文章编号:1005-0523(2011)03-0018-08

公路车桥耦合振动响应计算方法对比研究

陈水生

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:使用有限单元方法,分别建立了桥梁结构的振动计算模型和车辆的振动计算模型,考虑车桥接触点的位移连续,分别提出了考虑桥梁全自由度的车桥耦合振动模型和使用桥梁振动模态的模态综合计算模型。将桥梁结构的振动响应计算转化为求解模态广义坐标,并结合车辆振动与桥面的耦合,建立结构模态广义坐标和车辆振动自由度耦合的系统方程,使用Newmark-β数值积分方法对时变耦合系统进行求解。为了验算方法的有效性和可靠性,分别计算了平面梁在集中力作用下,空间板结构在整车模型作用下的振动响应,研究结果表明,使用模态综合法求解公路桥梁车桥耦合振动响应的结果可靠,并有很高的计算效率,该方法具有广泛的适用性。

关键词:公路桥梁;车桥耦合;振动响应;对比研究

中图分类号:U213 **文献标识码:**A

在移动荷载作用下结构的振动响应研究是经典的力学问题,尤其对于梁结构的研究成果较多,但是大都集中在移动集中力、简单移动弹簧质量系统的研究,结果表明结构的动态位移大小与荷载的移动速度和桥梁的固有振动周期有关,最大动位移可以达到静态位移的1.743倍[1]。当然实际的桥梁结构只用简单的梁模型是不能真实模拟桥梁结构的三维空间特性的,尤其当车辆位于桥梁不同横向位置通过桥梁时的振动情况。近几十年来,国内外学者对桥梁结构的车辆振动问题做了大量的研究工作[2-5],自上世纪50年代,美国国家公路委员会对大量桥梁进行了振动响应测试工作[2],并提出冲击系数的大概范围:结构的动态应变冲击系数为3%~25%,结构的挠度冲击系数为2%~42%,英国的某道路研究实验室也对30座桥梁进行了测试,得到的冲击系数在9%~75%之间[2]。而我国对移动荷载作用下桥梁的振动研究主要集中在铁路桥梁[6],对公路桥梁的研究则起步较晚,尤其对计算方法的系统研究较少。

目前在车桥耦合振动分析中使用最广泛的是有限单元方法,通常有两种方法考虑车桥耦合振动,他们都是分别将桥梁结构和车辆建立有限元模型,然后考虑两者在接触点的耦合作用,把接触点的相互作用力采用位移形函数分配到有限元模型的相关节点上,在建立动力学方程时,其中一种方法是直接建立全自由度的车桥耦合振动方程进行求解,这种方法称为全自由度耦合振动法(full-size method);而另一种方法是采用结构模态正交特性,使用振型叠加技术,得到桥梁结构的广义坐标方程,然后和车辆的振动方程耦合,形成桥梁结构的广义坐标和车辆自由度同时存在的模态综合方程,这种方法称为模态综合法(modal general method)。两种方法都可以采用直接积分方法求解,而模态综合法的计算简单,工作量大大减少,而对于振动响应主要由较少的低阶模态组成的桥梁结构问题可以得到足够精度的计算结果。如何获得有效的计算方法,科学的计算公路桥梁的车桥耦合振动响应,科学计算桥梁的车辆荷载冲击系数,为桥梁设计提供可靠依据,仍然是我国科研工作者需要努力的基础工作。

该文分别采用两种方法建立耦合系统的振动合方程,建立了车辆系统的统一计算模型,分别针对公路桥梁结构的特点,对梁结构和板结构计算了各种荷载作用下的动力响应,并与其它计算结果进行比较分

收稿日期:2011-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50868007)

作者简介:陈水生(1968-),男,教授,博士,主要研究方向为土木工程结构振动与控制。

析,说明模态综合法的通用性和有效性。

1　桥梁模型

桥梁结构振动的有限元模型可以表示如下

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}\ddot{\boldsymbol{w}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{w}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{w}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{int}}^{\mathrm{bv}} \tag{1}$$

式中: $\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}$, C_{b} , $\boldsymbol{K}_{\mathrm{b}}$ 分别是桥梁结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\boldsymbol{w}$ 是各节点自由度位移列阵; $F_{\mathrm{int}}^{\mathrm{bv}}$ 是车轮对桥梁的作用力在桥梁有关接触位置的等效节点荷载,采用Rayleigh阻尼计算结构的阻尼矩阵:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}=\alpha\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}+\beta\boldsymbol{K}_{\mathrm{b}} \tag{2}$$

其中 α , β 可表示为

$$\alpha=\frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2-\xi_2\omega_1)}{\omega_2^2-\omega_1^2},\ \ \beta=\frac{2(\xi_2\omega_2-\xi_1\omega_1)}{\omega_2^2-\omega_1^2} \tag{3}$$

式中: ω_1 , ω_2 分别为结构的第一、第二阶自振频率; ξ_1 , ξ_2 分别为结构的第一、第二阶模态阻尼比。如果采用模态空间形式,可以得到桥梁结构的振动方程为

$$\boldsymbol{I}\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{\eta}\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{q}=\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F}_{\mathrm{int}}^{\mathrm{bv}} \tag{4}$$

其中

$$\boldsymbol{I}=\begin{bmatrix}\ddots & & \\ & 1 & \\ & & \ddots\end{bmatrix}_{n\times n},\ \ \boldsymbol{\eta}=\begin{bmatrix}\ddots & & \\ & 2\xi_i\omega_i & \\ & & \ddots\end{bmatrix}_{n\times n},\ \ \boldsymbol{\Omega}=\begin{bmatrix}\ddots & & \\ & \omega_i^2 & \\ & & \ddots\end{bmatrix}_{n\times n} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{w}(t)=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{\phi}_i q_i(t)=\boldsymbol{\phi}\boldsymbol{q} \tag{6}$$

式中: $\boldsymbol{\phi}_i$ 为结构第 i 阶模态各节点自由度值; ω_i 为结构第 i 阶模态圆频率; ξ_i 为结构第 i 阶模态阻尼比; $q_i(t)$ 为第 i 阶模态 t 时刻的广义坐标值; $\boldsymbol{\phi}$ 是由各阶模态向量组成的模态矩阵,它是一个 $R\times n$ 的矩阵; R 是结构的总自由度个数; n 为计算所取的模态阶数。通常桥梁结构可以采用梁单元和板单元,对于平面梁单元,每个节点有3个自由度,空间梁单元有6个自由度,板单元也常取6个自由度。

2　车辆模型

公路重载汽车车辆形式多样,目前三轴卡车在我国最为常见,三轴车辆总体分为整体式车厢和分体式车厢,它们的动力计算模型如图1所示,图中的参数 k 表示对应部分结构的弹性刚度系数, c 表示结构的阻力系数, m 表示对应部分结构的质量,其中分体车辆模型有12个独立自由度,整体车厢模型有9个独立自由度,该文分别建立了两种车辆的空间有限元动力计算模型(计算以9自由度模型为例)。而两轴车辆模型和车辆的平面计算模型均可以由空间三轴车辆模型简化得到。

由d'Alembert原理,可以得到车辆各独立自由度的有限元振动方程

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{v}}\ddot{\boldsymbol{z}}+\boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}\dot{\boldsymbol{z}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}\boldsymbol{z}=\boldsymbol{F}_{\mathrm{int}}^{\mathrm{vb}}-\boldsymbol{F}_{\mathrm{g}} \tag{7}$$

式中: $\boldsymbol{M}_{\mathrm{v}}$, $\boldsymbol{C}_{\mathrm{v}}$, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}$ 分别是车辆的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\boldsymbol{F}_{\mathrm{g}}$ 是车辆的重力荷载列阵; $\boldsymbol{F}_{\mathrm{int}}^{\mathrm{vb}}$ 是桥梁对车辆的作用力列阵; $\boldsymbol{z}$ 是车辆振动独立自由度列阵,对于整体车厢模型

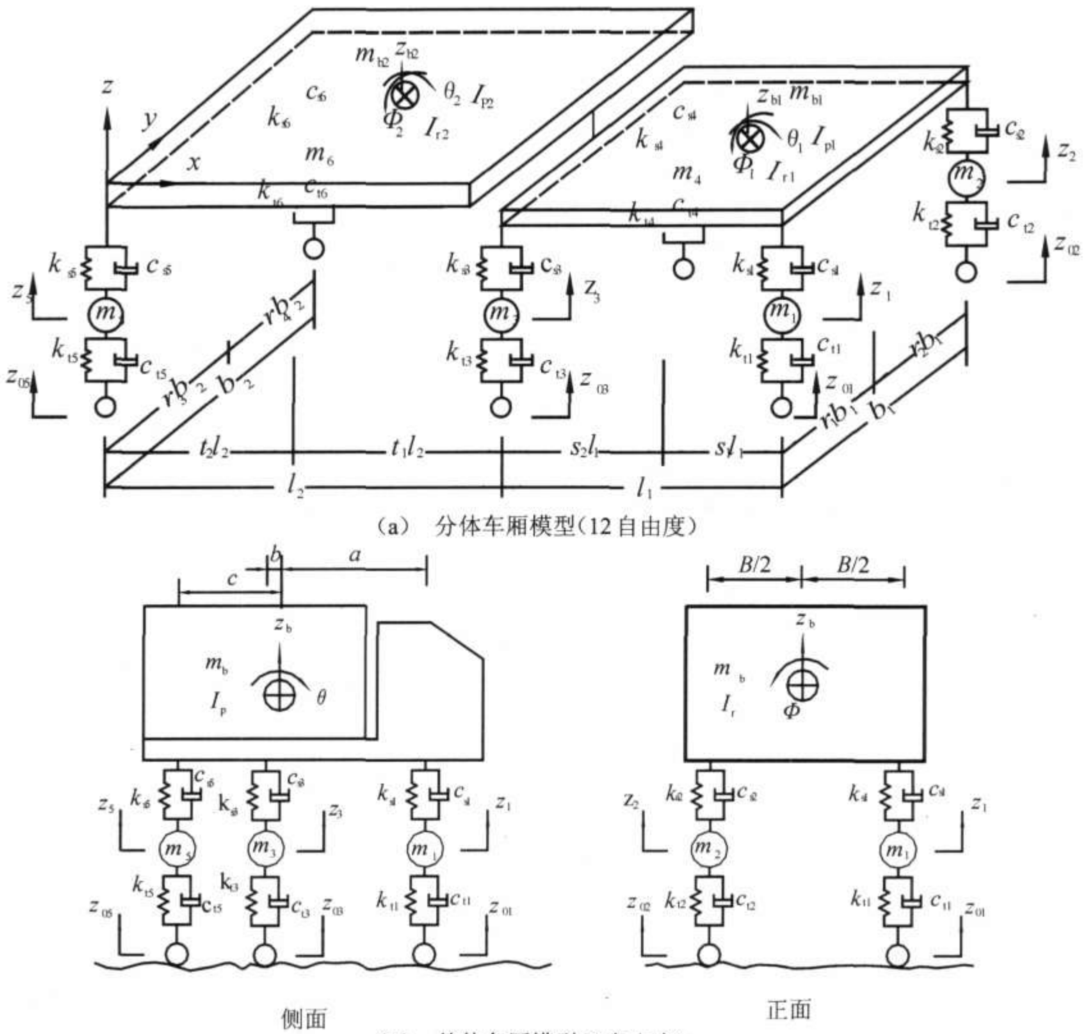
$$\boldsymbol{z}=\left[z_1\ z_2\ z_3\ z_4\ z_5\ z_6\ z_b\ \theta\ \phi\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

对于分体车厢模型

$$\boldsymbol{z}=\left[z_1\ z_2\ z_3\ z_4\ z_5\ z_6\ z_{b1}\ z_{b2}\ \theta_1\ \theta_2\ \phi_1\ \phi_2\right]^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

车桥之间的相互作用力分别施加在桥梁上和车辆上,它们的大小相等方向相反,但是它们分配到有限元模型节点自由度方向上的力是不同的(分别如方程(1)和方程(7)所示),之间的相互作用力可表示为(第 i 个车轮位置处)

$$F_{\mathrm{int}}^{i}=k_{ti}\Delta_i+c_{ti}\Delta_i \tag{10}$$



（a）　分体车厢模型（12自由度）

（b）　整体车厢模型（9自由度）

图1　　三轴车辆有限元整车模型示意图

Fig.1　Model of three-axis vehicle finite element

$$\Delta_i = z_i - z_{0i} = z_i - r_i - \bar{w}_i,\ \dot{\Delta}_i = \dot{z}_i - \frac{\partial r_i \cdot v}{\partial x} - \frac{\partial \bar{w}_i \cdot v}{\partial x} - \dot{\bar{w}}_i \tag{11}$$

$$\bar{w}_i = \sum_{j=1}^{NN} \boldsymbol{N}_{ij} w_j = \tilde{\boldsymbol{N}}_i^{\mathrm{T}} w_i,\ \dot{\bar{w}}_i = \tilde{\boldsymbol{N}}_{,xi}^{\mathrm{T}} w_i v + \tilde{\boldsymbol{N}}_i^{\mathrm{T}} \dot{w}_i \tag{12}$$

式中：k_{ti}，c_{ti} 分别为第 i 个车轮对应的刚度和阻尼系数；Δ_i 是第 i 个车轮与桥梁表面之间的相对位移；v 是车辆的行驶速度；z_i 是车轮的竖向振动位移；r_i 是第 i 个车轮位置处的桥梁表面不平顺值；N_j 是 j 节点单元位移形函数值；NN 是第 i 个车轮接触的单元节点个数；$\tilde{N}_i$ 是扩充到结构全体自由度的单元位移形函数。由(10)~(12)式可知，车桥之间的相互作用力可以表示为

$$F_{\mathrm{int}}^{i} = k_{ti}\left(z_i - \tilde{\boldsymbol{N}}_i^{\mathrm{T}} w - r_i\right) + c_{ti}\left(\dot{z}_i - v\tilde{\boldsymbol{N}}_{,xi}^{\mathrm{T}} w - \tilde{\boldsymbol{N}}^{\mathrm{T}} \dot{w} - v r_{,x}\right) \tag{13}$$

而分配到桥梁有限元模型节点上的力为

$$\boldsymbol{F}_{int}^{\mathrm{bv}} = \sum_{i=1}^{nt} \tilde{\boldsymbol{N}}_i F_{int}^{i} \tag{14}$$

其中 nt 是车辆轮胎个数。

各车轮受到的相互作用力为

$$\boldsymbol{F}_{int}^{\mathrm{vb}}=\begin{Bmatrix} k_{t1}\left(\tilde{\boldsymbol{N}}_1^{\mathrm{T}}w+r_1\right)+c_{t1}\left(v\tilde{\boldsymbol{N}}_{,x1}^{\mathrm{T}}w+\tilde{\boldsymbol{N}}_1^{\mathrm{T}}\dot{w}+(r_{,x})_1 v\right)\\ \vdots \\ k_{tnt}\left(\tilde{\boldsymbol{N}}_{nt}^{\mathrm{T}}w+r_{nt}\right)+c_{tnt}\left(v\tilde{\boldsymbol{N}}_{,xnt}^{\mathrm{T}}w+\tilde{\boldsymbol{N}}_{nt}^{\mathrm{T}}\dot{w}+(r_{,x})_{nt} v\right)\\ 0\\ \vdots\\ 0 \end{Bmatrix}_{nv} \tag{15}$$

式中:nv 是车辆振动自由度数。

3　耦合系统及求解

将式(14),(15)分别代入方程(1),(9),则可以建立车桥耦合的全自由度振动模型,这个模型直接对有限元的节点各自由度进行求解,但是当桥梁振动自由度较多时,则计算花费时间较长;而将式(14),(15)式分别代入方程(4),(9),则可以建立车桥耦合的模态综合振动模型,模型中既包含有广义模态坐标又包含有车辆的振动自由度。该文将采用两种模型分别计算,限于篇幅,只建立模态综合振动模型。

定义

$$\boldsymbol{\delta}=\begin{Bmatrix}\boldsymbol{q}_{n\times 1}\\ \boldsymbol{z}_{nv\times 1}\end{Bmatrix} \tag{16}$$

结合(14),(15)式和方程(4),(9),可以得到车桥耦合振动方程

$$\boldsymbol{M}(t)\ddot{\boldsymbol{\delta}}+\boldsymbol{C}(t)\dot{\boldsymbol{\delta}}+\boldsymbol{K}(t)\boldsymbol{\delta}=\boldsymbol{F}(x,t) \tag{17}$$

其中

$$\boldsymbol{M}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}_v\end{bmatrix},\ \boldsymbol{C}(t)=\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{x}} & \boldsymbol{A}_1\\ \boldsymbol{A}_2 & \boldsymbol{C}_v\end{bmatrix},\ \boldsymbol{K}(t)=\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{\Omega}} & \boldsymbol{B}_1\\ \boldsymbol{B}_2 & \boldsymbol{K}_v\end{bmatrix} \tag{18}$$

$$\bar{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{x}_{n\times n}+\boldsymbol{D}_{n\times n},\quad \boldsymbol{D}=\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}\left(\sum_{i=1}^{nt}\tilde{\boldsymbol{N}}_i c_{ti}\tilde{\boldsymbol{N}}_i^{\mathrm{T}}\right)\boldsymbol{\phi} \tag{19}$$

$$\bar{\boldsymbol{\Omega}}_{n\times n}=\boldsymbol{\Omega}_{n\times n}+\boldsymbol{S}_{n\times n},\quad \boldsymbol{S}=\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}\left(\sum_{i=1}^{nt}\tilde{\boldsymbol{N}}_i\left(k_{ti}\tilde{\boldsymbol{N}}_i^{\mathrm{T}}+c_{ti}v\tilde{\boldsymbol{N}}_i^{\mathrm{T}}\right)\right)\boldsymbol{\phi} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{A}_1=-\begin{bmatrix}\boldsymbol{\phi}_1^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_1 c_{t1} & \cdots & \boldsymbol{\phi}_1^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_{nt} c_{tnt}\\ \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{\phi}_n^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_1 c_{t1} & \cdots & \boldsymbol{\phi}_n^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_{nt} c_{tnt}\end{bmatrix},\ \boldsymbol{A}_2=\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{T}} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{B}_1=-\begin{bmatrix}\boldsymbol{\phi}_1^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_1 k_{t1} & \cdots & \boldsymbol{\phi}_1^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_{nt} k_{tnt}\\ \vdots & & \vdots\\ \boldsymbol{\phi}_n^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_1 k_{t1} & \cdots & \boldsymbol{\phi}_n^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{N}}_{nt} k_{tnt}\end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{B}_2=\boldsymbol{B}_1^{\mathrm{T}}-v\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{N}}_{,x1}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\phi}_1 c_{t1} & \cdots & \tilde{\boldsymbol{N}}_{,x1}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\phi}_n c_{t1}\\ \vdots & & \vdots\\ \tilde{N}_{,xnt}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\phi}_1 c_{tnt} & \cdots & \tilde{N}_{,xnt}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\phi}_n c_{tnt}\end{bmatrix} \tag{23}$$

$$\boldsymbol{F}(x,t)=\begin{Bmatrix}-\boldsymbol{\phi}^{\mathrm{T}}\sum_{i=1}^{nt}\tilde{\boldsymbol{N}}_i\left(k_{ti}r_i+c_{ti}vr_{i'x}\right)\\ k_{t1}r_1+c_{t1}vr_{1'x}\\ \vdots\\ k_{tnt}r_{nt}+c_{tnt}vr_{nt'x}\\ 0\\ \vdots\\ 0\end{Bmatrix}_{(n+nv)\times 1}-\begin{Bmatrix}\boldsymbol{0}_{n\times 1}\\ \boldsymbol{F}_{g(nv\times 1)}\end{Bmatrix} \tag{24}$$

方程(17)即为车桥相互作用的模态综合振动模型,方程的系数矩阵是时间的函数,它是一个线性时变系统,该文采用 Newmark-β 方法进行数值积分,认为在每个积分时间步长内是线性时不变系统。

4 数值算例

为了验证本算法的准确性和实用性，以下分别计算了简支梁在移动集中力作用和两轴车辆平面振动的响应，以及板桥受两轴空间模型车辆作用的耦合振动响应。

4.1 简支梁结构受移动荷载作用的振动响应

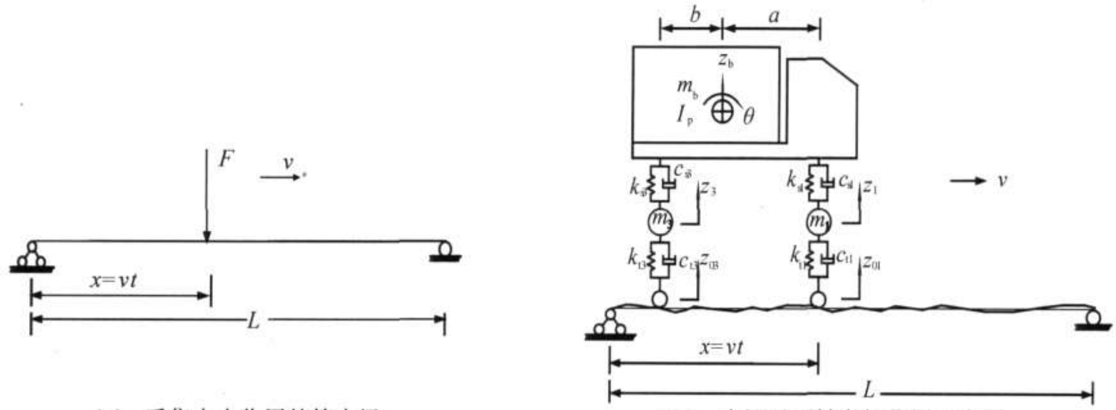
定义

$$\zeta=\frac{T_1}{\tau},\quad \tau=\frac{L}{v} \tag{25}$$

$$I=\frac{R_\mathrm{d}-R_\mathrm{s}}{R_\mathrm{s}}\times 100\% \tag{26}$$

式中：T_1 是结构的第一阶固有振动周期；τ 是移动荷载通过桥梁的时间；R_d 是跨中振动响应最大值；R_s 是跨中最大静态位移；I 称为荷载位移冲击系数。

为了与其它研究结果对比，计算了图2(a)所示简支梁结构受移动集中力作用，梁的结构参数如表1所示，不计结构阻尼，集中力以各种 ζ 值通过时，简支梁跨中节点的振动冲击系数，结果如图3和表2所示。图3示出了各种速度情况下，简支梁跨中振动位移与静态位移比值时程曲线，当速度很小时（$\zeta=0.1$），振动响应位移曲线与静态位移很接近，当移动速度进一步减小，则振动响应曲线将收敛到静态位移曲线。表2列出了图3结果的冲击系数值，并列出了已有研究的相应结果，其中文献[1]的结果是仅考虑一级振动模态的理论值(这对于跨中节点具有足够高的精度，而当 $\zeta=2$ 时，它是精确解)，其中ansys结果是由商用软件ansys 11.0计算得到，full-size结果是采用全自由度直接耦合方法计算得到，而modal method结果是采用模态综合发计算得到。从表2可知，所有研究结果都表明，当 $\zeta=1.234$ 时，也即当力通过时间等于梁的一级固



（a） 受集中力作用的简支梁　　（b） 支梁受两轴车辆作用示意图

图2 简支梁结构受移动荷载作用示意图

Fig.2 Diagram of beam structure with moving loads

表1 简支梁结构参数和车辆参数

Tab.1 Beam structure parameters and vehicle parameters

简支梁参数	车辆参数
$L=1.193\,8$ m	$m_\mathrm{b}=4.405$ kg　$m_1=m_3=10^{-10}$ kg
$\rho=2.960\,2\times10^3$ kg·m^{-3}	$I_\mathrm{p}=0.568$ kg·m^2
$A=0.51\times10^{-2}$ m^2	$k_{t1}=k_{s1}=0.901\,5\times10^6$ N·m^{-1}
$I=0.944\,8\times10^{-6}$ m^4	$k_{t3}=k_{s3}=1.082\times10^6$ N·m^{-1}
$E=10.48\times10^{10}$ N·m^{-2}	$a=0.371$ m, $b=0.348$ m
工况1	工况1
$\xi_1=\xi_2=0$	$c_{t1}=c_{s1}=c_{t3}=c_{s3}=0$
工况2	工况2
$\xi_1=2\%,\xi_2=5\%$	$c_{t1}=c_{s1}=39.205$ (N·s)·m^{-1}
	$c_{t3}=c_{s3}=44.340$ (N·s)·m^{-1}

有振动周期的0.810 4倍时，跨中竖向振动位移取得最大值，模态综合法计算得到的冲击系数为1.734，与文献[1]的比较表明，模态综合法的计算效果良好，最大差别小于1%，与其他结果比较也是吻合很好，说明了本计算方法的有效性。

如图2(b)所示简支梁受到两轴车辆作用，梁结构和车辆参数如表1所示，为了和已有研究结果比较，有关参数和文献[1]相同，表1中的车轮质量均为一小值，表示车辆退化为一个只有车厢竖向和旋转振动的两自由度系统，为了分析结构和车辆阻尼的影响，分为有阻尼（工况1）和无阻尼（工况2）两种工况。图4给出了工况1，车辆以不同速度通过时（无量纲参数 ζ 表示），梁的跨中节点位移响应时程曲线，结果表明，当 $\zeta=2$ 时，也就是车辆通过梁的时间是梁的一阶振动周期的一半时，跨中位移冲击系数最大，约为1.7。与文献[4]的结果比较说明，两者的最大差值不超过1%，与文献[8]的结果也吻合较好，本文采用的两种计算方法得到的结果也很接近。图5给出了工况1和工况2的梁跨中位移冲击系数与车辆行驶速度的关系，并和文献[4]的结果进行了比较，结果表明，有阻尼的工况2比无阻尼的工况1得到的冲击系数小，同时也说明了本算法得到的结果和文献[4]的结果是很吻合的。

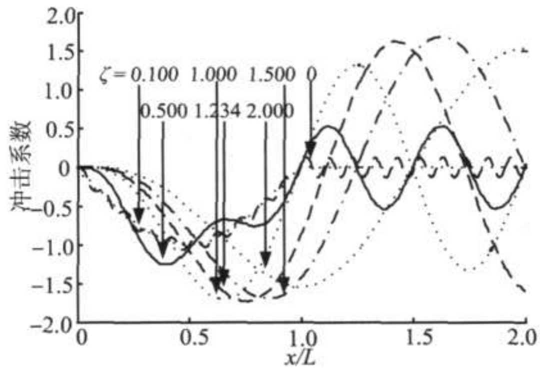


图3　简支梁受集中力作用，不同速度时跨中位移冲击系数比较图

Fig.3　Comparison of displacement impact coefficient of the beam with concentrated force and different speeds

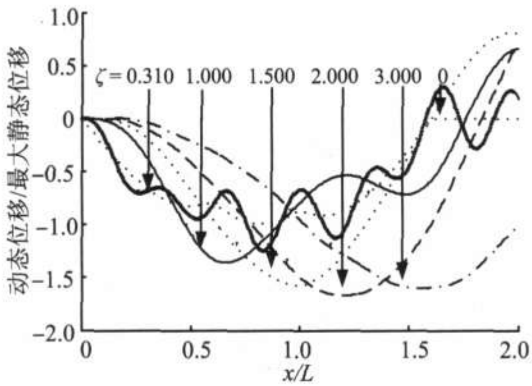


图4　简支梁受平面两轴车辆作用，跨中振动位移与最大静态位移比值时程曲线（工况1）

Fig.4　Curves of the beam with two axis vehicles, and ratio between maximum span vibration displacement and static displacement (condition 1)

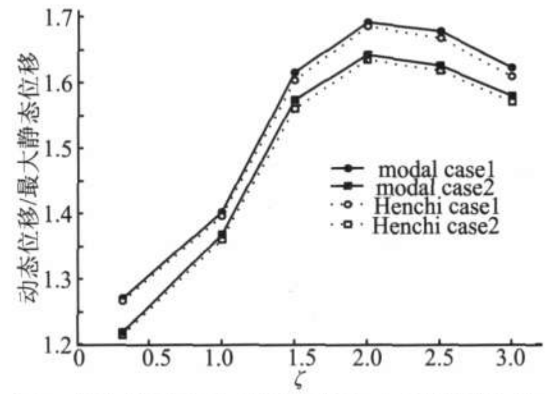


图5　简支梁受平面两轴车辆作用，本文计算结果与Henchi结果对比图

Fig.5　Contrast diagram between calculated results in the paper and Henchi results in the beam with two axis vehicles

表2　移动集中力作用，使用不同方法计算的跨中位移冲击系数对比表

Tab.2　Contrast table of displacement impact coefficient of the beam with mobile concentration force and different calculating ways

ζ	① exact[1]	② lin[8]	③ ansys	④ full-size	⑤ modal method	(⑤–①)/①/%
0.100	1.050	1.053	1.076	1.065	1.057	0.667
0.500	1.250	1.252	1.251	1.256	1.254	0.320
1.000	1.707	1.705	1.692	1.703	1.702	−0.293
1.234	1.743	1.730	1.729	1.737	1.734	−0.516
1.500	1.710	1.704	1.686	1.695	1.695	−0.877
2.000	1.550	1.550	1.543	1.549	1.551	0.064

4.2 简支板结构受移动两轴空间车模型作用振动响应

如图6所示的简支板结构受匀速移动的三维两轴车辆作用，为了比较计算结果，模拟中采用的结构和车辆参数与文献[4]一致，板的长度 $L=80$ m，宽度 $W=8$ m，厚度 $h=0.8$ m，弹性模量 $E=3.0\times10^{10}$ N·m^{-2}，$\rho=3\,500$ kg·m^{-1}，板的一阶模态频率为0.52 Hz，车辆参数如表3所示，表中各与图1(b)相同，其中的第5、6号车轮质量定义为一小值，对应的刚度定义为一大值，则相应的模型就两轴车辆，车辆的一阶模态频率为2.31 Hz。使用4节点板单元模拟板结构，沿板纵向划分为10个单元，横向划分为4个单元，共40个单元，55个节点，每个节点有6个自由度，不考虑结构阻尼，车辆沿板中线纵向行驶，模态综合法计算中取前10阶模态参与振动，车辆以不同的均匀速度通过结构，分别采用全自由度直接耦合方法(full-size)和模态综合法(modal method)计算得到板中央点的振动位移响应，模态综合法计算结果如图7所示，表4列出了两种计算方法得到的中点竖向振动位移最大值，并与文献[4]的结果进行了对比分析。分析结果表明，模态方法得到的结果与文献[4]的结果很接近，最大差别不超过1%，直接耦合和模态耦合方法的结果也吻合很好，理论上采用直接耦合方法是包括结构的所有模态，得到的结果更可靠。

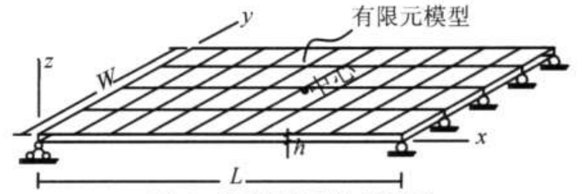


图6 简支板桥结构示意图

Fig.6 Structural scheme of simply-supported slab bridge

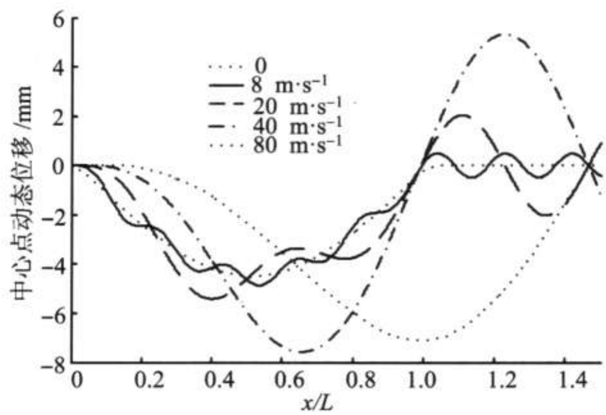


图7 简支板桥受两轴整车作用，不同速度时中央点振动位移响应对比图

Fig.7 Contrast diagram of central point vibration displacement response of simply-supported slab bridge with two axis and different speed

表3 等效两轴整车模型参数

Tab.3 Parameters of equivalent two axis vehicle model

汽车模型参数
$m_b=1\,460$ kg，$m_1=m_2=800$ kg，$m_3=m_4=710$ kg，$m_5=m_6=0.1$ kg，$I_p=1\,516$ kg·m^2，$I_r=449$ kg·m^2
$k_{t1}=k_{t2}=k_{t3}=k_{t4}=0.335\,1\times10^6$ N·m^{-1}，$k_{t5}=k_{t6}=10^{10}$ N·m^{-1}
$k_{s1}=k_{s2}=k_{s3}=k_{s4}=0.399\times10^6$ N·m^{-1}，$k_{s5}=k_{s6}=10^{10}$ N·m^{-1}
$a=0.931$ m，$b=1.729$ m，$c=1.730$ m，$B=1.5$ m，$c_{t1}=c_{t2}=c_{t3}=c_{t4}=800$ N·(s·m^{-1})
$c_{s1}=c_{s2}=232\,210$ N·(s·m)$^{-1}$，$c_{s3}=c_{s4}=5\,180$ N·(s·m)$^{-1}$，$c_{t5}=c_{t6}=c_{s5}=c_{s6}=0.001$ N·(s·m^{-1})，$c_{t3}=c_{s3}=44.340$ N·(s·m^{-1})

应该指出，采用直接耦合方法需要求解的自由度个数是所有未知位移的节点自由度数，共计315个，加上车辆自由度共计322个未知量；而模态求解取前10阶模态，有10个广义坐标未知量，加上车辆自由度共计只有17个未知量，由于系统的振动方程是随时间变化的，每个积分步均需重新计算系统特性矩阵的逆矩阵，本full-size方法计算时间约5 min，而modal general method方法计算时间约6 sec，显然，采用模态综合法是更加有效的，对于更复杂的结构直接耦合法很不经济。

表4 简支板受两轴整车作用,板中节点位移最大值

Tab.4 Node displacement maximum of simply-supported board with two axis vehicle

v/m·s^{-1}	① Henchi[4]/mm	② full-size/mm	③ modal method/mm	(③–①)/①/%
0	—	−4.489	−4.499	—
8	−4.822	−4.856	−4.869	−0.970
20	−5.400	−5.401	−5.421	−0.389
40	−7.524	−7.571	−7.576	−0.689
80	—	−7.094	−7.098	—

5 结论

采用全自由度耦合和模态综合两种方法建立了公路车桥耦合系统的振动方程,建立了车辆系统的统一计算模型,分别针对公路桥梁结构的特点,对梁结构和板结构计算了各种荷载作用下的动力响应,并与其它计算结果进行比较分析,研究结果表明,全自由度的耦合振动方法,求解时间很长,对长跨桥梁几乎是不现实的,而模态综合法具有较好的通用性和准确性,并且效率很高,可以求解长跨和多车耦合振动响应的求解。

参考文献:

[1] WARBURTON G B. The dynamic behavior of structure[M]. Oxford:Pregamon Press,1976.

[2] HUANG D Z, WANG T L, SHAHAWY M. Impact studies of multigirder concrete bridges[J]. Journal of Structural Engineering,1993,119(8):2387-2402.

[3] HONGYI L, JERRY WEKEZER, LESLAW KWASNIEWSKI. Dynamic response of a highway subjected to moving vehicles [J]. Journal of Bridge Engineering,2008,13(5):439-447.

[4] HENCHI K, FAFARD M, TALBOT M, et al. An efficient algorithm for dynamic analysis of bridges under moving vehicles using a coupled modal and physical components approach[J]. Journal of Sound and Vibration,1998,212(4):663-683.

[5] 夏禾. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京:科学出版社,2002.

[6] 李小珍,蔡婧,张坤,等. 车桥系统耦合振动分析的数值解法[J]. 振动与冲击,2002,21(3):21-25.

[7] AU F T K, CHENG Y S, CHEUNG Y K. Vibration analysis of bridges under moving vehicles and trains :an overview[J]. Prog Struct Engng Mater,2001(3):299-304.

[8] LIN Y H, TRETHEWEY M W . Finite element of elastic beams subjected to moving dynamic loads[J]. Journal of Sound and Vibration,1990,136(2):323-342.

Comparative Research on the Calculating Methods for Coupling Highway Vehicle-bridge System

Chen Shuisheng

(School of the Civil Enginneering and Architecture, East China Jiaotng University, Nanchang 330013, China)

Abstract: According to the displacement continuum condition of the vehicle-bridge contacting point, the calculating models for bridges structure vibration and the vehicle structure vibration are established, by using the finite element method. Both of the full size method and modal general method are provided for coupling vehicle and bridge vibration. Based on the coupling the vehicle and the bridges surface, the vibration system in which the calculating of the bridge structure vibration responses is transformed into the elevating of the generalized coordinate is obtained. And the Newmark-β direct integration strategy is adopted to solve the coupling system. In order to check the accurateness and effectiveness, some numerical examples are performed and the results are well satisfied with other method. The research results demonstrate that the modal general method is effective and accurate.

Key words: highway bridges; coupling vehicle-bridge; vibration response; comparative research