

“十三五”国家重点图书出版规划项目

重大工程的动力灾变学术著作丛书

大跨桥梁的风致灾变

葛耀君 陈政清 李惠 廖海黎 李凤臣 编著



科学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目
重大工程的动力灾变学术著作丛书

大跨桥梁的风致灾变

葛耀君 陈政清 李 惠 廖海黎 李凤臣 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是国家自然科学基金重大研究计划“重大工程的动力灾变”第一阶段“强/台风场以及建筑与桥梁结构风致灾变”项目群中“大跨桥梁抗风”子项目群的五个项目研究成果的总结。全书共 10 章,包括风荷载空间作用及非线性效应、风-雨-结构耦合作用效应、桥梁风致振动细观机理、桥梁构件风致振动效应、风致振动控制方法及原理、桥梁风致灾变过程数值模拟和桥梁风致振动原型监测及验证等。

本书可供桥梁工程和风工程的科研、设计和施工人员使用,也可作为高等院校高年级本科生和研究生教学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

大跨桥梁的风致灾变/葛耀君等编著. —北京:科学出版社,2016

(重大工程的动力灾变学术著作丛书)

“十三五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-049336-1

I. ①大… II. ①葛… III. ①长跨桥-风振控制-研究 IV. ①U448.431

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 151986 号

责任编辑:刘宝莉 张晓娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:左 讯

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

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:25 1/4

字数:509 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

1940年11月7日,建成才四个月的美国华盛顿州塔科马悬索桥在八级大风作用下发生强烈的风致振动,造成桥面折断坠落事故,震动了世界桥梁工程界,也成了桥梁抗风研究的起点。经过几代学者的努力,特别是20世纪60年代Scanlan教授和Davenport教授的奠基性工作,建立起桥梁风致振动分析的理论框架和风洞试验的方法,基本满足了一般大跨度桥梁的抗风设计要求。1964年召开了第一届结构风致效应国际会议,并在1975年的第四届会议上正式成立了国际风工程协会(IAWE)。75年来,国际风工程界没有再让塔科马桥风毁事故重演,而且在抗风理论和风工程实践方面都取得了巨大的进步。

1980年,由北京大学孙天凤教授发起成立了工业空气动力学委员会,中国的风工程研究开始起步。1985年,同济大学提出了多振型耦合的颤振分析理论,完成了上海南浦大桥的全桥模型试验,并在1987年的第七届国际风工程会议上作了大会报告,中国风工程界由此成为国际风工程大家庭的一员。20世纪90年代,国家“九五”重大科研项目是一次重要的机遇,中国的桥梁抗风研究在全国大跨度桥梁建设高潮的推动下,通过理论联系实际,取得了一些重要成果。中国的风工程研究队伍也不断扩大,并积极参加国际和地区的风工程会议,逐渐成长为国际风工程界的一支重要力量。

进入21世纪后,中国桥梁建设又迎来了新一轮的建设高潮,跨海工程建设的兴起激发了全国桥梁风工程研究的热情,中国的边界层风洞建设遍地开花,从20世纪90年代初的10余座猛增到60多座。在2011年的第十三届国际风工程大会上,中国代表超过百人,位居各国之首,中国风工程界已成为国际风工程大家庭的主要力量。

2007年,国家自然科学基金委员会启动了“重大工程的动力灾变”的重大研究计划。该书就是在“大跨桥梁抗风”子项目群中五个项目的研究基础上编著而成的。作为重大研究计划的专家组成员,我一直密切关注着有关桥梁抗风子项目群的研究进展。该书第1章中全面介绍了大跨桥梁抗风领域中三大科学问题的研究现状:由于大跨桥梁的快速发展,经典理论已不能适应超大跨度桥梁的需要;理论分析和实测数据的差异也表明桥梁风振理论精细化的必要性;一些新的风致振动现象的发现需要明确其致振机理,并提出有效的控制技术和方法,以保证大跨桥梁的抗风安全和车辆的安全舒适通行等10余项尚待研究解决的重要问题。

经过五年(2008~2012年)的分工研究和每年一次的交流,五个项目组的研究工作都取得了进展。该书第10章介绍了主要研究结论和成果。其中最突出的有以下几个方面:实现了目前最理想的二维湍流物理模拟及其桥梁气动力实验室识别,研发了精细化的风雨试验装置并用于探索桥梁构件风雨效应,发现了桥梁断面自激气动力作用下非线性大振幅迟滞扭转振动,提出了非线性桥梁风致效应全过程精细化分析方法和软件,实测并验证了大跨度悬索桥加劲梁和斜拉桥拉索的涡激振动,揭示了典型桥梁断面颤振和涡振的细观机理及控制原理。

科学研究是永无止境的。五年研究工作的总结不可能全面解决所有现存的问题,有些理论瓶颈是需要几代人的不懈努力才能克服的。然而,从实用的意义上为大桥工程的抗风安全提出可靠的解决方法是我们最迫切的任务。最近中央提出了“一带一路”的战略目标,中国桥梁界将走出国门,面对世界的桥梁建设任务和发达国家品牌企业的竞争,其中也包括大桥抗风设计的技术服务。我相信,该书所提供的阶段性成果将会在未来中国走向世界的大桥建设中发挥重要的作用,而在该书“未来研究展望”一节中所提出的任务将会激励年轻一代学子继续努力,做出更多创新成果,为中国早日走向桥梁强国贡献力量。

顾海帆

2015年12月

前 言

2007 年国家自然科学基金委员会启动了一项 8 年的重大研究计划——“重大工程的动力灾变”，分两个阶段实施，第一阶段从 2008 年到 2012 年，第二阶段从 2013 年到 2015 年。第一阶段分 4 个项目群开展研究工作，包括“地震动场以及地下结构与大坝地震灾变”、“建筑与桥梁结构地震灾变”、“强/台风场以及建筑与桥梁结构风致灾变”和“重大工程动力灾变模拟系统的集成与验证”。第三项目群由 4 个子项目群组成，分别是“强/台风场”、“大跨桥梁抗风”、“高层建筑抗风”和“大跨空间结构抗风”。“大跨桥梁抗风”子项目群中共立项了 3 个重点支持项目和 2 个培育项目，包括“超大跨度桥梁风致灾变关键效应与过程控制”(90715039, 项目负责人葛耀君)、“柔性桥梁风致振动与控制的现代理论体系研究”(50738002, 项目负责人陈政清)、“大跨度桥梁结构风致动力灾变的原型观测与验证”(90815022, 项目负责人李惠)、“大跨度桥梁斜拉索风雨多相介质耦合振动的精细化研究”(90715015, 项目负责人李凤臣)和“大跨度桥梁非线性自激气动力及非线性颤振研究”(90815016, 项目负责人廖海黎)。本书是“大跨桥梁抗风”子项目群 5 个项目的研究成果总结。

全书共 10 章。第 1 章介绍了研究范围、研究基础和国内外研究现状，由此引出大跨桥梁风致灾变研究的必要性；第 2 章从关键科学问题和科学研究目标出发介绍了 5 个研究项目的研究内容；第 3 章从风荷载空间相关性、抖振力非线性效应、自激力非线性效应和紊流对桥梁颤振影响等方面介绍了风荷载空间作用及非线性效应研究成果；第 4 章从风速与雨强联合分布、高精度人工降雨模拟、钝体断面风雨联合作用力、拉索风雨激振环境与机理和斜拉索表面水膜形态数值模拟等方面介绍了风-雨-结构耦合作用效应研究成果；第 5 章从颤振和涡振绕流特征的 PIV 定量分析、旋涡与自激力非定常演化规律和 Re 效应数值模拟及风洞试验等方面介绍了桥梁风致振动细观机理研究成果；第 6 章从拱桥 H 形吊杆风致振动效应和斜拉索高阶振型涡激振动等方面介绍了附属构件风致振动效应研究成果；第 7 章从主梁颤振的中央稳定板控制、斜拉索风振的磁流变阻尼控制、斜拉索涡振的主动吸气控制和斜拉索风雨振的自适应模糊控制等方面介绍了风致振动控制方法及原理研究成果；第 8 章从桥梁颤振精细化和多元化分析，特别是桥梁随机抖振、静风失稳和颤振发散全过程数值分析等方面介绍了桥梁风致灾变过程数值模拟研究成果；第 9 章从桥梁风致振动原型监测、风振信号采集和数据恢复、原型监

测数据处理和结果分析以及基于原型监测的混合子结构方法等方面介绍了桥梁风致振动原型监测及验证研究成果;第10章从主要研究结论、重要研究进展和未来研究方向等方面进行了总结与展望。

本书由葛耀君负责确定各章节内容、制定全书大纲并根据5个项目的申请书和结题报告编写书稿,陈政清、李惠、廖海黎和李凤臣等修改和审核了相关内容。其中,第1章和第2章的内容来自于全部5个项目;第3章3.1节和3.2节的内容基于葛耀君负责的项目(90715039)、3.3节的内容基于廖海黎负责的项目(90815016)、3.4节的内容基于陈政清负责的项目(50738002);第4章4.1节和4.2节的内容来自于葛耀君负责的项目(90715039)、4.3节的内容来自于李凤臣负责的项目(90715015)和葛耀君负责的项目(90715039)、4.4节的内容来自于葛耀君负责的项目(90715039);第5章5.1~5.3节的内容基于葛耀君负责的项目(90715039)、5.4节的内容基于陈政清负责的项目(50738002)和李惠负责的项目(90815022);第6章6.1节的内容来自于陈政清负责的项目(50738002)、6.2节的内容来自于李凤臣负责的项目(90715015)、陈政清负责的项目(50738002)和李惠负责的项目(90815022);第7章7.1节和7.2节的内容基于陈政清负责的项目(50738002)、7.3节的内容基于李惠负责的项目(90815022)、7.4节的内容基于陈政清负责的项目(50738002);第8章8.1节和8.2节的内容来自于陈政清负责的项目(50738002)、8.3节的内容来自于葛耀君负责的项目(90715039);第9章的内容基于李惠负责的项目(90815022);第10章的内容基于全部5个项目。同济大学赵林研究员和许坤博士参与了书稿的整理、排版和校核工作。

本书作为国家自然科学基金重大研究计划——“重大工程的动力灾变”中“大跨桥梁抗风”子项目群5个项目研究工作的总结,希望能对读者有所裨益。不当之处还望各位同仁批评指正。

葛耀君

2015年11月于同济大学

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究范围	1
1.2 研究背景	2
1.3 关键效应及机理研究现状	4
1.3.1 风荷载空间作用及非线性效应	4
1.3.2 风-雨-结构耦合作用效应	6
1.3.3 桥梁风致振动细观机理	9
1.4 基本理论及控制研究现状	10
1.4.1 基本理论发展演变	10
1.4.2 精细化理论和方法	12
1.4.3 经典理论框架及局限性	18
1.5 原型观测及验证研究现状	20
1.5.1 桥位风场的原型观测与分析	20
1.5.2 结构效应的原型观测与分析	21
参考文献	24
第 2 章 大跨桥梁抗风	33
2.1 关键科学问题	33
2.2 科学研究目标	34
2.3 研究项目及内容	36
2.3.1 超大跨度桥梁风致灾变关键效应与过程控制	36
2.3.2 柔性桥梁风致振动与控制的现代理论体系研究	37
2.3.3 大跨度桥梁结构风致动力灾变的原型观测与验证	39
2.3.4 大跨度桥梁斜拉索风雨多相介质耦合振动的精细化研究	43
2.3.5 大跨度桥梁非线性自激气动力及非线性颤振研究	44
参考文献	44
第 3 章 风荷载空间作用及非线性效应	46
3.1 风荷载空间相关性试验研究	46
3.1.1 被动紊流发生试验	46

3.1.2 主动控制紊流试验	53
3.2 多风扇主动紊流抖振力非线性效应	57
3.2.1 紊流强度与积分尺度影响	57
3.2.2 积分尺度识别修正及验证	65
3.2.3 积分尺度的桥梁抖振效应	70
3.3 大振幅强迫振动自激力非线性效应	78
3.3.1 扭转振动自激力时程和频谱	78
3.3.2 竖向振动自激力时程和频谱	82
3.3.3 高次谐波的非线性变化规律	83
3.3.4 非线性自激力的迟滞效应	84
3.3.5 流线型箱梁的颤振后状态	88
3.4 紊流对桥梁颤振影响	89
3.4.1 对自激力及颤振导数的影响	93
3.4.2 对自激力空间相关性的影响	102
参考文献	111
第4章 风-雨-结构耦合作用效应	113
4.1 风速与雨强联合分布概率	113
4.1.1 极值概率分布	114
4.1.2 Copula 函数	115
4.1.3 Copula 函数的相关性	116
4.2 高精度人工降雨条件及风雨作用效应	118
4.2.1 高精度人工降雨装置	118
4.2.2 降雨特性的统计特征	123
4.2.3 典型断面风-雨定常力	126
4.2.4 典型断面风-雨非定常力	128
4.3 斜拉索风雨激振试验及数值模拟	133
4.3.1 斜拉索风雨激振试验	133
4.3.2 水膜形态的数值模拟	137
4.3.3 水膜形态的试验测量	144
4.3.4 斜拉索风雨激振模拟	151
参考文献	155
第5章 桥梁风致振动细观机理	157
5.1 颤振绕流特征的 PIV 定量分析	157
5.2 涡振绕流特征的 PIV 定量分析	162
5.2.1 扁平闭口箱梁断面	162

5.2.2 分体式双箱梁断面	166
5.3 旋涡与自激力非定常演化规律	177
5.3.1 典型桥梁断面颤振流场作用机制	177
5.3.2 典型桥梁断面颤振表面压力特征	186
5.4 Re 效应数值模拟和风洞试验	194
5.4.1 确定性涡方法的数值模拟	194
5.4.2 不同尺度模型的风洞试验	206
参考文献	208
第 6 章 附属构件风致振动效应	210
6.1 拱桥 H 形吊杆风振稳定性	210
6.1.1 节段模型气动稳定性	211
6.1.2 气弹模型气动稳定性	223
6.1.3 气动稳定性影响参数	227
6.1.4 基于气动稳定性设计	229
6.2 斜拉索高阶振型涡激振动	232
6.2.1 涡激振动数值模拟	232
6.2.2 涡激振动风洞试验	245
参考文献	247
第 7 章 风致振动控制方法及原理	248
7.1 主梁颤振的中央稳定板控制	248
7.1.1 颤振导数试验识别比较	248
7.1.2 断面绕流数值模拟比较	254
7.1.3 PIV 流迹显示验证和比较	260
7.2 斜拉索风振的磁流变阻尼控制	266
7.2.1 磁流变阻尼器试验验证	266
7.2.2 磁流变阻尼器控制原理	268
7.2.3 常电流被动磁流变阻尼器	277
7.2.4 变电流半主动磁流变阻尼器	281
7.3 斜拉索涡振的主动吸气控制	282
7.3.1 节段模型涡振主动吸气控制	282
7.3.2 气弹模型多阶模态涡振 TMD 控制	284
7.4 斜拉索风雨振的自适应模糊控制	285
7.4.1 风雨振两自由度模型	285
7.4.2 自适应模糊控制理论	288
7.4.3 控制效果数值仿真	289

参考文献	292
第 8 章 桥梁风致灾变过程数值模拟	293
8.1 ANSYS 三维桥梁颤振分析	293
8.1.1 自激气动力 ANSYS 模拟	293
8.1.2 颤振分析的 ANSYS 实现	296
8.1.3 ANSYS 桥梁颤振算例	297
8.2 斜拉索气动力对颤振的影响	301
8.2.1 拉索定常气动力模型	301
8.2.2 拉索非定常气动力模型	304
8.2.3 拉索气动力影响算例	313
8.3 桥梁风致灾变全过程分析	324
8.3.1 良态和台风模式风荷载	325
8.3.2 风致灾变全过程模拟	330
8.3.3 风致灾变全过程响应	340
参考文献	350
第 9 章 桥梁风致振动原型监测及验证	352
9.1 桥梁风致振动原型监测	352
9.1.1 悬索桥风振原型监测系统	352
9.1.2 斜拉桥风振原型监测系统	354
9.2 风振信号采集和数据恢复	355
9.2.1 风振信号压缩采样方法	355
9.2.2 无线监测数据恢复方法	357
9.3 原型监测数据处理和结果分析	359
9.3.1 斜拉索多阶模态涡激振动	359
9.3.2 分体式加劲梁涡激振动	360
9.3.3 分体式加劲梁抖振响应	364
9.4 基于原型监测的混合子结构方法	367
9.4.1 物理试验与数值模拟混合方法	367
9.4.2 圆柱与分体箱梁涡激振动计算	367
参考文献	370
第 10 章 总结与展望	371
10.1 主要研究结论	371
10.1.1 风荷载空间作用及非线性效应	371
10.1.2 风-雨-结构耦合作用效应	374
10.1.3 桥梁风致振动微观机理	375

10.1.4 桥梁构件风致振动效应	377
10.1.5 风致振动控制方法及原理	378
10.1.6 桥梁风致灾变过程数值模拟	380
10.1.7 桥梁风致振动原型监测及验证	380
10.2 重要研究进展	382
10.3 未来研究展望	387
参考文献	390

第 1 章 概 述

1.1 研究范围

“大跨桥梁”是指关系国计民生的国家经济大动脉——公路和铁路,特别是高速公路和高速铁路上跨度很大的桥梁。国内外对桥梁结构大跨度的定义不尽相同,一般是指跨度超过 200m 的梁式桥或拱式桥以及跨度超过 400m 的斜拉桥或悬索桥,本书中特指跨度大、刚度小、风敏感的桥梁结构,主要包括悬索桥、斜拉桥和拱式桥。

“风致灾变”研究大跨桥梁在强/台风作用下的结构灾变过程、致灾机理和灾害控制。其中,灾变过程是指强季风和强台风的多维和多点非平稳空间动力作用、风荷载非线性动力作用和风-雨-结构动力耦合作用等所引起的大跨桥梁全过程风致响应直至破坏;致灾机理是指采用现场实测、风洞试验或数值模拟所揭示的大跨桥梁结构抗风性能随风致灾变变化的细部和微观机理;灾害控制是指基于空间作用效应、非线性效应和动力耦合效应的风致振动控制,特别是大振幅或发散性自激振动的控制方法。

“大跨桥梁的风致灾变”涉及的研究范围主要是国家自然科学基金重大研究计划——“重大工程的动力灾变”中五个项目所涵盖的,项目简况如下^[1~5]:

(1) 超大跨度桥梁风致灾变关键效应与过程控制:项目编号 90715039,项目负责人葛耀君(同济大学),研究经费 250 万元,起止时间 2008 年 1 月~2011 年 12 月。

(2) 柔性桥梁风致振动与控制的现代理论体系研究:项目编号 50738002(重大研究计划代管项目),项目负责人陈政清(湖南大学),研究经费 250 万元,起止时间 2008 年 1 月~2011 年 12 月。

(3) 大跨度桥梁结构风致动力灾变的原型观测与验证:项目编号 90815022,项目负责人李惠(哈尔滨工业大学),研究经费 250 万元,起止时间 2009 年 1 月~2012 年 12 月。

(4) 大跨度桥梁斜拉索风雨多相介质耦合振动的精细化研究:项目编号 90715015,项目负责人李凤臣(哈尔滨工业大学),研究经费 50 万元,起止时间 2008 年 1 月~2010 年 12 月。

(5) 大跨度桥梁非线性自激气动力及非线性颤振研究:项目编号 90815016,

项目负责人廖海黎(西南交通大学),研究经费 50 万元,起止时间 2009 年 1 月~2011 年 12 月。

1.2 研究背景

在世界范围内,随着科学技术的进步,特别是设计方法和施工技术的提高,现代大跨度桥梁(特别是悬索桥和斜拉桥)不断向着长大化方向发展。建成于 19 世纪末的美国 Brooklyn 悬索桥(1883 年)主跨为 483m,到 20 世纪末日本 Akashi Kaikyo 悬索桥(1998 年)的主跨已经达到了 1991m,在大约 120 年的时间里悬索桥的跨径增长了 3.1 倍;到 2011 年年底,在全世界已经建成的 10 座最大跨度公路悬索桥中有 5 座在中国(表 1.1),分别是 2009 年建成的 1650m 跨度的舟山西堠门大桥、2007 年建成的 1280m 跨度的阳逻长江大桥、2005 年建成的 1490m 跨度的润扬长江大桥、1999 年建成的 1385m 跨度的江阴长江大桥和 1997 年建成的 1377m 跨度的香港青马大桥,其中,舟山西堠门大桥是世界上跨度最大的钢箱梁悬索桥。此外,意大利 3300m 主跨的 Messina 海峡大桥已经完成设计、开工在即,2001 年丹麦 COWI 公司完成了 Gibratar 海峡大桥多跨 3500m 悬索桥的可行性研究,2003 年我国同济大学完成了 5000m 跨径悬索桥的抗风可行性分析。现代斜拉桥的发展晚于悬索桥,第一座现代斜拉桥瑞典 Strömsund 桥建成于 1955 年、主跨仅 183m,到 2008 年我国苏通长江大桥的通车将斜拉桥的跨径纪录突破到 1088m,53 年内斜拉桥的跨径增长了近 5 倍;到 2011 年年底,在全世界已经建成的 5 座最大跨度公路斜拉桥和 5 座铁路斜拉桥中各有 3 座在中国(表 1.1),分别是 1088m 跨度的苏通长江大桥、1018m 跨度的香港昂船洲大桥、926m 跨度的鄂东长江大桥、504m 跨度的天兴洲长江大桥、251m 跨度的上海闵浦二桥和 168m 跨度的郑州黄河大桥,其中,苏通长江大桥是世界上跨度最大的斜拉桥。

桥梁跨径大幅度增长带来的主要问题是结构刚度的急剧下降,这就使得风对桥梁结构的作用,尤其是风致振动问题变得越来越重要。我国是世界上少数几个受风灾影响最严重的国家之一,我国地处太平洋西北岸,全世界最严重的热带气旋(台风)大多数在太平洋上生成并沿着西北或偏西路径移动,频繁地在我国从南到北的漫长海岸线上登陆并袭击我国沿海地区。据统计,我国沿海地区平均每年有登陆台风 7 个、引起严重风暴潮灾害 6 次、袭击最大风速可达 60m/s 以上,对沿海地区的人民生命财产安全以及桥梁结构安全构成严重威胁。目前,我国沿海经济发达地区新建及待建的超大跨度桥梁数量明显增加,强/台风引起的极值风荷载往往成为控制桥梁设计和施工的关键因素,随着我国高速公路网的建设与发展,太平洋沿岸的大型跨海工程和长江中下游越江通道都将成为 21 世纪中国桥梁工程师面临的最严峻的挑战。

表 1.1 国内外最大跨度悬索桥和斜拉桥

桥型	国家	桥名	主跨/m	建成年份	桥型	国家	桥名	主跨/m	建成年份
公路悬索桥	日本	明石海峡桥	1991	1998	公路斜拉桥	中国	苏通长江大桥	1088	2008
	中国	舟山西堠门大桥	1650	2009		中国	香港昂船洲大桥	1018	2009
	丹麦	大海带东桥	1624	1998		中国	鄂东长江大桥	926	2010
	中国	润扬长江大桥	1490	2005		日本	多多罗大桥	890	1999
	英国	亨伯大桥	1418	1980		法国	诺曼底大桥	856	1995
	中国	江阴长江大桥	1385	1999	铁路斜拉桥	中国	天兴洲长江大桥	504	2009
	中国	香港青马大桥	1377	1997		丹麦	厄勒海峡大桥	490	1999
	美国	维拉萨诺大桥	1298	1964		中国	上海闵浦二桥	251	2009
	美国	金门大桥	1280	1937		意大利	珀河大桥	192	2009
	中国	阳逻长江大桥	1280	2007		中国	郑州黄河桥	168	2011

在过去的 20 多年里,我国的桥梁建设特别是大跨度桥梁的建设取得了飞速的发展,总体规模巨大,但就悬索桥和斜拉桥而言,还未在跨度上取得过突破性的进展。因此,通过 20 世纪 80 年代的“学习与追赶”和 90 年代的“跟踪与提高”,努力掌握发达国家 70 年代奠定的桥梁抗风理论和方法,并将其转化成适合于我国实际的桥梁抗风设计规范,确保已经建成的大跨度桥梁的抗风稳定性、安全性和适用性。随着我国桥梁建设事业的蓬勃发展,我国在经济实力和工程经验方面已经具备了建造大跨度桥梁、冲击桥梁跨度世界纪录的可能。例如,已经建成的世界纪录跨度的苏通长江大桥和舟山西堠门大桥,以及正在探索中的 5000m 跨度的悬索桥。此外,借助大跨度桥梁工程建设的背景,我国已经成为世界上桥梁结构健康监测系统装备最多的国家,已经建设的健康监测系统一般均设计了桥梁结构风场和风效应的监测子系统,这些系统的运行积累了大量的台风、强风和日常风荷载及桥梁结构风致响应的数据,我们应充分利用这些宝贵的数据,验证现有桥梁风工程理论和风洞试验及数值模拟结果,研究基于原型观测的大跨度桥梁结构风致动力灾变效应分析方法,揭示大跨度桥梁结构风致动力灾变机理。

对于处于国际大跨度桥梁建设最前沿的中国桥梁工程界,发达国家的桥梁抗风理论和方法已经不再先进并无法适应跨度增长后所带来的新问题、新挑战,我们只有通过自主创新和原始创新才能修正或创立超大跨度桥梁抗风的新理论和新方法,继续延续我国大跨度桥梁抗风稳定、安全和适用的光辉历史。因此,“大跨桥梁的风致灾变”研究不仅具有超前的理论意义,而且具有重大的实用价值。

1.3 关键效应及机理研究现状

1.3.1 风荷载空间作用及非线性效应

大跨度桥梁为典型的空腔线状结构,传统的抗风研究内容主要集中在空腔线状结构局部“点”的气动力表达及其相关气动参数识别等工作,在一定程度上忽略了与结构响应密切相关的来流脉动风或气动力荷载的空间相关性研究。目前,气动力荷载的空间相关性近似假定服从与来流脉动风相关性一致的指数律衰减趋势。在随着桥梁跨度不断增加而采用的各种气动措施中,采用开槽分离箱主梁断面、附加中央稳定板是非常有效的提高大跨度桥梁颤振临界风速的措施,但是,这些能有效提高气动稳定性的措施却使桥梁断面的流线性变差,流动分离加剧,基于势流理论的二维气动力参数公式与实际偏差已非常显著,表现出较为强烈的风荷载来流和尾流空腔效应以及非线性效应。

为了比较准确和方便地研究桥梁颤振问题,1971年 Scanlan^[6]提出了一个桥梁断面的二维自激力模型,并基于该模型建立了桥梁颤振分析理论^[7]。除 Scanlan 的自激力模型外,桥梁断面自激力的表达还有 Zasso^[8]自激力模型、准定常修正的自激力模型^[9]、Marine Coefficient 自激力模型^[10,11]和 Lin 等^[12~14]提出的用脉冲响应函数表示的自激力时域模型。所有这些自激力模型均含有颤振导数或类似系数,其系数之间也可以相互转换,在具体应用时各有优势,它们均为时域-频域混合型模型。上述自激力模型均建立在如下两个假定基础上:①线性化假定:由于进行颤振分析时主要关心的是即将出现振动发散的临界状态,即对主梁的小振幅运动作趋势性预测,因此,线性化假定对于小振幅条件下颤振稳定性分析是足够精确和有效的;②风攻角不变假定:来流风攻角的变化可看作是由截面有效气动外形的改变所致,因此就允许分别考察各种风攻角情况下主梁的气动稳定性,在作具体分析时可假定风攻角是不变的。

由于条件的限制,Scanlan 对实际问题的线性化假定是较理想化的,而实际运营的大跨度桥梁以及和桥梁设计相关的风洞试验(如颤振导数的识别)却受到诸多非线性因素的影响,特别对于目前正在修建和即将修建的超大跨度桥梁及其相关风洞试验,非线性因素的影响越显突出,因而气动力线性化假定在桥梁风工程研究中已引起了理论和实践的一些矛盾,表现为以下两个方面:

(1) 线性化理论是建立在小振幅假定的基础上,即需要断面在某个风攻角附近做非常微小的振动,振幅应“微小”到可以忽略其对有效气动外形改变的影响,但该假定已表现出了很大的局限性。Rierab 等^[15]在测量 H 形桥梁断面的气动系数时,观测到气动系数是平均风攻角 α 和角速度 θ 的非线性函数;Falco 等^[16]、

Diana等^[9]、Borri等^[17]、Sarkar等^[18]近年来已提出各种方法来计入非线性效应以及瞬时风攻角的非线性的影响;我国陈政清等^[19]也在桥梁节段模型颤振导数强迫振动法测试试验中观察到了自激力的非线性效应,并初步量化了非线性的影响。

(2) 线性化理论在进行颤振失稳机理解释时,认为典型桥梁断面的颤振失稳为阻尼驱动,即扭转气动阻尼(主要是颤振导数中的 A_2^* 项)随风速的增加由负转正,导致结构总扭转阻尼先增后减,当减小为 0 时结构达到颤振临界状态。但该理论无法解释桥梁发生的颤振后状态(旧塔科马大桥在发生颤振后基本是以一个较稳定的幅度振动,并经历了约 70min 才发生破坏,而不是如线性理论所描述的那样,出现颤振后迅速发生破坏;目前的《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T D60-01—2004)^[20]对于发散现象不明显的节段模型颤振试验,规定取扭转位移根方差值为 0.5°作为颤振临界点的判据,此两例都对颤振后状态进行了一定量的描述,同时也反映了自激力非线性因素对桥梁颤振的影响),而颤振后状态的研究已成为桥梁颤振灾变整个过程不可或缺的组成部分,直接关系到大跨度桥梁设计和运营的抗风稳定性和安全性。我国著名桥梁专家李国豪教授^[21]在国际上率先研究了斜拉桥的颤振后状态,并指出由于拉索力非线性的影响,在风速高于颤振临界风速的很大范围内,斜拉桥仍然保持较小振幅的振动而不出现发散,但在其论文中仍然采用了线性化假定下的自激力;Bohm^[22]研究了旧塔科马大桥风致非线性振动的稳定性问题,并指出桥梁的非线性稳定性受到初始条件的影响,当风速超过临界风速时存在极限环振动(Hopf 分叉现象);徐旭和曹志远^[23,24]在对柔长结构非线性气动力理论的研究中,也对旧塔科马大桥的非线性颤振做了研究,不仅得出了和 Bohm^[22]相同的桥梁扭转振动非线性方程式,还得出和 Piccardo^[25]相一致的旧塔科马大桥的颤振临界风速。可以说,国内外桥梁风工程界对桥梁非线性自激气动力及桥梁非线性颤振分析开展的研究,目前还处于比较初期的阶段。

对钝体桥梁断面的气动力参数(包括静风力系数、颤振导数和气动导纳)风洞试验识别理论和技术方法的研究已成为大跨度桥梁抗风性能研究的关键环节,其中静风力系数和颤振导数识别工作,国内外已取得较好的研究进展,而与结构气动力作用时频转换和空间相关性密切联系的气动导纳函数识别工作尚未有足够的可借鉴研究成果,尤其表现为脉动风来流和尾流非线性效应相关的研究工作基本上处于空白状态。目前,工程应用中常假定取常值为 1.0 和薄机翼断面的 Sear 函数作为导纳函数实际取值的上、下限,基于这两种取值计算得到的结构风振响应差别可以达到 100%,无法有效指导实际桥梁工程抗风设计。

气动导纳可以通过节段模型风洞试验同步测量抖振力和来流风脉动风速的方法来确定。根据抖振力测量方法的不同,气动导纳的识别方法分为刚体节段模型高频天平测力法、刚体节段模型表面风压测量积分法和气动弹性节段模型紊流场随机响应系统辨识法。1984 年,谢霁明^[26]较早地开展了桥梁主梁断面气动导