# 基于 ANSYS 的简支梁车-桥-支座耦合动力响应分析

宁 锋1,2,3, 邓年春2,4

(1. 中交四航工程研究院有限公司,广州 510415; 2. 广西大学土木建筑工程学院,南宁 530004;
3. 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室,广州 510415; 4. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室,南宁 530004)

摘要:为准确模拟车辆过桥产生的振动,应考虑支座弹性作用的影响。结合分离法与汽车动力学原理,分别建立车辆、桥梁和支座的计算模型并通过位移协调关系和力的平衡关系进行车-桥-支座耦合。基于 ANSYS 中 APDL 语言,以30 m 筒支箱梁桥为算例研究桥面不平整度、支座刚度和阻尼对车-桥-支座耦合动力响应的影响。结果表明,桥面平整度越差,车辆行驶过程中对桥梁产生的冲击力越大,激发桥梁的动力响应越剧烈;适当增大支座刚度能有效降低桥梁动挠度,减弱振动响应;支座阻尼具有耗能作用,增大支座阻尼对削弱桥梁加速度响应有明显的效果;在设计桥梁支座时,应适当增大支座刚度和阻尼来削弱车-桥-支座耦合振动对桥梁的冲击作用。 关键词: 车-桥-支座耦合振动;动力响应;桥面不平顺;数值分析;车辆冲击 中图分类号: U441 文献标志码:A 文章编号: 1671-1807(2024)06-0287-08

随着桥梁建造和交通运输的高速发展,桥梁与 车辆之间的振动问题愈发突出,车桥产生的振动不 但会影响桥梁结构的安全性和耐久性,而且会影响 行车安全,引发交通事故[1-4]。在以往的车桥耦合振 动研究中,通常采用生死单元和自由度耦合就可以 对简化的车桥模型进行车桥耦合振动分析,但这种 方法计算精度较低,且要求车辆行驶工况和桥型简 单。如今基于计算机技术的有限元分析方法飞速 发展,车桥耦合振动的研究也进入了新阶段。刘永 健等<sup>[5]</sup>刘世忠等<sup>[6]</sup>结合分离迭代法原理与车辆动力 学理论,提出一种基于 ANSYS 的车桥耦合振动响 应数值分析方法,计算结果和相关文献算例有较高 的吻合度,并以此方法分别建立车辆与桥梁子系 统,分析双层公路钢桁梁桥在车桥耦合振动下的影 响;许汉铮等<sup>[7]</sup>基于 ANSYS 精细化建模,在研究车 辆的横竖向振动对曲线桥振动的影响中表明车桥 耦合振动主要为竖向振动,建议分析曲线桥动力响 应时应考虑车桥耦合作用:韩智强等[8]、韩智强等[9] 采用模态综合法建立多车车桥耦合系统,研究多点 激励和桥面不平度对车桥耦合振动的影响,结果表 明部分国家冲击系数规范值较小,建议在研究车桥 耦合振动问题中考虑多点激励和桥面不平度的影 响;王秀丽等[10]采用隐式动力学分析了大跨度钢管 翼缘组合梁桥车桥耦合振动的影响,结果表明路面 平整度、车辆载重和速度对车桥耦合振动均有较大 影响;Liu等<sup>[11]</sup>采用有限元方法建立车辆处于交通 拥堵怠速时车桥耦合模型,分析交通拥堵对桥梁的 动力响应影响,表明交通拥堵情况下车桥耦合对桥 梁造成的影响远大于正常交通条件下的影响。

桥梁支座作为桥梁的重要传力构件,其刚度和 阻尼对桥梁振动的影响不容忽视<sup>[12-15]</sup>,上述提出的 车桥耦合振动分析方法均未考虑弹性桥梁支座对 车桥耦合振动的影响,因此在刘永健等<sup>[5]</sup>、刘世忠 等<sup>[6]</sup>的分析方法的基础上,结合分离法与汽车动力 学原理,在 ANSYS 软件中通过 APDL 编程把车辆 模型、桥梁模型和支座模型分别独立建立,再通过 APDL 编写车辆、桥梁和支座之间的位移协调关系 和力的平衡关系进行车-桥-支座耦合,以一座30 m 简支箱梁桥为算例,对车-桥-支座耦合系统进行了 动力响应分析。

#### 1 车-桥-支座耦合动力计算模型

把车-桥-支座系统分为车辆、桥梁和支座3个 子系统建立各自的运动方程,通过接触点处位移协 调和相互作用力的平衡关系分别把车辆-桥梁和桥 梁-支座进行耦合,形成车-桥-支座耦合系统模型如 图1所示,再采用迭代法求解系统响应。车辆模型 采用9自由度(车体的浮沉、点头和侧倾和各个车轮 的竖向位移自由度)空间整车模型如图2所示。系

收稿日期: 2023-12-22

基金项目:国家自然科学基金(52268048);广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人[2018]35)

作者简介: 宁锋(1995—),男,广东湛江人,硕士,工程师,研究方向为智能桥梁与防灾减灾;通信作者邓年春(1975—), 男,湖南永州人,博士(后),教授级高工,研究方向为智能桥梁与防灾减灾。

统的整体坐标系为 OXYZ, 把车体看作质量为 M 的 刚体,其点头自由度 θ 和侧倾自由度 φ 的转动惯量 分别为  $I_x$  和  $I_y$ , 通过悬架弹簧和减振器把车体质 量与车轮质量连接;各车轮的质量为  $m_i$ (i = 1,2,3, 4,5,6), 各车轮竖向位移自由度分别为  $z_i$ (i = 1,2, 3,4,5,6), 车轮再通过具有一定刚度和阻尼的弹簧 (轮胎)与桥梁路面连接,弹簧(轮胎)与桥面接触位 置点为  $N_i$ (i = 1,2,3,4,5,6)。



图 1 车-桥-支座耦合系统模型



图 2 三轴空间整车模型

#### 1.1 车辆运动微分方程

由达朗贝尔原理<sup>[12]</sup>可推导出整车运动微分 方程:

 $M_{v} \dot{u}_{v}(t) + C_{v} \dot{u}_{v}(t) + K_{v} u_{v}(t) = F_{v}(t)$  (1) 式中: $M_{v} \cdot C_{v} \cdot K_{v} \cdot F_{v} \cdot u_{v}$ 分别为车辆的质量矩阵、阻 尼矩阵、刚度矩阵、荷载矩阵和位移矩阵,具体表达 式如下:

	$\lceil m_v \rceil$								7	
	0	$I_p$			对					
	0	0	$I_r$							
	0	0	0	$m_1$			称			
$M_v =$	0	0	0	0	$m_2$					(2)
	0	0	0	0	0	$m_3$				
	0	0	0	0	0	0	$m_4$			
	0	0	0	0	0	0	0	$m_5$		
	Lo	0	0	0	0	0	0	0	$m_6 \rfloor$	

$$\boldsymbol{C}_{v} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & -c_{s1} & -c_{s2} & -c_{s3} & -c_{s4} & -c_{s5} & -c_{s6} \\ & C_{22} & C_{23} & ac_{s1} & ac_{s2} & -bc_{s3} & -bc_{s4} & -cc_{s5} & -cc_{s6} \\ & C_{33} & -b_{1}c_{s1} & b_{1}c_{s2} & -b_{2}c_{s3} & b_{2}c_{s4} & -b_{3}c_{s5} & b_{3}c_{s6} \\ & & c_{t1} + c_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{t2} + c_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{t3} + c_{s3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & c_{t4} + c_{s4} & 0 & 0 \\ & & & & & c_{t5} + c_{s5} & 0 \\ & & & & & & c_{t6} + c_{s6} \end{bmatrix}$$
(3)

$$\begin{cases} C_{11} = c_{s1} + c_{s2} + c_{s3} + c_{s4} + c_{s5} + c_{s6} \\ C_{12} = -ac_{s1} - ac_{s2} + bc_{s3} + bc_{s4} + cc_{s5} + cc_{s6} \\ C_{13} = b_1c_{s1} - b_1c_{s2} + b_2c_{s3} - b_2c_{s4} + b_3c_{s5} - b_3c_{s6} \\ C_{21} = a^2(c_{s1} + c_{s2}) + b^2(c_{s3} + c_{s4}) + c^2(c_{s5} + c_{s6}) \\ C_{22} = ab_1(c_{s2} - c_{s1}) + bb_2(c_{s4} - c_{s3}) + cb_3(c_{s6} - c_{s5}) \\ C_{23} = b_1^2c_{s1} + b_1^2c_{s2} + b_2^2c_{s3} + b_2^2c_{s4} + b_3^2c_{s5} + b_3^2c_{s6} \end{cases}$$

$$(4)$$

$$\boldsymbol{K}_{v} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & -k_{s1} & -k_{s2} & -k_{s3} & -k_{s4} & -k_{s5} & -k_{s6} \\ K_{22} & K_{23} & ak_{s1} & ak_{s2} & -bk_{s3} & -bk_{s4} & -kk_{s5} & -kk_{s6} \\ K_{33} & -b_{1} & k_{s1} & b_{1} & k_{s2} & -b_{2} & k_{s3} & b_{2} & k_{s4} & -b_{3} & k_{s5} & b_{3} & k_{s6} \\ k_{t1} + k_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{t2} + k_{s2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_{t3} + k_{s3} & 0 & 0 & 0 \\ k_{t4} + k_{s4} & 0 & 0 \\ k_{t5} + k_{s5} & 0 \end{bmatrix}$$

$$(5)$$

$$\begin{cases} K_{11} = k_{s1} + k_{s2} + k_{s3} + k_{s4} + k_{s5} + k_{s6} \\ K_{12} = -ak_{s1} - ak_{s2} + bk_{s3} + bk_{s4} + kk_{s5} + kk_{s6} \\ K_{13} = b_1 \ k_{s1} - b_1 \ k_{s2} + b_2 \ k_{s3} - b_2 \ k_{s4} + b_3 \ k_{s5} - b_3 \ k_{s6} \\ K_{21} = a^2 (k_{s1} + k_{s2}) + b^2 (k_{s3} + k_{s4}) + k^2 (k_{s5} + k_{s6}) \\ K_{22} = ab_1 (k_{s2} - k_{s1}) + bb_2 (k_{s4} - k_{s3}) + kb_3 (k_{s6} - k_{s5}) \\ K_{23} = b_1^2 \ k_{s1} + b_1^2 k_{s2} + b_2^2 \ k_{s3} + b_2^2 k_{s4} + b_3^2 \ k_{s5} + b_3^2 k_{s6} \end{cases}$$
(6)

 $\boldsymbol{u}_{v} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{z}_{v} & \boldsymbol{\theta}_{v} & \boldsymbol{\varphi}_{v} & \boldsymbol{z}_{w1} & \boldsymbol{z}_{w2} & \boldsymbol{z}_{w3} & \boldsymbol{z}_{w4} & \boldsymbol{z}_{w5} & \boldsymbol{z}_{w6} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ (7)

$$\mathbf{F}_{tb} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & k_{t1}\mathbf{z}_{r1} & k_{t2}\mathbf{z}_{r2} & k_{t3}\mathbf{z}_{r3} \\ k_{t4}\mathbf{z}_{r4} & k_{t5}\mathbf{z}_{r5} & k_{t6}\mathbf{z}_{r6} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(8)

式中: $m_v$ 、 $I_p$ 、 $I_r$ 分别为车体质量、点头转动惯量和 侧倾转动惯量; $m_i$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为车轮质量;  $k_{si}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为悬架刚度系数; $c_{si}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为悬架阻尼系数; $k_{ii}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为轮胎刚度系数; $c_{ii}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为轮胎刚度系数; $c_{ii}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为轮胎阻尼 系数; $z_v$ 、 $\theta_v$ 、 $\varphi_v$ 分别为车体竖向位移、点头角位移 和侧倾角位移; $z_{vi}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为车轮的竖 向位移; $z_{ri}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为车轮的竖 向位移; $z_{ri}$ (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)为车轮对应的桥梁接 触点的竖向位移; $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 分别为 1/2前中后车轴 轴距;a、b、c分别为前中后车轴与车体重心的距离。

#### 1.2 桥梁结构振动方程

根据有限元动力学理论<sup>[13]</sup>可以得到桥梁振动的一般方程:

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}\ddot{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{b}}(t) + \boldsymbol{C}_{\mathrm{b}}\dot{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{b}}(t) + \boldsymbol{K}_{\mathrm{b}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{b}}(t) = \boldsymbol{F}_{\mathrm{bg}}(t) + \boldsymbol{F}_{\mathrm{bv}}(t)$$
(9)

式中: $M_b$ 、 $C_b$ 、 $K_b$ 分别为桥梁的质量矩阵、阻尼矩阵 和刚度矩阵; $u_b$ 、 $\dot{u}_b$ 、 $\ddot{u}_b$ 分别为桥梁节点的位移向 量、速度向量和加速度向量; $F_{bg}$ 、 $F_{bv}$ 分别为与车辆 无关的荷载列向量和车轮荷载列向量。

桥梁结构的阻尼矩阵可以表示为:

$$\boldsymbol{C}_{\mathrm{b}} = \alpha \boldsymbol{M}_{\mathrm{b}} + \beta \boldsymbol{K}_{\mathrm{b}} \qquad (10)$$

式中:

$$\begin{cases} k_{t5} + k_{s5} & 0 \\ k_{t6} + k_{s6} \end{bmatrix} \\ \left\{ \alpha = \frac{2\omega_i \omega_j \left( \xi_i \omega_j - \xi_j \omega_i \right)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \\ \beta = \frac{2\left( \xi_j \omega_j - \xi_i \omega_i \right)}{\omega_i^2 - \omega_i^2} \end{cases}$$
(11)

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ 为质量阻尼系数( $\alpha$  阻尼)和刚度阻尼系数 ( $\beta$  阻尼); $\omega_i$ 、 $\omega_j$ 分别为桥梁结构的第i和第j阶振 频; $\xi_i$ 、 $\xi_j$ 分别为桥梁结构的第i和第j阶振型对应 的阻尼比。

#### 1.3 支座振动方程

支座振动方程表示为

 $C_{\mathrm{p}}\dot{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{p}}(t) + K_{\mathrm{p}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{p}}(t) = \boldsymbol{F}_{\mathrm{p}}(t) \qquad (12)$ 

式中:  $C_{p}$ 、 $K_{p}$ 为支座的阻尼系数和刚度系数;  $u_{b}$ 、 $\dot{u}_{b}$ 分别为桥梁节点的位移向量和速度向量;  $F_{p}$ 为支座 受到的外荷载向量。

其中橡胶支座的法向刚度系数 K<sub>p</sub>和阻尼系数 C<sub>p</sub>分别由以下公式确定。

$$\begin{cases} S = \frac{ab}{2(a+b)t_e} \\ E = (3+6.58S^2)G_d \\ K_p = \frac{A_r E}{\sum t} \\ C_p = -\frac{F_p}{V} \end{cases}$$
(14)

式中: S 为橡胶支座的形状系数; a,b 为橡胶的边长,m; $t_e$  为单层橡胶的厚度,m; E 为橡胶支座的等价弹性模量;  $G_a$  为橡胶支座的动剪切模量,  $kN/m^2$ 。 **F**。为阻尼力; **V**。为支座运动速度。

#### 2 车-桥-支座耦合关系

在车-桥-支座耦合系统中,车辆系统与桥梁结 构通过接触点处的位移协调关系和相互作用力的 平衡关系进行耦合。

1)位移协调关系

在车辆行驶过程中,假定车辆轮胎与桥面、支 座与桥面和支座与桥墩之间始终紧密接触,均不发 生跳车或脱空现象。其位移协调关系表示为

289

$$\boldsymbol{\Delta}_{i} = \boldsymbol{z}_{i} + \boldsymbol{r}_{i} - \boldsymbol{z}_{bi} \qquad (15)$$
$$\boldsymbol{\dot{\Delta}}_{i} = \boldsymbol{\dot{z}}_{i} + \boldsymbol{r}_{i} \boldsymbol{\dot{x}} - \boldsymbol{z}_{bi}^{\prime} \boldsymbol{\ddot{x}} \boldsymbol{\dot{z}}_{bi} = \boldsymbol{\dot{z}}_{i} + \boldsymbol{r}_{i}^{\prime} \boldsymbol{v} - \boldsymbol{z}_{bi}^{\prime} \boldsymbol{v} - \boldsymbol{z}_{bi} \qquad (16)$$

式中: $\Delta_i$ 、 $\Delta_i$ 分别为第*i*个接触点与桥面之间的竖向 位移和速度关系; $z_i$ 、 $z_i$ 、 $z_i$ 分别为第*i*个接触点的竖 向位移、竖向速度和竖向加速度; $z_{bi}$ 、 $z'_{bi}$ 分别为第*i* 个接触点位置处的桥梁瞬时位移和瞬时转角; $r_i$ 为 第*i*个车轮下桥面的不平顺度;x、v分别为车辆向 前行驶的位移和速度。

2) 力学耦合关系

无论是桥面与车轮接触点之间,还是支座与桥 面接触点或桥墩接触点之间,都存在一对相互作用 的力,这对相互作用的力总是大小相等、方向相反, 可表示为

$$\boldsymbol{F}_{ii} = k_{ii} \boldsymbol{\dot{\Delta}}_i + c_{ii} \boldsymbol{\dot{\Delta}}_i \tag{17}$$

式中:  $F_{ii}$  为第i 个接触点的车-桥或桥-支座接触力;  $k_{ii}$ 、 $c_{ii}$  为第i 个轮胎或支座的刚度系数和阻尼系数。

#### 3 车-桥-支座耦合动力响应分析

以计算跨径为 30 m 的等截面简支箱梁桥为算 例,其中箱梁为 C50 混凝土,弹性模量为 3.45×10<sup>7</sup>  $kN/m^3$ ,泊松比为 0.2,密度为 2.549  $kN/m^3/g$ ,截 面为单箱单室截面,截面面积为 11.298 7  $m^2$ ,截面 抗弯 刚 度 为 13.532 1  $m^4$ 。采用 ANSYS 中 的 APDL参数化建立有限元模型如图 3 所示。

#### 3.1 桥面不平整度的影响

根据中国国家标准《车辆振动输入与路面平度



#### 图 3 有限元模型

表示方法》(GB/T 7031—1986)中功率谱密度,利用 MATLAB进行 Fourier 逆变换得到了 A、B、C、D等 级桥面不平整度反演如图 4 所示。



图 4 路面不平整度反演

分析工况:单辆三轴卡车(车辆技术参数如表 1 所示)以 60 km/h 速度匀速通过桥梁,支座的法向 刚度系数  $K_0$  和法向阻尼系数  $C_0$  分别为 1.60×  $10^6$  kN/m和 9.8× $10^3$  kN•s/m。

计算得到了桥面不平整度对桥梁动力响应的 影响如图 5~图 7 所示。

图 5 为跨中竖向位移响应曲线,车辆行驶在桥梁上,随着桥面状况变差,跨中的振动幅度越大,动 力响应越激烈,而且由于车辆行驶速度较快,桥梁 动力响应有明显的滞后现象。

图 6 和图 7 分别为 1 # 支座和 2 # 支座的竖向 反力响应曲线,支座的动力响应随着桥面状况变差 而增大,由于响应滞后,2 # 支座出现的瞬时反力比 1 # 支座更大,图中曲线出现的三级阶梯为车辆的 三个车轴进出桥梁瞬间所造成的支座反力突然增 大或减小。

移动荷载动力冲击系数(impact factor, IM)采 用国际常用的表达式定义:

$$IM = \frac{R_{dyn} - R_{sta}}{R_{sta}}$$
(18)

式中: *R*<sub>dyn</sub>、*R*<sub>sta</sub>分别为移动荷载作用下的桥梁动力效应时间历程曲线上的最大动效应和最大静效应。

根据公式(18)计算得到不同等级桥面简支梁 动力冲击系数 IM 如表 2 所示。跨中和支座的动力 冲击系数 IM均随着桥面等级下降单调增大如图8

车轴	轮对质量 (m)/kg	悬架垂向刚度 $(K_u)/(N \cdot m^{-1})$	悬架垂向阻尼 $C_{\rm u}/({ m kg}\cdot{ m m}^{-1})$	轮胎垂向刚度 $K_{\rm u}/({ m N}\cdot{ m m}^{-1})$	悬架垂向阻尼 $C_{\rm u}/({ m kg} \cdot { m m}^{-1})$	车体质量 $M_{ m c}/{ m kg}$	车体点头刚度 I <sub>c</sub> /(kg·m <sup>2</sup> )	车体侧倾刚度 <i>I<sub>c</sub>/(kg•m<sup>2</sup>)</i>
前轴	2 200	1 267 500	98 000	2 140 000	49 000			
中轴	1 100	633 750	49 000	1 070 000	24 500	25 600	688 000	760 000
后轴	1 100	633 750	49 000	1 070 000	24 500			

表1 空间三轴车辆技术参数

注:车辆前后轴距为4.8 m。

290



图 5 不同等级桥面简支梁跨中竖向位移响应曲线



图 6 不同等级桥面简支梁 1 # 支座反力响应曲线



图 7 不同等级桥面简支梁 2 # 支座反力响应曲线

所示。与理想桥面相比,在A、B、C、D等级桥面下, 跨中 IM 分别增大了 76.1%、152.1%、328.2%、 905.6%,1 # 支座 IM 分别增大了 50.0%、183.3%、 466.7%、1 016.7%,2 # 支座 IM 分别增大了 71.4%、185.7%、728.6%、1 957.1%。分析结果表 明,桥面的优劣程度对车-桥-支座耦合动力响应的 影响非常大,桥面平整度越差,系统产生的动力响 应越激烈。

表 2 不同等级桥面简支梁动力冲击系数计算结果

长而不亚数亩竿纽	不同位置动力冲击系数(IM)				
<b>忻</b> 闻小干 釜及 守 纨	跨中	1 # 支座	2 # 支座		
理想桥面	0.071	0.006	0.007		
A等级桥面	0.125	0.009	0.012		
B等级桥面	0.179	0.017	0.020		
C等级桥面	0.304	0.034	0.058		
D等级桥面	0.714	0.067	0.144		





#### 3.2 支座刚度的影响

为了研究支座刚度大小的影响,引人比例因子  $\alpha$ ,设支座刚度系数为 $K = \alpha K_0 (K_0 = 1.60 \times 10^6$  kN/m为初始刚度系数), $\alpha$ 分别取值 0.01、0.02、 0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0。

分析工况:单辆三轴卡车(车辆技术参数如表 1 所示)以 60 km/h 速度匀速通过桥梁(理想等级桥面),支座阻尼系数  $C_0$  为 9.8 × 10<sup>3</sup> kN • s/m。

分析得到不同支座刚度下,简支梁跨中竖向位 移响应曲线如图 9 所示,支座反力响应曲线如图 10 所示,计算得到不同支座刚度下简支梁动力冲击系 数如表 3 所示。从图 9 和表 3 可以看出随着支座刚 度增大,跨中动力冲击系数不断减小,但是当α>1.0

古应则审	不同位置动力冲击系数(IM)				
又座刚及	跨中	1 # 支座	2#支座		
刚性支座	0.036	0.004	0.002		
$\alpha = 2.0$	0.054	0.008	0.002		
$\alpha = 1.5$	0.071	0.009	0.002		
$\alpha = 1.0$	0.071	0.006	0.003		
$\alpha = 0.5$	0.107	0.009	0.001		
$\alpha = 0.1$	0.286	0.005	0.004		
$\alpha = 0.05$	0.500	0.004	0.005		





图 9 不同支座刚度跨中竖向位移响应曲线

时,再继续增大支座刚度对减小跨中竖向动位移的 贡献变得很小,与刚性支座下的挠度曲线非常接 近。从图 10 和表 3 可以看出支座刚度变化对支座 动力冲击系数的影响很小,支座反力动力冲击系数 最大值为 0.09。

#### 3.3 支座阻尼的影响

引入比例因子  $\beta$ ,设支座刚度系数为  $C = \beta C_0 (C_0 = 9.8 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 为初始阻尼系数), $\beta$ 分别取值 0.01、1.0、100.0。

分析工况:单辆三轴卡车(车辆技术参数如表 4 所示)以 60 km/h 速度匀速通过桥梁(理想等级桥面),支座刚度系数  $K_0 = 1.60 \times 10^6$  kN/m。

分析得到不同支座阻尼下,简支梁跨中竖向 加速度响应曲线如图 11 所示,支座加速度响应曲 线和反力响应曲线如图 12 和图 13 所示,计算得 到不同支座阻尼下简支梁最大瞬时加速度如表 4 所示。由图 13 可知不同支座阻尼情况下,各支座 竖向反力变化规律基本一致。从图 14 可以看出 增大支座阻尼对削弱简支梁加速度响应有明显的 效果,随着支座阻尼增大,可以有效降低桥梁瞬时 加速度的峰值。



图 10 不同支座刚度下支座竖向反力响应曲线



图 11 不同支座阻尼跨中竖向加速度响应曲线

表 4 不同支座阻尼简支梁最大瞬时加速度计算结果

去应阳尼	不同位置最大瞬时加速度/(m•s <sup>-2</sup> )				
又座阻尼	跨中	1 # 支座	2#支座		
$\beta = 0.01$	0.385	0.703	0.520		
$\beta = 1.0$	0.305	0.460	0.370		
$\beta = 100.0$	0.294	0.360	0.286		



图 12 不同支座阻尼下支座竖向加速度响应曲线

### 4 结论

本文基于 ANSYS 中 APDL 语言,结合分离法 与汽车动力学原理,分别建立车辆、桥梁和支座3个 子系统的计算模型并通过位移协调关系和力的平 衡关系进行车-桥-支座耦合,以公路桥梁常用的 30 m预制简支箱梁为算例详尽分析了桥面不平整 度、支座刚度和阻尼对车-桥-支座耦合动力响应的 影响,得到以下结论。

(1)桥面不平整度是影响车-桥-支座耦合动力 响应的一个非常重要的因素,桥面平整度越差,车 辆行驶过程中振动越激烈,对桥梁结构产生的冲击 作用力越大,激发桥梁振动越激烈。与理想桥面相 比,在A、B、C、D等级桥面下,跨中 IM 分别增大了 76.1%、152.1%、328.2%、905.6%,1 # 支座 IM 分 别增大了 50.0%、183.3%、466.7%、1016.7%,2 # 支座 IM 分别增大 71.4%、185.7%、728.6%、 1957.1%。

(2)支座刚度和阻尼对车-桥-支座耦合动力响 应有较大影响。在一定范围内,增大支座刚度能有



图 13 不同支座阻尼下支座竖向反力响应曲线



图 14 最大瞬时加速度变化曲线

效降低桥梁跨中动力响应,减小跨中挠度 IM,但当 支座刚度增大到一定程度时,再继续增大支座刚度 对减小跨中 IM 效果非常小;支座刚度变化对支座 IM 的影响很小;阻尼可以消耗结构振动产生的能 量,增大支座阻尼对削弱桥梁加速度响应有明显的 效果,随着支座阻尼增大,可以有效降低简支梁瞬 时加速度的峰值。 (3)实际桥梁设计时,适当增大支座刚度和阻 尼能有效削弱车-桥-支座耦合振动对桥梁的冲击作 用,增强桥梁结构性能。

#### 参考文献

- [1] 李小珍,王铭,晋智斌,等. 车-桥耦合振动 2020 年度研 究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43 (S1): 135-141.
- [2] ZHOU J, WANGG. Coupling vibration research on vehicle-bridge system[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267 (4): 042104.
- [3] LIU G, JANG B, ZHOU H Z, et al. Effect of wheel pressure on vibration of straddle monorail transit vehiclebridge system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 31(919/921): 542-546.
- [4] HAN W, LIU X, GUO X, et al. Research status and prospect of wind-vehicle-bridge coupling vibration system
   [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2022, 9 (3): 319-338.
- [5] 刘永健,刘世忠,米静,等.双层公路钢桁梁桥车桥耦合 振动[J].交通运输工程学报,2012,12(6):9.
- [6] 刘世忠,刘永健,程高,等. 公路桥梁车桥耦合振动数值 分析方法[J]. 郑州大学学报:工学版,2014(1):5.
- [7] 许汉铮,潘宏,商朋朋,等.考虑横竖向车桥耦合曲线桥的 动力响应影响[J].科学技术与工程,2020,20(19):7891-7897.

- [8] 韩智强,李路遥,周勇军,等. 多点激励简支梁桥车桥耦合 振动响应[J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (18): 7425-7432.
- [9] 韩智强,谢刚,李路遥,等.大跨连续梁桥车桥耦合振动 响应[J].科学技术与工程,2022,22 (11):4588-4595.
- [10] 王秀丽,朱武军,张雨.大跨度钢管翼缘组合梁桥车桥 耦合振动性能分析[J].科学技术与工程,2022,22 (28):12525-12534.
- [11] LIU L, WANG J, YANG H. Dynamic impact factor induced by idling vehicle-bridge coupling vibration [J]. Journal of Harbin Institute of Technology(New Series), 2022, 29 (3): 79-87.
- [12] 刘旭川. 连续钢构桥梁支座消能减振抗震加固技术研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(14): 98-102.
- [13] 李晓波. 铁路桥梁两种减震装置振动控制效果研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(6): 92-97.
- [14] 张永亮,刘聪聪,李晓钟,等.长联连续梁桥双曲面球 型减隔震支座参数影响研究[J].桥梁建设,2022
   (1):52.
- [15] 郝慧荣,曹艳状,程利军,等.基于有限元的板簧橡胶 支座失效形式分析[J].科学技术与工程,2023,23(5): 2156-2163.
- [16] MUKHIDDIN K, ANVAR R, GULOMJON P, et al. Modeling the dynamics of a wedge pair under the action of a constant force[J]. Transportation Research Procedia, 2022, 63: 458-464.
- [17] 金浩.有限单元法在城市轨道交通振动控制中的应用 [M].北京:中国铁道出版社,2021.

## Analysis of Vehicle-Bridge-Support Coupling Dynamic Response of Simply Supported Beam Based on ANSYS

NING Feng<sup>1,2,3</sup>, DENG Nianchun<sup>2,4</sup>

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co. Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. School of civil engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Key Laboraatory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;
 4. Key Laboraatory of Disaster Prevention and Structural Safety of Guangxi, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to more accurately simulate the vibration generated by vehicles crossing the bridge, the influence of the elastic action of the bridge support should be considered. Combining the separation method and the principle of vehicle dynamics, the calculation models of the vehicle, bridge and support were respectively established, and the vehicle-bridge-support coupling was carried out through the displacement coordination relationship and the force balance relationship. Based on the APDL language in ANSYS, taking a 30 m simply supported box girder bridge as an example, the effects of bridge deck irregularity, support stiffness and damping on vehicle-bridge-support coupling dynamic response were studied and analyzed. The results show that the worse the flatness of the bridge deck, the greater the impact force on the bridge during the driving process of the vehicle, and the more severe the dynamic response of the bridge. Appropriately increasing the support stiffness can effectively reduce the dynamic deflection of the bridge and weaken the vibration response. The support damping has the effect of energy dissipation, and increasing the support damping has a significant effect on weakening the acceleration response of the bridge. When designing the bridge support, the stiffness and damping of the support should be appropriately increased to weaken the impact of the vehicle-bridge-support coupling vibration on the bridge.

Keywords: vehicle-bridge-support coupling vibration; dynamic response; uneven bridge deck; numerical analysis; vehicle impact