



申请同济大学工学博士学位论文

# 车辆—桥梁/轨道系统耦合振动精细 分析理论及应用

(国家科技支撑计划项目资助 编号: 2006BAG04B01)

(香港研究资助局角逐研究用途补助金资助 编号: PolyU 5311/07E)

(上海市优秀学科带头人计划支持 编号: 07XD14204)

培养单位: 土木工程学院

一级学科: 土木工程

二级学科: 桥梁与隧道工程

研究生: 李奇

指导教师: 陈艾荣 教授

吴定俊 教授

徐幼麟 教授

二〇〇八年六月



A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Doctor of Philosophy

# **Refined analysis of vehicle-bridge/track dynamic interaction: theory and applications**

(Supported by National Key Technologies R&D Program under grant No. 2006BAG04B01,  
Research Grants Council of Hong Kong through a CERG grant No. PolyU 5311/07E, and  
Program of Shanghai Subject Chief Scientist under grant No. 07XD14204)

School: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Bridge and Tunnel Engineering

Candidate: Qi Li

Supervisor: Prof. Ai-Rong Chen

Prof. Ding-Jun Wu

Prof. You-Lin Xu

**June, 2008**

车辆-桥梁/轨道系统耦合振动精细分析理论及应用

李奇

同济大学

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其他手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

## 摘要

铁路列车的发展趋势是高速、重载、轻量化，这导致了更为突出的车辆—轨道动力相互作用问题，也促使了具有减振降噪性能的新型轨道结构的应用。与此同时，随着我国客运专线、高速铁路以及城市轨道交通建设的发展，一方面新型桥梁结构不断涌现以适应列车和线路发展，另一方面，某些既有和新建桥梁结构也成为整个线路中的薄弱环节。列车、轨道和桥梁结构的固有耦合特性要求将它们作为一个整体大系统加以考察。上述铁路交通的发展趋势引出了一些车辆—桥梁/轨道动力相互作用领域的精细化研究课题，如桥梁局部振动问题，柔性车体振动问题，以及车辆、轨道结构非线性振动问题。

数值仿真计算是处理车辆—桥梁/轨道系统动力相互作用问题的重要手段。上述精细化研究课题的出现必然对车辆—桥梁/轨道系统耦合振动分析的数值仿真能力、仿真精度和计算效率提出更高的要求。然而，目前国内外提出的耦合振动计算方法往往在计算模型上采用了不同程度的简化，在计算理论上的针对性强而灵活性不足，从而限制了这些方法处理耦合振动领域新课题的能力，难以适用耦合振动精细化分析的发展趋势。针对目前已有数值计算方法的不足，为解决铁路交通发展带来的新课题，本文完善了车辆—桥梁/轨道系统耦合振动的精细分析方法并将之应用于一些实际工程，主要完成了以下几个方面的工作：

(1) 运用有限元方法建立桥梁/轨道模型和车辆模型，基于模态叠加方法分别形成车辆子系统和桥梁/轨道子系统的运动微分方程，可根据需要采用模态综合法和静力凝聚法缩减大型结构动力自由度，为实现系统精细化建模和分析提供基础。

(2) 桥梁/轨道子系统和车辆子系统之间的联系通过轮轨三维滚动接触模型实现，既继承了传统的轮轨密贴模型，又应用了更为精细的轮轨非密贴接触模型。基于 Kalker 线性理论计算轮轨蠕滑力并采用 Shen-Hedrick-Elkins 理论对蠕滑力进行非线性修正。

(3) 将各子系统非线性内力以及轮轨非线性接触力处理为虚拟激振力，解决传统模态叠加法在处理非线性问题上的不足，从考虑非线性的角度实现耦合振动的精细化分析。

(4) 同时利用了基于 Wilson- $\theta$ 、Newmark- $\beta$  和新型显式积分法的分离迭代算法以及基于 Runge-Kutta 的分离同步法求解系统运动微分方程，以满足不同的

计算需要，并寻求最优的计算方案。

(5) 运用谱半径理论分别对采用轮轨密贴接触模型和非密贴接触模型的耦合系统的迭代计算稳定性问题进行了理论分析，并提出了相应的解决和增强迭代稳定性的措施。

(6) 根据以上理论方法，编制了车辆—桥梁/轨道耦合振动分析程序VBC2.0。采用了大量数值算例对分析理论和计算程序进行校核，并以香港青马大桥健康检测系统获取的实测数据为基础进行实测验证。

(7) 运用本文理论方法和计算程序对列车作用下大跨度悬索桥振动问题，箱梁悬臂板局部振动问题、柔性车体振动问题以及轨道结构振动问题进行了精细分析。

**关键词：**车辆—桥梁/轨道系统，耦合振动，精细分析，有限元法，模态叠加法，模态综合法，静力凝聚法，非线性，拟力法，轮轨密贴与非密贴接触，蠕滑，数值稳定性，实测验证，大跨度悬索桥，局部振动，柔性车体，轨道结构

## **Abstract**

It is witnessed that modern railway vehicles become lighter, run faster and can carry heavier loads than ever before. As a result, vehicle-track dynamic interaction becomes intenser, and some new track structures are widely used to reduce vibration and absorb noise. At the same time, with the development of dedicated passenger railway lines, high speed railway lines and urban rail transit traffic, new types of bridge structures are coming forth to keep up with the development of railway vehicles and railway lines on one hand. Nevertheless, some existing as well as newly-built bridges are turning into bottlenecks of the railway lines on the other hand. It is believed that vehicles, track structures and bridges should be treated as large-scale systems because of their inherent dynamic coupling property. And the aforementioned trend of railway transportation leads to some new issues for refined analysis in the field of vehicle-bridge/track coupling dynamics, such as local vibration of bridge, flexible carbody vibration and nonlinear vibration of vehicles and track structures.

Numerical computation is an important method dealing with vehicle-bridge/track coupling dynamics, and the numerical method of high applicability, accuracy and efficiency is required to settle the aforementioned new issues in this research field. Nevertheless, most previous work mainly focuses on limited aspects of the vehicle-bridge/track interaction problem and adopts excessive simplification. As a result, the applicability and accuracy of their methodologies are restricted confronting new issues of vehicle-bridge/track coupling dynamics. In consideration of the limitations of previous work and the arising of new issues, this thesis aims to develop a new method for refined analysis of coupled railway vehicle-bridge/track systems. The main content of this thesis includes:

(1) To account for refined analysis of vehicles, bridges and track structures, the finite element method is used to establish not only bridge/track model (bridge subsystem) but also vehicle models (vehicle subsystem). The mode superposition method is applied to form equation motions of the two subsystems. Component mode synthesis method and Guyan reduction method can be used to reduce dynamic degrees of freedom to facilitate refined analysis of large bridge/track structures.

(2) The connections between the two subsystems are considered based on spatial wheel-rail contact conditions. Both traditional wheel non-jump condition and refined wheel jump condition are considered in this thesis. Kalker's linear theory is applied to compute wheel-rail creeping forces and Shen-Hedrick-Elkins theory is then used to

modify Kalker's linear theory in the case of large creepage ratio.

(3) All of the nonlinear forces in the two subsystems and the nonlinear contact forces between the two subsystems are treated as pseudo forces to facilitate nonlinear analysis. The mode superposition method is then not restricted to solve linear problems and refined nonlinear analysis can be achieved owing to pseudo force treatment.

(4) Iterative schemes with Wilson- $\theta$  method, Newmark- $\beta$  method and the new explicit integration method, non-iterative scheme with Runge Kutta method are respectively developed to find the best solution scheme.

(5) Iterative convergence for both wheel non-jump and jump conditions is quantitatively studied with spectral radius methodology and then some strategies are proposed to settle the well-known low convergence ratio and even divergence problem of iterative scheme.

(6) Based on the aforementioned methodologies, the program named as VBC2.0 is developed to analyze vehicle-bridge/track coupling dynamics. The applicability and reliability of the proposed method and the program are verified firstly through numerical examples and comparisons with previous work, and then through comparisons with measured data from structural health monitoring system of Tsing Ma Bridge in Hong Kong.

(7) Finally, some refined analysis of vehicle-bridge/track dynamic interaction concerning long span suspension bridge, cantilever plate of girder box bridge, flexible carbody and track structures are studied with the help of the proposed method and the associated program.

**Keywords:** vehicle-bridge/track system, dynamic interaction, refined analysis, finite element method, mode superposition method, Guyan reduction method, component mode synthesis method, nonlinearity, pseudo force method, wheel non-jump & jump condition, creepage, numerical stability, verification by field measured data, long span suspension bridge, local vibration, flexible car body, track structures

## 目录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 车辆—桥梁/轨道系统耦合振动研究历史与现状概述 .....	2
1.1.1 车桥振动研究 .....	2
1.1.2 车线振动研究 .....	4
1.1.3 车辆—轨道—桥梁系统耦合振动研究 .....	5
1.2 车辆—桥梁/轨道系统耦合振动研究存在的不足 .....	7
1.2.1 车辆模型 .....	7
1.2.2 桥梁模型 .....	7
1.2.3 轨道结构模型 .....	9
1.2.4 轮轨接触模型 .....	9
1.2.5 数值求解方法 .....	10
1.3 本文的主要研究思路和内容 .....	13
第 2 章 车辆、桥梁/轨道计算模型与运动微分方程 .....	17
2.1 车辆模型与运动微分方程 .....	17
2.1.1 铁路车辆构造特点与计算假定 .....	17
2.1.2 车辆模型的建立 .....	20
2.1.3 物理坐标下的车辆运动微分方程 .....	23
2.1.4 模态坐标下车辆运动微分方程 .....	24
2.2 桥梁/轨道模型与运动微分方程 .....	27
2.2.1 铁路桥梁及桥上轨道结构 .....	27
2.2.2 模态坐标下桥梁/轨道运动微分方程 .....	30
2.2.3 大型结构自由度的缩减 .....	30
2.2.4 基于模态叠加法的应力/内力计算 .....	35
2.3 本文建模方法的主要优势 .....	36
2.4 本章小结 .....	37
第 3 章 车辆、桥梁/轨道运动微分方程右端激振力 .....	39
3.1 由轮轨相互作用产生的激振力 .....	39

3.1.1 轮轨系统坐标系与坐标变换.....	40
3.1.2 轮轨空间接触几何参数.....	42
3.1.3 轮轨法向力的求解.....	47
3.1.4 轮轨蠕滑力的求解.....	51
3.1.5 轮轨激励模型及处理.....	56
3.1.6 轮轨耦合原理.....	63
3.2 由系统内力移到右端项产生的虚拟激振力.....	64
3.3 其他外部激振力.....	66
3.4 本章小结.....	67
<b>第 4 章 数值求解方法与迭代稳定性.....</b>	<b>69</b>
4.1 分离迭代法.....	70
4.2 分离同步法.....	73
4.3 用于迭代稳定性分析的简化模型.....	74
4.4 对应于简化模型的迭代稳定性分析.....	75
4.4.1 密贴接触弹簧振子模型.....	75
4.4.2 非密贴接触弹簧振子模型.....	78
4.5 车辆—桥梁/轨道系统模型迭代稳定性分析.....	80
4.6 迭代稳定性与收敛性、计算效率的关系.....	81
4.7 本章小结.....	83
<b>第 5 章 程序编制及数值验证.....</b>	<b>85</b>
5.1 程序编制介绍.....	85
5.1.1 前处理功能.....	85
5.1.2 后处理功能.....	87
5.1.3 程序流程.....	88
5.2 程序考核与数值实验.....	89
5.2.1 匀速移动簧上质量过桥验证.....	89
5.2.2 非线性处理功能验证.....	90
5.2.3 轨道不平顺作用下车辆振动响应验证.....	91
5.2.4 车辆—轨道—桥梁系统耦合振动验证.....	96
5.2.5 迭代稳定性分析数值实验.....	99

5.2.6 新型显式积分方法迭代收敛性验证.....	103
5.3 本章小结.....	104
<b>第 6 章 大跨度悬索桥应力和加速度分析与实测验证.....</b>	<b>105</b>
6.1 大跨度桥梁应力和加速度计算时振动模态选取的指导原则.....	107
6.1.1 移动荷载作用下简支梁共振分析.....	107
6.1.2 移动荷载作用下弹性地基梁共振分析.....	111
6.1.3 从共振分析导出大跨度振动模态选取的指导原则.....	113
6.2 列车作用下青马大桥动力响应计算与实测.....	114
6.2.1 青马大桥及其有限元模型.....	114
6.2.2 健康监测系统与实测数据.....	115
6.2.3 车桥动力计算参数.....	119
6.2.4 桥梁振动模态的选取.....	121
6.2.5 动力响应对比与分析.....	122
6.3 本章小节.....	129
<b>第 7 章 考虑桥面板局部振动的车桥振动分析.....</b>	<b>131</b>
7.1 桥面板局部共振条件.....	132
7.2 轻轨列车作用下预应力混凝土引桥局部振动分析.....	135
7.2.1 计算模型和参数.....	135
7.2.2 桥梁自振特性分析.....	137
7.2.3 计算结果分析与讨论.....	138
7.3 高速列车作用下钢—混凝土组合梁引桥局部振动分析.....	141
7.3.1 计算模型和参数.....	141
7.3.2 计算结果分析与讨论.....	144
7.4 桥面板局部刚度评定标准与方法探讨.....	148
7.4.1 局部振动频率.....	149
7.4.2 局部静挠度.....	150
7.5 本章小节.....	153
<b>第 8 章 考虑车体柔性的车桥振动分析.....</b>	<b>155</b>
8.1 柔性车体自振频率与车桥系统动力参数.....	156
8.2 柔性车体共振机理分析.....	158

8.2.1 竖向振动 .....	158
8.2.2 横向振动 .....	161
8.3 计算结果分析与讨论 .....	163
8.3.1 竖向振动 .....	163
8.3.2 横向振动 .....	167
8.4 本章小节 .....	171
<b>第 9 章 考虑轨道结构的车桥振动分析 .....</b>	<b>173</b>
9.1 单层轨道结构模型 .....	174
9.1.1 轨道结构对轮对力的影响 .....	175
9.1.2 轨道结构对车体加速度的影响 .....	178
9.1.3 轨道结构对桥梁振动响应的影响 .....	179
9.2 双层轨道结构模型 .....	181
9.2.1 钢轨—混凝土轨道板—下承式板桁结合梁桥模型 .....	181
9.2.2 轮轨密贴与非密贴接触模型对动力仿真结果的影响 .....	184
9.2.3 是否考虑轨道结构对系统动力响应的影响 .....	191
9.2.4 轨下胶垫刚度（阻尼）对系统动力响应的影响 .....	194
9.2.5 轨道板下 CA 砂浆刚度（阻尼）对系统动力响应的影响 .....	197
9.3 本章小节 .....	200
<b>第 10 章 总结与展望 .....</b>	<b>203</b>
10.1 主要研究工作及其结论 .....	203
10.2 主要创新点 .....	208
10.3 未来研究展望 .....	209
致谢 .....	211
参考文献 .....	213
附录 A 本文采用的车辆模型参数 .....	221
附录 B 国内外适合车辆—桥梁/轨道耦合振动分析的部分程序 .....	223
个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果 .....	225

## 第 1 章 引言

“十一五”期间，我国将建设铁路新线 17000 公里，其中客运专线 7000 公里；既有线增建二线 8000 公里，既有线电气化改造 15000 公里。2010 年全国铁路营业里程达到 9 万公里，复线和电气化比例分别达到 45%以上，续转和新安排建设项目达 200 多个，其中客运专线项目 28 个，建设总投资 12500 亿元<sup>[1]</sup>。

在大规模的铁路交通建设过程中，必要的车桥耦合振动分析是保障铁路桥梁安全、适用和经济的重要技术支持。桥梁是铁路土建工程的主要组成部分，从结构动力学的角度而言，桥梁也是整个铁路线路中的薄弱环节。铁路线路常常需要采用桥梁形式跨越江河、公路或者地质条件不良地区，特别是高速铁路，需要采用全封闭的行车模式，因此整个线路中桥梁比例大。我国既有铁路提速和国外高速铁路的发展经验表明，在列车作用下桥梁振动过大不但致使桥上线路稳定性和结构疲劳强度降低，而且还会影响桥上列车运行的安全性和平稳性。为此，各国规范都规定，在桥梁设计和检定时，要对桥梁的动力性能进行评定，必要时还应进行车桥系统动力分析，以使桥梁动力性能能满足列车高速运行安全的要求<sup>[2]</sup>。例如，我国《新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定》对桥梁基本结构型式作了规定，指出桥梁上部结构应采用刚度大的结构型式，钢结构桥面系不宜采用明桥面；明确规定了桥梁的竖向挠度、横向挠度、梁端折角、扭曲变形限值；规定了简支梁的竖向自振频率最小值，对于竖向频率小于规定值的简支梁，应按实际运营情况进行车桥耦合动力分析，要求其列车运行安全性和舒适性指标满足规定的标准。随着我国客运专线、高速铁路以及城市轨道交通建设高峰时期的到来，非常规的、新型的、复杂的桥梁结构将不断涌现，使得车桥耦合振动分析对指导铁路桥梁建设的重要性和必要性更为突出。

铁路交通是一项系统工程，主要包含车辆、轨道和桥梁 3 个核心组成部分。车辆在桥梁上运动是一个复杂的动力学相互作用过程。车辆、轨道和桥梁 3 个子系统构成一个整体大系统，各个子系统相互渗透、相互影响。一方面，移动的车辆经由轮轨接触界面向轨道传递自重下的静态轮轨作用力和轨道不平顺导致的动态轮轨作用力，从而引起轨道结构的变形与振动，同时轨道结构的变形与振动作用通过轨桥界面向桥梁结构传递作用力，激发桥梁结构的变形与振动；

另一方面，桥梁结构的变形与振动反过来加剧了轨道的变形与振动，进而通过轮轨相互作用加剧车辆系统的振动。上述相互作用过程反复循环、耦合叠加，使得车辆—轨道—桥梁系统处于特定的耦合振动形态中。与车辆和桥梁以中低频振动为主不同，轨道结构本身的振动属于高频范围，轨道结构高频振动对车辆和桥梁低频振动影响有限，但是对轮轨力的高频成分影响极大。因此，是否考虑轨道的振动会极大地影响对脱轨系数与轮重减载率估计。特别在高速行车条件下，有必要考虑轨道结构的振动作用，以便比较准确地模拟轮轨接触力和轮轨脱离现象。综上所述，合理地考虑大系统的耦合作用是准确地研究车辆、轨道和桥梁中任何一个子系统的动力学行为的前提。

显然，轮轨相互作用是连接车辆和轨道—桥梁的“纽带”，也是铁路交通区别于公路交通和磁浮交通的本质特征。以轮轨接触界面为界，本文将车辆—轨道—桥梁系统大系统分为移动的车辆子系统和固定的轨道—桥梁子系统。虽然轨道结构必然存在于铁路桥梁之上，轨道—桥梁子系统是不可分割的，但从理论研究和工程应用的角度来看，为着重研究桥梁结构，在某些具体分析中只考虑虚拟的刚性轨道作用。在这种情况下，轨道—桥梁子系统将退化为桥梁子系统。此外，当只考虑车辆在路基上的运行时，桥梁结构是不存在的，此时轨道—桥梁子系统将退化为轨道子系统。为统一表达，将轨道—桥梁子系统、桥梁子系统和轨道子系统通称为桥梁/轨道子系统，并与车辆子系统一起构成车辆—桥梁/轨道大系统。

## 1.1 车辆—桥梁/轨道系统耦合振动研究历史与现状概述

### 1.1.1 车桥振动研究

车桥振动研究已有 150 多年的历史。自 1825 年英国修建了世界上第一条铁路开始，随着铁路建设的不断发展，特别是英国的 Chester 铁路桥在 1847 年因列车过桥引起强烈的振动而坍塌后，车辆荷载对桥梁结构的动力作用问题的研究愈来愈引起人们关注和兴趣。以计算机在车桥耦合振动研究中的普遍应用为界，车桥振动的发展历程一般可以分为古典理论阶段和现代理论阶段<sup>[3-6]</sup>。

所谓的古典理论主要是指二十世纪五十年代之之前，计算机尚未普遍应用时车桥振动的研究理论和方法。古典理论研究阶段研究方法以试验为主，从研究桥梁的冲击系数，到研究蒸汽机锤击力作用下的共振车速，进而发展到对桥梁横

向振动机理的研究。理论研究方面，古典理论的特征是没有考虑或只简单考虑车桥振动时两者之间的耦合关系，采用了不是忽略桥梁的质量就是忽略车辆质量的基本假定，其车桥振动模型基本经历了静力法、移动常量力过桥、移动简谐力过桥、移动质量过桥以及移动簧上质量过桥的发展过程。古典理论所研究的内容基本是简支梁的竖向动力响应，求解的方法基本是解析解或半解析解，由于受理论水平和计算手段的限制，采用了诸多假设，其分析结果与实际情况相差较大，在应用中存在先天不足。值得肯定的是，古典理论目前在对车桥振动机理的解释上仍有重要意义，其发展末期出现的移动簧上质量模型是现代车桥振动研究模型的雏形，对现代车桥振动理论研究的开辟起了铺垫作用。

二十世纪 60、70 年代以来，电子计算机的出现以及有限元技术的发展，使得车桥振动研究有了飞速的发展，从车桥系统的力学模型、激励源的模拟到研究方法和计算手段等都有了质的飞跃，人们可以建立比较真实的车辆和桥梁计算模型，然后用数值模拟法计算车辆和桥梁系统的耦合振动响应。美国、日本、欧洲和国内诸多学者为车桥系统振动力学理论的发展做出了重要贡献，在车辆模型、桥梁模型以及车桥系统耦合振动上取得了不少进展。1969 年日本修建时速 210 km 的东海道新干线，1978 年法国进行了时速 260 km 的高速铁路试验。车速的提高加剧了桥梁的振动，西方各国都加大了车桥振动理论的研究力度。解决生产实践问题的需要和技术上的可能使得车桥振动理论的研究得到快速发展，从这一阶段开始及以后的研究，一般称为车桥振动研究的现代理论。车桥振动的现代理论主要特征是：车、桥计算模型更加精细、逼真，考虑的影响因素更加全面。车辆模型已从集中力或简单地移动质量加载模型发展到能反映车体，转向架以及轮对各部件振动状态的多刚体振动系统。桥梁结构模型已从古典理论研究的梁桥为主的结构形式扩展到拱桥、斜拉桥、悬索桥等。桥梁的动力响应从以前的二维竖向振动扩展到空间的横向、扭转振动，在研究桥梁的动力响应同时还研究车辆的动力响应。

车桥振动的现代理论蓬勃发展的过程中，国内外不少学者对古典理论也进行了有益的发展。许多学者进一步研究了在单个移动荷载或单轮对过桥作用下的简支梁的振动问题，他们通过假定梁的动力挠曲线进而寻求车桥系统振动规律的解析表达式。这些工作多为古典理论的延续，但已开始考虑轨道不平顺等因素的影响，振动微分方程及其求解精度趋于提高，并且已经开始应用随机振动理论。古典理论中单个匀速移动常量力在目前所能达到的车速下的动力效应上

较小，并没有实际的意义。然而，如果将列车荷载看作一系列有规律排列的移动常量力，则可以考虑荷载列的周期性强迫振动，因而更为接近实际。Yang 等<sup>[7]</sup>将非一致间距的规律荷载列分解为两个等间距的子荷载列的合成，是一种不考虑车辆振动的非常成功的简化模型，它能比较准确的预测桥梁的共振和“相消”现象。李建中等<sup>[8]</sup>研究了移动荷载和车桥相互作用两种模型高速通过简支梁的共振反应，得出的基本结论与 Yang 一致，另外还得出桥梁的共振反应与车辆或者移动荷载的数量有关的结论，即当车辆数过少时，共振现象很难出现。最近，夏禾等<sup>[9]</sup>从理论分析、数值模拟和现场测试三个方面阐述车桥竖向和横向的共振机理。可见，移动荷载列作用下简支梁振动求解仍是目前车桥振动分析的重要内容。

从上个世纪 90 年代末至今，车桥耦合振动研究在完善和发展古典理论以及现代理论的基础上，在以下新的领域取得了进一步的发展<sup>[10]</sup>：列车—轨道—桥梁大系统动力学理论的建立与应用；桥梁在特殊荷载（风、地震）作用下的列车安全性问题；列车桥梁系统的振动在环境周围传播以及对环境影响问题；高速铁路桥梁的振动控制研究。

近十几年我国铁路相继开展了既有铁路提速改造和高速铁路的建设，车速提高加剧列车过桥时车桥振动、使得车桥动力性能成为桥梁设计、检定中必须考虑的一个主要问题。生产建设的需要促使科学技术的发展，近二十多年来车桥耦合振动理论和计算方法的研究在我国得到了前所未有的重视，多所高校和科研机构对车桥耦合振动的理论和应用开展研究，取得了不少重要成果<sup>[2]</sup>。目前这些研究人员承担了大量铁路桥梁的动力分析工作，成为提速桥梁改造、高速铁路桥梁设计动力响应分析的主要力量，为我国高速铁路建设和既有铁路桥梁提速改造做出了重要贡献。

在车桥耦合振动研究的 150 多年的历史中，许多学者为此花费了大量的时间和心血，提出和建立了许多分析理论与分析方法，其研究工作取得了不少重要的成果。但是，由于车桥耦合振动研究的复杂性，在车辆模型、桥梁模型和轮轨接触模型方面的精细化研究还尚待进一步完善与深入。

### 1.1.2 车线振动研究

线路在铁路建设中的比例始终很大，与车桥动力相互作用问题相比，车辆与轨道的动力相互作用问题是铁路轮轨系统中更为普遍和基本的动力学问