

文章编号: 1005-0523(2022)02-0017-10



## 车桥耦合振动高速铁路典型桥梁动力系数研究

吴大宏<sup>1</sup>, 屠嘉杨<sup>2</sup>, 苏伟<sup>1</sup>, 孙树礼<sup>1</sup>, 余志武<sup>2,3</sup>, 毛建锋<sup>2,3</sup>

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075;  
3. 中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南长沙 410075)

**摘要:** 国内外规范目前定义的桥梁动力放大系数无法全面反映各复杂因素对桥梁动力性能的影响, 在设计阶段, “逢桥必算”成为常态。针对此问题, 该研究通过建立高速列车-轨道-桥梁系统耦合振动模型, 对 33 座桥梁在不同列车类型、不同车速荷载下的动力特性进行仿真分析。基于概率统计学原理, 引入“谱函数”的概念, 以结构自振周期为指标, 在一定保证率的前提下拟合得到了适合计算车桥耦合下桥梁结构动力放大系数谱的函数表达式。另选取了 10 座桥梁进行车桥耦合仿真计算分析, 以验证动力放大系数谱方法的适用性, 结果表明, 该方法具有一定的保证率和适用性。最后, 提出了一些改进该方法精度的建议。

**关键词:** 车桥耦合模型; 动力放大系数; 谱函数

**中图分类号:** U441; [U24]      **文献标志码:** A

**本文引用格式:** 吴大宏, 屠嘉杨, 苏伟. 车桥耦合振动高速铁路典型桥梁动力系数研究[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(2): 17-26.

**DOI:** 10.16749/j.cnki.jecjtu.2022.02.002

## Study on the Dynamic Coefficient Law of Typical Bridges of High-Speed Railway Based on Vehicle-Bridge Coupling Vibration

Wu Dahong<sup>1</sup>, Tu Jiayang<sup>2</sup>, Su Wei<sup>1</sup>, Sun Shuli<sup>1</sup>, Yu Zhiwu<sup>2,3</sup>, Mao Jianfeng<sup>2,3</sup>

(1. China Railway Design Corporation (CRDC), Tianjin 300308, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University Changsha 410075, China)

**Abstract:** At present, the dynamic amplification coefficient of bridges defined in domestic and foreign codes cannot fully reflect the influence of various complex factors on the dynamic performance of bridges. In the design stage, it is a normal state for every bridge to be calculated. Accordingly, this article established the high-speed train-track-bridge coupled vibration system model to analyze the dynamic characteristics of 33 bridges under different vehicle types and speed loads. Based on the probability statistics theory, the concept of spectral function was introduced, taking the natural vibration period of structure as the index. The function expression suitable for calculating the dynamic amplification coefficient spectrum of the bridge structure under vehicle bridge coupling was obtained at a certain guarantee rate. Another 10 bridges were selected for vehicle-bridge coupling calculation to verify the applicability of the dynamic amplification coefficient spectrum method. The results show that the method has certain guarantee rate and applicability. Finally, some suggestions are given to improve the accuracy of the method.

**Key words:** train-bridge system model; dynamic magnification coefficient; spectral function

收稿日期: 2021-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708558, 52078485); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5740)

**Citation format:** WU D H, TU J Y, SU W, et al. Study on the dynamic coefficient law of typical bridges of high-speed railway based on vehicle-bridge coupling vibration[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 17-26.

高速铁路桥梁设计挑战大、任务艰巨,其中桥梁车致振动安全评估是桥梁设计中的重要环节之一,而桥梁动力研究主要集中于抗震、抗风及车桥耦合等<sup>[1-6]</sup>。目前,我国规范对车桥耦合虽有所提及,但涉及内容较少,往往采用桥梁动力系数进行动力性能简化分析,而由于车桥耦合振动的复杂特性,这种简化算法局限较大。因此,亟需开展基于车桥耦合振动的高速铁路典型桥梁动力系数规律研究,为我国铁路桥梁快速设计提供有力支撑。

近十几年来,高速铁路的发展极大地促进了铁路桥梁动力学的研究,关于桥梁动力系数的研究成果丰富<sup>[7-15]</sup>。国内外规范中对铁路桥梁动力系数的定义仅与结构顶部填土厚度、桥梁最大跨径有关,不能全面考虑桥梁跨度、梁体刚度、频率、阻尼、桥墩与基础刚度等复杂因素对桥梁动力性能造成的影响<sup>[16]</sup>。因而,在桥梁设计阶段“逢桥必算”成为常态,给设计工作带来了一些麻烦,尤其是中长跨度钢筋混凝土桥梁设计。发展通用的铁路钢筋混凝土桥梁动力系数设计方法,更高效指导工程设计具有重要的意义。

作为车桥耦合的设计方法和原则,为了避免“逢桥必算”繁重任务的现象,本文建立高速列车-轨道-桥梁系统耦合振动模型,通过高速列车作用下各类型轨道-桥梁结构体系的系统动力特性仿真分析,综合考虑各复杂因素对桥梁动力性能的影响程度,总结、归纳桥梁结构通用性车桥耦合振动规律。基于概率统计学原理,引入“谱函数”的概念,对于具有相同自振周期的桥梁结构,在不同车速、不同列车类型荷载作用下,确定一定概率保证率下车桥耦合导致桥梁结构动力放大系数的包络值,提出了“车桥耦合动力放大系数谱”,并另取10座桥梁算例验证本方法的可行性与保证率。

## 1 列车-轨道-桥梁耦合振动模型

定义车辆各自由度符号: $L_c$ 为车辆定距之半,

$m; L_i$ 为同一转向架所属两轮对轴距之半,  $m; b_4$ 为系悬挂纵向弹簧阻尼器横向间距之半,  $m; b_3$ 为二系悬挂纵向弹簧阻尼器横向间距之半,  $m; b_2$ 为系悬挂纵向弹簧阻尼器横向间距之半,  $m; b_1$ 为二系悬挂纵向弹簧阻尼器横向间距之半,  $m; b_0$ 为轮对两滚动圆横跨之半,  $m; h_1$ 为车体重心到二系悬挂纵向弹簧阻尼器的距离,  $m; h_2$ 为转向架重心到二系悬挂纵向弹簧阻尼器的距离,  $m; h_3$ 为转向架重心到一系悬挂纵向弹簧阻尼器的距离,  $m; h_4$ 为轮对重心到一系悬挂纵向弹簧阻尼器的距离,  $m; M_c, M_t, M_w$ 分别为车体质量, 转向架质量, 轮对质量,  $\text{kg}; J_{c\theta}, J_{c\varphi}, J_{c\psi}$ 分别为车体侧滚、点头、摇头运动惯性矩,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2; J_{t\theta}, J_{t\varphi}, J_{t\psi}$ 分别为转向架侧滚、点头、摇头运动惯性矩,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2; J_{w\theta}, J_{w\varphi}$ 分别为轮对侧滚、摇头运动惯性矩,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2; k_{1x}, k_{1y}, k_{1z}$ 分别为一系悬挂系统纵向, 横向, 竖向弹簧刚度系数,  $\text{N/m}; c_{1x}, c_{1y}, c_{1z}$ 分别为一系悬挂系统纵向, 横向, 竖向阻尼系数,  $\text{N}\cdot\text{s/m}; k_{2x}, k_{2y}, k_{2z}$ 分别为二系悬挂系统纵向, 横向, 竖向弹簧刚度系数,  $\text{N/m}; c_{2x}, c_{2y}, c_{2z}$ 分别为二系悬挂系统纵向, 横向, 竖向阻尼系数,  $\text{N}\cdot\text{s/m}; x_{w1}, x_{w2}, x_{w3}, x_{w4}, x_{ft}, x_{lt}, x_c$ 分别为第一, 第二, 第三, 第四轮对及前, 后转向架与车体的纵移自由度;  $y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}, y_{ft}, y_{lt}, y_c$ 分别为第一, 第二, 第三, 第四轮对及前, 后转向架与车体的刚体横移自由度;  $z_{w1}, z_{w2}, z_{w3}, z_{w4}, z_{ft}, z_{lt}, z_c$ 分别为第一, 第二, 第三, 第四轮对及前, 后转向架与车体的刚体沉浮自由度;  $\theta_{w1}, \theta_{w2}, \theta_{w3}, \theta_{w4}, \theta_{ft}, \theta_{lt}, \theta_c$ 分别为第一, 第二, 第三, 第四轮对及前, 后转向架与车体的刚体侧滚自由度;  $\varphi_{ft}, \varphi_{lt}, \varphi_c$ 分别为前, 后转向架与车体的刚体点头自由度;  $\psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}, \psi_{ft}, \psi_{lt}, \psi_c$ 分别为第一, 第二, 第三, 第四轮对及前, 后转向架与车体的刚体摇头自由度。

假设列车每节车辆的车体、转向架、轮对均为刚体(如图1所示),基于曾庆元院士的弹性系统动力学总势能不变值原理<sup>[17]</sup>,并运用形成矩阵的“对号入座”法则<sup>[18]</sup>即可得到车辆空间振动的有限元形式矩阵方程

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

式中:  $\mathbf{M}_v$  为车辆质量矩阵;  $\mathbf{C}_v$  为车辆阻尼矩阵;  $\mathbf{K}_v$  为车辆刚度矩阵;  $\mathbf{F}_v$  为车辆荷载矩阵;  $\ddot{\mathbf{X}}_v$ ,  $\dot{\mathbf{X}}_v$  和  $\mathbf{X}_v$  分别为车辆加速度、速度和位移列阵。

本文使用德国低干扰轨道不平顺谱来考虑轨道不平顺的影响。在处理轮轨接触问题时,轮轨法向力采用应用广泛的非线性 Hertz 弹性接触理论模型,即

$$N_{ij} = \left[ \frac{1}{G} \delta_{ij} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中:  $\delta_{ij}$  为第  $i$  轮对处左右侧轮轨相对压缩量,  $j=l$  表示左轨,  $j=r$  表示右轨;  $G$  为轮轨接触常数,  $\text{m/N}^{2/3}$ 。对于磨损型踏面车轮有

$$G = 3.86 R_w^{-0.115} \times 10^{-8}$$

式中:  $R_w$  为车轮踏面曲率半径。

基于有限元建模方法, 可得下部轨道-桥梁结

构系统空间动力学方程

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{X}}_b + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{X}}_b + \mathbf{K}_b \mathbf{X}_b = \mathbf{F}_b \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{M}_b$  为桥梁系统质量矩阵;  $\mathbf{C}_b$  为桥梁系统阻尼矩阵;  $\mathbf{K}_b$  为桥梁系统刚度矩阵;  $\mathbf{F}_b$  为桥梁系统荷载列阵;  $\ddot{\mathbf{X}}_b$ ,  $\dot{\mathbf{X}}_b$  和  $\mathbf{X}_b$  分别为桥梁系统各自由度的加速度、速度和位移列阵。

列车-轨道-桥梁系统耦合模型是一个时变系统, 综合以上各子系统的模型, 联立车辆-轨道-桥梁空间随机动力方程式, 即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_v & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{X}}_v \\ \ddot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_v & \mathbf{C}_{vb} \\ \mathbf{C}_{bv} & \mathbf{C}_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_v \\ \dot{\mathbf{X}}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_v & \mathbf{K}_{vb} \\ \mathbf{K}_{bv} & \mathbf{K}_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{X}_v \\ \mathbf{X}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}'_v \\ \mathbf{F}'_b \end{Bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{C}_{vb}$  与  $\mathbf{C}_{bv}$  为车-轨耦合阻尼矩阵;  $\mathbf{K}_{bv}$  与  $\mathbf{K}_{vb}$  为车-轨耦合刚度矩阵;  $\mathbf{F}'_v$  和  $\mathbf{F}'_b$  分别为更新调整后的列车荷载矩阵和桥梁荷载矩阵<sup>[19]</sup>。

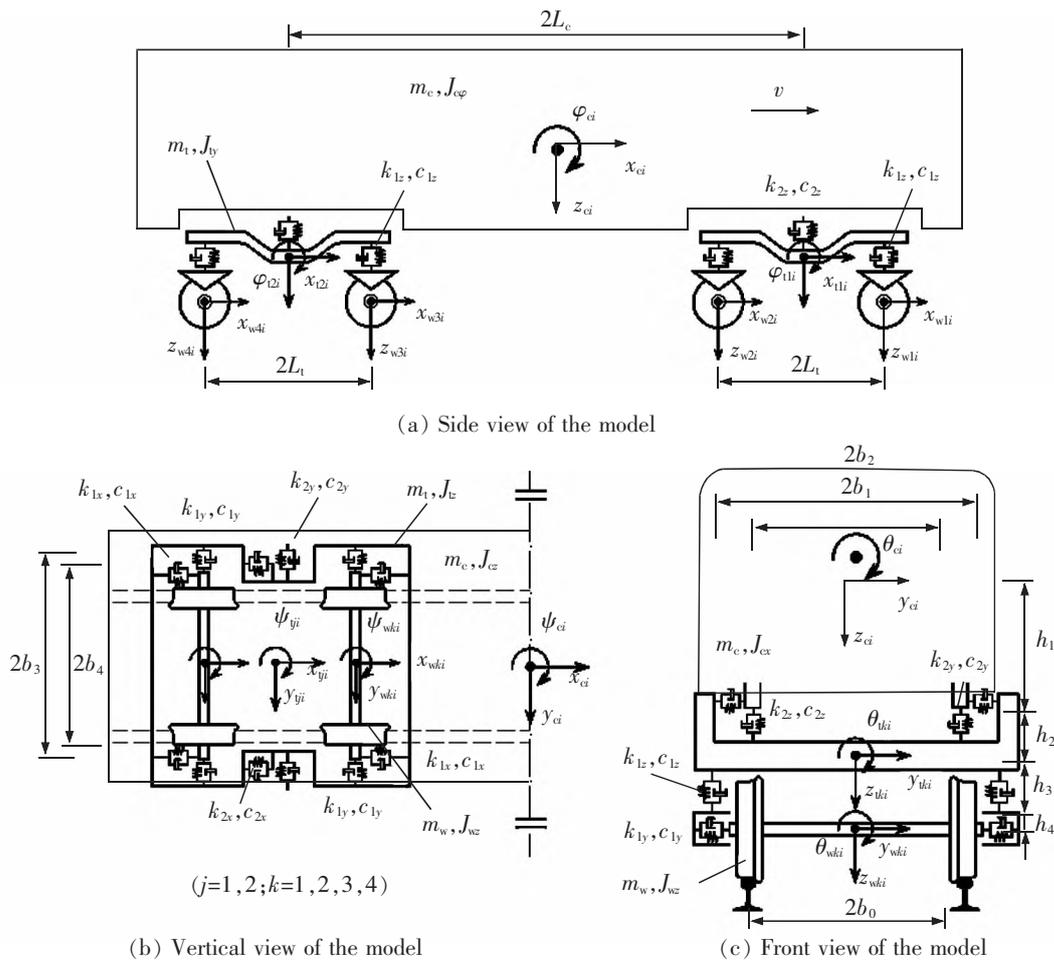


图 1 车辆动力学模型  
Fig.1 Vehicle dynamics model

## 2 动力放大系数谱

### 2.1 基于车桥耦合振动的放大系数统计规律分析

基于上述列车-轨道-桥梁耦合振动分析模型,综合分析计算所得放大系数结果,下面给出部分桥梁结构放大系数的车桥耦合计算值与规范计算值的对比情况,对比图见图2所示。

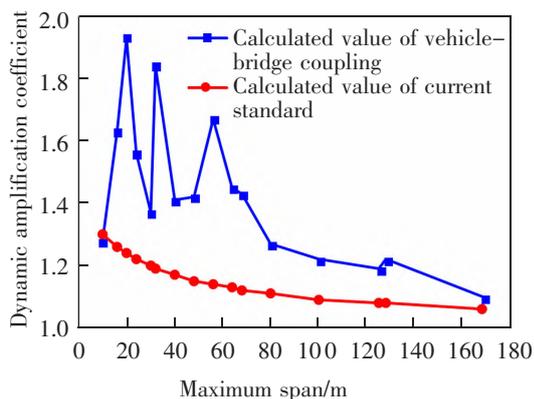


图2 现有规范动力放大系数与实际计算结果对比  
Fig.2 The comparison of amplification coefficients and calculation results

根据图2,共16个偏差百分比数据,其中,按照铁路规范计算所得的动力放大系数均远小于车桥耦合计算值,偏差超过5%的数据有14个,占总数的87.5%。由此可见,铁路规范计算所得动力放大系数,暂时无法准确、安全地计算桥梁结构由于车桥耦合而产生的动力放大系数,需要另外寻找一个适合计算车桥耦合的动力放大系数公式。

### 2.2 动力放大系数谱的提出与指标选择

目前桥梁动力方面的研究主要可分为3方面:桥梁抗震研究,桥梁抗风研究,桥梁车桥耦合研究。有学者<sup>[20-21]</sup>进行了一些针对地震设计中动力放大系数谱的研究,本文类比结构抗震动力学中的“弹性反应谱”的概念,提出车桥耦合动力学中的“车桥耦合动力放大系数谱”。具体含义如下:基于概率统计学原理,对于具有相同自振周期的桥梁结构,在不同车速、不同列车类型下,由于车桥耦合现象导致桥梁结构在列车荷载作用下响应的动力放大系数在一定保证率下的包络值。

图3展示了不同结构自振周期与放大系数的关系。根据以往学者的研究结果,影响动力放大系数的因素主要可以分为两部分,一部分是桥梁结

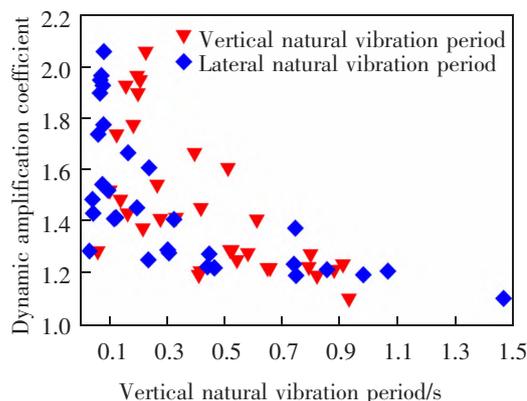


图3 结构自振周期与放大系数关系  
Fig.3 Relationship between natural vibration periods and amplification coefficient of structures

构自身特性,如结构刚度、质量、支座等;另一部分是车辆的自身特性,如车辆组成结构、轮重轮距、阻尼等。综合车桥耦合研究的意义,可简单理解为,放大系数是车桥在发生“共振”现象时的振幅与静载作用下挠度的比值。具有相似自振周期的不同桥型,发生“共振”时的工况也较为相似,选取结构自振周期作为动力放大系数谱方法的指标比较有代表性。而对于同一桥型的桥梁,其自振周期较为接近,选取自振周期作为指标也更有利于数据的归纳总结。

### 2.3 动力放大系数计算结果

本文统计了不同类型高速列车以不同车速通过不同桥梁结构简支梁桥(SS)、连续梁桥(CB)、钢构桥(Steel)时的动力放大系数情况,现有德国ICE城际特快列车(German ICE)、法国TGV高铁(French TGV)、日本新干线500系列列车(Japan 500 series)、国产动力分散式列车(Power distributed train)、国产先锋号电力动车组(DJF2 train)、国产中华之星动车组(China star train)。将不同类型高速列车作用下动力放大系数与结构自振周期的数据表示在表1中。

对于德国ICE列车、法国TGV列车、日本500系列列车,其车速等级为:250,275,300,325,350,375,400,420 km/h;对于国产先锋号列车和国产中华之星列车,其车速等级为:160,180,200,220,240,270 km/h。将各计算结果进行提取汇总,结果如表2所示,其中桥梁编号与表1保持一致。表1和表2中数据暂缺的部分以斜杠表示。

表 1 不同类型高速列车作用下桥梁结构动力放大系数  
 Tab.1 Dynamic amplification coefficient of bridge structures under different types of high-speed trains

Bridge number	Type	Span combination /m	Vertical period /s	Lateral period /s	German ICE	French TGV	Japan 500 series	Power distributed train	DJF2 train	China star train
1	SS	24	0.137	0.04	1.367	1.341	1.485	1.434	/	1.271
2	SS	32	0.196	0.071	1.952	1.966	1.579	1.678	1.159	1.127
3	SS	32	0.206	0.067	1.875	1.69	1.836	1.949	1.244	1.289
4	SS	32	0.198	0.066	1.897	1.64	1.791	1.899	1.236	1.263
5	SS	16	0.101	0.094	1.521	1.434	1.461	1.505	1.236	1.198
6	SS	40	0.276	0.115	1.322	1.411	1.373	1.339	1.171	1.122
7	CB	80+128+80	0.913	0.741	1.23	1.211	1.213	1.234	1.173	1.183
8	CB	55+80+55	0.581	0.306	1.264	1.278	1.266	1.209	1.21	1.122
9	CB	48+5×80+48	0.8	0.446	1.232	1.215	1.227	1.25	1.057	1.103
10	CB	44+68+44	0.543	0.234	1.273	1.182	1.242	1.267	1.219	1.191
11	CB	32+32	0.225	0.079	1.95	1.548	1.99	2.06	1.129	1.122
12	CB	24+24+24	0.162	0.042	1.321	1.419	1.321	1.227	1.321	1.432
13	CB	32+32+32	0.265	0.074	1.543	1.425	1.541	1.518	1.425	1.245
14	CB	48+80+48	0.526	0.302	1.289	1.212	1.186	1.272	1.202	1.212
15	CB	60+100+60	0.658	0.465	1.206	1.219	1.196	1.211	1.171	1.198
16	Steel	48+80+48	0.417	1.068	1.207	/	/	/	1.158	1.174
17	Steel	48+80+48	0.41	0.983	1.192	/	/	/	1.157	1.171
18	Steel	96+168+96	0.934	1.471	/	/	/	/	1.092	1.101
19	Steel	10+10+10	0.058	/	1.284	1.282	1.191	1.238	1.205	1.278
20	CB	32+48+32	0.331	0.122	1.257	1.15	1.401	1.415	1.257	1.145
21	CB	40+56+40	0.396	0.164	1.198	1.257	1.538	1.611	1.667	1.409
22	CB	40+64+40	0.418	0.195	1.126	1.193	1.129	1.144	1.194	1.453
23	CB	48+80+48	0.519	0.301	1.289	1.212	1.186	1.272	1.202	1.212
24	CB	60+100+60	0.649	0.464	1.206	1.219	1.196	1.211	1.171	1.198
25	CB	44+68+44	0.512	0.237	1.224	1.106	1.156	1.139	1.608	1.411
26	CB	55+80+55	0.612	0.324	1.301	1.257	1.238	1.221	1.408	1.206
27	CB	48+5×80+48	0.794	0.44	1.214	1.196	1.207	1.223	1.071	1.085
28	CB	70+125+70	0.822	0.749	1.189	1.179	1.158	1.18	1.135	1.173
29	CB	80+128+80	0.882	0.857	1.166	1.212	1.162	1.209	1.038	1.1
30	Steel	12+16+12	0.124	0.059	1.599	1.739	1.694	1.669	1.564	1.42
31	Steel	16+20+16	0.156	0.075	1.873	1.928	1.874	1.846	1.372	1.434
32	Steel	16+24+16	0.182	0.078	1.543	1.775	1.766	1.731	1.19	1.162
33	Steel	30	0.216	0.746	1.374	1.164	1.26	1.235	1.144	1.096

表2 不同车速作用下桥梁结构动力放大系数

Tab.2 Dynamic amplification coefficient of bridge structures under different speeds

Bridge number	Vertical period/s	Lateral period/s	160 km/h	180 km/h	200 km/h	220 km/h	240 km/h	250 km/h
1	0.137	0.040	1.059	1.042	1.082	1.421	1.176	1.163
2	0.196	0.071	1.074	1.096	1.09	1.076	1.141	1.206
3	0.206	0.067	1.121	1.098	1.113	1.289	1.204	1.312
4	0.198	0.066	1.169	1.115	1.108	1.225	1.263	1.326
5	0.101	0.094	1.124	1.106	1.204	1.091	1.105	1.126
6	0.276	0.115	1.077	1.07	1.079	1.124	1.147	1.411
7	0.913	0.741	1.111	1.122	1.145	1.178	1.183	1.1
8	0.581	0.306	1.21	1.08	1.05	1.061	1.081	1.051
9	0.800	0.446	1.025	1.057	1.058	1.077	1.096	1.047
10	0.543	0.234	1.205	1.219	1.081	1.072	1.134	1.062
11	0.225	0.079	1.122	1.091	1.121	1.129	1.104	1.129
12	0.162	0.042	1.1	1.167	1.343	1.376	1.407	1.13
13	0.265	0.074	1.108	1.425	1.206	1.205	1.245	1.425
14	0.526	0.302	1.169	1.173	1.202	1.166	1.193	1.125
15	0.658	0.465	1.104	1.127	1.14	1.155	1.158	1.075
16	0.417	1.068	1.093	1.11	1.121	1.132	1.155	1.105
17	0.410	0.983	1.102	1.112	1.124	1.136	1.148	1.121
18	0.934	1.471	1.075	1.079	1.092	1.085	1.101	0
19	0.058	/	1.071	1.115	1.207	1.22	1.235	1.125
270 km/h	275 km/h	300 km/h	325 km/h	350 km/h	375 km/h	400 km/h	420 km/h	
1.231	1.193	1.288	1.485	1.386	1.193	1.258	1.341	
1.159	1.253	1.484	1.926	1.966	1.309	1.559	1.952	
1.172	1.417	1.553	1.69	1.389	1.513	1.763	1.949	
1.195	1.302	1.404	1.534	1.64	1.495	1.715	1.899	
1.236	1.405	1.521	1.42	1.434	1.348	1.339	1.344	
1.171	1.278	1.198	1.373	1.255	1.195	1.14	1.145	
1.181	1.111	1.153	1.187	1.193	1.216	1.23	1.234	
1.122	1.098	1.106	1.152	1.174	1.264	1.266	1.278	
1.103	1.086	1.097	1.099	1.103	1.176	1.221	1.25	
1.191	1.092	1.135	1.142	1.158	1.202	1.174	1.273	
1.116	1.218	1.548	1.215	1.225	1.591	1.99	2.06	
1.432	1.177	1.187	1.245	1.321	1.323	1.387	1.419	
1.25	1.165	1.202	1.345	1.543	1.411	1.344	1.212	
1.212	1.146	1.159	1.186	1.196	1.212	1.251	1.289	
1.198	1.112	1.135	1.176	1.206	1.195	1.216	1.219	
1.174	1.139	1.165	1.189	1.207	/	/	/	
1.171	1.152	1.165	1.178	1.192	/	/	/	
0	/	/	/	/	/	/	/	
1.278	1.167	1.133	1.191	1.216	1.224	1.265	1.284	

### 3 动力放大系数谱的计算

#### 3.1 基于概率统计的动力放大系数谱计算方法

根据前文所述动力放大系数谱的概念,其具体

计算方法为:选取若干拥有不同自振周期的桥梁结构,并将每一个结构输出响应值与输入激励值的比值(即动力放大系数)进行处理,最终得到一系列动

力放大系数—结构自振周期的二维点位图,并选取一定的保证率,将点位进行包络,此包络线即为动力放大系数谱。

根据表 1 和表 2 中的动力放大系数数据,在一定保证率的前提下,满足包络要求。动力放大系数谱与结构自振周期的关系表达式如下

$$\lambda_s = \begin{cases} 7.143T_s + 1 & 0 < T_s < 0.14 \\ 2 & 0.14 \leq T_s \leq 0.25 \\ \frac{0.06}{T_h} + 1.25 & T_s > 0.25 \end{cases}$$

$$\lambda_h = \begin{cases} 14.286T_h + 1 & 0 < T_h < 0.7 \\ 2 & 0.07 \leq T_h \leq 0.08 \\ \frac{0.06}{T_h} + 1.25 & T_h > 0.08 \end{cases}$$

式中: $\lambda_s$ 为结构竖向动力放大系数; $T_s$ 为结构竖向自振周期,s; $\lambda_h$ 为结构横向动力放大系数; $T_h$ 为结构横向自振周期,s。

以上两个动力放大系数谱的曲线形分别见图 3,图 4 所示。

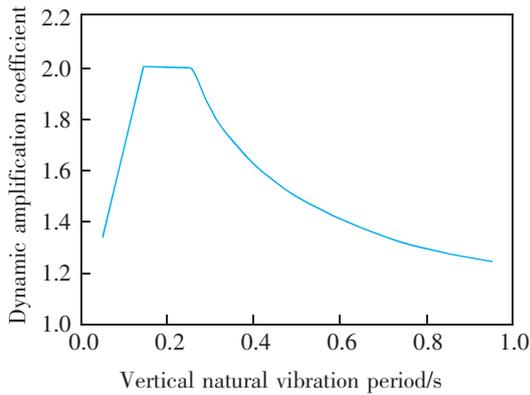


图 3 竖向自振周期动力放大系数谱曲线

Fig.3 Spectrum curve of vertical dynamic amplification coefficients (DAC)

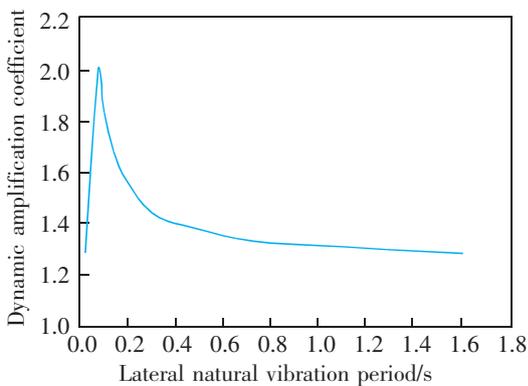


图 4 横向自振周期动力放大系数谱曲线

Fig.4 Spectrum curve of lateral dynamic amplification coefficients (DAC)

根据以上动力放大系数谱的计算流程,对表 1 和表 2 中的动力放大系数数据进行包络线的计算,计算结果与原图绘在同一坐标系内,结果如图 5~图 8 所示。

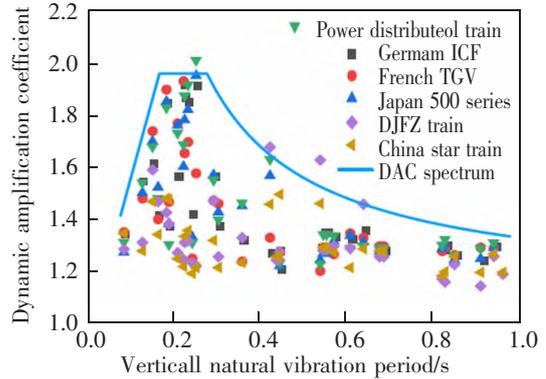


图 5 动力放大系数谱与结构竖向自振周期关系图——不同列车类型

Fig.5 Relationship between dynamic amplification coefficient spectrum and vertical natural vibration period of structures—different vehicle models

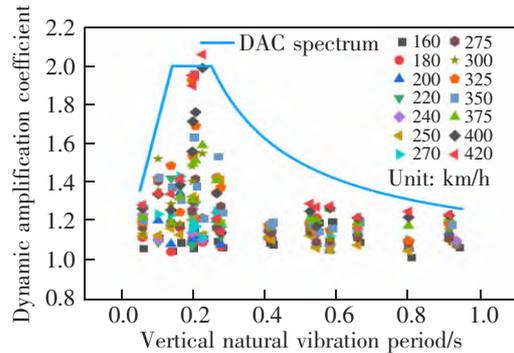


图 6 动力放大系数谱与结构横向自振周期关系图——不同列车类型

Fig.6 Relationship between dynamic amplification coefficient spectrum and lateral natural vibration period of structures

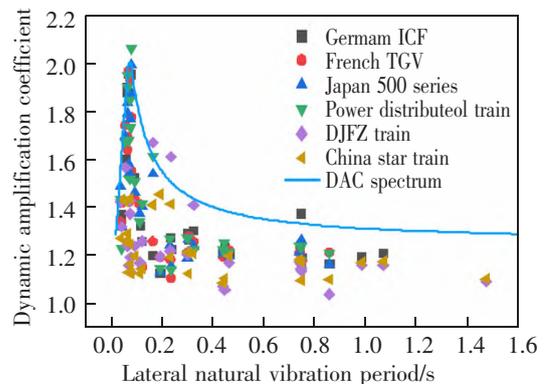


图 7 动力放大系数谱与结构竖向自振周期关系图——不同车速

Fig.7 Relationship between dynamic amplification coefficient spectrum and vertical natural vibration period of structures—different velocities

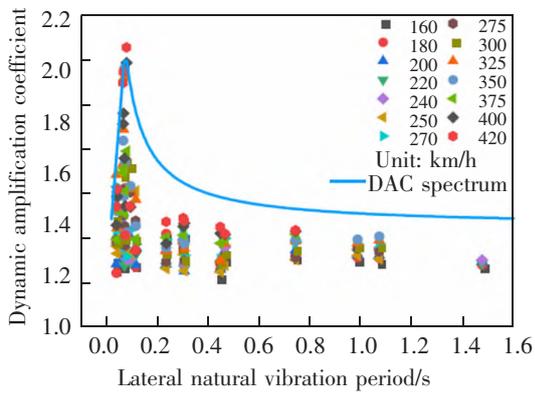


图8 动力放大系数谱与结构横向自振周期关系图

Fig.8 Relationship between dynamic amplification coefficient spectrum and lateral natural vibration period of structures

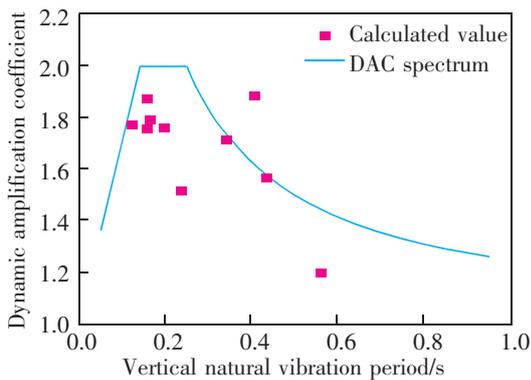


图9 纵向动力放大系数对比情况

Fig.9 Comparison of vertical dynamic amplification coefficient

### 3.2 合理性及适用性证明

另选 10 座混凝土桥梁进行车桥耦合动力分析计算,计算内容为不同结构在不同列车类型、不同车速下的桥梁结构响应情况,最终选取计算的动力放大系数,作为验算动力放大系数谱合理性的指标。为了方便进行对比,将计算结果以图的形式给出,如图 9,图 10 所示。

经过以上图表计算结果的分析,发现 10 座桥梁中,仅有一座按照本文提出的动力放大系数谱计算所得结果偏于不安全。但总体上,根据本文所列数据的对比情况来看,本文提出的动力放大系数谱的概念是合理的。

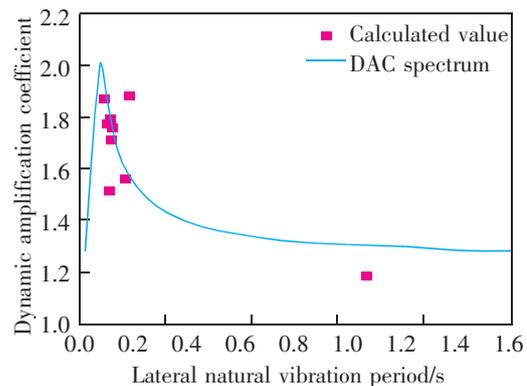


图10 横向动力放大系数对比情况

Fig.10 Comparison of lateral dynamic amplification coefficient

## 4 动力系数谱方法的说明

### 4.1 动力放大系数谱的不足

动力放大系数谱方法也存在以下几点问题:

1) 本文提出的动力放大系数谱法暂时仅考虑同一结构在不同列车类型、时速下,动力系数的最大值。实际上,桥梁通过的列车和时速都较为固定,可能达不到放大系数谱中的数值,结果会偏为保守,且对于某些情况的偏差较大,其精度还需要进一步的修正。

2) 本文提出的动力放大系数谱的公式理论上仅适合混凝土梁桥结构,并且本文所计算的高铁桥梁大多数都处于直线段,弯扭耦合作用下的适用性尚不明晰,且本方法对于其他形式桥梁结构是否依然适用,还有待进一步的探讨与研究。

### 4.2 动力放大系数谱的修正期望

综合本文动力放大系数谱方法的不足,给出如下几个修改方向的思路 and 方向:

1) 在动力放大系数谱曲线表达式中,对峰值(即分段函数的第二段的数值)乘以一个结构修正系数,以考虑结构最大跨径、静活载作用下挠跨比对结构动力放大系数的影响。

2) 可以对动力放大系数谱曲线表达式的分段区间进行修正,将分段区间的节点表示为列车类型及时速、车辆自振频率的函数,以更加分明地表示,结构和车辆的自振周期之间的关系对其动力放大系数的影响。

3) 本文提出的方法具有一定的可行性,可以根据本文的方法,对其他形式的桥梁结构及在曲线段弯扭耦合作用下进行动力方法系数谱曲线的计算,由

此来找到适合每一种桥梁结构的动力放大系数谱。

## 5 结论

本文基于概率统计学的“谱函数”方法,在一定保证率下拟合得到了适合计算车桥耦合下桥梁结构动力放大系数谱的函数表达式,并得出结论。

1) 动力放大系数谱法在一定程度上简化了桥梁设计验算环节车桥耦合动力放大系数的计算流程,实现了车桥耦合问题静力化的目的,对于指导铁路钢筋混凝土形式桥梁设计具有通用性和高效性。

2) 可以进一步对本方法进行参数修正并依据本方法对其他形式的桥梁结构进行推广,以满足今后工程实际中的需求。

## 参考文献:

- [1] 余志武,何华武,蒋丽忠,等. 多动力作用下高速铁路轨道-桥梁结构体系动力学及关键技术研究[J]. 土木工程学报,2017,50(11):1-9.  
YU Z W, HE H W, JIANG L Z, et al. Dynamics and key technology research on high-speed railway track-bridge system under multiple dynamic sources[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 1-9.
- [2] LI X, WANG M, XIAO J, et al. Experimental study on aerodynamic characteristics of high-speed train on a truss bridge: A moving model test[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 26-38.
- [3] ZHAI W M, CAI C B. Train/Track/Bridge dynamic interactions: Simulation and applications[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37: 653-665.
- [4] ZHAI W, HAN Z, CHEN Z, et al. Train-track-bridge dynamic interaction: A state-of-the-art review[J]. Vehicle System Dynamics, 2019, 57(7): 984-1027.
- [5] ZHANG N, XIA H, GUO W. Vehicle-bridge interaction analysis under high-speed trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 309(3): 407-425.
- [6] LI Q, XU Y L, WU D J, et al. Computer-aided nonlinear vehicle-bridge interaction analysis[J]. Journal of Vibration and Control, 2010, 16(12): 1791-1816.
- [7] 张士铎. 活载冲击系数还是动力系数[J]. 公路, 1992(2): 7-12.  
ZHANG S D. Live load impact coefficient or dynamic coefficient[J]. Highway, 1992(2): 7-12.
- [8] 曹雪琴, 朱金龙. 城市轨道交通桥梁车辆荷载动力系数测试与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2003(5): 30-35.  
CAO X Q, ZHU J L. Field test and analysis of the impact factor of the vehicle loading on bridge [J]. Urban Mass Transit, 2003(5): 30-35.
- [9] 朱金龙, 倪章军. 城市轨道交通桥梁的动力系数计算式探讨[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(8): 950-954.  
ZHU J L, NI Z J. Determination of dynamic factors for bridge design in urban railway transportation system[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2002, 30(8): 950-954.
- [10] 方秦, 郭东, 张亚栋, 等. 梁的剪力动力系数的确定[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 181-185.  
FANG Q, GUO D, ZHANG Y D, et al. Determination of shear dynamic factor in beams[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 181-185.
- [11] 蒲黔辉, 魏召兰, 李晓斌. 大跨连续钢桁拱桥动力系数影响因素研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 123-128.  
PU Q H, WEI Z L, LI X B. Study on dynamic coefficient influence factors of continuous steel truss arch bridge with large span[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(6): 123-128.
- [12] 何旭辉, 赵安华, 李鹏. 直线电机列车作用下桥梁动力系数研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(4): 34-39.  
HE X H, ZHAO A H, LI P. Study on dynamic factor of bridge under linear induction metro train load[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(4): 34-39.
- [13] 邓建良, 吴定俊, 李奇. 移动均布荷载作用下简支梁桥动力系数分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 56-62.  
DENG J L, WU D J, LI Q. Impact factor analysis of simply-supported girder bridges traversed by uniformly distributed moving loads[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 56-62.
- [14] 杜友福, 陈楚阳, 李向娜. 铁路桥梁主梁横向动力系数测试研究[J]. 建材世界, 2014, 35(4): 82-85.  
DU Y F, CHEN C Y, LI X N. Experimental research on transverse dynamic coefficient of bridge girder[J]. The World of Building Materials, 2014, 35(4): 82-85.
- [15] 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.
- [16] 胡所亭, 王丽, 蔡超勋. 铁路桥梁设计动力系数研究进展

- [J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 1-5.  
 HU S T, WANG L, CAI C X. Research progress on dynamic coefficient of railway bridge design [J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 1-5.
- [17] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变值原理[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(1): 1-3.  
 ZENG Q Y. The principle of total potential energy with stationary value in elastic system dynamics[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(1): 1-3.
- [18] 曾庆元, 杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁梁空间分析的桁段有限元法[J]. 铁道学报, 1986(2): 48-59.  
 ZENG Q Y, YANG P. The rule of "taking the seat according to the number" for forming matrix and the truss segment finite element method for spatial analysis of truss girder[J]. Journal of the China Railway Society, 1986(2): 48-59.
- [19] ZHI W Y, JIAN F M, FENG Q, et al. Non-stationary random vibration analysis of a 3D train-bridge system using the probability density evolution method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 366(Supplement C): 173-189.
- [20] 何浩祥, 丁佳伟, 程时涛. 地震动广义动力放大系数谱及其特性研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 170-178.  
 HE H X, DING J W, CHENG S T. Generalized dynamic amplification coefficient spectrum of ground motion and its characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 170-178.
- [21] 栾极. 设计反应谱场地放大系数和动力放大系数的研究

[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

LUAN J. Study on site amplification coefficient and dynamic amplification coefficient of seismic design response spectrum[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.



第一作者: 吴大宏(1975—), 男, 正高级工程师, 博士, 获省部级优秀勘察设计奖多项, 国家实用新型专利 3 项, 研究方向为铁路桥梁。E-mail: 505723786@qq.com。



通信作者: 毛建锋(1986—), 男, 副教授, 博士, 获湖南省科技进步一等奖、中国铁道学会特等奖、湖南省科技创新团队奖, 研究方向为铁路/磁悬浮车-轨-桥耦合随机动力学、轨-桥结构智能养维。E-mail: jfmao1@csu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)