

# 基于振动环境预测的结构动力学特性分析

李播博<sup>1</sup>, 袁惠群<sup>2</sup>, 王光定<sup>1</sup>, 赵天宇<sup>2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对载荷测试技术的局限性, 提出一种以加速度响应为输入快速稳定求解工程结构动力学的分析方法. 以试验测试加速度为输入激励, 运用基础运动激励动力学特性分析方法, 对某重型牵引车电瓶框总成模型进行仿真分析, 获得模型在该激励下的强度分布和动力学响应, 并与相应的实际路面试验测试结果进行对比, 验证方法准确性. 研究表明, 本文提出的方法能准确有效地求解工程结构的动力学特性, 对于企业缩短产品的研发、设计周期具有工程应用价值.

**关 键 词:** 加速度响应; 动力学特性; 牵引车; 基础运动; 仿真分析

**中图分类号:** U 463.99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)02-0216-05

## Analysis of Structural Dynamic Characteristics Based on Vibration Environment Prediction

LI Bo-bo<sup>1</sup>, YUAN Hui-qun<sup>2</sup>, WANG Guang-ding<sup>1</sup>, ZHAO Tian-yu<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YUAN Hui-qun, E-mail: yuan\_hq@163.com)

**Abstract:** Aiming at the limitation of load testing technology, this paper proposes an analytical method for the dynamic analysis of engineering structure using the acceleration information. The test acceleration is used as input excitation of the battery frame assembly model, then the simulation analysis of dynamic characteristic is used to calculate the strength distribution and dynamic response of the battery frame assembly model of heavy tractor. At the same time, the accuracy of the method is verified by comparing with the test results of actual roads. Research results show that the proposed method can be used to solve the dynamic characteristics of engineering structures accurately and effectively, and the method has important engineering application value for enterprises in shortening the research and development period of products.

**Key words:** acceleration response; dynamics characteristic; tractor; base motion; simulation analysis

物流产业的发展使重型汽车呈现井喷式增长. 特别对于重型牵引车, 高吨位、大马力、高技术含量已成为主要发展趋势. 开发新型性能优良的车辆, 同时尽量缩短设计周期已成为前沿课题. 基于动力学分析, 将基础研究与工程应用结合, 是解决问题的有效途径.

国内外学者对汽车部件的动力学特性进行了一系列深入研究, 并取得大量的研究成果: 文献[1]利用有限元程序对用铆钉连接的车架进行动

力学分析, 给出了有限元分析方法在研究车架中的具体流程; 文献[2]提出一种修正有限元传递矩阵求解对称结构自由振动的方法; 文献[3]建立了包含非线性弹簧和阻尼器的单自由度悬架模型, 研究了阻尼系数、激励频率和激励幅值等参数对悬架动力学响应的影响; 文献[4]研究了采用GAP单元模拟车架钢结构之间接触的方法, 分析了该车架的弯曲工况, 该方法提高了车架分析精度和效率; 文献[5]采用虚拟实时控制器实现基

于加速度信号的汽车悬架位移的实时测量,对比试验结果,表明该方法分析结果满足精度要求;文献[6]对某自卸车发生断裂的平衡悬架支架进行强度分析,同时就失效模式进行研究,提出了结构的改进方案;文献[7]对模拟车架测点布置、激励方式、试验频段和激励点的选择等方面给出了模态试验的具体方法,通过对试验模态和有限元结果对比,表明有限元动力特性分析方法可以直接评价结构设计。

以上文献的研究采用的激励载荷大多是力、位移载荷,虽然理论基础相对成熟,但是,通过传感器获得构件重要部位的载荷时间历程相对比较困难,且在一些特殊场合,由于结构动态特性或试验条件的限制,往往会引起较大的测量误差,甚至无法正确测量。加速度传感器可以方便地测量复杂结构局部的振动情况<sup>[8-9]</sup>,利用加速度信号分析结构响应的方法极大地降低了试验阶段获取载荷信息的难度。

本文针对重型牵引车部件电瓶框总成,提出一种基于加速度响应信号的动力学特性分析方法,利用试验方法获得悬挂件激励输入点和监测点处在不同测试路面上的加速度信号,以加速度响应信号为输入激励,通过基础运动激励动力学分析方法对电瓶框总成模型进行有限元仿真分析,将得到的监测点处动力学响应结果与测试试验结果进行对比,进而验证该方法在工程实际中的可使用性。

## 1 基础运动激励动力学分析方法

在基于模态的动力学特性分析中<sup>[10]</sup>,通过加速度激励的形式改变结构的运动状态,该方式定义为基础运动激励。基础运动的形式分为初级基础运动和次级基础运动,对应的激励为初级基础激励和次级基础激励。

在分析过程中,采用模态参与法结合附加大质量法,利用加速度时间历程求解构件的动力学响应,现假设结构与基础的相对运动为  $\mathbf{u}$ ,施加的基础运动激励为  $\mathbf{u}_b$ ,结构的总体响应  $\mathbf{u}_t = \mathbf{u} + \mathbf{u}_b$ ;速度和加速度也有和位移相同的关系。将  $\mathbf{u}_t$  代入到动力学的基本方程中,得到

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_b. \quad (1)$$

假定  $\mathbf{u}_b$  代表刚体运动,则有  $\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_b = \mathbf{0}$  和  $\mathbf{K}\mathbf{u}_b = \mathbf{0}$ ,基础运动激励转化为惯性力载荷  $-\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_b$ 。基础运动向量用刚体模态向量  $\mathbf{T}_j$  和时域运动变量  $\mathbf{z}_j (j=1,2,\dots,6)$  表示:

$$\mathbf{u}_b = \sum_{j=1}^6 \mathbf{T}_j \mathbf{z}_j. \quad (2)$$

将运动方程投影到模态空间,得到模态坐标表示的运动方程:

$$\ddot{\mathbf{q}}_m + \frac{\mathbf{c}_m}{m_m} \dot{\mathbf{q}}_m + \frac{\mathbf{k}_m}{m_m} \mathbf{q}_m = - \sum_{j=1}^6 (\mathbf{\Gamma}_m)_j \ddot{\mathbf{z}}_j. \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{q}_m$  表示相对运动对应于模态  $m$  的模态坐标;  $\boldsymbol{\varphi}_m$  表示相对运动对应于模态  $m$  的模态振型;  $\mathbf{k}_m, \mathbf{c}_m$  和  $m_m$  分别为模态刚度、模态阻尼和模态质量;  $(\mathbf{\Gamma}_m)_j = \frac{1}{m_m} \boldsymbol{\varphi}_m^T \mathbf{M} \mathbf{T}_j$  为模态  $m$  第  $j$  个自由度的模态参与因子。

次级基础运动的处理方式与初级基础运动不同,次级基础运动主要是应用大质量法。在特征模态求解过程中,次级基础运动的自由度全部释放,取而代之的是在这些释放的自由度上附加大质量。附加大质量后基础运动通过在次级基础自由度上施加集中力的方式实现,此集中力为

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{M}_{\text{big}} \ddot{\mathbf{u}}_s. \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{M}_{\text{big}}$  为结构的质量矩阵;  $\ddot{\mathbf{u}}_s$  为次级基础的运动。在模态坐标下包含次级基础运动的运动方程为

$$\ddot{\mathbf{q}}_m + \frac{\mathbf{c}_m}{m_m} \dot{\mathbf{q}}_m + \frac{\mathbf{k}_m}{m_m} \mathbf{q}_m = - \sum_{j=1}^6 (\mathbf{\Gamma}_m)_j \ddot{\mathbf{z}}_j + \frac{1}{m_m} \boldsymbol{\varphi}_m^T \mathbf{P}_s. \quad (5)$$

## 2 试验测试方案设计

为了获得加速度激励信号,实现以基础运动激励动力学分析方法来解决电瓶框总成模型的动力学问题,对某重型牵引车整车进行路面试跑,试验内容主要包括两部分:①选取适当的载荷激励,试验主要利用重型牵引车常用试跑路面作为加速度的来源;②选取适当的加速度传感器安装位置,考虑到加速度传感器安装位置选取原则,尽可能将其安装在表面平整光滑的位置。

### 2.1 传感器布置

为了能够较为准确地反映悬挂件电瓶框总成在测试路面上的真实运动情况,考虑悬挂件与车架的连接形式及加速度传感器位置选取原则,将输入激励加速度传感器布置于紧靠车架与电瓶框总成连接螺栓处。为了避免监测点加速度响应受电瓶框总成与车之间连接螺栓位置加速度的干扰,选取离该连接部位较远的储气筒筒壁外侧设置加速度测试点。实车试车试验中各三通道加速度传感器的布置如图 1 所示。

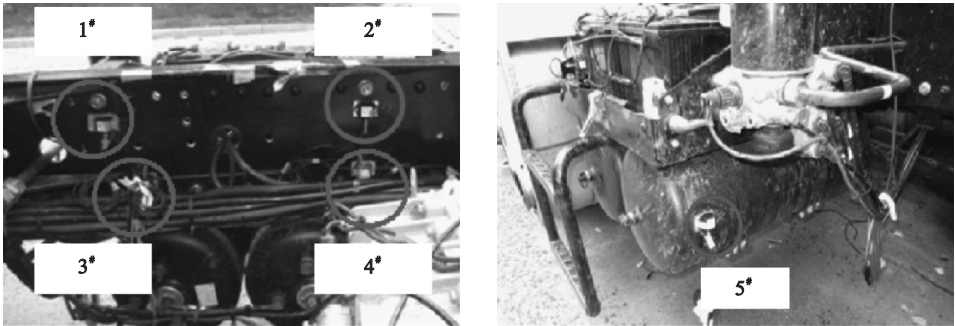


图 1 加速度传感器布置示意图  
Fig. 1 Layout diagram of acceleration sensors

2.2 载荷谱

综合考虑不同路面对响应结果的影响,试车试验分别在 6 种不同路面进行试跑(大圆凸起路面、失修坑路面、小圆凸起路面、大卵石路面、比利时甲路面、比利时乙路面). 每种测试路面提取时长为 120 s 的试验加速度响应信号,然后将提取的 6 段加速度信号拼接成包含不同路况信息的

720 s 全载荷谱;同时,考虑到测试环境等因素对载荷谱的干扰,在仿真前对全载荷谱进行一定的滤波和降噪处理. 另外,对电瓶框总成模型进行时域动力学分析需要耗费大量的计算时间,并且考虑到与试验结果对比的可信性,本文截取时长为 20 s 的载荷谱对悬挂件电瓶框总成进行有限元仿真. 图 2 为 1#加速度传感器三向加速度谱.

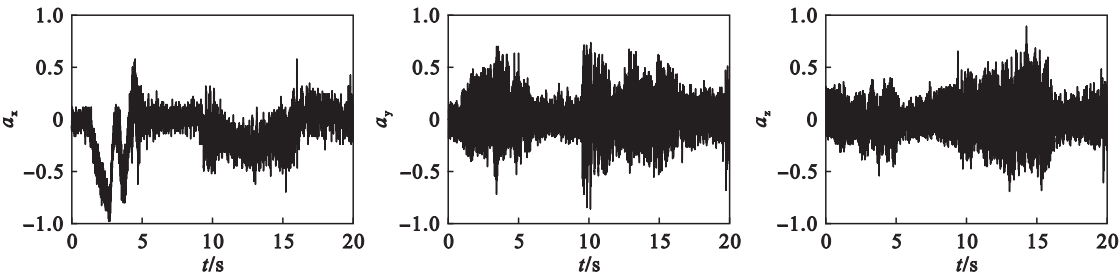


图 2 1#传感器加速度谱  
Fig. 2 Acceleration spectrum of sensor 1

3 电瓶框总成仿真分析

本文基于某重型牵引车真实结构,对整车悬挂件电瓶框总成采用以加速度为激励的基础运动分析方法进行仿真. 首先,建立简化的电瓶框总成有限元仿真模型(电瓶模块、储气筒、电瓶边板和横梁、电瓶垫板、电瓶盖、电瓶盖拉钩及支架、蹬车梯等),由于模型中包含大量的螺栓连接结构,考虑到模型的规模及计算时长等因素,对螺栓结构采用 coupling 约束进行简化;其次,储气筒与电瓶垫板、电瓶边板与电瓶盖等连接部位采用 tie 绑定约束. 另外,为了避免动力学计算过程中出现奇异单元,网格划分过程中主要采用八节点六面体单元,经简化的电瓶框总成模型网格单元数量为 1 051 034 个,划分完成后的有限元网格模型如图 3 所示,其各部分的材料参数详见表 1.

在电瓶框总成与车架的连接位置施予加速度激励,对电瓶框总成模型进行有限元分析,得到在

该激励时段内任意时刻的应力分布及加速度分布,如图 4 所示.

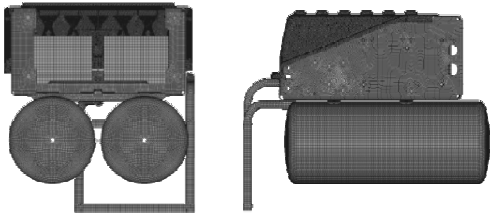


图 3 电瓶框总成有限元仿真模型  
Fig. 3 Finite element simulation model of the battery box

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters			
部件名称	$\rho / (\text{mg} \cdot \text{mm}^{-3})$	$E / \text{GPa}$	$\mu$
电瓶盖	1.508	2.4	0.39
电瓶横梁、电瓶边板、蹬车梯、 电瓶盖拉钩、拉钩支架	7.85	210	0.30
电瓶垫板	7.8	210	0.30
储气筒	9.638	210	0.30
电瓶模块	2.018	0.1	0.40

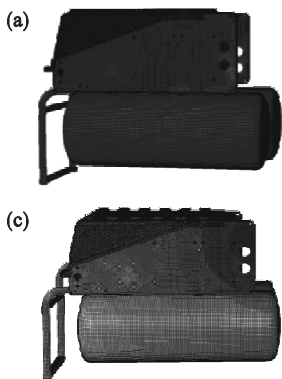


图 4  $t=20\text{ s}$  应力、加速度分布云图  
Fig. 4 Stress and acceleration distribution cloud maps when  $t=20\text{ s}$   
(a)—应力云图；(b)—加速度云图.

由仿真结果可知：①在试验路面工况下，电瓶框总成与车架连接区域和电瓶框垫板与储气筒耦合过渡位置为应力较大区域，这与电瓶框总成在实际使用过程中出现破坏的位置吻合；②模型中加速度较大区域出现在蹬车梯和储气筒靠外的部位. 蹬车梯出现较大的加速度分布区域主要是由于该部位由较细的管状结构焊接而成，且自身质量较轻，在相同激励下与其他结构相比更易产生振动. 考虑到加速度传感器的安装便易程度，故将传感器固定在更易安装的储气筒筒壁上.

### 4 结果对比与分析

通过整车的实车试车试验，利用三通道加速度传感器，采集电瓶悬挂件连接螺栓位置和监测点处的加速度信号，对螺栓连接位置采用基于基础运动的分析方法，以加速度载荷信号作为激励，计算获得监测点处的响应加速度信号，然后对基于基础运动方法的响应加速度和试验加速度进行对比，结果如图 5 所示.

通过对比监测点处试验加速度与仿真加速度，可以看出： $x$  方向试验加速度最大幅值为 0.842 46，仿真最大加速度为 0.805 39，仿真值与试验值相比，误差为 4.4%； $y$  方向试验加速度最大幅值为 0.763 42，仿真最大加速度为 0.732 46，误差为 4.05%； $z$  方向试验加速度最大值为 0.937 77，仿真最大加速度为 0.895 05，误差为 4.56% . 其中，试验三向加速度最大值均高于仿真获得的最大加速度值，这主要是由于在模型的前处理中对螺栓的简化导致螺栓连接部位的刚度有所下降，而结构刚度的减小则衰减了部分振动能量.

为了进一步验证以加速度为激励的基础运动分析方法对求解构件动响应的可靠性和准确性，

对试验和仿真加速度信号进行快速傅立叶变换 (见图 6)，研究基于基础运动分析方法获得的加速度信号与试验信号中的主要频率成分.

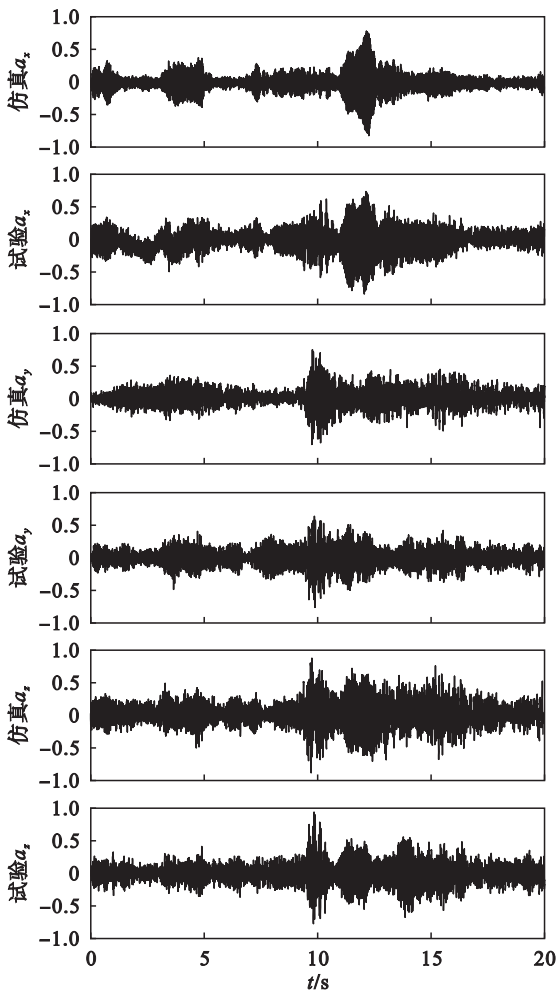
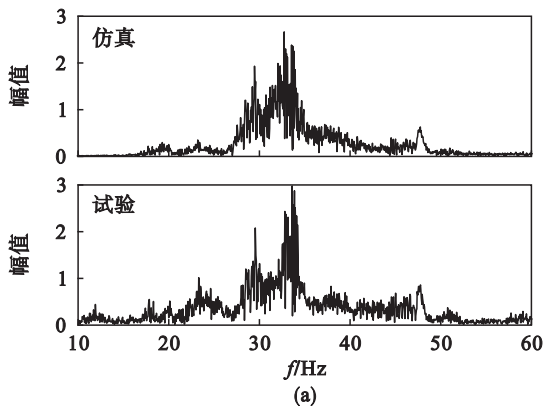


图 5 试验加速度与计算加速度对比  
Fig. 5 Comparison between the tested and computed accelerations

三向加速度 FFT 信号的对比结果表明：试验采集监测点加速度信号与采用基础运动分析方法仿真加速度信号中主要频率成分相同，且频率成分主要集中在 19、29、34 和 48 Hz，其中，27 ~ 35 Hz 是三向加速度同时出现的主要频率成分.



(a)



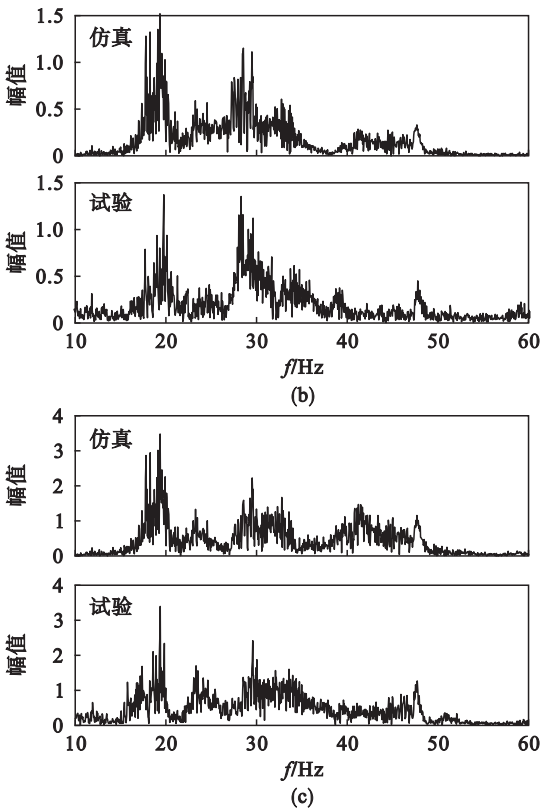


图 6 加速度 FFT 信号对比  
Fig. 6 Comparison of acceleration FFT signals  
(a)—x 方向; (b)—y 方向; (c)—z 方向.

综上所述,对时域加速度信号和傅立叶变换后频域信号的对比表明,采用加速度作为激励的基础运动分析方法能准确预测结构的动力学特性,且结果与试验一致.

5 结 论

- 1)通过仿真分析得到的监测点处三向加速度幅值与实车试车试验的加速度幅值相比,误差分别为 4.4% ,4.05% ,4.56% .
- 2)除试验过程中由于环境干扰所出现的小幅低频信号外,试验测试信号与仿真信号的主要频率成分相同.
- 3)综上,对时(频)域加速度的对比表明,以加速度为激励,采用基础运动的分析方法求解结构的动力学响应,在满足工程误差条件下,能准确地预测结构的动力学响应特性.同时,对工程应用具有一定的通用性和应用价值.

参考文献:

[ 1 ] Karaoglu C, Kuralay N S. Stress analysis of a truck chassis with riveted joints [ J ]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2012, 38(12):1115 – 1130.

[ 2 ] Bozdogan K B. Free vibration analysis of asymmetric shear wall-frame buildings using modified finite element-transfer matrix method [ J ]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2013, 46(1):1 – 17.

[ 3 ] Zhou S H, Song G Q, Sun M N, et al. Nonlinear dynamic analysis of a quarter vehicle system with external periodic excitation [ J ]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2016, 84:82 – 93.

[ 4 ] 王国林, 张建, 王启唐. 基于 GAP 单元的车架有限元分析 [ J ]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(3): 206 – 209.  
(Wang Guo-lin, Zhang Jian, Wang Qi-tang. Finite element analysis for vehicle frame based on GAP elements [ J ]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science)*, 2008, 29(3):206 – 206. )

[ 5 ] 张小龙, 潘登, 姜山. 基于加速度的汽车悬架位移实时测试方法试验研究 [ J ]. *农业机械学报*, 2013, 44(10):15 – 22.  
(Zhang Xiao-long, Pan Deng, Jiang Shan. Experiment on real-time test method for automotive suspension distance based on acceleration [ J ]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10):15 – 22. )

[ 6 ] 张建振, 常连霞, 马文松. 平衡悬架失效模式与影响的有限元分析 [ J ]. *汽车技术*, 2009(10):9 – 12.  
(Zhang Jian-zhen, Chang Lian-xia, Ma Wen-song. FEM analysis on failure modes and effects of the equalizing suspension [ J ]. *Automobile Technology*, 2009(10): 9 – 12. )

[ 7 ] 陈健, 周福庚, 袁创. 轻型卡车车架模态试验及有限元模拟分析 [ J ]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 32(sup1):131 – 134.  
(Chen Jian, Zhou Fu-geng, Yuan Chuang. Modal test of a light truck body frame and its FEA analysis [ J ]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2009, 32(sup1):131 – 134. )

[ 8 ] Zhou Y F, Chen S R. Vehicle ride comfort analysis with whole-body vibration on long-span bridges subjected to crosswind [ J ]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2016, 155:126 – 140.

[ 9 ] Gupta A, Rastogi V. Effects of various road conditions on dynamic behavior of heavy road vehicle [ J ]. *Procedia Engineering*, 2016, 144:1129 – 1137.

[ 10 ] Cui X Z, Li S C, Lou J J, et al. Dynamic responses and damage analyses of tunnel lining and errant large vehicle during collision [ J ]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 50:1 – 12.