



翟婉明 夏禾 等著

列车-轨道-桥梁动力相互作用 理论与工程应用

Train-Track-Bridge Dynamic Interaction:
Theory and Engineering Application

Zhai Wanming and Xia He



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

列车-轨道-桥梁动力相互作用 理论与工程应用

Train-Track-Bridge Dynamic Interaction:
Theory and Engineering Application

翟婉明 夏 禾 等著
Zhai Wanming and Xia He

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐述了作者及其研究组在列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与应用研究领域所取得的系统性成果。全书共十章,前五章论述列车-轨道-桥梁动力相互作用理论基础,包括理论模型、动力学方程、系统激励、数值仿真方法及其试验验证;第6章介绍列车-轨道-桥梁相互作用系统动力响应的基本特性;第7章讨论列车过桥动力性能评估方法与评价标准;后三章(第8、9、10章)通过选取有代表性的若干重点工程应用实例,介绍列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与安全评估方法在中国铁路提速工程及高速铁路工程中的应用实践。

本书不仅理论性强,而且极具工程实用性,适合于铁路工程特别是桥梁工程领域的研究、设计人员及工程技术人员阅读参考,并可作为高等院校铁道工程、桥梁工程、载运工具运用工程等专业方向的博士、硕士研究生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用=Train-Track-Bridge Dynamic Interaction: Theory and Engineering Application/翟婉明等著.

—北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-032464-1

I. 列… II. 翟… III. ①铁路线路-振动-研究②铁路桥-车桥耦合振动-研究 IV. ①U211.3②U448.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 200045 号

责任编辑:魏英杰 余 丁 / 责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 12 月第一次印刷 印张:20 3/4 彩插:8

字数:421 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

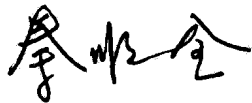
随着我国铁路旅客列车不断提速,货物列车载重日益加大,高速铁路全面建设等,列车与轨道及桥梁的动力相互作用显著加剧。机车车辆通过桥梁时的运行安全性、乘车舒适性以及桥梁动力的安全可靠,已成为铁路桥梁设计及加固改造中的重大关键技术问题。传统的静力与准静力设计方法已经远远不能满足其应用需求,必须依靠现代动力学理论与计算机仿真技术进行桥梁设计优化与安全评估。

翟婉明教授带领的课题组,在国家及铁道部科技项目的持续支持下,针对这一工程科学问题,通过跨学科、跨单位的联合攻关研究,历经十余年,在基础理论和应用技术两方面均取得了突破性进展。建立了一套完整的列车-轨道-桥梁动力相互作用理论分析方法,研制了具有我国自主知识产权的列车-轨道-桥梁动力学仿真分析大型综合软件 TTBSIM,提出了铁路桥梁动力性能优化设计与安全评估方法,为铁路新桥设计、旧桥加固提供了一套先进的理论分析方法和安全评估技术,适应了国家铁路大发展的需求。相关的研究成果获得 2009 年国家科技进步二等奖。

该理论方法已全面应用于我国铁路提速工程及高速铁路工程,完成了时速 160~250km 提速铁路、时速 200~350km 高速铁路重大工程中一系列关键桥梁的动力分析或设计优化与安全评估,为我国铁路桥梁的现代化建设做出了积极贡献。

该书系统而全面地介绍了课题组在列车-轨道-桥梁动力相互作用领域所取得的研究成果,内容新颖、结构严谨,学术水平高,而且工程应用实例翔实。书中提出的理论模型、仿真技术、评估方法对从事铁路桥梁研究、设计及运营维护的学者、专家、技术人员等都具有非常大的参考价值。

该书的及时出版,对我国高速铁路的大规模建设,特别是高速列车过桥安全性和舒适性的设计与评估,具有重要意义。



中国工程院院士

中铁大桥局集团有限公司总工程师

2011 年 5 月

前 言

列车通过桥梁引起的振动,通常称作车-桥耦合振动,又可称为车桥动力相互作用。随着列车运行速度的不断提高、车辆载重的不断加大,列车与轨道和桥梁的动力相互作用问题越来越受到人们的重视。一方面,高速运行的列车会对其通过的轨道和桥梁结构产生大的动力冲击作用,使它们发生振动,直接影响其工作状态和使用寿命;另一方面,轨道和桥梁的振动又会对运行车辆的平稳性和安全性产生影响,严重时甚至造成行车安全等重大事故。因此,对列车-轨道-桥梁动力相互作用进行系统综合研究,以便正确评估桥梁动力性能和桥上运行列车的走行性,确定它们在各种状态下的运用可靠性,是现代高速、重载铁路桥梁设计的实际需要,特别是对于中国铁路既有线不断提速、高速铁路大规模建设及运营速度持续提升的客观现实而言,其工程需求和实际应用意义十分重大。

铁路列车在原有设计标准并不太高的既有线上不断提速,将直接面临提速列车安全过桥问题。什么样的桥梁需要加固?如何加固?加固效果怎样?不可能完全依靠现场提速试验的方法一一获知,这样做既不经济,也影响运输安全。科学的方法是首先通过细致的车桥动力分析做出评估,然后对需要加固的桥梁进行加固方案优化或比选,最终进行现场试验验证。高速铁路桥梁设计,特别是时速300km以上的客运专线桥梁设计,更是必须依靠列车-轨道-桥梁动力相互作用理论进行分析研究,预测桥梁设计方案在未来高速行车条件下的动力性能,评估列车高速过桥的安全性及乘坐舒适性,并进行方案的优化或比选。

本书作者正是在这一工程背景下开展研究的,研究工作始于20世纪末中国第一条快速客运专线(秦沈线)桥梁建设工程。当时首次涉及时速200km以上速度等级的桥梁设计,随后又面临既有线提速160km/h以上乃至最高250km/h的桥梁动力加固问题,紧接着又大规模开展时速200~350km高速铁路建设,其中迫切需要解决高速行车条件下的桥梁动力设计与安全评估问题。为此,铁道部于2001年组织西南交通大学、中国铁道科学研究院、北方交通大学(2003年更名为北京交通大学)及中南大学的相关研究人员,组成了跨学科的列车、线路、桥梁系统动力学联合攻关课题组(翟婉明为负责人),并为此持续设立了一系列的铁道部重点科技研究计划课题,主要包括:“列车-线路-桥梁动力学仿真通用软件的研究”(编号:2001G40)、“既有线提速200km/h关键技术的试验研究(B)——桥梁安全性评估”(编号:2004G002-B)、“客运专线典型桥梁列车走行性研究”(编号:2005K002-C-3)以及“京沪高速铁路专项研究——京沪高速铁路特殊结构桥梁对高速动车组适应

性研究”(编号:2010G017-E)。此外,结合高速铁路桥梁重大工程需求,课题组各方承担了一系列重要的应用研究课题,如“武汉天兴洲公铁两用长江大桥关键技术研究——桥梁动力特性分析研究”(编号:2004G028-B)、“南京大胜关长江大桥关键技术研究——大跨度铁路钢桁拱桥抗风性能研究”(编号:2006G006-B)、“郑州黄河公铁两用大桥关键技术研究——主桥及引桥车桥系统耦合振动分析”(编号:2007G047-A)等。这些课题的总体目标是为铁路新桥设计、旧桥加固提供一套先进的理论分析方法和安全评估技术,并及时应用于工程实际,以满足国家铁路快速发展的重大需求。

与此同时,课题组各方一直不间断地开展车轨桥系统动力学基础研究,先后得到多项国家基金资助,如国家杰出青年科学基金项目“铁路大系统动力学理论的研究与应用”(编号:59525511),国家自然科学基金面上项目“高速列车与线桥结构动态相互作用理论分析与试验研究”(编号:50178061)、“强风作用下大跨度悬索桥的动力响应及行车安全控制研究”(编号:50078026)、“地震作用下高速铁路桥梁的动力响应及行车安全控制研究”(编号:50478059),国家自然科学基金重点项目“高速铁路基础结构与车辆系统动态相互作用研究”(编号:50838006),国家自然科学基金重大研究计划面上项目“强地震、强风作用下长大桥梁空间动力效应及车辆运行安全控制研究”(编号:90715008)等。这些都为实现前述工程目标奠定了良好的理论基础。此外,本领域的研究工作还受到了国家重点基础研究发展计划 973 项目“高速列车安全服役关键基础问题研究”(编号:2007CB714700)、国家自然科学基金创新研究群体项目“高速列车运行安全的关键科学技术问题研究”(编号:50821063)、国家高技术发展计划 863 重大项目子课题“高速铁路轮轨系统动力学仿真研究”(编号:2009AA110302)的部分资助。

全书共十章。第 1 章介绍列车-轨道-桥梁动力相互作用的研究背景、研究范畴、研究方法;第 2 章论述列车-轨道-桥梁动力相互作用理论模型,包括建模方法、列车振动模型、轨道振动模型、桥梁结构模型以及轮轨相互作用模型、桥轨相互作用模型;第 3 章讨论列车-轨道-桥梁振动系统激励,包括轨道激励、桥梁激励、环境激励及其模拟方法;第 4 章介绍列车过桥动力学仿真技术,包括车线桥大系统动力学仿真算法与大型动力仿真软件 TTBSIM;第 5 章介绍基于两次大规模的高速列车过桥动力学现场试验结果而进行的 TTBSIM 仿真软件验证;第 6 章介绍列车-轨道-桥梁系统动力响应特性,包括列车过桥时车辆、轨道、桥梁动力响应的基本特征,风荷载和地震作用下列车-轨道-桥梁系统的动力相互作用特征等;第 7 章讨论列车过桥动力性能评价指标及标准,并介绍基于列车过桥动力学仿真技术的桥梁动力性能优化方法;最后三章(第 8、9、10 章)介绍列车-轨道-桥梁动力相互作用理论在中国铁路提速工程及高速铁路工程中的应用实践,选取有代表性的若干典型实例分别予以介绍,如 200km/h 提速铁路混凝土 T 型梁加固工程应用、沪宁线 250km/h 提速钢桥加固工程应用、武广高速铁路典型桥梁列车走行性评

估、京沪高速铁路桥梁动力设计评估,以及武汉天兴洲长江大桥、南京大胜关长江大桥、郑州黄河大桥等特大型铁路桥梁工程应用等。

本书由翟婉明和夏禾负责规划,自2009年11月开始撰写,历经一年半时间完成,全书由翟婉明负责统稿。具体撰写情况如下:翟婉明主要撰写了第1章1.3、1.4节,第2章2.1、2.2、2.3、2.6、2.8节,第4章4.1、4.2节,第5章,第6章6.1、6.2、6.4节,第7章7.1、7.2、7.3、7.5节,第8章8.1、8.2节,第9章9.1、9.2节;夏禾主要撰写了第1章1.1节,第3章3.2,第6章6.3节,第7章7.4节;蔡成标撰写了第1章1.2节,第2章2.4、2.5、2.7节,第4章4.3节;高芒芒撰写了第8章8.3节,第10章10.1、10.3节;张楠撰写了第9章9.3节,第10章10.2节;王开云撰写了第3章3.1节;郭薇薇撰写了第3章3.3节。此外,翟婉明完成了全书各章节内容的修改完善工作,夏禾参与了部分章节内容的修改工作,李小珍、郭向荣、王少林也参与了某些章节部分内容的撰写或提供了相关素材,博士生王少林还协助完成了多个算例的TTBSIM软件计算工作。

借本书出版之机,作者要向关心、支持和资助相关研究工作及本书出版的各有关部门、单位和个人致以诚挚的谢意!首先要感谢国家自然科学基金委员会、铁道部、科技部、教育部的资助,以及各铁道勘察设计院、有关铁路局等设计 and 应用部门对本研究工作所提供的各方面支持与帮助。其次要感谢课题组各组成单位的大力支持,特别是中南大学曾庆元院士、中国铁道科学研究院潘家英研究员、西南交通大学强士中教授等老一辈桥梁专家的指导,以及课题组核心成员高芒芒研究员、蔡成标研究员、郭向荣教授、李小珍教授、张楠教授、王开云研究员、柯在田研究员等对本研究做出的重要贡献,感谢铁道第四勘察设计院副总工程师薛照钧高工的指导与帮助。特别要感谢西南交通大学沈志云院士、北京理工大学胡海岩院士、中铁大桥局集团有限公司秦顺全院士,以及中国铁道科学研究院徐涌研究员等专家对相关研究工作的关心与指导,秦院士还在百忙中为本书作序。最后要感谢作者的同事及研究生们,特别是西南交通大学赵春发研究员、晋志斌讲师、王少林博士生,北京交通大学郭薇薇副教授,中国铁道科学研究院熊建珍副研究员,中南大学郭文华教授、袁世平讲师、周涛老师等,他们都曾参与了课题的研究工作,付出了辛勤劳动,本书的出版是大家共同努力的结果。

本书的出版获得了2010年度国家科学技术学术著作出版基金的资助,作者谨对基金委员会深表谢意,同时感谢科学出版社的帮助以及本书编辑魏英杰和余丁先生的出色工作。

限于作者水平,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

翟婉明 夏 禾

2011年5月于成都

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 铁路桥梁及其动力学问题	1
1.2 列车-轨道-桥梁动力相互作用研究历史演进	8
1.3 列车-轨道-桥梁动力相互作用研究内容	18
1.4 列车-轨道-桥梁动力相互作用研究方法	21
参考文献	23
第 2 章 列车-轨道-桥梁动力相互作用模型	29
2.1 列车-轨道-桥梁系统动力相互作用原理	29
2.2 列车-轨道-桥梁系统动力学建模方法	30
2.3 机车车辆振动分析模型.....	32
2.3.1 四轴机车车辆模型及运动方程	34
2.3.2 六轴机车模型及运动方程.....	43
2.4 轨道结构振动分析模型.....	52
2.4.1 轨道结构振动模型	53
2.4.2 轨道结构振动方程	58
2.5 桥梁结构有限元模型.....	64
2.5.1 基本单元模型	65
2.5.2 总体刚度矩阵和质量矩阵.....	87
2.5.3 总体阻尼矩阵	88
2.6 轮轨相互作用分析模型.....	89
2.6.1 轮轨接触几何关系	89
2.6.2 轮轨法向力计算模型	90
2.6.3 轮轨蠕滑力计算模型	91
2.7 桥轨相互作用分析模型.....	97
2.8 列车-轨道-桥梁大系统动力学方程	98
参考文献	99
第 3 章 列车-轨道-桥梁振动系统激励	100
3.1 桥上轨道系统激励	100

3.1.1	轨道几何不平顺的描述	100
3.1.2	典型轨道谱	102
3.1.3	轨道随机不平顺的数值模拟	106
3.2	桥梁系统激励	109
3.2.1	桥梁徐变上拱	110
3.2.2	桥梁预拱度	111
3.2.3	梁体温度变形	112
3.2.4	墩台基础工后沉降	113
3.3	环境激励	114
3.3.1	地震激励	114
3.3.2	风荷载激励	125
	参考文献	142
第4章	列车-轨道-桥梁动力相互作用仿真技术	145
4.1	列车过桥动力学仿真技术	145
4.2	列车-轨道-桥梁系统动力学仿真算法	147
4.2.1	新型快速显式数值积分法	147
4.2.2	Newmark- β 积分法	150
4.3	列车-轨道-桥梁系统动力学仿真综合软件 TTBSIM	151
4.3.1	TTBSIM 软件的结构	151
4.3.2	TTBSIM 软件的功能	155
	参考文献	157
第5章	列车-轨道-桥梁动力相互作用仿真软件的试验验证	159
5.1	用于验证 TTBSIM 软件的列车过桥动力学试验概况	159
5.1.1	秦沈客运专线高速试验列车通过桥梁动力学现场试验	159
5.1.2	京津城际铁路高速列车通过桥梁动力学现场试验	161
5.2	基于秦沈客运专线高速试验列车过桥动力学试验的验证	163
5.3	基于京津城际铁路高速列车过桥动力学试验的验证	167
	参考文献	170
第6章	列车-轨道-桥梁相互作用系统动力响应特性	171
6.1	列车-轨道-桥梁相互作用系统动力响应的基本特征	171
6.1.1	列车过桥时车辆动力响应特征	172
6.1.2	列车过桥时轨道动力响应特征	173
6.1.3	列车过桥时桥梁动力响应特征	176
6.2	桥梁刚度对高速列车-轨道-桥梁系统动力特性的影响	179
6.2.1	分析对象	179

6.2.2 梁体竖向刚度的影响	180
6.2.3 梁体横向刚度的影响	182
6.2.4 桥墩横向刚度的影响	183
6.2.5 墩台基础横向刚度的影响	184
6.2.6 基本结论	185
6.3 风荷载作用下列车-轨道-桥梁系统动力响应特性	186
6.3.1 分析对象	186
6.3.2 设计风速作用下车桥系统的动力响应	189
6.3.3 风速对车桥系统动力响应的影响	191
6.3.4 列车横向风压移动荷载列对桥梁振动的影响	193
6.3.5 基本结论	195
6.4 地震作用下高速列车-轨道-桥梁动力相互作用特征	196
6.4.1 地震作用下的高速列车-轨道-桥梁耦合动力学模型	196
6.4.2 典型地震作用下高速列车-轨道-桥梁系统动力响应	197
6.4.3 不同强度地震作用下高速列车-轨道-桥梁系统动力响应	201
参考文献	205
第7章 列车-轨道-桥梁动力相互作用性能评估与优化	207
7.1 列车-轨道-桥梁动力相互作用性能评价指标体系	207
7.2 列车过桥运行安全性评定标准	209
7.2.1 脱轨系数	209
7.2.2 轮重减载率	212
7.2.3 轮轨横向力	213
7.3 列车过桥运行平稳性评定标准	214
7.3.1 车体振动加速度	214
7.3.2 平稳性指标	215
7.4 桥梁动力性能评定标准	216
7.4.1 桥梁自振频率	218
7.4.2 桥梁挠度	221
7.4.3 桥梁横向振幅	224
7.4.4 桥梁梁端折角	226
7.4.5 桥梁振动加速度	227
7.5 桥梁动力性能优化设计方法	228
参考文献	230
第8章 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论在铁路提速工程中的应用	232
8.1 列车提速引起的桥梁振动问题	232

8.2	时速 200km 提速铁路混凝土 T 型梁加固工程应用	234
8.2.1	工程背景	234
8.2.2	分析研究的梁型	235
8.2.3	车桥动力分析评估	236
8.2.4	现场运营试验	243
8.3	沪宁线 250km/h 提速钢桥加固工程应用	248
8.3.1	桥梁概况	248
8.3.2	桥梁加固方案的确定	250
8.3.3	工程实施效果	251
	参考文献	254
第 9 章 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论在高速铁路桥梁工程中的应用		255
9.1	秦沈快速客运专线桥梁工程应用	256
9.2	武广高速铁路桥梁工程应用	259
9.2.1	武广高速铁路动力分析的典型桥梁	259
9.2.2	典型桥梁的动力分析模型	260
9.2.3	主要计算结果及其评估	261
9.2.4	评估结论	266
9.3	京沪高速铁路桥梁工程应用	267
9.3.1	京沪高速铁路动力分析的桥型及其建模	268
9.3.2	动力分析条件	270
9.3.3	主要研究成果	274
9.3.4	主要研究结论	278
	参考文献	279
第 10 章 列车-轨道-桥梁动力相互作用理论在特大型桥梁工程中的应用		280
10.1	武汉天兴洲长江大桥工程应用	281
10.1.1	工程概况	281
10.1.2	初步设计方案的动力分析	283
10.1.3	推荐方案的动力性能综合评定	285
10.1.4	工程实施效果	287
10.2	南京大胜关长江大桥工程应用	288
10.2.1	工程概况	288
10.2.2	车桥动力分析评估	291
10.2.3	风荷载作用下高速列车过桥安全性研究	296
10.3	郑州黄河公铁两用特大桥工程应用	302

10.3.1 工程概况	302
10.3.2 车桥动力性能分析评估	304
10.3.3 风荷载作用下车桥动力性能分析评估	311
10.3.4 地震激励作用下车桥动力性能分析评估	314
10.3.5 公路移动荷载作用下车桥动力性能分析	315
后记	317
彩图	

第 1 章 绪 论

1.1 铁路桥梁及其动力学问题

在当今社会,大力发展轨道交通运输,建立四通八达的铁路交通网,对国民经济的发展和人民生活水平的提高具有非常重要的意义。在铁路线路中,桥梁是重要的组成部分。我国幅员辽阔,大小山脉众多,江河湖泊纵横,需要修建大量的铁路桥梁。

中国过去由于经济和技术力量相对薄弱,铁路交通的发展比较缓慢,直到 20 世纪 90 年代以后,才加速了其现代化发展进程。截至 2010 年底,全国铁路营业里程达到 91 000km,跃居世界第二位。近年来,中国在提高既有铁路客、货列车速度的同时,把建设快速和高速客运专线作为铁路发展的新目标。2004 年,国务院审议通过了《中长期铁路网规划》,规划建设“四纵四横”高速客运专线网和三个城际快速客运系统,客车速度目标值为 200km/h 及以上,线路总长 12 000km;而 2008 年调整后的铁路网规划进一步将高速客运专线规划目标由 12 000km 调整为 16 000km,并将城际客运系统由环渤海城市群、长江三角洲城市群、珠江三角洲城市群扩展到长株潭城市群、成渝城市群、中原城市群、武汉城市圈、关中城镇群、海峡西岸城市群等经济发达和人口稠密地区。中国第一条客运专线铁路是 2003 年开通运营的秦沈(秦皇岛—沈阳)快速客运专线,设计运营速度 200km/h,试验列车在高速试验段内最高试验速度达到 321.5km/h。中国第一条城际快速客运专线是京津城际铁路(图 1.1),于 2008 年 7 月北京奥运会前投入运营,使得北京到天津的列车运行时间缩短为半小时,最高运营速度为 350 km/h,最高试验速度达到 394.3 km/h。全长 1068.6km 的武广客运专线是世界上第一条运营速度达到 350km/h 的长距离高速铁路,于 2009 年 12 月 26 日正式投入运营(图 1.2),使武汉到广州的列车运行时间缩短为 3 小时。2010 年 6 月底即将开通运营的京沪高速铁路全长 1318km,设计时速 350km/h,将成为世界上一次建成线路最长、技术标准最高的高速铁路。

在提高列车速度的同时,重载运输也在越来越多的国家得到了发展。各国通过发展大功率机车,开发大轴重、轻自重的大型货车等高新技术,使重载列车牵引重量不断增加,铁路运输能力不断增强。早在 20 世纪 70 年代末,美国一级铁路就开始了重载运输。2001 年 6 月,澳大利亚 BHP 铁矿集团公司在纽曼山—海德兰



图 1.1 京津城际高速列车运行在高架桥上(见彩图)



图 1.2 高速列车在武广客运专线汀泗河特大桥上(见彩图)

重载铁路上创造了列车牵引总重 99 734t 的世界纪录,列车长度达 7353m。2004 年,巴西 CVRD 铁矿集团的重载列车平均牵引重量已达 39 000t。美国的 UP 铁路公司经营的列车平均牵引重量已达 14 900t。目前,不仅美国、加拿大、澳大利亚等幅员辽阔的大陆性国家大量开展重载运输,而且在欧洲传统以客运为主的客货混运干线铁路上也开始开行重载列车。美国、加拿大、澳大利亚重载列车已普遍采用 35.4t 轴重,巴西、瑞典已采用 30t 轴重,俄罗斯也已将重载列车轴重提高到 27t,欧

洲铁路重载列车也已向轴重 25t 迈进。

中国第一条重载铁路是大秦(大同—秦皇岛)铁路(图 1.3),1992 年全线开通运营,为了满足紧张的煤炭运输需求,逐步开行了 5000t、10 000t 乃至 20 000t 重载列车。运量逐年上升,2002 年超过 1 亿 t,2007 年总运量突破 3 亿 t,2008 年达到 3.4 亿 t。20 000t 重载列车由五台 SS4G 电力机车(总功率为 43 300 马力^①)牵引 204 辆 C80 型 80t 运煤专用敞车,全长 2658m。另一条重载铁路是朔黄铁路,1997 年开始运营,2006 年运量超过 1 亿 t,2008 年达到 1.4 亿 t。2009 年底,朔黄铁路正式开行了载重达 10 000t 的组合列车,从而使 2010 年总运量超过了 1.6 亿 t。目前,我国重载列车轴重正从 23t 逐渐提高到 25t,与此同时,正在进行将轴重进一步提升至 30t 及以上的研究工作。



图 1.3 大秦铁路万吨重载列车运行在高架桥上(见彩图)

桥梁是构建铁路的重要基础设施之一,也是铁路建设的关键技术。从节约土地资源和环境保护出发,并根据技术需要,时速 200km 以上的高速铁路(包含客运专线、城际铁路)线路中,桥梁所占比例要比普通铁路线路高得多。表 1.1 和表 1.2 分别列出了国外和中国高速铁路桥梁工程概况。国外高速铁路桥梁比例最高的是日本,其上越新干线和东北新干线桥梁累计长度占全线总长的比例分别为 61.5% 和 58.1%。中国京津城际高速铁路桥梁比例高达 87.7%,京沪高速铁路桥梁比例为 80.5%,哈大客运专线为 73.4%,而广珠城际铁路则达到了 94.2%(表 1.2)。高速铁路列车运行速度快,由轨道不平顺引起的轮轨动力响应及其对行车

^① 1 马力(hp)=745.7W。

安全性、平稳性和乘车舒适性的影响均随车速度的提高而显著增大,因此要求高速铁路的线路必须具有高平顺性、高稳定性和高可靠性等特点,桥梁作为轨道的下部基础结构,主要功能是为高速列车提供平顺、稳定的桥上线路,确保列车运营安全和乘坐舒适。

表 1.1 世界上已建成的高速铁路桥梁工程概况

国别	高速铁路名称	线路全长/km	桥梁总长/km	桥梁比例/%
德国	科隆—法兰克福	177	4.8	2.7
	汉诺威—维尔茨堡	327	41	12.5
	曼海姆—斯图加特	99	6	6.1
法国	TGV 东南线	417	25	6.0
	TGV 大西洋线	282	36	12.8
	TGV 北方线	330	72	21.8
	东南延伸线	121	39	32.2
日本	东海道新干线	515	173	33.6
	山阳新干线	554	211	38.1
	上越新干线	270	166	61.5
	东北新干线	493	344	58.1
	北陆新干线	117	39	33.3
西班牙	马德里—塞维利亚	471	15	3.2
意大利	罗马—佛罗伦萨	254	32	12.6
韩国	首尔—釜山	412	111.8	27.1

表 1.2 中国高速铁路桥梁工程概况

线路名称	线路全长/km	桥梁总长/km	桥梁比例/%	备注
京沪高速铁路	1318	1060.9	80.5	
石太客运专线	189.93	39.2	20.6	
京津城际铁路	115.2	100.2	87.7	
郑西客运专线	484.52	289.5	59.8	
武广客运专线	1068.8	401.24	41.4	
甬台温铁路	282.4	91.4	32.4	客、货兼运
温福铁路	298.4	77.1	25.8	客、货兼运
合武客运专线	359.4	115.9	32.2	
福厦城际铁路	274.9	84.8	30.8	
广深港高速铁路	104.4	59.2	56.7	
广珠城际铁路	142.3	134.1	94.2	
夏深客运专线	502.4	204.14	40.6	

续表

线路名称	线路全长/km	桥梁总长/km	桥梁比例/%	备注
哈大客运专线	903.9	663.3	73.4	
海南东环铁路	308.11	102.95	33.4	
长吉城际铁路	96.26	30.3	31.5	
昌九城际铁路	91.58	31.96	34.9	
台北—高雄高速铁路	345	257	74.5	台湾省

据统计,截至2009年中国铁路运营桥梁47 850余座,184 060余孔,总延米长度约3707km。其中,混凝土桥45 990余座,177 480余孔,延米长约3516.5km;钢梁桥(含混合桥)1860余座,6580余孔,延米长约190.5km。跨度32m及以下的混凝土简支梁142 430余孔,约占混凝土梁总数的80%;跨度40m以下的简支钢梁5290余孔,约占钢梁总数的80%。中小跨度简支梁约占桥梁总孔数的80%。

作为交通枢纽及生命线工程的铁路桥梁是承受动荷载的结构物。在车辆运行荷载以及风力、地震等外力作用下,桥梁结构产生的振动会增大按结构静力计算的内力,引起杆件的局部疲劳损伤,或会形成影响桥上行车舒适与安全的振动变形和加速度,甚至使桥梁完全破坏。例如,英国在1830年修建了世界上第一座公路铁路两用悬索桥,但当列车过桥时,桥面出现波浪起伏的振动变形,以至必须在桥面梁下打桩支承才能使用,不久即拆除改建;德国于1830年建成的纳索兰河链杆悬索桥在1833年的一次大风中,12根链杆及加劲梁断裂;1847年英国的Chester铁路桥在列车通过时因振动过大而折断;1878年,英国Thomas Bouch建成了当时世界上最长的横跨敦提的泰河海湾大桥,建成不到两年,大桥在一场暴风雪中倒塌了,当时正好有一列承载着75人的列车经过,列车上的人员全部遇难,酿成了一场巨大的工程灾难;1940年11月7日,历时19个月耗资640万美元建成的美国华盛顿州的Tacoma Narrows大桥开通仅4个月就因风振致毁(图1.4);2004年10月23日,日本新潟县发生里氏6.8级的强烈地震,一列以200km/h速度行驶在上越新干线浦佐至长冈间的“朱鹮325”号高速列车,在制动后仍行进了约1.6km,10节车厢中有8节在高架桥上脱轨(图1.5)。

可见桥梁结构的振动是影响桥梁使用与安全的重要因素之一。

铁路桥梁振动的种类很多,按照引起桥梁振动的原因,大体可以分成两大类四种形式,如图1.6所示。第一类振动是由于风荷载、地震作用以及船舶、漂流物等撞击桥墩引起的桥梁振动,属于外力作用产生的振动。第二类振动是由于列车通过桥梁引起的振动,属于铁路运输系统自身产生的振动,是列车正常运营过程中不可避免的基本振动形式,也是我们研究的重点。第二类振动与第一类振动叠合在一起同时发生时,会使问题变得更加复杂。