

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.08.066

基于 APDL 的车-连续曲线梁桥耦合系统 建模及动力学分析

王京潮¹, 郑志均²

(1. 宁海县市政建设中心, 浙江 宁海 315600; 2. 杭州市城建设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310018)

摘要: 随着公路等级、行车速度以及汽车载重等的不断提高, 汽车-桥梁相互作用问题越来越突出。在车-曲线桥耦合动力系统中存在“弯-扭耦合作用”, 使得曲线桥的动力学分析相对复杂得多。基于 APDL 语言采用位移耦合合法建立了车-曲线桥耦合系统有限元模型, 并与已有文献对比验证了该方法的正确性。以一座 5 跨连续曲线箱梁公路桥为例, 计算了该桥在车辆荷载作用下的动挠度响应, 并分析了偏载、车速、离心力对连续曲线梁桥各跨跨中截面动挠度和动力冲击系数的影响。

关键词: APDL; 车-曲线桥耦合系统; 挠度; 动力冲击系数

中图分类号: U441+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)08-0252-06

0 引言

在曲线桥中, 梁截面发生竖向弯曲时, 由于曲率的影响, 同时会产生扭转, 这种扭转作用又将导致梁的挠曲变形, 称为“弯-扭耦合作用”^[1], 因此, 曲线桥的变形比相同跨度的直线桥大。同时, 汽车在曲线桥上行驶时会对桥梁产生水平方向的离心力, 导致横向内力及附加扭矩, 使得曲线桥的动力学分析比直线桥的动力学分析复杂得多。

国内外学者的早期研究中, 主要侧重于解析方法研究, 曲线桥采用 Euler 梁、Timoshenko 梁或者梁单元模拟, 且多为简支梁, 汽车模型多简化为移动荷载^[2-11], 分析曲线桥的动力响应或冲击系数, 李忠献^[12]针对公路和城市立交中的曲线箱梁桥, 基于剪力柔性梁格法建立了曲线箱梁的梁格模型, 进行了车桥相互作用分析, 得到曲线箱梁桥的车桥耦合振动方程, 利用 Newmark- β 数值积分法求解桥梁的动力响应。随着研究的逐渐深入和有限元计算软件的发展, 车-桥耦合系统的研究转为解析方法和有限元方法相结合的方法。

尽管国内外学者近些年对车-曲线桥耦合系统进行了一些研究, 但已有的汽车-桥梁耦合系统的计算方法各不相同, 通用性不强, 对于普通的桥梁设计人员或施工人员进行实际车-桥耦合系统的

动力计算有较大难度。为此, 本文拟提出一种完全基于 ANSYS 有限元分析软件, 建立车-桥耦合系统动力计算模型的方法, 并与已有文献的计算结果比较, 验证该方法的正确性; 最后以某 5 跨连续曲线箱梁公路桥为例, 采用实体单元建立车-曲线桥耦合系统动力模型, 分析各种因素对曲线桥动挠度响应和动力系数的影响情况。研究成果可为曲线梁桥的设计、健康监测、损伤识别、加固等的进一步研究提供参考。

1 汽车-曲线桥有限元模型

2.1 采用 APDL 建立车-桥耦合系统有限元模型

图 1 所示是车-曲线桥耦合系统动力分析模型, 为了便于获得解析解, 该模型中桥梁的计算模型多为简支梁, 而实际的桥梁结构多为连续梁桥或连续刚构桥、变截面连续梁桥、钢混组合梁桥等, 显然只通过解析方法进行汽车-桥梁耦合系统的动力分析已不能满足实际工程的需要。有限元方法却能弥补这一不足, 能够建立各种复杂桥梁的计算模型。采用 APDL 位移耦合合法^[13]建立一个车辆模型, 根据移动速度对车辆模型施加不同的位移约束, 将车辆模型与所移动到的位置处的节点竖向位移耦合, 该方法建模简单, 计算的桥梁的动力响应正确, 且无论桥梁模型采用何种单元类型, 均能够实现车-桥耦合系统的模拟计算。

本文将文献[13]中的位移耦合合法思想拓展应用到汽车-曲线桥耦合系统动力分析模型中, 并计算桥梁的动力响应。计算流程如图 2 所示, 具体步骤包括:

(1) 根据实际桥梁选择合适的单元类型建立其有

收稿日期: 2021-04-12

作者简介: 王京潮(1963—), 男, 学士, 高级工程师, 从事结构设计及城市市政工程管理。

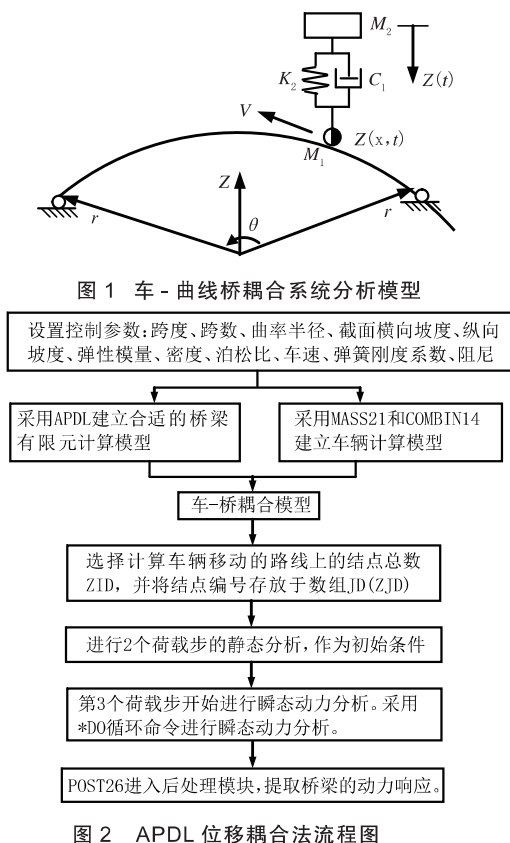


图 2 APDL 位移耦合流程

限元计算模型;(2)在车辆移动的起点建立质量单元 MASS21 模拟图 1 中的 M_1 , 在 M_1 的上方距离为 1 m (可根据实际情况确定此高度) 的位置建立模拟 M_2 的 MASS21 单元, 再将 M_1 和 M_2 用弹簧 - 阻尼器单元 COMBIN14 连接起来, 模拟图 1 中的弹簧和阻尼器;(3)在桥梁有限元模型中选择车辆移动的路线上的结点编号;(4)采用 APDL 中的 DO 循环命令使车辆依次经过选定的结点编号, 进行瞬态动力分析, 根据车辆移动的速度, 计算车辆移动到各个结点的时刻, 即该结点到起点的距离, 对 M_1 和 M_2 施加相应的位移约束, 并采用 CP 命令将 M_1 和该结点的竖向位移相耦合实现车辆模型的移动;(4)ANSYS 后处理功能可以提取桥梁结构任意位置的动力响应, 并能通过修改控制参数, 分析各个控制参数对车 - 曲线桥耦合系统动力响应的影响情况。本文将这种完全由 APDL 建立的车 - 曲线桥有限元模型称为 APDL 车 - 曲线桥耦合模型。

2.2 验证 APDL 有限元模型的正确性

以文献[4]中车辆和桥梁结构的参数为例, 建立 APDL 车 - 曲线桥耦合系统计算模型, 并与其计算结果比较, 验证 APDL 车 - 曲线桥计算模型的正确性。

桥梁跨长 $L=24$ m, 圆心角 $\phi=30^\circ$, 截面积 $A=9$ m², 截面特性 $I_x=18.75$ m⁴、 $I_y=2.43$ m⁴、 $J=21.18$ m⁴, 弹性

模量 $E=32.3$ GPa, 泊松比 $\nu=0.2$, 密度 $\rho=2.4$ t/m³。车辆系统采用文献[4]中的车重, 即 $m_v=29.9$ t=29 900 kg, 如图 1 所示的簧下质量 $M_1=1\ 083$ kg, 簧上质量 $M_2=28\ 817$ kg, $m_v=M_1+M_2$ 。参考重型汽车的参数, 图 1 中车辆系统的弹簧刚度系数 $k_1=2.135\times 10^6$ N/m, 车辆阻尼系数 $c_1=3.9\times 10^3$ N·s/m; 车辆移动速度 $v=40$ m/s。

首先, 在柱坐标系下建立曲线梁, 设曲线的径向为 x 轴(柱坐标的 r 方向(正方向指向曲线的外侧)), 沿桥的纵向为 y 轴(柱坐标的 θ 方向(逆时针方向为正方向)), 垂直于桥面方向向上为 z 轴方向正方向。一端支座约束沿 x 轴、 y 轴、 z 轴的线位移及绕 y 轴的角位移, 另一端约束沿 x 轴、 z 轴的线位移及绕 y 轴的角位移。由于 3 节点的 BEAM189 单元可以适应曲线边界, 能更加准确的模拟曲线桥, 因此选择 BEAM189 单元。

该曲线桥跨中截面的竖向位移动力响应如图 3 所示, 本文建立的 APDL 车 - 曲线桥耦合模型的计算结果与文献[4]的结果吻合良好, 说明该方法是可行的。

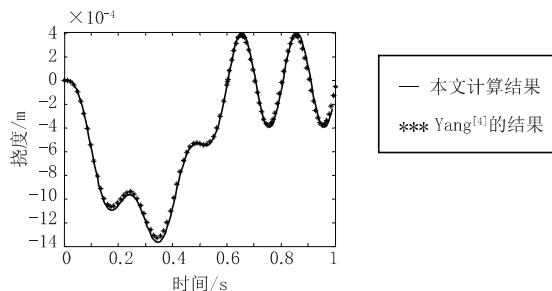


图 3 与 Yang^[4]的计算结果对比图

2.3 5 跨连续曲线梁桥的 APDL 车 - 曲线桥计算模型

以某 5×25.4 m 连续曲线箱梁公路桥, 如图 4 所示为研究背景, 分别采用梁单元 BEAM189 和实体单元 SOLID95 建立桥梁的有限元模型, 本文按照等截面梁体建立, 桥梁的横截面示意图如图 5 所示。桥梁和车辆的具体参数见表 1 和表 2。采用位移耦合法建立 APDL 车 - 曲线桥计算模型, 如图 6 所示。

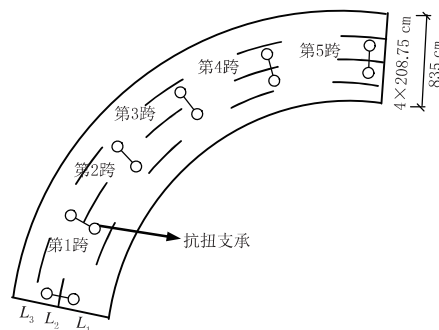


图 4 桥梁示意图

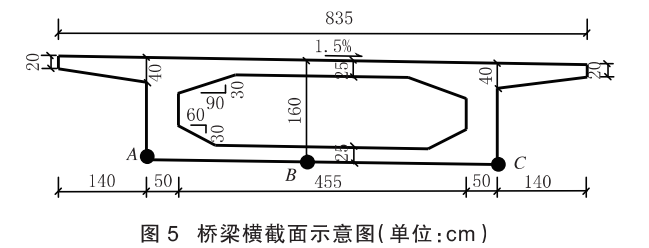


图5 桥梁横截面示意图(单位:cm)

表1 桥梁参数

曲率半径/m	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
160	34.5	0.3	2500

表2 车辆参数

簧下质量 <i>M</i> ₁ /kg	簧上质量 <i>M</i> ₂ /kg	刚度系数 <i>k</i> ₁ /(kN·m ⁻¹)	阻尼系数 <i>c</i> ₁ /(N·s·m ⁻¹)	车速 <i>v</i> /(km·h ⁻¹)
190	5 054.5	2 135	3 900	60

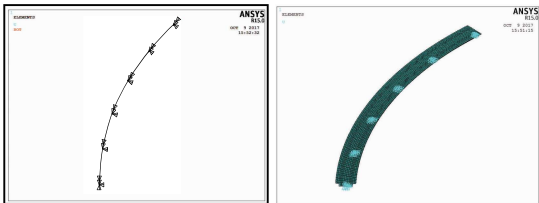


图6 分别采用梁单元和实体单元建立的曲线桥有限元模型

计算得桥梁各跨跨中截面B点的挠度时程曲线如图7各图所示,表3为两种模型计算得到的各跨跨中截面最大挠度及差值列表。

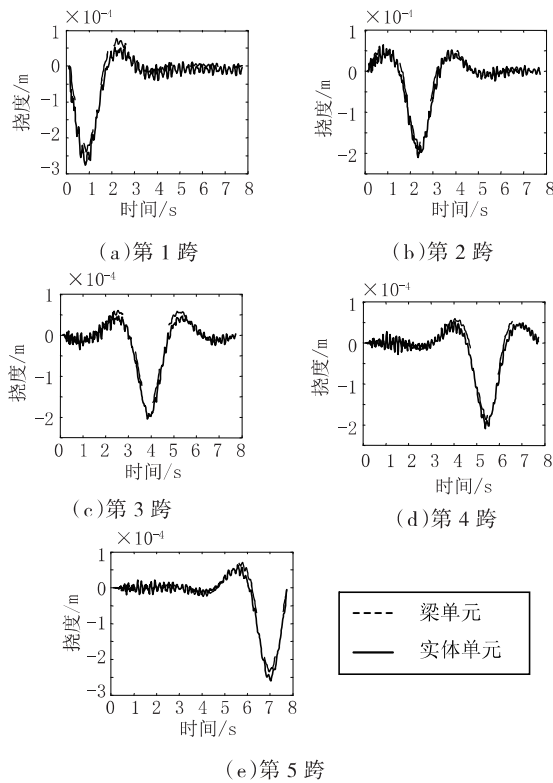


图7 采用两种桥梁模型所得桥梁各跨跨中截面B点的挠度时程曲线

表3 两种桥梁计算模型所得各跨跨中B点最大挠度及差值
(单位:×10⁻⁵ m)

	第1跨	第2跨	第3跨	第4跨	第5跨
梁单元	-2.401	-1.927	-1.812	-1.870	-2.355
实体单元	-2.669	-2.105	-2.042	-2.096	-2.605
差值	-0.268	-0.178	-0.230	-0.226	-0.250

其中:差值=实体单元模型所得B点最大挠度-梁单元模型所得B点最大挠度

由图7可知,采用两种桥梁计算模型所得桥梁各跨跨中截面的挠度时程曲线变化趋势一致,实体单元模型的计算结果偏大一些。且由表3可知,最大挠度之差最大为0.268×10⁻⁴ m,可见采用实体单元模型计算偏于安全。下面的分析均采用实体单元模型进行计算。

2 车-曲线桥耦合系统动挠度的影响因素分析

动力冲击系数(*IM*)是桥梁设计中用以表征车辆动荷载对桥梁冲击效应的系数^[14]:

$$IM = \frac{\Delta d_{\max}}{\Delta s_{\max}} - 1 \tag{1}$$

式中: $\Delta d_{\max}$ 为最大动响应,m; $\Delta s_{\max}$ 为最大静响应,m。

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[15]中的计算公式为:

$$\begin{aligned} &\text{当 } f < 1.5 \text{ Hz 时, } IM = 0.05; \\ &\text{当 } 1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 14 \text{ Hz 时, } IM = 0.176 \ln f - 0.0157 \tag{2} \\ &\text{当 } f > 14 \text{ Hz 时, } IM = 0.45; \end{aligned}$$

式中: f 为桥梁的基频,该算例中桥梁的基频为5.072 2 Hz,因此,动力冲击系数为0.27。

2.1 偏载的影响

修改APDL命令流中汽车荷载作用位置,使汽车荷载分别沿不同的路线(内偏载 L_1 、轴线 L_2 、外偏载 L_3 ,如图4所示)驶过桥梁时,计算各跨跨中截面中的A点(横截面底板外侧点,如图5所示)、B点、C点(横截面底板内侧点,如图5所示)的动挠度及动力冲击系数。由于结构具有对称性,因此第1跨和第5跨、第2跨和第4跨的挠度时程曲线也具有对称性,因此本文只列出第1跨、第2跨、第3跨的挠度时程曲线,如图8~图10所示。表4和表5分别为,汽车荷载沿不同路线驶过桥梁时,各跨跨中截面中的A点、B点、C点的最大动挠度及动力冲击系数列表。

由图8~10和表4~5可知,偏载对该5跨连续曲线桥各跨跨中截面中A点和C点的动挠度及动挠度的动力冲击系数影响较大。车辆荷载沿 L_1 (内偏载)

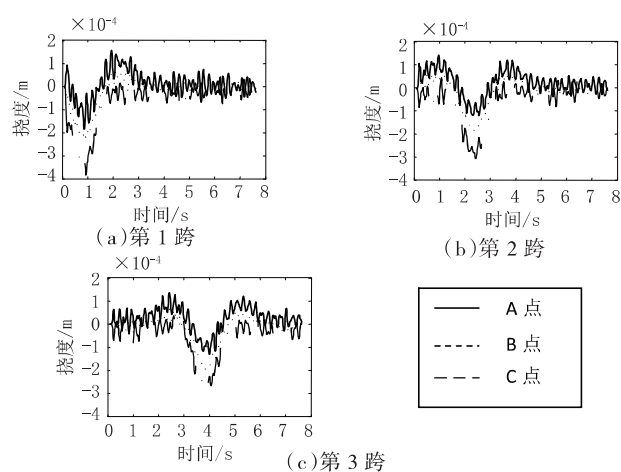


图8 汽车荷载沿内偏载路线 L_1 驶过桥梁时,第1~3跨跨中截面中的A点、B点、C点的动挠度时程曲线

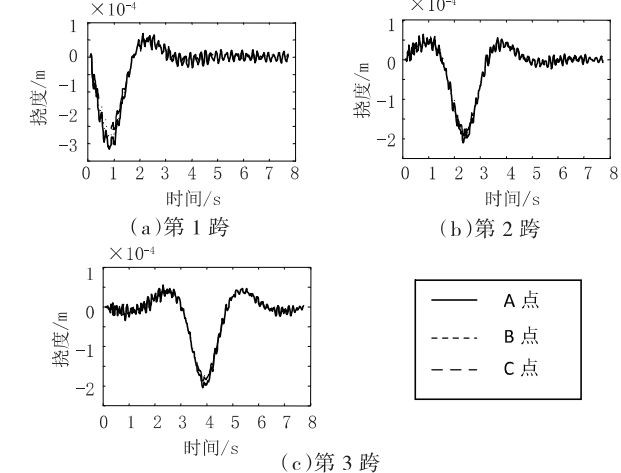


图9 汽车荷载沿轴线 L_2 驶过桥梁时,第1~3跨跨中截面中的A点、B点、C点的动挠度时程曲线

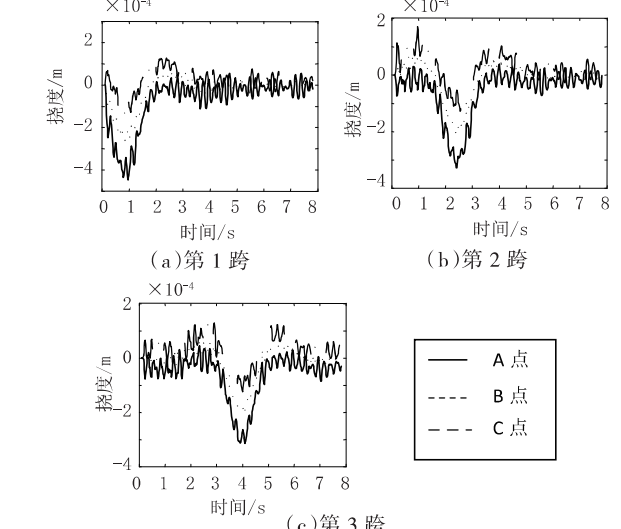


图10 汽车荷载沿外偏载路线 L_3 驶过桥梁时,第1~3跨跨中截面中的A点、B点、C点的动挠度时程曲线

移动时,内侧C点的最大挠度比外侧A点和轴线B点的最大挠度大,最大差值为 2.0785×10^{-4} m;车辆荷载沿 L_2 (轴线)移动时,外侧A点、轴线B点和内侧C点的最大挠度相差较小,最大差值仅为 $-0.4308\times$

表4 汽车荷载分别沿 L_1 、 L_2 、 L_3 驶过桥梁时,各跨跨中截面中的A点、B点、C点的最大动挠度列表(单位: $\times 10^{-4}$ m)

路线	测点	第1跨	第2跨	第3跨	第4跨	第5跨
L_1	A点	-1.763 7	-1.175 4	-1.310 1	-1.422 1	-1.615 6
	B点	-2.383 5	-1.904 1	-1.964 5	-1.980 8	-2.349 9
	C点	-3.821 1	-3.051 7	-3.042 9	-3.101 1	-3.694 1
	差值	2.057 4	1.876 3	1.732 8	1.679 0	2.078 5
L_2	A点	-2.669 3	-2.105 4	-2.041 7	-2.096 5	-2.604 8
	B点	-2.371 1	-1.931 5	-1.875 3	-1.948 4	-2.291 7
	C点	-2.238 4	-1.957 4	-1.873 7	-1.961 6	-2.179 7
	差值	-0.430 8	-0.148 0	-0.168 0	-0.134 8	-0.425 1
L_3	A点	-4.469 2	-3.290 1	-3.129 6	-3.172 2	-4.583 7
	B点	-2.644 4	-2.049 1	-1.965 9	-2.024 9	-2.713 2
	C点	-1.536 4	-1.267 7	-1.263 2	-1.139 3	-1.182 7
	差值	-2.932 8	-2.022 4	-1.866 3	-2.032 9	-3.401 1

其中:差值=A点的最大挠度-C点的最大挠度。

表5 汽车荷载分别沿 L_1 、 L_2 、 L_3 驶过桥梁时,各跨中截面的A点、B点、C点动挠度的IM列表

路线	测点	第1跨	第2跨	第3跨	第4跨	第5跨
L_1	A点	0.684 7	0.235 9	0.318 0	0.501 3	0.556 9
	B点	0.103 5	0.035 2	0.080 9	0.076 8	0.085 6
	C点	0.130 1	0.079 9	0.111 3	0.095 7	0.086 5
L_2	A点	0.056 2	0.060 8	0.031 3	0.056 2	0.028 6
	B点	0.057 2	0.054 4	0.031 8	0.063 6	0.019 5
	C点	0.042 9	0.054 6	0.022 9	0.056 8	0.013 3
L_3	A点	0.108 0	0.082 1	0.047 4	0.041 9	0.130 8
	B点	0.085 2	0.082 1	0.022 4	0.049 2	0.111 1
	C点	0.619 6	0.385 1	0.324 7	0.250 0	0.259 1

10^{-4} m;车辆荷载沿 L_3 (外偏载)移动时,外侧A点的最大挠度比轴线B点和内侧C点的最大挠度大,最大差值为 3.4011×10^{-4} m。说明曲线桥在移动车辆荷载作用下均有扭转变形,偏载时扭转更明显。但是,偏载对轴线B点的动挠度的影响较小,最大差值仅为 -0.3633×10^{-4} m,而偏载对外侧A点和内侧C点的影响较大,最大差出现在第5跨的外侧A点,差值为 -2.9681×10^{-4} m。

车辆荷载沿轴线 L_2 移动时,桥梁各跨跨中截面的挠度动力冲击系数,均远小于规范规定的冲击系数0.27,而偏载时,均有大于0.27的动力冲击系数。车辆荷载沿 L_1 (内偏载)移动时,较大的动力冲击系数出现在外侧A点,除第2跨外,其余各跨均大于0.27,最大值为0.684 7;车辆荷载沿 L_3 (外偏载)移动时,较大的动力冲击系数出现在内侧C点,除第4、5跨外,其余各跨均大于0.27,最大值为0.619 6。可见,偏载时对桥梁动挠度的影响较大,内偏载时对外侧点的动力冲击系数较大,而外偏载时内侧点的

动力冲击系数较大,与文献[12]所得结论相同。

2.2 车速的影响

将 APDL 命令流中的车速分别修改为:20 km/h、 $v=40$ km/h、 $v=60$ km/h(设计时速)、 $v=80$ km/h,汽车荷载分别沿不同的路线(轴线 L_1 、外偏载 L_2 、内偏载 L_3 ,见图 4 所示)驶过桥梁时,计算各跨跨中截面 A 点、B 点、C 点的挠度,及动力冲击系数。由于篇幅有限,这里只给出了车辆荷载分别在 L_1 、 L_2 、 L_3 上以不同车速移动时,引起的第 3 跨跨中最大挠度和动力冲击系数列表,见表 6 和表 7。

表 6 汽车荷载分别以不同车速沿 L_1 、 L_2 、 L_3 驶过桥梁时,第 3 跨跨中截面的 A 点、B 点、C 点的最大动挠度列表
(单位: $\times 10^{-3}$ m)

路线	测点	20 / (km·h ⁻¹)	40 / (km·h ⁻¹)	60 / (km·h ⁻¹)	80 / (km·h ⁻¹)	差值
L_1	A 点	-0.113 0	-0.128 0	-0.131 0	-0.136 7	-0.023 7
	B 点	-0.184 9	-0.190 8	-0.196 5	-0.206 9	-0.022 0
	C 点	-0.289 1	-0.295 6	-0.304 3	-0.331 3	-0.042 2
L_2	A 点	-0.199 6	-0.204 4	-0.204 2	-0.206 9	-0.007 3
	B 点	-0.183 0	-0.188 5	-0.187 5	-0.190 2	-0.007 2
	C 点	-0.183 5	-0.189 6	-0.187 4	-0.190 9	-0.007 4
L_3	A 点	-0.310 8	-0.321 8	-0.313 0	-0.325 9	-0.015 1
	B 点	-0.192 7	-0.198 4	-0.196 6	-0.212 9	-0.020 2
	C 点	-0.111 3	-0.120 3	-0.126 3	-0.126 5	-0.015 2

其中:差值=车速为 80 km/h 时的最大挠度-车速为 20 km/h 时的最大挠度

表 7 汽车荷载分别以不同车速沿 L_1 、 L_2 、 L_3 驶过桥梁时,第 3 跨跨中截面的 A 点、B 点、C 点的 IM 列表
(单位: $\times 10^{-3}$ m)

路线	测点	20 / (km·h ⁻¹)	40 / (km·h ⁻¹)	60 / (km·h ⁻¹)	80 / (km·h ⁻¹)	差值
L_1	A 点	0.136 9	0.287 7	0.318 0	0.375 5	0.238 6
	B 点	0.017 4	0.049 5	0.080 9	0.138 4	0.121 0
	C 点	0.055 8	0.079 5	0.111 3	0.209 8	0.154 0
L_2	A 点	0.008 0	0.032 5	0.031 3	0.044 9	0.036 9
	B 点	0.006 9	0.036 9	0.031 8	0.046 5	0.039 6
	C 点	0.001 6	0.034 8	0.022 9	0.042 2	0.040 6
L_3	A 点	0.040 2	0.076 9	0.047 4	0.090 7	0.050 5
	B 点	0.002 1	0.031 6	0.022 4	0.107 0	0.104 9
	C 点	0.166 9	0.262 0	0.324 7	0.326 7	0.159 8

其中:差值=车速为 80 km/h 时的 IM-车速为 20 km/h 时的 IM

由表 6 和表 7 可见,随着车速的增加,第 3 跨跨中截面的 A 点、B 点和 C 点的最大挠度和动力冲击系数均有所增加。当车辆沿 L_2 (轴线)移动时,车速为 80 km/h 时 A 点、B 点和 C 点的最大挠度与车速为 20 km/h 时 A 点、B 点和 C 点的最大挠度之差较小,且均约为 $-0.007 3 \times 10^{-3}$ m,IM 的差值也都约为

0.04。当车辆沿 L_1 (内偏载)移动时,第 3 跨跨中截面的 C 点的最大动挠度之差最大为 $-0.042 2 \times 10^{-3}$ m,而 A 点和 B 点的最大动挠度之差分别为 $-0.023 7 \times 10^{-3}$ m 和 $-0.022 0 \times 10^{-3}$ m,均比车辆轴线移动时的差值大;A 点、B 点和 C 点的 IM 差值分别为 0.238 6、0.121 0、0.154 0,可见内偏载时车速对第 3 跨跨中截面的动力冲击系数影响较大,且对外侧 A 点的 IM 影响最大。当车辆沿 L_3 (外偏载)移动时,第 3 跨跨中截面的 A 点、B 点和 C 点的最大动挠度之差比较接近,最大为 $-0.020 2 \times 10^{-3}$ m,最小为 $-0.015 1 \times 10^{-3}$ m,均比车辆沿轴线移动时的差值大;A 点、B 点和 C 点的 IM 差值分别为 0.050 5、0.104 9、0.159 8,且对内侧 C 点的 IM 影响最大。

2.3 离心力的影响

《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)^[15]中规定,曲线桥离心力为车辆荷载(不计冲击力)乘以离心力系数 C 计算,其中离心力系数的计算公式为:

$$C = \frac{v^2}{127R} \quad (2)$$

式中: v 为设计速度,km/h,应按桥梁所在路线设计速度采用; R 为曲线半径,m。

该算例中 $v=60$ km/h,汽车荷载沿轴线 L_1 移动时 $R=160$ m, $C=0.177$;汽车荷载沿外偏载 L_2 移动时 $R=160+2.087 5=162.087 5$ m, $C=0.175$;汽车荷载沿轴线 L_3 移动时 $R=160-2.087 5=157.912 5$ m, $C=0.180$ 。

汽车荷载分别沿不同的路线(轴线 L_1 、外偏载 L_2 、内偏载 L_3 ,如图 4 所示)驶过桥梁时,分别计算考虑离心力和不考虑离心力时曲线桥各跨跨中截面 A 点、B 点、C 点的挠度。图 11~图 12 为离心力对第 3 跨跨中截面的 A 点、B 点、C 点的挠度的影响情况。

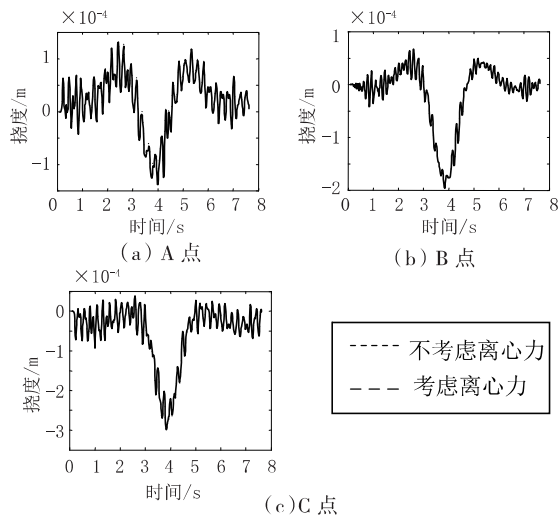


图 11 汽车荷载沿 L_1 驶过桥梁时,离心力对第 3 跨跨中截面的 A 点、B 点、C 点挠度的影响情况

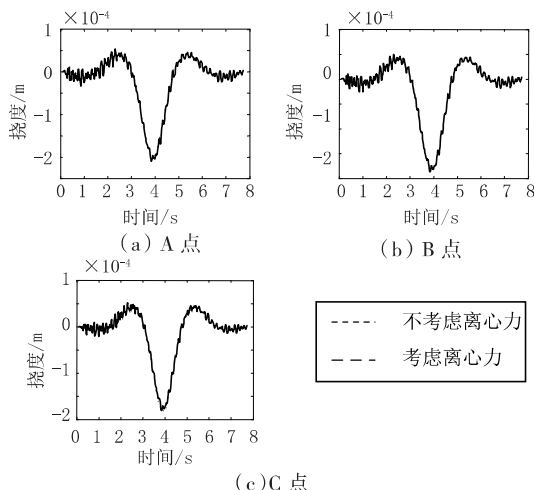


图 12 汽车荷载沿 L_2 驶过桥梁时,离心力对第 3 跨跨中截面的 A 点、B 点、C 点挠度的影响情况

表 6 为考虑离心力与不考虑离心力时各跨跨中最大挠度偏差列表。偏差的计算公式:

$$\text{偏差} = \frac{u_{zlx} - u_z}{u_{zlx}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: u_{zlx} 为考虑离心力时的最大挠度, mm; u_z 为不考虑离心力时的最大挠度, mm。

由图 11~图 12、表 6 可知,考虑离心力时,跨中横截面中的 A 点和 B 点的最大挠度均比不考虑离心力时偏大,最大偏差为 9.518 2%, B 点的偏差均小于 1%, C 点的最大挠度均比不考虑离心力时偏小,最大偏差为 -12.320 6%。内偏载和轴线移动(汽车荷载沿 L_1 、 L_2 移动)时, A 点的偏差均大于 5%, 外偏载(汽车荷载沿 L_3 移动)时, C 点的负偏差最大, 均大于 -5%, A 点的偏差均小于 5%。

3 结论

本文采用有限元法,完全由 APDL 建立了车-曲线桥耦合系统动力分析的模型,并与已有文献对比验证了该方法的正确性。以一座 5 跨连续曲线梁桥为例,采用 APDL 车-曲线桥计算模型,计算了该桥在四分之一车辆荷载作用下的动挠度响应,及偏载、车速、离心力对动挠度和动力冲击系数 IM 的影响情况,结论如下:

(1)偏载对连续曲线桥各跨跨中截面的动挠度及 IM 均有较大影响;

(2)随着车速的增大,连续曲线桥跨中截面的最大挠度和动力冲击系数 IM 均有增大的趋势。偏载时比车辆沿轴线移动时影响更大,内偏载时车速对外

侧的动力冲击系数影响较大,外偏载时车速对内侧的动力冲击系数影响较大。汽车经过曲线桥时,尽量沿桥梁的轴线行驶;

(3)离心力对跨中截面轴线处的挠度影响不大,但是对于跨中截面内外侧的 A 点和 C 点的挠度均有相对较大的影响,挠度偏差大于 5%,因此,分析曲线桥的动力响应时,须要考虑离心力的影响。

本文提出的基于 APDL 的车-曲线桥动力仿真分析方法,可以有效提高工程师分析车-桥耦合振动问题的工作效率,也可以作为进一步研究多轴多车-曲线桥耦合系统动力分析、曲线桥损伤识别、确定曲线桥动力冲击系数限值等的重要参考方法。

参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2015.
- [2] C.P. Tan, S. Shore. Dynamic Response of a Horizontally Curved Bridge[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1968, 94:761-781.
- [3] J. F. Wilson, Y. Wang, I. Threlfall. Responses of Near-optimal, Continuous Horizontally Curved Beams to Transit Loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 222(4): 565-578.
- [4] Y.B. Yang, C.M. Wu, J.D. Yau. Dynamic Response of a Horizontally Curved Beam Subjected to Vertical and Horizontal Moving Loads[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 242(3):519-537.
- [5] T. Iwase, K.I. Hirashima. Dynamic Responses of Multi-span Curved Beams with Non-uniform Section Subjected to Moving Loads [J]. Trans JSME, 2003, 69(12): 1723-1730.
- [6] J.S. Wu, L.K. Chiang. Out-of-plane Responses of a Circular Curved Timoshenko Beam due to a Moving Load [J]. International Journal of Solids and Structures, 2003(40): 7425-7448.
- [7] K. Nazzal. An Investigation of Vibration of Horizontally Curved Bridge in Highway Feeder Ramps [D]. A Dissertation for Doctor of Philosophy in Civil Engineering, 2004.
- [8] Y.M. Wang. The Transient Dynamics of Multiple Accelerating/Decelerating Masses Traveling on an Initially Curved Beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(1-2): 207-228.
- [9] Qing Zeng, Y.B. Yang, Elias G. Dimitrakopoulos. Dynamic response of high speed vehicles and sustaining curved bridges under conditions of resonance[J]. Engineering Structures, 2016, 114: 61-74.
- [10] 单德山,李乔.移动荷载作用下简支曲线梁的振动响应[J].铁道学报,2001,23(3):99-104.
- [11] 王元丰, J. F. Wilson.多跨连续曲线梁在移动荷载下的动力响应[J].土木工程学报,1999,32(4):33-36.
- [12] 李忠献,陈锋.曲线箱梁桥的车桥相互作用分析[J].工程力学,2007,24(11):93-99.
- [13] 王新敏.ANSYS 结构动力分析与应用[M].人民交通出版社,2014.
- [14] 邓露,何维,王芳.不同截面类型简支梁桥动力冲击系数研究[J].振动与冲击,2015,34(14):70-75.
- [15] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].