



“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）

Wind-Wave-Current Coupling Action of  
Super-large Bridge

# 特大型桥梁 风-浪-流耦合作用

刘 高 张喜刚 刘天成 陈上有 著



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



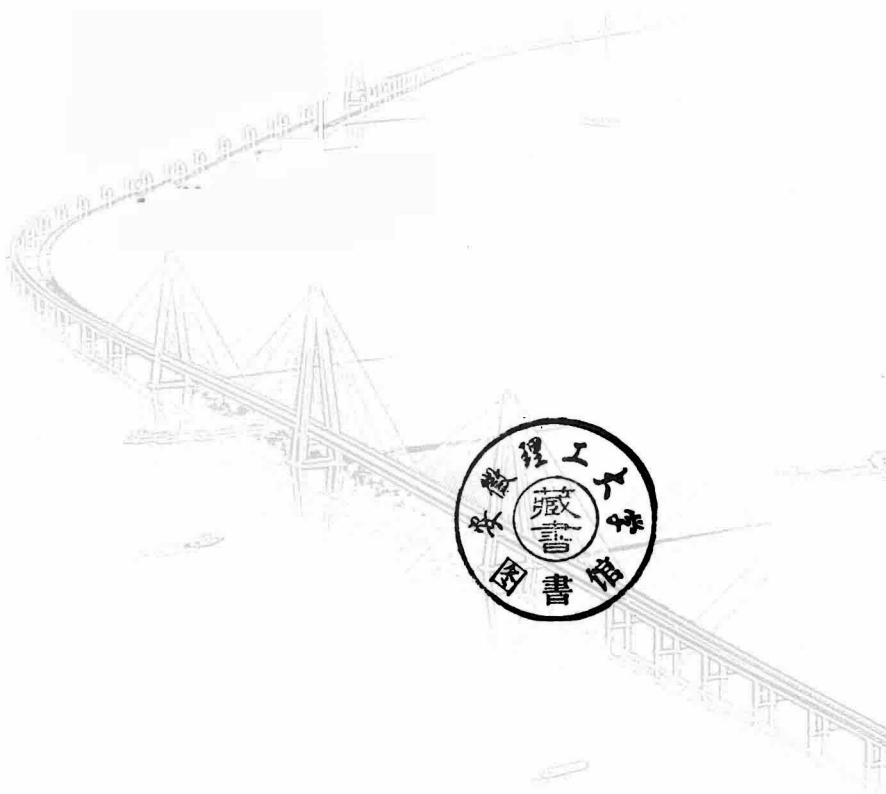
国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“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）

Wind - Wave - Current Coupling Action of  
Super-large Bridge

# 特大型桥梁 风-浪-流耦合作用

刘 高 张喜刚 刘天成 陈上有 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

特大型桥梁风-浪-流耦合作用 / 刘高等著. — 北京:  
人民交通出版社股份有限公司, 2018.9  
ISBN 978-7-114-14737-1

I. ①特… II. ①刘… III. ①跨海峡桥—风浪—耦合作用 IV. ①U448.19

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 092883 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: 特大型桥梁风-浪-流耦合作用

著 者: 刘 高 张喜刚 刘天成 陈上有

责任编辑: 周 宇 牛家鸣 王海南

责任校对: 刘 芹

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: 31.25

字 数: 660 千

版 次: 2018 年 12 月 第 1 版

印 次: 2018 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14737-1

定 价: 185.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

---

## 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!

A handwritten signature in black ink, consisting of four characters: '傅钟' (Fu Zhong). The style is cursive and expressive.

2016年6月24日

## 前 言

21 世纪以来,世界桥梁建设进入了跨海连岛工程的新时期。我国相继建成了东海大桥、杭州湾大桥、青岛海湾大桥等跨海大桥。目前,港珠澳大桥已建成通车,大连湾跨海大桥、六横跨海大桥、深中通道工程已开工建设,跨越琼州海峡、渤海海峡的巨型跨海通道工程正在规划研究。在国际上,世界各国也都在加快规划研究规模宏伟的跨越海湾、连接岛屿与大陆的跨海交通工程,如跨越直布罗陀海峡、挪威沿海诸岛、印度尼西亚巽他海峡等的跨海通道工程。

桥梁建设从内陆走向外海,面临着深水、强风、巨浪、急流等恶劣海洋环境的严峻挑战。在海洋环境中,强风、巨浪、海流之间具有强烈的耦合性,产生的动力荷载已成为跨海桥梁的主要控制性荷载。尤其是跨海特大型桥梁,随着跨径的增大,桥梁结构自身刚度越来越小,阻尼越来越低,强风、巨浪、海流激发的动力荷载效应十分显著,风-浪-流耦合将对桥梁结构产生巨大的动力破坏作用。

桥梁风-浪-流耦合作用是复杂的气-液-固耦合作用问题。目前,国内外还没有针对桥梁风-浪-流耦合作用的学术专著和设计标准。在传统桥梁设计中,没有考虑强风、巨浪、海流之间的耦合特性,没有考虑风-浪-流耦合作用与桥梁结构之间的动力耦合效应,通常只考虑风自身的静力和动力作用效应,波浪和海流则作为静力荷载进行单独考虑。因此,如何准确描述风-浪-流耦合场及其对桥梁结构的动力效应是跨海特大型桥梁设计必须研究解决的重大技术难题。

“十一五”期间,在对跨海特大型桥梁风-浪-流耦合作用的技术需求和发展情况进行调研分析的基础上,作者提出并负责完成了国家 863 计划课题“台风浪耦合作用下跨海峡桥梁动力模拟及防灾减灾技术(2007AA11Z101)”,在世界范围内首次开展了跨海桥梁台风-波浪耦合作用问题的探索性研究,形成了桥梁台风-波浪耦合作用的试验模拟技术、数值模拟技术和防灾减灾技术方面的一些初步研究成果。“十二五”期间,交通运输部将“特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术

(2011318494001)”列为交通运输“十二五”重大科技专项之首,作者负责该重大科技专项之项目二“特大型桥梁风-浪-流耦合作用研究(2011318494150)”。进入“十三五”时期,在科技部立项的国家重点研发计划“涉水重大基础设施安全保障技术研究与工程示范(2018YFC0809600)”中,作者负责课题四“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)”的研究工作,经过针对风-浪-流耦合作用关键科学问题的多年努力攻关,在深水海洋环境中风-浪-流耦合场现场观测技术及数值模拟技术、风-浪-流耦合场设计参数极值联合概率模型、风-浪-流耦合作用下桥梁三维弹性模型试验模拟技术、风-浪-流耦合作用下桥梁设计方法及数值模拟技术、风-浪-流耦合作用下桥梁振动控制技术、桥梁风-浪-流耦合作用设计指南等方面取得了创新性成果,为港珠澳大桥、深中通道工程提供了技术支撑,为琼州海峡跨海工程等外海跨海桥梁工程建设提供了重要技术储备。交通运输部组织的专家鉴定后认为:“项目形成了具有原创性的研究成果,达到了国际领先水平”。科学技术部和交通运输部对上述科技项目的资助,作者表示衷心的感谢!

本书共12章,系统总结了十余年来作者和研究团队在桥梁风-浪-流耦合作用研究领域的研究成果。第1章介绍桥梁风-浪-流耦合作用的研究背景和进展;第2章介绍国内外跨海特大型桥梁建设和规划,着重介绍了琼州海峡跨海通道工程的建设条件和主通航孔桥设计方案,作为后续章节研究的主要工程背景;第3章介绍跨海桥梁面临的风、波浪和海流等海洋环境因素的基础理论知识;第4章介绍风-浪-流耦合场现场观测及数据分析方法,并结合琼州海峡跨海通道工程区域的多年观测结果,分析了该海域风-浪-流耦合场的耦合特性;第5章介绍风-浪-流耦合场数值模拟方法,以及基于多维复合极值概率模型的桥梁风-浪-流耦合场设计参数取值方法;第6章介绍桥梁风-浪-流耦合作用弹性模型试验相似理论和试验模拟方法;第7章介绍索塔自立状态及千米级三塔斜拉桥全桥结构风-浪-流耦合作用弹性模型试验及动态响应特征;第8章介绍基于计算流体力学方法的桥梁风-浪-流耦合作用数值水槽模拟方法;第9章介绍基于虚拟激励法的桥梁风-浪耦合作用随机振动频域分析方法;第10章介绍桥梁风-浪-流耦合作用随机振动的时域分析方法;第11章介绍车-桥-风-浪-流耦合作用随机振动的时域分析方法;第12章介绍桥梁大型深水预制基础沉放过程数值模拟方法及控制措施。

在本书的撰写过程中,刘高教授级高级工程师负责全书的统稿、定稿和第1、

3、4、6、9 章的编写,张喜刚教授级高级工程师负责第 2 章的编写,刘天成教授级高级工程师负责第 7、8 章的编写,陈上有高级工程师负责第 5、10 章的编写,程潜高级工程师负责第 5 章部分内容和第 12 章的编写,王昆鹏高级工程师负责第 11 章的编写。参加本书内容相关研究的还有陈汉宝研究员、郭安薪教授、周道成副教授、刘海源副研究员、耿宝磊副研究员、吴宏波教授级高级工程师、柏晓东博士等,作者对他们为本书相关内容研究所作出的贡献表示感谢!韩冬冬博士、杨海洋博士、李冲博士、许会燕硕士、李凯强硕士参加了书稿的校对工作,在此表示感谢!

本指南的编写过程中,得到了我的导师项海帆院士、林家浩教授的鼓励和支持,得到了国际桥协原主席 K H Ostenfeld 先生、钟万勰院士、王景全院士、欧进萍院士、陈政清院士、周绪红院士、赖远明院士、李守善设计大师、孟凡超设计大师、交通运输部原总工程师周海涛教授级高工、侯金龙教授级高工、张劲泉研究员、苏权科研究员、张鸿教授级高工、宋神友教授级高工、周世忠教授级高工、徐国平教授级高工、陈艾荣教授、李惠教授、张亚辉教授、周志勇教授等的大力支持,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 11 月

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 桥梁风-浪-流耦合作用问题	1
1.1.1 国内外跨海桥梁建设概况	1
1.1.2 跨海桥梁面临的海洋气象水文环境挑战	3
1.1.3 跨海桥梁的风-浪-流耦合作用	10
1.2 桥梁风-浪-流耦合作用研究进展	13
1.2.1 风-浪-流耦合场现场观测技术研究	14
1.2.2 风-浪-流耦合场数值模拟技术及设计参数研究	16
1.2.3 桥梁风-浪-流耦合作用弹性模型试验技术研究	17
1.2.4 风-浪-流耦合作用下桥梁振动分析研究	19
1.2.5 车-桥-风-浪-流-耦合作用下桥梁振动分析研究	22
1.2.6 桥梁大型深水预制基础沉放过程数值模拟技术研究	24
1.3 桥梁风-浪-流耦合作用研究内容	24
本章参考文献	26
第2章 跨海特大型桥梁建设及规划	31
2.1 跨海特大型桥梁建设概况	31
2.1.1 国外跨海特大型桥梁建设	31
2.1.2 国内跨海特大型桥梁建设	35
2.2 跨海特大型桥梁建设规划	36
2.2.1 智利查考大桥	36
2.2.2 直布罗陀海峡跨海通道工程	37
2.2.3 巽他海峡跨海通道工程	38
2.2.4 琼州海峡跨海通道工程	39
2.2.5 渤海海峡跨海通道工程	40

2.2.6	台湾海峡跨海通道工程	41
2.3	琼州海峡跨海大桥主通航孔桥方案	44
2.3.1	主要建设条件	44
2.3.2	主通航孔公路桥梁研究方案	46
2.3.3	主通航孔公铁两用桥梁研究方案	53
	本章参考文献	57
<b>第3章</b>	<b>海洋环境</b>	<b>59</b>
3.1	风场	59
3.1.1	大气环流	59
3.1.2	近海地区主要风系	60
3.1.3	大气边界层	61
3.1.4	边界层风特性	62
3.2	波浪场	68
3.2.1	波浪分类	68
3.2.2	规则波浪理论	71
3.2.3	随机波浪理论	81
3.3	海流场	85
3.3.1	海流分类	85
3.3.2	海流特征值计算	85
3.4	风-浪-流耦合场	87
	本章参考文献	87
<b>第4章</b>	<b>风-浪-流耦合场现场观测方法与耦合特性分析</b>	<b>89</b>
4.1	风-浪-流耦合场现场观测方法	89
4.1.1	风-浪-流耦合场观测基本原则	89
4.1.2	风-浪-流耦合场观测系统	91
4.2	风-浪-流耦合场观测数据分析方法	101
4.2.1	风观测数据处理分析方法	101
4.2.2	波浪水流观测数据处理分析方法	104
4.3	琼州海峡海域风-浪-流耦合场观测及耦合特性	118
4.3.1	琼州海峡海域风-浪-流耦合场观测系统	118
4.3.2	风、波浪、海流特性分析	121
4.3.3	风-浪-流耦合场耦合特性分析	132
4.3.4	对现行规范的讨论	142

本章参考文献·····	144
<b>第5章 风-浪-流耦合场数值模拟方法及设计参数</b> ·····	<b>146</b>
5.1 风-浪-流耦合场模拟方法·····	146
5.1.1 概述·····	146
5.1.2 台风场模拟·····	148
5.1.3 波浪场模拟·····	154
5.1.4 风暴潮数值模拟·····	163
5.1.5 风-浪-流耦合场模型的建立·····	167
5.2 琼州海峡海域风-浪-流耦合场数值模拟·····	168
5.3 琼州海峡历史台风过程的数值后报模拟·····	181
5.3.1 工程海域历史台风过程的选取·····	181
5.3.2 工程海域主要台风路径及影响分析·····	182
5.4 风-浪-流耦合场特征参数极值的联合概率模型·····	187
5.4.1 多维联合概率理论模型·····	187
5.4.2 特征参数极值的联合概率分布·····	192
5.5 风-浪-流耦合场设计参数·····	202
本章参考文献·····	204
<b>第6章 桥梁风-浪-流耦合作用弹性模型试验方法</b> ·····	<b>207</b>
6.1 桥梁风-浪-流耦合作用弹性模型试验相似理论·····	207
6.1.1 桥梁风-浪-流耦合作用场的流动相似理论·····	207
6.1.2 桥梁风-浪-流耦合作用动力相似模拟理论·····	210
6.1.3 桥梁风-浪-流耦合作用弹性试验的相似参数·····	212
6.2 桥梁风-浪-流耦合作用弹性模型试验模拟系统·····	213
6.2.1 试验模拟系统构成·····	213
6.2.2 风场要素模拟·····	216
6.2.3 波浪场要素模拟·····	218
6.2.4 水流场模拟·····	220
6.2.5 工程场地模拟·····	221
6.3 桥梁风-浪-流耦合场试验模拟·····	221
6.3.1 风-浪耦合场特征要素模拟·····	221
6.3.2 浪-流耦合场特征要素模拟·····	226
6.3.3 风-浪-流耦合场特征要素模拟·····	230
6.4 桥梁弹性模型的物理模拟·····	232

6.4.1	弹性模型的类型	232
6.4.2	桥梁结构弹性模型物理模拟系统	233
6.4.3	模型缩尺比确定	236
6.4.4	弹性试验模型设计原则与过程	237
6.5	弹性模型试验动态测试	237
6.5.1	测试系统构成	238
6.5.2	试验测量仪器的标定	241
6.5.3	测试系统的布置与安装	242
6.5.4	测试实时同步采集系统	244
	本章参考文献	246
<b>第7章</b>	<b>桥梁风-浪-流耦合作用弹性模型试验及响应特性</b>	<b>248</b>
7.1	群桩基础索塔自立状态弹性模型试验	248
7.1.1	试验模型设计及制作	248
7.1.2	试验方案设计	251
7.1.3	风-浪-流耦合作用试验结果及分析	253
7.1.4	海啸作用试验模拟及分析	261
7.2	沉箱/沉井基础索塔自立状态弹性模型试验	267
7.2.1	试验模型设计及制作	267
7.2.2	试验方案设计	271
7.2.3	试验结果及分析	273
7.3	三塔斜拉桥全桥风-浪-流耦合作用弹性模型试验	279
7.3.1	试验模型设计及制作	279
7.3.2	试验方案设计	284
7.3.3	试验结果及分析	285
	本章参考文献	291
<b>第8章</b>	<b>桥梁风-浪-流耦合作用数值水槽模拟技术</b>	<b>293</b>
8.1	风-浪-流耦合数值水槽模型	293
8.1.1	风-浪-流耦合数值水槽架构	293
8.1.2	波浪自由表面的追踪方法	295
8.1.3	浪-流耦合场及区域数值造波模型	296
8.1.4	流场区域阻尼消波法	299
8.1.5	空间脉动风速场模拟	300
8.1.6	边界条件和初始条件	303

8.2	风-浪-流数值水槽模拟方法 .....	304
8.2.1	基于通用 CFD 平台的浪-流数值水槽模拟 .....	304
8.2.2	非定常不可压缩黏性流求解方法 .....	306
8.3	风-浪-流场数值水槽模拟 .....	308
8.3.1	风-浪-流耦合场计算模型及参数 .....	309
8.3.2	风-浪-流耦合场演化及波形分析 .....	310
8.3.3	风-浪-流耦合场中波面和波高的变化 .....	313
8.4	圆柱结构数值水槽模拟 .....	314
8.4.1	小尺度圆柱结构浪-流耦合作用数值模拟 .....	314
8.4.2	大尺度直立圆柱结构数值水槽模拟 .....	319
8.4.3	圆柱结构风-浪-流耦合作用模拟 .....	321
8.5	高桩承台基础浪-流作用模拟 .....	324
8.5.1	基础局部冲刷效应对基础浪-流作用影响模拟 .....	325
8.5.2	钻石形索塔大型高桩承台群桩基础浪-流作用模拟 .....	328
8.5.3	哑铃形高桩承台群桩基础浪-流耦合作用模拟 .....	333
8.6	沉箱/沉井基础浪-流作用模拟 .....	337
8.7	风暴潮对桥梁上部结构作用模拟 .....	342
8.7.1	岛-桥过渡区域波浪场的数值模拟 .....	342
8.7.2	岛-桥过渡区桥梁主梁波浪作用数值模拟 .....	348
	本章参考文献 .....	354
<b>第9章</b>	<b>风-浪耦合作用下桥梁随机振动频域分析方法 .....</b>	<b>356</b>
9.1	桥梁风-浪耦合作用运动方程 .....	356
9.2	桥梁结构有限元建模方法 .....	357
9.2.1	塔梁索建模方法 .....	358
9.2.2	几何非线性 .....	358
9.2.3	土-结构相互作用的模拟 .....	359
9.3	桥梁大型深水基础波浪荷载 .....	361
9.3.1	频域边界元方法 .....	362
9.3.2	桥梁大型深水基础波浪力计算方法 .....	369
9.3.3	桥梁大型深水基础波浪力谱 .....	370
9.4	桥梁风荷载 .....	371
9.4.1	桥梁脉动风抖振力 .....	371
9.4.2	主梁自激力 .....	372

9.5	基于虚拟激励法的桥梁风-浪耦合振动内力分析方法	373
9.6	琼州海峡大桥最大双悬臂状态分析	375
9.6.1	桥梁有限元模型	375
9.6.2	风-浪耦合场参数	376
9.6.3	边界单元组波浪力传递函数	376
9.6.4	桥梁结构气动参数	376
9.6.5	桥梁风-浪耦合作用随机振动分析结果	377
	本章参考文献	380
<b>第 10 章</b>	<b>风-浪-流耦合作用下桥梁振动时域分析方法</b>	<b>382</b>
10.1	桥梁风-浪-流耦合作用运动方程	382
10.2	桥梁基础结构浪-流荷载	383
10.2.1	频域-时域转换方法	383
10.2.2	直接时域边界元方法	387
10.2.3	高桩承台群桩基础结构浪-流荷载计算方法	392
10.2.4	沉箱和沉井基础结构单元浪-流荷载计算方法	393
10.3	考虑斜风效应的桥梁风荷载	397
10.3.1	桥梁风致振动形态	397
10.3.2	坐标系统	398
10.3.3	平均风荷载和抖振力	402
10.3.4	自激力	407
10.4	桥梁风-浪-流耦合作用运动方程求解	411
10.4.1	桥梁风-浪-流耦合作用运动方程	411
10.4.2	桥梁风-浪-流耦合作用运动方程求解方法	411
10.4.3	桥梁风-浪-流耦合振动分析程序	414
10.5	琼州海峡大桥风-浪-流耦合振动分析	416
10.5.1	全桥结构动力特性	416
10.5.2	基础结构水动力分析	417
10.5.3	成桥状态桥梁风-浪-流耦合振动响应	419
	本章参考文献	423
<b>第 11 章</b>	<b>车-桥-风浪流耦合系统振动分析方法</b>	<b>425</b>
11.1	车-桥-风浪流耦合系统运动方程	425
11.1.1	车辆-桥梁耦合作用	426
11.1.2	车辆-风浪流耦合作用	429

11.1.3 桥梁-风浪流耦合作用 .....	430
11.2 车-桥-风浪流耦合系统运动方程的求解算法 .....	432
11.3 琼州海峡公铁两用特大桥车-桥-风浪流耦合振动分析 .....	435
11.3.1 桥梁子系统参数 .....	435
11.3.2 桥梁基础水动力参数 .....	437
11.3.3 风浪流耦合场子系统 .....	438
11.3.4 车辆子系统参数 .....	438
11.3.5 车-桥-风浪流耦合振动分析结果 .....	439
本章参考文献 .....	446
<b>第 12 章 桥梁大型深水预制基础沉放过程数值模拟及控制 .....</b>	<b>448</b>
12.1 桥梁深水预制基础施工过程分析 .....	448
12.1.1 深水预制基础的施工流程 .....	448
12.1.2 深水预制基础沉放过程中的系泊定位 .....	449
12.2 浮体及系泊系统计算原理 .....	450
12.2.1 浮体在波浪中的运动计算理论 .....	450
12.2.2 系泊系统受力分析 .....	454
12.2.3 耦合计算原理 .....	455
12.3 预制基础系泊系统动力分析简化模型 .....	456
12.3.1 系泊系统简化模型简介 .....	456
12.3.2 系泊系统简化模型运动方程 .....	456
12.3.3 系泊系统动力特性分析 .....	458
12.3.4 系泊系统的波浪作用分析 .....	462
12.4 预制基础沉放过程数值模拟 .....	465
12.4.1 预制基础幅频运动特性研究 .....	465
12.4.2 预制基础定位沉放系泊控制分析 .....	467
12.5 预制基础沉放过程控制 .....	473
本章参考文献 .....	475
索引 .....	477

# 第 1 章 绪 论

21 世纪是跨海桥梁的世纪。与跨越江河峡谷的桥梁相比,跨海桥梁面临着深水、强风、巨浪、急流等恶劣海洋环境的严峻挑战。在海洋环境中,强风、巨浪、急流之间的耦合作用及其与桥梁结构之间的动力耦合作用同时发生(图 1.0-1),尤其是跨海特大型桥梁,随着跨径的增大,桥梁结构自身刚度越来越小,阻尼越来越低,风-浪-流耦合作用将在多个频点上激发结构产生显著的动力效应,甚至可能导致桥梁结构发生严重的动力破坏。因此,保障跨海特大型桥梁在风-浪-流耦合作用下的安全,已成为亟待研究解决的重大课题。对于跨海特大型公铁两用桥梁,车辆、桥梁、风-浪-流耦合场之间的耦合作用同时发生,并相互影响,如何保障桥梁结构自身以及车辆运行安全性和舒适性是桥梁设计中面临的新的技术挑战。

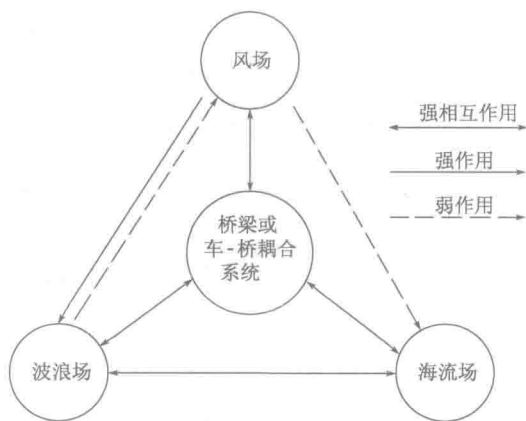


图 1.0-1 桥梁、风、浪、流耦合作用环

## 1.1 桥梁风-浪-流耦合作用问题

### 1.1.1 国内外跨海桥梁建设概况

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。作为交通网络的咽喉工程,一批跨越近海浅湾、连接岛屿的跨海特大型桥梁相继建成,如北美洲的金门大桥、奥克兰海湾大桥、切萨皮克湾跨海大桥、联邦大桥等;欧洲的大贝尔特海峡大桥、厄勒海峡大桥、里翁—安蒂里翁大桥,以及联结欧亚大陆的博斯普鲁斯大桥等;亚洲的日本本州—四国联络工程系列跨海大桥、巴林—沙特阿拉伯跨海大桥、马来西亚槟城二桥,以及我国的东海大桥、杭州湾大桥、胶州湾大桥、舟山大陆连岛工程、港珠澳大桥等。目前,在世界上已建或在建的跨海大桥中,我国建设的跨海大桥占据主导地位,如表 1.1-1 所示。我国已建部分跨海大桥见图 1.1-1。

世界上已建或在建的跨海大桥列表

表 1.1-1

序号	桥名	国家	总长(km)	建成时间(年)
1	港珠澳大桥	中国	49.968	2018
2	胶州湾大桥	中国	36.48	2011
3	杭州湾大桥	中国	36	2007
4	东海大桥	中国	32.5	2005
5	舟山大陆连岛工程	中国	25	2009
6	槟城二桥	马来西亚	22.5	2012
7	平潭公铁两用大桥	中国	16.34	在建
8	大贝尔特海峡大桥	丹麦	13.412	1997
9	联邦大桥	加拿大	12.9	1997
10	厄勒海峡大桥	丹麦/瑞典	7.845	2000



a)东海大桥



b)杭州湾大桥



c)胶州湾大桥



d)港珠澳大桥

图 1.1-1 我国部分已建跨海大桥