率特征参数, 取为 2; A 是表面粗糙度系数, 取为 6.1×10^{-8} 。采样步长为 0.25 m, 采样总长取 1 000 m, 全程轨道高低不平顺幅值约为 ± 2 mm。

4.2 模型及方法验证

首先, 通过与现场实测结果对比, 验证磁浮车-桥耦合振动模型的正确性。车速设为 80 km/h, 轨道不平顺样本采用式(5)所示经典谱方法生成, 结果见图 7。图 8 为轨道梁跨中竖向振动位移和加速度实测结果与仿真结果对比图, 其中实测结果来源于文献[21]。从图 8(a)可以看出, 从列车进桥到出桥的整个过程中, 计算的轨道梁跨中竖向位移曲线与实测结果表现出良好的一致性, 虽然计算结果的幅值略大于实测结果, 分别为 1.71、1.69 mm, 但两者的相对误差为 1.18%, 满足工程精度误差小于 5% 的要求。从图 8(b)可以看出, 轨道梁跨中竖向加速度的计算结果与实测结果在波形和幅值方面

表 1 磁浮列车模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of maglev train model				
车体质量 M_c/kg	悬浮架质量 M_s/kg	二系悬挂刚度 $K_z/(\text{kN}/\text{m})$	二系悬挂阻尼 $C_z/(\text{kN}\cdot\text{s}/\text{m})$	相邻电磁力的间距 l_s/m
2×10^4	2×10^3	160	10	0.7
车体点头转动惯量 $J_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	悬浮架点头转动惯量 $J_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	同一悬浮架上的两个二系悬挂点间的距离 $2a/\text{m}$	相邻悬浮架上相距最近的两个二系悬挂点间的距离 $(2b+c)/\text{m}$	相邻电磁铁质心间的距离 d/m
6.25×10^5	3.6×10^3	2.3	0.86	0.7

表 2 悬浮控制系统模型计算参数

Table 2 Calculation parameters of suspension control system						
主动悬浮控制系统的位移系数 K_{sp}	主动悬浮控制系统的速度系数 K_{sv}	主动悬浮控制系统的加速度系数 K_{sa}	额定悬浮间隙 c_0/mm	额定悬浮电流 i_0/A	系统状态观测器特征频率 ω_0/Hz	系统状态观测器阻尼 $\xi_0/(\text{N}\cdot\text{m}/\text{s})$
5 000	20	0.1	8	21	1 256.6	0.7

同样吻合较好,说明计算结果有效再现了车辆过桥过程中轨道梁竖向振动加速度的变化过程。

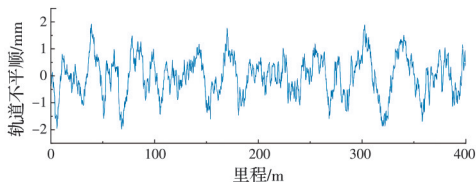


图 7 轨道不平顺样本
Fig. 7 Track irregularity sample

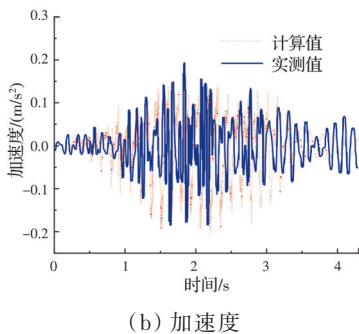
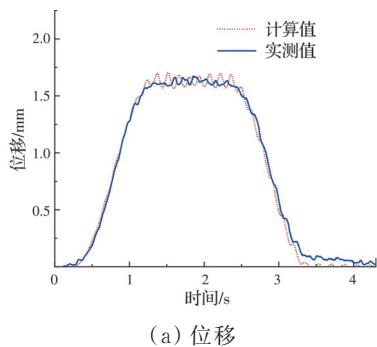


图 8 轨道梁跨中竖向振动响应实测值与计算值对比
Fig.8 Comparison of computed and measured vertical dynamic responses of the guideway beam at midspan

其次,通过与蒙特卡罗法计算结果对比,验证动力可靠度计算方法的正确性。在对比动力响应计算结果之前,先验证轨道随机不平顺降维模拟方法的正确性。图 9 为轨道高低不平顺目标谱与 383

个代表样本的平均谱曲线。从图 9 可以看出,383 个代表样本的平均谱与目标谱吻合良好,如此不仅证明了降维模拟方法的准确性,同时说明 383 个样本已能较好反映轨道不平顺的统计特性。图 10 给出了蒙特卡罗法与本文方法获取的轨道梁动力系数 PDF,其中蒙特卡罗法计算采用的是由式(5)生成的 5 000 个轨道不平顺样本。从图 10 可以看出,两种方法获取的 PDF 曲线在幅值和分布范围上均吻合较好,从而证明了轨道梁动力可靠度计算方法的准确性。

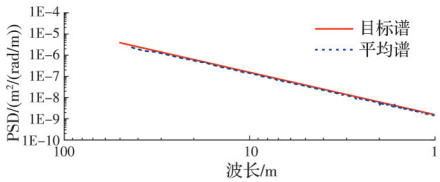


图 9 轨道高低不平顺目标谱与代表样本平均谱
Fig. 9 Target spectrum and average spectrum of representative sample of vertical track irregularity

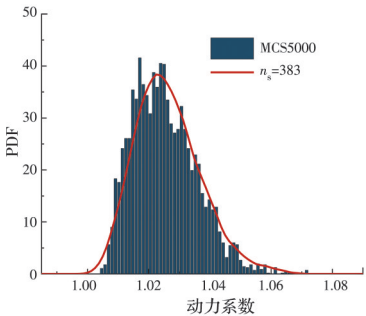


图 10 蒙特卡罗法与本文方法获取的轨道梁动力系数 PDF
Fig. 10 PDF of the the dynamic factor of the guideway beam obtained by Monte Carlo method and the method in this paper

通过以上对比可知,建立的中低速磁浮车-桥耦合振动模型以及依此提出的轨道梁动力可靠度计算方法是可靠的。

4.3 车速影响分析

考虑列车以 60、80、100、120、140 km/h 等 5 种

速度通过桥梁,探讨车速对轨道梁动力系数及动力可靠度的影响。图 11 给出了磁浮列车分别以 80、140 km/h 通过时轨道梁跨中竖向静位移及动位移样本曲线,其中加粗显示的曲线为静位移及第 383 号动位移样本。从图 11 可以看出,由于动位移考虑了车桥系统动力响应,因此该类曲线围绕静位移曲线下波动。受轨道不平顺随机性影响,动位移幅值存在一定的离散性,但并非车速越高离散性越大。当车速为 80 km/h 时,动位移幅值范围为 [1.64 mm, 1.73 mm],当车速为 140 km/h 时,幅值范围为 [1.64 mm, 1.70 mm]。这是因为桥梁动位移幅值与车辆激励频率和桥梁基频相关。上述结果也说明,传统基于单一轨道不平顺样本进行车-桥动力响应分析可能导致评估结果不准确。

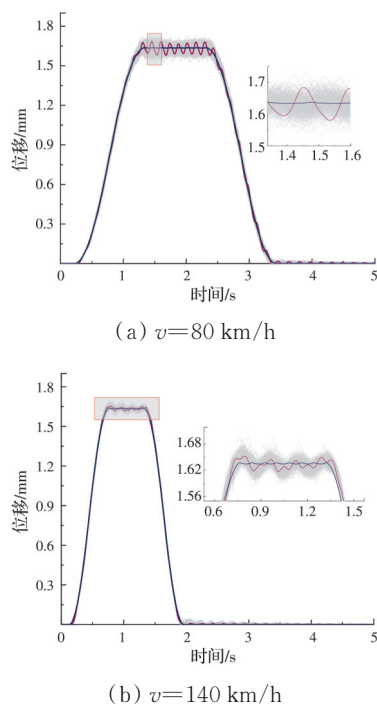


图 11 轨道梁跨中竖向静位移及动位移时程曲线

Fig. 11 Time histories of the vertical static and dynamic deflections of the guideway beam at midspan

图 12 为 80 km/h 车速下轨道梁动力系数样本值。从图 12 中可以看出,受轨道不平顺随机激励影响,轨道梁动力系数表现出明显的随机性。图 13 为不同车速下轨道梁动力系数样本值及统计参数。从图中可以看出,轨道梁动力系数分布范围并非随车速的增大而增大。计算车速范围内,分布范围最窄为车速 120 km/h 时,范围为 [1.003, 1.024]; 分布范围最宽为车速 80 km/h 时,范围为 [1.007, 1.063]。这是因为,当车速为 80 km/h 时,车辆荷载的激励主频为 $f=80/3.6/d_c=7.03$ Hz (其中 $d_c=3.16$ m 为悬浮架中心间距),与桥梁竖向一阶自振

频率 6.84 Hz 接近。图 13 还给出了 5 种车速下轨道梁动力系数样本值的均值和标准差。车速从小到大均值分别为 1.016、1.026、1.013、1.012、1.016,标准差分别为 0.006、0.010、0.004、0.004、0.006。从图中可以看出,与样本值类似,均值和标准差同样没有表现出随车速增大而增大的规律,两者均在车速 80 km/h 时最大。相比均值,标准差的波动性更大。5 种车速下,均值最大值比最小值增幅约 2%,而标准差增幅约 135%,说明当车辆激励主频靠近桥梁竖向一阶自振频率时,轨道梁动力响应离散性更加显著。

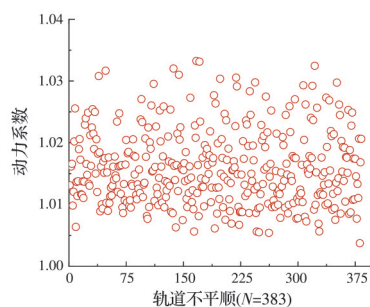


图 12 80 km/h 车速下轨道梁动力系数样本值

Fig. 12 Sample values of dynamic factors of the guideway beam at the speed of 80 km/h

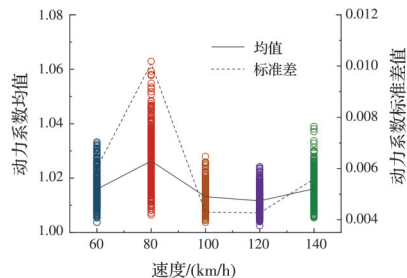


图 13 不同车速下轨道梁动力系数样本值及统计参数

Fig. 13 Sample values and statistical parameters of dynamic factors of the guideway beam at different speeds

图 14 给出了不同速度下轨道梁动力系数 PDF 和 CDF 曲线。从图 14(a)可以看出,轨道梁动力系数 PDF 曲线近似呈正态分布,且不同车速下 PDF 曲线的分布范围与样本值分布范围类似。相比其他车速,80 km/h 车速下的 PDF 曲线分布范围最宽而幅值最小,其分布范围和幅值分别为 [1, 1.06] 和 38.37,该结果同样说明该车速下轨道梁动力系数离散性较大。由于 CDF 曲线是通过 PDF 曲线积分得到,因此,80 km/h 车速下的 CDF 曲线更倾向于右侧,且该车速下曲线变化更为平缓,其余车速下的 CDF 曲线变化趋势接近。根据 CDF 计算结果和《磁浮铁路技术标准(试行)》(TB 10630—2019)中关于桥梁动力系数不大于 1.15 的要求,本文车速范围内轨道梁动力可靠度计算结果均为 1。

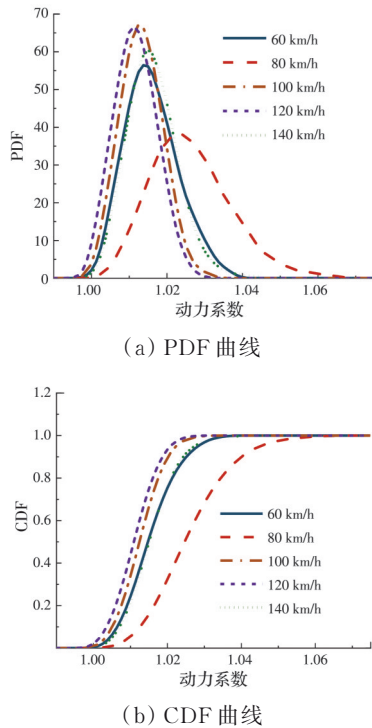


图14 不同速度下轨道梁动力系数PDF和CDF曲线

Fig. 14 PDF and CDF curves of dynamic factors of the guideway beam at different speeds

4.4 车体质量影响分析

车辆依然采用3节编组,分别考虑磁浮车体质量为20 t(空车)、25 t(定员)、30 t(超载)3种情况。图15给出了不同车体质量下轨道梁动力系数样本值及统计参数。从图15可以看出,随着车体质量的增加,轨道梁动力系数样本值的分布范围越窄,且均值和标准差也随之下降。空车、定员和超载3种情况下,轨道梁动力系数的均值分别为1.026、1.022、1.019,标准差分别为0.010 1、0.008 6、0.007 1。由此说明,80 km/h车速下,车体质量越大,轨道梁动力系数越小,且离散性也随之降低。图16给出了不同车体质量下轨道梁动力系数PDF和CDF曲线。从图16可以看出,不同车体质量下的PDF同样近似呈正态分布,且车体质量越大,曲

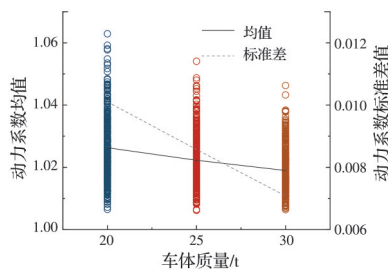


图15 不同车体质量下轨道梁动力系数样本值及统计参数

Fig. 15 Sample values and statistical parameters of dynamic factors of the guideway beam at different car body mass

线分布范围越窄、幅值越大。由于空车行驶条件下轨道梁动力系数的离散性最大,因此,PDF和CDF曲线愈加偏向右侧。CDF取值为1时,3种车体质量下的轨道梁动力系数值分别为1.070、1.063、1.054,满足动力系数不大于1.15的规范要求。

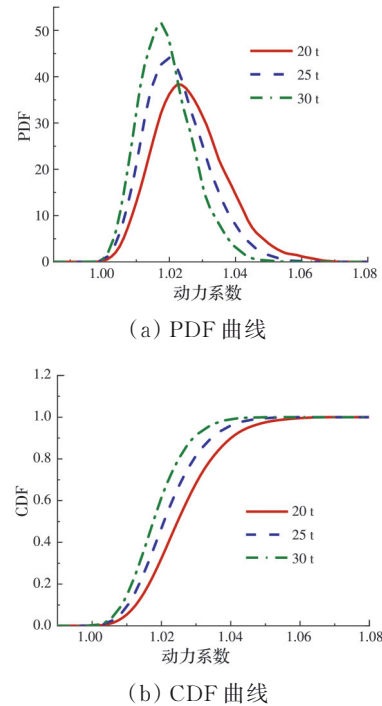
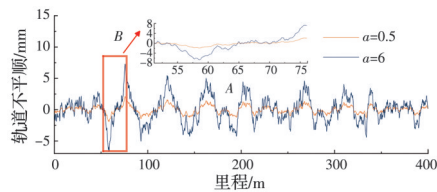
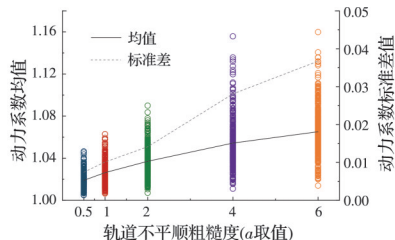


图16 不同车体质量下轨道梁动力系数PDF和CDF曲线

Fig. 16 PDF and CDF curves of dynamic factors of the guideway beam at different car body mass

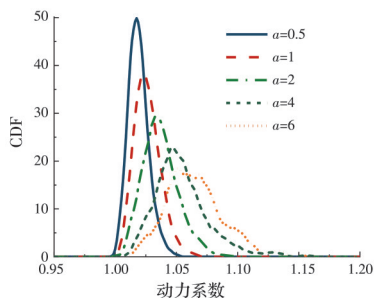
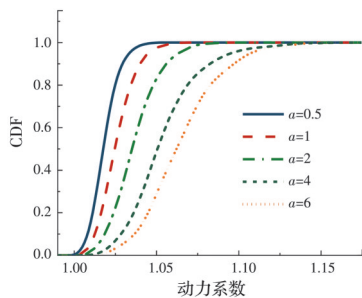
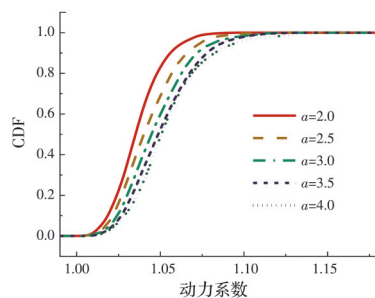
4.5 轨道不平顺粗糙度影响分析

轨道不平顺作为引起磁浮车桥耦合系统振动的主要激励源,是个随机过程,通常采用轨道谱来表示其统计特征。式(17)为模拟轨道不平顺样本使用的功率谱密度函数,其中参数 a 取值越大,轨道不平顺的粗糙度就越明显。为探讨轨道不平顺粗糙度对轨道梁动力系数的影响,首先取 a 等于0.5、1、2、4、6等5种粗糙度情况进行研究,对应的轨道不平顺代表样本在52.25~77.25 m(桥梁跨度)范围内的最大幅值分别为2.11、2.69、4.21、5.95、7.29 mm。图17为 a 取0.5和6两种情况下幅值最大的轨道不平顺代表样本曲线,后者幅值约为前者的3.5倍。图18为不同 a 取值情况下轨道梁动力系数样本及统计参数。从图18可以看出,随着轨道不平顺粗糙度的增大,轨道梁动力系数分布范围愈广。 a 取0.5时,分布范围在[1.005, 1.047],当 a 增大至6时,分布范围扩大至[1.014, 1.160]。动力系数均值和标准差同样表现出随 a 值增大而增大的趋势。 a 取0.5和6时,均值分别为1.019和1.065,后者为前者的1.05倍,标准差分别为0.007和0.037,后者

图 17 a 取 0.5 和 6 两种情况下轨道不平顺代表样本Fig. 17 Track irregularity samples with a equal to 0.5 and 6图 18 不同 a 取值情况下轨道梁动力系数样本值及统计参数Fig. 18 Sample values and statistical parameters of dynamic factors of the guideway beam at different values of a

为前者的 5.3 倍。由此说明,当轨道平顺度恶化时,不仅轨道梁动力系数会增大,而且其离散性也会增大。图 19 为不同 a 取值情况下轨道梁动力系数 PDF 和 CDF 曲线。从图 19(a)可以看出,随着不平顺粗糙度的增大,PDF 曲线分布范围越宽、幅值越

小,且整体也更加右移,同样说明了动力系数数值和离散性增大的结论。同时,不平顺度越粗糙,PDF 曲线与正态分布曲线的相似性越差。从图 19(b)的 CDF 曲线可以看出,CDF 同样表现出随不平顺粗糙度增大而愈加右移的趋势。当 CDF 取值为 1 时,轨道梁动力系数的界限分别为 1.061、1.078、1.105、1.171 和 1.175。根据动力系数不大于 1.15 的规范要求,轨道梁动力可靠度计算结果分别为 1.0、1.0、1.0、0.998、0.997。可见,若需保证轨道梁动力可靠度计算结果为 1, a 的取值需要在 2~4 之间。为了进一步确定允许的轨道不平顺最大幅值,增加了 a 取 2.5、3.0、3.5 三种情况,对应的轨道不平顺代表样本在桥梁跨度范围内的最大幅值分别为 4.25、4.65、5.03 mm。图 19(c)给出了 a 取 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 时的轨道梁动力系数 CDF 曲线。同样地,当 CDF 取值为 1 时,轨道梁动力系数的界限分别为 1.105、1.136 3、1.132 5、1.141 3、1.171。根据动力系数不大于 1.15 的要求,此时轨道梁动力可靠度计算结果分别为 1.0、1.0、1.0、1.0、0.998。由此可以得出,若要求轨道梁动力可靠度计算结果为 1,轨道不平顺幅值应控制在 5.03 mm 以内。

(a) a 取 0.5、1、2、4、6 时 PDF 曲线(b) a 取 0.5、1、2、4、6 时 CDF 曲线(c) a 取 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 时 CDF 曲线图 19 不同 a 取值情况下轨道梁动力系数 PDF 和 CDF 曲线Fig. 19 PDF and CDF curves of dynamic factors of the guideway beam at different values of a

5 结论

考虑轨道不平顺的随机性,建立了中低速磁浮车-桥随机振动模型,结合等价极值原理,探讨车速、车重和轨道不平顺粗糙度对轨道梁动力系数及可靠度的影响。基于数值计算结果,得出以下结论:

1) 数值模拟获得的轨道梁跨中竖向位移和加速度与实测结果吻合良好,表明建立的磁浮车-桥耦合振动模型可靠。同时,通过对比本文方法与蒙特卡罗法获得的轨道梁动力系数 PDF,发现两者在幅值和分布范围上均较吻合,从而证明了提出的轨道梁动力可靠度计算方法的准确性。

2) 当车辆以 80 km/h 通过时,轨道梁动力系数

数值和离散性最大,这是因为在该车速下,车辆激励主频与桥梁竖向振动基频接近。60~140 km/h 车速范围内,轨道梁动力可靠度计算结果均为 1,表明即使车辆提速至 140 km/h,长沙中低速磁浮 25 m 简支梁桥动力系数亦满足规范要求。

3) 车体质量对轨道梁动力系数影响较小,但轨道不平顺粗糙度对轨道梁动力系数影响显著。当轨道平顺度恶化时,轨道梁动力系数均值和标准差显著增大,动力可靠度降低。因此,保证线路平顺性是减小轨道梁动力响应的有效措施之一。

4) 综合动力系数分析结果可以看出,长沙中低速磁浮 25 m 简支梁桥动力性能良好,安全富余度较大。

参考文献

- [1] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199-216.
MA W H, LUO S H, ZHANG M, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 199-216. (in Chinese)
- [2] 王党雄, 李小珍, 梁林. 中低速磁浮列车-桥梁系统竖向耦合振动理论分析与试验验证[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 81-90.
WANG D X, LI X Z, LIANG L. Theoretical analysis and experimental verification of vertical coupling vibration of medium and low speed maglev train-bridge system [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(8): 81-90. (in Chinese)
- [3] 王亚朋, 蔺鹏臻. 中低速磁悬浮双线简支轨道梁的冲击效应研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 77-84
WANG Y P, LIN P Z. Study on impact effect of double-track simply supported track beams for medium and low speed maglev [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4): 77-84 (in Chinese)
- [4] 苗永抗, 尹邦武, 郭向荣. 考虑徐(温)变效应的列车与连续梁-框架墩桥耦合振动分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(2): 5-10
MIAO Y K, YIN B W, GUO X R. Vehicle-bridge coupling vibration analysis of continuous beam-framework pier bridge considering concrete creep and temperature deformation [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(2): 5-10 (in Chinese)
- [5] 周勇军, 薛宇欣, 李冉冉, 等. 桥梁冲击系数理论研究和应用进展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 31-50.
ZHOU Y J, XUE Y X, LI R R, et al. State-of-the-art of theory and applications of bridge dynamic load allowance [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(4): 31-50. (in Chinese)
- [6] 周勇军, 赵洋, 赵煜, 等. 基于动载试验荷载效率的简支梁桥冲击系数研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 207-216
ZHOU Y J, ZHAO Y, ZHAO Y, et al. A study on dynamic load allowance of a simply supported girder bridge based on load efficiency of a dynamic load test [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 207-216 (in Chinese)
- [7] 谢华, 周永礼. 浅谈中低速磁浮常用跨度梁设计[J]. 四川建筑, 2018, 38(3): 191-193
XIE H, ZHOU Y L. Discussion on the design of common span beam for medium and low speed maglev [J]. Sichuan Architecture, 2018, 38(3): 191-193 (in Chinese)
- [8] LEE J S, KWON S D, KIM M Y, et al. A parametric study on the dynamics of urban transit maglev vehicle running on flexible guideway bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 328(3): 301-317.
- [9] 杨平, 刘德军, 李小珍. 中低速磁浮简支轨道梁动力系数研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(4): 79-84
YANG P, LIU D J, LI X Z. Investigation of dynamic factors of low and medium speed maglev simply-supported guideway beam [J]. Bridge Construction, 2016, 46(4): 79-84 (in Chinese)
- [10] 敖建安, 魏高恒, 马卫华, 等. 轨道精度对中低速磁浮列车-轨排-桥梁动力作用影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2738-2747.
AO J A, WEI G H, MA W H, et al. Influence of geometry accuracy of track structure on dynamic performance of the coupled medium-low speed maglev train-rail-bridge system [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(11): 2738-2747. (in Chinese)
- [11] 朱志辉, 赵婷婷, 王力东, 等. 基于随机振动模型的重载铁路拱桥吊杆应力冲击系数研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(6): 955-964
ZHU Z H, ZHAO T T, WANG L D, et al. Stress impact factor of the suspenders of heavy-haul railway arch bridge based on random vibration model [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(6): 955-964 (in Chinese)
- [12] 姜金凤. 基于概率密度演化理论的尼尔森体系拱桥吊杆应力冲击系数研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2350-2357
JIANG J F. Study on stress impact factor of suspenders of Nielsen system arch bridge based on probability density evolution method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(9): 2350-2357 (in Chinese)
- [13] 徐文涛, 廖敬波, 张泽通, 等. 基于参数识别的桥梁冲击系数随机响应优化方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 64-70.
XU W T, LIAO J B, ZHANG Z T, et al. Numerical method study of key factor identification and parameter optimization for dynamic impact on bridge based on the pseudo-excitation method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 64-70. (in Chinese)
- [14] WANG D X, LI X Z, LIANG L, et al. Dynamic interaction analysis of bridges induced by a low-to-medium-speed maglev train [J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 26(21/22): 2013-2025.
- [15] 陈琛, 徐俊起, 林国斌, 等. 具有径向基网络加速度反馈的磁浮列车悬浮系统滑模控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(12): 1642-1651
CHEN C, XU J Q, LIN G B, et al. Sliding mode control of maglev train suspension system with neural network acceleration feedback [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(12): 1642-1651 (in Chinese)

- [16] WANG L D, ZHANG X, LIU H Y, et al. Global reliability analysis of running safety of a train traversing a bridge under crosswinds [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 224: 104979.
- [17] LIU Z J, LIU Z H, PENG Y B. Simulation of multivariate stationary stochastic processes using dimension-reduction representation methods [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 418: 144-162.
- [18] YU Z W, MAO J F. A stochastic dynamic model of train-track-bridge coupled system based on probability density evolution method [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 59: 205-232.
- [19] LI J, CHEN J B, FAN W L. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability [J]. *Structural Safety*, 2007, 29(2): 112-131.
- [20] ZHAO C F, ZHAI W M. Maglev vehicle/guideway vertical random response and ride quality [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2002, 38(3): 185-210.
- [21] WANG D X, LI X Z, WANG Y W, et al. Dynamic interaction of the low-to-medium speed maglev train and bridges with different deflection ratios: Experimental and numerical analyses [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(11): 2399-2413.

(编辑 胡玲)