

# 路桥过渡段上车内人体舒适性评价方法

郑木莲<sup>1</sup>, 孟建党<sup>2</sup>, 张世铎<sup>3</sup>, 崔梦璇<sup>4</sup>, 徐金欣<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 河南省交通运输厅 京珠高速公路新乡至郑州管理处, 河南 郑州 450016; 3. 日照市公路管理局, 山东 日照 276826; 4. 山东公路技师学院 公路工程系, 山东 德州 253020)

**摘要:**为了方便分析车辆通过路桥过渡段时车内人体舒适性, 提出道路-车辆-人体振动系统, 在分析评价现有人体振动及舒适性评价方法与标准的基础上, 根据车辆通过路桥过渡段时人体承受振动的特点, 采用压电式加速度传感器测量车辆通过路桥过渡段时人体承受的竖向加速度, 提出了新的人体舒适性评价方法, 并以 2 条高速公路为例, 应该用该方法进行路桥过渡段人体舒适性评价。结果表明, 该方法可以更加客观准确地评价车辆通过路桥过渡段时人体的舒适程度, 可为提出基于舒适性的路桥过渡段差异沉降控制标准提供理论依据。

**关键词:**道路工程; 路桥过渡段; 人体舒适性; 加权加速度; 均方根值

**中图分类号:**U414.1; U491

**文献标志码:**A

## Evaluation method of human comfort in vehicle at transition section between bridge abutment and embankment

ZHENG Mu-lian<sup>1</sup>, MENG Jian-dang<sup>2</sup>, ZHANG Shi-duo<sup>3</sup>, CUI Meng-xuan<sup>4</sup>, XU Jin-xin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Management Office for Jingzhu Expressway from Xinxiang to Zhengzhou, Henan Province Department of Transportation, Zhengzhou 450016, Henan, China; 3. Rizhao City Highway Administration, Rizhao 276826, Shandong, China; 4. Department of Highway Engineering, Shandong Highway Technician College, Dezhou 253020, Shandong, China)

**Abstract:** In order to analyze the human comfort when vehicles passing through the transition section between bridge abutment and embankment, the vibration system of road-vehicle-human were put forward. On the basis of analyzing the present evaluation methods and criteria for human body vibration and comfort, the new evaluation method adopting piezoelectric acceleration sensor to measure the vertical acceleration of the human body was proposed according to the vibration characteristics. Take two existing expressways for example, this method was used to evaluate the human body comfort. The results show that the new method can objectively and accurately evaluate the human body comfort degree so as to provide a theoretical basis for the control of differential settlement of the transition section based on comfort properties. 5 tabs, 2 figs, 10 refs.

**Key words:** road engineering; transition section between bridge abutment and embankment; human comfort; weighted acceleration; root-mean-square-value

## 0 引言

车辆通过路桥过渡段时,人体会由于车辆振动产生相应的振动。一种振动由汽车发动机传动系统引起,频率较高,超出了人体感受振动的范围,对人体舒适性影响较小;另一种振动由路面的不平整、差异沉降、线形及车辆制动等因素引起,此类振动频率多在 1~20 Hz 之间,人体舒适性主要受这种振动的影响。当这种振动达到一定强度时,会使乘客感觉不舒适或疲劳。近年来,国内外许多研究人员将车辆振动的加速度与人体主观感觉联系起来,将人体舒适性作为车辆行驶舒适性和安全性的重要指标。车辆通过路桥过渡段时,人体舒适性的评价标准与所采用的评价方法和指标有关,国内外评价人体舒适性的方法有许多种<sup>[1-10]</sup>,郑郎采用“汽车振动舒适度  $C_v$ ”来评价汽车平顺性,将汽车座椅加速度与人对汽车振动舒适性的主观感觉联系起来,并分析了不同车速、测量位置对汽车振动舒适性的影响<sup>[7]</sup>;ISO 2631-1-1997 以加权加速度均方根值作为行驶舒适性的基本评价指标,并引入“总乘坐值法”,给出了加权加速度均方根值与人的舒适程度的关系;张洪亮提出以人体最大瞬态振动值  $I_{MTVV}$  作为路桥过渡段桥头搭板容许坡差确定的指标,研究了车速、行进方向等参数对人体  $I_{MTVV}$  的影响<sup>[8]</sup>;中国标准《客车平顺性评价指标及限值》中对各型客车提出的振动平顺性指标;另外,美国宇航局莱利研究中心提出“单一不舒适性指数法”,日本国营铁道提出“乘坐舒适性系数法”;中国黄启钧围绕该问题讨论了“人-座椅”系统受路面平整度的影响<sup>[9]</sup>;胡振东等从舒适性角度出发,系统分析了桥梁结构振动与车辆竖向加速度之间的关系,得出路桥过渡段及临界速度下车辆的最大加速度,并提出车辆竖向加速度、车速及桥的固有频率之间的数学关系<sup>[10]</sup>。综上,虽然已有研究中提出了人体舒适性的相关评价指标及标准,但是采用的测试方法不统一,且相关指标与标准的提出目的及其适宜范围也存在很大差异,不能针对车辆通过路桥过渡段时的动力特点,客观准确地测量人体承受的振动。同时,由于人体个体的差异,造成每个人体对振动的敏感程度有所不同,所以需要在现有评价指标与标准的基础上,提出适合于车辆通过路桥过渡段时人体承受振动的定量测试方法与评价指标,从而为基于人体舒适性的路桥过渡段差异沉降的控制标准提供理论依据。

为此,本文采用压电式加速度传感器,测量车辆

通过路桥过渡段时人体承受的竖向加速度,从而评价人体的舒适性。

## 1 道路-车辆-人体振动系统

车辆振动行驶舒适性系统是由道路、车辆和人体组成的“路-车-人”系统<sup>[1]</sup>。系统的输入是路面不平度作用下车辆产生的机械振动,通过轮胎、悬架、车身及座椅等弹性元件和阻尼元件传到人体全身或局部,最终由人的生理、心理和物理等复杂因素综合输出人体对振动的反应,例如:人感到轻微不舒服、极度不舒服等。

行驶车辆受到路面不平整的随机激励,使车体发生垂直振动、横摆振动和前后俯仰运动,这些多自由度的振动对坐在座椅上的人体形成头、肩、胸、腹、手等上下、左右、前后方向的振动,且具有不同的频率特性。车身的横摆振动由左右车轮对应的路面平整度不同引起,对于低等级公路和旧路,该现象较明显;对于高等级公路,由于路基路面设计和施工要求较高,且整个横断面同步施工,因此由左右车轮引起的侧向振动较小,可以不考虑。本文主要研究由于路桥过渡段差异沉降造成的路面不平整,使车-座椅-人体发生垂直振动而引起的人体舒适程度<sup>[2]</sup>。

## 2 人体振动评价方法

ISO(国际标准化组织)在汇集各国研究成果的基础上,于 20 世纪 70 年代公布了 ISO 2631 人体承受全身振动的评价指南。这里的全身振动是指通过支撑表面(如站立人的脚、就座人的臀部)传递到人体上的三轴向振动。ISO 2631 用于评价人体振动的方法有 2 种:1/3 倍频带分别评价方法和总加权值方法。但是在后期实践证明,这 2 种方法均不能真实地反映人体对振动的感觉。

近年来,国际标准化组织全面修订了 ISO 2631 标准,提出了新草案 ISO 2631-1-1997。该标准改进了一些规定,并给出了暴露于振动的界限数值,目前已成为许多行业评价舒适性的依据<sup>[3-4]</sup>。

新草案做出了几点改进。

(1)删除了“疲劳-降低工效界限”的定义。

(2)对运动病、人体健康、振动知觉和舒适性 4 个方面分别建立了人体承受全身振动的评价标准,其中第 1 项的频率范围由 0.10~0.63 Hz 缩小到 0.1~0.5 Hz,后 3 项的频率范围由 1~80 Hz 扩展到 0.5~80 Hz。

(3)采用加权加速度均方根值  $a_w$  作为基本评价

方法,其计算公式为

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

(1)

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

频率加权函数  $W(f)$  可以表示为

$$W(f) = \begin{cases} 0.5 & 0.5 < f < 2 \\ f/4 & 2 < f < 4 \\ 1 & 4 < f < 12.5 \\ 12.5/f & 12.5 < f < 80 \end{cases}$$

(2)

式中: $f$  为频率(Hz)。

(4) 当采用基本评价方法出现低估结构的情况下,可采用 2 种附加评价方法。

① 持续加权加速度均方根值  $a_w(t_0)$

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

(3)

式中: $\tau$  为持续平均积分时间; $t$  为时间; $t_0$  为考察的时间(瞬时)。

当  $\tau$  取值很小时,即可评价瞬态振动或间发冲击的情况。

② 四次方振动剂量法

振动剂量值  $I_{VDV}$  定义为

$$I_{VDV} = \left[ \int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$$

(4)

(5) 当评价全身振动对人体健康和舒适性的影响时,若下列比值超过推荐值,尤其适合采用附加评价方法,公式为

$$\frac{I_{MTVV}}{a_w} = 1.5, \frac{I_{VDV}}{a_w T^{\frac{1}{4}}} = 1.75$$

式中: $I_{MTVV} = \max\{a_w(t_0)\}$ ,为最大瞬态振动值。

3 人体舒适性新评价指标

乘客行驶舒适性评价标准的提出要从以下 3 个方面综合考虑:①科学性,该标准从理论或试验上能表征乘客的受振量;②精确性,平行试验标准方差应较小。该标准应能反映汽车不同的行驶条件,如车辆车速、车辆参数等;③灵敏性,该标准应随振动量的变化而变化。

目前,评价道路平顺性,大部分都是采用人体加权加速度均方根值作为评价指标。一般车辆通过路桥过渡段时的时间很短,例如车速为 100 km/h,车身为 4 m,通过 8 m 的桥头搭板只需 0.43 s。鉴于此,本文提出了新的评价指标。根据车辆以不同速度通过路桥过渡段时所经历的时间不同,计算人体在通过路桥过渡段时“瞬间内”的加权加速度均方根

值,结合 ISO 2631-1-1997 中加权加速度均方根值与行驶舒适性的关系(表 1),综合评定人体通过路桥过渡段时的舒适性。这样不仅考虑到车辆通过路桥过渡段时的“瞬时性”,而且把加权加速度均方根值与国际标准 ISO 2631-1-1997 综合起来,可以更加客观准确地反映人体通过路桥过渡段时的舒适程度。

表 1 加权加速度均方根值与行驶舒适性的关系

加权加速度均方根值/(m·s <sup>-2</sup> )	人体舒适程度
<0.315	保持舒适
0.315~0.630	稍不舒适
0.5~1.0	有些不舒服
0.8~1.6	不舒适
1.25~2.50	非常不舒适
>2.0	特别不舒适

由于车辆通过路桥过渡段时的时间很短,其振动是典型的瞬态振动,计算过程如下。

人体加权加速度均方根值  $\sigma_a$  为

$$\sigma_a = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{0.5} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \dot{y}_1^2(t) dt \right]^{0.5}$$

(5)

式中: $y_1(t)$  为瞬时竖向位移。

根据巴什瓦等式知周期函数的平方在周期里的平均值等于其傅立叶系数的模数平方的级数和,所以人体加权加速度均方根值  $\sigma_a$  可写为

$$\sigma_a = \left[ \int_{0.5}^{80} (W(f) | a(f) |)^2 df \right]^{0.5} =$$

$$\left[ \int_{0.5}^{80} W(f) | y_1(f) |^2 df \right]^{0.5}$$

(6)

式中: $f = \omega/2\pi$ ; $a(f)$  为某一频率的对应的竖向加速度; $y_1(f)$  为某一频率对应的竖向位移。

频率加权函数  $W(f)$  如式(2) 所示。

4 加权加速度均方根值的测量

选用小轿车帕萨特 1.8T 和大客车宇通 ZK6119HB 作为测试用车,表 2 为这 2 种车型的对应参数。在车内安装压电式加速度传感器,测量车辆振动时传至人体的竖向加权加速度均方根值。

压电式加速度传感器属于惯性式传感器的一种,又称压电式加速度计。图 1 为压电式加速度传感器的原理图。它由质量块、压电元件和支座组成。支座与待测物刚性地固定在一起。压电式加速度传感器利用石英晶体等一些物质的压电效应,当待测物运动时,支座与待测物以同一加速度运动,压电元件受到质量块与加速度相反方向的惯性力的作用,在晶体的两个表面上产生交变电荷(电压)。当振动频率远低于传感器的固有共振频率时,传感器的输

出电荷(电压)与作用力成正比。电信号经前置放大器放大,即可由一般测量仪器测试出电荷(电压)大小,从而得知物体的加速度<sup>[11]</sup>。

表 2 车型对应参数

车型		宇通 ZK6119HB	帕萨特 1.8T
整车尺寸	长/mm	11 290	4 780
	宽/mm	2 500	1 740
	高/mm	3 580	1 470
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )		115	205
轴数		2	2
轴距/mm		5 550	2 803
座位数		49+1+1	5
最小离地间隙/mm		200	105

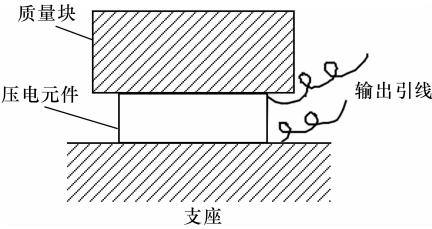


图 1 压电式加速度传感器原理

对车辆通过路桥过渡段时“瞬间内”的信号进行处理,车辆通过路桥过渡段所需要的时间  $t$  是选择信号段的前提。上桥时,时间  $t_1$  为车辆前轮上搭板到车辆后轮离开桥头伸缩缝所经历的时间;下桥时,时间  $t_2$  为车辆前轮接触桥头伸缩缝到车辆后轮离开搭板所经历的时间。

$$t = \frac{L + l}{v}$$

(7)

式中: $L$  为搭板长度; $l$  为车辆轴距; $v$  为车速。

本文调查的路桥过渡段搭板长度为 8 m,帕萨特轴距为 2.8 m,宇通轴距为 5.55 m。由此可以得到“信号段的长度”,表 3 为调查车辆在不同时速下通过路桥过渡段时所经历的时间。

表 3 车辆通过路桥过渡段时所经历的时间

时速/(km·h <sup>-1</sup> )	不同车型所经历时间/s	
	宇通 ZK6119HB	帕萨特 1.8T
60		0.66
80	0.63	0.50
100	0.50	0.40
120		0.33

以帕萨特小轿车为例,将其桥头跳车加速度信号分割为 3 个信号段(分别对应上搭板、搭板上、上桥头),信号总长度取上面的时间  $t$ 。在 Matlab 中编写程序,装载这些数据,进行计算和图形可视化,得到跳车加速度的最大值和加权加速度均方根值,并

画出加速度  $a$  随时间  $t$  的变化曲线图,如图 2 所示。

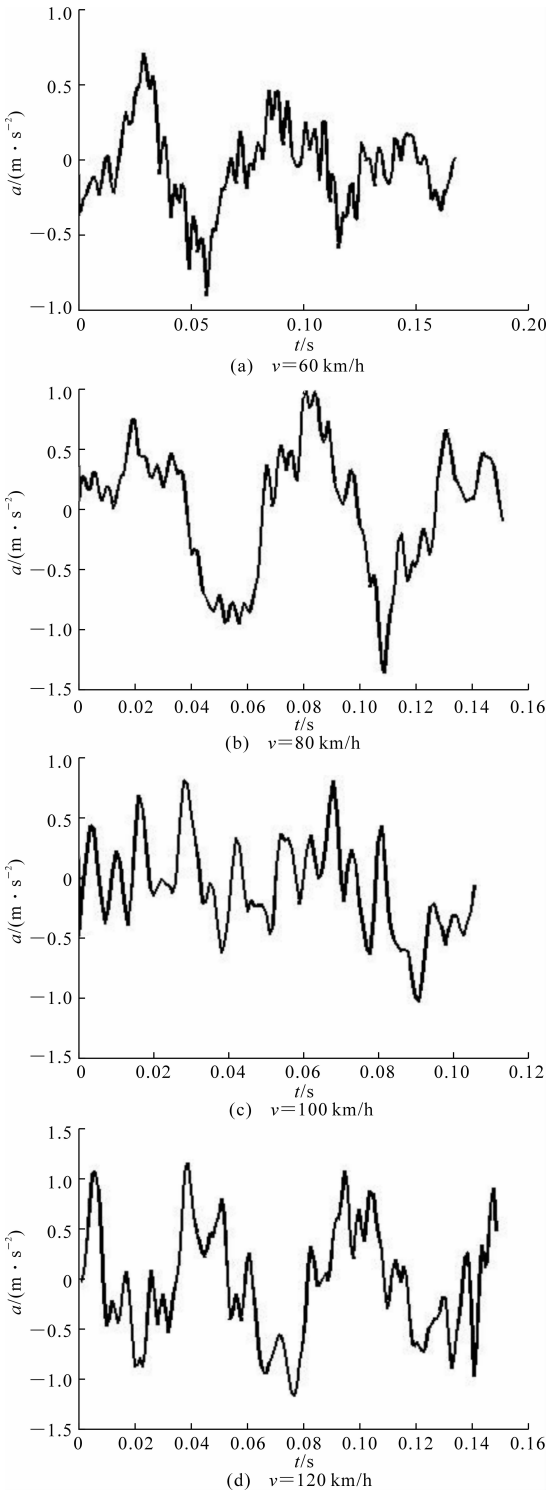


图 2 某一桥头不同速度下加速度随时间的变化曲线

根据压电式加速度传感器测出的加权加速度均方根值,结合 ISO 2631-1-1997 中加权加速度均方根值与行驶舒适性的关系(表 1),可以定量评定人体通过路桥过渡段时的舒适性。在此基础上,可以针对人体舒适性要求,控制车辆通过路桥过渡段的加权加速度均方根值,并根据加权加速度均方根

值与路桥过渡段差异沉降的对应关系,基于人体舒适性要求,提出路桥过渡段差异沉降控制标准。

## 5 评价方法的应用

近年来,京港澳(北京—香港——澳门)高速公路新郑段与郑焦晋(郑州—焦作—晋城)高速公路在长期交通荷载及环境荷载作用下,许多路桥过渡段出现差异沉降,部分沉降量甚至达到 5 cm 以上,严重影响了行车安全性和舒适性。本文以此作为试验路段,采用问卷调查和在宇通客车和帕萨特 1.8 T 小轿车内安装加速度传感器两种形式评价乘客通过路桥过渡段时的舒适性。此处以帕萨特 1.8 T 小轿车为例说明该方法的应用。

随机抽取不同性别、不同年龄、不同职业的人员参与帕萨特以 60 km/h、80 km/h、100 km/h、120 km/h 的速度通过路桥过渡段时的人体舒适性调查。对调查情况采用打分的形式进行统计分析。按照舒适性由好到差,得分依次分为 1 分、3 分、5 分、7 分,分值越大,乘客感觉越不舒适,桥头跳车越严重;反之,则桥头跳车不严重。同时,在小轿车座椅上安装加速度传感器(图 3)以测量车辆振动时传至人体的加权加速度均方根值。



图 3 固定在车座椅的加速度传感器

表 4 为对应桥头不同时速下,座椅加权加速度均方根值及问卷调查中乘客舒适性的综合评分,可分别从客观和主观两方面综合分析路桥过渡段桥头跳车的严重程度,进而为提出合理的量化指标提供依据。根据表 4 中测试结果,得出对应座椅加权加速度均方根值的人体舒适性评分范围如下页表 5 所示。

由表 4 可知,在同一桥头处,座椅加权加速度均方根值随车速的增大而增大,乘客评分也随着车速的增大呈升高趋势,也即,乘客舒适性随车速增加呈下降趋势。同时,人体舒适性评分结果与小轿车座椅加权加速度均方根值测试结果之间具有良好的相关性,评价结果与 ISO 2631-1-1997 基本吻合。可见,本文提出的评价方法可准确测量车辆通过路桥

表 4 座椅加权加速度均方根值测量及人体舒适性评分结果

高速公路	桩号	时速/ (km·h <sup>-1</sup> )	座椅加权加速度均 方根值/(m·s <sup>-2</sup> )	人体舒适 性评分
京港澳高速公路新郑段	K664+700 上行下桥	60	0.387 1	1.9
		80	0.452 6	2.6
		100	0.473 5	2.6
		120	0.494 4	3.4
	K662+868 上行上桥	60	0.393 3	3.7
		80	0.467 4	3.9
		100	0.551 1	4.8
	K662+868 上行下桥	60	0.311 9	2.4
		80	0.456 5	3.6
		100	0.499 9	3.8
郑焦晋高速公路	K1+550 上行上桥	60	0.834 2	4.6
		80	1.264 5	4.6
		100	1.388 2	5.2
		120	1.430 5	5.4
	K2+440 上行上桥	60	0.336 4	3.0
		80	0.391 4	3.7
		100	0.451 7	3.9
		120	0.487 9	5.0
	K2+440 上行上桥	60	0.488 7	3.6
		80	0.489 9	4.1
		100	0.621 3	4.6
	K9+750 上行上桥	80	0.484 7	4.1
		100	0.844 1	4.2
		120	0.942 5	4.9
	K10+450 上行上桥	60	0.381 3	3.1
		80	0.492 7	3.7
		100	0.817 2	4.2
	K2+950 上行上桥	60	0.498 1	3.4
		80	0.480 6	4.8
		100	0.756 7	5.0
	K2+950 上行上桥	80	0.815 7	3.2
		100	1.261 3	4.1
		120	1.264 4	5.3
	K7+820 上行上桥	60	0.499 9	3.9
		100	0.799 3	4.4
		120	1.059 2	4.9
	K7+820 上行上桥	60	0.667 4	4.1
		80	1.257 5	5.4
		100	1.305 1	5.9
	K1+100 上行上桥	60	0.489 7	3.2
		80	0.615 9	3.4
		100	0.625 2	4.6
	K1+100 上行上桥	60	0.509 8	3.2
		80	0.645 6	3.7
		120	1.077 3	3.9

表 5 座椅加权加速度对应最大加速度范围与评分范围

人体舒适程度	座椅加权加速度范围/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	评分
保持舒适	$<0.315$	1.0~2.4
稍不舒适	$0.315\sim0.63$	1.9~4.1
有些不舒服	$0.5\sim1.0$	3.2~5.0
不舒适	$0.8\sim1.6$	4.2~5.9
非常不舒适	$1.25\sim2.5$	无
特别不舒适	$>2.0$	无

过渡段时车辆的竖向加速度,从而客观评价人体舒适性。

6 结 语

(1)分析评述了 ISO 2631-1-1997 振动评价方法以及人体舒适性评价方法的研究现状,为新评价方法的提出奠定基础。

(2)采用通过路桥过渡段“瞬间内”人体加权加速度均方根值,作为车辆通过路桥过渡段时人体舒适性的评价指标。

(3)提出新的评价方法,即根据车辆以不同速度通过路桥过渡段时所经历的时间不同,计算人体在“瞬间内”加权加速度均方根值,结合 ISO 2631-1-1997 中加权加速度均方根值与行驶舒适性的关系,综合评定人体通过路桥过渡段时的舒适性;并可为提出基于舒适性的路桥过渡段差异的沉降控制标准提供理论依据。

参考文献:

References:

[ 1 ] 徐国宇,梅雪松,吴序堂. 多自由度人体-车辆-道路系统的建模与模拟[J]. 机械工程学报,1999,35(2): 105-108.  
XU Guo-yu, MEI Xue-song, WU Xu-tang. Modeling and simulation of the multi-degree vehicle-occupant-road system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(2): 105-108.

[ 2 ] 张丙强,李 亮. 人-车-路耦合系统振动分析及舒适度评价[J]. 振动与冲击,2011,30(1):1-5,15.

ZHANG Bing-qiang, LI Liang. Dynamic model and comfortableness evaluation of a body-vehicle-road coupled system[J]. Vibration and Impact, 2011, 30(1):1-5,15.

[ 3 ] ISO 2631-1-1982, Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration[S].

[ 4 ] ISO 2631-1-1997, Mechanical vibration and impact-evaluation of human exposure to whole-body vibration part 1: general requirement[S].

[ 5 ] 王钧利,马春燕. 汽车乘客振动舒适性评价指标的研究[J]. 工程力学,1998,15(A03):231-235.  
WANG Jun-li, MA Chun-yan. Evaluation index study of vehicle passenger vibration comfort[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(A03):231-235.

[ 6 ] 田德培. 汽车中人体振动的的评价方法研究[J]. 汽车科技,1997(4):12-16,23.  
TIAN De-pei. Evaluation method of car body vibration[J]. Automotive Technology, 1997(4):12-16,23.

[ 7 ] 郑 郇. 汽车振动舒适性的测量与评价[J]. 客车技术与研究,2000,22(4):23-26.  
ZHENG Yun. Measurement and evaluation of auto vibration comfort[J]. Bus Technology and Research, 2000, 22(4):23-26.

[ 8 ] 张洪亮. 路桥过渡段车路动力学分析及容许差异沉降研究[D]. 西安:长安大学,2003.

[ 9 ] 黄启钧. 在随机激励下卧铺客车系统动态特性及响应的分析[J]. 客车技术与研究,1995,17(2):75-80.  
HUANG Qi-jun. Analysis of sleeping bus system dynamic characteristics and response under random excitation[J]. Bus Technology and Research, 1995, 17(2):75-80.

[10] 胡振东,王华林. 高速车辆过桥时的舒适性分析[J]. 振动与冲击,2002,21(4):104-105.  
HU Zhen-dong, WANG Hua-lin. Analysis of high-speed vehicles comfort cross the bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(4):104-106.

[11] 余成波. 传感器原理与应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2010.