

文章编号:1671-6833(2011)05-0091-05

多车辆一大跨连续梁桥耦合振动响应分析

蒋培文, 贺拴海, 宋一凡, 王凌波, 周勇军

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为研究公路桥梁在各种复杂车辆行驶工况下的车桥耦合振动响应,提出基于 ANSYS 单一环境下的车桥耦合振动响应数值分析方法,该方法将桥梁与车辆模型均独立建立于 ANSYS 环境下,其耦合作用关系通过 APDL 编程语言计算并将其在任意时刻施加于车辆及桥梁结构,最终得到振动的时程响应.通过参考文献验证该方法正确,并对一座大跨连续梁桥在 2~8 辆车以各种常见车速行驶等工况下的车桥耦合振动响应进行了分析计算,总结了挠度、弯矩冲击系数的变化规律.

关键词:桥梁工程;车桥耦合振动;冲击系数;多车辆;大跨连续梁

中图分类号: U441 **文献标志码:** A

0 引言

近年来,车桥的耦合振动研究已经成为热点, Kawatani 等^[1]采用 3 轴汽车模型研究了简支梁的非平稳随机振动; Marchesiello 等^[2]采用 3 轴汽车模型研究了多跨连续板桥的动力反应;王元丰等^[3]将车与桥相互作用作为整体建立体系振动微分方程组,应用数值分析方法求解了公路简支梁、连续梁桥动力响应;沈火明^[4-5]应用达朗伯原理建立简支梁桥车桥耦合振动分析模型,数值分析求解微分方程组;彭献^[6]运用 Newmark 逐步积分法解得匀变速移动质量与简支梁耦合系统的响应;丁南宏^[7]采用单个移动质量-弹簧-阻尼模型模拟车辆,应用达朗贝尔原理和位移协调条件,推导出车桥耦合振动的运动方程;王凌波等^[8]利用车桥耦合振动原理结合车桥相关参数,提出一种简捷实用的桥梁刚度健康状态快速检测方法.

目前绝大多数对公路桥梁车桥耦合振动响应研究还仅限于单一车辆,并未考虑多车辆过桥的耦合振动响应,笔者将对该方面进行较为详细的研究.

1 车桥耦合振动分析方法

1.1 基于 ANSYS 的数值分析方法^[9-10]

1.1.1 桥梁和车辆模型的建立

笔者将车辆模型与桥梁模型建立在同一个 ANSYS 工作环境下,各自独立,两者间耦合作用关系通过 APDL 编程语言计算并将其在任意时刻施加于车辆及桥梁结构.在 ANSYS 环境下,利用 MASS21、COMBIN14、BEAM4 等单元对平面双轴车辆模型进行建模分析,见图 1.

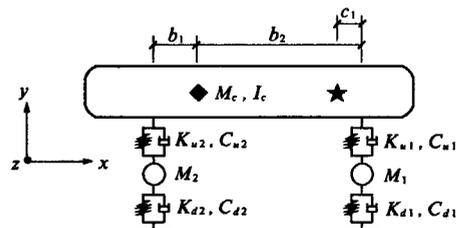


图 1 1/2 平面双轴车辆模型

Fig. 1 1/2 vehicle modal

图 1 中 M_c 为车体质量; I_c 为车体质心绕 z 轴转动惯矩; M_i 、 K_{di} 和 C_{di} 分别为第 i 个轮子的车辆质量参数、弹簧阻尼器的刚度及弹簧阻尼器的阻尼; b_1 、 b_2 分别为质心至车辆后轴、前轴的距离; c_1 为车辆驾驶员处距前轴距离.

当 N 辆车以不同行驶参数作用于桥梁时,可在 ANSYS 环境下建立 N 个相互独立的车辆模型,以进行多车辆过桥时的耦合振动分析.

1.1.2 确定车辆各轮在任意时刻的坐标

桥面上车辆的行驶状态通常为匀速或匀变速状态,笔者采用车辆行驶起始节点 $P(P_x, P_y, P_z)$

收稿日期:2011-05-20;修订日期:2011-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008028);交通部西部交通建设科技资助项目(200831881232)

作者简介:蒋培文(1984-),男,陕西西安人,长安大学博士生,主要从事车桥耦合振动响应方面的研究, E-mail: 50423514@qq.com.

与车辆行驶结束节点 $Q(Q_x, Q_y, Q_z)$ 来定义车辆的行驶方向,结合车辆的初始速度 v_0 、车辆的加速度 α 、车辆的行驶时间 t ,即可确定车辆模型中各轮位置坐标:

$$\begin{cases} c_{1x} = P_x + zjl(Q_x - P_x)/l_c \\ c_{1y} = P_y + zjl(Q_y - P_y)/l_c \\ c_{1z} = P_z + zjl(Q_z - P_z)/l_c \\ c_{2x} = P_{1x} - (b_1 + b_2)(Q_x - P_x)/l_c \\ c_{2y} = P_{1y} - (b_1 + b_2)(Q_y - P_y)/l_c \\ c_{2z} = P_{1z} - (b_1 + b_2)(Q_z - P_z)/l_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_c 为车辆行驶起点与终点的距离; $l_c = \sqrt{(P_x - Q_x)^2 + (P_y - Q_y)^2 + (P_z - Q_z)^2}$; $zjl = v_0 t + \alpha t^2/2$ 或 $zjl = -v_0^2/(2\alpha)$, 仅当 $\alpha < 0$ 且 $t\alpha < -v_0$ 时; c_{ij} 中 i 代表车轮编号, j 代表坐标方向; 其余参数含义见车辆模型示意图。

1.1.3 竖向荷载与挠度的转换

任意 t 时刻的车辆各轮坐标确定后,由于该坐标点未必处于桥梁节点处,故需进行车轮位置处与桥梁节点处竖向荷载与挠度的转换。

(1) 车轮位置处的等效荷载转换如图 2 所示,梁单元等效荷载转换可通过式(2)所示梁单元的荷载等效原理^[10]进行计算,转换结果见式(3)。

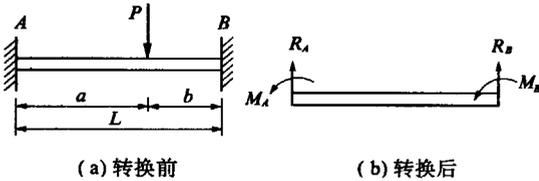


图 2 梁单元的等效荷载转换示意
Fig.2 Equivalent load of beam element

$$W^e = \int \bar{p}(x) \cdot v(x) dx = \left[\int \bar{p}(x) \cdot N(x) dx \right] \cdot q^e \\ = [R^A \quad M_A \quad R_B \quad M_B] \cdot q^e \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_A = -(Pb^2/L^3)/(3a + b) \\ R_B = -(Pa^2/L^3)/(a + 3b) \\ M_A = -Pab^2/L^2 \\ M_B = Pa^2b/L^2 \end{cases} \quad (3)$$

(2) 车轮位置处的竖向位移转换如图 3 所示. 纯弯梁单元的位移场(竖向挠度)根据文献[11]推导结果如下:

$$\begin{cases} v(x) = (1 - 3\xi^2 + 2\xi^3)v_1 + L(\xi - 2\xi^2 + \xi^3)\theta_1 \\ \quad + (3\xi^2 - 2\xi^3)v_2 + L(\xi^3 - \xi^2)\theta_2 \\ \xi = x/L \end{cases} \quad (4)$$

式中: $v_1, \theta_1, v_2, \theta_2$ 分别为梁单元两端节点的竖向位移与转角度,为截面位置系数。

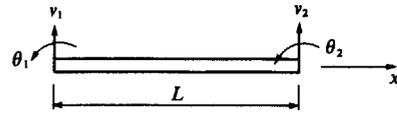


图 3 梁单元位移转化示意
Fig.3 Displacement transformation of the beam element

此外,扭矩的荷载及转角同样可根据线性插值函数计算^[10],不再赘述。

1.1.4 车桥耦合相互作用的数值计算方法

平面双轴车辆模型包含 4 个独立的自由度,分别为轮对处竖向位移 z_1, z_2 及支承车体点的竖向位移 z'_1, z'_2 . 根据力的平衡原理,推得车辆的振动方程:

$$[M_v] \ddot{\{Z_v\}} + [C_v] \dot{\{Z_v\}} + [K_v] \{Z_v\} = \{G_v\} + \{F_{bv}\} \quad (5)$$

其中,

$$[M_v] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_c \beta_2^2 + I_c/l_u^2 & M_c \beta_1 \beta_2 - I_c/l_u^2 \\ 0 & 0 & M_c \beta_1 \beta_2 - I_c/l_u^2 & M_c \beta_1^2 + I_c/l_u^2 \end{bmatrix};$$

$$[K_v] = \begin{bmatrix} k_{u1} + k_{d1} & 0 & -k_{u1} & 0 \\ 0 & k_{u2} + k_{d2} & 0 & -k_{u2} \\ -k_{u1} & 0 & k_{u1} & 0 \\ 0 & -k_{u2} & 0 & k_{u2} \end{bmatrix};$$

$$[C_v] = \begin{bmatrix} c_{u1} + c_{d1} & 0 & -c_{u1} & 0 \\ 0 & c_{u2} + c_{d2} & 0 & -c_{u2} \\ -c_{u1} & 0 & c_{u1} & 0 \\ 0 & -c_{u2} & 0 & c_{u2} \end{bmatrix};$$

$$\{G_v\} = \{m_1 g, m_2 g, M_c g \beta_2, M_c g \beta_1\}^T;$$

$$\{F_{bv}\} = \{k_{d1} \dot{\gamma}_1 + c_{d1} \dot{\gamma}_1, k_{d2} \dot{\gamma}_2 + c_{d2} \dot{\gamma}_2, 0, 0\}^T;$$

$$l_u = b_1 + b_2, \beta_1 = b_2/(b_1 + b_2);$$

$$\beta_2 = b_1/(b_1 + b_2).$$

可以看出, $[M_v], [C_v], [K_v], \{G_v\}$ 均为常量,只与车辆的初始参数有关,仅有 $\{F_{bv}\}$ 随时间及车辆位置变化. 笔者将 $\{F_{bv}\}$ 通过 APDL 语言在车辆行驶过程中实时计算,将 $\{G_v\} + \{F_{bv}\}$ 施加于车辆模型中各自由度所在节点进行时程分析. 假定车轮下部与桥面在任意时刻紧密接触,通过式(6)可求解车辆在任意时刻与桥梁间的接触力 $F(t)$,从而计算车辆过桥的时程响应。

$$F(t) = (D_c(t) - (D_q(t) + W)) \cdot K + (v_c(t) - v_q(t)) \cdot C \quad (6)$$

式中: $D_c(t)$ 、 $v_c(t)$ 为 t 时刻车轮节点的竖向位移速度; $D_q(t)$ 、 $v_q(t)$ 为 t 时刻车轮正下方对应桥梁节点的竖向位移和速度; W 为车轮所在处的路面不平度数据; K 为车轮与桥梁连接弹簧的刚度; C 为车轮与桥梁连接弹簧的阻尼。

其中节点速度 $v_c(t)$ 、 $v_q(t)$ 可通过数值微分相关理论进行计算^[9]。

1.2 匀速通过简支梁时的车桥耦合振动分析

车辆和简支梁的技术参数按照文献[5]取值。按照本文方法建模计算,计算结果如图4所示。将结果与参考文献[5]中的插图对比可以发现:结果吻合很好,验证了模块的正确性。

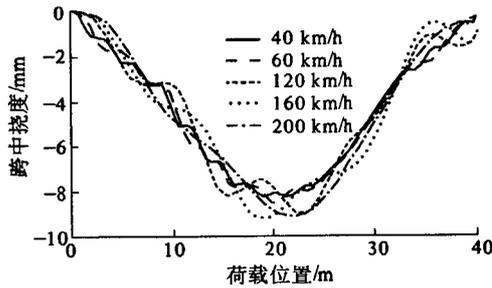


图4 本文方法分析结果

Fig.4 The results of the analysis method

2 多车辆—大跨连续梁耦合振动响应分析

2.1 桥梁模型

以一座较典型的变截面大跨连续梁桥为例,研究多车辆共同行驶时的车桥耦合振动响应,该

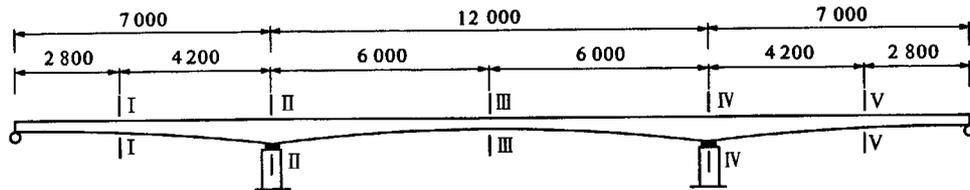


图5 连续梁控制截面示意(单位:cm)

Fig.5 Control section of continuous beam

表1 桥梁参数

Tab.1 Bridge parameters

桥梁结构类型	跨径组合/m	混凝土标号	截面面积/m ²	截面抗弯惯距/m ⁴	截面抗扭惯距/m ⁴
变截面连续梁	70 + 120 + 70	C50	8.96(跨中处)	12.55(跨中处)	25.68(跨中处)
			23.76(支点处)	151.06(支点处)	194.68(支点处)

表2 车辆模型计算参数

Tab.2 Analysis parameters of vehicle model

车辆模型	构架轮对质量/kg	一系垂向刚度 K_1 /(N·m ⁻¹)	一系垂向阻尼 C_1 /(kg·s ⁻¹)	二系垂向刚度 K_2 /(N·m ⁻¹)	二系垂向阻尼 C_2 /(kg·s ⁻¹)	距质心距离/m	车体质量 M /kg	车体点头刚度 I_a /(kg·m ²)	
1/2 车辆模型	前轴	800	2.28×10^6	98 000	1.53×10^6	196 000	2.65	18 400	1.47×10^6
	后轴	800	2.28×10^6	98 000	1.53×10^6	196 000	1.35		

桥挠度控制截面(I、III、V)与弯矩控制截面(I~V)如图5所示。该桥梁参数见表1所示。

2.2 计算工况

研究表明,车桥耦合振动影响因素主要有^[11]:车辆行驶方式、车辆行驶速度、车辆模型、桥面的平整度等。将各因素进行全排列,得到所有工况。

(1) 车辆行驶方式:各车辆间隔1.8 s依次上桥,同向行驶,车辆数分别为2,4,6,8辆。

(2) 车辆行驶速度:60,80,100,120 km/h。

(3) 车辆模型分2种:①1/2车辆模型,车辆参数见表2所示;②集中力车辆简化模型,前轴66.15 kN,后轴129.85 kN,不考虑车辆对桥梁作用力的变化。

(4) 路面平整度:①完全平整,②B级路面。

2.3 车桥耦合振动响应分析结果

运用笔者方法对以上所有工况进行车桥耦合振动分析,得到各控制截面的挠度、弯矩时程响应曲线,进而推算各控制截面的挠度、弯矩冲击系数如下式,计算结果如表3所示。

$$1 + \mu = y_{dmax} \cdot y_{jmax}^{-1}$$

式中: μ 为冲击系数; y_{dmax} 、 y_{jmax} 为在效应时间历程曲线上最大静力处量取的最大动、静效应值。

为了表示方便:挠度冲击系数“ $\mu_{D1}/\mu_{D2}/\mu_{D3}$ ”依次表示3个挠度控制截面冲击系数,单位 10^{-2} ;弯矩冲击系数“ $\mu_{M1}/\mu_{M2}/\mu_{M3}/\mu_{M4}/\mu_{M5}$ ”依次表示5个弯矩控制截面的冲击系数,单位 10^{-2} 。

表3 各行驶工况下的桥梁控制截面挠度、弯矩冲击系数计算结果
Tab.3 Impact coefficient of deflection and moment for all driving conditions

车辆模型	行驶车辆数	类别	车辆行驶速度			
			60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
$\frac{1}{2}$ 车辆模型 (平整路面)	2	挠度冲击系数	4/2/1	9/4/7	10/10/7	15/17/27
		弯矩冲击系数	2/4/-1/4/3	2/5/-2/5/-1	3/9/3/3/3	12/11/1/10/20
	4	挠度冲击系数	4/0/4	9/2/9	10/5/15	15/9/25
		弯矩冲击系数	2/2/1/2/-2	2/2/0/1/0	3/4/-1/3/10	12/4/5/5/21
	6	挠度冲击系数	4/2/2	9/3/8	10/14/4	15/8/27
		弯矩冲击系数	2/2/2/1/0	2/2/1/2/-1	3/4/-1/8/3	12/4/5/4/22
	8	挠度冲击系数	4/1/4	9/3/9	10/5/13	15/8/27
		弯矩冲击系数	2/2/2/2/-2	2/2/2/2/0	3/4/-1/4/10	12/4/5/4/22
$\frac{1}{2}$ 车辆模型 (B级路面)	2	挠度冲击系数	4/3/8	15/13/19	8/17/14	10/16/30
		弯矩冲击系数	3/14/3/18/12	1/13/1/14/10	-1/14/-1/16/3	8/17/5/18/23
	4	挠度冲击系数	4/3/11	15/8/10	8/11/20	10/12/40
		弯矩冲击系数	3/14/4/21/8	1/11/-2/9/1	-1/13/0/14/14	8/20/21/23/31
	6	挠度冲击系数	4/5/16	15/10/15	8/18/19	10/12/39
		弯矩冲击系数	3/14/6/17/13	1/8/1/5/7	-1/13/-1/15/10	8/20/24/31/32
	8	挠度冲击系数	4/4/13	15/8/11	8/12/20	10/12/39
		弯矩冲击系数	3/14/9/17/10	1/8/-1/3/4	-1/13/0/10/16	8/20/25/32/32
集中力车 辆模型	2	挠度冲击系数	4/3/3	9/5/9	10/11/6	15/19/30
		弯矩冲击系数	2/4/-1/5/3	1/6/-2/5/0	3/10/3/4/0	11/12/2/12/22
	4	挠度冲击系数	4/1/3	9/3/10	10/5/16	15/11/30
		弯矩冲击系数	3/2/1/3/0	1/3/-1/2/0	3/5/-1/4/11	11/5/6/8/25
	6	挠度冲击系数	4/3/4	9/4/9	10/18/7	15/11/30
		弯矩冲击系数	3/3/4/3/2	1/2/1/3/1	3/5/-1/11/-1	11/5/6/10/24
	8	挠度冲击系数	4/1/2	9/4/10	10/7/18	15/13/40
		弯矩冲击系数	3/3/3/2/1	1/2/0/4/2	3/5/3/10/14	11/5/7/12/33

2.4 结果分析

(1) 同时作用于桥面的车辆数量对连续梁各个截面冲击系数有着明显的影响,且单孔跨度越大时,该影响越明显.桥梁各控制截面的挠度、弯矩冲击系数随着桥面车辆数量的增加,变化规律不明显,但总体看来,平整路面时,较少的车辆容易对各个控制截面产生较大的挠度、弯矩冲击系数;当路面平整度状况较差时,则反之.

(2) 随着车辆行驶速度的提高,控制截面的挠度、弯矩冲击系数并不单调增加,但根据计算结果,高速行驶工况下产生高冲击系数的概率较大,对桥梁的安全性较为不利.

(3) 路面不平整度对控制截面的挠度、弯矩冲击系数影响很大,随着路面不平整度的提升,控制截面的挠度、弯矩冲击系数呈非线性趋势上升.

(4) 桥梁简化动力计算中通常采用的集中力模型的计算结果中,控制截面的挠度、弯矩冲击系数与平整路面下 $\frac{1}{2}$ 车辆模型计算结果相比略大;与 B 级路面下 $\frac{1}{2}$ 车辆模型计算结果相比略小.由此可见,由于集中力模型无法考虑路面不平

整度对桥梁振动响应的影响,故当桥面平整度状况较好(完全平整或 A 级)时,可偏保守的按照简化集中力模型计算;但当桥面平整度状况较差(B 级或低于 B 级时),将车辆简化为集中力模型进行计算则对安全性不利,此时宜采用 $\frac{1}{2}$ 车辆模型对全桥进行车桥耦合动力分析.

3 结论

针对公路桥梁在多车辆行驶、匀变速行驶等复杂工况下的车桥耦合振动响应问题,笔者基于大型有限元软件 ANSYS 单一平台,将车辆与桥梁分别建模,其耦合关系利用 APDL 语言及其强大的结构动力分析模块进行求解.该方法可适用于各种结构体系公路桥梁的车桥耦合振动问题,无需借助 MATLAB 软件或自编程序即可计算任意截面挠度、弯矩、速度、加速度等参数的时程响应曲线及相应的冲击系数.运用笔者方法对 $\frac{1}{2}$ 车辆模型匀速通过简支梁工况进行了分析求解,与参考文献的结果对比表明,笔者方法可行并具有良好的精度.

利用笔者方法,对多车辆同时作用于大跨径连续梁时的车桥耦合振动响应进行了详细的分析,计算中考虑不同行驶工况、不同车辆模型、不同行驶速度、不同路面平整度等级等参数,得到所有工况控制截面的时程响应曲线并计算冲击系数。结果表明:单孔跨度越大时,多车辆耦合振动效应越明显;高速行驶工况下产生高冲击系数的概率较大;路面平整度等级下降会使冲击系数非线性增加;当桥面平整度状况较好时,可偏保守的按照集中力车辆模型计算,否则不宜采用。

参考文献:

- [1] KAWATANI M, KOBAYASHI Y, TAKAMORI K. Non-stationary random analysis with coupling vibration of bending and torsion of simple girder-bridge under moving vehicle [J]. *Structural Engineering Earthquake Engineering JSCE*, 1998, 15(1): 107 - 114.
- [2] MARCHESIELLO S, FASANA A, GARIBALDI L, et al. Dynamic of multi-span continuous straight bridges subject to multi-degrees of freedom moving vehicle excitation [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 224(3): 541 - 561.
- [3] 王元丰,许士杰. 桥梁在车辆作用下空间动力响应的研究[J]. *中国公路学报*, 2000, 13(4): 38 - 41.
- [4] 肖新标,沈火明. 移动荷载作用下桥梁的系统仿真[J]. *振动与冲击*, 2005, 24(1): 121 - 123.
- [5] 沈火明,肖新标. 求解车桥耦合振动问题的一种数值方法[J]. *西南交通大学学报*, 2003, 38(6): 658 - 662.
- [6] 彭献,殷新锋,方志. 变速车辆与桥梁的耦合振动及其 TMD 控制 [J]. *湖南大学学报:自然科学版*, 2006, 26(5): 19 - 21.
- [7] 丁南宏,林丽霞,钱永久,等. 双链式悬索桥车桥耦合振动研究[J]. *兰州交通大学学报*, 2010, 29(1): 95 - 99.
- [8] 王凌波,贺拴海. 基于车桥耦合振动的桥梁检测方法研究[J]. *郑州大学学报:工学版*, 2011, 32(1), 26 - 29.
- [9] 张雄,王天舒. 计算动力学 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [10] 曾攀. 有限元分析及应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2006.
- [11] 陈榕峰. 公路桥梁车桥耦合主要影响因素仿真分析方法研究 [D]. 西安:长安大学公路学院, 2007.

Analysis of Coupled Vibration of Vehicle-Bridge when Several Vehicles Driving on Long-Span Continuous Girder Bridge

JIANG Pei-wen, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan, WANG Ling-bo, ZHOU Yong-jun

(Highway College, Chang' An University, Xi' An 710064, China)

Abstract: For discuss the respond of coupled vibration of vehicle-bridge in complex vehicle driving conditions, a vehicle-bridge coupled vibration numerical analysis method is presented based on ANSYS. the bridge and vehicle model are established in ANSYS environment separately and the coupled vibration relationship is calculated by APDL language which can be imposed on vehicles and bridge structures at any time to get the vibration schedule response. Through comparison with references, it proved that this method can be used for coupled vibration of vehicle-bridge research in several vehicles' driving conditions and provides a viable numerical algorithm for the analysis of highway bridge impact coefficient. The paper analyze the respond of vehicle-bridge coupled vibration of a long-span continuous beam with 2 to 8 vehicles driving in common speeds and summed up the laws about the changes of deflection and moment impact factor.

Key words: bridge engineering; coupled vibration of vehicle-bridge; impact coefficient; many vehicles; long-span continuous girder bridge