

文章编号:1671-1637(2013)04-0029-08

## 基于加权法的桥梁冲击系数计算方法

周勇军<sup>1</sup>, 蔡军哲<sup>1</sup>, 石雄伟<sup>2</sup>, 赵煜<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安公路研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**以公路简支梁桥为研究对象,采用四自由度的二分之一车辆模型,建立了车桥耦合振动方程,计算了不同车速下桥梁跨中截面的动挠度和应变时程曲线。对比了传统定义法、试验测试法、现行规范法的冲击系数计算值,对前2种方法进行了修正,获得了桥梁结构的最大动效应值,并根据主梁的最大活载内力计算原理,引入数值加权的概念对前2种方法进行了加权计算。分析结果表明:传统定义法和试验测试法计算的冲击系数值比《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)计算值小;由时程曲线上最大动效应处得到的冲击系数平均值约是前2种方法计算值的2倍,且其最大值比规范法计算值小37%;基于传统定义法的挠度冲击系数值大于应变冲击系数值,而试验测试法得到的挠度冲击系数值普遍小于应变冲击系数值;基于传统定义法和加权法的挠度冲击系数计算值比规范值大16%;试验测试法和加权法相结合的冲击系数计算方法考虑了移动荷载对整个桥梁冲击的历程效应,计算比较稳定。

**关键词:**桥梁工程;冲击系数;车桥耦合振动;加权法;挠度;弯矩

**中图分类号:**U441.3

**文献标志码:**A

## Computing method of bridge impact factor based on weighted method

ZHOU Yong-jun<sup>1</sup>, CAI Jun-zhe<sup>1</sup>, SHI Xiong-wei<sup>2</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Xi'an Highway Research Institute, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** A simply supported beam highway bridge was taken as an example, the half vehicle model with four-degree-of-freedom was employed to set up vehicle-bridge coupled vibration function, and the time-history curves of dynamic deflection and strain at mid-span under different vehicle velocities were calculated. The impact factors (IM) calculated by traditional definition method, experiment method and current code provisions were compared, the first two methods were revised to reflect the maximum dynamic response of bridge. According to the calculation principle of the maximum internal force for girder under moving load, the weighted method was utilized to replenish the first two methods. Analysis result shows that the IMs calculated by traditional definition and experiment methods are less than those in *General Code for Design of Highway Bridges and Culverts* (JTG D60—2004). The average value of IMs obtained at the maximum dynamic response of time-history curves doubles the first two methods, and its maximum IM is 37% less than code provision. Deflection IMs calculated by traditional definition method are greater than strain IMs, but deflection IMs calculated by experiment method are

收稿日期:2013-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51008028);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC030);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0250);陕西省交通科技项目(10-39K)

作者简介:周勇军(1978-),男,湖北孝昌人,长安大学副教授,工学博士,从事桥梁结构动力学研究。

mostly less than strain IMs. The IM calculated by traditional definition method and weighted method is 16% greater than code provision. The weighted method combining with experiment method reflects the whole impact course of bridge caused by moving load, and it is stable when calculating IM. 3 tabs, 4 figs, 17 refs.

**Key words:** bridge engineering; impact factor; vehicle-bridge coupled vibration; weighted method; deflection; bending moment

**Author resume:** ZHOU Yong-jun(1978-), male, associate professor, PhD, +86-29-82334872, zyj@chd.edu.cn.

## 0 引 言

汽车以一定的速度在桥梁上行驶时,桥梁产生的应力与变形效应比大小相等的静载引起的效应要大一些,这种由于荷载的动力作用使桥梁发生振动而造成内力或变形增大的现象称为冲击作用。在设计计算中汽车荷载的这种冲击力用冲击系数表示。公路桥梁冲击系数的影响因素很多<sup>[1]</sup>,桥梁结构形式众多,加之计算机及有限元技术的进步,故基于车桥耦合振动理论来进行冲击系数计算仍是国内外研究热点。在理论计算模型方面,蒋培文等提出基于 ANSYS 单一环境下的车桥耦合振动响应数值分析方法,并基于梁单元模型利用该算法研究了简支梁各参数对车辆过桥时的耦合振动影响<sup>[2]</sup>;韩万水等通过有限元模型修正法研制了梁格法桥梁车桥耦合振动分析模块<sup>[3]</sup>;丁勇等针对正交异型钢面板的钢桥交通振动响应问题,建立反映细部构造的板壳模型,以区别于以往的梁格模型<sup>[4]</sup>;刘永健等以某双层公路简支钢桁梁桥为研究对象,应用 ANSYS 软件建立三维梁格有限元模型,分析了车速、桥梁阻尼、桥面平整度及不同加载模式对车桥耦合振动的影响,认为在桥梁设计时应考虑局部冲击效应的影响<sup>[5]</sup>;殷新锋等将车辆模拟成弹簧和阻尼器连接的多刚体,沥青路面层模拟成 Kelvin 模型支承的无限长梁,混凝土路面和主梁一起模拟成 Euler-Bernoulli 梁,研究了车辆制动作用下的车辆-路面-桥梁耦合系统的振动特性<sup>[6]</sup>;鉴于影响车桥耦合振动的参数很多,以前学者把研究重心放在建立冲击系数与单个参数的关系上,这样工作量大, Yang 等将这些参数合并为一个量纲—参数进行冲击系数的研究,并给出了冲击系数计算公式<sup>[7]</sup>;试验方面,施尚伟等通过行车试验作用下实测动挠度时程信号,对桥梁冲击系数随机性、冲击系数与动力荷载效率之间相关性进行分析,认为冲击系数与动力荷载效率之间具有较大的相关性<sup>[8]</sup>;龙建旭等在冲击系数计

算时引入最小移动二乘法,使得拟合的效应时间历程曲线更加光滑<sup>[9]</sup>。

以上研究一般采用跨中截面最大动效应与最大静效应之比作为动力增大系数(或冲击系数)的计算公式,且认为车辆行驶于跨中处时达到其最值,事实上,跨中截面的最大冲击作用有可能在汽车行驶于其他截面处时发生<sup>[10]</sup>。虽然通过试验回归得到冲击系数是目前《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)(以下简称 04 规范)所采纳的方法,但有关试验方面的研究都没有涉及冲击系数的具体计算问题,由于采样频率设置不合理或采样前没有抗混滤波器,有些仪器的测试结果并不适合直接分析冲击系数<sup>[11]</sup>,由此导致测试及分析数据的偏差,甚至是同样的问题得到的结论可能不一致<sup>[12-13]</sup>,因此,需要对冲击系数的计算方法进行重新审视。本文以简支梁和四自由度车辆模型为研究对象,采用车桥耦合振动理论得到时程曲线,对比阐述了传统定义法、试验测试法、现行规范法在计算冲击系数时各自的特点,并提出了基于试验测试法与加权法相结合的冲击系数计算方法,以更准确、合理地反映桥梁结构在移动车辆荷载作用下的动力效应,并可考虑多种不确定性因素对桥梁结构冲击系数的影响。

## 1 目前冲击系数计算方法

### 1.1 传统定义法

对简支梁桥来说,一般用跨中截面的冲击系数来代替其他截面的冲击系数值,而传统的跨中截面冲击系数  $\mu$  定义为跨中截面处最大动态挠度(应变)和最大静态挠度(应变)之比,即

$$\mu = \frac{y'_1}{y_2} - 1 \quad (1)$$

式中: $y'_1$ 为当车辆荷载过桥时简支梁跨中截面动挠度(应变)的峰值; $y'_2$ 为同一车辆荷载静止作用于桥梁跨中截面时所对应的最大静挠度(应变)值。

实际应用时,试验车辆以准静态的速度(一般速

度小于  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 通过桥梁,得到跨中截面相应挠度测点的时程曲线,由于车辆速度低缓,这种时程曲线将是一条很平滑的曲线,读取该曲线的最大值  $y'_2$  作为最大静挠度值。然后在该车辆以某种速度通过的情况下,测定该测点的动态时程曲线,读取该曲线的最大挠度值  $y'_1$ ,则可根据式(1)得到冲击系数。

这种方法缺点是需要进行2次试验,在多梁式公路桥梁中,还要保证2种情况下车辆行驶位置的一致性。另外,由于在车辆荷载激励下公路桥梁结构响应可能有一定的滞后性,测点最大动挠度并非一定发生在车辆行驶于跨中截面时,即最大动挠度与最大静挠度并非处在同一时刻。

## 1.2 试验测试法

早期由于受到车桥耦合振动理论研究及计算手段的局限性,加之车桥耦合振动特性的复杂性和参数的不确定性,工程师在设计实践中不得不借助于试验的方法,通过经验的冲击系数来近似地考虑移动车辆荷载的动力效应,汽车荷载冲击系数  $\mu$  可根据控制截面测点在跑车试验时记录的动应变或挠度时程曲线计算,即

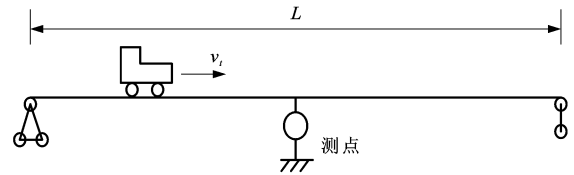
$$\begin{cases} 1 + \mu = \frac{y_3}{y_4} \\ y_4 = \frac{1}{2}(y_3 + y_5) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $y_3$  为汽车荷载作用下简支梁跨中截面测点最大动应变(动挠度)值,  $y_3 = y'_1$ ;  $y_5$  为与  $y_3$  相对应的最小动应变(动挠度)值;  $y_4$  为  $y_3$  与  $y_5$  的平均值,  $y_4 \approx y'_2$ ,即用最大动应变(动挠度)效应与相应的最小动应变(动挠度)效应代替式(1)中的静应变(挠度)值,其计算见图1。图1中,  $x$  为汽车上桥后行驶的距离;  $v_t$  为  $t$  时的速度;  $L$  为桥梁跨径。

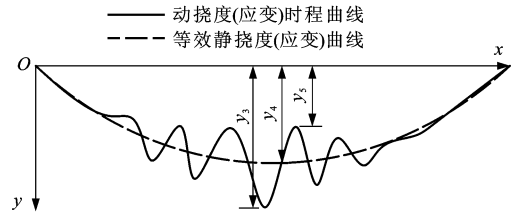
该方法由于随机性强,测试方便,不需要进行静力加载试验就能获取最大“静”效应,且其最大动挠度(弯矩)响应与“静”载效应基本上处于同一截面附近,因此,在实际桥梁测试中应用较为广泛。

## 1.3 规范算法

在基于理论分析及试验测试的基础上,发现冲击系数随跨度增大而逐渐递减,因此,一些国家制定了随跨度增大而递减的冲击系数公式,如《公路桥涵设计通用规范》(JTJ 021—89)(以下简称89规范)。此模式计算方便,但不能科学合理地反映结构动力特性本质,故随后多数国家改用基频来计算冲击系数,如《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)中明确指出冲击系数为



(a) 移动荷载及挠度(应变)测点布置



(b) 跨中挠度(应变)测点时程曲线

图1 移动荷载下简支梁跨中挠度(应变)曲线

Fig. 1 Deflection (strain) curves at mid-span of simply supported beam under moving load

$$\mu = \begin{cases} 0.05 & f < 1.5 \\ 0.176 \, 7 \ln(f) - 0.015 \, 7 & 1.5 \leq f \leq 14.0 \\ 0.45 & f > 14.0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f$  为结构基频(Hz)。

## 2 车桥耦合振动理论

随着车桥耦合振动理论的发展特别是有限元技术的进步,使得现在以有限元方式进行冲击系数的计算已经成为可能。车桥耦合分析时,车辆模型较多,车辆模型的选取应以既能体现车辆系统的振动特性又不增加计算难度为原则,二分之一车辆模型不仅能很好地考虑前后轴之间的耦合关系,真实地反映车辆的振动规律,而且系统自由度也不多,计算简便。故本文以四自由度的二分之一车辆模型为例进行车桥耦合振动分析。

### 2.1 车辆模型及振动方程推导

如图2所示,将车辆简化为两系的质量-弹簧-阻尼系统。图2中:  $M$  为车体质量;  $Z$  为车体的竖向位移;  $\alpha$  为车体绕横向轴的转角位移;  $I_a$  为车体转动惯矩(点头刚度);  $m_i$  ( $i=1,2$ ) 为车辆悬架与轮胎质量之和;  $z_i$  为前后轮对的竖向位移;  $k_{si}$  为悬挂装置的弹簧刚度;  $c_{si}$  为悬挂装置的减振阻尼系数;  $k_{ti}$  为轮胎刚度;  $c_{ti}$  为轮胎的阻尼系数;  $l_0$  为车体前后轴之间的距离;  $\beta_i$  为前后轴至车辆重心距离与车辆轴距之比;  $z'_i$  为支承车体点的竖向位移。假定  $x_i$ 、 $y(x_i, t)$  分别为桥梁与轮胎接触点的水平位移和竖向位移,  $t$  为时间,为方便起见,将  $y(x_i, t)$  简写为  $y_i$ 。

按图2坐标系定义并取各弹簧的平衡位置为起

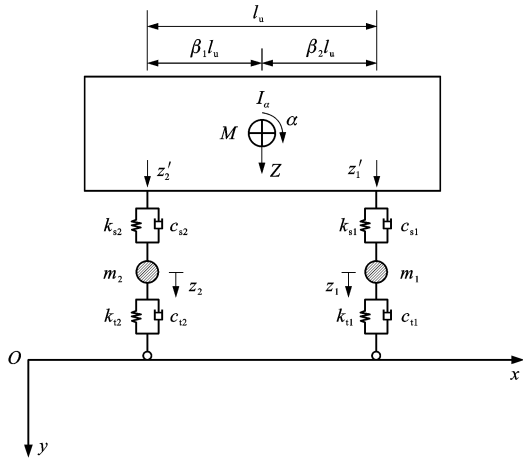


图 2 四自由度二分之一车辆分析模型

Fig. 2 Analytical model of half vehicle with four-degree-of-freedom

点,待求的车辆位移向量  $\mathbf{Z}_v$  为

$$\mathbf{Z}_v = (z_1, z_2, z'_1, z'_2)^T$$

由几何关系可得

$$\begin{cases} Z = \beta_1 z'_2 + \beta_2 z'_1 \\ \alpha = (z'_1 - z'_2)/l_u \end{cases} \quad (4)$$

车辆模型中悬挂弹簧恢复力  $F_{si}$ 、轮胎恢复力  $F_{ti}$  分别为

$$\begin{cases} F_{si} = k_{si}(z'_i - z_i) + c_{si}(\dot{z}'_i - \dot{z}_i) \\ F_{ti} = k_{ti}(z_i - y_i) + c_{ti}(\dot{z}_i - \dot{y}_i) \end{cases} \quad (5)$$

由广义虚功原理得

$$\begin{aligned} \delta W = & \sum_{i=1}^2 m_i g \delta z_i + Mg \delta Z - \sum_{i=1}^2 m_i \ddot{z}_i \delta z_i - \\ & M \ddot{Z} \delta Z - I_a \ddot{\alpha} \delta \alpha - \sum_{i=1}^2 F_{si} \delta(z'_i - z_i) - \\ & \sum_{i=1}^2 F_{ti} \delta(z_i - y_i) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $\dot{z}_i, \dot{z}'_i, \dot{y}_i$  分别为速度;  $\ddot{z}_i, \ddot{Z}$  分别为加速度;  $\ddot{\alpha}$  为角加速度;  $g$  为重力加速度;  $W$  为系统虚功;  $\delta$  为变分。满足式(6)的条件为广义虚位移对应系数项取值为 0, 将式(4)、(5)代入式(6), 并展开、移项、整理成矩阵的形式为

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{Z}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{Z}_v = \mathbf{G}_v + \mathbf{F}_{bv} \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_v = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M\beta_2^2 + I_a/l_u^2 & M\beta_1\beta_2 - I_a/l_u^2 \\ 0 & 0 & M\beta_1\beta_2 - I_a/l_u^2 & M\beta_1^2 + I_a/l_u^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_v = \begin{bmatrix} k_{s1} + k_{t1} & 0 & -k_{s1} & 0 \\ 0 & k_{s2} + k_{t2} & 0 & -k_{s2} \\ -k_{s1} & 0 & k_{s1} & 0 \\ 0 & -k_{s2} & 0 & k_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_v = \begin{bmatrix} c_{s1} + c_{t1} & 0 & -c_{s1} & 0 \\ 0 & c_{s2} + c_{t2} & 0 & -c_{s2} \\ -c_{s1} & 0 & c_{s1} & 0 \\ 0 & -c_{s2} & 0 & c_{s2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_v = (m_1 g, m_2 g, Mg\beta_2, Mg\beta_1)^T$$

$$\mathbf{F}_{bv} = (k_{t1} y_1 + c_{t1} \dot{y}_1, k_{t2} y_2 + c_{t2} \dot{y}_2, 0, 0)^T \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{M}_v, \mathbf{K}_v, \mathbf{C}_v$  分别为车辆的质量、刚度、阻尼矩阵;  $\mathbf{F}_{bv}$  为车辆的轮胎与桥面接触点处的相互作用力荷载向量;  $\mathbf{G}_v$  为重力列向量;  $\mathbf{Z}_v, \dot{\mathbf{Z}}_v, \ddot{\mathbf{Z}}_v$  分别为车辆位移、速度、加速度向量。

## 2.2 桥跨结构动力平衡方程

在研究桥梁与车辆的耦合振动时,一般将桥梁离散成空间梁单元模型,并认为:桥梁的质量、刚度和阻尼等特性沿桥跨方向不变;不计支座及桩土相互作用影响;截面形状无明显畸变。

由有限元知识可知,桥梁结构的振动方程为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{K} \mathbf{Y} = \mathbf{F} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{M}, \mathbf{K}, \mathbf{C}$  分别为桥梁的质量、刚度、阻尼矩阵;  $\mathbf{Y}, \dot{\mathbf{Y}}, \ddot{\mathbf{Y}}$  分别为桥梁节点的位移、速度、加速度向量;  $\mathbf{F}$  为作用在桥梁节点上的力列向量。

利用 ANSYS 软件的 APDL 语言编制车桥耦合振动宏模块,按照常规方法在其环境下建立桥梁模型后,将该宏作为一个命令在 ANSYS 命令行中输入,即可实现对复杂桥梁车桥耦合振动的分析求解<sup>[13]</sup>。

## 3 实例计算

### 3.1 工程概况

某简支 T 梁桥其跨径为 40 m, 横向由 5 片梁组成, 整体截面抗弯刚度为  $1.28 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ , 桥梁整体结构单位质量为  $1.20 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ; 2 轴货车的相关参数为<sup>[14-17]</sup>:  $m_1 = m_2 = 4330 \text{ kg}$ ,  $M = 24790 \text{ kg}$ ,  $l_u = 3.625 \text{ m}$ ,  $\beta_1 l_u = 1.787 \text{ m}$ ,  $\beta_2 l_u = 1.838 \text{ m}$ ,  $k_{ti} = 4.28 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $c_{ti} = 9.8 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $k_{si} = 2.54 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $c_{si} = 1.96 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $I_a = 3.258 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。分别考虑车辆运行速度  $v$  为 10、20、30、40、50、60、70、80  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 为了简化冲击系数的计算过程, 不考虑桥面的不平度。利用编制的 APDL 语言进行车桥耦合振动分析, 求得跨中截面的挠度和下缘应变时程曲线, 并将其转换为挠度或应变曲线随车辆行走位置的关系曲线, 见图 3。

### 3.2 现有冲击系数计算方法的对比分析

在挠度和应变的时程曲线基础上, 通过传统定

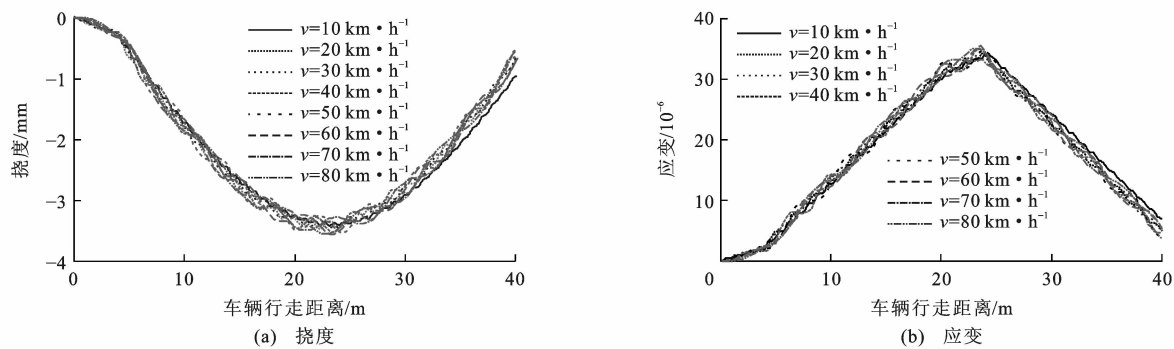


图 3 简支梁跨中挠度和应变曲线

Fig. 3 Deflection and strain curves at mid-span of simply supported beam

义法(下称方法 1)、试验测试法(下称方法 2)和现行规范法各自计算得到不同车速对应跨中截面的冲击系数,结果见表 1。表 1 中, $\mu_{f1}$  为方法 1 得到的挠度冲击系数, $\mu_{\epsilon 1}$  为方法 1 得到的应变冲击系数,以此类推。

由表 1 可知,无论是挠度还是应变冲击系数随速度的变化并非是一个单调变化,为了应用方便,一般认为冲击系数与速度无关,故将冲击系数进行平

均处理后作为最后的结果一并列入表 1 最后一列中。由此可见:方法 1 和方法 2 都是在时程曲线上近似取汽车行驶于跨中截面(最大静效应处)进行冲击系数计算,其挠度冲击系数比较接近,相差不到 10%;应变冲击系数也比较接近,相差也不到 10%,但 2 种方法得到的挠度冲击系数均小于应变的冲击系数,两者相差接近 30%;两者的挠度与应变冲击系数都比 04 规范法计算值小,与 89 规范值比较接近。

表 1 现有计算方法的冲击系数

Tab. 1 Impact factors calculated by current methods

车速/(km·h <sup>-1</sup> )		10	20	30	40	50	60	70	80	平均值
方法 1	$\mu_{f1}$	0.008	0.017	0.023	0.032	0.039	0.059	0.029	0.061	0.034
	$\mu_{\epsilon 1}$	0.001	0.028	0.059	0.081	0.005	0.087	0.019	0.075	0.044
方法 2	$\mu_{f2}$	0.011	0.027	0.012	0.029	0.033	0.047	0.024	0.065	0.031
	$\mu_{\epsilon 2}$	0.013	0.029	0.030	0.057	0.018	0.075	0.004	0.098	0.041
04 规范法 $\mu$		0.190								
89 规范法 $\mu$		0.038								

3.3 冲击系数的修正计算

由冲击系数时程曲线可知,最大动挠度(弯矩)并不一定是发生在汽车行驶于跨中截面时刻(最大静效应计算处),而可能是驶离于跨中一段距离,即最大动效应值出现了一定的“延迟”。基于这一点对冲击系数进行修正计算,主要是将式(1)、(2)中的计算时刻值截取为该时程动挠度(弯矩)曲线最大值

处,而非汽车行驶于跨中截面处,即冲击系数等于最大动挠度(应变)除以相应位置处静挠度(应变),或最大动挠度(应变)除以时程曲线相应位置处最大与最小动挠度(应变)的平均值,利用该修正方法得到的挠度(应变)冲击系数值见表 2。修正后的挠度与应变冲击系数并非随速度的增加而单调增加,同理,对冲击系数进行平均处理后一并列入表 2 中最后一列。

表 2 冲击系数修正值

Tab. 2 Corrected values of impact factors

车速/(km·h <sup>-1</sup> )	10	20	30	40	50	60	70	80	平均值
修正的 $\mu_{f1}$	0.099	0.081	0.126	0.148	0.190	0.143	0.063	0.135	0.123
修正的 $\mu_{\epsilon 1}$	0.118	0.117	0.118	0.145	0.130	0.148	0.032	0.132	0.118
修正的 $\mu_{f2}$	0.008	0.021	0.025	0.051	0.070	0.063	0.089	0.068	0.049
修正的 $\mu_{\epsilon 2}$	0.012	0.024	0.045	0.088	0.128	0.088	0.033	0.113	0.066

由表 2 可知:由时程曲线上最大动效应点处计算的冲击系数(修正值)是方法 1 和方法 2(未修正)

计算冲击系数的 2 倍左右,说明它准确地反映了移动荷载对桥梁的最大冲击作用;方法 1(修正)的挠

度冲击系数约是方法 2(修正)挠度冲击系数的 2.5 倍,两种方法得到的应变冲击系数相差也比较大,前者约是后者的 1.8 倍;由于挠度和弯矩最大值发生的时刻(或车辆行驶位置)可能不一致,故两者冲击系数计算稍有差异,其中方法 1(修正)计算的挠度冲击系数稍大于应变冲击系数,而方法 2(修正)计算的挠度冲击系数则稍小于应变的冲击系数;虽然修正后的两种方法得到的冲击系数均小于 04 规范值,其中冲击系数最大值(修正方法 1)比 04 规范值小 37%,但方法 2(修正)的冲击系数值却超过了 89 规范值。

#### 4 基于加权法的冲击系数计算方法

根据最大动荷载拟静力化的设计思想,主梁在汽车荷载下的内力为

$$S_p = \sum (1 + \mu_i) \xi m'_i P_i \eta_i \quad (10)$$

为设计方便,用跨中截面的冲击系数  $\mu$  代替其他截面的冲击系数  $\mu_i$ ,即

$$S_p = (1 + \mu) \xi \sum m'_i P_i \eta_i \quad (11)$$

式中: $S_p$  为主梁的最大活载内力; $\xi$  为汽车荷载的折减系数; $m'_i$  为荷载横向分布系数; $P_i$  为汽车的车轴重力; $\eta_i$  为主梁内力影响线竖坐标。

由式(11)可以看出,传统方法(包括修正法)仅考虑汽车行驶于跨中截面附近或行驶于某一截面(此位置处的动效应最大)的冲击系数  $\mu$ ,没有考虑汽车在其他位置处对桥梁结构的冲击作用,即截面设计时所采纳的冲击系数值  $\mu$  应该反映多个动荷载

(或者多个位置处)的综合作用( $\sum \mu_i$ )。故本文提出考虑时程曲线上所有峰值处的冲击系数(即局部冲击系数)并对其进行加权的计算方法,这样可以充分计入多个位置(甚至多辆移动荷载)的冲击效应而不是仅仅一点的冲击效应,而且可反映其他外界因素变化带来的冲击系数计算的不确定性,比原来的理论分析法较合理,其加权方式采用

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i y_{4i}}{\sum_{i=1}^n y_{4i}} \quad (12)$$

式中: $y_{4i}$  为动挠度(应变)时程曲线上  $\mu_i$  计算值处所对应的局部“静”挠度(应变); $n$  为时程曲线上出现的较有规律的峰值个数。

采用该原理计算冲击系数仍有 2 种方法,一种是基于传统定义法,一种是基于试验法。以基于试验法为例,按照该原理进行冲击系数的求解过程如下。

(1)基于车桥耦合振动分析得到所求截面的动挠度(应变)时程曲线。

(2)在时程曲线上,找到局部“波谷值” $y_{3i}$  和其相邻的“波峰值” $y_{5i}$ ,利用传统的试验测试法求解该处等效“静”挠度(应变) $y_{4i}$ ,即平均挠度(应变)值,进而得到该点处的局部冲击系数  $\mu_i$ 。

(3)由式(12)求解考虑加权值的某速度下的冲击系数值。

(4)如果考虑多种速度,则对速度取平均值后可得最终的冲击系数值。

基于加权法的冲击系数计算结果见表 3、图 4 中,由表 3、图 4 可得如下结论。

表 3 基于加权法的冲击系数

Tab. 3 Impact factors based on weighted method

车速/(km · h <sup>-1</sup> )	10	20	30	40	50	60	70	80	加权值
加权的 $\mu_{f1}$	0.206	0.256	0.160	0.315	0.294	0.236	0.157	0.135	0.220
加权的 $\mu_{\epsilon 1}$	0.072	0.080	0.067	0.105	0.059	0.148	0.055	0.132	0.090
加权的 $\mu_{f2}$	0.011	0.029	0.022	0.078	0.065	0.034	0.027	0.035	0.038
加权的 $\mu_{\epsilon 2}$	0.027	0.041	0.017	0.074	0.071	0.045	0.008	0.113	0.050

(1)按照传统定义法及加权法计算的挠度冲击系数值比方法 1 及方法 1 的修正挠度冲击系数值明显偏大,但应变冲击系数值大于方法 1 的应变冲击系数值,而小于方法 1 的修正值;此外,利用该方法计算的挠度冲击系数大部分情况下要大于应变的冲击系数;对加权后的最终值来说,挠度的冲击系数值大于方法 1 值及方法 1 的修正值,且加权后的挠度冲击系数最终值比 04 规范计算值大 16%,说明 04 规范的挠度冲击系数偏于不安全,

加权后的应变冲击系数最终值大于方法 1 的应变冲击系数值,却小于方法 1 的修正值,也小于 04 规范值。

(2)按照试验测试法及加权法计算的冲击系数与表 1、2 计算的冲击系数基本相当,说明基于试验法的冲击系数算法比较稳定;由该方法计算的挠度冲击系数值稍小于应变冲击系数;对加权后的最终值来说,该方法得到的挠度及应变冲击系数最终值均大于方法 2 值,但均稍小于方法 2 相应的修正

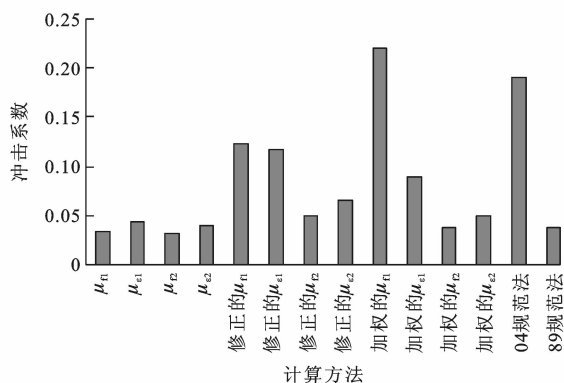


图4 冲击系数对比

Fig. 4 Comparison of impact factors

值;加权后的挠度冲击系数最终值小于应变冲击系数最终值,且两者最终值均小于04规范值。

(3)基于传统定义法的挠度冲击系数最终值大于应变冲击系数值,而基于试验测试法的挠度冲击系数最终值小于应变冲击系数值,反映了不同计算方法的差异。

(4)考虑到试验测试法计算比较稳定,推荐采用试验测试与加权相结合的方法进行冲击系数计算。

## 5 结 语

针对目前冲击系数计算方法的不足,本文在传统定义法、试验测试法的基础上提出了基于加权法进行冲击系数计算的新方法,得到如下结论:在不考虑桥面不平整的情况下,传统定义法和试验测试法计算的冲击系数值比用04规范法计算值小;由时程曲线上最大动效应处得到的冲击系数修正值比传统定义法及试验测试法计算值明显偏大,它较准确反映了移动荷载对桥梁的最大冲击作用;基于传统定义法得到的挠度冲击系数值大于应变冲击系数值,而基于试验测试法则刚好相反,说明挠度与应变的冲击系数并不相等;不考虑桥面的不平整度,基于传统定义法和加权法计算的挠度冲击系数值大于04规范法的计算值,可以预见,如果考虑桥面的不平整度,该计算方法得到的冲击系数将会更大,这说明规范计算值可能是不安全的;试验测试法和加权法相结合计算的冲击系数考虑了移动荷载对整个桥梁冲击的历程效应,且计算比较稳定,是一种值得推荐的方法。

## 参考文献:

### References:

[1] 许华东. 车辆作用下桥梁冲击系数分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2013, 32(1): 5-8.

XU Hua-dong. Analysis of bridge impact coefficient with vehicles[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2013, 32(1): 5-8. (in Chinese)

[2] 蒋培文, 贺拴海, 宋一凡, 等. 简支梁车桥耦合振动及其影响因素[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2013, 33(1): 59-66.

JIANG Pei-wen, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan, et al. Vehicle-bridge coupled vibration and its influencing factors of simple beam[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(1): 59-66. (in Chinese)

[3] 韩万水, 王涛, 李永庆, 等. 基于模型修正梁格法的车桥耦合振动分析系统[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 47-55.

HAN Wan-shui, WANG Tao, LI Yong-qing, et al. Analysis system of vehicle-bridge coupling vibration with grillage method based on model updating[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 47-55. (in Chinese)

[4] 丁勇, 谢旭, 苟昌焕, 等. 钢桥交通振动计算方法与动力特性研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2012, 46(6): 1107-1114.

DING Yong, XIE Xu, GOU Chang-huan, et al. Research on computational method and dynamic characteristics of traffic vibration of steel bridge[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(6): 1107-1114. (in Chinese)

[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): 20-28.

LIU Yong-jian, LIU Shi-zhong, MI Jing, et al. Vehicle-bridge coupled vibration of highway double-deck steel truss bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 20-28. (in Chinese)

[6] 殷新锋, 方志. 车辆制动作用下的车辆-路面-桥梁系统随机振动分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(5): 936-941.

YIN Xin-feng, FANG Zhi. Random vibration analysis of vehicle-pavement-bridge system under vehicle braking[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(5): 936-941. (in Chinese)

[7] YANG Y B, LIAO S S, LIN B H. Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams[J]. Journal of Structure Engineering, 1995, 121(11): 1644-1650.

[8] 施尚伟, 杜松, 李莹雪. 桥梁冲击系数随机性分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2012, 31(3): 377-379, 393.

SHI Shang-wei, DU Song, LI Ying-xue. Random analysis of bridge impact coefficient[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(3): 377-379, 393. (in Chinese)

[9] 龙建旭, 石东艳. 基于移动最小二乘拟合大跨结构动载实验冲击系数分析[J]. 四川建筑, 2011, 31(2): 134-135, 137.

LONG Jian-xu, SHI Dong-yan. Impact factor analysis of dynamic test for long-span bridge using least-square method[J]. Sichuan Architecture, 2011, 31(2): 134-135, 137. (in Chinese)

[10] KIM Y J, TANOVIC R, WIGHT R G. Recent advances in performance evaluation and flexural response of existing bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, 23(3): 190-200.

[11] 李伟钊, 张巍, 王宗林, 等. 一种基于低通滤波的公路简支梁

- 桥实测冲击系数计算方法[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 46-50.
- LI Wei-zhao, ZHANG Wei, WANG Zong-lin, et al. A method for calculation of tested impact factor of a simply supported girder bridge based on low-pass filtering [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 46-50. (in Chinese)
- [12] 李炜明, 朱宏平, 张俊兵, 等. 车-桥系统在路面随机谱激励下放大效应的归类分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 58-63, 83.
- LI Wei-ming, ZHU Hong-ping, ZHANG Jun-bing, et al. Amplification effect classification analysis on vehicle-bridge system under road surface random excitation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 58-63, 83. (in Chinese)
- [13] 周新平, 宋一凡, 贺拴海. 公路曲线梁桥车桥耦合振动数值分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 41-46.
- ZHOU Xin-ping, SONG Yi-fan, HE Shuan-hai. Numerical analysis for coupled vibration of vehicle-bridge on highway curved-bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 41-46. (in Chinese)
- [14] 施 颖, 宣纪明, 宋一凡. 不平整度桥面下连续梁桥车桥耦合振动分析[J]. 桥梁建设, 2009(6): 15-18, 22.
- SHI Ying, XUAN Ji-ming, SONG Yi-fan. Analysis of vehicle-bridge coupling vibration of continuous girder bridge under uneven deck[J]. Bridge Construction, 2009(6): 15-18, 22. (in Chinese)
- [15] DENG L, CAI C S. Development of dynamic impact factor for performance evaluation of existing multi-girder concrete bridges[J]. Engineering Structures, 2010, 32(1): 21-31.
- [16] MA Z, CHAUDHURY S, MILLAM J L, et al. Field test and 3D FE modeling of decked bulb-tee bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 306-314.
- [17] MOGHIMI H, RONAGH H R. Development of a numerical model for bridge-vehicle interaction and human response to traffic-induced vibration[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3808-3819.

### 《交通运输工程学报》2014 年征订通知

《交通运输工程学报》是由国家教育部主管、长安大学主办、国务院学位委员会交通运输工程学科评议组、东南大学与西南交通大学共同协办的交通运输领域的学术理论刊物, 两院院士沈志云教授任名誉主任委员; 主要刊载道路与铁道工程、载运工具运用工程、交通运输规划与管理、交通信息工程与控制等领域高水平的学术论文和重大工程实践项目产生的论文; 主要读者对象为国内外交通运输领域的科研人员、工程技术人员及大专院校相关专业的师生。

《交通运输工程学报》为双月刊, 大 16 开本, 128 个页码, 每期定价 30.00 元, 全年共 180.00 元。可到当地邮局订阅, 邮发代号为 52-195, 也可直接汇款至《交通运输工程学报》编辑部订阅。

开户银行: 中国银行西安翠华路支行

账 号: 102407337258

账 户: 长安大学杂志社

邮政编码: 710064

联 系 人: 胡广平

电 话: 029-82334382

地 址: 陕西省西安市南二环路中段长安大学杂志社

E-mail: jygc@chd.edu.cn