

序 一

铁路是发展国民经济、改善社会民生、提升综合国力的重要力量。我国以 21 世纪中叶全面建成更高水平的现代化铁路强国为目标，正逐步完善“八纵八横”高速铁路网，扩大重载铁路网络规模，加速城市轨道交通进程。铁路之创新发展，安全运行是核心，平稳运行是前提。铁路桥梁由于其大承载力、强结构稳定性和环境适应性，已成为保障高速、重载列车安全运行的重要基础设施，轨道是列车导向与承载的基本结构，列车、轨道及桥梁三者构成不可分割的基础性铁路运输载体。

列车-轨道-桥梁系统在长期服役期中承受列车荷载和环境因素的共同作用，其服役性能呈现出一定的时变性、非线性和随机性。如何建立列车-轨道-桥梁系统确定性与非确定振动关联机制，突破该复杂系统随机模拟与分析瓶颈，是亟待解决的关键科学问题。中南大学(原长沙铁道学院)在车桥振动领域有长期耕耘历史和深厚积淀基础，余志武教授带领团队传承和发展了曾庆元院士开创的车桥振动理论，20 多年来紧密围绕我国铁路建设发展的重大需求，创新性地建立了列车-轨道-桥梁系统随机振动理论，研发了相应计算软件，实现了列车-轨道-桥梁系统振动分析从确定性分析到随机性分析的突破。基于列车-轨道-桥梁系统随机振动理论，余志武教授团队对我国上百座铁路桥梁行车安全性和乘坐舒适性进行了分析评估，覆盖了高速、重载铁路桥梁和无砟轨道、有砟轨道结构。结果表明，该理论能够有效揭示列车-轨道-桥梁系统的随机振动本质特征，基于概率保证率的行车安全性和乘坐舒适性的评估方法使评估结果更为安全可靠、科学合理。列车-轨道-桥梁系统随机振动理论是车桥振动分析领域的又一重要进展，开辟了一条基于随机分析思想的列车-轨道-桥梁振动研究新路径。

《列车-轨道-桥梁系统随机振动理论与应用》一书涵盖了作者团队在列车-轨道-桥梁系统随机激励模拟、随机模型构建和随机系统求解等方面的研究成果，系统总结了列车-轨道-桥梁系统随机参数选点、随机轮轨关系、随机振动分析和随机性能综合评定等核心知识点，基础理论论述清晰、内容构成严谨合理。我国铁路工程技术的持续发展离不开基础理论技术的攻关与突破，相信该

书的出版可以为列车-轨道-桥梁系统随机振动分析理论的进一步发展提供有力支撑，为我国铁路事业的宏伟蓝图和创新发展贡献力量。

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of the characters '何平' (He Ping) in a cursive script.

中国工程院院士

序 二

“客运高速化，货运重载化”是我国铁路的重大发展战略。在该战略指导下，我国铁路取得了长足发展，尤其是高速铁路的全面发展，已然成为中国的世界名片。然而，我国铁路服役环境复杂，多因素作用下列车-轨道-桥梁系统振动非线性、随机性和时变性显著加剧，影响铁路桥梁的行车安全性、乘坐舒适性和结构可靠性，铁路行车安全面临严峻挑战。而传统的单样本或若干样本确定性动力时程分析方法不足以精确揭示列车-轨道-桥梁系统动力响应的随机振动本质特征，必须依靠更科学合理的随机振动分析理论和更精确、高效的计算机仿真技术进行桥梁的设计、建造和安全评估。

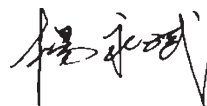
二十余年来，在多项国家级、省部级及企业等课题和项目的支持下，余志武教授带领课题组，针对这一工程科学问题持续开展列车-轨道-桥梁系统随机振动分析理论和安全评估技术研究，传承曾庆元院士的铁路车桥耦合振动研究方向，通过跨学科、跨单位的联合攻关研究，取得了基础理论和工程应用两方面的突破性进展，建立了一套完整的列车-轨道-桥梁系统随机振动分析和行车安全评估方法，研制了具有我国自主知识产权的列车-轨道-桥梁系统随机振动仿真分析与行车安全评估软件 TTBP V2.0，为我国高速铁路和重载铁路设计、建造与养护维修等提供了更为坚实的理论基础和技术支持，具有重要的科学研究和工程应用价值。相关研究成果获得了 2017 年中国铁道学会科学技术奖特等奖、2019 年湖南省科学技术进步奖一等奖和 2019 年国家技术发明奖二等奖。

该理论方法已广泛应用于我国高速铁路、客运专线、重载铁路等各类铁路桥梁结构的设计、校核和加固维修工程，涵盖简支梁桥、连续梁桥、刚构桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥及拱梁组合结构桥等多种桥型 100 余座，为我国铁路桥梁的现代化建设作出了积极贡献。

《列车-轨道-桥梁系统随机振动理论与应用》一书系统而全面地介绍了作者课题组在列车-轨道-桥梁系统随机振动分析领域所取得的研究成果，内容新颖、结构严谨、学术水平高、理论性强，而且极具工程实用性。书中提出的随机理论模型、仿真技术和基于概率保证率的评估方法，实现了列车-轨道-桥梁系统振动分析从确定性分析到随机性分析的突破，为列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与桥上行车安全评估提供了更科学合理的方法，对从事铁路轨道-桥梁体系研究、设

计及运营维护的专家、学者、技术人员等都具有非常大的参考价值。

该书的研究和出版不仅是对我国当前铁路桥梁仿真分析的技术总结，更是我国铁路产业由建设为主向建养并重转型的重要支撑，特别是对长期复杂运营环境下高速列车过桥安全性和舒适性的结构设计、性能评估与运营维护具有重要意义。



中国工程院院士

前 言

列车-轨道-桥梁系统是一个强随机动力学系统。我国铁路服役环境复杂，环境因素与列车荷载的长期共同作用导致该系统服役性能动态演化，进一步加剧了该系统动力响应的随机性，铁路行车安全面临严峻挑战。由于列车随机荷载、轨道随机不平顺、系统结构随机参数等多重随机性的共同作用，列车、轨道与桥梁的相互动力冲击效应使列车-轨道-桥梁系统呈现出特有的多重高维空间随机振动特性，而现有的基于随机分析理论的列车-轨道-桥梁系统随机振动分析方法，如蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法、虚拟激励法、随机摄动法、协方差分析法等，或计算成本极高、效率低，或仅能考虑随机激励谱输入，或仅针对随机参数的高斯特性等，具有一定的局限性。因此，有必要寻求更为科学合理的随机振动分析理论对列车-轨道-桥梁系统的随机振动特性进行深入、系统的研究，以揭示列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动的本质特征，科学评估桥梁动力性能和桥上列车的走行安全性。因此，开展列车-轨道-桥梁系统随机动力学研究，具有重要的理论意义和工程应用价值。

作者基于以上工程背景和科学问题持续开展了研究。研究理念始于 2000 年 (原)铁道部科技课题“秦沈客运专线综合试验科技攻关项目——桥梁动力性能综合试验研究”(编号：2000G48，A 类)，作者余志武担任项目负责人主持工作，曾庆元院士担任技术总负责人。当时，从事铁路列车-桥梁系统动力分析的高校主要有西南交通大学、北京交通大学、中国铁道科学研究院和中南大学等。针对列车过桥引起的随机动力问题，(原)铁道部也非常重视，但限于理论与技术的局限性，只能让学者分别根据十多座典型桥梁的基础信息开展列车-轨道-桥梁系统动力分析，再将结果封装好，待试验测试结果公布后对比各分析结果与试验结果统计值的吻合度。这是项目早期针对列车-轨道-桥梁系统响应随机特性采取的研究手段，显然有较大的不完备性和不足。针对研究工作的实质性推进和开展，始于 2008 年 (原)铁道部重大课题“高速铁路工程结构动力学及关键技术研究”(编号：2008G-17)。该课题由中国工程院何华武院士担任课题负责人，由作者余志武担任课题技术负责人。课题研究与原高速铁路建造技术国家工程实验室的高速铁路线桥隧动力学实验室建设紧密结合，研究建设了高速列车、风和地震作用下轨道-桥梁体系动力性能模拟系统，构建了在高速列车、风和地震作用下的高速铁路工程结构动力学理论体系，提出了工程结构的动力设计方法和安全防控措施。在课

课题研究过程中,作者充分认识到仅利用现有确定性的列车-轨道-桥梁系统动力学分析方法不足以揭示列车-轨道-桥梁系统的随机动力学特征,迫切需要解决高速行驶条件下由多随机源耦合作用下的桥梁动力分析与行车安全评估问题。

二十余年来,作者团队积极探索列车-轨道-桥梁系统随机振动分析方法,持续获得了多项国家级、省部级及企业等科研项目的支持,主要包括国家自然科学基金面上项目“基于概率密度演化理论的高速列车-桥梁耦合系统随机振动分析研究”(编号:51578549)、国家自然科学基金青年科学基金项目“多动力源作用下高速列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车安全准则”(编号:51708558)、国家自然科学基金联合基金项目-高铁联合基金(重点支持项目)“高速铁路Ⅲ型板式无砟轨道-桥梁结构体系服役性能智能评定与预测理论研究”(编号:U1934217)、中国国家铁路集团有限公司重点课题“长联大跨无砟轨道连续钢桁梁桥关键技术研究”(编号:2017G006-H)、大秦铁路股份有限公司(科学技术研究所)科技项目“重载铁路列车-轨道-桥梁系统随机动力分析研究及应用”(编号:A2019G01)、中铁第四勘察设计院集团有限公司科技项目“昌赣客专赣州赣江特大桥主跨300m组合梁斜拉桥列车-轨道-桥梁耦合系统随机动力学研究”(编号:四设桥(2020)指令性委外01号)、中国中铁股份有限公司科技研究开发计划课题重大专项“轨道交通技术设施智能检测与评定-A”(编号:2021-专项-08)和国家自然科学基金青年科学基金项目“基于法向找点法的近场地震下高速列车-轨道-桥梁系统失效机理研究”(编号:52108433)等。这些项目都为实现本书的基础研究与工程目标奠定了良好的基础。同时,研究工作还得到了国家高技术研究发展计划(863计划)重大专题课题“重载铁路桥梁和路基检测与强化技术研究”(编号:2009AA11Z101)、中国中铁股份有限公司科技研究开发计划课题重大专项“高铁轨道-桥梁体系智能养维关键技术研究”(编号:2020-专项-02)的部分资助。在列车-轨道-桥梁系统随机振动分析理论、系统随机动力性能综合评估方法和系统随机振动响应预测算法等方面开展了系统、深入的研究,取得了许多新的研究成果。

本书是作者在该研究方向的首部专著,也是对曾庆元院士开创的车桥耦合振动研究方向的传承。全书共10章。第1章介绍了列车-轨道-桥梁系统随机振动的研究内容与方法、研究进展综述;第2章介绍了系统随机变量统计特性、系统随机激励谱表达及随机参数选点方法等;第3章论述了列车-轨道-桥梁系统随机动力相互作用模型的概率密度演化分析方法,包括建模与分析方法、车辆子系统随机振动模型、轨道子系统随机振动模型、桥梁子系统随机振动模型、轮轨相互作用与随机轮轨关系、列车-轨道-桥梁系统随机振动方程组的建立与求解、列车-轨道-桥梁系统简化计算模型;第4章介绍了列车-轨道-桥梁系统随机振动相互作用仿真软件与验证,包括随机振动仿真软件TTBP和模型验证(统计校验、算例佐证

及现场实测验证等)；第5章介绍了列车-轨道-桥梁系统随机动力性能综合评定方法、评估指标体系及列车过桥运行安全性、平稳性、舒适性与桥梁动力性能评定标准；第6章介绍了列车-轨道-桥梁系统随机动力响应特性与桥上行车安全评估、随机参数影响分析等；第7章介绍了地震作用下列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车安全评估及参数影响分析；第8章介绍了列车-轨道-桥梁系统基于概率保证率的平稳性与乘坐舒适性评估方法及参数敏感性分析；第9章介绍了基于人工智能算法的列车-轨道-桥梁系统随机振动响应预测方法；第10章介绍了列车-轨道-桥梁系统随机振动分析理论在高速铁路、重载铁路、城际铁路等典型桥梁工程中的应用算例，选取有代表性的若干典型实例予以阐述，如昌赣高速铁路赣江特大桥、厦深高速铁路榕江特大桥、郑济高速铁路郑州黄河特大桥等。本书系统阐释了随机分析方法在工程领域的核心优势：其一，基于概率密度演化理论有效揭示了多重耦合随机系统的随机特性，计算方法更为科学合理；其二，准确识别列车-轨道-桥梁系统敏感性随机参数，用于指导设计施工；其三，无缝对接铁路工程结构可靠性设计方法，评定结果更为安全，兼具理论严谨性与工程实用性。

借本书出版之机，特别向资助、支持和关心相关研究工作及本书出版的有关单位和个人致以诚挚的谢意！感谢中国科学院李杰院士和同济大学陈建兵教授在广义概率密度演化理论和数论选点方法方面的多次指导和帮助。感谢中南大学铁路轨道-桥梁结构服役安全创新团队核心成员蒋丽忠、何旭辉、曾志平、郭向荣、郭文华、朱志辉、国巍和徐磊等教授的大力支持，传承曾庆元院士开创的铁路车桥耦合振动研究方向，持续开展列车-轨道-桥梁系统振动分析理论和安全评估研究工作。感谢参与撰写的谈遂高级工程师、刘汉云副教授、李海燕讲师和李铮等研究生，同时感谢中南大学宋力教授、刘鹏教授、单智副教授等同事的支持，他们付出了辛勤劳动，本书的出版离不开大家的共同努力。最后，要特别感谢中国科学技术协会副主席何华武院士、重庆大学杨永斌院士对本书相关研究工作的关心与指导，并在百忙之中为本书作序。

本书的出版获得了2022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在出版过程中给予的帮助。

限于作者水平，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

余志武 毛建锋

2024年5月于长沙中南大学铁路园

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 铁路桥梁及其随机动力学问题	1
1.2 列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动的研究内容与方法	4
1.3 列车-轨道-桥梁系统耦合振动研究综述	7
1.3.1 列车-轨道-桥梁系统耦合振动研究进展	7
1.3.2 轮轨接触理论研究进展	11
1.4 列车-轨道-桥梁系统随机振动研究综述	12
1.4.1 结构随机振动研究进展	12
1.4.2 列车-轨道-桥梁系统随机振动研究进展	14
1.4.3 地震作用下列车-轨道-桥梁系统振动分析与随机振动研究进展	20
1.4.4 基于人工智能与深度学习算法的列车-轨道-桥梁系统耦合振动响应 预测算法研究进展	24
1.5 结构动力可靠度理论与行车安全评估	26
1.6 本章小结	27
第 2 章 列车-轨道-桥梁系统随机变量统计特性与系统随机激励	28
2.1 列车-轨道-桥梁系统关键结构参数及其随机分布	28
2.1.1 列车车辆关键结构参数	28
2.1.2 轨道-桥梁体系关键结构参数	34
2.2 多维随机参数点集的选点规则	40
2.2.1 数论选点法	40
2.2.2 基于等概率变换的多分布选点法	46
2.2.3 多维多分布随机参数点集选点法	53
2.3 系统随机激励参数	57
2.3.1 系统随机激励功率谱	57
2.3.2 轨道不平顺功率谱的随机谐和函数表达	61
2.3.3 地震随机激励的随机谐和函数表达	67
2.4 本章小结	70

第3章 列车-轨道-桥梁系统随机动力相互作用模型的概率密度演化

分析方法	71
3.1 概率密度演化经典理论与(广义)概率密度演化方程	71
3.1.1 概率守恒原理的随机事件和状态空间描述	71
3.1.2 三类经典概率密度演化方程	74
3.1.3 (广义)概率密度演化方程	75
3.1.4 概率密度演化方程的物理意义	79
3.2 列车-轨道-桥梁随机系统建模思想	79
3.2.1 随机系统建模思想	79
3.2.2 随机系统建模关键技术	81
3.3 车辆子系统随机振动模型	82
3.3.1 车辆随机参数模型	82
3.3.2 车辆空间随机振动方程	93
3.4 轨道子系统随机振动模型	96
3.4.1 无砟轨道有限元随机参数模型	96
3.4.2 有砟轨道质量块随机参数模型	97
3.4.3 轨道结构随机振动方程	99
3.5 桥梁子系统随机振动模型	100
3.5.1 桥梁系统振动分析模型	100
3.5.2 支座刚度的影响	105
3.5.3 基础作用等效刚度矩阵	105
3.5.4 桥梁系统随机振动方程	106
3.6 轮轨相互作用与随机轮轨关系	107
3.6.1 常用轮轨踏面基本几何特征	108
3.6.2 三维轮轨接触精细化计算模型	109
3.6.3 轮轨随机接触找点的数值计算方法	114
3.6.4 轮轨相互作用力计算	132
3.7 列车-轨道-桥梁系统随机振动方程组的建立	141
3.8 列车-轨道-桥梁系统随机振动方程组的求解	142
3.8.1 随机参数选点与随机激励模拟	142
3.8.2 数值积分方法	147
3.8.3 随机振动方程的概率密度演化求解	153
3.9 列车-轨道-桥梁系统简化计算模型	157
3.9.1 列车-轨道-桥梁系统空间简化随机振动模型	157
3.9.2 列车-轨道-桥梁系统竖向简化随机振动模型	165

3.10 本章小结	168
第4章 列车-轨道-桥梁系统随机振动相互作用仿真软件与验证	170
4.1 列车-轨道-桥梁系统随机振动分析软件的编制	171
4.1.1 软件编制思路与目的	171
4.1.2 软件功能模块与程序框架	172
4.1.3 软件分析与求解流程	173
4.2 TTBP 与蒙特卡罗法的对比验证	175
4.2.1 随机振动响应的概率分布	175
4.2.2 车辆响应与蒙特卡罗法的对比验证	176
4.2.3 桥梁响应与蒙特卡罗法的对比验证	178
4.3 TTBP 与已有典型算例的对比验证	179
4.4 TTBP 与列车-轨道-桥梁系统现场动力试验结果的对比验证	183
4.4.1 合肥—福州高速铁路南平建溪特大桥动力试验与验证	184
4.4.2 朔黄重载铁路混凝土简支梁动力试验与验证	190
4.5 本章小结	198
第5章 列车-轨道-桥梁系统随机动力性能综合评定方法	200
5.1 列车-轨道-桥梁系统耦合随机动力性能评定方法	200
5.1.1 基于概率保证率的随机响应概率不确定性界估计	200
5.1.2 基于随机分析的轨道-桥梁体系动力性能评定方法	204
5.2 列车-轨道-桥梁系统随机动力性能评估指标体系	206
5.3 列车过桥运行安全性评定标准	208
5.3.1 脱轨系数	208
5.3.2 轮重减载率	210
5.3.3 轮轨横向力	212
5.3.4 轮轴横向力	212
5.4 列车过桥运行平稳性与舒适性评定标准	213
5.4.1 车体振动加速度	213
5.4.2 平稳性与舒适性指标	214
5.5 桥梁动力性能评定标准	215
5.5.1 桥梁自振频率	215
5.5.2 桥梁挠度	219
5.5.3 桥梁横向振幅	222
5.5.4 桥梁振动加速度	224
5.5.5 桥梁梁端折角	225
5.6 本章小结	226

第 6 章 列车-轨道-桥梁系统随机动力响应特性与桥上行车安全评估	228
6.1 列车-轨道-简支梁桥系统耦合随机动力响应的基本特征	228
6.1.1 高速铁路通用简支梁桥型概况与随机参数假设	228
6.1.2 列车过桥时车辆随机动力响应特征	232
6.1.3 列车过桥时轮轨随机接触关系特征	233
6.1.4 列车过桥时轨道随机动力响应特征	236
6.1.5 列车过桥时桥梁随机动力响应特征	237
6.2 系统随机参数对列车-轨道-简支梁桥系统随机动力特性影响分析	240
6.2.1 车辆结构参数敏感性分析	240
6.2.2 桥梁结构参数敏感性分析	245
6.3 轨道随机不平顺对列车-轨道-简支梁桥系统随机动力特性的影响	251
6.3.1 轨道不平顺分量影响分析	251
6.3.2 常用轨道不平顺功率谱的系统随机振动响应对比分析	255
6.3.3 中国高速铁路无砟轨道谱与德国低干扰轨道谱随机响应对比分析	257
6.4 列车-轨道-简支梁桥系统行车安全评估算例	260
6.4.1 桥梁概况与随机工况	260
6.4.2 列车-轨道-桥梁系统耦合振动分析与行车安全评估	263
6.5 本章小结	267
第 7 章 地震作用下列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车安全评估	268
7.1 地震作用下列车-轨道-桥梁系统随机振动分析模型	270
7.1.1 地震作用下列车-轨道-桥梁系统随机动力学模型	270
7.1.2 地震作用下列车-轨道-桥梁系统随机振动方程求解	275
7.1.3 地震作用下桥上列车行车安全评估标准	277
7.2 地震作用下列车-轨道-简支梁桥系统随机振动及参数分析	278
7.2.1 地震作用下列车-轨道-简支梁桥系统随机振动分析模型与随机地震波 代表性样本	278
7.2.2 地震强度对列车-轨道-桥梁系统随机地震响应的影响分析	280
7.2.3 隔震支座对列车-轨道-桥梁系统随机地震响应的影响分析	283
7.2.4 车速对列车-轨道-桥梁系统随机地震响应的影响分析	286
7.3 地震作用下列车-轨道-简支梁桥系统行车安全评估算例	288
7.4 本章小结	290
第 8 章 列车-轨道-桥梁系统运行平稳性与乘坐舒适性评估	291
8.1 车辆运行平稳性与乘坐舒适性影响因素及评价概述	291
8.2 基于概率保证率的列车-轨道-桥梁系统旅客乘坐舒适性评估	293
8.2.1 基于概率保证率的列车-轨道-桥梁系统乘坐舒适性评定方法	293

8.2.2 高速铁路简支梁桥乘坐舒适性的概率密度演化响应与参数分析	297
8.3 旅客乘坐舒适性指标的车速影响规律与波长敏感性分析	302
8.3.1 不同轨道谱对车辆乘坐舒适性的影响分析	302
8.3.2 随机激励下车速对车辆不同位置乘坐舒适性的影响	303
8.3.3 随机激励下旅客乘坐舒适性敏感波长高效分析	304
8.4 本章小结	308
第 9 章 基于人工智能算法的列车-轨道-桥梁系统随机振动响应预测方法	309
9.1 基于 GA-BP 神经网络的列车-轨道-桥梁系统耦合振动响应预测	309
9.1.1 GA-BP 神经网络及算法优化	309
9.1.2 基于 GA-BP 神经网络的列车-轨道-桥梁系统随机振动响应预测	311
9.1.3 列车-轨道-桥梁系统随机响应预测分析算例	314
9.2 基于 PSO-LSTM 的列车-轨道-桥梁系统随机振动响应预测	315
9.2.1 PSO-LSTM 神经网络模型	315
9.2.2 基于 PSO-LSTM 神经网络模型的随机响应预测算例与验证	319
9.2.3 列车-轨道-桥梁系统随机响应预测结果	320
9.3 基于 BO-CNN-MLSTM 和概率密度演化理论的列车-轨道-桥梁系统 随机振动响应预测	322
9.3.1 CNN-MLSTM 深度学习模型	322
9.3.2 贝叶斯优化深度学习模型	325
9.3.3 基于 BO-CNN-MLSTM 的列车-轨道-桥梁系统随机响应预测方法框架 与验证	328
9.3.4 高速铁路列车-轨道-桥梁系统随机响应预测算例分析	330
9.4 本章小结	338
第 10 章 列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与桥上行车安全评估应用	339
10.1 昌赣高速铁路赣江特大桥列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车 安全评估实例	339
10.1.1 桥梁建模与系统随机参数	339
10.1.2 列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与桥上行车安全评估	342
10.1.3 考虑预拱度与温度耦合的车桥耦合随机振动分析	348
10.1.4 地震作用下列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与桥上行车安全评估	350
10.1.5 行车安全评估基本结论	355
10.2 厦深高速铁路榕江特大桥列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车 安全评估实例	355
10.2.1 桥梁建模与系统随机参数	355
10.2.2 榕江特大桥列车-轨道-桥梁系统随机振动响应分析	358

10.2.3	榕江特大桥行车安全性和平稳性评估	363
10.2.4	行车安全评估基本结论	365
10.3	郑济高速铁路郑州黄河特大桥列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与 行车安全评估实例	365
10.3.1	桥梁建模与系统随机参数	365
10.3.2	列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与桥上行车安全评估	367
10.3.3	桥梁组件与环境因素引起的车桥耦合振动特性及行车安全影响分析	371
10.3.4	行车安全评估基本结论	378
10.4	其他典型铁路列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车安全评估 实例	378
10.4.1	大跨度悬索桥列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车安全评估	378
10.4.2	无砟轨道波形钢腹板矮塔斜拉桥列车-轨道-桥梁系统随机振动分析与行车 安全评估	383
10.4.3	特大跨双线有砟槽型混凝土连续梁拱桥列车-轨道-桥梁系统随机振动 分析与行车安全评估	386
10.4.4	连续多跨无砟轨道预应力混凝土连续梁桥列车-轨道-桥梁系统随机振动 分析与行车安全评估算例	389
	参考文献	393

第1章 绪 论

1.1 铁路桥梁及其随机动力学问题

“交通强国，铁路先行”，铁路运输的发展水平是一个国家综合国力的有力体现。铁路发展是以客运铁路和货运重载铁路两条脉络展开的，客运铁路发展以高速铁路为典型代表。1964 年日本建成世界上第一条高速铁路——东海道新干线，最高运行速度达 210km/h，这标志着现代高速铁路时代的开始。而后，各国逐渐发展了各自的高速铁路^[1]，德国一度处于世界领先地位，2002 年，ICE3 型高速列车的最高运行速度已达 330km/h。我国很早就开始了高速铁路的探索之路，1999 年开工，2003 年 10 月 11 日建成通车的秦沈客运专线是中国第一条真正意义上的高速铁路，也是第一条城际客运专线，其设计中预留的提速空间达到 250km/h，部分区段可运行 300km/h 以上的速度，符合国际铁路联盟规定的高速铁路标准。2008 年 8 月 1 日，京津城际铁路的正式运营标志着中国第一条设计速度达到 350km/h 级别的高速铁路投入服务，中国正式跨入高铁时代。2011 年 6 月 30 日，京沪高速铁路正式通车运营，这标志着中国高速铁路建设达到了一个新的高度。京沪高速铁路全长 1318km，设计速度为 350km/h，CRH “和谐号”动车组最高试验速度为 482km/h，是世界上一次建成线路最长、标准最高的高速铁路。由于行车速度的不断提高，高速列车荷载作用下高速铁路轨道-桥梁体系结构振动与行车安全问题备受关注。

货运铁路具有总重大、轴重大、行车密和运量大等特点，到现在已有近百年的历史。国外的重载铁路已发展较成熟，具备数万吨重载货车运输能力，轴重高达 35t 以上；而我国在 20 世纪 80 年代才起步发展重载铁路，但发展速度较快；目前已发展成以大秦铁路、神骅铁路、浩吉铁路、瓦日铁路等为代表、轴重从 21t 至 30t 不等的现代化重载铁路干线。我国重载铁路多跨山地，桥梁比重较大，由于货车轴重不断加大，总运量、运行密度不断提升，以及桥梁结构的设计荷载安全储备小，桥梁疲劳及耐久性问题日益突出。因此，由长编组大轴重重载货车引起的列车-轨道-桥梁系统随机振动与行车安全问题亦不容小觑，尤其是既有线路老旧在役桥梁系统的长期持续安全运营问题。

铁路建设高速化与重载化是世界轨道交通发展的必然趋势。近年来，伴随着人们对出行方式的多样化需求和中国铁路“走出去”战略的实施，高速铁路建设日新月异。根据《中长期铁路网规划》，到 2030 年，我国将全面建成“八纵八横”

高速铁路主通道,铁路总里程达 20 万 km,高铁 4.5 万 km。根据《2024 年铁道统计公报》,截至 2024 年底,我国铁路实际运营总里程达到 16.2 万 km(世界第二),其中高速铁路运营总里程达到 4.8 万 km(世界第一),提前完成《中长期铁路网规划》的高铁里程要求。据权威媒体报道,2024 年我国重载铁路的整体运力已居世界第一,其中牵引重量超过 8000t 的铁路总里程已超 5000km。

我国已完成“从牛背上的中国向高铁上的中国”的蜕变,以绝对的优势成为高速铁路大国,成就令世界瞩目。中国高速铁路在先进装备、建造经验等方面已处于国际领先地位,高铁已经成为中华民族伟大复兴的响亮名片之一。

显然,铁路对国民经济和社会发展起到了巨大的推动作用,而桥梁在铁路工程领域尤其在高速铁路中占据了特别重要的地位。桥梁在线路中的比例越来越大(以京沪高铁为例,桥梁 244 座,约占正线长度的 81%^[2]),如图 1.1.1 所示,列车基本全线运行在桥梁上。研究桥上列车走行安全性是确保铁路桥梁正常运营的理论基础保障和工程实践应用基石。

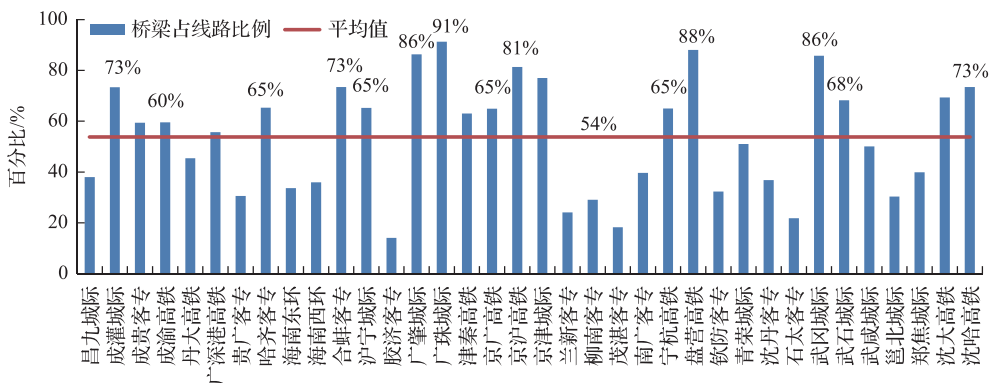


图 1.1.1 国内 36 条高速铁路桥梁占线路比例统计结果

列车-轨道-桥梁的相互作用问题涉及车辆、轨道、桥梁三个子系统,在长期运营过程中,由于地震、风、轨道不平顺、列车荷载、桥梁横向刚度不足等随机作用,施工养护、轨道/桥梁结构耐久性、疲劳、损伤以及钢轨磨耗等复杂因素引起的参数变化,使列车-轨道-桥梁系统呈现出了强烈的随机振动特性,加剧了桥梁和列车的破坏,甚至车辆运行安全性也会受到严重影响,列车脱轨、桥梁坍塌等严重事故也时有发生,如英国 Chester 铁路桥因车致振动过大而坍塌;2015 年一辆法国高速测试列车(TGV)在经过斯特拉斯堡附近的桥梁时失事(图 1.1.2),部分车厢断开,跌落河流,这是 TGV 列车自 1981 年投入服务以来最严重的事故;2015 年巴基斯坦东部古杰兰瓦拉地区一列火车过桥时坠入河流(图 1.1.3),造成 200 人受伤。



图 1.1.2 法国高速测试列车过桥时失事



图 1.1.3 巴基斯坦一列火车过桥时坠入河流

此外,我国幅员辽阔,铁路列车常年大跨度运营又会经常承受环境荷载的影响,当处于地震区时还面临多遇地震的威胁。纵观国内外铁路发展史,由于地震、风、轨道不平顺等随机激励,列车在运行过程中发生损坏进而导致列车停运维修甚至脱轨的事故时有发生,例如,2007年由乌鲁木齐开往阿克苏的旅客列车因大风脱轨(图 1.1.4),南疆线被迫中断行车;2004年日本新潟县一辆行驶在高架桥上的高速列车由于地震作用,10节车厢中的8节车厢脱轨(图 1.1.5);类似的脱轨事故还有京山线滦河老桥2次货车脱轨、焦柳线西水大桥1次货车脱轨、马来西亚高架桥轻轨列车脱轨、韩城-北京普通客运线6节客车脱轨,尤其是2016年日本熊本6.5级地震新干线脱轨、九州7.3级地震JR列车脱轨,以及2017年美国26节货车脱轨等事件,无不时刻警醒着科技人员要加强铁路行车安全基本理论与技术的研究。



图 1.1.4 新疆旅客列车因大风脱轨

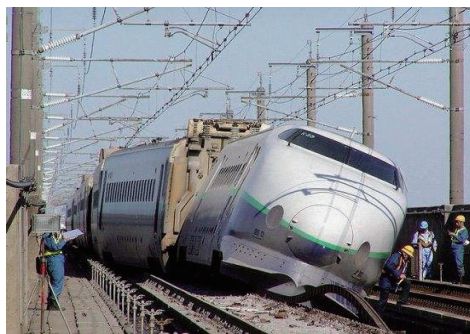


图 1.1.5 日本新潟县地震新干线列车脱轨

列车运营速度不断加大,高速列车-工程结构系统随机动力学问题日益突出,主要表现在因轮轨磨耗、桥梁基础偏移、基础沉降、支座变形变位、轨道结构损伤变形、轨道-桥梁结构温度翘曲、桥梁徐变上拱等引起的轨道不平顺加剧,列车-轨道-桥梁系统结构参数离散性引起的振动极值随机性加大等。正常运营下,即便是同一车辆多次以同样速度通过同一座桥梁时,桥梁测得的动力响应值均非

常离散,有时甚至相差几倍^[3]。显而易见,系统动力响应本身就是一个随机过程,仅采用传统列车-轨道-桥梁系统动力分析方法不足以精确揭示多因素作用引起的高速列车-桥梁耦合随机振动特征,而已有的基于随机振动理论的列车-轨道-桥梁系统随机振动分析方法多从输入激励功率谱或结构参数等单源随机性对列车-轨道-桥梁系统的影响开展随机分析,只考虑列车荷载、轨道不平顺等随机输入激励作用,而忽略了列车、桥梁结构体系等系统随机参数对列车-轨道-桥梁系统的耦合作用是不全面的,不能很好地揭示其随机振动的本质特征。

因此,有必要寻求更为科学合理的随机振动理论对列车-轨道-桥梁系统动力相互作用的随机振动特性进行深入、系统的综合研究,更精确地揭示列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动的本质特征,以便正确评估各种运营状态下的轨道-桥梁结构体系动力性能和桥上列车走行性。这是现代高速铁路、重载铁路桥梁设计的实际需要,将为中国铁路既有线不断提速,高速铁路大规模建设、运维及重载铁路大轴重、高运量、高密度运行等的客观现实奠定更为坚实的理论基础,具有重要的理论意义和工程应用价值。

1.2 列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动的研究内容与方法

列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动是一个以数学、物理、力学、材料等为基础,涉及数论选点、数学与概率统计、随机振动力学、多刚体动力学、车辆工程、桥梁工程、轨道工程、风工程、地震工程、振动控制等多个数理与工程科学领域的复杂研究体系。随着大数据、人工智能(artificial intelligence, AI)、超算等先进科学技术的发展,列车-轨道-桥梁系统正在往大系统工程科学的方向发展。

当前,列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动的研究主要包含以下几个方面内容:

- (1) 高维度多概率分布随机参数点集的最优选点理论;
- (2) 地震、风、轨道随机不平顺等随机荷载特性和模拟方法;
- (3) 轨道-桥梁结构在列车运行作用下的随机动力响应分析;
- (4) 地震作用下的列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动分析;
- (5) 横风作用下的列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动分析;
- (6) 多源随机激励作用下的列车-轨道-桥梁系统行车安全性与乘坐舒适性评估;
- (7) 轨道-桥梁结构动力性能可靠性评估与最优化设计;
- (8) 各源激励作用下的轨道-桥梁结构振动控制问题;
- (9) 多源随机激励作用下的列车-轨道-桥梁系统结构可靠性、行车安全性与乘坐舒适性评估准则更新;
- (10) 多种随机振动分析方法最优比选问题;

(11) 基于大数据技术、机器学习等人工智能技术的列车-轨道-桥梁系统智能评估与预测代理模型研发。

早在 20 世纪 80 年代初,我国各相关科研单位和高等院校就开始从事铁路列车-桥梁系统耦合振动理论与工程应用的研究,先后建立和发展了各自的分析模型,并经过了大量实测数据与理论仿真的验证,具有较好的实用性和合理性;同时,这些模型也为学者理解和认识列车-轨道-桥梁系统随机振动特性提供了强有力的理论基础与技术支撑。然而,列车-轨道-桥梁系统是强随机系统,仅采用传统确定性列车-轨道-桥梁系统动力分析方法不足以精确揭示由多动力源作用引起的列车-轨道-桥梁耦合随机振动特征。因此,学者开始考虑采用随机振动理论来研究车桥耦合随机振动特性。

从本质上来说,任何随机振动分析问题都可以转化为若干个确定性振动问题来开展分析,可以从解析求解、数值模拟求解和试验研究统计等多方面开展研究。结构系统随机振动的研究范畴主要针对受随机激励或者随机参数激励作用下的结构动力系统的随机振动响应、可靠度分析问题,其发展经历了从单自由度系统到多自由度系统、从线性系统到非线性系统等阶段。伴随着随机振动分析理论与方法的逐步完善,各类线性/非线性随机振动分析方法(包括功率谱方法、虚拟激励法、随机等效线性化方法、随机摄动法、概率密度演化方法、直接概率积分法、随机平均法、矩截断法、福克-普朗克-科尔莫戈罗夫(Fokker-Planck-Kolmogorov, FPK)方程数值求解法(如路径积分法、本征函数展开法、有限差分法、有限元法等)、等效非线性系统法、时域递推法等),以及动力可靠度分析方法(跨越过程法、扩散过程法、随机模拟法、广义胞映射法等)在各类工程结构中的发展和应用越来越广泛。

综合上述研究方法,根据方法本身的适用性和科学性,学者逐步将随机分析方法引入铁路桥梁动力学领域,有针对性地提出和发展了多种适用于特定条件下的列车-轨道-桥梁系统耦合随机振动分析方法,主要包括随机移动荷载解析法、随机模拟法(蒙特卡罗(Monte Carlo)法)、随机摄动法、虚拟激励法、(广义)概率密度演化方法(probability density evolution method, PDEM)、直接概率积分法、协方差方法^[4]以及统计线性化方法等。

(1) 随机移动荷载解析法。随机移动荷载模型由于受力简单、模型明确、易于分析等特点,常用于早期车桥随机耦合振动的研究。

(2) 随机模拟法(蒙特卡罗法)。随机模拟法又称随机抽样或统计试验方法,属于计算数学的一个分支,由于能够真实地模拟实际物理过程,经常以概率和统计理论方法为基础被用于解决实际的随机性问题。它是一种基于大量离散样本统计的随机分析方法,将所求解的问题与一定的概率模型相联系并实现统计模拟或抽样,以获得问题的近似解。因此,该方法往往需要足够大的样本容量才能保证结果的可靠性。随着车桥耦合振动研究工作的深入,系统随机性问题越来越受关注,

但随机振动计算方法尚未深入发展,学者开始采用随机模拟法来研究车桥耦合系统的随机振动问题。

(3) 随机摄动法。随机摄动法又称小参数展开法,是利用随机摄动法求解方程的渐进解,通常要将物理方程和定解条件无量纲化,在无量纲方程中选择一个能反映物理特征的无量纲小参数作为摄动量,然后假设解可以按小参数展成幂级数,将这一形式级数代入无量纲方程后,可得各级近似方程,依据这些方程可确定幂级数的系数,对级数进行截断,便得到原方程的渐进解,主要用来获取弱非线性系统在随机激励下的响应近似解。非线性确定性分析中的随机摄动法为列车-轨道-桥梁系统动力分析提供了较为强大的工具,其基本原理为:假设随机变量在小范围内变动,将结构的质量、刚度、阻尼矩阵以及结构响应展开成随机变量的级数,通过比较各阶系数得出方程的递推解,从而算出随机响应。

(4) 虚拟激励法。林家浩于 1985 年对单点平稳随机激励问题提出了虚拟激励的概念,并发展了一个确定性精确算法,计算效率高,计算步骤简便,是基于随机理论以新的思路逐步发展和建立的高效精确算法^[5],源于海洋工程动力分析的需求^[6],并发展到多点互相干随机激励^[7]。虚拟激励法对于多输入多输出系统的随机振动问题仍然适用。后续,又提出了逆虚拟激励法^[8,9],反向扩展了虚拟激励法。该方法已有 30 多年的研究历史,在大跨度结构抗震计算^[10-16]、结构风工程^[17-19]、汽车工程^[20,21]、磁浮车辆^[22]、海洋和船舶工程^[23]、航空航天工程^[24,25]、国防工程^[26]、振动控制^[27,28]、随机荷载识别^[29,30]等领域得到应用,获得国内外同行的广泛重视和认可。他们系统地证明了虚拟激励法不但适用于高层建筑、大跨度结构等时不变系统,而且适用于受多维或者非平稳随机激励的时变系统,进而为车桥时变随机振动系统的研究奠定基础。

(5) (广义) 概率密度演化方法。概率密度演化方法源自对物理随机动力系统的现象学描述与物理学描述。前者可追溯到 1905 年 Einstein^[31]对 Brown 运动的研究,推导了粒子密度的演化方程。1914 年由 Fokker^[32]、1917 年由 Planck^[33]加以发展及 1931 年由苏联数学家 Kolmogorov^[34]建立方程的严格数学基础,得出了著名的 Fokker-Planck-Kolmogorov (FPK) 方程。后者可追溯到 1908 年 Langevin^[35]对单个 Brown 粒子运用牛顿运动定律从物理学角度进行的研究,20 世纪 40 年代初、中期,Itô^[36,37]对该随机过程的研究及 20 世纪 60 年代初 Stratonovich^[38]提出的物理白噪声解释,形成了 Langevin-Itô-Stratonovich 的研究脉络。而后,概率密度演化理论的发展相对较滞后。

近 20 年以来,李杰、陈建兵针对以上两条研究思路进行深入剖析,从物理随机系统的思想框架中形成了对多维非线性随机动力系统研究的新思路,提出了一类新的广义概率密度演化方法^[39,40]。概率密度演化方法 (FPK 方程方法)^[41]现已发展为研究非线性随机振动的重要方法,尤其经李杰、陈建兵提出并建立的广义概

率密度演化理论,使之能适应多自由度非线性结构的随机响应和动力可靠度计算^[40,42-52],并在实际工程应用中推广。在列车随机荷载、轨道不平顺、系统随机参数以及环境随机荷载等的耦合作用下,列车-轨道-桥梁系统呈现出了很强的随机性和时变性,目前的随机振动理论尚不能很好地揭示列车-轨道-桥梁系统的随机振动本质特征,广义概率密度演化方法有望解决此类问题。

(6)直接概率积分法。直接概率积分法^[53]是一种适用于大型结构线性、非线性随机振动分析以及静、动力可靠度评估的准确、高效、统一的新方法,是在(广义)概率密度演化理论框架上发展而来,可直接计算概率密度积分方程进而得到随机响应概率密度函数(probability density function, PDF)的数值求解。其求解关键技术为:①根据(广义)概率密度演化方法中提出的基于 GF 偏差选点技术获得输入参数点集的概率空间剖分,并赋得初始概率;②使用连续的高斯函数代替原概率密度积分方程中不连续的狄拉克函数,进行光滑化处理,对每一积分步长概率分布叠加求和,得到随机响应的概率密度函数。目前,该方法已推广应用于列车-(轨)-桥系统随机振动和桥梁动力可靠度分析^[54]中,取得了良好的计算效果。

1.3 列车-轨道-桥梁系统耦合振动研究综述

1.3.1 列车-轨道-桥梁系统耦合振动研究进展

1825年英国建成世界上第一条铁路,开启了探索车桥耦合动力作用规律的篇章。由于车桥振动分析的难度大,早期的模型并未考虑系统的随机性,而以确定性时程分析结合现场实测来开展车桥振动研究。1849年 Willis^[55]、Stokes^[56]最先开展了车桥振动理论与试验研究。1887年,Robinson^[57]发表了桥梁振动的初步理论分析结果与试验测试结果,因没有考虑桥梁质量的影响,其分析结果与实际情况出入较大。1905年, Kolousek^[58]按振型叠加法将轮轨垂向力模拟为单周期作用力得出了连续梁桥竖向振动解,获得了连续梁、刚架和拱桥的车振响应。

在试验研究方面,20世纪初期美国组织了规模原型试验,并首次提出了冲击系数和冲击系数曲线的概念。在随后的试验中,又得出了临界速度的概念。20世纪30年代,苏联进行了大量试验,主要考虑桥梁的横向振动并提出帷幕理论和侧向摇摆理论。由于古今试验条件的差距,他们的研究结论局限于当时的工程实际,对现代化桥梁建设与理论分析指导意义有限,但冲击系数和车桥共振等概念一直沿用至今。

在理论研究方面,针对简化的车桥竖向模型用解析法求得精确解或近似解。1922年, Timoshenko^[59]、Krylov^[60]等求得了匀速简谐力通过简支梁的解析解,并从理论上解释了共振现象。1934年, Inglis^[61]简化列车荷载为移动的周期力与惯

性力,并用试算法求出了车桥振动微分方程的近似解,对车桥振动研究的发展起决定性的影响。1937年, Schallenkamp^[62]将桥梁挠度与轮对惯性力展开为傅里叶级数,分析了独轮过桥问题。1953年, Muchnikov^[63]结合积分方程法和伽辽金法分析了桥梁自重加活荷载时的振动问题。1956年, Mise等^[64]完善了 Inglis的理论,提出桥梁移动荷载作用下强迫振动响应的计算方法。1960年, Wen^[65]考虑路面不平顺情况,应用能量法研究双轴车桥动力问题。1964年, Biggs^[66]得到了匀速质量对简支梁桥作用的近似解,他把车辆模拟成簧上及簧下质量。此间的理论研究虽然进行了大量简化,但为现代车桥振动理论研究奠定了良好的基础。

20世纪60年代以来,计算机及有限元的发展极大推动了车桥振动研究。从车桥振动模型的建立、激励源的模拟到研究、计算方法等均有了跨越式发展,可建立基于实际的车辆和桥梁模型并利用数值模拟法计算列车-轨道-桥梁系统振动响应。

20世纪70年代,美国伊利诺伊理工大学的 Chu等^[67,68]和 Garivaltis等^[69]采用较符合实际的车辆模型来分析列车-轨道-桥梁系统的振动响应。随后, Wiriyachai^[70]基于此车辆模型研究了刚接、铰接及半刚接桁架桥的冲击系数和局部杆件的疲劳破坏,并分析了轮轨缺陷和轨道不平顺对桥梁冲击系数的影响^[71]。此后, Bhatti^[72]进一步细化车辆模型,建立了具有21个自由度的两系弹簧的空间车辆模型,考虑车体、摇枕、转向架系统及弹簧的几何和悬挂非线性影响,以轨道竖向、横向不平顺为激励源,研究了简支桁架桥的振动响应及动力系数。Wang^[73]则将上述车辆模型改为19个自由度后重新分析了桁梁的振动特性,与 Bhatti^[72]均得到结论,即桥梁空间铰接与空间刚接的杆件轴力基本相当(忽略扭转刚度)。之后, Wang等^[74,75]又建立了具有23个自由度的空间车辆模型,改进了 Bhatti的车辆模型。虽然 Chu等的研究未充分考虑横向蠕滑问题,但多刚体车辆模型得到了各国学者的公认,对现代车桥振动理论具有深远影响。1989年, Vu-Quoc等^[76]结合龙格-库塔(Runge-Kutta)法、线性多步法和车桥振动的非线性微分方程组,提出了无条件稳定求解相互作用问题的预测-校正算法。1994~1995年, Green等^[77,78]提出了在频域内利用模态脉冲响应函数与模态激励力,结合模态叠加法及快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)和快速傅里叶逆变换技术求解桥梁动力响应。

早在20世纪70年代,日本就进行了较广泛、深入的车桥振动理论与试验研究。松浦章夫^[79-81]建立了四轴车辆的10自由度车辆模型,考虑轨道不平顺,基于能量法,推导了车桥运动方程,对比分析了各参数对桥梁冲击系数的影响。阿部英彦等^[82]修订与补充了多跨简支梁竖向挠跨比限制的问题。日本铁道技术研究所(Railway Technical Research Institute)开发了新干线列车轨道结构物相互作用程序(DIATARS)^[83,84],建立了31自由度车辆模型,可考虑车体部件之间非线性弹簧和阻尼,按照赫兹(Hertz)非线性弹簧和 Kalker 线性蠕滑理论分别得到轮轨垂向力、

横向力,采用纽马克(Newmark)法迭代求解方程组。

欧洲国家也对车桥振动进行了广泛而深入的研究。英国的 Fryba^[85-87]较早建立了接近现代车桥理论的分析模型,并研究了桥梁结构疲劳问题和随机移动荷载作用下桥梁的随机振动问题。Diana 等^[88]研究了列车-大跨度悬索桥系统的列车动力响应及其走行安全性问题,并考虑了弹性轨道的影响。Olsson^[89,90]采用有限元模态技术求解车桥动力响应,模态坐标法有效减少了桥梁的方程数。Bogaert^[91]通过研究肋式拱桥的车桥竖向冲击效应提出了冲击系数的简化表达式。1989 年 Diana 建立 23 自由度车辆模型,考虑轮轨关系,分析了列车及风荷载作用下悬索桥的动力问题^[88,92]。Lei 等^[93]研究了轨道随机不平顺对列车-轨道耦合系统的振动响应分析;Biondi 等^[94]提出了子结构法分析列车-轨道-桥梁系统动力响应;Dinh 等^[95]利用轮轨接触模型分析了三维高速列车-桥梁动态耦合响应,考虑接触刚度与阻尼对振动响应的影响;Majka 等^[96]基于轨道随机不平顺和桥梁偏载分析了对车桥动力响应的影响;Lombaert 等^[97]基于频域方法的傅里叶变换方法研究了道路不平顺作用下车桥耦合系统的随机动力特性;Lu 等^[98]进行了列车质量对铁路桥梁频响特性的研究分析;Youcef 等^[99]采用模态叠加法研究了轨道随机不平顺作用下列车-轨道-桥梁系统的动力特性与舒适度问题。

在我国,早在 20 世纪七八十年代,李国豪^[100]、陈英俊^[101]、胡人礼^[102]、何度心^[103]等已对车桥耦合振动进行了研究,打下了良好的基础。自 20 世纪 80 年代以来,以西南交通大学、北京交通大学、中南大学(原长沙铁道学院)和中国铁道科学研究院为代表的科研院校对车桥耦合振动问题进行了更为系统的理论、试验研究。目前,已建立了 38 自由度车辆模型,使车桥耦合振动的研究不断深入并取得了丰硕的成果。中国铁道科学研究院潘家英和高芒芒对铁路列车-轨道-桥梁系统动力分析工作进行了总结^[104]。

自 20 世纪 80 年代初以来,中南大学曾庆元带领课题组对列车-轨道-桥梁系统振动理论进行了深入、系统的研究^[105-107],其著作《列车桥梁时变系统振动分析理论与应用》^[3]对原创理论——弹性系统动力学势能驻值原理及形成矩阵的“对号入座”法则开展了系统性介绍。郭向荣等一大批学者基于该理论研发了列车-轨道-桥梁系统相关动力学分析软件,并广泛应用于我国铁路设计、运营维护等领域,为我国铁路事业作出了重要贡献;同时,在列车脱轨领域,曾庆元、向俊等提出了桥上列车脱轨的力学机理和能量随机分析理论,并出版著作《列车脱轨分析理论与应用》^[108];Lou 等^[109]提出了列车-轨道-桥梁耦合模型的一种多尺度耦合方法;徐磊^[110]在其著作《列车-轨道-基础结构动力相互作用:理论模型与数值算法》中进一步发展了高效的列车-轨道-桥梁系统模型和研究框架,较系统地建立了高速列车-轨道-基础结构动力相互作用统一分析模型。

20 世纪 80 年代以来,北京交通大学夏禾教授课题组对列车-桥梁系统动力学

问题进行了一系列深入的研究,并且取得了丰硕的研究成果^[111-120],尤其夏禾、张楠的著作《车辆与结构动力相互作用》(第二版)^[121]、《车桥耦合振动工程》^[122]、《高速铁路车桥耦合动力学》^[123]及其系列研究成果,系统、详细地归纳了研究团队在车桥振动研究领域的成果。2012年,Guo等^[124]建立了完整的高架桥上列车-轨道-桥梁系统的动态仿真与评估模型,进行了随机风荷载作用列车-轨道-桥梁系统的运行安全性分析,并给出了建议指标^[125]。这些研究成果对车桥振动研究作出了重要贡献,对铁路工程设计和工程实践具有重要的指导价值。

西南交通大学以翟婉明^[126]、李小珍等^[127,128]、蔡成标^[129]和沈锐利^[130]等学者带领的团队长期以来对车桥振动问题进行了深入系统的研究,尤其翟婉明院士课题组历经十余年,在车桥基础理论与应用技术方面取得突破性进展^[131,132],《车辆-轨道耦合动力学》系统、详细地归纳了研究团队长期以来在车轨动力学领域的研究成果,建立了精细化的轮轨关系模型,为铁路事业、行车安全作出了重要贡献。翟婉明、夏禾合著的《列车-轨道-桥梁动力相互作用理论与工程应用》^[133]系统地介绍了在车桥耦合振动基础理论和应用技术两方面取得的突破性进展,为我国铁路新桥设计、旧桥加固提供了一套先进的理论分析和安全评定方法。

另外,上海铁道大学曹雪琴等^[134-137]对钢桁架桥车桥横向振动问题进行了大量理论、实测研究,得到了一些有价值的结果。

20世纪90年代以来,杨永斌院士、姚忠达教授等一直致力于列车-轨道-桥梁系统动力学研究,取得了丰硕的研究成果^[138-141]。十余年来,杨永斌院士带领课题组在列车-轨道-桥梁耦合振动领域作出了突出贡献^[142-145],尤其1997年在车桥共振与相消条件^[146]方面的研究,为我国高速铁路简支梁桥标准梁的设计与建造提供了直接的理论基础和技术支撑。其著作 *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics: with applications to High-Speed Rail*^[147]由浅入深地对列车-轨道-桥梁系统动力学建模、求解进行了详细推导,对列车-轨道-桥梁系统动力学理论进行了较好的归纳和总结。近年来,杨永斌院士持续深入研究列车-轨道-桥梁系统构件损伤检测^[148]、系统参数识别^[149-151]、车桥共振与相消^[152]等,取得了显著的突破。

随着世界高速铁路的大力发展,尤其是我国高速铁路十余年来由跟跑、并跑再到领跑的跨越式发展,基于高速铁路的列车-轨道-桥梁耦合振动分析研究愈显活跃,极大地推动了车桥耦合振动理论的发展,大量高水平研究成果陆续发表,研究内容涉及多方面。例如,Hankari等^[153]在列车-轨道-桥梁系统共振和减振方面进行了深入研究;Eroğlu等^[154]应用磁场降低钢桥对高速列车的强振效应;Tang等^[155]考虑滑移和剪力滞效应的钢-混凝土组合梁桥车桥振动混合控制。也有专家学者寻求车辆-桥梁相互作用效应的简化计算方法。例如,Bettinelli等^[156]提出了桥架结构附加质量或附加阻尼的概念;König等^[157]提出了一种基于集总参数模型的半解析方法来分析列车-轨道-桥梁-土大系统的动态相互作用等。