

# 列车-桥梁耦合振动研究综述\*

王宁波<sup>1,2,†</sup> 任伟新<sup>1,2</sup> 肖祥<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 中南大学土木工程学院, 长沙 410075

<sup>2</sup> 高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075

<sup>3</sup> 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070

**摘要** 针对列车-桥梁耦合振动问题, 从模型分类与建立、轮轨接触、数值计算、工程应用等 4 个方面综述了 20 世纪 60 年代至今, 特别是近 20 年以来的研究进展, 总结了已经取得的成就与结论. 并指出建立更加精细合理、运算效率高的列车-桥梁耦合振动模型, 综合考虑整个体系中的各种因素, 更系统地分析车、桥相互作用的影响关系, 将成为列车-桥梁耦合振动研究的必然趋势.

**关键词** 车-桥耦合振动, 车辆模型, 桥梁模型, 轮轨接触

## 1 引言

1825 年修建第一条铁路以来, 人类便开始了列车与桥梁相互作用问题的研究. 早期由于计算水平低下, 多采用现场测试的手段来研究车辆、桥梁振动相关问题, 美国、前苏联于 20 世纪初至 40 年代期间进行过大规模实桥试验, 首次提出“冲击系数”、“临界速度”的概念, 给出了系列经验公式, 并对“共振”现象作出初步解释<sup>[1]</sup>. 这种以现场试验为主导的研究思路在一定时期内曾起到很大作用, 但由于其耗费时间长、经济成本高、只能对已经建成的桥梁进行研究等弊端, 其可行性逐渐丧失, 逐步发展成以理论分析和模拟仿真为主、并结合现场试验进行验证的思路来研究列车与桥梁的振动问题.

20 世纪初期, 受计算水平、力学水平、研究方法的限制, 列车与桥梁相互作用问题的研究一般是将车辆和桥梁简化成两个独立模型, 车辆简化为单个或多个移动的不变或可变载荷, 桥梁简化成等截面梁, 采用级数展开作近似求解, 这类研究方法有很强的近似性, 也不能体现车辆与桥梁的耦合振动, 真正的列车-桥梁耦合振动研究(以下简称“车-桥耦合振动”)源于 20 世纪 70 年代欧美、日本兴建高速铁路的壮举, 伴随着电子计算

机、有限元技术的迅速发展, 车-桥耦合振动研究取得显著成效. 通过建立较精细的车辆和桥梁系统模型, 采用合理的轮轨接触关系和数值计算方法对车-桥耦合振动问题进行建模与数值计算, 并结合现场测试进行研究.

本文从模型建立、轮轨接触、数值计算、工程应用等几个方面阐述 20 世纪 60 年代以来, 特别是最近 20 年期间, 车-桥耦合振动研究所取得的成果以及尚存在的问题.

## 2 车辆模型

车-桥耦合振动研究中对车辆模型的简化经历了以下几个阶段:

(1) 移动载荷模型, 包括移动的不变或可变载荷模型, 适用于车、桥质量比小, 仅关心桥梁动力响应的情况. 早期的研究中此模型用于求解特定车-桥振动问题的解析解, 目前, 研究动力放大系数、桥梁动力响应、载荷识别、数值结果验证时仍采用移动载荷模型<sup>[2-3]</sup>, 其缺点是模型简单, 无法进行车体响应、走行性等方面的研究.

(2) 移动质量模型, 能考虑车辆重力、惯性力以及与桥梁的相互作用, 现在的车桥振动研究中, 侧重于桥梁动力分析时仍有采用此模型<sup>[4]</sup>. 该模

收稿日期: 2011-09-13, 修回日期: 2012-02-10 doi: 10.6052/1000-0992-11-128

\* 国家“863”项目(2009AA11Z101)资助

† E-mail: wangnb@csu.edu.cn

型的缺点是不能考虑车辆悬挂系统的影响。

(3) 移动系统模型, 又经历了单自由度系统模型<sup>[5-6]</sup>、二自由度系统模型<sup>[7]</sup>, 最后发展成多自由度系统模型(又称多刚体系统模型)。多刚体系统分为一系悬挂和二系悬挂的系统, 当车辆按等效一系悬挂系统处理时, 由于忽略了转向架的振动, 会导致计算分析结果产生偏差, 考虑二系悬挂的多刚体系统模型能比较真实地模拟车辆动力特性, 目前的车-桥耦合振动研究广泛采用此类模型<sup>[8-13]</sup>。

20 世纪 70 年代末, Chu 等<sup>[14-17]</sup> 首先提出了具有多刚体多自由度的复杂车辆系统模型。该车辆系统模型将车体、转向架、轮对均视为刚体, 通过二系悬挂连接, 各刚体具备伸缩、横摆、沉浮、侧滚、摇头、点头等 6 个自由度, 理论上 4 轴车辆有 1 个车体、2 个转向架、4 个轮对, 共 7 个刚体系统, 42 个自由度。实际建模时根据研究重点不同, 可省略刚体的某些自由度。

一般来讲, 车辆模型可分为竖向振动模型、横向振动模型和空间振动模型, 由于建立车辆横向振动模型的复杂程度与其空间模型近似, 因此车辆横向振动模型也常称为车辆空间振动模型。

## 2.1 车辆竖向振动模型

只考虑车体和转向架的沉浮、点头运动, 认为轮轨竖向密贴, 即: 轮对的竖向位移、速度、加速度与接触点处桥梁一致, Lou<sup>[18]</sup> 基于此模型建立了车-轨-桥耦合单元用于研究车-桥竖向耦合振动。若在该模型基础上摒弃轮轨密贴假设, 认为轮轨弹性接触, 则还需考虑轮对的沉浮运动<sup>[19-20]</sup>, 此类模型可以模拟轮轨脱离的情况。

V-Quoc 和 Ollson<sup>[21-25]</sup> 除考虑车体、转向架的沉浮、点头运动外, 首次考虑各刚体的纵向伸缩运动以及轮对的点头运动, 该模型能研究车-桥耦合系统运动过程中速度的变化和能量转化。

## 2.2 车辆空间振动模型

35 自由度车辆模型: 认为车体、转向架及轮对沿列车运行方向的纵向振动(伸缩)对桥梁的竖向和横向振动基本无影响, 因此在车辆模型中可以忽略各刚体的伸缩运动, 每个刚体只考虑 5 个自由度, 车辆系统共 35 个自由度。该模型考虑的轮对自由度比较齐全, 适合作曲线桥梁(线路)的车-桥耦合振动分析。

34 自由度车辆模型: 为全面了解车辆的动态性能, 张卫华在其博士论文中考虑车体和转向架

的 6 个自由度<sup>[26]</sup>, 根据轮对受轨道结构几何约束而忽略其沉浮、侧滚 2 自由度, 建立了 34 个自由度车辆模型。

31 自由度车辆模型: 若考虑车体、转向架的横摆、沉浮、侧滚、摇头、点头 5 自由度, 轮对的横摆、沉浮、侧滚、摇头 4 自由度, 车辆空间模型有 31 个自由度。Tanabe 等<sup>[27]</sup> 采用该模型研究了列车高速运行下新干线桥梁的动力响应, 高芒芒<sup>[28]</sup> 在进行车-线-桥耦合振动及列车走行性研究时也采用该车辆模型。

27 自由度车辆模型: 考虑车体、转向架的横摆、沉浮、侧滚、摇头、点头 5 自由度, 只考虑轮对的横摆、沉浮、侧滚 3 自由度, 此时车辆空间模型自由度数为 27, Majka 等<sup>[29-30]</sup>、张楠等<sup>[31]</sup> 进行车-桥耦合振动动力响应及其影响研究时均采用 27 自由度车辆模型。

23 自由度车辆模型: 在 27 自由度模型基础上引入轮轨竖向密贴的假定, 即略除轮对沉浮运动, 得到 23 个自由度的车辆空间振动模型。该模型最早由 Wang 等提出<sup>[32]</sup>, 而后得到广泛应用。

21 自由度车辆模型: 其特点是略除转向架的点头自由度, 而用转向架前后轮对的竖向位移来表示, 该模型考虑车体横摆、沉浮、侧滚、摇头、点头 5 自由度, 转向架横摆、沉浮、侧滚、摇头 4 自由度以及轮对的横摆、摇头(或横摆、沉浮)2 自由度。王荣辉等<sup>[33]</sup>、陈淮等<sup>[34]</sup> 曾采用该车辆模型研究了桁梁桥、斜拉桥等不同桥型的车-桥耦合振动问题。

以上车辆模型分析仅针对传统独立车辆连接方式(如: 日本新干线采用的动车、德国 IEC 等)的 4 轴车辆。翟婉明<sup>[35]</sup> 在其博士论文中根据转向架数量、其他具体参数的不同, 将车辆系统模型细分为机车系统模型、客车系统模型、货车系统模型。Xia 等<sup>[36]</sup> 采用的铰接式列车(如法国 Thalys 高速列车), 分机车、过渡车、拖车 3 类车辆结构, 机车有独立的转向架, 过渡车在靠近机车端有一独立转向架, 靠近拖车端则与拖车共用一个转向架, 所有拖车都与相邻车辆共用转向架。针对不同的车辆结构类型, 需在上述模型基础上适当修正。

总之, 车辆模型的选用既要保证足够的计算精度, 又要避免建模及求解过于复杂, 采用较多的如 27 自由度车辆模型和 31 自由度车辆模型, 基本可以满足列车-桥梁横向耦合振动分析的需要, 但忽略了车辆纵向振动自由度。随着对车-桥耦合振动研究的逐步深入, 车辆模型必将更加精细, 采用

的振动自由度也将逐渐增多,在上述模型基础上再考虑刚体纵向振动将是车辆模型发展的一个必然趋势,使之成为真正的车辆空间(三维)振动模型.

### 3 桥梁模型

只研究车-桥耦合系统竖向振动问题时,由于桥梁墩台及基础等下部结构的竖向刚度比桥跨结构大得多,故一般将下部结构以刚性支撑来模拟.但进行车-桥耦合空间振动分析时,因下部结构的横向刚度一般远小于其竖向刚度,尤其是对轻型桥墩或高墩而言,此时的桥梁建模应包含下部结构.总之,桥梁模型影响着车-桥耦合振动仿真计算的准确性,建立准确的桥梁模型是研究车-桥耦合振动的关键之一.目前桥梁建模的主要方法包括有限元法和模态坐标法.

#### 3.1 有限元法

有限元法又以杆系有限元建模为主,美国伊利诺理工学院 Chu 等<sup>[14]</sup>首先使用空间杆系模型分析铁路桁梁桥冲击系数.但对于复杂的桥梁,如桁梁桥、拱桥、斜拉桥以及悬索桥等,桥梁实际截面由于有强大的桥面板(系)的联系,仅采用杆系有限元建模时需作大量简化处理,不能完整反映桥梁的真实动力行为,还会导致空间横向振动和扭转振动特性存在较大误差.因此车-桥振动分析中桥梁有限元模型将朝着更精细化方面发展,桥梁有限元模型必须是一个能够全面、正确反映结构真实性态的完整的计算模型,即依据实际结构,采用多种单元类型(包括梁单元、桁架单元、板壳单元和实体单元等)组合而成的空间有限元模型. Kaliyaperumal 等<sup>[37]</sup>采用板壳单元和梁单元对中小跨铁路钢梁桥建模和动力计算, Yau 等<sup>[38]</sup>、Li 等<sup>[39]</sup>和任伟新等<sup>[40]</sup>采用梁单元和杆单元建立了完整的大跨度斜拉桥有限元模型进行动力分析.

为减少单元数和计算工作量,曾庆元院士及其研究生<sup>[41]</sup>采用梁段或桁段有限单元建立桥梁模型并进行车-桥空间振动分析.其思路是取节间桁段视为一个单元,将桁段质量缩聚至角点和其他点,单元之间通过4个角点联系.采用桁段有限元法针对大跨度、特大跨桁架桥进行建模和车-桥动力响应计算,是一种相对简单而又不失精度的有效方法.

总之,依据实际结构,采用多种单元类型模拟不同结构构件,是目前建立桥梁有限元模型的主

流.但实际上常常会遇到模型的完整性与单元规模和计算量巨大的矛盾,需要依据具体的结构和实际情况在这两者之间取得平衡.

#### 3.2 模态坐标法

模态坐标法是减少结构自由度的一种简便方法,首先求取结构自由振动的频率和振型,再利用振型的正交性,把互相耦联的运动方程解耦,使其转化为互相独立的模态方程.因许多工程问题往往只需要考虑前几阶振型就可以获得满意的精度,所以大大减少了自由度数量.该方法需获取桥梁结构的振型信息,对于复杂桥型,仍以有限元法建模为基础,先建立桥梁的有限元模型,再进行模态信息提取.

采用模态坐标法的优点是可以减少计算工作量,但该方法难以处理非线性问题及局部振动问题,此外,采用基于振型函数的模态坐标法难以考虑桥上列车质量及作用力动态分布引起的结构自振特性的变化和影响.

上述两种方法建模时,对桥梁结构的材料特性、连接形式、外部作用进行了理想化,同时施工过程中的误差、材料及构件的时变性等众多因素,使得依据桥梁设计图纸建立的模型往往与实际桥梁结构不一致.因此,对桥梁模型的正确性检验以及模型修正是研究车-桥耦合振动问题的重要环节,这方面的研究正在逐步展开. Kaliyaperumal 等<sup>[37]</sup>通过比较模型分析频率是否与经验值相符合来验证桥梁模型的正确性, Rebelo 等<sup>[42]</sup>和 De-Roeck 等<sup>[43]</sup>则通过对桥梁进行环境振动试验来验证模型,肖祥等<sup>[44]</sup>基于环境振动试验得到的模态参数对桥梁初始有限元模型进行修正,得到反映桥梁真实动力行为的基准有限元模型,并以此为基础研究武汉天兴洲长江大桥车-桥耦合振动问题.

基于有限元模型修正的车-桥耦合振动研究是新的研究趋势,一般采用基于灵敏度分析的参数修正法修正桥梁初始有限元模型,其基本思路是通过修正结构的设计参数,达到模型分析值与测试值在频率、振型以及动力响应3方面较好吻合的目的<sup>[45]</sup>.但这种方法仅适用既有桥梁,对设计中的桥梁车-桥振动分析无法适用.

### 4 轮轨接触

轮轨接触是车-桥耦合振动的关键问题之一,它直接影响着车-桥耦合振动模拟计算的准确性,

需采用合适的轮轨接触模型连接车辆和桥梁两个子系统。

#### 4.1 轮轨接触关系

从处理方法上, 轮轨接触一般分为轮轨弹性接触和轮轨约束接触。弹性接触考虑轮轨之间的弹性压缩变形, 并考虑轮轨偶尔分离的情况, 常用的如赫兹非线性弹性接触理论。约束接触则认为轮轨均不发生变形, 且始终保持接触。两模型在轮轨接触点、轮轨接触力计算等方面均不相同。Shabana 等<sup>[46-47]</sup>对两种接触方式进行了比较分析, 并针对两点接触问题提出混合接触模型, 即将踏面上的接触点(第一接触点)按照约束接触处理, 轮缘上的接触点(第二接触点)按照弹性接触处理。肖祥<sup>[48]</sup>从轮轨竖向密贴和轮轨法向密贴两个方面研究了轮轨约束关系, 并以此建立车-桥空间耦合振动模型。

对轮轨接触关系的研究都是以假定某种轮轨接触模型为前提, 它主要包括轮轨接触几何关系和轮轨接触力两个方面。

##### 4.1.1 轮轨接触几何关系

轮轨接触几何关系, 也就是轮对与钢轨间的空间位置关系, 其实质是描述两个复杂曲面在空间运动中的动态几何接触, 计算轮轨接触点位置和轮轨接触几何参数(接触角、曲率等)。早期的轮轨接触关系研究忽略了轮对摇头角位移, 轮轨之间的接触关系只是车轮主轮廓线与钢轨轮廓线之间的接触关系, 属二维轮轨接触问题。用数值方法求解轮轨接触三维几何关系是目前的基本趋势<sup>[49]</sup>, 该方法一般有两个步骤: 第一, 通过联立方程求解两接触面上的离散点在整体坐标系中的坐标参数; 第二, 通过距离计算及相关约束条件判断点与点是否接触<sup>[50-51]</sup>, 其基本思路是将解析问题减少到简单一维问题, 再进行数值求解。计算轮轨接触点的另一种方法是神经网络算法<sup>[52]</sup>, 这是一种非迭代方法, 其特点是能节省计算时间。

##### 4.1.2 轮轨接触力

轮轨接触力分为轮轨法向力和轮轨切向力(包括轮轨蠕滑力和蠕滑力矩), 它以精确的轮轨接触点计算为基础, 并考虑接触点间的蠕滑。大量学者对轮轨接触力学, 尤其是轮轨蠕滑力/率理论、轮轨接触试验研究等方面做了大量工作, 已取得丰富成果<sup>[53]</sup>。

轮轨法向力计算大多数是采用赫兹非线性接

触理论, Pombo 在赫兹接触模型基础上考虑滞后阻尼的作用, 其法向接触力包括“赫兹”部分和阻尼部分, 前者与压缩缩进位移相关, 后者与缩进速度相关, 该模型能解释接触过程中能量损耗<sup>[50]</sup>。

在轮轨切向力计算方面, 荷兰学者 Kalker 在 Johnson 和 Carter 的研究基础上先后提出了 Kalker 线性蠕滑理论、Kalker“简化理论”和三维非线性精确理论<sup>[54-56]</sup>。Kalker 线性蠕滑理论只适用于小蠕滑率和小自旋的情况, Shen 等<sup>[57]</sup>提出的启发式非线性模型(又称“沈志云-Hedrick-Elkins 理论”)对蠕滑力的计算进行非线性修正, 但该模型忽略蠕滑力矩, 不适合高速自旋的情况。Polach<sup>[58]</sup>在上述基础上又考虑了自旋的影响, 该方法(Polach Method)能计算非线性蠕滑力和蠕滑力矩, 在计算速度上优于 Kalker 精确理论和 Kalker“简化理论”。采用沈志云-Hedrick-Elkins 理论并结合考虑自旋影响, 是目前应用比较广泛的非线性轮轨接触理论。

#### 4.2 轮轨接触试验

日本学者 Matsumoto 等<sup>[59]</sup>利用滚动试验台和 1:1 转向架模型进行了干摩擦条件下轮轨滚动接触纵、横向蠕滑力试验, 分别通过控制轮对和轨轮的摇头角及左右轮滚动速度差来产生横向蠕滑力和纵向蠕滑力, 并与 Vermeulen-Johnson 理论结果作了比较。同时还对轮轨接触力进行了现场测试, 采用非接触式间隙传感器测横向力、通过测试相关部件应变的方式来测轮轨法向力和纵向力<sup>[60]</sup>。西南交通大学牵引动力国家实验室用原型尺寸试验模型进行了多因素轮轨滚动接触试验研究<sup>[61-62]</sup>, 如 Kalker 三维非 Hertz 滚动接触理论试验验证、高速动态轮轨蠕滑力试验研究等。Gullers 等<sup>[63]</sup>选定瑞典境内 10 段 0.5~1.0 km 长的轨道线路进行试验, 测试轮轨竖向力和轨道不平顺, 分析了轮轨竖向力响应的高频特性, 以及轨道不平顺与轮轨接触力的关系。

## 5 列车-桥梁耦合振动模型

目前, 对列车-桥梁耦合振动的建模方式总体可分为两种, 即分开建模和整体建模。

### 5.1 分开建模

分开建模的基本思路是以轮轨接触处为界, 将车-桥耦合系统分为车辆与桥梁两个子系统, 分

别建立车辆和桥梁两子系统的振动方程

$$\begin{aligned} [M_V]\{\ddot{u}_V\} + [C_V]\{\dot{u}_V\} + [K_V]\{u_V\} &= \{f_V\} \\ [M_B]\{\ddot{u}_B\} + [C_B]\{\dot{u}_B\} + [K_B]\{u_B\} &= \{f_B\} \end{aligned}$$

式中, V 表示车辆系统, B 表示桥梁系统. 由轮轨接触点处几何协调来体现车辆子系统与桥梁子系统的耦合, 并通过轮轨相互作用力平衡关系联立两运动方程, 再采用迭代法求解系统响应.

分开建模的方法主要体现系统耦合性, 它从轮轨接触关系的分析出发, 能够描述轮轨复杂的相互作用力和位移协调关系. 同时, 由于各子系统振动方程质量、刚度、阻尼矩阵不具时变性, 可以避免每一迭代步长上对系统矩阵的重新生成, 减少计算工作量.

## 5.2 整体建模

整体建模的方法最早由曾庆元院士提出<sup>[64-65]</sup>, 其基本思路是把桥上列车及桥梁视为一个整体系统, 桥梁的边界条件就是此系统的边界条件, 将列车与桥梁所有自由度耦合在一起, 采用“弹性系统动力学总势能不变值原理”和形成矩阵的“对号入座”法则生成耦合系统振动方程的质量、阻尼、刚度矩阵和载荷列阵, 再进行迭代求解.

整体建模能够避开轮轨接触关系的不确定性, 但需引入构架蛇行波作为系统激励源. 它的另一个主要优点体现在建模思路清晰, 结合“对号入座”法则能较方便地得到复杂系统振动方程的质量、阻尼和刚度矩阵, 利于耦合系统模型扩展和精细化研究, 例如轨道模型中细化无砟轨道扣件、轨道板、弹性垫层、底座等结构和构件的存在与影响.

## 6 数值计算方法

对车-桥耦合振动方程的求解一般采用数值计算方法, 大多采用时域方法进行, 主要包括轮轨接触数值计算、耦合系统运动方程求解, 而轮轨接触计算是运动方程求解的基础.

在轮轨接触数值计算方面, Kalker 先后开发了与其轮轨蠕滑理论相对应的数值计算程序 CONTACT, FASTSIM, DUVOROL, 至今仍在采用. Polach 提出一种新的轮轨接触数值计算方法<sup>[66]</sup>, 并与 CONTACT, FASTSIM 等计算程序进行比较研究, 该方法在满足精度要求情况下能缩短计算时间.

运动方程求解方面, 由于车-桥耦合系统是一个大型的、复杂的时变系统, 目前只能采用直接数值积分法, 广泛采用的如 wilson- $\theta$  法、Newmark- $\beta$  法等, 由于车-桥耦合系统自由度多、需采用的积分步长短等特点, 采用上述方法迭代求解车-桥耦合振动方程费时费力. 翟婉明<sup>[67]</sup>提出了一种适用于车辆和线路结构振动分析的显示快速数值积分方法, 并针对桥梁结构自由度多, 求解规模过大的特点, 在车-桥耦合振动分析中提出了显-隐式结合数值积分方法, 该方法在提高运算效率的同时兼顾了计算精度.

车-桥耦合系统本质上是大型的非线性、时变系统, 根据这些特点, 探索有效的适合于车-桥耦合振动方程求解的数值计算方法仍是有待进一步研究的问题.

## 7 工程应用

车-桥耦合振动所涉及的工程应用范围广泛, 主要包括下面几方面.

### 7.1 动力响应研究

车辆及桥梁动力响应如振动加速度、位移、冲击系数等, 是衡量行车安全性和乘坐舒适性的重要指标, 动力响应问题的研究是车-桥耦合振动研究的最基本的问题.

Chu 等<sup>[68]</sup>以预应力混凝土多跨箱梁为对象, 模拟计算列车过桥时不同位置和不同行驶速度下的动力冲击系数, 并与设计标准值、测试值进行比较. Wu 等<sup>[69]</sup>、Yang 等<sup>[70]</sup>通过建立车-桥耦合系统空间模型, 研究了 3 种轨道不平顺条件下列车行驶速度对响应的影响, 模拟计算了桥上两列车双线对开工况的动力响应, 并以混凝土简支梁为对象, 研究了车桥频率比、阻尼、轨道不平顺对冲击系数的影响. Majka 等<sup>[29]</sup>以单跨简支梁为研究对象, 研究不同行车速度下, 频率系数(车、桥基频比值)、质量系数(车、桥质量比值)、阻尼系数(包括桥梁阻尼和车辆阻尼)、跨度系数(车长与桥跨比值)等对车、桥动力响应的影响. Rigueiro 等<sup>[71]</sup>研究了不同的轨道结构参数对铁路高架桥梁动力响应的影响. Xia 等<sup>[72]</sup>以高速铰接列车通过 Antoning 桥为例, 对车辆、桥梁的动力响应进行了仿真分析和现场测试, 分析结果与试验值吻合良好, 且动力响应满足行车安全性及舒适性指标要求.

此外, 铁路桥梁上车载不同于公路桥梁, 后者在行车频率、车辆轴重、轴间距、行驶速度等方

面都是随机的,而列车过桥则可等效成一系列具有规则时间间隔的激励,该激励通常包含车辆固有频率以及与行驶速度相关的激振频率,如果这些频率与桥梁的某一频率重合则会引起车桥共振.车桥共振现象发生时,桥梁和车辆振动将会加剧,影响桥梁使用寿命和列车走行性.

Ju 等<sup>[73]</sup>研究了高墩多跨简支梁桥在高速车辆作用下的共振特性,总结了桥梁发生共振的条件,并指出可通过调整两简支梁之间的轴向刚度来阻止共振产生. Li 等<sup>[74]</sup>采用移动载荷模型和车桥耦合系统模型研究了简支钢梁桥的振动响应,指出中小跨度钢桥在高速车辆作用下容易产生共振,并分析了影响共振的主要因素,研究了共振速度(临界速度)与系统参数的关系.

研究不同行车条件下车-桥耦合系统的动力响应和横向刚度,可为桥梁设计、车辆走行性研究提供参考,同时也是既有桥梁检测与评估的重要内容.

## 7.2 特殊载荷作用下车-桥耦合振动

特殊载荷,主要指风载荷和地震载荷,其作用力强,对车-桥耦合系统振动影响大,直接影响列车过桥的安全性和舒适性.随着高速铁路的大力发展,特殊载荷作用下的车-桥耦合振动问题将受到更多关注.

### 7.2.1 风载荷作用下车-桥耦合振动

抗风性能一直是影响大跨度桥梁结构设计的重要因素,对于跨越江河、海峡及峡谷的大跨度桥梁,遭遇强风作用的可能性大,风载荷会使桥梁产生较大变形和振动,改变车体原有振动特性.此外,由于列车的阻风面积大,风载荷在有车时的气动性能与无车时存在较大差别,对于大跨度桥梁车-桥耦合振动问题,必须考虑风载荷作用.

Dianal 等<sup>[75]</sup>最早研究了带有横向平均风压的机动车辆对桥梁结构的附加动力作用.郭向荣等<sup>[76]</sup>采用空间相关的侧向脉动风速场,考虑桥梁和列车的静力风载荷和准定常脉动风载荷作用,采用时域分析方法对脉动风作用下高速列车通过桥梁时的车桥动力响应进行了分析,从安全性和舒适性两个方面分析了临界风速.夏禾等<sup>[77]</sup>对香港青马大桥在风和列车同时作用下的振动特性进行了分析,分析中基于模拟的脉动风速场,得到桥梁的模态抖振风力和模态自激风力,模拟了桥梁的风致振动,采用模态综合法求解车桥动力响应,

研究了桥梁风致振动对车-桥耦合振动特性的影响. Li 等<sup>[78]</sup>、李永乐等<sup>[79]</sup>将风、车、桥作为一个相互作用的系统,建立了风-车-桥系统非线性空间耦合分析模型,综合考虑了桥梁的抖振响应、车-桥耦合振动、桥梁静风位移对轨道不平顺的影响、风载荷对车辆的影响、桥梁和车辆间的相互气动影响、结构非线性和气动非线性的影响等,提出了一种简化的大跨度斜拉桥三维脉动风速场模拟方法. Xu 等<sup>[80]</sup>在研究斜拉桥的车-桥耦合振动时考虑到了列车风,在计算列车气动力时采用的是:按等效风向测得的列车在路基上的气动力.

上述研究较好地利用了桥梁抗风的研究成果,推动了风-车-桥系统耦合振动的研究与发展,但关于风载荷的研究将车辆、桥梁简化为二维模型,较少考虑车辆引起的三维风效应.

### 7.2.2 地震载荷作用下车-桥耦合振动

为保证线路的平顺性和稳定性,高速铁路桥梁可能连续几十公里甚至上百公里,而且高速铁路行车密度大,一些大跨度桥梁多为双线桥,发生地震时,列车正好在桥上的几率很大.地震载荷作为外部激励作用在桥梁支撑处,该激励会导致桥墩墩顶位移、影响轨道线形及不平顺、加剧车辆和桥梁振动,严重危及列车运行安全甚至引起脱轨.因此,在“桥梁抗震”与“车-桥耦合振动”的基础上,研究地震作用下车-桥耦合振动很有必要.

日本铁道技术研究所针对多跨简支梁桥和大跨度斜拉桥在横向按正弦波激励和随机激励作用下的桥梁上的车辆走行安全性进行了分析,给出了相应的安全限界,并从能量平衡的观点,提出了一种既能适合正弦波激励又能适合地震波载荷的简便评价方法,用于对地震时桥上列车的运行安全进行快速估计<sup>[81]</sup>.韩艳等<sup>[82]</sup>从行车速度、桥梁跨度、墩高以及地震强度等不同影响因素研究了地震作用下列车过桥的安全性问题,并给出地震发生时能确保安全运行的速度限值.

有关地震作用下车-桥耦合振动的研究成果并不多,对于如何确保地震发生时列车在高速铁路上运行的安全性仍是有待研究的问题.

## 7.3 基于车-桥耦合振动的系统识别

基于车-桥耦合振动的系统识别是随着车-桥耦合振动研究的深入而逐步展开:

Rebelo 等<sup>[42]</sup>将车辆振动作为桥梁系统激振

源,对一系列中小跨铁路桥进行动力响应测试,通过对火车刚好过桥后桥梁自由振动测试和环境振动测试两种方法来识别桥梁频率,研究表明,火车激振作用下的识别效果优于环境振动。

Yang 等<sup>[83]</sup>、Lin 等<sup>[84]</sup>将车辆简化成移动单自由度系统,以简支梁桥为研究对象,根据车-桥耦合振动特点,从车辆动力响应识别、提取桥梁振动频率,并进行了试验验证。这种频率识别方法以特定车载为激励,其激励能量高于环境激励,能将桥梁激振至一定程度,以车辆振动信号为输出,在安装、测试等方面能节省大量人力、物力。

Zhu 等<sup>[85-89]</sup>以车辆通过简支梁为对象,根据桥梁动力响应,采用多种方法识别车辆轴重,分析了影响识别精度的众多因素,并进行试验验证;还对移动车载作用下的混凝土简支梁进行了损伤识别,研究车辆参数、测试噪音等对识别结果的影响,结果表明测试噪音、车辆速度、轨道不平顺对损伤识别不敏感。

Kim 等<sup>[90]</sup>针对高速铁路列车运行速度快,列车过桥时间短,实际桥梁动力测试时获取的有效数据量少等特点,采用 TDD 技巧对高速铁路桥梁进行模态参数提取,该方法能保证识别精度,有其适用性。

车-桥耦合振动系统是一个自激振动系统,车辆与桥梁之间的激励具备强度大,规律性强等特点。根据实测的车、桥动力响应,并结合上述特点进行系统识别,如桥梁结构的损伤识别、车辆载荷识别及桥梁长期的健康监测等,是车-桥耦合振动研究的又一应用领域。

#### 7.4 其他

车-桥耦合振动的工程应用还包括振动控制研究、车-桥耦合振动对环境的影响研究等。

振动控制通过在结构的敏感部位设置控制装置,改变结构的动力特性,隔离、吸收和耗散(震)动能,使结构的动力响应减小。对于大跨度桥梁,高速列车经过时会产生很大振动,风载荷或地震载荷作用又会使之加剧,通过采取有效的控制技术(如 MTMD)来实现系统减振。

车-桥耦合振动对环境的影响主要体现在环境振动和噪音等方面。随着高速铁路、地铁、城市轻轨的发展,环境影响问题将日益突出,研究列车通过时引起的环境振动幅度、振动传播距离、振动对周围建筑物的破坏影响,以及振动噪音等也是车-桥耦合振动的一个研究方向。

## 8 结论与展望

车-桥耦合振动一直是理论与工程应用十分关心的研究课题,现代高速、重载铁路的大力发展,对桥梁(线路)的设计提出了越来越高的要求,车-桥耦合振动分析已经成为制约现代高速和重载铁路发展的关键技术问题之一。大量学者和研究人员从模型建立、轮轨接触、数值计算、工程应用等方面对车-桥耦合振动问题进行了研究,但仍存在以下几方面的研究有待进一步开展:

(1) 详细考虑无砟轨道结构的高速铁路车-桥耦合振动研究

高速铁路线的桥梁比例大(以京沪高铁为例高达 80%),高速铁路无砟轨道结构由于其制作及铺设精度高,轨道几何形位控制精确,整体性强,对车辆和桥梁的动力响应影响明显等。研究高速铁路车-桥耦合振动问题时需详细考虑无砟轨道结构的振动与影响,除了桥墩基础的沉降,还需详细考虑如整体轨道板、整体轨道板的温度应力、砂浆层、底座板、摩擦层以及桥梁支座的变形等影响,这是高速铁路车-桥耦合振动一个新的研究方向。

(2) 考虑纵向振动的车-桥耦合空间模型研究

当前采用的车-桥耦合振动“空间模型”大多只考虑了系统竖向和横向振动问题,而忽略车辆和桥梁的纵向振动,还不是真正意义上的空间模型。对于大跨度桥梁等纵向载荷比较明显的情况,则需单独研究其纵向振动问题,这不仅费时费力,而且无法体现不同方向振动的相互影响以及车-桥耦合系统空间模型的完整性。随着桥梁结构在高速铁路线上的广泛采用,在桥梁上出现列车加速、减速、制动等情况将十分普遍,车-桥耦合系统纵向振动问题将不能忽略,考虑纵向振动的车-桥耦合空间模型将是有待研究的问题。

(3) 车-桥耦合模型精细化研究

车-桥耦合系统模型其他精细化方面的研究,如考虑桥梁初始线形变化,桥墩沉降对高速铁路车-桥耦合振动的影响,轨道板的开裂对车-桥耦合系统响应的影响,轨道板温度应力的影响等。随着计算机技术与计算方法的不断发展,精细化的车辆模型、精细化的桥梁模型、精细化的轮轨关系等必定是今后车-桥耦合空间振动研究的发展方向。

(4) 其他问题研究

例如,高速列车/轨道建模的高频柔性特性的

考虑, 关键结构件的非线性特性的考虑, 高速气流场中流固耦合问题, 环境温度对高速列车瞬态行为的影响等。

随着科学技术的发展, 特别是计算机技术的发展, 车-桥耦合振动定性分析的手段已经不能满足要求。现代车-桥耦合振动分析不仅需要精细合理的车辆模型, 更需要准确反映桥梁(线路)的实际工作状况的车-桥耦合振动模型。建立更加精细合理、运算效率高的车-桥耦合振动模型和动力学方程, 不仅仅停留在单一的竖向分析、横向分析基础上, 而且车辆纵向振动应该被更合理地考虑, 同时, 要求更加全面地综合考虑整个体系中的各种因素, 更系统地分析车桥相互作用的影响, 更合理地考虑轮轨接触力和轮轨关系, 已成为车-桥耦合振动研究的必然趋势。

## 参考文献

- 1 何度心. 列车动载. 地震工程与工程振动, 1988, (4): 78-98
- 2 Brady S P, O'Brien E J, Žnidarič A. Effect of velocity on the dynamic amplification of a vehicle crossing a simply supported bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(2): 241-249
- 3 Zhu X Q, Law S S. Identification of moving interaction force with incomplete velocity information. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(6): 1349-1366
- 4 Akin J E, Mofid M. Numerical solution for response of beams with moving mass. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115(1): 120-131
- 5 Yang Y B, Lin C W. Vehicle-bridge interaction dynamic and potential application. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 284(1-2): 205-226
- 6 Yang Y B, Lin C W, Yau J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 272(3-5): 471-493
- 7 Cheng Y S, Au F T K, Cheung Y K, et al. On the separation between moving vehicles and bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 222(5): 781-801
- 8 Zhang Q L, Vrouwenvelder A, Wardeniner J. Numerical simulation of train-bridge interactive dynamics. *Computes and Structures*, 2001, 79(10): 1059-1075
- 9 Xia H, De-Roeck G, Zhang H R, et al. Dynamic analysis of train-bridge system and its application in steel girder reinforcement. *Computes and Structures*, 2001, 79(21): 1851-1860
- 10 Wu Y S, Yang Y B, Yau J D. Three-dimensional analysis of train-rail-bridge interaction problems. *Vehicle System Dynamic*, 2001, 36(1): 1-35
- 11 Lee C H, Kawatani M, Kim C W, et al. Dynamic response of a monorail steel bridge under a moving train. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 294(3): 562-579
- 12 张楠, 夏禾, 郭薇薇, 等. 京沪高速铁路南京大胜关长江大桥风-车-桥耦合振动分析. 中国铁道科学, 2009, 30(1): 41-48
- 13 Lee S Y, Cheng Y C. A new dynamic model of high-speed railway vehicle moving on curved tracks. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2008, 130(1): 011009-1-011009-10
- 14 Chu K H, Garg V K, Dhar C L. Railway-bridge impact: Simplified train and bridge model. *Journal of the Structural Division*, 1979, 105(9):1823-1844
- 15 Chu K H, Garg V K, Wiriyachai A. Dynamic interaction of railway train and bridges. *Vehicle System Dynamics*, 1980, 9(4): 207-236
- 16 Wiriyachai A, Chu K H, Garg V K. Bridge impact due to wheel and track irregularities. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 1982, 108(4): 648-666
- 17 Chu K H, Garg V K, Wang T L. Impact in railway prestressed concrete bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1986, 112(5): 1036-1051
- 18 Lou P. A vehicle-track-bridge interaction element considering vehicle pitching effect. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 41(4): 397-427
- 19 宋国华, 高芒芒, 黎国清. 桥梁墩台不均匀沉降时的车桥垂向系统耦合振动分析. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 29-33
- 20 Liu K, De-Roeck G, Lombaert G. The effect of dynamic train-bridge interaction on the bridge response during a train passage. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 325(1-2): 240-251
- 21 Vu-Quoc L, Olsson M. Formulation of a basic building block model for interaction of high speed vehicles on flexible structures. *Journal of Applied Mechanics*, 1989, 56: 451-458
- 22 Vu-Quoc L, Olsson M. High-speed vehicle models based on a new concept of vehicle/structure interaction component: Part 1-formulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, 115: 140-147
- 23 Vu-Quoc L, Olsson M. High-speed vehicle models based on a new concept of vehicle/structure interaction component: Part 2: Algorithmic treatment and results for multi-span guideways. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, 115: 148-155
- 24 Olsson M. Finite element modal co-ordinate analysis of structures subjected to moving loads. *Journal of Sound and Vibration*, 1985, 99(1): 1-12
- 25 Vu-Quoc L, Olsson M. A computational procedure for interaction of high-speed vehicles on flexible structures without assuming known vehicle nominal motion. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1989, 76: 207-244
- 26 张卫华. 机车车辆运行态模拟研究. 成都: 西南交通大学出版社, 1999. 76-77
- 27 Tanabe M, Yamada Y, Wakui H. Modal method for interaction of train and bridge. *Computer and Structures*, 1987, 27(1): 119-127
- 28 高芒芒. 高速铁路列车-线路-桥梁耦合振动及列车走行性研究. 中国铁道科学, 2002, 23(2): 135-136
- 29 Majka M, Hartnett M. Effects of speed, load and damping on the dynamic response of railway bridges and vehicles. *Computers and Structures*, 2008, 86(6): 556-572
- 30 Majka M, Hartnett M. Dynamic response of bridges to moving trains: A study on effects of random track irregularities and bridge skewness. *Computers and Structures*, 2009, 87(19-20): 1233-1252
- 31 Zhang N, Xia H, Guo W W. Vehicle-bridge interaction analysis under high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 309(3-5): 407-425
- 32 Wang T L, Garg V K, Chu K H. Railway bridge/vehicle interaction studies with new vehicle mode. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(7): 2099-2116
- 33 王荣辉, 郭向荣, 曾庆元. 高速列车-钢桁梁桥系统横向振动随机分析. 铁道学报, 1996, 18(1): 90-95
- 34 陈淮, 郭向荣, 曾庆元. 大跨度斜拉桥动力特性分析. 计算力学学报, 1997, 14(1): 57-63
- 35 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学. 第3版. 北京: 科学出版社, 2007. 38-48



- 36 Xia H, De-Roeck G, Zhang N, et al. Experimental analysis of a high-speed railway bridge under Thalys trains. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 268(1): 103-113
- 37 Kaliyaperumal G, Imam B, Righiniotis T. Advanced dynamic finite element analysis of a skew steel railway bridge. *Engineering Structures*, 2011, 33(1): 181-190
- 38 Yau J D, Yang Y B. Vibration reduction for cable-stayed bridges traveled by high-speed trains. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2004, 40(3): 341-359
- 39 Li Y L, Qiang S Z, Liao H L, et al. Dynamics of wind-rail vehicle-bridge systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93(6): 483-507
- 40 任伟新, 彭雪林. 青洲斜拉桥的基准动力有限元模型. 计算力学学报, 2007, 24(5): 609-614
- 41 曾庆元, 填志奇, 杨毅, 等. 桁架行车空间振动计算的桁段有限元法. 桥梁建设, 1985, 4: 1-16
- 42 Rebelo C, Simões da Silva L, Rigueiro C, et al. Dynamic behaviour of twin single-span ballasted railway viaducts-field measurements and modal identification. *Engineering Structures*, 2008, 30(9): 2460-2469
- 43 Liu K, Reynders E, De-Roeck G, et al. Experimental and numerical analysis of a composite bridge for high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 320(1-2): 20-220
- 44 肖祥, 任伟新. 基于桥梁基准有限元模型的列车-桥梁空间耦合振动分析. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 41-47
- 45 朱安文, 曲广吉. 结构动力模型修正技术的发展. 力学进展, 2002, 32(3): 337-348
- 46 Shabana A A, Berzeri M, Sany J R. Numerical procedure for the simulation of wheel/rail contact dynamics. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2001, 123 (2): 168-178
- 47 Shabana A A, Zaazaa K E, Escalona J L, et al. Development of elastic force model for wheel/rail contact problems. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 269(1): 295-325
- 48 肖祥. 车-桥(线)耦合空间振动分析与应用: [博士论文]. 长沙: 中南大学, 2011. 76-77
- 49 de Pater A D. The Geometrical contact between track and wheelset. *Vehicle System Dynamics*, 1988, 17(3): 127-140
- 50 Pombo J, Ambrósio J, Miguel S. A new wheel-rail contact model for railway dynamics. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(2): 165-189
- 51 Pombo J, Ambrósio J. Dynamic analysis of a railway vehicle in real operation conditions using a new wheel-rail contact detection model. *Vehicle Systems Modeling and Testing*, 2005, 1(1-3):79-105
- 52 Falomi S, Malvezzi M, Meli E, et al. Determination of wheel-rail contact points: Comparison between classical and neural network based procedures. *Physics and Astronomy Meccanica*, 2009, 44(6): 661-686
- 53 金学松, 沈志云. 轮轨滚动接触力学的发展. 力学进展, 2001, 31(1): 33-46
- 54 Kalker J J. Wheel-rail rolling contact theory. *Journal of Wear*, 1991, 144(1-2): 243-261
- 55 Kalker J J. Book of tables for the hertzian creep-force law. In: Report of the Faculty of Technical Mathematics and Informatics, 1996. 96-61
- 56 Kalker J J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling-contact. *Vehicle System Dynamics*, 1982, 11(1): 1-13
- 57 Shen Z Y, Hedrick J K, Elkins J A. A comparison of alternative creep force models for rail vehicle dynamic analysis. *Vehicle System Dynamics*, 1983, 12(1-3): 591-605.
- 58 Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. *Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, 2005, 258(7-8): 992-1000
- 59 Matsumoto A, Sato Y, Nakata M, et al. Wheel-rail contact mechanics at full scale on the test stand. *Wear*, 1996, 191(1-2): 101-106
- 60 Matsumoto A, Sato Y, Ohno H, et al. A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations. *Wear*, 2008, 265(9-10): 1518-1525
- 61 张卫华, 金学松, 薛弼一. 单轮对试验台及轮轨蠕滑力计算模型的验证. 铁道车辆, 1997, 35(5): 1-4
- 62 金学松, 沈志云, 陈良麒, 等. 单轮对轮轨蠕滑力试验研究. 机械工程学报, 1998, 34(4): 22-27
- 63 Gullers P, Andersson L, Lundén R. High-frequency vertical wheel-rail contact forces: Field measurements and influence of track irregularities. *Wear*, 2008, 265(9-10): 1472-1478
- 64 曾庆元, 郭向荣. 列车桥梁时变系统振动分析理论与应用. 北京: 中国铁道出版社, 1999. 50-87
- 65 曾庆元, 杨平. 形成矩阵的“对号入座”法则与桁架空间分析的桁段有限元法. 铁道学报, 1986, 8(2): 48-59
- 66 Polach O. A fast wheel-rail forces calculation computer code. *Vehicle System Dynamics*, 1999, 33(S): 728-739
- 67 Zhai W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, 39(24): 4199-4214
- 68 Chu K H, Garg V K, Wang T L. Impact in railway prestressed concrete bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1986, 112(5): 1036-1051
- 69 Wu Y S, Yang Y B, Yau J D. Three-dimensional analysis of train - rail - bridge interaction problems. *Vehicle System Dynamics*, 2001, 36(1): 1-35
- 70 Yang Y B, Liao S S, Lin B H. Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(11): 1644-1670
- 71 Rigueiro C, Rebelo C, Simões da Silva L. Influence of ballast models in the dynamic response of railway viaducts. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(15): 3030-3040
- 72 Xia H, Zhang N, De-Roeck G. Dynamic analysis of high speed railway bridge under articulated trains. *Computers and Structures*, 2003, 81(26-27): 2467-2478
- 73 Ju S H, Lin H T. Response characteristics of high-speed trains passing simply supported bridges. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 267(5): 1127-1141
- 74 Li J Z, Su M B. The resonant vibration for a simply supported girder bridge under high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 224(5): 897-915
- 75 Diana G, Cheli F. Dynamic interaction of railway systems with large bridges. *Vehicle System Dynamics*, 1989, 18(1): 71-106
- 76 郭向荣, 曾庆元. 京沪高速铁路南京长江斜拉桥方案行车临界风速分析. 铁道学报, 2001, 23(5): 75-80
- 77 夏禾, 徐幼麟, 阎全胜. 大跨度悬索桥在风与列车荷载同时作用下的动力响应分析. 铁道学报. 2002, 24(4): 83-91
- 78 Li Y L, Qiang S Z, Liao H L, et al. Dynamics of wind-rail vehicle-bridge systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93: 483-507
- 79 李永乐, 强士中, 廖海黎. 风-车-桥系统空间耦合振动研究. 土木工程学报, 2005, 38(7): 61-64
- 80 Xu Y L, Zhang N, Xia H. Vibration of coupled train and cable-stayed bridge systems in cross winds. *Engineering Structures*, 2004, 26(10): 1389-1406
- 81 Luo X, Miyamoto T. Method for running safety assessment of railway vehicles against structural vibration

- displacements during earthquakes. *Quarterly Report of RTRI*, 2007, 48(3): 129-135
- 82 韩艳, 夏禾. 地震作用下列车过桥安全性分析. *中国安全科学学报*, 2006, 14(7): 24-30
- 83 Yang Y B, Lin C W, Yan J D. Extracting the bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 272(3-5): 471-493
- 84 Lin C W, Yang Y B. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification. *Engineering Structures*, 2005, 27(13): 1865-1878
- 85 Zhu X Q, Law S S. Identification of vehicle axle loads from bridge dynamic responses. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 236(4): 705-724
- 86 Zhu X Q, Law S S. Moving forces identification on a multi-span continuous bridge. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 228(2): 377-396
- 87 Zhu X Q, Law S S. Practical aspects in moving load identification. *Journal of Sound and Vibration*, 2002, 258(1): 123-146
- 88 Zhu X Q, Law S S. Dynamic axle and wheel loads identification: Laboratory studies. *Journal of Sound and Vibration*, 2003, 268(5): 855-879
- 89 Zhu X Q, Law S S. Damage detection in simply supported concrete bridge structure under moving vehicular loads. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2007, 129(1): 58-65
- 90 Kim B H, Lee J, Lee D H. Extracting modal parameters of high-speed railway bridge using the TDD technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(3): 702-720

## THE STATE OF ART OF STUDY ON VEHICLE-BRIDGE COUPLING VIBRATION\*

WANG Ningbo<sup>1,2,†</sup>    REN Weixin<sup>1,2</sup>    XIAO Xiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China

<sup>2</sup> High-Speed Railway Construction Technology National Engineering Laboratory, Changsha 410075, China

<sup>3</sup> School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

**Abstract** The studies about vehicle-bridge coupling vibration have been summarized, especially those in the last 20 years. Some results and conclusions were obtained in the following four aspects: vehicle-bridge modeling, wheel-rail contact relationship, numerical calculations and engineering applications. It is an inevitable trend to establish more refined and efficient vehicle-bridge coupling vibration model, to incorporate more factors as a whole, and to analyze comprehensively the interaction effects of vehicle and bridge.

**Keywords** vehicle-bridge coupling vibration, vehicle model, bridge model, wheel-rail contact



任伟新, 长江学者计划特聘教授、博士、博士生导师. 主要研究方向: 桥梁结构空间稳定与振动; 桥梁结构健康诊断、损伤识别与长期健康监测等. 曾获福建省 2007 年科技进步二等奖、湖南省 2010 年自然科学二等奖, 获 8 项发明专利. 目前由中国铁道出版社出版专著 2 本, 在国内外重要学术刊物发表论文 250 余篇, 其国际杂志论文近 130 篇, 被 SCI, EI 收录 70 余篇, SCI 引用近百次.

\* The project was supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2009AA11Z101).

† E-mail: wangnb@csu.edu.cn