

文章编号:1671-6833(2024)02-0106-08

桥梁预拱度对行车舒适性的影响及桥面线形调整

郑元勋^{1,2}, 孔孟^{1,2}, 王博立^{1,2}, 王长柱³, 陈静⁴

(1. 郑州大学 黄河实验室, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 3. 中交第三公路工程局有限公司, 北京 100304; 4. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004)

摘要:为研究成桥预拱度对连续刚构桥行车舒适性的影响,以多座主跨跨径为110~200 m的连续刚构桥为研究对象,首先,采用滤波白噪声法建立桥面时域模型,并与按余弦曲线设置的成桥线形叠加模拟成桥后的桥面不平度;其次,采用MATLAB/Simlink搭建车辆-桥面系统模型,以加速度均方根值(RMS)作为桥梁边跨、中跨桥面的行车舒适性评价指标,以最大瞬态振动值(MTVV)作为边跨峰值处短时内的行车舒适性评价指标;最后,分析采取经验法按照余弦曲线设置成桥预拱度的桥梁其跨径和设计时速对边、中跨RMS值的影响,以及成桥预拱度取值对边跨3L/8处MTVV值的影响。研究结果表明:在边跨、中跨处RMS值均小于0.315 m/s²,说明采取经验法按照余弦曲线设置成桥预拱度并不影响中跨处的行车舒适性;在边跨3L/8处MTVV值在短时内存在大于0.345 m/s²的情况,说明在边跨峰值处短时内会产生一定不舒适度。提出了一种基于桥面铺装层施工优化边跨3L/8处和边墩墩顶桥面线形的方法,改善了边跨的行车舒适性。

关键词:连续刚构桥; 行车舒适性; 仿真分析; 桥梁预拱度; 余弦曲线分配法; 桥面线形; 白噪声

中图分类号: O324; TB123; U448.23

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2023.05.001

随着中国经济的发展,行车舒适性问题也逐渐受到了广泛的关注。在大跨连续刚构桥中,通常设置成桥预拱度来抵消运营期间混凝土收缩徐变以及活载作用导致的跨中下挠,然而预拱度的设置也会形成以跨径为波长的特定波浪形桥面线形。这种桥面线形将对桥上高速行驶的车辆产生周期性的波形扰动,它不仅影响乘客乘车体验,同时还影响乘客的身心健康^[1]。

目前,针对桥梁预拱度对行车舒适性的影响,现有研究中主要围绕简支梁的预拱度进行。如曹胜语等^[2]以行车舒适度为评价指标,分析不同跨径下的简支梁满足行车舒适性要求的最大上拱度值。钟明全等^[3]分析PC板梁徐变上拱对车辆振动响应和行车舒适度的影响,提出了基于公路设计行车速度的徐变上拱度控制值。马春佳^[4]研究了预应力混凝土空心板梁桥徐变上拱与行车舒适性之间的关系,探索性地建立了行车舒适性指标和桥梁上拱度之间

的数学关系式。在车-桥耦合振动方面,周小烨^[5]、王旭军等^[6]对简支梁的上拱度对于行车舒适性的影响进行研究,得出了桥梁振动相对于上拱度对车辆振动影响很小的结论。此外,刘世忠等^[7]、Deng等^[8]、李武生等^[9]用数值方法模拟了车辆与桥梁的动力响应,表明桥面不平度是车-桥耦合振动的主要激励源。对于连续刚构桥来说,其预拱度取值明显大于简支梁,且预拱度作为桥面不平度的重要组成部分,因此有必要对预拱度对行车舒适性的影响做出进一步研究。

本文采用MATLAB/Simlink建立1/4车辆模型,将基于滤波白噪声生成的路面时域模型与按照余弦曲线分配法设置的成桥预拱度叠加生成的桥面不平度作为输入荷载。根据不同跨度下的成桥预拱度对于车辆竖向的激振效果,得出桥梁的预拱度值、车速、跨径对于桥面行车舒适性的影响。最后,根据仿真结果提出改善桥面行车舒适性的具体措施。

收稿日期: 2023-03-14; **修订日期:** 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2040224, 51878623, 52279144); 中交第三公路工程局有限公司科技研发项目(2021-08)

作者简介: 郑元勋(1978—),男,河南驻马店人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事结构监控、检测及加固等方面研究, E-mail: yxzheng@zzu.edu.cn。

引用本文: 郑元勋, 孔孟, 王博立, 等. 桥梁预拱度对行车舒适性的影响及桥面线形调整[J]. 郑州大学学报(工学版) 2024, 45(2): 106-113. (ZHENG Y X, KONG M, WANG B L, et al. Influence of bridge pre-camber on traffic comfort and adjustment of bridge deck alignment [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(2): 106-113.)

1 基于滤波白噪声法的桥面时域模型

1.1 桥面激励模型

桥面不平度是汽车振动的主要振源,它使汽车在行驶过程中产生行驶阻力以及振动。当桥面等级和行车速度一定时,桥面不平顺的速度功率谱密度可以认为是白噪声响应的功率谱密度。

(1)基于功率密度谱的频域描述。桥面不平度可以近似处理为平稳的、各态经历的随机过程。其中功率谱密度的拟合表达式为

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-2} \tag{1}$$

式中: $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数, m^3 ; n 为空间频率, m^{-1} ; n_0 为参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 。

(2)基于滤波白噪声的桥面时域描述。一阶滤波白噪声系统是指激励为白噪声的一阶单自由度线形系统,一阶滤波白噪声系统的频响函数为^[10]

$$H(\omega) = \frac{2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)u}}{j\omega + 2\pi n_1 u} \tag{2}$$

式中: ω 为圆频率, rad/s , $\omega = 2\pi un$; u 为汽车行驶速度, m/s ; n_1 为路面空间截止频率, $n_1 = 0.01 \text{ m}^{-1}$ 。

将式(2)转换为微分表达式,故最终基于滤波白噪声法桥面随机激励的时域描述为

$$\dot{q}(t) + 2\pi n_1 u \cdot q(t) = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)u} \cdot \omega(t) \tag{3}$$

1.2 成桥预拱度线形设置

目前设置成桥预拱度的方法一般都是在理论计算的基础上,根据经验确定跨中最大预拱度后,按某种曲线向全跨分配。由于余弦曲线线形符合连续刚构桥的徐变变形规律,且在跨中以及墩顶处曲线斜率为零。因此现有桥梁线形通常按照余弦曲线进行分配,具体函数如下。

边跨曲线方程:

$$y = \begin{cases} \frac{f_{cz}}{8} \left(1 - \cos \frac{8\pi x}{3L} \right), & 0 \leq x \leq 3L/8; \\ \frac{f_{cz}}{8} \left[1 + \cos \frac{8\pi}{5L} \left(x - \frac{3L}{8} \right) \right], & 3L/8 \leq x \leq L. \end{cases} \tag{4}$$

中跨曲线方程:

$$y = \frac{f_{cz}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{L} \right) \tag{5}$$

式中: L 为跨径; f_{cz} 为中跨跨中成桥预拱度。

1.3 桥面时域模型的建立

根据我国 JTG F80/1—2017《公路工程质量检验评定标准》,在新建桥梁的桥面铺装实测项目中,高速公路、一级公路的沥青混凝土面层国际平整度

指数最低要求要达到 2.5 m/km 。国际平整度指数与路面功率谱密度之间存在以下关系^[11]:

$$IRI = 0.78 a_0 \sqrt{G_q(n_0)} \tag{6}$$

式中: a_0 为系数, $a_0 = 10^3 \text{ m}^{-1.5}$; $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数。

根据 GB/T 7031—1986 可知,按照功率谱密度,路面等级分为 A~H 8 个等级,我国公路基本处于 A、B、C 3 个等级,根据式(6)计算,当国际平整度指数取值为 2.5 m/km 时,其功率谱密度值接近于 A 级路面中的下限值, $G_q(n_0) = 8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。如图 1 所示,基于 Simlink 环境搭建式(3)下的仿真程序,其中, $k_a = 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)u}$; $k_b = 2\pi n_1 u$ 。

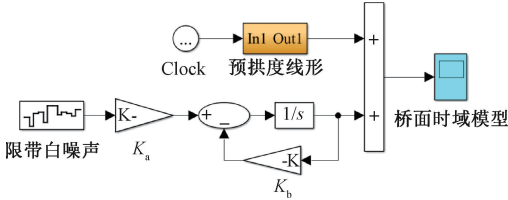


图 1 桥面不平度时域仿真模型
Figure 1 Time domain simulation model of bridge deck roughness

为保证当车辆以不同的车速在桥梁的设计线形下行驶时,同样的行车区间内其桥面历程的幅值完全一致,参考文献[12]中的“方法三”来对限带白噪声参数进行设置,具体设置如下:其功率谱密度设置为 0.5,同时采样时间设置为 $(10u)^{-1}$,其中车速 u 的单位为 m/s 。

2 车辆竖向振动舒适性分析

2.1 车辆-座椅系统模型的建立

在车辆的行驶过程中,桥面的横向坡度并不发生变化,因此主要考虑车辆的垂向振动。如图 2 所示为 3 自由度的 1/4 车辆-座椅模型,由于轮胎阻尼要比悬架阻尼小几个数量级,对车辆的行驶性能影响很小,因此通常忽略轮胎的阻尼^[13]。

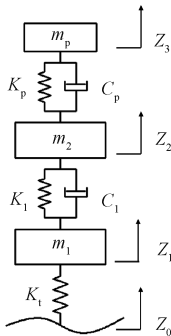


图 2 1/4 车辆-座椅模型简图
Figure 2 Sketch of the 1/4 vehicle-seat model

忽略路面激励引起的质量转移,1/4 车辆模型的运动微分方程为

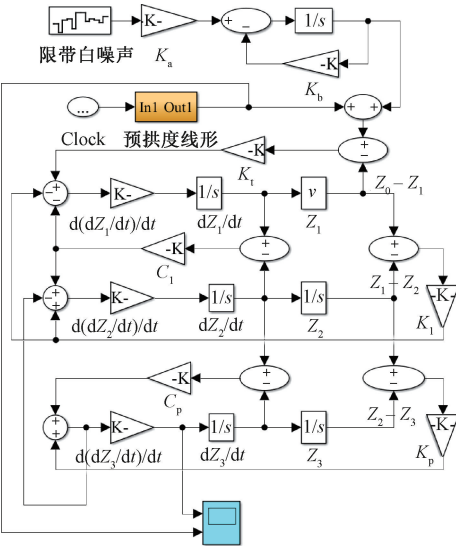
$$\begin{cases} m_p \ddot{Z}_3 = K_p(Z_2 - Z_3) + C_p(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_3); \\ m_2 \ddot{Z}_2 = K_p(Z_3 - Z_2) + C_p(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) + \\ \quad K_1(Z_1 - Z_2) + C_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2); \\ m_1 \ddot{Z}_1 = K_1(Z_2 - Z_1) + C_1(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + \\ \quad K_i(Z_0 - Z_1). \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z_0 为桥面激励; Z_1 为轮胎垂直振动位移; Z_2 为悬架质量垂直振动位移; Z_3 为车辆座椅垂直振动位移。以某国产轿车为研究对象,其余结构参数见表 1。

表 1 车辆结构参数

Table 1 Vehicle structure parameters			
参数	参数值	参数	参数值
座椅及人质量	100	悬架刚度	28 000
m_p/kg		$K_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	
车身质量	450	轮胎刚度	19 200
m_2/kg		$K_i/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	
车轮质量	50	座椅阻尼	240
m_1/kg		$C_p/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	
座椅刚度	10 500	悬架阻尼	2 000
$K_p/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$		$C_1/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	

在 Simlink 中搭建的 1/4 车辆仿真模型如图 3 所示,其中示波器输出车辆振动加速度以及预拱度线形,其中车辆模型根据式(7)进行搭建。



车辆振动加速度以及预拱度线形
图 3 1/4 车辆仿真模型

Figure 3 1/4 vehicle simulation model

2.2 行车舒适评价指标

在 1/4 车辆模型中,主要考虑车辆的竖向加速度对于乘客或者驾驶员的影响。本文采取基于国际标准化组织所提出的 ISO 2631-1:1997(E) 标准^[14]

的加权加速度均方根值法作为行车舒适性的评价指标。

(1) 基本评价方法——加权加速度均方根值 RMS ^[15]:

$$RMS = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{0.5} \quad (8)$$

式中: T 为振动的分析时间,s; $a_w(t)$ 为瞬时频率加权加速度幅值。

RMS 的大小范围与行车舒适性之间的关系如表 2 所示^[14]。

表 2 加权加速度均方根值与人体舒适性的关系

Table 2 Relationship between RMS and human comfort	
$RMS/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	人体舒适程度
<0.315	舒适
0.315~0.630	稍不舒适
0.500~1.000	有些不舒适
0.800~1.600	不舒适
1.250~2.500	非常不舒适
>2.000	极其不舒适

(2) 辅助评价方法——最大瞬态振动值 $MTVV$ 。对于特殊路面,相对于 RMS ,用最大瞬态振动值 $MTVV$ 能更好地评价振动在短时内对人体的影响,最大瞬态振动值法本质为持续加权加速度均方根值 $a_w(t_0)$:

$$a_w(t_0) = \left[\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} a_w^2(t) dt \right]^{0.5}; \quad (9)$$

$$MTVV = \max[a_w(t_0)]. \quad (10)$$

式中: τ 为持续平均积分时间,通常取 1 s; t_0 为选取计算时间。此外,ISO 2631-1:1997(E) 标准规定了 $MMTV$ 和 RMS 的经验换算公式,同时当两者比值大于 1.5 时,则采用辅助评价方法替代基本评价方法来评价振动对人体的影响。

在 ISO 2631-1:1997(E) 规范中,虽然建立了最大瞬时振动冲击指标,但是并未对 $MTVV$ 进行分级,参考文献[16]中提出的关于路桥过渡段的相关评价方法,其相关舒适性对应评价标准如表 3 所示。

表 3 最大瞬态振动值与人体舒适性的关系

Table 3 The relationship between MTVV and human comfort	
$MTVV/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	人体舒适程度
<0.364	舒适
0.364~0.750	稍不舒适
0.615~1.500	有些不舒适
1.373~2.800	不舒适
>2.645	很不舒适

2.3 模型仿真分析

通过查阅资料,选取 10 座在实际工程中按照余弦曲线分配法设置成桥预拱度的桥梁,如表 4 所示。对 10 座主跨跨径为 110~200 m 的连续刚构桥进行行车舒适性研究,同时为了对比成桥预拱度对行驶车辆的激励效果,设置以下 2 种工况。

- (1)工况 a:桥梁成桥线形下的桥面激励;
- (2)工况 b:桥梁设计线形下的桥面激励。

如图 4(a)~图 4(j) 为工况 a 下的车辆加速度响应及各桥的预拱度线形示意图,图 4(k) 为工况 b 下不同的行驶速度所对应的车辆加速度响应, a 为加速度, y 为成桥预拱度值。

表 4 实桥相关参数
Table 4 Relevant parameters of the actual bridge

算例	桥名	跨径分布/m	设计时速/(km·h ⁻¹)	成桥预拱度值/mm	
				边跨	跨中
1	1 号连续刚构桥	60.5+110.0+60.5	80	35.0	130
2	连昌河特大桥	65+120+65	100	40.0	140
3	2 号刚构桥	70+130+70	100	37.5	150
4	合川区培江一桥	85+135+88	100	37.5	150
5	常家河特大桥	75+2×140+75	100	42.0	165
6	3 号连续刚构桥	85+148+85	100	42.5	170
7	姜嫳河特大桥	88+3×165+85	80	44.6	178
8	回箐沟大桥主桥	95+170+95	100	40.0	170
9	三岔沟特大桥	95+180+95	100	40.0	180
10	天桥大桥	105+200+106	80	55.0	220

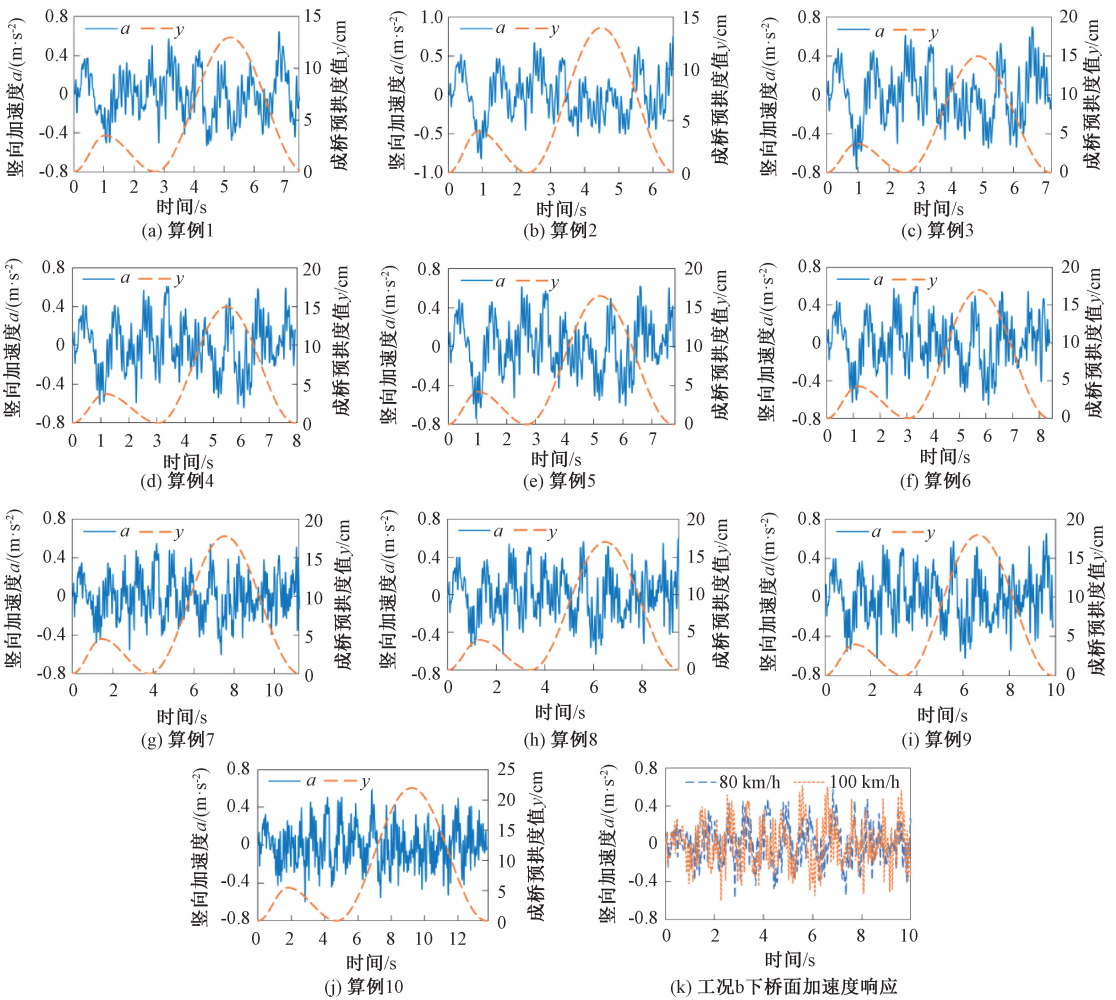


图 4 车辆加速度响应及成桥预拱度示意图

Figure 4 Vehicle acceleration response and bridge camber diagram

表 5 为边跨、中跨模型仿真结果。如表 5 所示,由于边跨、中跨线形差异较大,因此分别选取车辆在边跨、中跨行驶时的加权加速度均方根值 RMS 以及 2 种工况下的 RMS 比值作为预拱度影响行车舒适性的衡量指标。

表 5 边跨、中跨模型仿真结果
Table 5 Model simulation results of side span and mid span

算例	$RMS_a/(m \cdot s^{-2})$		$RMS_b/(m \cdot s^{-2})$		RMS_b/RMS_a	
	边跨	中跨	边跨	中跨	边跨	中跨
1	0.199	0.245	0.149	0.231	0.749	0.943
2	0.298	0.289	0.184	0.257	0.617	0.890
3	0.274	0.221	0.186	0.202	0.679	0.914
4	0.246	0.261	0.196	0.243	0.797	0.933
5	0.284	0.261	0.195	0.244	0.687	0.936
6	0.255	0.258	0.196	0.242	0.769	0.936
7	0.192	0.219	0.170	0.212	0.885	0.971
8	0.244	0.235	0.213	0.228	0.873	0.974
9	0.244	0.241	0.213	0.233	0.873	0.965
10	0.201	0.203	0.194	0.199	0.965	0.980

注: RMS_a 、 RMS_b 分别代表在工况 a、工况 b 下座椅处加权加速度均方根值。

由于车身簧载质量加速度受到车辆行驶速度的影响较大^[17],现分析车速在 100 km/h 时,主跨跨径与桥面加速度响应之间的关系。如图 5 所示,随着主跨跨径增加,2 个工况下的边跨、中跨加速均方根比值明显呈线性正相关,且最终比值趋近于 1。说明随着跨径的增加,预拱度对行车舒适性的影响逐渐下降;对同一座桥梁,2 种工况下中跨处的加速度均方根比值较边跨更大一些,且拟合曲线在边跨处的斜率更大,说明边跨处的行车响应更为明显。

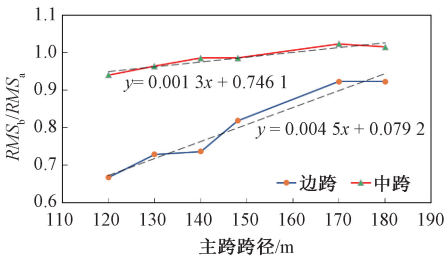


图 5 跨径和 RMS_b/RMS_a 响应关系

Figure 5 Response relationship between bridge span and RMS_b/RMS_a

根据表 5 数据,从全桥加速度响应结果来看,当车辆以设计时速通过桥面时,人体加速度均方根值小于 $0.315 m/s^2$,此时人体感受处于舒适范围内。但该评价指标不能反映桥面局部范围的行车响应效果。如图 4 所示,当车辆以 100 km/h 驶过桥面时,在边跨 $3L/8$ 附近存在瞬时加速度峰值大于 $0.6 m/s^2$

的情况,此时人体在短时内可能会产生不舒适感。现以最大瞬态振动值 $MTVV$ 为指标,研究边跨处车辆行驶速度对行车舒适性的影响。

表 6 为工况 a 下边跨 $3L/8$ 处 $MTVV$ 值。如表 6 所示,当边中跨比在接近于 0.55 时,随着主跨跨径的增大,其最大瞬态振动值呈逐渐降低的趋势。当车辆行驶速度为 100 km/h 时,边跨 $3L/8$ 范围内 $MTVV$ 与 RMS 比值大于 1.5。根据表 3 中的 $MTVV$ 分级评价范围,此时人体舒适性感受为稍不舒适,因此有必要采取措施对边跨的桥梁线形进行调整从而改善边跨处的行车舒适性。

表 6 边跨 $3L/8$ 处 $MTVV$ 值
Table 6 $MTVV$ value at $3L/8$ of the side span

算例	边中跨比	$MTVV/(m \cdot s^{-2})$			$MTVV/RMS$
		100 km/h	80 km/h	60 km/h	
1	0.55	0.459	0.286	0.137	1.567
2	0.54	0.498	0.298	0.148	1.671
3	0.54	0.463	0.170	0.171	1.690
5	0.54	0.483	0.156	0.174	1.701
6	0.57	0.241	0.066	0.070	0.945
7	0.52	0.266	0.283	0.141	1.028
8	0.56	0.167	0.224	0.133	0.684
9	0.53	0.221	0.224	0.158	0.906
10	0.53	0.150	0.251	0.118	0.640

3 基于桥面铺装层的桥面线形调整

随着现有桥梁跨径的不断增加,同时在施工阶段受到多种因素的干扰,现有连续刚构桥最终的桥线形与预期状态之间存在一定误差。目前,连续刚构桥的桥面铺装主要由混凝土调平层和上层沥青铺装组成。因此,针对合龙后的桥面实测线形进行拟合优化,或者在规范允许的范围内对铺装层厚度进行小范围调整,能够进一步提高桥面线形的平顺性。桥面铺装层线形拟合基本原理如下:

$$g(x) = n \cdot y'(x) + d。$$
 (11)

式中: g 为最终的铺装线形; n 为成桥预拱度调整系数,当合龙后的桥面实测线形与理想成桥线形完全吻合时其值为 1; y' 为按照余弦曲线分配法计算的成桥预拱度; d 为混凝土调平层厚度,通常取 8~12 cm。

线形调整原理如图 6 所示。方法一:在桥面实测线形的拟合优化中以降低边跨、中跨跨中处的桥面预抛高为目标,从而增加桥面线形的平顺性;方法二:通过增加边墩墩顶混凝土调平层厚度来提高桥面线形的平顺性。

参考 JTG F80/1—2017《公路工程质量检验评定标准》^[18]中对于桥面高程以及桥面铺装的具体要

求,如表 7 所示,方法一、方法二应分别将桥面高程、铺装层厚度控制在检验标准允许偏差以内。同时根据相关研究^[19],当铺装层混凝土材料与桥面板结合良好时,铺装垫层厚度的增加对铺装材料内部应力的分布几乎没有什么影响。

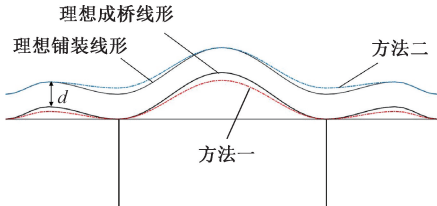


图 6 桥面线形调整示意图

Figure 6 Schematic diagram of bridge deck alignment adjustment

表 7 桥面线形调整参考指标

Table 7 Reference index of bridge deck alignment adjustment

adjustment		
检查项目	检查指标	允许偏差/mm
现浇梁/板	顶面高程	±10
桥面铺装层	厚度	+10,-5
	顶面高程 $L\leq 100\text{ m}$	±20
悬臂浇筑梁	顶面高程 $L>100\text{ m}$	± $L/5\ 000$
	相邻节段高差	10

以某连续刚构桥为例,该桥跨径分布为 65 m+6×120 m+65 m,其桥面混凝土调平层设计厚度为 8 cm。在铺装层施工前需要对桥面线形进一步拟合,以提高桥面的平顺性。以边跨、中跨加速度均方根值和边跨 3L/8 处的大瞬态振动值为指标,研究方法一、方法二对于改善桥面行车舒适性的效果,得到的加速度响应的评价指标如表 8 所示。

根据表 8 中的仿真结果,整理结果如图 7~8 所示,当处于工况 7 时,边跨 3L/8 处预抛高与边墩墩顶位置预抛高差值达到最小,边跨与中跨的 RMS 值

表 8 方法一及方法二综合作用下加速度响应结果

Table 8 The results of acceleration response under the coupling effect of method 1 and method 2

算例	预抛高值/mm		$RMS/(m\cdot s^{-2})$		$MTVV/(m\cdot s^{-2})$
	边跨 3L/8	边墩墩顶	边跨+中跨	边跨	边跨 3L/8
1	30	0	0.277	0.262	0.381
2	40	0	0.290	0.256	0.463
3	50	0	0.305	0.301	0.550
4	30	10	0.275	0.263	0.379
5	40	10	0.288	0.299	0.461
6	50	10	0.303	0.338	0.546
7	30	20	0.274	0.264	0.378
8	40	20	0.286	0.300	0.460
9	50	20	0.301	0.339	0.544

变化不太明显,但边跨的 RMS 值以及边跨 3L/8 处的 MTVV 值为最小,此时行车舒适性达到最优。说明通过线形拟合优化降低边跨 3L/8 处的预抛高值以及增加边墩墩顶混凝土调平层厚度能有效改善边跨桥面的行车舒适性。

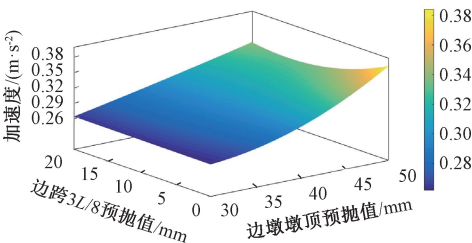


图 7 边跨 3L/8 处 RMS 响应结果

Figure 7 RMS response results at 3L/8 of side span

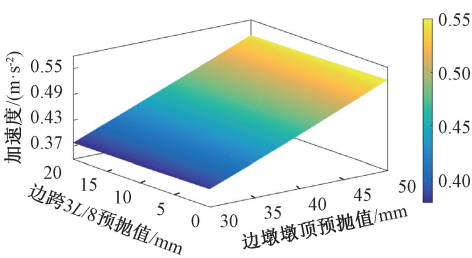


图 8 边跨 3L/8 处 MTVV 响应结果

Figure 8 MTVV response results at 3L/8 of side span

如图 9 所示,某大桥由于在施工过程中因施工工期以及施工工艺上的原因,悬浇箱梁顶面施工完成后表面平整度较差,现在基于上述方法对桥面线形进行调整。调整前后边墩桥面行车舒适性提高了 11%,边跨位置行车舒适性提高了 16.3%,边跨 3L/8 处的最大瞬态振动值降低了 20.7%。

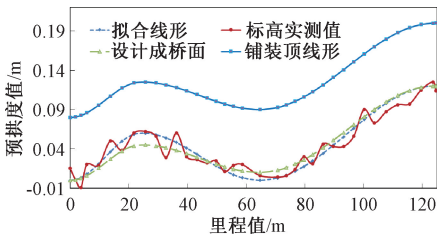


图 9 边墩桥面线形拟合

Figure 9 Bridge deck line fitting of abutment pier

综上所述,按照以上方法对桥面线形进行调整,既有效改善了桥面的行车舒适性,也兼顾成桥预拱度在运营期间抵消跨中下挠的作用。

4 结论

本文通过采用滤波白噪声法建立桥面时域模型,同时将得到的桥面时域模型与按照余弦曲线分配的成桥预拱度值进行叠加模拟成桥后的桥面不平度。采用 MATLAB/SIMLINK 搭建成桥后的桥面不平度模型与 1/4 车辆模型,并对实桥结构进行仿真

分析,得出了以下结论。

(1)以加速度均方根值 RMS 为评价指标时,边跨、中跨处的 RMS 值均小于 0.315 m/s^2 ,人体感受均处于舒适范围以内;同时随着桥梁跨径的增加,预拱度对行车舒适性的影响逐渐下降,桥面平整度对行车舒适性的影响逐渐增加。

(2)以最大瞬态振动值 $MTVV$ 为评价指标时,当桥梁跨径较小时,车辆座椅的竖向振动受成桥预拱度值与车辆行驶速度的影响较为明显,在边跨 $3L/8$ 附近人体会有产生稍不舒适感。因此在计算边跨成桥预拱度取值时,应该同时考虑桥梁设计时速的影响。

(3)针对边跨 $3L/8$ 位置附近产生的行车不舒适感,通过线形拟合降低边跨 $3L/8$ 处的桥面预抛高或者增加边墩墩顶混凝土调平层厚度能够有效改善行车舒适性。

参考文献:

[1] DILLEN N, ILIEVSKI M, LAW E, et al. Keep calm and ride along: passenger comfort and anxiety as physiological responses to autonomous driving styles[C]//Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM, 2020: 1-13.

[2] 曹胜语, 马春佳, 郭长江. 考虑行车舒适性简支梁桥允许上拱度分析[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2008, 17(4): 7-9.

CAO S Y, MA C J, GUO C J. Arch degree analysis of single beam bridge based on moving vehicle comfortable[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2008, 17(4): 7-9.

[3] 钟明全, 阳光, 王旭军, 等. PC 板梁徐变上拱对高速行驶车舒适性的影响分析[J]. 桥梁建设, 2007, 37(6): 26-29.

ZHONG M Q, YANG G, WANG X J, et al. Analysis of influence of creeping camber of PC plate girder bridge on riding comfort of high-speed traveling vehicle[J]. Bridge Construction, 2007, 37(6): 26-29.

[4] 马春佳. 基于行车舒适性的高速公路中小跨径预应力混凝土桥梁设计方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.

MA C J. Research on designing method of the medium and small span prestressed concrete highway bridge based on driving comfort[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.

[5] 周小焯. 先简支后桥面连续梁桥车桥耦合振动分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(增刊 1): 57-61.

ZHOU X Y. A vehicle-bridge coupling vibration analysis

on bridge girders by simple support design followed by structural continuous design[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(S1): 57-61.

[6] 王旭军, 钟明全, 刘建波, 等. 简支梁桥上拱度对高速行驶车舒适性影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2007, 26(6): 60-63, 152.

WANG X J, ZHONG M Q, LIU J B, et al. Analysis of high speed driving comfort impacted by deflection upwards of PC bridges[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2007, 26(6): 60-63, 152.

[7] 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, 35(1): 94-98.

LIU S Z, LIU Y J, CHENG G, et al. Numerical analysis of vehicle-bridge coupling vibration for highway bridges[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2014, 35(1): 94-98.

[8] 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.

[9] 李武生, 王贵春. 基于桥面不平顺的车辆舒适性分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(1): 98-104.

LI W S, WANG G C. Vehicle ride comfort analysis based on bridge deck with irregular pavement[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2022, 46(1): 98-104.

[10] 卢凡, 陈思忠. 汽车路面激励的时域建模与仿真[J]. 汽车工程, 2015, 37(5): 549-553.

LU F, CHEN S Z. Modeling and simulation of road surface excitation on vehicle in time domain[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(5): 549-553.

[11] 陈洪兴, 何兆益. 基于国际平整度指数 IRI 的路面不平度仿真研究[J]. 公路, 2008, 53(11): 155-160.

CHEN H X, HE Z Y. A study on simulation of road roughness based on international roughness index[J]. Highway, 2008, 53(11): 155-160.

[12] 殷珺, 陈辛波, 吴利鑫, 等. 滤波白噪声路面时域模拟方法与悬架性能仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 398-407.

YIN J, CHEN X B, WU L X, et al. Simulation method of road excitation in time domain using filtered white noise and dynamic analysis of suspension[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(3): 398-407.

[13] SOONG M F, RAMLI R, SAIFIZUL A. Between simplicity and accuracy: effect of adding modeling details on quarter vehicle model accuracy[J]. PLoS One, 2017, 12(6): e0179485.

[14] ISO. Mechanical vibration and shock——evaluation of hu-

man exposure to wholebody vibration——part 1: general requirements; ISO 2631 - 1: 1997 (E) [S]. Geneva: ISO, 1997.

[15] 中国国家标准化管理委员会. 汽车平顺性试验方法: GB/T 4970—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for smoothness of automobiles: GB/T 4970—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[16] 苏曼曼, 张洪亮. 路桥过渡段沥青路面平整度的评价方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39 (3): 362–367.

SU M M, ZHANG H L. Roughness evaluation method of asphalt pavement between bridge abutment and approach embankment[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 362–367.

[17] 时刚, 田新涛. 工程卡车行驶引发地面振动特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(5): 76–81.

SHI G, TIAN X T. Research on ground vibration characteristics caused by engineering truck driving[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(5): 76–81.

[18] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程质量检验评定标准: JTG F80/1—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017. Research Institute of Highway Ministry of Transport. Inspection and evaluation quality standards for highway engineering: JTG F80/1—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.

[19] 臧继成, 潘正华, 罗君, 等. 超载及调平层厚度对连续刚构桥桥面铺装层受力的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1137–1140.

ZANG J C, PAN Z H, LUO J, et al. Effect of overloading and the leveling layer thickness on deck pavement stress of continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(6): 1137–1140.

Influence of Bridge Pre-camber on Traffic Comfort and Adjustment of Bridge Deck Alignment

ZHENG Yuanxun^{1,2}, KONG Meng^{1,2}, WANG Boli^{1,2}, WANG Changzhu³, CHEN Jing⁴

(1. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Water Conservancy and Transportation Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100304, China; 4. China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd., Zhengzhou 450004, China)

Abstract: In order to study the effect of bridge pre-camber on the comfort of continuous rigid bridge, a number of continuous rigid bridges with main span diameters between 110 m and 200 m were used as research objects. Firstly, the time domain model of the pavement was established using the filtered white noise method, and the levelness of the new bridge deck was simulated by superimposing it with the formed bridge alignment set according to the cosine curve. Secondly, MATLAB/Simlink was used to build the vehicle-road system model. The root means square (*RMS*) acceleration value was used to evaluate the traffic comfort of the bridge side span and middle span deck. The maximum transient vibration value (*MTVV*) was used as the evaluation index of the driving comfort in the short time at the peak of the side span. Finally, the influence of the span diameter and design speed on the *RMS* value of the side and middle spans of the bridge with the empirical method of setting the pre-arch according to the cosine curve was analyzed. The influence of the pre-arch value on the *MTVV* value at $3L/8$ of the side span were analyzed. The results showed that the *RMS* values were less than 0.315 m/s^2 at the side span and mid-span, indicating that the empirical method of setting the pre-arch of the bridge according to the cosine curve did not affect the traffic comfort at the mid-span. The *MTVV* value at the side span $3L/8$ was greater than 0.345 m/s^2 in a short period of time, which mean that the peak of the side span was slightly uncomfortable in a short period of time. In order to improve the traffic comfort within the side span, measures were proposed to optimize the bridge deck alignment at $3L/8$ and the top of the side pier based on the leveling layer construction.

Keywords: continuous rigid frame bridge; traffic comfort; simulation analysis; bridge pre-camber; cosine line distribution method; bridge deck alignment; white noise