

文章编号: 1674—8247(2018)02—0033—04

## 铁路系杆拱桥拱肋横向振动及刚度改善研究

王法武

(中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

**摘 要:**系杆拱桥是我国铁路大跨度桥梁的常用桥型,具有竖向刚度大和建筑高度低的特点。对于单线系杆拱桥,其横向刚度较低,过大的拱肋横向振动对拱肋自身及其上设备有不利影响,但是我国规范并未对拱桥拱肋的横向刚度进行限制。文章采用车桥耦合振动分析,重现了拱肋刚度不足情况下出现的车桥共振现象,通过增设 K 型横撑的方式提高拱肋横向刚度,以避免货物列车横向蛇形运动频率,从而大幅减小拱肋横向振动。建议在类似工程中注意拱肋横向刚度的合理设计,并在车桥耦合振动分析和现场实测中重点关注拱肋的横向振动情况。

**关键词:**铁路桥梁;拱桥;横向刚度;车桥耦合振动

中图分类号:U441<sup>+</sup>.5

文献标志码:A

## Research on Improvement of Transverse Vibration and Stiffness for the Arch Ribs of a Railway Tied Arch Bridge

WANG Fawu

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

**Abstract:** Tied arch bridges are featured by large vertical stiffness and low building height. As a result, it is widely used for long-span railway bridges in China. The lateral stiffness of the single-line tied arch bridges is generally low, which causes large lateral vibration on the arch ribs. The vibration of the arch ribs has a negative impact on the ribs themselves and equipment installed on the ribs. However, the codes in China do not specify the lateral stiffness limits for the arch ribs of the bridge. In this paper, the train-bridge coupling vibration analysis is used to reconstruct the resonance phenomenon in the case of insufficient stiffness of the arch ribs. In order to avoid resonance responses, the lateral stiffness of the arch rib is increased by the proposed K-shaped bracing for the ribs. Significantly reduction of the lateral vibration on the arch ribs is obtained through this proposed design scheme. It is suggested that the reasonable design of transverse stiffness of arch ribs should be paid attention to in similar projects, and the lateral vibration of arch ribs should be paid attention to in the train-bridge coupling vibration analysis and field measurements.

**Key words:** railway bridge; arch bridge; transverse stiffness; train-bridge coupling vibration

铁路桥梁在结构刚度、运营养护性能和列车乘坐舒适等方面具有较高要求,在特定跨线、跨河条件下,铁路桥梁需要同时达到大跨度、低高度和高刚度的目标。目前铁路采用的大跨度混凝土简支梁跨度通常在

40 m、48 m、56 m,结构建筑高度通常为 3.5~5.5 m 左右,活载挠跨比在 1/2 000 左右。低高度简支梁多采用钢桁梁、系杆拱等结构形式。其中,系杆拱桥用钢量和工程造价通常低于钢桁架桥,其建筑高度(轨底至梁

收稿日期:2017-08-30

作者简介:王法武(1981-),男,高级工程师。

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划项目(2013G001-C)

引文格式:王法武. 铁路系杆拱桥拱肋横向振动及刚度改善研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(2):33-36.

WANG Fawu. Research on Improvement of Transverse Vibration and Stiffness for the Arch Ribs of a Railway Tied Arch Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(2): 33-36.

底)通常为2.5 m,挠跨比在1/6 000左右,是铁路大跨度桥梁的一种有较大竞争力的桥型<sup>[1-6]</sup>。特别是当采用槽型梁作为系梁时,其建筑高度可进一步减小,可在建筑高度受限的情况下使用。

虽然系杆拱桥具有竖向刚度大、竖向振动小的优点,但是其拱肋的结构高度较大,其横向刚度和横向振动对桥梁的正常使用及桥上设备的正常维护有不利影响。对此,本文以某简支槽型梁拱组合结构为研究对象,分析客运列车和货物列车通过桥梁下的拱肋横向振动规律,提出增强拱肋横向刚度,减小其横向振动的结构措施,可供同类桥型的设计参考。

## 1 车桥耦合振动计算模型与方法

采用李奇等<sup>[7]</sup>提出的车桥耦合振动分析方法及相应程序进行动力仿真研究。车桥耦合系统分为两个子系统,一个是车辆子系统,另一个是桥梁子系统。车辆和桥梁模型均在有限元软件中建立,导入其模态分析结果至车桥耦合振动分析专用程序 VBC2.0 后形成如下的车桥系统运动微分方程:

$$\begin{cases} \ddot{q}_v + 2[\xi_v][\omega_v]\dot{q}_v + [\omega_v^2]q_v = \{F_v\} \\ \ddot{q}_b + 2[\xi_b][\omega_b]\dot{q}_b + [\omega_b^2]q_b = \{F_b\} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\{q_v\}$ ——待求车辆系统模态坐标向量;

$\{q_b\}$ ——待求的桥梁子系统模态坐标向量;

$[\omega_v]$ ——待求车辆系统自振圆频率矩阵;

$[\omega_b]$ ——待求桥梁子系统自振圆频率矩阵;

$[\xi_v]$ ——待求车辆系统模态阻尼矩阵;

$[\xi_b]$ ——待求桥梁子系统模态阻尼矩阵;

$\{F_v\}$ ——待求桥车辆系统所受的轮轨接触力和虚拟力向量;

$\{F_b\}$ ——待求桥桥梁子系统所受的轮轨接触力和虚拟力向量,主要由车辆和桥梁的运动位移、速度和加速度决定,与模态位移和轮轨关系有关。

式(1)的求解采用翟方法<sup>[8]</sup>进行迭代求解,具有较高的迭代计算稳定性。

铁路车辆种类繁多,按用途可分为机车、货车和客车三大类。各类车辆在基本构造上具有一定的相似性,每辆车主要由车体、转向架、制动装置、连接缓冲装置、车辆内部设备五大基本部分组成。对于研究车辆-桥梁/轨道耦合振动来说,主要关注的是车体、转向架(包括构架、轮对以及悬挂装置)的构造和力学特性,并据此决定车辆建模中自由度的选取以及相关简

化处理。DF4 型六轴机车辆有限元模型,如图1所示,采用轮轨密贴接触假定,整车具有空间27个自由度。对于四轴车辆,则整车具有23个自由度。本研究考虑设计速度为160 km/h的I级铁路,将分析普通客运列车、传统C62货物列车和新型K6货物列车编组下的车桥耦合振动。

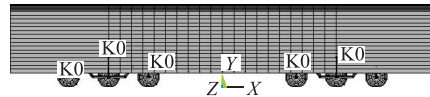


图1 六轴机车有限元模型图

某64 m跨度单线铁路槽型系杆拱桥横断面,如图2所示,线路位于曲线,主梁采用预应力混凝土,拱肋采用钢管混凝土。桥面采用有砟轨道结构。

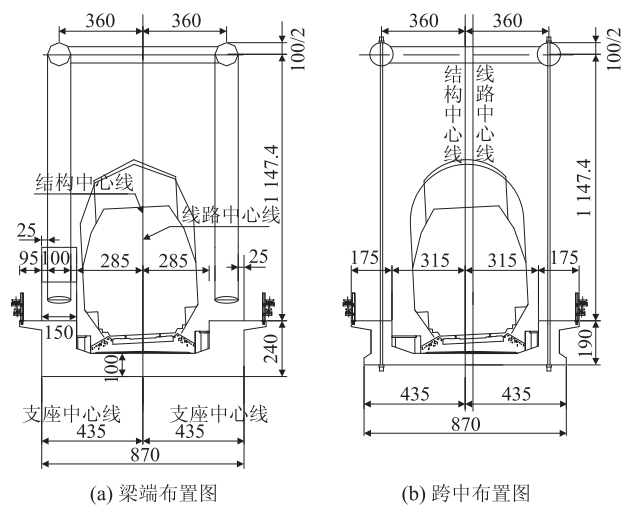


图2 某槽型系杆拱桥横断面图 (cm)

此槽型系杆拱桥方案有限元模型,如图3所示。其中槽型梁底板采用板单元,其余构件均采用考虑剪切变形的空间梁单元。在拱桥两侧分别建立一孔32 m预应力混凝土简支梁,以考虑其对拱桥的影响。根据工程经验,桩长考虑至覆土层以下10 m,并在桩底面施加固定约束,以近似考虑基础的弹性约束。二期恒载按95.34 kN/m施加到道床板位置。

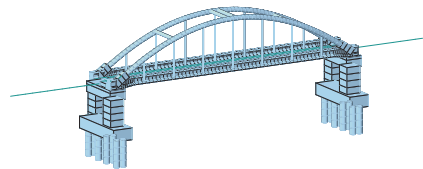


图3 某槽型系杆拱桥方案有限元模型 (方案一)

拱肋横撑如图3所示,为4道一字撑,其构造简单但对两片拱肋的连接作用较弱,为提高拱肋的横向刚度,提出如图4所示的横撑加强方案进行对比研究。

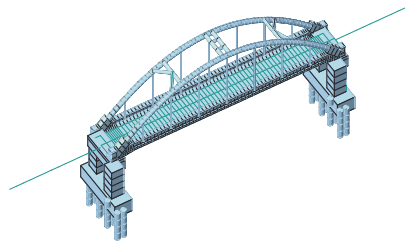


图4 增强拱肋横撑方案有限元模型(方案二)

3种不同列车编组及相应的计算车速,如表1所示。各工况采用的轨道不平顺样本相同,均由美国六级谱生成,波长范围均为1~100 m。

表1 车桥耦合振动计算工况及车速

工况号	工况描述	计算车速/(km/h)
工况1	DF4 机车+15 节普客列车	100,120,140,160
工况2	DF4 机车+15 节C62 货车	60,70,80
工况3	DF4 机车+15 节K6 货车	60,80,100,120

2 桥梁自振特性分析

由于钢管混凝土系杆拱桥的系梁具有较大的横向刚度,钢管混凝土系杆拱桥的横向振动往往首先表现为拱肋的横向振动。由图5可知,该桥的拱肋的横向一阶频率为1.18 Hz,远低于系梁的横向一阶频率2.29 Hz。值得注意的是,拱肋的横向弯曲与系梁的横向弯曲存在耦合,即列车引起的系梁横向振动将带动拱肋的振动。

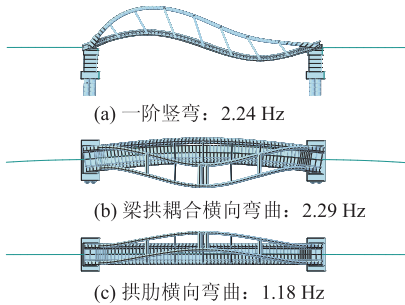


图5 方案一桥梁典型振型及其自振频率

TB 10002-2017《铁路桥涵设计规范》<sup>[9]</sup>和铁运函[2004]120号《铁路桥梁检定规范》<sup>[10]</sup>对于不同结构类型桥梁的横向自振频率进行了规定。方案一的梁跨结构一阶横向频率为2.29 Hz,大于检定规范限值1.41 Hz,也满足设计规范限值1.97 Hz(参考预应力混凝土梁限值)。方案二增加拱肋横撑后,拱肋的横向一阶频率由1.18 Hz增加为1.75 Hz,拱肋的横向刚度大幅增加。然而,规范并没有对拱肋的横向频率进行限制,仅从频率值难以判断该桥的拱肋横向刚度是否足够,也无法判断增加横撑是否具有必要性。这需要

通过进一步的车桥耦合振动分析来进行说明。

3 车桥耦合振动响应分析

《铁路桥梁检定规范》对于结构横向振幅有如下规定:

(1)列车通过时,对于钢筋混凝土梁、预应力混凝土梁在荷载平面处跨中横向振幅行车安全限值为 $L/9\,000$ 。

(2)跨中横向振幅通常值为: $L/(17.2B_1)$  mm(客车 $120\text{ km/h} < v \leq 160\text{ km/h}$ ,  $B_1$ 为支座中心距), $L/(7.0B_1)$  mm(货车重车)。

(3)墩顶横向振幅通常值为: $\frac{H}{25} + 0.4\text{ mm}$  ( $\frac{H_1}{B_2} < 2.5$ ,低墩,采用桩基础,  $B_2$ 为墩身平均宽度,  $H$ 为全墩高(自基底或桩承台底至墩顶),  $H_1$ 为墩高(自基顶或桩承台顶至墩顶))。

对于本桥,  $H = 12.6\text{ m}$ ,  $H_1 = 9.6\text{ m}$ ,  $B_2 = 7\text{ m}$ ,  $B_1 = 8.4\text{ m}$ ,计算可得规范限值,经车桥耦合分析得到各工况下的桥梁横向振幅。各工况计算得到的方案一跨中及墩顶横向最大振幅值如表2所示。由表2可知,无论是跨中截面还是墩顶处的横向振幅均小于《铁路桥梁检定规范》通常值,满足规范要求。方案一桥梁跨中及墩顶振幅时程曲线,如图6、图7所示。由时程曲线可知,桥梁横向振动处于正常范围内,未见随列车运行而逐渐增大的共振现象。

表2 方案一桥梁横向振幅计算值与规范值

桥梁位置	车辆工况	计算值 /mm	铁路桥梁检定 规范通常值 /mm	铁路桥梁检定 规范安全限值 /mm
跨中主梁	准高速	0.23	0.44	7.11
	C62	0.38	1.09	
	K6	0.44		
墩顶	准高速	0.14	0.90	—
	C62	0.17		
	K6	0.27		
跨中拱肋	准高速	0.52	—	
	C62	3.55		
	K6	0.57		

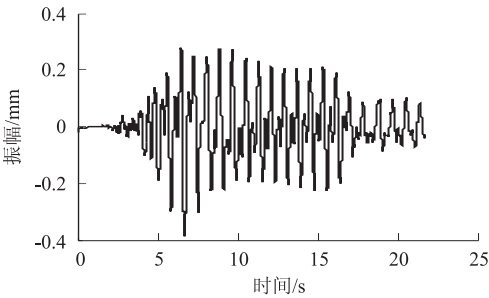


图6 方案一系梁跨中横向振幅时程曲线(C62列车编组,车速60 km/h)

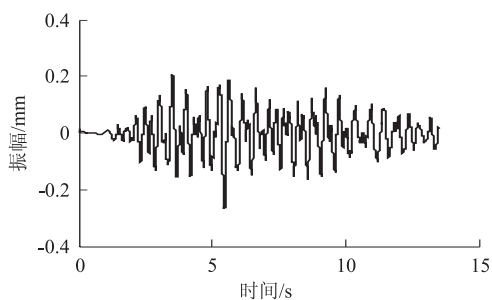


图7 方案一墩顶横向振幅时程曲线(K6列车编组,车速100 km/h)

值得指出的是,由表2可知,拱肋的横向振幅远大于主梁和桥墩,但规范并未对其振动进行限制。特别地,C62列车以60 km/h车速过桥时引起的横向振动远大于另外两种车速下的振动(70 km/h和80 km/h),跨中拱肋最大横向振幅高达3.55 mm,亦远大于其他两种车型过桥时产生的振动。C62货车以60 km/h车速通过桥梁时拱肋的横向振幅时程曲线,如图8所示,由时程曲线可知此时存在明显横向共振现象。

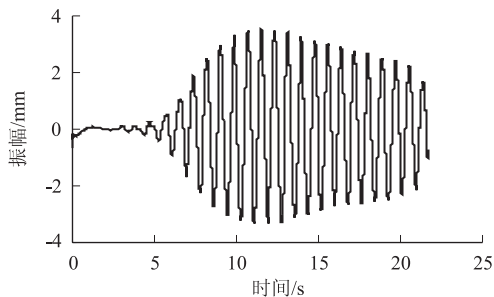


图8 方案一跨中拱肋横向振幅时程曲线(C62列车编组,车速60 km/h)

分析表明,等踏面锥度情况下轮对横向蛇形运动频率可表示为<sup>[11]</sup>:

$$f = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{\lambda}{br_0}} \quad (2)$$

式中: $v$ ——车速;

$\lambda$ ——踏面锥度;

$b$ ——轮轨接触点横向间距之半;

$r_0$ ——滚动圆半径。

将车速16.67 m/s(60 km/h)、踏面锥度0.05、轮轨接触点横向间距之半0.75 m、滚动圆半径0.42 m带入上式可计算得到轮对横向蛇形运动频率为1.05 Hz。这与拱肋的横向自振频率1.18 Hz接近,是引发拱肋出现较大振动的原因。在桥梁设计中,应使得桥梁横向自振频率避开货物列车蛇形运动频率,以减小桥梁振动响应给运营维护带来的不利影响。

在原有桥梁方案一的基础上,将四道“一”字型撑

改成了两道K型撑加一道框架撑,拱肋的横向一阶频率由1.18 Hz增加为1.71 Hz。由于拱肋横向频率的增加,方案二桥梁拱肋横向振幅大大降低,C62列车在各种车速过桥时不再产生共振现象,跨中拱肋横向振幅最大值由3.55 mm降到1.04 mm,其振动时程曲线如图9所示。与图8对比可知,增强拱肋横撑联系后,拱肋的横向共振响应消失。

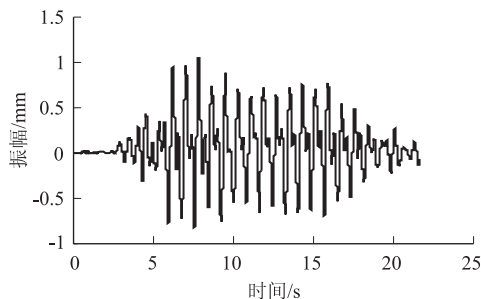


图9 方案二跨中拱肋横向振幅时程曲线(C62列车编组,车速60 km/h)

## 4 结论

以跨度64 m单线铁路简支槽型梁系杆拱桥为研究对象,进行了三种列车编组(准高速客车、C62货车和K6货车)下的车桥耦合计算,重点对其横向振动进行了分析,结论如下。

(1)桥跨结构横向基频为2.29 Hz,各工况列车作用下的跨中及墩顶横向振幅最大值分别为0.44 mm和0.27 mm,均远小于检定规范限值。

(2)采用“一”字型横撑的拱肋横向基频为1.18 Hz,当C62列车以60 km/h车速过桥时跨中拱肋产生了共振现象,振幅高达3.55 mm。将“一”字型横撑改为K型撑和框架撑后,拱肋横向频率增加至1.71 Hz,避开了C62货车蛇形运动频率,拱肋横向振幅降低到1.04 mm。

虽然规范对拱肋的横向振幅未做规定,但应确保拱肋具有足够的横向刚度,以避免出现过大的横向振动而影响拱肋的正常使用及支撑于拱肋上的接触网设备的运营、维护性能。建议在类似工程中注意拱肋横向刚度的合理设计,并在车桥耦合振动分析和现场实测中重点关注拱肋的横向振动情况。

## 参考文献:

- [1] 户东阳,周昆,曾敏. 铁路钢筋混凝土系杆拱桥设计研究[J]. 高速铁路技术,2017,8(3):68-72.  
HU Dongyang, ZHOU Kun, ZENG Min. Research on the Design of Railway Reinforced Concrete Tied Arch Bridge [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(3): 68-72. (下转第52页)

下结论:

(1) 为保证钢梁的局部稳定性,中国规范规定了翼缘自由外伸与其厚度的相对值,确保设计规定上翼缘不发生局部屈曲。

(2) 美国规范规定,根据板件是否发生局部屈曲将钢梁分为紧凑型、非紧凑型与细长型三种类型。若翼缘的宽厚比超过规定值,则钢梁截面为细长型,应考虑翼缘的局部屈曲计算。

(3) 欧洲规范根据转动能力的强弱把截面分为四个类型,其中IV类截面最为薄宽,一般在钢梁达到屈服前就会产生局部屈曲,不同的截面种类,其钢梁稳定性的计算方式也会不同。

(4) 带加劲肋钢梁腹板受弯构件的局部稳定性计算结果表明,按中国规范和欧洲规范计算的抗剪承载力结果相近,而按美国规范计算的抗剪承载力略大。

## 参考文献:

- [1] 沈祖炎. 中国《钢结构设计规范》的发展历程[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 1-6.  
SHEN Zuyan. Development of the Chinese "Code for Design of Steel Structure" [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 1-6.
- [2] 徐彬. 梁腹板在纯弯与局压联合作用下的弹塑性屈曲[D]. 西安:

西安建筑科技大学, 2001.

XU Bin. Elastic-plastic Buckling of Beam Web under Pure Bending and Partial Edge Loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture And Technology, 2001.

- [3] 蔺军. 梁腹板在弯、剪及局压复合应力作用下的弹性及弹塑性屈曲分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2002.

LIN Jun. Elastic and Elastic-plastic Buckling Analysis of Beam Web under Combined Bending, Shear and Patch Loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2002.

- [4] 于海丰, 张耀春. 中美欧钢结构标准设计方法比较[J]. 低温建筑技术, 2006, 28(6): 53-55.

YU Haifeng, ZHANG Yaochun. Comparison of Standard Design Methods for Steel Structure among China, the United States and Europe [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2006, 28(6): 53-55.

- [5] 李洋. 中欧钢结构设计规范对比研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.

LI Yang. Comparative Study on Design Specifications of Steel Structure in China and Europe [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016.

- [6] GB 50017-2017 钢结构设计规范[S].

GB 50017-2017 Code for Design of Steel Structures[S].

- [7] ANSI/AISC360-05 Specification for Structural Steel Building.

- [8] BS EN1993-1-8-2005 Design of steel structures.

(编辑: 赵立红 白雪)

(上接第36页)

- [2] 孙树礼. 连续梁拱组合桥梁设计关键技术对策研究[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(5): 25-28.  
SUN Shuli. Study on the Key Technologies' Countermeasure in the Design of Combined Bridges with Prestressed Continuous Beam and Arch [J]. Railway Standard Design, 2005, 49(5): 25-28.
- [3] 黄晓彬, 李涛, 吴定俊. 大跨度单线铁路连续梁拱桥动力特性分析[J]. 铁道标准设计, 2009, 53(7): 59-62.  
HUANG Xiaobin, LI Tao, WU Dingjun. Dynamic Analysis of a Continuous-beam Arch Bridge on Long-span Single Track Railway [J]. Railway Standard Design, 2009, 53(7): 59-62.
- [4] 成明. 高速铁路无横撑组合拱桥设计[J]. 铁道标准设计, 2009, 53(12): 62-64.  
CHENG Ming. Design of a Hybrid Arch Bridge without Wind Bracing on High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2009, 53(12): 62-64.
- [5] 朱林根. 单线铁路大跨度连续梁拱组合结构设计[J]. 铁道标准设计, 2010, 54(7): 50-52.  
ZHU Ling. Design of Long-span Continuous Girder and Arch on Single Track Railway [J]. Railway Standard Design, 2010, 54(7): 50-52.
- [6] 陈晓波. 某高速铁路连续梁拱组合桥结构设计[J]. 铁道标准设

计, 2011, 55(5): 60-62.

CHEN Xiaobo. Design of a Hybrid Bridge of Continuous Girder and Arch on High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2011, 55(5): 60-62.

- [7] 李奇, 吴定俊, 邵长宇. 考虑车体柔性的车桥耦合系统建模与分析方法[J]. 振动工程学报, 2011, 24(1): 41-47.

LI Qi, WU Dingjun, SHAO Changyu. Modeling and Analysis Method of Vehicle-bridge Coupling System Considering Car-body Flexibility [J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(1): 41-47.

- [8] ZHAI W M. Two Simple Fast Integration Methods for Large-scale Dynamic Problems in Engineering [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(24): 4199-4214.

- [9] TB 10002-2017 铁路桥涵设计规范[S].

TB 10002-2017 Code for Design on Railway Bridge and Culvert [S].

- [10] 铁运函[2004]120号, 铁路桥梁检定规范[S].

Tie Yun Han [2004] No. 120, Code for Rating Existing Railway Bridges [S].

- [11] 夏禾, 张楠. 车辆与结构动力相互作用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

XIA He, ZHANG Nan. Dynamic Interaction of Vehicle and Structures [M]. Beijing: Science Press, 2005.

(编辑: 车晓娟 白雪)