



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书（一期）

Numerical Simulation and Control Technologies for
Wind-resistant Design of Super-large Bridge

特大型桥梁 抗风设计数值化及控制技术

刘高 葛耀君 朱乐东 刘天成 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书（一期）

Numerical Simulation and Control Technologies for
Wind-resistant Design of Super-large Bridge

特大型桥梁 抗风设计数值化及控制技术

刘 高 葛耀君 朱乐东 刘天成 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

特大型桥梁抗风设计数值化及控制技术 / 刘高等著
—北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.3
ISBN 978-7-114-14950-4

I. ①特… II. ①刘… III. ①特大桥—桥梁工程—抗
风结构—结构设计 IV. ①U442.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 046134 号

“十三五”国家重点图书出版规划项目
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书(一期)

书 名:特大型桥梁抗风设计数值化及控制技术

著 者:刘 高 葛耀君 朱乐东 刘天成

责任编辑:刘永超 侯蓓蓓 石 遥

责任校对:刘 芹 张 贺

责任印制:张 凯

出版发行:人民交通出版社股份有限公司

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)59757973

总 经 销:人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京雅昌艺术印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:16

字 数:348千

版 次:2019年3月 第1版

印 次:2019年3月 第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-14950-4

定 价:100.00元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

内 容 提 要

特大型桥梁轻柔的结构体系及复杂多样的断面形式使其抗风设计极具挑战。面向跨海、跨江和山区峡谷特大型桥梁的建设需求,本书对特大型桥梁抗风的数值化模拟方法、软件开发及风致振动控制等关键技术进行了详细论述。具体包括:桥梁设计风参数、典型断面桥梁气动参数数据库及抗风性能快速评价、桥梁气动参数识别的数值风洞技术、桥梁多模态耦合颤振分析的能量法、桥梁多模态耦合抖振内力分析的虚拟激励法、斜风下桥梁抖振分析的时域方法、桥梁抗风气动控制技术等。相关研究成果为港珠澳大桥、西堠门大桥、坝陵河大桥、琼州海峡跨海通道工程等特大型桥梁工程建设提供了技术支撑和储备。

本书可供从事特大型桥梁设计、科研等工作的技术人员使用,亦可供桥梁专业师生参考使用。

Abstract

The flexible structural systems and complex cross-section forms of super long-span bridges make their wind-resistant design extremely challenging. Facing the construction requirements of across sea, river and mountain canyons for super long-span bridges, the key technologies of numerical simulation method, software development and wind-induced vibration control are discussed in detail in this book, which including wind parameters of bridge design, aerodynamic parameters database of typical cross-section bridges and rapid evaluation of wind resistance performance, bridge aerodynamic parameters identification via numerical wind tunnel technology, energy method of bridge multi-mode coupled flutter analysis, pseudo excitation method of bridge multi-mode coupled buffeting internal force analysis, time domain analysis method of bridge buffeting under skew wind, aerodynamic countermeasures of bridge wind-induced vibration control, etc. The technological achievements provide technical support and reserve for the construction of such super long-span bridges as Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, Xihoumen Bridge, Baling River Bridge and feasibility study of Qiongzhou Strait Cross-Sea Passage Project.

This book can be used by technicians engaged in the design and scientific research of super long-span bridges, as well as by teachers and students of bridge specialty.

交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾 问：陈 健 周 伟 成 平 姜明宝

主 任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委 员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王 炜 孙立军 蒋树屏 韩 敏 张喜刚

吴 澎 刘怀汉 汪双杰 廖朝华 金 凌

李爱民 曹 迪 田俊峰 苏权科 严云福

序

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版“交通运输建设科技丛书”,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支

持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版“交通运输科技丛书”,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!

杨治堯

2016年6月24日

前 言

随着交通建设适应经济快速发展的需要,跨越江河海湾、深沟峡谷的特大型桥梁面临着巨大建设需求。随着桥梁跨径的增大,结构更为轻柔,阻尼显著降低,结构对风的作用十分敏感,抗风设计已成为控制特大型桥梁安全的一项重大技术挑战。

风洞模型试验是桥梁抗风设计的最重要手段,但试验费用较高、周期较长,而且存在模型尺度限制问题。近年来,随着计算科学和计算机硬件技术的进步,数值模拟技术已发展成为除风洞模型试验之外的重要技术方法,为桥梁抗风设计提供了新的重要技术手段。抗风设计数值化技术费用低、周期短,特别适合工程可行性研究阶段和初步设计阶段大量桥梁设计方案抗风性能的比选,而且能够克服物理风洞试验的尺度局限性,形象描述桥梁结构周围的微观流场变化,揭示桥梁风致振动的物理机理。同时,为了确保桥梁的抗风安全,急需研发实用有效的气动控制措施。

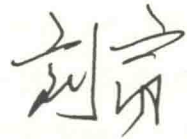
在国家重点研发计划“风浪流耦合及撞击作用下超大跨桥梁致灾机理与安全防控技术(2018YFC0809604)”、国家自然科学基金项目“大跨悬索桥能量耗散机制及振动控制研究(59578001)”“复杂结构非线性随机振动算法研究(10072015)”和交通部西部交通建设科技项目“大跨桥梁抗风设计数值化技术研究(200631849426)”等的资助下,紧密结合港珠澳大桥、西堠门大桥、坝陵河大桥、琼州海峡跨海通道工程等特大型桥梁的抗风设计,在桥梁设计风参数、抗风设计数值分析方法及程序开发、桥梁颤/抖振分析办法、桥梁抗风气动控制措施等方面开展了20余年的研究工作。本书是上述项目部分研究成果的总结,共分8章:第1章为绪论;第2章为桥梁设计风参数;第3章为典型断面桥梁气动参数数据库及抗风性能快速评价;第4章为桥梁气动参数识别的数值风洞技术;第5章为桥梁多模态耦合颤振分析的能量法;第6章为桥梁多模态耦合抖振内力分析的虚拟激励法;

第7章为斜风下桥梁抖振时域分析方法;第8章为桥梁抗风气动控制技术。

在本书的撰写过程中,本人负责全书的统稿、定稿和第1、5、6、7、8章的编写,葛耀君教授负责第2章和第3章的编写、参与第1章的编写,朱乐东教授参与第7章和第8章的编写,刘天成教授级高工负责第4章的编写、参与第1章和第8章的编写,吴宏波教授级高工参与第1章和第3章的编写,赵林教授参与第2章的编写,杨詠昕研究员参与第3章的编写,王秀伟教授级高工参与第5章和第8章的编写。王昆鹏高级工程师、李凯强工程师、许会燕工程师和杨怀茂工程师对书稿进行了仔细的校对,在此表示衷心的感谢!

本书的编写过程中,得到了我的导师项海帆院士、强士中教授、林家浩教授、周述华教授、徐幼麟教授、朱乐东研究员的指导和帮助,得到了赖远明院士、张喜刚设计大师、李守善设计大师、孟凡超设计大师、杨盛福教授级高工、周海涛教授级高工、张劲泉研究员、苏权科教授级高工、徐国平教授级高工、宋辉教授级高工、罗强教授级高工、彭运动教授级高工、邵新鹏教授级高工、梅世龙教授级高工、周平教授级高工、刘波教授级高工、张杰教授级高工、廖海黎教授、李永乐教授、李明水教授、马存明教授、周志勇教授、宋锦忠研究员、陈伟研究员、丁泉顺副研究员、谭潇高级工程师等的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平所限,时间仓促,书中不当之处在所难免,敬请读者多提宝贵意见。



2018年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 桥梁风工程研究的兴起	1
1.2 特大型桥梁的建设热潮	3
1.3 特大型桥梁抗风设计数值化技术	5
1.4 特大型桥梁抗风控制技术	9
本章参考文献	10
第 2 章 桥梁设计风参数	11
2.1 概述	11
2.2 平均风统计分析 with 概率描述	11
2.2.1 极值分布参数估计	12
2.2.2 逐步迭代估计法	14
2.2.3 极值分布拟合优化	16
2.2.4 气象站与桥位风速相关性分析方法	19
2.3 脉动风特性与风谱拟合	21
2.3.1 脉动风特性分析	21
2.3.2 近地脉动风特性分析及风谱拟合实例	23
2.3.3 重庆双碑大桥风参数统计分析	28
2.3.4 复杂地貌桥址风环境相关性研究	31
本章参考文献	38
第 3 章 典型断面桥梁气动参数数据库及抗风性能评价	41
3.1 概述	41
3.2 桥梁气动参数数据库架构	41
3.2.1 主梁气动参数数据库	41
3.2.2 桥塔(墩)气动参数数据库	44

3.3 典型断面桥梁抗风性能数值评价	46
3.3.1 风速计算	47
3.3.2 风荷载计算	48
3.3.3 动力特性计算	49
3.3.4 抗风稳定性验算	49
3.4 马鞍山长江公路大桥抗风性能数值评价示例	52
3.4.1 工程简介	52
3.4.2 桥位边界层风特性	52
3.4.3 颤振稳定性评价	53
3.4.4 静风稳定性评价	54
本章参考文献	55
第4章 桥梁气动参数识别的数值风洞技术	56
4.1 概述	56
4.2 LB方法控制方程及LB并行计算模型	56
4.2.1 Lattice Boltzmann方程	56
4.2.2 D2Q9离散模型	59
4.2.3 LB方法的并行计算过程及并行算法设计	60
4.3 桥梁结构气动参数数值识别的LB方法	62
4.3.1 气动力计算方法	62
4.3.2 特殊边界格式	63
4.3.3 LB湍流松弛时间模型	67
4.3.4 LB动网格气弹模拟模型	71
4.3.5 桥梁结构气动参数的数值识别方法	75
4.4 桥梁结构数值风洞模拟软件研发	78
4.4.1 基于面向对象的LB并行计算软件研发	78
4.4.2 桥梁结构数值风洞模拟软件的计算流场	79
4.4.3 BridgeFluent软件界面及功能	79
4.5 典型钝体绕流数值风洞模拟	82
4.5.1 圆柱绕流数值模拟	82
4.5.2 方柱绕流数值模拟	84
4.6 桥梁结构数值风洞模拟	85
4.6.1 箱形截面梁数值风洞模拟	85
4.6.2 H形截面梁数值风洞模拟	94

4.6.3	分体双箱梁数值风洞模拟	99
4.6.4	桥塔结构数值风洞模拟	108
	本章参考文献	111
第5章	桥梁多模态耦合颤振分析的能量法	116
5.1	概述	116
5.2	桥梁多模态耦合颤振分析的运动方程	116
5.2.1	桥梁颤振基本方程	116
5.2.2	结构等效自激节点力列向量的计算	117
5.2.3	系统颤振状态空间方程	120
5.3	桥梁多模态耦合颤振分析的能量方法	121
5.3.1	状态向量精细时程积分	121
5.3.2	系统颤振稳定性的能量判别法	121
5.3.3	全桥三维多模态耦合颤振分析	123
5.3.4	颤振分析中几点策略	123
5.4	桥梁多模态耦合颤振分析的程序开发	124
5.4.1	桥梁三维多模态颤振分析中对非线性效应的考虑	124
5.4.2	主梁单元有效攻角的计算	124
5.4.3	多模态颤振分析的流程图	125
5.5	桥梁多模态耦合颤振分析实例	125
5.5.1	英国塞文桥	126
5.5.2	虎门大桥	129
5.5.3	伶仃洋跨海大桥方案	132
5.6	结论	139
	本章参考文献	139
第6章	桥梁多模态耦合抖振内力分析的虚拟激励法	141
6.1	概述	141
6.2	桥梁多模态耦合抖振运动方程	141
6.3	基于虚拟激励法的桥梁多模态耦合抖振内力分析方法	142
6.3.1	保留模态外高频模态拟静力效应的考虑	142
6.3.2	结构抖振内力响应分析的虚拟激励法	143
6.4	桥梁多模态耦合抖振内力分析的程序开发	145
6.4.1	桥梁抖振分析中对非线性效应的考虑	145
6.4.2	主梁单元有效攻角的计算	145

6.4.3	桥梁多模态耦合抖振内力分析的流程图	146
6.5	桥梁多模态耦合抖振内力分析实例	147
6.5.1	西堍门大桥桥塔抖振内力分析	147
6.5.2	青马大桥抖振内力分析	153
	本章参考文献	159
第7章	斜风下桥梁抖振时域分析方法	161
7.1	概述	161
7.2	基本假定	161
7.3	斜风下的坐标系及斜片条上的气动力	162
7.3.1	斜风下的坐标系定义	162
7.3.2	结构单元斜片条上的气动力定义	163
7.3.3	坐标系之间的转化矩阵	164
7.3.4	风速分量及方向	166
7.4	抖振响应时域分析方法	166
7.4.1	斜风作用下桥梁运动控制方程	167
7.4.2	斜风作用下抖振力	167
7.4.3	斜风作用下的自激力	171
7.4.4	基于 Newmark- β 法的抖振运动方程求解	175
7.4.5	斜风作用下桥梁抖振时域分析程序开发	176
7.5	香港青马大桥台风森姆期间实测数据	177
7.5.1	香港青马大桥及 WASHMS 系统简介	177
7.5.2	台风森姆数据获取及处理	178
7.5.3	台风森姆期间主梁加速度实测数据	179
7.6	香港青马大桥抖振响应分析及实测结果对比	180
7.6.1	桥梁模型	180
7.6.2	主梁斜片条的气动特性	180
7.6.3	等效湍流风速的模拟	182
7.6.4	主梁加速度响应时程对比	185
7.7	小结	188
	本章参考文献	188
第8章	桥梁抗风气动控制技术	190
8.1	概述	190
8.2	气动翼板控制桥梁颤振的能量机理	191

8.2.1	作用在主梁和气动翼板上的气弹自激力	191
8.2.2	气流由气动翼板输入系统的能量	193
8.2.3	算例	195
8.3	气动翼板沿桥跨布置的合理模式	197
8.3.1	安装气动翼板的主梁单元气动刚度与阻尼矩阵	197
8.3.2	安装气动翼板的桥梁颤振稳定性分析	198
8.3.3	算例	199
8.4	青州航道桥初步设计方案抗风性能研究	200
8.4.1	桥梁设计方案概况	200
8.4.2	结构动力特性分析	201
8.4.3	原始方案主梁节段模型颤振性能风洞试验结果	201
8.4.4	原始方案主梁节段模型涡振性能风洞试验结果	202
8.4.5	安装气动翼板的主梁节段模型风洞试验研究	203
8.4.6	气动翼板对阻尼的影响分析	204
8.5	坝陵河大桥抗风性能研究	206
8.5.1	桥梁设计方案概况	206
8.5.2	钢桁加劲梁抗风设计	207
8.5.3	结构动力特性分析	208
8.5.4	节段模型风洞试验	208
8.5.5	斜风作用下的节段模型风洞试验	210
8.5.6	全桥气弹模型风洞试验	213
8.5.7	极端气候环境下的大桥抗风安全性能	216
8.6	琼州海峡公路桥梁方案抗风性能研究	220
8.6.1	琼州海峡公路桥梁方案及抗风设计风参数	220
8.6.2	结构动力特性分析	221
8.6.3	主梁节段模型风洞试验研究	223
8.6.4	分体式钢箱梁的格栅结构涡振控制机理	227
8.7	主动气动控制翼板研究	228
8.7.1	作用在整个主梁单位长度上的气弹自激力	229
8.7.2	翼板主动扭转振动参数的选取	231
8.7.3	算例	234
	本章参考文献	236
	索引	239

第 1 章 绪 论

1.1 桥梁风工程研究的兴起

1940 年 11 月 7 日,美国华盛顿州建成才 4 个月的旧塔科马大桥(主跨 853m)在风速不到 20m/s 的八级大风作用下发生强烈的风致振动,桥面经历了 70min 振幅不断增大的反对称扭转振动,当桥面的 1/4 点达到 $\pm 35^\circ$ 的扭转角时,吊索开始被逐根拉断,最终导致桥面折断并坠落到峡谷中(图 1.1-1)。旧塔科马大桥的风毁事件震惊了当时的桥梁工程界,并促使了一门新兴的边缘分支学科——桥梁风工程学的形成和发展。

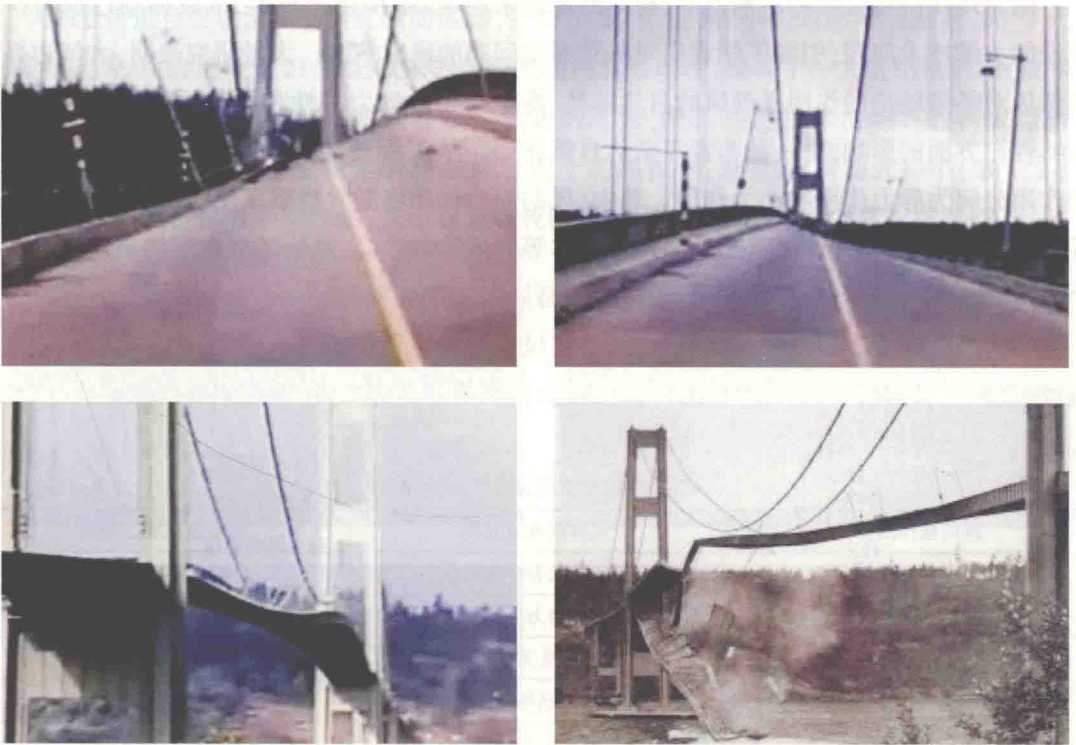


图 1.1-1 旧塔科马大桥的风毁

在旧塔科马大桥风毁之前的很长时间内,人们都把风对结构的作用看成是一种风压所形成的静力作用,在设计中仅考虑静风荷载的作用。然而,在为调查事故原因而收集有关桥梁风毁的历史资料中,人们发现从 1818 年起,至少已有 11 座悬索桥毁于强风,如表 1.1-1 所示。而且从目击者所描述的风毁现象中可以明显感觉到,事故的大部分原因是风引起的强烈振动,虽

然对于这种风致振动的机理在发生风毁现象当时还不能作出科学的解释。

遭风毁的桥梁

表 1.1-1

风毁年份	桥名	桥址(现所属国家)	主跨(m)	设计者
1818	Dyburgh Abbey	英国	79	John&William Smith
1821	Union	英国	137	Sir Samuel Brown
1834	Nassau	德国	75	Lossen&Wolf
1836	Brighton Chair Pier	英国	78	Sir Samuel Brown
1838	Montrose	英国	132	Sir Samuel Brown
1839	Menai Strait	英国	177	Thomas Telford
1852	Roche-Beruard	法国	195	Le Blanc
1854	Wheeling	美国	308	Charles Ellet
1864	Lewiston-Queenston	美国	317	Edward Serrell
1889	Nigara-Clifton	美国	384	Samuel Keefer
1940	Tacoma Narrows	美国	853	Leon Moisseiff

随着现代桥梁技术的不断发展,桥梁跨度越来越大、结构越来越柔,风致振动已成为桥梁建设的关键技术问题,引发了学者们对风致振动问题的研究热潮。大量研究表明,大气边界层自然风对桥梁结构的作用受到风的自然特性、桥梁结构的动力特性和风与桥梁结构的相互作用特性三方面的影响,是一种非常复杂的自然作用。从工程设计的角度一般可以将风对桥梁的作用分解为静力作用和动力作用。其中,风的静力作用将激发桥梁发生扭转发散、横向屈曲等静风稳定性问题,并将引起静风内力与位移等静风荷载效应;风动力作用将激发桥梁发生颤振失稳、驰振失稳等风振稳定性问题,激发桥梁产生涡激共振,并将引起结构产生抖振内力与位移等风振荷载效应。因此,大跨度桥梁抗风设计主要包括静风稳定性设计与验算、静风荷载效应设计与计算、风振稳定性设计与验算、涡振幅值和内力验算、风振荷载效应设计与计算,如表 1.1-2 所示。

风对桥梁的作用及抗风设计内容

表 1.1-2

风荷载作用分类	风荷载效应分类	桥梁抗风设计分类
静力作用	扭转发散和横向屈曲	静风稳定性验算
	静风内力与位移	静风荷载效应计算
动力作用	颤振、驰振	风振稳定性验算
	涡振	涡振幅值和内力验算
	抖振内力与位移	风振荷载效应计算

概括来说,以 20 世纪 60 年代桥梁颤振和抖振理论为奠基,经过国内外重大工程实践的不断完善和补充,这些基于准定常假设、线性和频域的分析方法以及通过节段模型风洞试验识别气动参数和全桥模型试验进行检验的方法可以基本满足一般大跨度桥梁的抗风设计要求。少数特大跨度的桥梁则需要考虑采用跟踪变形的非线性时域分析。但随着 21 世纪跨越海峡、外

海的超级工程的规划开展,以及计算机技术的迅猛提升,精细化的理论和方法、数值化技术和控制技术已成为抗风研究的新热点。

1.2 特大型桥梁的建设热潮

桥梁是跨越江河湖海、深沟峡谷等障碍的人工构筑物,是交通基础设施互联互通的关键节点和枢纽工程,是国民经济发展和社会活动安全的重要保障。20世纪以来,为适应区域经济的快速发展,世界各国都在致力于建立更加快速、便捷的陆路交通网络,相继建成了一批代表性的跨海特大型桥梁,如:北美洲的金门大桥、诺森伯兰海峡大桥、奥克兰海湾桥、切萨皮克跨海通道,欧洲的大贝尔特桥、厄勒海峡大桥、博斯普鲁斯海峡大桥,南美洲的尼特罗伊跨海大桥、马拉开波大桥,亚洲的本州—四国岛联络线系列跨海大桥、巴林—沙特阿拉伯跨海大桥、马来西亚槟城二桥、马尔代夫中马友谊大桥等。

改革开放以来的40年是中国桥梁建设发展的黄金时期,在学习引进国外先进技术的基础上,我国坚持走自主建设和创新发展的道路,经历了20世纪80年代的学习与追赶、90年代的跟踪与提高,当前正处于21世纪以来的创新与超越发展阶段,建设了一大批结构新颖、技术复杂、设计施工难度大、现代化水平和科技含量高的跨海、跨江和跨越深山峡谷的特大型桥梁(图1.2-1)。在世界已建或在建的桥长排名前十的斜拉桥、悬索桥、跨海大桥中(表1.2-1~表1.2-3),我国占据着半壁江山,这也标志着我国桥梁建设水平已跨入世界先进行列。



图 1.2-1 我国已建成的典型跨海、跨江和山区峡谷特大型桥梁