



2017年度湖南省图书重点选题

Running safety analysis of
high-speed train-bridge systems subjected to strong winds:
theory and application

强风作用下 高铁桥上行车安全 分析理论与应用

何旭辉 邹云峰 / 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

专题

Running safety analysis of
high-speed train-bridge systems subjected to strong winds:
theory and application

强风作用下 高铁桥上行车安全 分析理论与应用

何旭辉 邹云峰 / 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn
· 长沙 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

强风作用下高铁桥上行车安全分析理论与应用 / 何旭辉, 邹云峰著. --长沙: 中南大学出版社, 2018. 11
ISBN 978 - 7 - 5487 - 3268 - 6

I. ①强… II. ①何… ②邹… III. ①高速铁路—铁路桥—铁路行车—行车安全—研究 IV. ①U298. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 253107 号

强风作用下高铁桥上行车安全分析理论与应用

QIANGFENG ZUOYONGXIA GAOTIE QIAOSHANG HANGCHE ANQUAN FENXI LILUN YU YINGYONG

何旭辉 邹云峰 著

责任编辑 刘颖维

责任印制 易红卫

出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

印 装 湖南鑫成印刷有限公司

开 本 720 × 1000 1/16 印张 22 字数 444 千字

版 次 2018 年 11 月第 1 版 印次 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3268 - 6

定 价 298.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

内容简介



本书为 2017 年度湖南省图书重点选题。全书较全面地总结了我国高铁桥梁发展成就和国内外风致行车安全事故，针对强风环境下高铁桥上行车的特点，重点介绍非平稳风特性及其模拟分析方法、我国高速铁路典型标准跨径和大跨桥梁-列车系统气动特性、移动列车-桥梁系统气动特性 CFD 数值模拟和风洞试验技术、桥梁-车辆动力相互作用分析理论和方法、非平稳风激励下车-桥随机振动分析理论、多体动力学软件 SIMPACK 在风-车-桥耦合振动分析中的应用、常规风屏障参数对车-桥系统气动特性影响规律、百叶窗型等多种新型风屏障研发，以及这些研究成果在重大高铁桥梁工程中的应用。

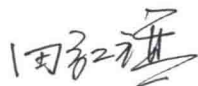
本书可供铁路、城市轨道交通等相关领域的科研人员和工程技术人员参考，亦可作为高等院校相关专业本科生、研究生的教学参考用书。

序一 Foreword

《强风作用下高铁桥上行车安全分析理论与应用》是我国轨道交通领域在行车安全方面的一部学术著作。笔者针对我国高速铁路快速发展面临的桥上行车安全技术挑战问题，在桥梁抗风和行车安全前沿领域，从非平稳风场特性、典型高铁桥梁-列车气动特性、车-桥及风-车-桥分析理论、高铁桥上风屏障等方面开展系统研究，取得了研究成果。

该书结构严谨，创新性强。在传统风-车-桥耦合振动研究的基础上，创造性地考虑了风的非平稳特性，建立了非平稳风激励下车-桥系统随机振动分析理论框架，并在静止/移动列车-桥梁系统模型风洞实验技术等方面取得突破；在常规桥上风屏障参数优化研究的基础上，发明了百叶窗型等新型风屏障结构形式，突破了常规风屏障透风率和风向不能实时改变的不足，为实现车-桥-障系统气动特性的综合优化和自适应控制奠定了基础。

列车行车安全是铁路发展永恒的主题，加强相关基础理论和应用技术研究至关重要。国内外发生的强风导致列车脱轨和倾覆事故表明，强风作用下的桥上行车安全问题更加复杂，引发列车坠桥等二次灾害风险更大，涉及列车空气动力学、桥梁工程、风工程等多学科交叉。本书的适时出版对我国高铁自主创新和可持续发展具有积极作用，也期望对从事和关心这一领域研究的学者有所教益。



中国工程院院士
中南大学教授
2018年9月

序二 Foreword

我国高速铁路桥梁占比很大，随着高速铁路网络不断向东南沿海和西部山区延伸，我国还将修建更大跨度的高铁桥梁，将面临更加复杂的风环境。桥梁抗风问题自从1940年美国塔科马大桥风毁事故以后，经过数十年的努力，现在的技术水平基本上可以防止桥梁风毁事故的发生，但桥梁振动问题仍难以避免。

铁路桥梁以前由于跨度小、刚度大，列车速度也不高，对风不是特别敏感。但随着我国高铁桥梁的快速发展和列车速度的不断提高，车辆和桥梁间耦合振动明显、气动干扰突出，强风作用下高铁桥上行车安全问题显得非常重要，很多科学和技术问题值得深入研究。

何旭辉教授是我最早的硕士和博士研究生之一，2000年我主持湖南岳阳洞庭湖大桥拉索风雨振研究，他就是主要研究人员。近年来，在国家及中国铁路总公司科技项目的持续资助下，依托中南大学风洞实验室，针对高铁桥梁抗风和行车安全问题，他带领课题组开展了系统深入的研究，在基础理论和应用技术方面均取得了突破性进展。他首次建立了非平稳风激励下的列车-桥梁系统随机振动分析框架，研发了静止和移动列车-桥梁系统气动特性识别技术，发明了百叶窗型等新型高铁桥上风屏障结构形式。相关的研究成果获得了2017年度湖南省科技进步一等奖和中国铁道科技特等奖。

该书系统地介绍了课题组在强风作用下高铁桥上行车安全领域所取得的研究成果，对从事铁路车-桥振动和桥梁抗风研究的科研工作者、工程技术人员及本科生、研究生具有非常好的参考价值。



中国工程院院士

湖南大学教授

2018年9月

前言

Preface

桥梁作为我国高速铁路的重要工程结构，占比非常高（平均达50%以上），且大跨度桥梁越来越多，加上风环境复杂多变，公文化运行的高速列车在时空上均很难避免强风环境下的桥上行车。相比平地路基，桥梁结构柔，桥面风速大，车辆与桥梁之间耦合振动显著，相互气动干扰复杂，桥上高速列车的行驶安全性与舒适性问题的更为突出，相关分析理论和防控技术的深化研究具有十分重要的理论和工程意义。

强风作用下高铁桥上行车安全问题涉及车-桥耦合振动、列车空气动力学和桥梁风工程等相关研究领域和学科。笔者所在的中南大学在这些方面均有非常好的研究基础：曾庆元院士于20世纪80年代初创立了一种车-桥横向耦合振动理论和能量随机分析理论，在国内外独树一帜，具有重要影响。列车空气动力学于20世纪90年代初在国内率先研究，田红旗院士研建了世界上规模最大、国内唯一的列车气动性能模拟动模型试验装置，其特色鲜明，为我国铁路提速、高速铁路的发展做出了重大贡献。

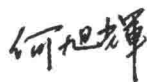
20世纪90年代初，笔者的硕士、博士生导师陈政清院士带领团队投入桥梁风工程研究，打下了很好的研究

基础。近年来随着风洞实验室的研建成功，大力推动了我校风工程学科的发展。感谢中南大学土木工程学院和高速铁路建造技术国家工程实验室的支持，笔者于2013年依托风洞实验室平台建立科研创新团队继续开展相关研究工作。

本书主要内容是笔者近十年来在高铁联合基金重点项目(U1534206)，国家重点研发计划项目(2017YFB1201204)，国家自然科学基金优秀青年基金项目(51322808)、面上项目(51178471)和青年基金项目(51508580, 50808175)，中国铁路总公司科技计划项目(2015G002 - C, 2015G01 - A)和中南大学首批创新驱动计划项目(2015CX006)等相关科研项目的持续资助下所取得的研究成果。本书较全面地介绍了我国高铁桥梁发展情况和国内外风致行车安全事故、非平稳风场特性及其模拟、高铁典型桥梁-列车系统气动特性、移动列车-桥梁系统气动特性、移动荷载作用下桥梁振动分析理论与试验、非平稳风激励下车-桥随机振动分析理论、基于多体动力学的风-车-桥耦合振动仿真、高铁桥上风屏障参数深化研究和新型风屏障研发，以及这些研究成果在我国高铁桥梁中的应用。研究工作得到了中铁大桥勘测设计院集团有限公司、中国铁路设计集团有限公司、中铁第四勘察设计院集团有限公司、中国中铁二院工程集团有限公司、中国铁路乌鲁木齐局集团有限公司、中国铁道科学研究院等单位 and 专家的大力支持。本书入选2017年度湖南省图书重点选题。笔者在此一并表示衷心的感谢!

本书由何旭辉提出写作计划，何旭辉、邹云峰制订全书大纲，集体讨论确定各章节内容并分工完成初稿，由何旭辉统一修改定稿。各章主要撰写人为：第1章何旭辉，第2章严磊、秦红禧，第3章敬海泉、邹云峰，第4章何旭辉、李欢，第5章何旭辉、邹思敏，第6章杨靖，第7章何旭辉、史康，第8、9、10章邹云峰、何旭辉。博士研究生于可辉、丁昊，硕士研究生吉晓宇、康熙萌等参与资料收集和排版校对工作，郭向荣、王汉封、闫斌、吴腾等同事也给予了很多帮助。本书包含了笔者所在中南大学风工程研究团队师生多年的研究成果，并引用了一些国内外公开发表的文献资料，已在每章参考文献中提及，这里不再一一列举。

由于笔者水平有限，书中缺漏和差错在所难免，敬请读者与专家批评指正为盼！



2018年9月于中南大学

目录

Contents

第1章 绪 论 / 1

- 1.1 高速铁路定义及发展 / 1
 - 1.1.1 高速铁路定义 / 1
 - 1.1.2 国外高速铁路发展 / 2
 - 1.1.3 我国高速铁路发展 / 3
- 1.2 我国高铁桥梁发展 / 5
 - 1.2.1 我国高铁桥梁建设新理念 / 5
 - 1.2.2 我国高铁桥梁建设成就 / 7
- 1.3 风致行车安全事故 / 15
 - 1.3.1 风致桥梁毁坏事故 / 15
 - 1.3.2 风致列车行车安全事故 / 16
- 1.4 我国主要强风区分布 / 20
 - 1.4.1 东南沿海地区 / 20
 - 1.4.2 “三北”区域 / 21
 - 1.4.3 中西部内陆山区 / 21
- 1.5 本书主要内容 / 21
- 参考文献 / 23

第2章 非平稳风场特性及其模拟 / 24

- 2.1 风力等级 / 24
- 2.2 近地风特性 / 26
 - 2.2.1 平均风特性 / 27

2 / 强风作用下高铁桥上行车安全分析理论与应用

2.2.2 脉动风特性 / 28

2.3 非平稳风分析方法 / 31

2.3.1 非平稳风速模型 / 31

2.3.2 非平稳风速的时频分析 / 32

2.3.3 基于小波变换的非平稳风速演变功率谱估计方法 / 33

2.4 非平稳风模拟 / 36

2.4.1 非平稳风的数值模拟 / 36

2.4.2 非平稳风的风洞模拟 / 40

2.5 实测非平稳风分析 / 43

2.5.1 基于实测的台风样本非平稳分析 / 43

2.5.2 基于实测的强风样本非平稳分析 / 47

参考文献 / 51

第3章 高铁典型标准跨径桥梁-列车系统气动特性 / 53

3.1 风荷载参数定义 / 53

3.2 高铁典型标准跨径桥梁气动特性 / 54

3.2.1 典型标准跨径箱梁气动特性 / 54

3.2.2 紊流场中箱梁气动特性 / 58

3.2.3 不同雷诺数下箱梁气动特性 / 61

3.3 高铁典型标准跨径桥梁-车头系统气动特性 / 64

3.3.1 箱梁-车头系统气动特性 / 66

3.3.2 紊流度对箱梁-车头系统气动特性的影响 / 72

3.3.3 雷诺数对箱梁-车头系统气动特性的影响 / 77

3.4 高铁典型标准跨径箱梁-车身系统气动特性 / 83

3.4.1 箱梁-车身系统气动特性 / 83

3.4.2 紊流度对箱梁-车身系统气动特性的影响 / 87

3.4.3 雷诺数对箱梁-车身系统气动特性的影响 / 93

参考文献 / 95

第4章 高速铁路典型大跨桥梁-列车系统气动特性 / 97

4.1 桁架桥梁气动特性 / 97

4.1.1 典型钢桁架桥梁几何参数统计 / 97

4.1.2 桁架形式对桥梁气动特性的影响 / 99

- 4.1.3 关键参数对桁架桥梁气动特性的影响 / 99
- 4.2 桁架桥梁 - 列车系统气动干扰特性 / 102
 - 4.2.1 相对位置对桁架桥梁 - 列车系统气动特性的影响 / 103
 - 4.2.2 桁架桥梁 - 列车系统气动干扰特性 / 105
- 4.3 扁平箱梁气动特性 / 107
 - 4.3.1 静力气动特性 / 107
 - 4.3.2 斯托罗哈数(St)及其机理 / 111
- 4.4 扁平箱梁桥梁 - 列车系统气动干扰特性 / 113
 - 4.4.1 相对位置对扁平箱梁桥梁 - 列车系统气动特性的影响 / 115
 - 4.4.2 扁平箱梁桥梁 - 列车系统气动干扰特性 / 117
 - 4.4.3 桥梁 - 列车系统尾流特征 / 118
- 参考文献 / 119

第5章 移动列车 - 桥梁系统气动特性 / 121

- 5.1 计算流体力学基本理论 / 121
 - 5.1.1 基本控制方程 / 121
 - 5.1.2 湍流模型 / 123
- 5.2 移动列车 - 桥梁系统 CFD 数值模拟 / 124
 - 5.2.1 模拟方法 / 124
 - 5.2.2 数值计算模型 / 125
 - 5.2.3 结果分析 / 128
- 5.3 移动列车 - 桥梁试验系统风洞试验 / 133
 - 5.3.1 U形滑道加减速装置 / 133
 - 5.3.2 试验模型 / 134
 - 5.3.3 试验工况 / 135
 - 5.3.4 静、动态列车表面风压 / 135
 - 5.3.5 静、动态列车对桥梁风压影响 / 138
- 5.4 CFD 数值模拟与风洞试验对比 / 142
- 5.5 弹射试验系统研发 / 142
- 参考文献 / 143

第6章 移动荷载作用下桥梁振动分析理论与试验 / 145

- 6.1 移动集中力引起的梁桥振动 / 145

4 / 强风作用下高铁桥上行车安全分析理论与应用

- 6.1.1 移动集中力引起的简支梁振动 / 145
- 6.1.2 移动集中力引起的连续梁振动 / 147
- 6.2 移动简谐力引起的梁桥振动 / 153
 - 6.2.1 移动简谐力引起的简支梁振动 / 153
 - 6.2.2 移动简谐力引起的连续梁振动 / 155
- 6.3 移动质量引起的梁桥振动 / 156
 - 6.3.1 移动质量引起的简支梁振动 / 157
 - 6.3.2 移动质量引起的连续梁振动 / 164
- 6.4 移动车辆 - 桥梁振动分析及试验验证 / 165
 - 6.4.1 采用数值模态的模态叠加法和迭代法 / 166
 - 6.4.2 试验介绍与建模计算 / 167
 - 6.4.3 试验验证 / 173
- 参考文献 / 177

第7章 非平稳风激励下车 - 桥随机振动分析理论 / 179

- 7.1 车 - 桥系统耦合模型 / 179
 - 7.1.1 列车模型 / 182
 - 7.1.2 桥梁模型 / 182
 - 7.1.3 车 - 桥相互作用 / 184
- 7.2 车 - 桥系统随机荷载激励 / 185
 - 7.2.1 非平稳风荷载 / 185
 - 7.2.2 轨道不平顺激励荷载 / 188
- 7.3 非平稳激励下车 - 桥随机振动分析方法 / 191
 - 7.3.1 分析流程 / 191
 - 7.3.2 计算精度与效率的验证 / 192
- 7.4 非平稳风关键参数对比分析 / 197
 - 7.4.1 非平稳静风荷载对车 - 桥系统的影响 / 197
 - 7.4.2 非平稳脉动风和轨道不平顺对车 - 桥系统的影响 / 202
 - 7.4.3 非平稳风对列车运行安全的影响 / 206
- 参考文献 / 208

第8章 基于多体动力学的风 - 车 - 桥耦合振动仿真 / 210

- 8.1 多体动力学基本理论 / 210

- 8.1.1 刚体运动学和动力学 / 210
- 8.1.2 多体系统模型的建立 / 211
- 8.1.3 相对坐标法和绝对坐标法 / 212
- 8.2 基于多体动力学的风-车-桥耦合振动分析模型 / 213
 - 8.2.1 高速列车动力学模型 / 213
 - 8.2.2 车-桥耦合振动在多体动力学中的实现 / 218
 - 8.2.3 SIMPACK 中施加风荷载的方法 / 225
- 8.3 多体动力学在大跨高铁桥梁风-车-桥耦合振动的应用 / 225
 - 8.3.1 工程背景及动力特性分析 / 225
 - 8.3.2 车-桥耦合振动动力响应分析 / 228
 - 8.3.3 风-车-桥耦合振动动力响应分析 / 235
 - 8.3.4 桥上列车运行速度安全阈值分析 / 243
- 参考文献 / 245

第9章 高速铁路桥上常规风屏障参数深化研究 / 247

- 9.1 风洞试验概况 / 247
 - 9.1.1 风屏障风洞试验模型 / 247
 - 9.1.2 车-桥风洞试验模型及测点布置 / 248
- 9.2 风屏障参数对简支箱梁-车气动特性的影响 / 252
 - 9.2.1 风屏障透风率对列车气动特性的影响 / 252
 - 9.2.2 风屏障高度对列车气动特性的影响 / 254
 - 9.2.3 风屏障透风率对列车风压分布的影响 / 255
 - 9.2.4 风屏障高度对列车风压分布的影响 / 257
- 9.3 风屏障参数对流线箱梁-车气动特性的影响 / 259
 - 9.3.1 风屏障透风率对气动力系数的影响 / 259
 - 9.3.2 风屏障高度对气动力系数的影响 / 261
- 9.4 风屏障气动影响机理分析 / 265
 - 9.4.1 风屏障透风率的影响 / 265
 - 9.4.2 风屏障高度的影响 / 267
 - 9.4.3 风屏障对车-桥系统流场分布影响 / 270
- 9.5 风屏障对桥上车辆动力响应影响 / 274
 - 9.5.1 车-桥动力学模型 / 274
 - 9.5.2 风屏障透风率对列车动力响应的影响 / 275

6 / 强风作用下高铁桥上行车安全分析理论与应用

9.5.3 风屏障高度对列车动力响应的影响 / 277

9.6 列车风作用下桥上风屏障风荷载现场实测 / 280

9.6.1 现场测试概况 / 280

9.6.2 测试结果与分析 / 282

参考文献 / 287

第10章 高速铁路桥上百叶窗型风屏障研发 / 289

10.1 百叶窗型风屏障原理介绍 / 289

10.2 百叶窗型风屏障气动特性风洞试验研究 / 290

10.2.1 百叶窗型风屏障对桥梁气动特性的影响 / 290

10.2.2 百叶窗型风屏障对车-桥气动特性影响 / 292

10.3 百叶窗型风屏障气动特性数值模拟研究 / 307

10.3.1 标准跨径简支箱梁-车组合系统气动特性变化规律 / 307

10.3.2 扁平钢箱梁车-桥组合系统气动特性变化规律 / 315

10.4 其他新型风屏障开发 / 319

10.4.1 合页型风屏障 / 319

10.4.2 组合型风屏障 / 324

参考文献 / 331

第1章

绪论

1.1 高速铁路定义及发展

1.1.1 高速铁路定义

高速铁路是当今时代高新技术的集成、人类文明的结晶和铁路现代化的标志。由于其具有运能大、能耗低、污染小、占地少和效益好等特点,已成为各国交通运输的发展重点。高速铁路,顾名思义就是速度高的铁路,简称高铁。不同国家、地区以及组织的定义稍有不同。

日本——1970年颁布的《全国新干线铁路整备法》中规定:列车在主要区间能以200 km/h以上速度运行的干线铁道称为高速铁路。

欧洲——1985年5月欧洲经济委员会(Economic Commission for Europe, ECE)给出的定义是:列车最高运行速度达到300 km/h及以上的客运专线或最高速度达到250 km/h及以上的客货混运线,可称为高速铁路;为了建立泛欧高速铁路网体系,欧洲铁路联盟于1996年9月对“高速铁路”提出新的定义:新建高速铁路的允许速度达到250 km/h或以上,既有线升级改造后达到200 km/h的,称为高速铁路。

国际铁路联盟(Internation Union of Rail Ways, UIC)——早期高速铁路定义为:新建高速铁路的设计速度达到250 km/h及以上,经升级改造的高速铁路的设计速度达到200 km/h或220 km/h;后来UIC高速部在2001年10月提出,新建高速铁路的速度目标值是320~350 km/h。

中国——初期高速铁路定义为:既有线改造运行速度不低于200 km/h,新建设计速度不低于250 km/h;2013年1月9日颁布的《铁路主要技术政策》中明确

高速铁路定义: 新建设计开行 250 km/h(含预留)及以上动车组列车、初期运营速度不低于 200 km/h 的客运专线铁路。考虑到人口的不均匀分布, 我国高速铁路通常有客运专线、客货共线和城际铁路等不同类型。

1.1.2 国外高速铁路发展

除了中国大陆外, 全世界已通车运营的 250 km/h 及以上高速铁路主要分布在日本、法国、德国、西班牙、意大利、韩国、英国、比利时、丹麦、瑞典等国家和中国台湾地区。其中, 日本的高速铁路里程为 2258 km, 西班牙 1907 km、法国 1884 km、德国 1057 km。各国铁路的技术路线和运输模式各有不同, 日本、德国多采用无砟轨道, 法国采用有砟轨道; 日本、法国、韩国是纯客运运输为主, 德国则客货混运和客运专线都有。主要国家高速铁路建设发展情况简要介绍如下。

1. 日本高速铁路

日本是建设高速铁路最早的国家。早在 1946 年, 日本就酝酿修建高速铁路, 但迫于战后百废待兴, 而无暇顾及。1958 年 12 月 19 日日本政府批准修建东海道新干线, 1959 年 4 月开始建设, 1964 年 10 月 1 日, 世界第一条高速铁路——日本东海道新干线正式开通, 运营速度为 210 km/h。随后修建的新干线, 包括山阳线、东北线、上越新干线、长野新干线等, 列车运行速度逐步提高, 1985 年建成的东北新干线提速到 240 km/h, 1992 年东海道新干线提速到 270 km/h, 1997 年建成的山阴新干线提速到 300 km/h; 2011 年新型高速列车“準”号投入运营, 最高速度为 300 km/h, 2012 年提高到 320 km/h。1993 年 12 月日本 Star21 试验速度达 425 km/h。

2. 法国高速铁路

法国高速铁路以 TGV (Train à Grande Vitesse) 命名, 是高速列车的意思。1967 年, 法国铁路既有线运营速度提高到 200 km/h, 1981 年新建 TGV 东南线巴黎—里昂高速铁路的部分区段速度达 260 km/h, 1983 年东南线全线通车, 运营速度提高到 270 km/h, 1989 年提高到 300 km/h; 1989 年 9 月, 大西洋西部支线巴黎—勒芒高速铁路开通; 1990 年 10 月, 开往图尔的西南部支线也投入使用, 运营速度逐步提高到 300 km/h; 1993 年 9 月, 北方线 TGV 巴黎—里尔全线贯通, 最高运营速度为 300 km/h; 2001 年 TGV 地中海线全部开通, 地中海线自瓦朗斯向南延伸, 在阿维尼翁设三角线, 东南分支到达马赛, 西南分支到达蒙彼利埃; 2007 年 TGV 东部线部分通车, 运营速度为 320 km/h; TGV 地中海线和 TGV 东部线的设计速度均为 350 km/h。1990 年 5 月法国 TGV 动车组试验速度达 515.3 km/h; 2007 年 3 月, 创造了世界铁路的最高试验速度 574.8 km/h。

3. 德国高速铁路

德国也是发展高速铁路卓有成效的国家, ICE (Inter City Express) 是德国高速