

文章编号:1000-582X(2012)08-054-08

## 动力指纹线方法在车桥共振分析中的应用

张 田,夏 禾,郭薇薇

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

**摘 要:**铁路桥梁的动力行为(动挠度、动加速度)是桥上高速列车运行安全控制的重要指标之一。为此,基于列车动力指纹线和桥梁动力指纹线的概念,将列车激励简化为一组移动集中力,从理论上推导出了列车动力指纹线的数学表达式,提出了简支梁跨中竖向最大加速度的简化计算方法,据此得到车桥发生共振时列车速度,从而可以快速计算简支桥梁的动力行为。通过实例验证了文中方法的可行性,并分析了车桥共振的发生机理、影响参数,以及桥梁加速度计算时高频成分的影响。

**关键词:**动力指纹;共振车速;高速列车;桥梁加速度

**中图分类号:**U448.13

**文献标志码:**A

## Dynamic signatures method for analysis of vehicle-bridge resonance

ZHANG Tian, XIA He, GUO Weiwei

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

**Abstract:** The dynamic behavior of railway bridges (dynamic deflection and acceleration) is one of the running safety control indices for high-speed trains. Therefore, the dynamic behavior of railway bridges is studied based on the concept of the dynamic signatures of the train and the bridge. By simplifying the train excitation as a series of moving concentrated forces, the mathematical expressions of the dynamic signatures of the train are obtained through theoretical derivations, and then a method is presented for calculating the resonance speed of trains and the maximum vertical acceleration of the bridge. With this method, the dynamic responses of the simple supported bridge can be calculated quickly. The feasibility of this method is validated through some examples, in which the resonance mechanism of train-bridge system and the influencing factors are investigated. In addition, the effect of high frequency components to the bridge acceleration is also analyzed.

**Key words:** dynamic signature; resonance speed of trains; high-speed train; bridge acceleration

列车-桥梁系统振动问题自从 100 多年前因英国某座桥梁运行列车引起强烈振动发生破坏而受到各国学者的关注,目前中国高速铁路、重载铁路的大发展,铁路车辆与桥梁之间耦合动力作用问题日益突出,车桥耦合振动系统分析是保证桥梁安全、车辆

安全运行的必要环节,也成为国内外研究的热点问题<sup>[1-10]</sup>,在车辆模型、轮轨关系和地震、风荷载作用下桥梁结构的响应及行车安全性等方面取得了大量的研究成果。而车桥系统共振分析是车桥耦合振动分析中的一类特殊问题,发生共振时,桥梁的振动会

收稿日期:2012-02-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90715008);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2011YJS256, 2012JBM075)

作者简介:张田(1986-),男,北京交通大学博士研究生,主要从事桥梁动力学研究,(E-mail)saghb@126.com;

夏禾(联系人),男,北京交通大学教授,博士生导师,(E-mail)hxia88@163.com。

急剧增大,影响桥梁结构的安全,远超过规范限值,对行车安全性及乘车舒适度构成威胁,因此研究桥梁的动力行为及快速估算桥梁的最大振动加速度对工程设计人员来说具有重要的意义。

根据有关文献[1-3]的研究,在高速铁路桥梁上,有规则的轴重排列所引起的荷载周期与梁的固有周期满足一定条件时就会引起共振。从物理学的角度,当系统受外界激励,作强迫振动时,若外界激励的频率接近系统频率,强迫振动的振幅可能达到非常大的值,这种现象叫共振;从结构动力学的角度,当荷载频率与结构物的固有频率相等或接近时,即体系频率比  $\beta$  接近于 1 时,体系将发生共振,将引起体系很大的响应幅值。

对车桥共振问题的研究,多采用解析方法得出各种桥型的共振条件和影响因素。文献[11]将列车荷载简化为移动集中力,研究了列车以一定速度通过桥梁时车桥系统的共振机理和发生共振的条件;文献[12-13]在移动荷载假设下用解析法研究了影响桥梁动力响应的参数,对弹性支承梁的共振机理进行了详细论述;文献[14]则基于梁上移动荷载的共振和消振条件,提出了抑制桥梁共振的优化设计方法,得到了抛物线下承式拱桥在移动荷载作用下动力响应的闭合解,采用正则坐标变换得到系统的解耦控制方程,据此确定车桥共振条件。

基于动力指纹线的概念,研究车桥共振问题,理论上推导出列车动力指纹线和桥梁动力指纹线的数学表达式,并绘制了不同类型列车的动力指纹线,提出了简支梁跨中竖向最大加速度的简化计算方法,据此得到车桥发生共振时列车速度,从而可以快速计算简支梁桥的动力行为,为工程技术人员提供指导。通过实例验证了文中方法的可行性,并对车桥共振的发生机理、影响参数,尤其对桥梁加速度计算时高频成分的影响即采用振型叠加法计算时选取桥梁振型阶数作了详细的分析。

## 1 桥梁的共振反应

### 1.1 共振现象

桥梁结构的安全性在很大程度上取决于桥梁的动力性能,不仅要依据桥梁的变形和应力,而且要依据振动加速度值。求得加速度通常是很复杂的,需要做车桥动力相互作用分析。目前,很多情况下动力效应是通过动力放大系数或冲击系数来考虑的,以刚度为  $EI$ 、均匀分布质量  $\bar{m}$ 、阻尼为  $c$  的等截面简支梁而言,其冲击系数(移动荷载作用下桥梁的动力响应与相同静荷载作用下桥梁的响应之比)是由梁的偏微分方程求解得到:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = P(x,t),$$

$$P(x,t) = P(t)\delta(x-Vt), \quad (1)$$

其中  $P(t)$  表示以匀速  $V$  在梁上移动的荷载, $\delta$  为 Dirac 函数,其特性如下:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x-a)f(x)dx = f(a), \delta(x-a) = 0 (\forall x \neq a).$$

式(1)中的荷载  $P(x,t)$  是运动的列车,当列车速度改变时,加载频率发生变化,列车速度达到某一特定的值,加载频率就会接近桥梁结构或车辆的自振频率,从而引起共振<sup>[4-11]</sup>,当然还有其他因素引起共振,例如列车类型。

法国的第一条高速铁路线(巴黎—里昂 TGV 东南线),开通运营后不久就因轨道变形过大而降低运营速度,但是经检查其桥梁刚度等参数都在 UIC(国际铁路联盟)定义的范围。测量出桥梁的竖向加速度大于 0.7 g,此时“铁路道碴的碎石就像炒锅里的栗子”,这也被 SNCF(法国铁路局)和 UIC 的实验所证实,此时即发生了共振<sup>[15]</sup>。实际上,由于列车荷载在桥上的周期性运动,式(1)的荷载激励应考虑由轴重的连续性而产生的周期特性,也即:

$$P(x,t) = \delta(x-Vt) \cdot [\bar{P} + Q \cdot \sin(\omega t)], \quad (2)$$

其中: $\omega$  表示移动列车荷载的加载频率; $\bar{P}$  表示常量力幅值; $Q$  表示波动变化力幅值。该荷载导致桥梁的共振,进一步放大桥梁位移及加速度响应。

### 1.2 共振响应分析

目前有很多方法求解上述偏微分方程,一般都是通过模态分析,再由振型叠加法得到桥梁的响应。然而直接通过对激励函数的研究去理解铁路桥梁的共振响应似乎也是一条可行之道,也可以定义列车临界速度。

车桥系统的分析模型中,移动荷载模型是最一般的模型,把列车荷载简化为一列移动的常值荷载,代表给定列车的每个轴重;车辆-结构相互作用模型,车辆不再由常数值的移动荷载代替,而是由点质量、弹簧及刚体构成,分别代表轮对及转向架、悬挂装置和车体。已有的研究表明<sup>[16]</sup>,相比于移动荷载模型,采用车辆-结构的相互作用模型常常会减小桥梁的动力响应,可以从能量的角度来解释,振动部分能量从桥上传递到车上,对短跨桥( $L \leq 30$  m)来说,减小量达 30%;对长跨桥或连续梁桥,减小量一般是很少的。因此,对一般只计算桥梁的动力响应时,可以只采用移动荷载模型,而不考虑动力相互作用。文中对列车激励简化为一列速度为  $V$  的匀速移动荷载,如图 1 所示。

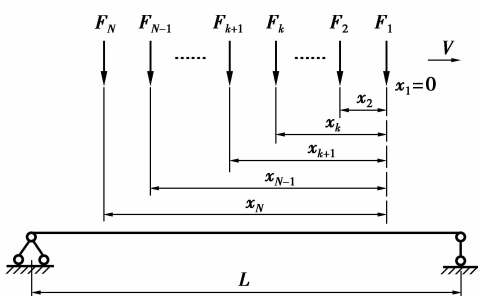


图 1 一组移动集中力作用下的简支梁模型

$P(x, t)$  可表示为

$$P(x, t) = \sum_{k=1}^N F_k \cdot \delta[x - V \cdot (t - t_k)] \cdot H_{\frac{L}{V}}(t - t_k), \quad (3)$$

式中:  $t_k = \frac{x_k}{V}$ ;  $F_k$  表示列车第  $k$  轴轴重, kN;

$H_T(t)$  称为阶跃函数, 定义如下:

$$H_T(t) = \begin{cases} 1 & (|t| \leq \frac{T}{2}), \\ 0 & (|t| > \frac{T}{2}). \end{cases} \quad (4)$$

按振型分解法求解方程(1), 以梁的基阶振型求解, 可得方程(1)的通解为

$$q(t) = e^{-\xi\omega_1 t} [A \sin(\omega_D t) + B \cos(\omega_D t)] + \frac{a_0}{k} + \frac{1}{k} \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)], \quad (5)$$

其中:  $A_n = \frac{a_n 2\xi\beta_n + b_n(1-\beta_n^2)}{(1-\beta_n^2)^2 + (2\xi\beta_n)^2}$ ,

$B_n = \frac{a_n(1-\beta_n^2) - b_n 2\xi\beta_n}{(1-\beta_n^2)^2 + (2\xi\beta_n)^2}$ ;  $\beta_n = \frac{n\omega}{\omega_1}$ ,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ,

$\omega_1 = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$ ,

$\xi = \frac{c}{2\omega_1 m}$ ,  $\omega_D = \omega_1 \sqrt{1-\xi^2} \approx \omega_1$ ,  $k = \frac{\bar{m}L\omega_1^2}{2} = \frac{\pi^4 EI}{2L^3}$ ,

$a_0 = \frac{2L}{\pi(L+x_N)} \sum_{k=1}^N F_k$ ,

$a_n = \frac{4L}{\pi(L+x_N)} \cdot \frac{\cos\left(\frac{Ln\omega}{2V}\right)}{1 - \left(\frac{Ln\omega}{\pi V}\right)^2} \cdot \sum_{k=1}^N F_k \cos(n\omega t_k)$ ,

$b_n = \frac{4L}{\pi(L+x_N)} \cdot \frac{\cos\left(\frac{Ln\omega}{2V}\right)}{1 - \left(\frac{Ln\omega}{\pi V}\right)^2} \cdot \sum_{k=1}^N F_k \sin(n\omega t_k)$ .

再由初始条件( $t=0$  时),  $q(0)=0$  和  $\dot{q}(0)=0$ , 解得

$$A = -\frac{1}{k} \left( a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \right), B \cong -\frac{1}{k} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n A_n \right).$$

于是, 桥梁跨中竖向加速度为

$$A(t) = \sin\left(\frac{\pi}{L} \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \ddot{q}(t) =$$

$$-\omega_D^2 \cdot e^{-\xi\omega_1 t} [A \sin(\omega_D t) + B \cos(\omega_D t)] -$$

$$\frac{1}{k} \sum_{n=1}^{\infty} (n\omega)^2 \cdot [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)]. \quad (6)$$

对式(6)做进一步的简化, 并将各式代入可得

$$A_{\max} = C \cdot B(L/\lambda) \cdot D(\lambda), \quad (7)$$

其中:  $C$  为常数, 取决于桥梁的单位长度质量  $\bar{m}$ ,

$$C = \frac{2\omega_1^2 L}{k\pi} = \frac{4}{\bar{m}\pi}; \quad (8)$$

$B(L/\lambda)$  为桥梁的动力指纹线, 取决于桥梁跨长和列车荷载激励波长,

$$B(L/\lambda) = \left| \frac{\cos\frac{\pi L}{\lambda}}{\left(\frac{2L}{\lambda}\right)^2 - 1} \right|; \quad (9)$$

$D(\lambda)$  为列车激励谱, kN/m; 取决于列车动力指纹线  $S_{0,i}(\lambda)$  和结构的阻尼比  $\xi$ .

$$D(\lambda) = \max_{i=1}^N \left[ \frac{1}{\xi x_i} \cdot (1 - e^{-2\pi\xi x_i}) \cdot S_{0,i}(\lambda) \right]; \quad (10)$$

$S_{0,i}(\lambda)$  表示前  $i$  个轴激励特性, 当  $i=N$  时, 记为  $S_0(\lambda)$ , 称为列车动力指纹线, 表达式分别为

$$S_{0,i}(\lambda) = \sqrt{\left( \sum_{k=1}^i F_k \cos\frac{2\pi x_k}{\lambda} \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^i F_k \sin\frac{2\pi x_k}{\lambda} \right)^2}, \quad (11)$$

$$S_0(\lambda) = \sqrt{\left( \sum_{k=1}^N F_k \cos\frac{2\pi x_k}{\lambda} \right)^2 + \left( \sum_{k=1}^N F_k \sin\frac{2\pi x_k}{\lambda} \right)^2}, \quad (12)$$

其中:  $\lambda$  为列车荷载的激励波长,  $m$ ;  $\lambda = \frac{2\pi V}{\omega_1}$ ;  $x_k$  为列车第  $k$  轴到第一个轴的距离,  $m$ ;  $F_k$  为列车第  $k$  轴轴重, kN.

可以看出, 列车动力指纹线  $S_0(\lambda)$  只是列车轴重和轴距的函数, 采用此方法可以快速比较不同列车的影响。例如, 先计算各种列车的动力指纹线, 然后绘出其包络线, 如果对某一类新型列车, 它的动力指纹线小于包络线的数值, 说明该条线路可以运行该类型列车, 而不需要重新计算结构的动力行为。

采用上述表达式, 也可求出列车以速度  $V$  过桥时桥梁跨中最大竖向加速度以及车桥共振速度。从式(12)可以看出, 发生共振时下式成立:

$$\omega_1 = \frac{2\pi V_c}{\lambda_c}, \quad (13)$$

式中,  $V_c$  为引起桥梁共振的列车临界速度, km/h;  $\omega_1$  为桥梁的一阶自振圆频率, rad/s;  $\lambda_c$  为列车谱或列车动力指纹线达到峰值时的横坐标,  $m$ .

对简支梁来说, 跨中的最大竖向加速度表示为

式(7),若令

$$G(L, \xi, \lambda) = B(L/\lambda) \cdot D(\lambda), \quad (14)$$

则当给定桥梁的跨度  $L$ 、阻尼比  $\xi$  以及列车荷载的激励波长  $\lambda$  中的任意两者时,可以绘出  $G$  的曲线;即对于每一对  $(L, \xi)$ ,可绘出 1 条  $G(\lambda)$  曲线,称为车桥动力指纹线。

### 1.3 不同类型列车的实例分析

根据上述的理论分析,以中国目前高速列车的实际情况,列出不同类型列车的列车动力指纹线,进而分析其共振速度和桥梁跨中最大竖向加速度。表 1 列出了各类型列车技术参数;图 2 绘出了各类型列车各轴之间的距离。

表 1 不同高速列车技术参数

列车型号	列车编组	编组长度/m	头车长度/m	中间车长度/m	轴距/m	车辆定距/m	轴重/kN
CRH1-A	5M3T	213.5	26.950	26.600	2.7	18.900	160
CRH2-A	4M4T	201.4	25.700	25.000	2.5	17.500	140
CRH3-C	4M4T	200.7	25.725	24.875	2.5	17.375	150
CRH5-A	5M3T	211.5	28.050	25.900	2.7	18.200	170
ICE3	6M2T	200.0	25.675	24.775	2.5	17.375	150
TGV-Thalys	2M8T	200.4	22.260	18.700	3.0	18.700	170

注:“列车编组”一栏中的“M”表示动车,“T”表示拖车。

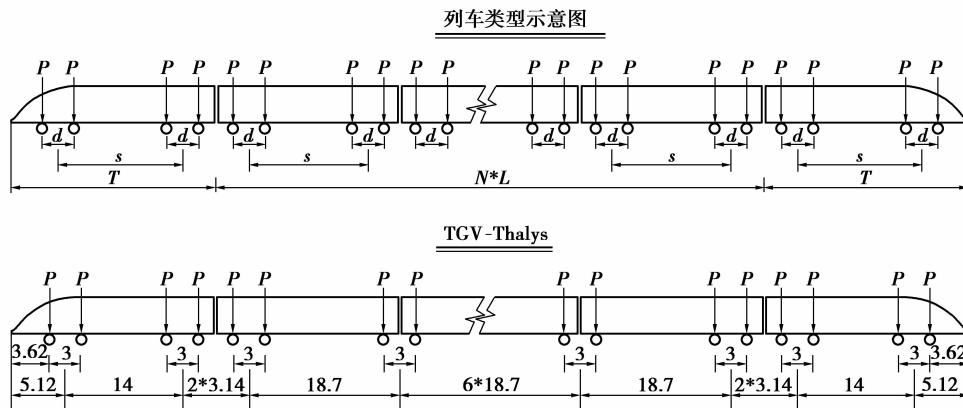


图 2 列车类型示意图(单位:m)

采用上述分析方法及给定的各列车参数值,可以绘出各列车的动力指纹线如图 3 所示。通过分析列车动力指纹线,达到峰值时的波长  $\lambda_c$  列入表 2 中。可按公式(15)计算出各种车辆的共振车速,某跨度为 20 m 和 32 m 梁的第一阶竖向自振频率分别为 7.73 Hz 和 4.23 Hz,而

$$V_c = 3.6 \cdot \lambda_c \cdot f_{b1}, \quad (15)$$

式中,  $V_c$  为引起桥梁共振的列车临界速度, km/h;  $f_{b1}$  为桥梁的第一阶竖向自振频率, Hz。

计算共振车速结果列于表 2。由表中计算结果可见,采用文中方法计算的共振车速与参考文献和仿真计算值吻合较好。

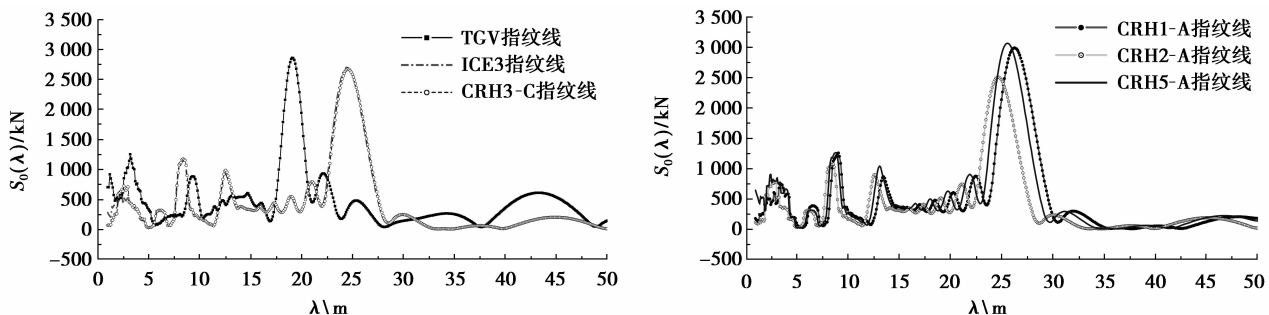


图 3 6 种高速列车的动力指纹线

表 2 共振车速计算结果

列车型号	特征波长 $\lambda_c$ /m	桥梁跨度/m	共振速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )		
			文中计算值	参考文献计算值 <sup>[1]</sup>	仿真计算值 <sup>[11]</sup>
TGV	19.0	20	528.73	520.38	524
ICE3	24.5		681.79	689.44	686
CRH1-A	26.3		731.88	740.22	—
CRH2-A	24.7		687.35	695.70	—
CRH3-C	24.5		681.79	692.22	—
CRH5-A	25.6		712.40	720.75	—
TGV	19.0	32	289.33	284.76	288
ICE3	24.5		373.09	377.27	375
CRH1-A	26.3		400.50	405.06	—
CRH2-A	24.7		376.13	380.70	—
CRH3-C	24.5		373.08	378.80	—
CRH5-A	25.6		389.84	394.41	—

同时,由列车激励谱  $D(\lambda)$ 也可以简单求出,其值只取决于列车动力指纹线  $S_0(\lambda)$ 和结构的阻尼比  $\xi$ ,因此可以分析其随阻尼比的变化情况。如图 4 示出了 CRH3-C 型列车在不同阻尼比下的列车激励谱曲线。可见,随着结构阻尼比的增加,列车激励谱值降低,即车桥动力响应降低,这与一般的结论是一致的,也证明了该理论分析的正确性;根据列车激励谱曲线  $D(\lambda)$ ,也可以推断出列车特征波长,以 CRH3-C 型列车为例, $\lambda=24.5$  m,与由列车动力指纹线得到的相一致。

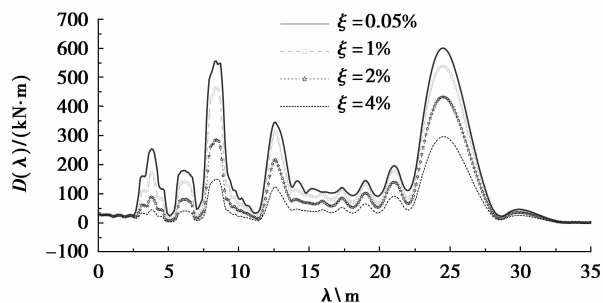


图 4 CRH3-C 型列车激励谱曲线

## 2 桥梁加速度分析

为了便于比较,取 SS8 型列车(编组为 1 节 SS8 机车+18 节 SS8 客车)以速度 160~200 km/h 通过桥梁时计算其竖向加速度最大值,桥梁的特性及有关参数见表 3。绘制车桥动力指纹线  $G(\lambda)$ ,如图 5 所示;然后利用文中给出的简支梁跨中竖向最大加

速度计算公式(7),可以容易的计算出列车以某速度  $V$  行驶时( $\lambda=V/f_{b1}$ ,  $f_{b1}$  为桥梁的第一阶竖向自振频率,单位为 Hz)桥梁的竖向加速度最大值,图 6 示出了 4 种类型桥梁的跨中加速度最大值随加载波长  $\lambda$  的变化,详细结果列于表 3。

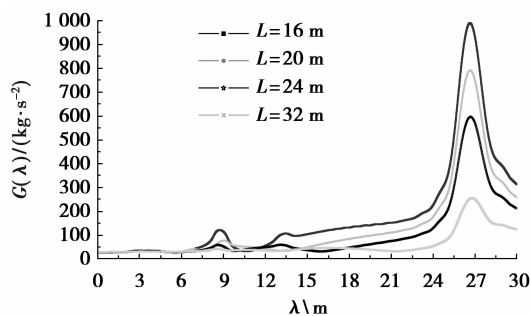
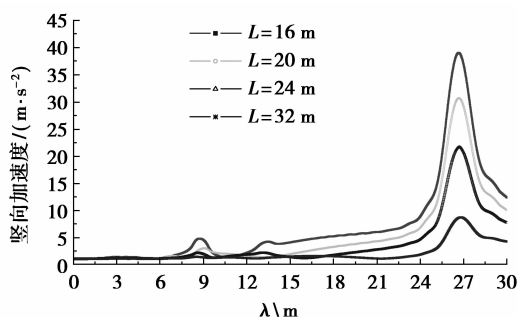


图 5 车桥动力指纹线

图 6 桥梁跨中加速度最大值随  $\lambda$  的变化曲线

由表 3 中可见,文中提出的方法与采用车-桥动力相互作用分析与考虑轨道不平顺时的计算结

果相比较,结果有相当的精度,可以使工程技术人员快速容易地计算出所设计的桥梁最大响应;分析计算公式,可以发现影响桥梁动力响应的参数主要包

括:列车类型、车速、桥梁的模态特性、桥梁跨度等。采用这种方法粗略估计桥梁的响应,以指导桥梁设计。

表 3 桥梁竖向加速度最大值计算比较

桥梁跨度/m	单位长度质量/(t·m <sup>-1</sup> )	文中计算的桥梁竖向加速度最大值/(m·s <sup>-2</sup> )	参考文献值/(m·s <sup>-2</sup> ) <sup>[17]</sup>
16	8.062 5	2.5	3.38 <sup>①</sup>
			2.22 <sup>②</sup>
20	8.200 0	2.48	2.36 <sup>①</sup>
			2.82 <sup>②</sup>
24	8.750 0	2.18	1.96 <sup>①</sup>
			1.87 <sup>②</sup>
32	9.312 5	1.77	1.29 <sup>①</sup>
			1.82 <sup>②</sup>

注:均为单线两片 T 梁;“参考文献值”一栏中上标“①、②”分别表示铁科院和中南大学的计算结果。

按照上述方法计算只是为桥梁工程师设计时对桥梁跨中最大加速度作简单的预测,仅考虑了桥梁的第一阶振型并作出了适当的简化。若按照常规方法,将列车荷载简化为移动荷载列,桥梁采用振型叠加法计算。列出桥梁的运动方程,采用逐步积分法计算;同时讨论考虑桥梁不同阶数振型时桥梁加速度的变化规律,即考虑桥梁不同参振频率时对加速度计算结果的影响。对图 1 所示的速度为 V 的匀速移动荷载列作用于等截面简支梁上,系统运动方程见式(1),右端荷载项为式(3),即

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = P(x,t),$$

$$P(x,t) = \sum_{k=1}^N F_k \cdot \delta[x - V \cdot (t - t_k)] \cdot H_{\frac{L}{V}}(t - t_k). \quad (16)$$

采用振型分解法求解,取桥梁前 N<sub>b</sub> 阶振型,即

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^{N_b} q_n(t) \cdot \varphi_n(x), \quad (17)$$

代入方程(16)并利用振型的正交特性,变换可得第 n 阶振型的广义坐标运动方程为

$$EI q_n(t) \int_0^L \varphi_n(x) \frac{d^4 \varphi_n(x)}{dx^4} dx + m \frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} \int_0^L \varphi_n^2(x) dx + c \frac{dq_n(t)}{dt} \int_0^L \varphi_n^2(x) dx = \int_0^L \varphi_n(x) \sum_{k=1}^N F_k \cdot \delta[x - V \cdot (t - t_k)] \cdot H_{\frac{L}{V}}(t - t_k) dx. \quad (18)$$

对于文中的等截面简支梁,振型函数假定为三角函数,即

$$\varphi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{L}, \quad (19)$$

代入式(18)并化简得

$$\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = \frac{2}{mL} \sum_{k=1}^N F_k \cdot \sin \frac{n\pi V \cdot (t - t_k)}{L} \cdot H_{\frac{L}{V}}(t - t_k), \quad (20)$$

其中:ω<sub>n</sub> =  $\frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$  为等截面简支梁的第 n 阶圆频率;ξ<sub>n</sub> 为第 n 阶振型阻尼比。采用数值解法求解式(20)得到任意时间点的广义坐标,再按式(17)计算桥梁位移和加速度。

对应于表 3 的桥梁,其截面特性如下表 4。按照规范,对混凝土桥梁,通常取 ξ<sub>n</sub> = ξ = 0.02;1 节 SS8 机车+1 节客车编组(轴重为 220 kN,按实际轴距布置)以速度 160 km/h 匀速运行,讨论采用不同的桥梁模态阶数时桥梁跨中加速度和位移的变化规律。

表 4 桥梁截面特性

桥梁跨度/m	单位长度质量/(t·m <sup>-1</sup> )	截面抗弯刚度/(N·m <sup>2</sup> )
16	8.062 5	1.53E+10
20	8.200 0	2.14E+10
24	8.750 0	3.30E+10
32	9.312 5	5.81E+10

各种跨度桥梁跨中位移和跨中竖向加速度的比较结果如图 7 所示。图 7 为 16 m 简支梁取前 8 阶和只取第 1 阶振型时跨中位移和加速度时程曲线；图 8 为 16 m 简支梁跨中竖向最大加速度随所取阶数的变化曲线；图 9 和图 10 是对 24 m 简支梁的计算结果，其它如 20 m 和 32 m 的简支梁也可以类似计算。

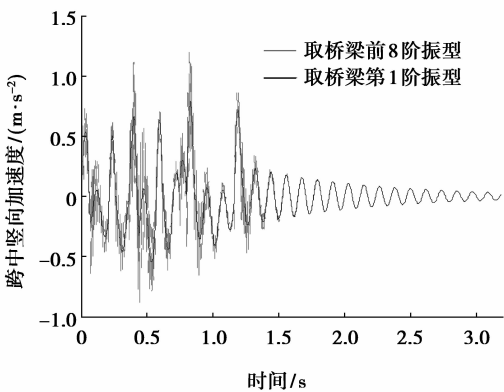
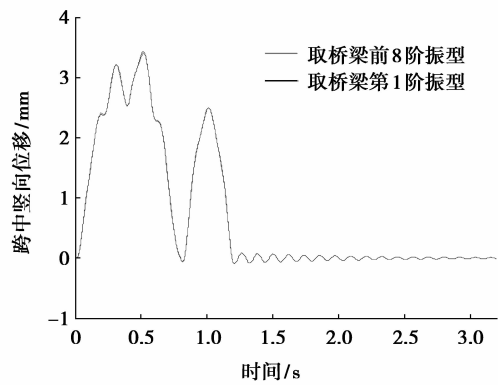


图 7 对 16 m 简支梁取前 8 阶和只取第 1 阶振型时跨中位移和加速度时程曲线

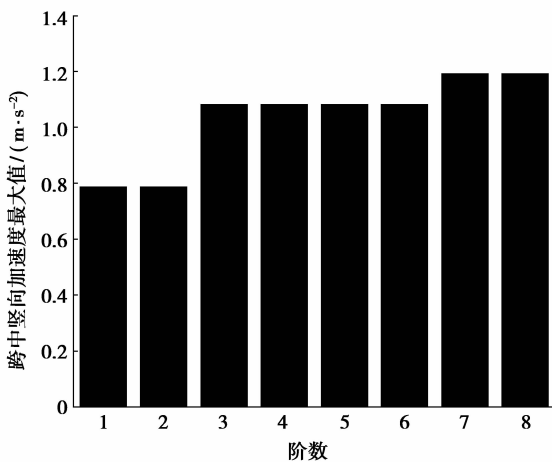


图 8 对 16 m 梁跨中竖向最大加速度随阶数的变化

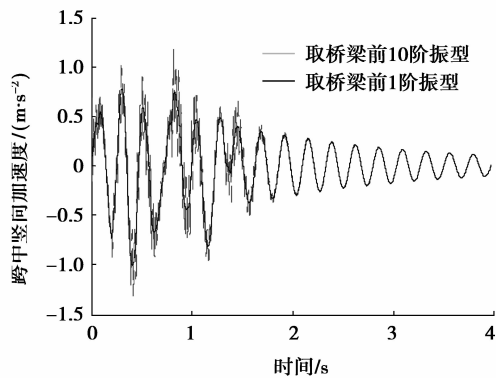
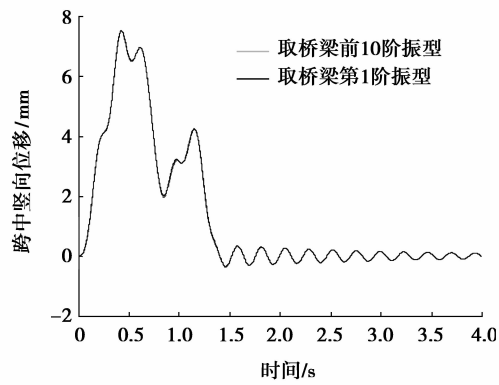


图 9 对 24 m 简支梁取前 10 阶和只取第 1 阶振型时跨中位移和加速度时程曲线

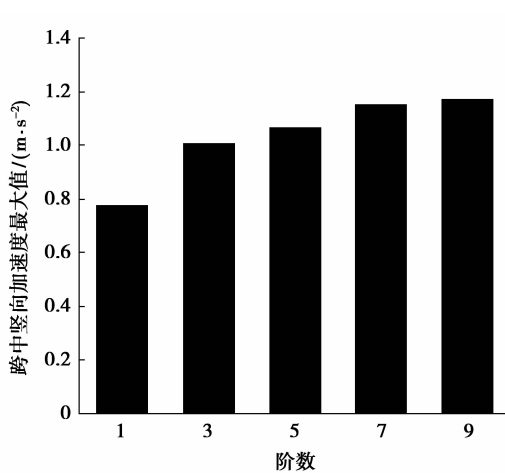


图 10 对 24 m 梁跨中竖向最大加速度随阶数的变化

从图 7 中可以看出,2 种情况下位移差别不大,而加速度与所取阶数密切相关,就本例而言,取前 8 阶计算的跨中加速度最大值与只取第 1 阶计算时相差超过 50%;24 m 简支梁的计算结果如图 9、图 10 所示,可以看出,取桥梁前 10 阶振型和第 1 阶振型,位移计算结果相差不大,但是加速度计算结果相差较大,前者与后者相差超过 50%。从上述 4 个图的计算结果表明桥梁高阶振型的参与会较大的影响桥

梁竖向加速度,即高频成分对加速度影响较大,对桥梁位移影响不大,但是从图 8 和图 10 可以看出,随着所取阶数的增加,振型阶数对加速度的影响呈减小趋势。

比较表 3 与图 8 及图 10 的计算结果,不考虑轨道不平顺而将列车荷载简化为移动荷载列时计算的桥梁竖向加速度结果偏小,因此实际作桥梁加速度计算时应考虑轨道不平顺的影响,并计及桥梁的共振频率即采用振型叠加法时桥梁截取振型阶数的因素。

### 3 结 论

基于列车的动力指纹线、列车激励谱和桥梁动力指纹线概念,对桥梁动力行为进行计算分析,并考虑桥梁不同频率成分的影响,得到以下结论。

1)通过列车动力指纹线、列车激励谱和桥梁动力指纹线的分析,证明车桥共振的主要影响因素为桥梁结构的自振频率、列车类型和编组,简支桥梁动力行为的主要影响因素为桥梁跨度、质量、列车类型、编组和结构的阻尼比等。

2)通过对中国 6 种高速列车动力指纹线的分析,CRH1-A、CRH2-A、CRH3-C 和 CRH5-A 型列车的特征长度  $\lambda_c$  分别为 26.3、24.7、24.5、25.6 m;当列车速度为 350 km/h 时,若桥梁第一阶竖向自振频率为 3.7~3.9 Hz,则会发生车桥共振。

3)推导出了简支梁跨中最大加速度的简化计算方法。以 4 座实际桥梁为例,采用文中方法对列车运行于桥上时桥梁的竖向加速度最大值进行估算,结果表明文中的简化方法有一定的精度。

4)计算桥梁动力响应时,高频成分对桥梁加速度计算影响较大,对位移计算影响较小;但是随着频率的增加,对加速度计算的影响越来越小。

#### 参考文献:

[1] 夏禾,张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2005: 178-182.

[2] 松浦章夫. 高速铁路における车辆と桥桁の動的相互作用[R]. 东京: 铁道技术研究资料, 1974, 31(5): 14-17.

[3] 松浦章夫. 高速铁路における车辆と桥桁の動的挙動に関する研究[J]. 土木学会论文集, 1976, 256(12): 35-47.

MATSUURA Akio. Study of the dynamic behavior of bridge girders for high-speed railway [J]. Journal of JSCE, 1976, 256(12): 35-47.

[4] Diana G, Cheli F. Dynamic interaction of railway systems with large bridges [J]. Vehicle System Dynamics, 1989, 18: 71-106.

[5] Fryba L. Vibration of solids and structures under moving loads [M]. London: Thomas Telford, 1999: 13-43.

[6] 曹雪琴,刘必胜,吴鹏贤. 桥梁结构动力分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987: 70-116.

[7] 李小珍,蔡婧,强士中. 京沪高速铁路南京长江大桥列车走行性分析[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 86-92.

LI Xiaozhen, CAI Jing, QIANG Shizhong. Train runability of the schemed Beijing-Shanghai high-speed railway on the Nanjing Yangtze River bridge [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 86-92.

[8] 高芒芒. 高速铁路列车-线路-桥梁耦合振动及列车走行性研究[D]. 北京: 铁道科学研究院, 2001.

[9] Ju S H, Lin H T. Resonance characteristics of high-speed trains passing simply supported bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267 (5): 1127- 1141.

[10] Xia H, Zhang N. Dynamic analysis of railway bridge under high-speed trains [J]. Computers & Structures, 2005, 83(23-24): 1891- 1901.

[11] Xia H, Zhang N, Guo W W. Analysis of resonance mechanism and conditions of train-bridge system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297 (3/5): 810-822.

[12] Yang Y B, Yau J D, Hsu L C. Vibration of simple beams due to trains moving at high speeds [J]. Engineering Structures, 1997, 19(11): 936-944.

[13] Yang Y B, Yau J D, Wu Y S. Vehicle-bridge interaction dynamics with applications to high-speed railway [M]. Singapore: World Scientific, 2004.

[14] Yau J D. Vibration of parabolic tied-arch beams due to moving loads [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2006, 6(2): 193-214.

[15] Delgado R. Dynamic of high-speed railway bridges [M]. London: CRC Press, 2009: 1-8.

[16] Goicolea J M. Dynamic loads in new engineering codes for railway bridges in Europe and Spain [J]. Bridges for High-Speed Railways, 2004: 43-58.

[17] 柳学发. 时速 200 km 铁路 T 梁设计研究[J]. 铁道标准设计, 2005(4): 31-36.

LIU Xuefa. Study on T-beam design for 200 km/h railway [J]. Railway Standard Design, 2005 (4): 31-36.