

不平整条件下过渡段车辆运行平稳性*

沈宇鹏^{1,2,3}, 魏庆朝^{1,2}, 韩浩¹, 左瑞芳¹

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院 北京, 100044) (2. 轨道工程北京市重点实验室 北京, 100044)

(3. 北京市轨道交通线路安全与防灾工程技术研究中心 北京, 100044)

摘要 以内蒙古 110 国道改扩建项目为背景, 建立了路桥过渡段三维模型及七自由度整车模型, 分析了当路面出现波浪形不平顺以及左右车轮处路面沉降不均等破坏类型时, 以车体垂向加速度、车轮动荷载系数以及前后轮垂向位移差作为评价指标, 综合评价搭板对路面不平顺的改善效果。结果表明: 无搭板时, 随着路面等级从 A 降低到 C, 车体最大垂向加速度由 0.96 m/s^2 增大到 3.78 m/s^2 , 前后轮最大垂向位移差由 20.5 mm 增大至 114.8 mm ; 设置搭板后, 最大垂向加速度由 0.87 m/s^2 增大到 2.93 m/s^2 , 前后轮最大垂向位移差由 18.7 mm 增大到 34.2 mm ; 搭板的设置可以将前轮动荷载系数降低到更高一级路面的水平。在左右车轮所处路面沉降不均时, 由无搭板到板厚 30 cm 时, 车体最大垂向加速度由 1.92 m/s^2 降低到 1.13 m/s^2 ; 板厚由 30 cm 增大到 45 cm 时, 最大垂向加速度只从 1.13 m/s^2 降低到 1.03 m/s^2 , 均处在人体不舒适的范围之内。可见, 当左右车轮所处路面沉降不均时, 搭板的改善效果不显著, 需要采取其他工程补救措施。

关键词 搭板; 波浪形不平顺; 路面不平顺; 动荷载系数

中图分类号 U416.1

1 问题的引出

由于道路自身因素及外部环境的影响, 新建道路或是已经运营多年的既有道路的路面均存在不同程度的不平整。路面不平顺会使行驶车辆产生附加振动, 进而对路面产生附加荷载, 造成路面破坏的加剧。在路桥过渡段上, 由于桥台与路基之间存在差异沉降, 这种破坏现象更为严重^[1]。通常, 路面不平顺包括路面波浪形不平顺以及道路渠化交通引起的道路横向沉降不均等。实际路面波形不平顺模型如图 1 所示^[2]。路面不平顺降低了车辆的行驶速度和道路的通行能力, 是道路交通安全的重要隐患, 不仅会影响行车的安全性和舒适性, 也会加剧车辆的轮胎磨损, 增加运输成本。因此, 如何降低路面的不平顺性, 特别是过渡段路面的不平顺性是路桥过渡段研究的关键。对此, 许多学者开展了广泛研究。

梁波等^[3]通过建立车辆—道路垂向耦合动力模型, 得到了车辆—道路系统的动力平衡方程, 把路面不平顺设定为振动激励函数, 对动力平衡方程进行求解, 通过编程并结合算例, 分析了车辆运行速度、

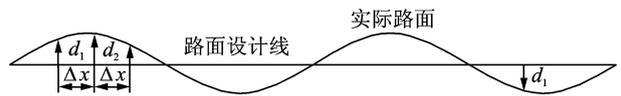


图 1 路面波形曲线图

Fig. 1 The pavement wave curve

路面不平顺度的矢高和波长与车辆动荷载及车身加速度的关系。王康^[4]将搭板计算工况分成均匀沉降和局部脱空两种情况, 计算结果表明, 搭板截面内力较大, 配筋量较多, 适宜长度为 $5 \sim 8 \text{ m}$ 。李智峰等^[5]对设置搭板的路桥过渡段路面进行简化, 采用 D-P 弹塑性本构模型描述路基土(包括地基)材料的本构关系, 通过改变搭板厚度和长度分析了路桥过渡段差异沉降对搭板性能的影响。研究发现, 在一定沉降差异的影响下, 增加搭板长度仅利于搭板的受力, 搭板厚度的增加对搭板的受力和变形均有利。搭板由于其刚度比较大, 在过渡段中能改善路面的不平顺^[6], 但是在实际工程中对于搭板改善过渡段路面不平顺的具体效果仍没有进行量化。当左右车轮处路面沉降不均时, 搭板对车辆运行平稳性的改善效果还不清楚。

* 交通运输部建设科技资助项目(2013318J06200); 国家自然科学基金资助项目(41772330); 第 49 批留学归国人员启动基金资助项目

收稿日期: 2017-02-09; 修回日期: 2017-05-02

笔者通过 ABAQUS 有限元软件建立了路桥过渡段及七自由度整车耦合三维模型,并用现场测试数据验证模型的正确性。研究了搭板对改善不同路面等级不平顺效果以及车辙的影响,为实际工程中搭板的运用提供一定的参考。

2 路面不平整的原因及表现形式

产生路面不平整的主要原因^[7]包括:a.路基不均匀沉降;b.桥头或涵洞与道路接头处及伸缩缝引起的桥头跳车;c.路基不平整对路面平整度的影响;d.路面摊铺机械及工艺对平整度的影响。

由于路面材料的不同,水泥路面和沥青路面常见的破坏类型也会不同。水泥路面常见的破坏类型^[8]如表 1 所示。

表 1 水泥路面常见破坏类型

Tab. 1 Classical types of the cement pavement damages

| 序号 | 破坏名称 | 破坏形式 |
|----|--------|------------------------|
| 1 | 裂缝(断裂) | 龟裂、纵向裂缝、横向裂缝、交叉裂缝、角隅裂缝 |
| 2 | 变形 | 路基下层、路面隆起 |
| 3 | 接缝损坏 | 唧泥、错台及拱起和接缝碎裂 |
| 4 | 表面层破坏 | 板面起皮、剥落、麻面、露骨、松散 |

沥青路面由于受行车荷载的反复作用以及在自然因素的不断影响下会逐渐出现破坏,造成路用性能逐步恶化,常见的破坏类型^[9]主要有车辙、裂缝、剥落、波浪以及泛油等。车辙主要是由于沥青路面在行车荷载的作用下,被压密、挤压、路面轮迹带下沉、两侧面鼓起进而形成波峰和波谷状,波峰和波谷的高差即为车辙深度^[10]。道路渠化交通主要是由于沥青路面受力不均而产生车辙,在长期累积荷载作用下形成的道路沿横向沉降不均^[11]。

3 车辆运行平稳性评价指标的选取

对于车辆行驶舒适性的评价,文献^[12]提出了吸收功率(absorbed power,简称 AP)法。国际标准化组织从 20 世纪 60 年代开始制定“人体承受全身振动的评价指标”,并在 1974 年颁布了 IS02631-1974(E)国际标准,经过几次补充和修订,确定为国际标准 IS02631/1-1985^[13]。目前,IS02631 推荐的 1/3 倍频带分别评价方法、总加权值评价方法及其评价指标仍被普遍采用^[14-15]。

动荷载系数是评价车辆振动剧烈程度的一个重要指标。在公路标准载荷下,一般 A 级路面动载系

数为 1.12~1.19,B 级路面动载系数为 1.23~1.38,C 级路面动载系数为 1.48~1.76,D 级路面动载系数为 2.00~2.52^[16]。动荷载系数越大,说明车辆在道路上运动时的振动越剧烈,行车越危险。

笔者选取车体垂向加速度、车轮动荷载系数、前后轮垂向位移差作为车辆运行平稳性的评价指标。车体垂向加速度越大,人体越不舒适;动荷载系数越大,车辆振动越剧烈;前后轮垂向位移差越大,安全性和舒适性越差。加权加速度均方根与人体行驶舒适性的关系详见文献^[13]。

4 模型建立及验证

利用 ABAQUS 有限元分析软件^[17]建立了路桥过渡段及七自由度整车耦合三维模型,如图 2 所示。分析了搭板对路面波浪形不平顺以及道路渠化交通的改善作用,侧视图如图 3 所示。行车方向为由路基侧驶入桥梁。

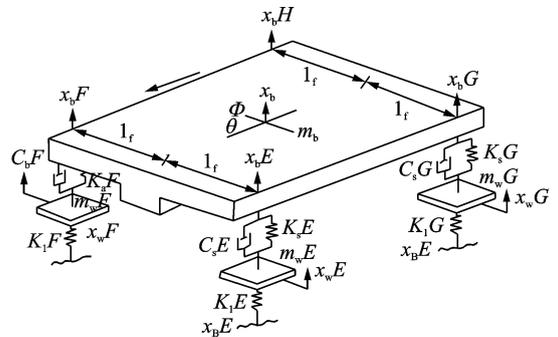


图 2 七自由度整车模型

Fig. 2 Vehicle model in seven DOFs

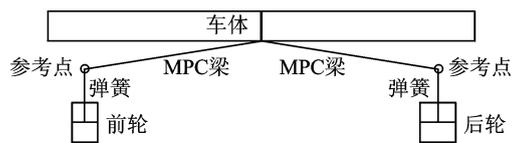


图 3 七自由度整车模型侧视图

Fig. 3 Vehicle model in seven DOFs' side view

模型中的参数^[18-23]分别如下: m_b 为汽车簧载质量; $m_w i(i = E, F, G, H)$ 为非悬挂质量; $K_s i(i = E, F, G, H)$ 为悬挂系统刚度; $K_l i(i = E, F, G, H)$ 为轮胎刚度; $C_s i(i = E, F, G, H)$ 为悬挂系统阻尼; $X_w i(i = E, F, G, H)$ 为非悬挂质量的垂直位移; $X_b i(i = E, F, G, H)$ 为悬挂质量的垂直位移; X_b 为悬挂质量质心处的垂直位移; $X_b i(i = E, F, G, H)$ 车轮处路面的随机激励即路面之间的不平度; E, F 为车体前轮对; G, H 为车体后轮对; L_l 为各轴至车体质心的垂直距离; θ, φ 为簧上系统质心绕轴的转角。

以解放 CA1253P7K1L11T16×4 型汽车为例,构建的七自由度整车模型参数^[18]如表 2 所示。

表 2 车辆模型参数

Tab. 2 Vehicle model parameters

| 模型参数 | | 符号 | 单位 | 数值 |
|---------------|-----------|----------------|------------------------------------|-----------|
| 质量 和 惯量 | 车身质量 | m_b | kg | 26 113 |
| | 俯仰转动惯量 | I_p | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | 181 216 |
| | 侧倾转动惯量 | I_r | $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ | 33 153 |
| | 前轴的簧下质量 | $m_w E, m_w F$ | kg | 490 |
| | 后轴的簧下质量 | $m_w G, m_w H$ | kg | 808 |
| 刚度 和 阻尼 | 前轴轮胎刚度 | $K_1 E, K_1 F$ | N/m | 875 082 |
| | 后轴轮胎刚度 | $K_1 G, K_1 H$ | N/m | 1 750 164 |
| | 前悬架刚度 | $K_s E, K_s F$ | N/m | 242 604 |
| | 后悬架刚度 | $K_s G, K_s H$ | N/m | 485 208 |
| | 前悬架阻尼系数 | $C_s E, C_s F$ | $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ | 2 190 |
| | 后悬架阻尼系数 | $C_s G, C_s H$ | $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ | 7 882 |
| 尺寸 大小 | 车体质心距前轴距离 | M | m | 3.60 |
| | 车体质心距后轴距离 | N | m | 1.45 |
| | 前轮距 | B_f | m | 2 |
| | 后轮距 | B_r | m | 2 |

由图 3 整车模型侧视图可以看出,车体簧载质量在车辆质心处通过 MPC 梁传到车辆悬挂系统,即参考点处,然后通过悬挂系统传到车轴,再通过车轴传到轮胎,最后通过轮胎与路面之间弹性接触传到路面。

路面纵向波形不平整是将不平整波形数据用强制位移施加到路面网格节点上,路面波形被简化为沿道路纵向凹凸不平的折线位移。因此,路面网格需尽可能采用小尺寸,波形图如图 4 所示。

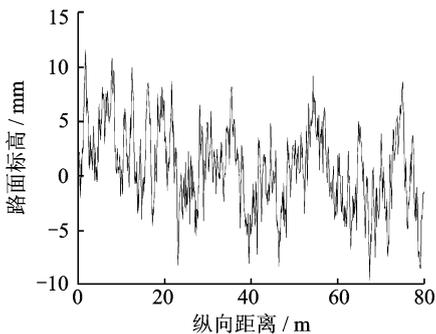


图 4 A 级路面波形图

Fig. 4 A-grade road waveform

对左右车轮所处路面沉降不均进行简化时,主要是将左右车轮所处路面分别施加一个纵向的沉降曲线,如图 5 所示。

为了验证所建立模型的正确性,笔者采用七自由度重载车辆模型参数^[16],将沥青路面结构简化为 4 层:沥青面层、半刚性材料基层、半刚性材料底基

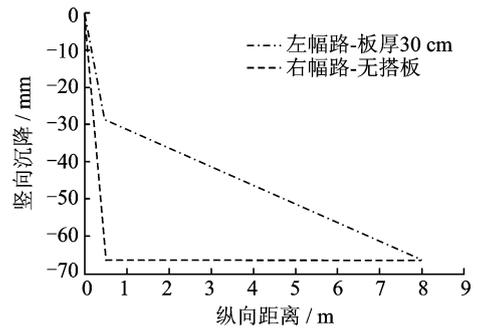


图 5 路面不均匀沉降示意图

Fig. 5 The road uneven settlement schematic diagram

层及土基层。各层均由均质、各向同性的线弹性材料组成,各结构层参数如表 3 所示。在面层下部设置混凝土搭板,搭板厚度为 30 cm,材料参数为 C30 混凝土。

表 3 沥青路面结构层材料参数

Tab. 3 The physical and mechanical parameters of asphalt pavement

| 结构层 | 厚度/m | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|-----|------|----------|------|---------------------------------------|
| 面层 | 0.18 | 1 200 | 0.35 | 2 613 |
| 基层 | 0.2 | 1 100 | 0.35 | 2 083 |
| 底基层 | 0.2 | 400 | 0.4 | 1 932 |
| 土基 | 5.42 | 50 | 0.4 | 1 926 |

考虑路面结构在水平和竖直方向的无限伸展,边界条件为底部完全固定, x, z 方向固定,深度 y 方向无约束。对于桥梁结构采取 $3 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ 梁式箱梁,箱梁下部的桥墩结构用竖向弹簧代替,各结构层材料均匀,层与层之间连续。轮胎采用面积等效的办法^[24]简化为长方形,前后轮胎的尺寸分别为 $S_f = B_f \times L_f = 0.064 \text{ m}^2$, $S_r = B_r \times L_r = 0.139 5 \text{ m}^2$ (其中: S 为车轮面积; B 为车轮宽度; L 为车轮长度;下标 f, r 分别表示前轮和后轮)。

在道路的同一点处,当车辆分别以 $5 \text{ km}/\text{h}$ 和 $70 \text{ km}/\text{h}$ 通过上述路面时,将计算得到的道路纵向应变的数据与文献^[25]中的实测数据进行比较,验证模型的正确性,如图 6 所示。可以看出,模型和实测数据的趋势非常吻合,都是前后轮分别经过该路段时产生两个极值,说明模型采用的假设条件和计算结果符合实际情况。

5 结果分析

5.1 路面波浪形不平顺的动力特性

根据我国《机械振动道路路面谱测量数据报告》

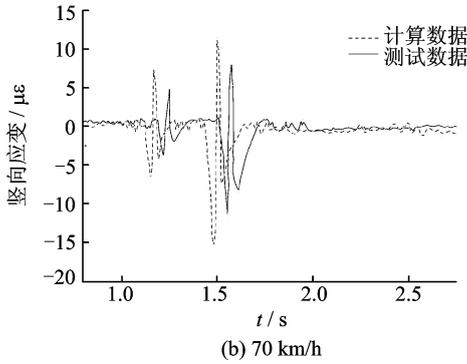
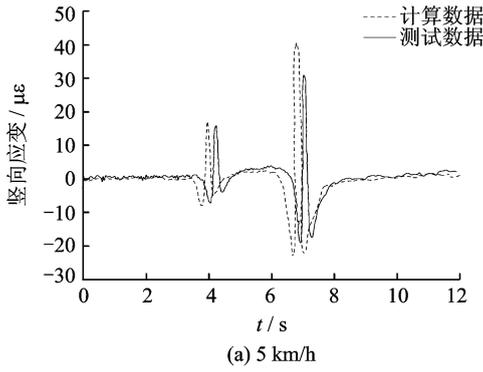


图 6 路基底部纵向应变对比

Fig. 6 Comparison chart between field measure and simulation of vertical strain on the bottom of the sub-grade

(GB/T 7031-2005/ISO 8608:1995)^[26]中的规定,基于路面不平整程度将道路分为 A~H 共 8 个等级,并给出了各自的功率谱密度,如图 7 所示。

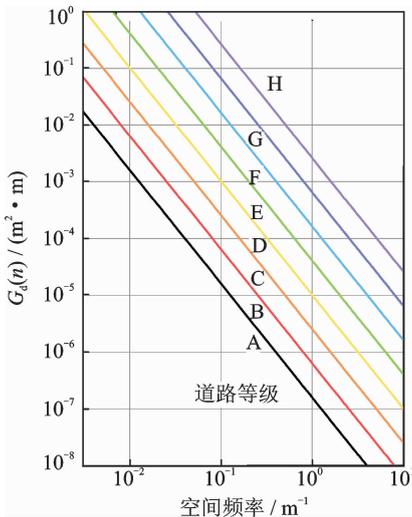


图 7 道路分级与位移功率谱密度

Fig. 7 The relation curve between road classification and displacement power spectrum density

笔者采用傅里叶逆变换方式,将 A,B,C 级路面的位移功率谱密度转化为路面不平度的空间分布,如图 4,8,9 所示。该车辆对应的不平顺有效波长范围为 1.11~33.3 m,不平顺有效空间频率范围为

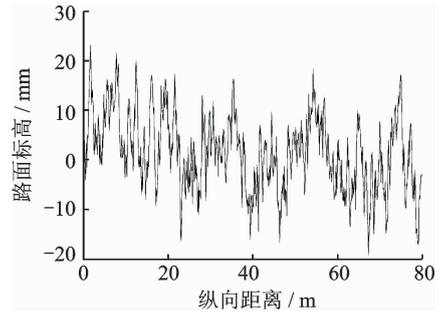


图 8 B 级路面波形图

Fig. 8 B-grade road waveform

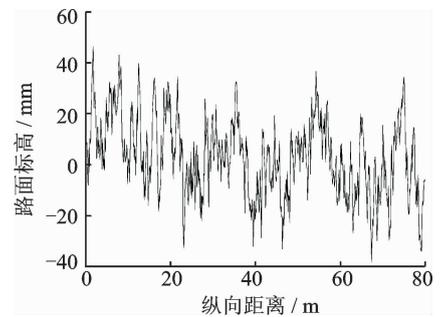


图 9 C 级路面波形图

Fig. 9 C-grade road waveform

0.03~0.9 m⁻¹。3 种路面不平度样本的统计特征在 0.03~0.9 m⁻¹的空间频率范围内,与规范[19]中对应等级的功率谱密度曲线接近,可以代表该等级路面进行动力学分析。

分别取 A,B,C 三种路面建立路面三维不平度模型,计算不同等级路面对车辆运行平稳性的影响。以 B 级路面为例,分析在过渡段有且无搭板的情况下,路面随机不平顺对车辆运行平稳性的影响。

图 10 为车体的垂向加速度时程曲线。当车辆刚进入过渡段时,设置搭板对减小车体振动效果不明显。当经过 0.25 s 车辆完全驶入过渡段后,在有设置搭板路段,车体垂向加速度变化的幅值越来越小,最大值仅为 1.40 m/s²,处于人体不舒适标准^[12]。对于无搭板的路段,车辆在进入过渡段过程中,车体加速度变化幅度大,最大达 1.62 m/s²,处

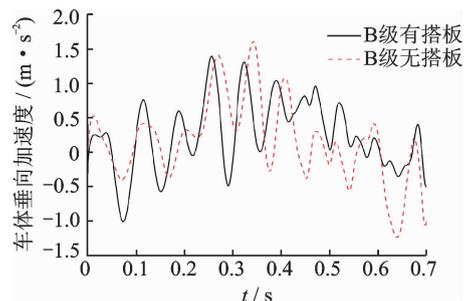


图 10 车体垂向加速度时程曲线图

Fig. 10 Car's vertical acceleration-time curve

于人体非常不舒适标准^[12]。

图 11 为车辆的前后轮垂向位移差时程曲线。可以看出,车辆的前后轮竖向位移差在有、无搭板的情况下对比吻合。当经过 0.25 s 车辆完全进入过渡段后,在有搭板时,前后轮垂向位移差最大值为 32.9 mm,然后保持在 10 mm 左右,即车体的倾斜度为 0.65%;在无搭板时,前后轮垂向位移差最大值为 38.4 mm,即车体的倾斜度达 0.76%,且以一个较大的幅度上下波动。

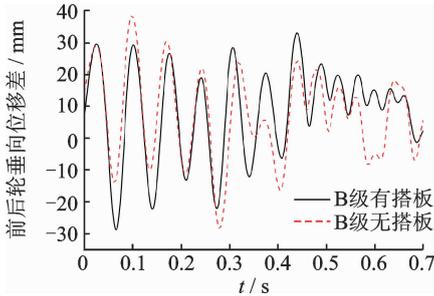


图 11 前后轮垂向位移差时程曲线图

Fig. 11 The front-rear wheel's vertical displacement difference-time curve

图 12,13 分别为前、后轮动荷载系数时程曲线。有、无搭板时,后轮最大动荷载系数基本保持在 2.10 左右;无搭板时前轮最大动荷载系数为 4.51,设置搭板可以将其降低到 4.43。

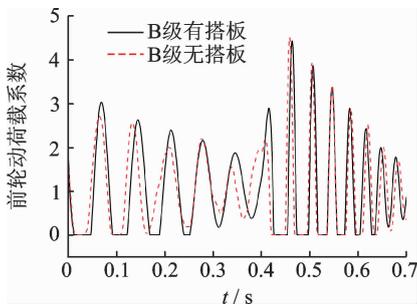


图 12 前轮动荷载系数时程曲线

Fig. 12 The front-wheel's DLC-time curve

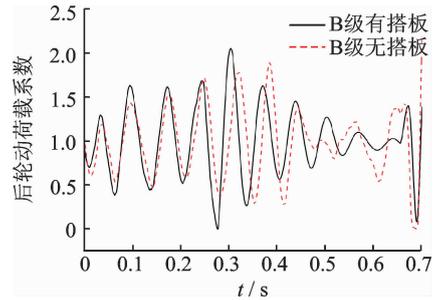


图 13 后轮动荷载系数时程曲线

Fig. 13 The rear-wheel's DLC-time curve

同样的方法得到 A 级和 C 级路面工况下车辆的评价指标值。对其进行整理,得到不同路面下车辆运行指标值,如表 4 所示。路面等级与车体加速度曲线如图 14 所示。

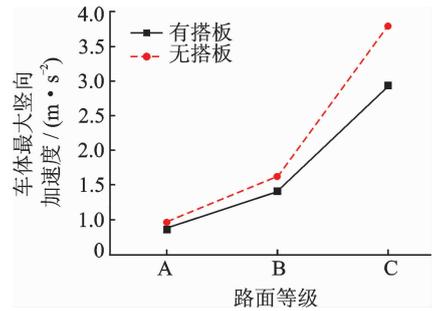


图 14 路面等级与车体加速度关系曲线

Fig. 14 The relationship between car's vertical acceleration and road grade

图 15 为路面等级与前后轮竖向位移之差关系曲线。可以看出,路面等级越低,前后轮垂向位移差越大;路面等级越低,搭板对前后轮垂向位移差的减小越明显。

图 16 为路面等级与前后车轮动荷载系数关系曲线。可以看出,随着路面等级的降低,前后车轮的最大动荷载系数都随之增大;有无搭板对后轮动荷载系数影响不大;设置搭板可明显降低前轮动荷载系数。

表 4 不同等级下车辆运行平稳性评价指标值

Tab. 4 Vehicle riding comfort evaluation index value under different levels

| 路面等级 | 车体垂向加速度 | 人体舒适度 | 前、后轮最大垂向位移差/mm | 车体最大倾斜度/% | 最大动荷载系数 |
|--------|--------------------------|-------|----------------|-----------|------------|
| | 最大值/(m·s ⁻²) | | | | 前轮/后轮 |
| 无搭板,A级 | 0.96 | 有些不舒适 | 20.5 | 0.41 | 3.13/1.92 |
| 有搭板,A级 | 0.87 | 有些不舒适 | 18.7 | 0.37 | 2.22/1.56 |
| 无搭板,B级 | 1.62 | 非常不舒适 | 38.4 | 0.76 | 4.51/2.14 |
| 有搭板,B级 | 1.40 | 不舒适 | 32.9 | 0.65 | 4.43/2.05 |
| 无搭板,C级 | 3.78 | 特别不舒适 | 114.8 | 2.27 | 10.36/2.89 |
| 有搭板,C级 | 2.93 | 特别不舒适 | 34.2 | 0.68 | 2.49/3.15 |

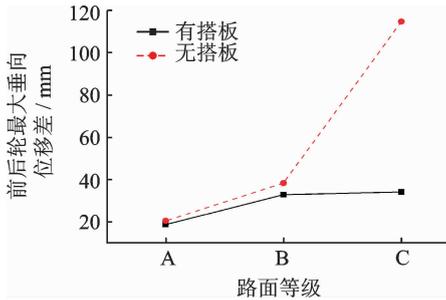


图 15 路面等级与前后轮垂向位移差关系曲线

Fig. 15 The relationship between the front-rear wheel's vertical displacement difference and road grade

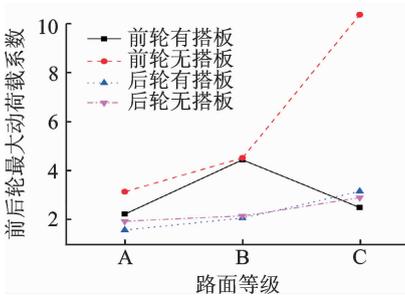


图 16 路面等级与前后轮垂向位移差关系曲线

Fig. 16 The relationship between the wheels' DLC and road grade

5.2 左右车轮所处路面沉降不均的动力特性

针对左右车轮所处路面沉降不均的现象,主要考虑两种情况:a. 右侧车轮处在没有搭板的道路沉降中、左侧车轮处在有搭板且搭板厚度为 30 cm 的道路沉降中,如图 5 所示;b. 右侧车轮处在有搭板且搭板厚度为 45 cm 的道路沉降中、左侧车轮处在有搭板且搭板厚度为 30 cm 的道路沉降中,如图 17 所示。

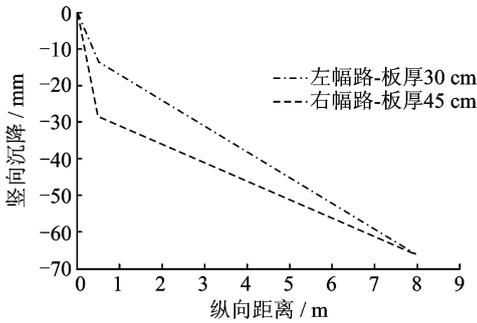


图 17 路面不均匀沉降示意图

Fig. 17 The road uneven settlement schematic diagram

车辆进入过渡段时,车体垂向加速度时程曲线如图 18 所示。可以看出,当左侧车轮所处路面搭板厚度为 30 cm 时,随着右侧车轮所处路面搭板厚度的增加,车体的垂向加速度逐渐减小;右侧车轮处在

无搭板的路面时,车体的最大垂向加速度为 1.92 m/s^2 ;右侧车轮处在搭板厚度为 30 cm 时,车体最大垂向加速度为 1.13 m/s^2 ;右侧车轮处在搭板厚度为 45 cm 时,车体最大垂向加速度为 1.03 m/s^2 。相对于右侧车轮处在没有搭板下路面,处在搭板厚度为 30 cm 路面时,车体垂向最大加速度变化显著,降低了 41.1%。当搭板厚度由 30 cm 增加到 45 cm 时,搭板对车体加速度的改善效果不明显。

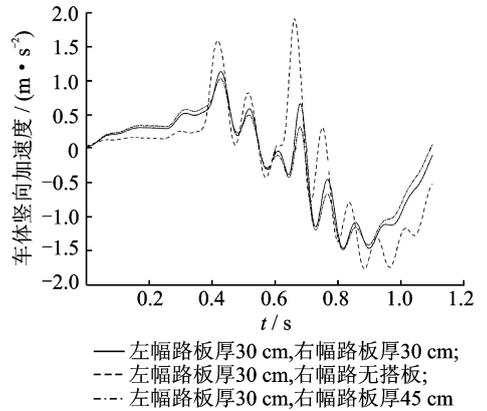


图 18 车体垂向加速度时程曲线

Fig. 18 Car body's vertical acceleration-time curve

车辆进入过渡段时,车体前、后左右轮垂向位移差时程曲线分别如图 19,20 所示。当左侧车轮处在板厚都为 30 cm 路面、右侧车轮处在无搭板路面时,前、后左右轮最大垂向位移差均为 -37.5 mm ,即车体的倾斜角度为 0.74%。右侧车轮处在板厚为 30 cm 路面时,前、后左右轮垂向位移差为 0,车辆行驶非常平稳。右侧车轮处在板厚为 45 cm 路面时,前、后左右轮最大垂向位移差为 9.8 mm,即车体倾斜角度仅为 0.19%。可见,从车轮垂向位移差角度考虑,搭板对改善左右车轮所处路面沉降不均的效果比较明显。

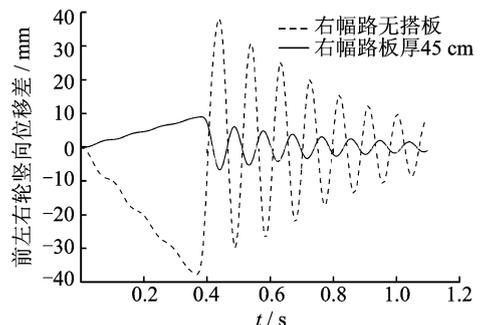


图 19 前左右轮垂向位移差时程曲线

Fig. 19 The front-left wheel and front-right wheel's vertical displacement difference-time curve

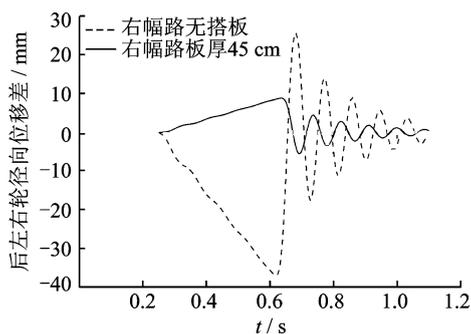


图 20 后左右轮垂向位移差时程曲线

Fig. 20 The rear-left wheel and rear-right wheel's vertical displacement difference-time curve

6 结 论

1) 车体加速度、车轮动荷载系数及前后轮垂向位移差能够直观、精确地反应车辆运行变化规律,可以作为评价车辆运行平稳性评价指标。

2) 无搭板时,随着路面等级的降低,车辆振动的越来越剧烈,此时车体最大垂向加速度由 0.96 m/s^2 增大到 3.78 m/s^2 。当路面为 C 级时,人体已经感到特别不舒适,前后轮最大垂向位移差由 20.5 mm 增大至 114.8 mm 。

3) 有搭板时,随着路面等级的降低,车体最大垂向加速度由 0.87 m/s^2 增大到 2.93 m/s^2 。当路面为 C 级时,人体依旧感到特别不舒适,但较无搭板情况有所缓解。前后轮最大垂向位移差由 18.7 mm 增大到 34.2 mm ,相对于无搭板时,搭板对等级更低的路面的改善效果更加明显。

4) 搭板的设置对改善后轮动荷载系数作用不大,但是可以有效地降低前轮动荷载系数,并将其提高到更高一级路面水平。

5) 在考虑搭板对左右车轮所处路面沉降不均的改善效果时,当由无搭板到板厚为 30 cm 的过程中,车体最大垂向加速度由 1.92 m/s^2 降到 1.13 m/s^2 。随着搭板厚度由 30 cm 增大到 45 cm 的过程中,车体最大垂向加速度由 1.13 m/s^2 降到 1.03 m/s^2 ,此时最大加速度仍处在人体不舒适的范围之内。可见,当道路出现左右车轮所处路面沉降不均时,搭板对车体垂向加速度的改善效果不显著,需采取其他工程补救措施。

参 考 文 献

[1] 吴庆雄,陈宝春,奚灵智. 路面平整度 PSD 和 IRI 评

价方法比较[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(1): 36-41.

Wu Qingxiong, Chen Baochun, Xi Lingzhi. Comparison of PSD method and IRI method for road roughness evaluation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 36-41. (in Chinese)

[2] 张栋. 基于路面实测值建立沥青路面平整度数学模型[D]. 重庆:重庆交通大学, 2011.

[3] 梁波,苏世毅,罗红. 不平整条件下车-路耦合作用动力分析[J]. 工程力学, 2009, 26(3):189-194.

Liang Bo, Su Shiyi, Luo Hong. Coupled dynamic analysis of vehicle-road system under roughness conditions[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3):189-194. (in Chinese)

[4] 王康. 关于桥头搭板的设计和计算问题[J]. 河北工学院学报, 1995, 24(1):12-20.

Wang Kang. The design and calculation with regard to the transition slab on bridgehead [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 1995, 24(1):12-20. (in Chinese)

[5] 李智峰,陶向华,李冬梅. 路桥过渡段差异沉降对搭板性能的影响[J]. 公路工程, 2009, 34(1): 77-80.

Li Zhifeng, Tao Xianghua, Li Dongmei. The influence of slab performance on differential settlement of bridge approach[J]. Highway Engineering, 2009, 34(1): 77-80. (in Chinese)

[6] 俞永华,谢永利,杨晓华. 桥头搭板受力特性及适用性[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 51-56.

Yu Yonghua, Xie Yongli, Yang Xiaohua. Mechanics property and adaptability of approach slab[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3):51-56. (in Chinese)

[7] 颜景波. 沥青路面不平整的原因分析及相关处理措施[J]. 北方交通, 2009(5): 33-36.

Yan Jingbo. Reasons of irregularity of asphalt pavement and concerning treating measures[J]. Northern Communications, 2009 (5): 33-36. (in Chinese)

[8] 廖文来,张君禄,叶尧辉. 某道路路面破损分析及处治对策[J]. 工业建筑, 2014, 44(S): 1071-1073.

Liao Wenlai, Zhang Junlu, Ye Yaohui. Analysis of a road surface damage and treatment strategies[J]. Industrial Construction, 2014, 44(S): 1071-1073. (in Chinese)

[9] 贾渝,赵延庆,张全庚. 再论沥青路面结构层厚度与混合料类型的选择[J]. 现代交通技术, 2005(5): 1-3.

Jia Yu, Zhao Yanqin, Zhang Quangeng. Rediscussion on thickness of the layer structure of asphalt pavement and selection of the mixture type[J]. Modern Transportation Technology, 2005(5): 1-3. (in Chinese)

- [10] 王辉,李雪连,张起森. 高温重载作用下沥青路面车辙研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(5): 139-144.
Wang Hui, Li Xuelian, Zhang Qisen. Rutting in asphalt pavement under heavy load and high temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 139-144. (in Chinese)
- [11] 张久鹏,黄晓明,王晓磊. 基于粘弹塑性理论的沥青路面车辙分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(10): 20-24.
Zhang Jiupeng, Huang Xiaoming, Wang Xiaolei. Analysis of asphalt pavement rut based on elastic-viscoplastic theory[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(10): 20-24. (in Chinese)
- [12] Lee R A, Pradko F. Analytical analysis of human vibration[R]. [S. l.]: SAE Technical Paper, 1968.
- [13] ISO. Guide for the evaluation of human exposure to whole body vibration, standard 2631[S]. [S. l.]: International Organization for Standardization, 1985.
- [14] 杜峰. 路面、人体及汽车平顺性客观评价研究[D]. 广州:华南理工大学, 2016.
- [15] 杨春风,解帅,孙吉书. 基于路面不平整度的车辆动荷载系数分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2015, 34(4): 77-80.
Yang Chunfeng, Xie Shuai, Sun Jishu. Vehicle dynamic load coefficient analysis based on pavement roughness [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2015, 34(4): 77-80. (in Chinese)
- [16] 王崇涛. 路桥过渡段差异沉降与动力响应研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
- [17] 廖公云,黄晓明. 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京:东南大学出版社, 2014: 231-264.
- [18] Shi Xiaomin, Cai S. Simulation of dynamic effects of vehicles on pavement using a 3D interaction model [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(10): 736-744.
- [19] 许海亮,袁勇,屈铁军,等. 考虑路面不平整度因素的车路耦合振动模型的建立[J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 152-156.
Xu Hailiang, Yuan Yong, Qu Tiejun, et al. Dynamic model for a vehicle-pavement coupled system considering pavement roughness [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 152-156. (in Chinese)
- [20] 魏连雨,杨政龙,李思倩. 货车对不平整路面的动荷载分析[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2014, 33(5): 70-72.
Wei Lianyu, Yang Zhenglong, Li Siqian. Truck dynamic load on uneven pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(5): 70-72. (in Chinese)
- [21] 卢正,姚海林,胡智. 基于车辆-道路结构耦合振动的不平整路面动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 232-238.
Lu Zheng, Yao Hailin, Hu Zhi. Dynamic response analysis of rough pavement under vehicle-rough system coupled vibration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 232-238. (in Chinese)
- [22] 檀润华,陈鹰,姚东方,等. 路面随机激励下的汽车振动仿真[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 20(2): 45-48.
Tan Runhua, Chen Ying, Yao Dongfang, et al. Simulation of suspension dynamics under the excitation of random road surface [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000, 20(2): 45-48. (in Chinese)
- [23] 杜峰,葛晓成,陈翔,等. 路面功率谱密度换算及不平度建模理论研究[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(5): 981-986.
Du Feng, Ge Xiaocheng, Chen Xiang, et al. Conversion of spatial power spectral density and study on road irregularity modeling theory [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(5): 981-986. (in Chinese)
- [24] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 北京:人民交通出版社, 1998: 192-206.
- [25] 董忠红,吕彭民. 高等级路面上的车辆动荷载[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2010, 30(1): 95-99.
Dong Zhonghong, Lü Pengmin. Dynamic load of vehicle on high-class pavement [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 95-99. (in Chinese)
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T 7031-2005/ISO 8608 机械振动道路路面谱测量数据报告[S]. 北京:中国标准出版社, 1995.



第一作者简介:沈宇鹏,男,1977年6月生,副教授。主要研究方向为复杂条件下路基工程。曾发表《松软土地区高速铁路路涵过渡段动静态试验研究》(《土木工程学报》2012年第45卷第8期)等论文。

E-mail: ypshe@bjtu.edu.cn

