



“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）

Disaster Mitigation System and Equipment for  
Large Span Bridge

# 特大型桥梁 综合防灾减灾技术系统与装备

宋 晖 陈艾荣 李 惠 黄李骥 著



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

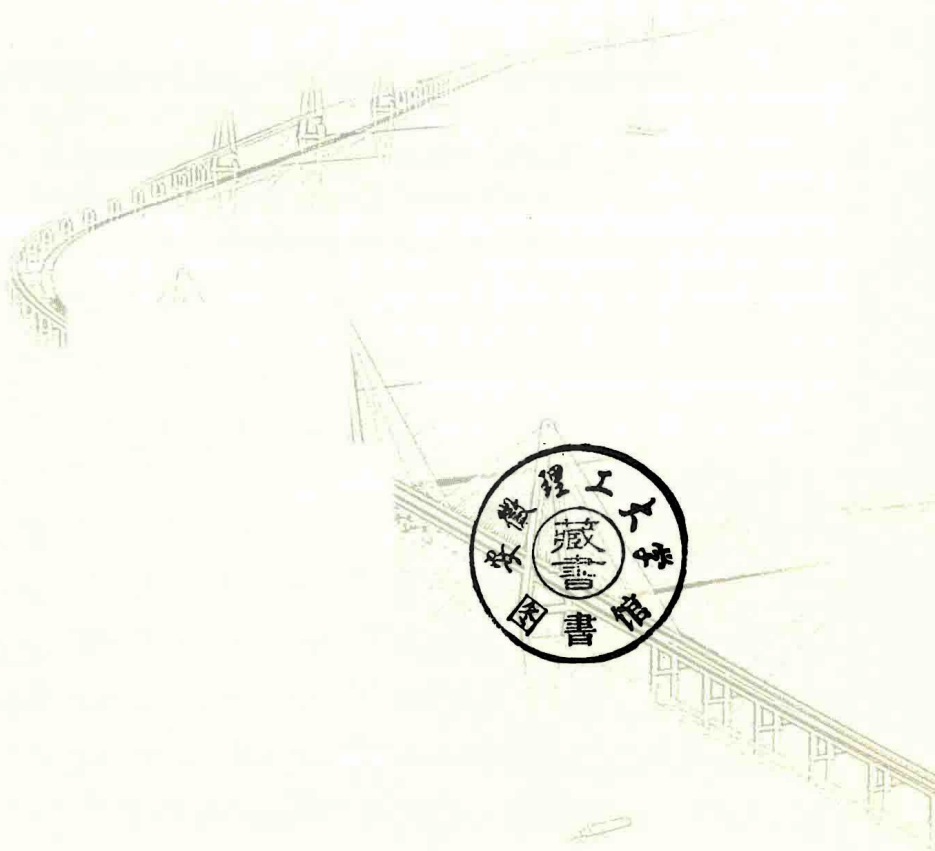


“十三五”国家重点图书出版规划项目  
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护  
特大型桥梁防灾减灾与安全控制技术丛书（一期）

Disaster Mitigation System and Equipment for  
Large Span Bridge

# 特大型桥梁 综合防灾减灾技术系统与装备

宋 晖 陈艾荣 李 惠 黄李骥 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

特大型桥梁综合防灾减灾技术系统与装备 / 宋晖等  
著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019. 2  
ISBN 978-7-114-14904-7

I. ①特… II. ①宋… III. ①特大桥—长跨桥—防灾—  
—工程设备 IV. ①U448.437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 027219 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: 特大型桥梁综合防灾减灾技术系统与装备

著 者: 宋 晖 陈艾荣 李 惠 黄李骥

责任编辑: 周 宇 潘艳霞 李 沛

责任校对: 刘 芹 赵媛媛

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: 19.25

字 数: 420千

版 次: 2019年3月 第1版

印 次: 2019年3月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14904-7

定 价: 120.00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

本书以特大型桥梁为对象,对风-雨振、地震等灾害作用下缆索及塔、梁、墩等构件的灾变效应和防灾减灾系统进行研究。揭示了特大型桥缆索风-雨振控制机理,以及塔、梁、墩等构件的控制机理;针对缆索研发了单根缆索一系列减振装备,包括多种磁流变阻尼装置及吊杆/拉索减振的 on-off 多模态控制算法、纳米材料阻尼装置、负刚性阻尼装置、斜拉索多重调谐质量阻尼系统(多 TMD),以及斜拉桥索网、悬索桥索网系统及辅助索体、辅助索连接接头;对塔、梁、墩等构件研发了一系列防灾减灾系统,包括主梁连续连接装置、主梁竖(侧)向支承装置、格构式组合断面、基于磁流变弹性体材料的变刚度调谐质量阻尼器、形状记忆合金塔(墩)梁连接装置。

本书可供桥梁工程领域和防灾减灾领域的研究机构、高等院校和设计咨询单位的技术人员、教师和学生使用。

### Abstract

In large span bridges, complex disaster response and mitigation system for cables, towers, piers, girders and key members upon wind-rain or earthquake are studied.

Mitigation and control mechanism is revealed for cables, towers, piers and girders. A series of equipment are developed for vibration mitigation of single cable, including magnetorheological fluid damper, multi-mode on-off algorithm, nano material damper, negative stiffness damper, multi-tuned mass damper, and cable network system for cable-stayed bridge and suspension bridge. A series of disaster mitigation systems are developed for towers, piers and girders, including continuous girder connection, vertical/lateral girder supports, lattice composite towers/piers, variable stiffness tuned mass damper and shape memory alloy connection.

This book provides reference for researchers, teachers and students from institutes, colleges and consulting companies in bridge engineering and disaster mitigation.

# 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!

杨治亮

2016年6月24日

# 前 言

本书依托琼州海峡大桥工程,针对风-雨振、地震等复杂建设条件和综合防灾减灾等重大工程技术问题,采用理论分析、数值模拟、模型试验等多种方法,系统地对特大型桥梁综合防灾减灾技术系统与装备进行了阐述,本书着重介绍了以下内容:

(1) 缆索阻尼技术系统与装备。主要阐述了气体补偿式磁流变液阻尼器、速度自感知和自集能两种被动智能磁流变液阻尼器,基于磁流变液阻尼器的悬索桥吊杆/斜拉桥拉索减振的多模态 on-off 控制算法,悬索桥吊索振动的被动智能磁流变液阻尼器自适应系统。

介绍了利用液体在纳米环境中流动的高耗能特性,研制了智能型一维和二维纳米流体阻尼器,为悬索桥吊杆和斜拉索索端附加阻尼器控制系统提供了一种耗能能力更强、频率适用范围更宽、体积更小的阻尼控制装置。

阐述了斜拉索上设置多 TMD 控制斜拉索多模态振动的参数优化设计方法;建立了多 TMD 控制斜拉索多模态振动的分析理论;阐述了一种被动吹气套环控制装置,阐述了实际工程应用的全孔套环的套环尺寸和安装间距的合理取值范围。

阐述了一种能够提供负刚度出力、耗能能力增强的负刚度阻尼控制装置,并建立了斜拉索-负刚度阻尼器控制系统的动力特性分析理论和参数设计方法。

(2) 索网技术系统与装备。阐述了特大型缆索承重桥梁索网与辅助索的设计方法与过程,解决了辅助索及其附属构件设计分析方法理论的难题。针对斜拉桥索网结构、悬索桥长吊杆索网结构的关键构造节点,阐述了具有耐疲劳抗冲击的辅助索体与连接接头,阐述了特大型缆索承重桥梁的索网结构局部构造设计的关键问题。

(3) 抗灾变关键装置技术系统与装备。阐述了实现多塔斜拉桥在跨中纵向伸缩释放主梁轴向力,并在跨中传递弯矩、剪力和扭矩的连续连接装置,解决千米级

多塔斜拉桥由于跨径过大而导致桥塔设计困难的问题。阐述了三向弹性减震支承装置,将水平位移转变为竖向压缩变形、水平摩擦摆动减震与竖向阻尼减震相结合的方式,解决了特大型桥梁横向静载力大、水平位移大的问题。

基于格构式组合断面的桥墩形式,发展了一种格构式组合塔墩阻尼系统,系统研究了阻尼器形式及其数量和安装位置对桥墩抗震性能的影响。研制了基于磁流变弹性体材料的变刚度调谐质量阻尼器,解决了桥塔施工期刚度和质量变化引起的调谐质量阻尼器频率调节问题。

阐述了一种具有高耗能减震性能的形状记忆合金塔(墩)梁连接装置,并介绍了形状记忆合金塔(墩)梁连接装置的参数设计方法以及相应的抗震分析方法。

(4)系统阐述了特大型桥梁缆索承重系统、塔梁墩等关键构件的各种不同类型防灾减灾技术系统与性能指标、适用范围与设计方法,为桥梁设计者提供了适用范围广、应用简洁明了的系统解决方案,推动了特大型桥梁防灾减灾技术的创新与进步。

本书的编写得到了交通运输部“十二五”重大科技专项资助。另外,中交公路规划设计院有限公司冯清海,哈尔滨工业大学刘敏、关新春,同济大学马如进,大连理工大学李芦钰,江苏法尔胜缆索有限公司薛花娟,西南交通大学周凌远,成都市新筑路桥机械股份有限公司刘海亮等参与了撰写,为本书的编著付出了艰辛的劳动,在此一并表示感谢。

虽倾其所能、尽心而为,但错误在所难免,恳请批评指正,谢谢。

宋峰

2018年12月

# 目 录

<b>1 概述</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 桥梁灾害与特大型桥梁防灾减灾系统 .....	2
1.3 国内外发展现状 .....	3
1.3.1 缆索结构灾变效应及控制机理 .....	3
1.3.2 防灾减灾技术系统及装备 .....	5
1.3.3 防灾减灾技术系统标准 .....	11
<b>2 特大型桥梁灾变效应及控制机理</b> .....	14
2.1 琼州海峡通道桥型方案介绍 .....	14
2.2 缆索结构灾变控制机理 .....	16
2.2.1 缆索结构振动及其控制措施 .....	16
2.2.2 缆索结构抖振效应分析方法 .....	22
2.2.3 有限元分析模型与动力特性 .....	26
2.2.4 悬索桥主缆及吊杆的抖振效应 .....	29
2.2.5 悬索桥平行吊索的尾流驰振 .....	32
2.2.6 斜拉-悬索协作桥缆索结构的抖振效应 .....	37
2.2.7 索网结构振动及控制机理 .....	41
2.3 塔梁墩构件灾变控制机理 .....	47
2.3.1 主梁连续连接装置灾变效应及控制机理 .....	47
2.3.2 桥塔施工期与运营期灾变效应及控制机理 .....	61
2.3.3 主梁竖(侧)向支承灾变效应及控制机理 .....	64
<b>3 缆索结构抗灾变关键装置技术系统</b> .....	67
3.1 磁流变液阻尼系统 .....	67

3.1.1	磁流变液阻尼器概述	67
3.1.2	气体补偿式系统	69
3.1.3	速度自感知式系统研究	78
3.1.4	自集能式系统研究	81
3.1.5	on-off 控制算法研究	83
3.1.6	磁流变液阻尼器设计与应用方法	90
3.2	纳米材料阻尼系统	93
3.2.1	基本原理	93
3.2.2	智能型一维纳米流体阻尼器	94
3.2.3	智能型二维纳米流体阻尼器	99
3.2.4	纳米流体阻尼器设计与应用方法	108
3.3	负刚度阻尼装置	109
3.3.1	基本原理	110
3.3.2	负刚度阻尼器装置研究	110
3.3.3	负刚度阻尼器系统的振动控制理论	114
3.3.4	负刚度阻尼器系统的振动控制数值研究	117
3.3.5	负刚度阻尼器系统的振动控制试验	121
3.3.6	设计与应用方法	126
3.4	斜拉索多重调谐质量阻尼系统(多 TMD)	127
3.4.1	基本原理	128
3.4.2	斜拉索上设置多 TMD 的动力特性的理论分析	128
3.4.3	斜拉索上设置多 TMD 的参数优化	129
3.4.4	多 TMD 控制斜拉索多模态振动的试验研究	133
3.4.5	设计与应用方法	147
3.5	斜拉索绕流场套环装置	147
3.5.1	基本原理	148
3.5.2	斜拉索绕流场套环装置研究	148
3.5.3	吸气效率参数影响试验研究	151
3.5.4	设计与应用方法	153
3.6	索网结构系统	160
3.6.1	基本原理	160
3.6.2	索网体系及设计方法	162

3.6.3	辅助索索体与连接接头 .....	167
3.6.4	索网计算算例 .....	171
<b>4</b>	<b>塔梁墩构件灾致变位控制技术研究 .....</b>	<b>187</b>
4.1	格构式组合塔墩阻尼系统 .....	187
4.1.1	背景 .....	187
4.1.2	基本原理 .....	188
4.1.3	超大跨度悬索桥梁体系抗震分析 .....	188
4.1.4	格构式组合塔墩悬索桥抗震性能分析 .....	195
4.1.5	格构式组合塔墩的振动台试验 .....	204
4.1.6	格构式组合塔墩悬索桥设计要点与建议 .....	209
4.2	桥塔调谐质量阻尼器控制技术 .....	210
4.2.1	基本原理 .....	211
4.2.2	流变弹性材料 .....	215
4.2.3	调谐质量阻尼器 .....	219
4.2.4	设计与应用方法 .....	233
4.3	主梁连续连接装置 .....	238
4.3.1	研究背景 .....	238
4.3.2	基本原理 .....	239
4.3.3	主梁连续连接装置构造设计 .....	239
4.3.4	连接装置数值模拟分析 .....	241
4.3.5	设计与应用方法 .....	247
4.3.6	适用范围 .....	254
4.4	形状记忆合金塔(墩)梁连接技术 .....	255
4.4.1	塔梁连接与形状记忆合金概述 .....	255
4.4.2	基本原理 .....	256
4.4.3	形状记忆合金装置对桥梁抗震性能的影响分析 .....	256
4.4.4	形状记忆合金塔梁连接振动台试验 .....	258
4.4.5	设计与应用方法 .....	267
4.5	主梁竖(侧)向支承技术 .....	268
4.5.1	基本原理 .....	268
4.5.2	主梁竖(侧)向支承结构方案与材料 .....	268
4.5.3	主梁竖(侧)向支承设计与应用方法 .....	269

4.5.4	主梁竖(侧)向支承有限元模型仿真 .....	276
<b>5</b>	<b>桥梁防灾减灾技术系统及装备技术指南研究 .....</b>	<b>281</b>
5.1	防灾减灾技术系统及装备指南 .....	281
5.1.1	目的、意义和准则 .....	281
5.1.2	总体方案与主要内容 .....	281
5.2	桥梁结构监测系统设计技术条件 .....	282
5.2.1	目的、意义和准则 .....	282
5.2.2	总体方案与主要内容 .....	283
	参考文献 .....	285
	索引 .....	292
	后记 .....	293

# 1 概 述

## 1.1 引言

改革开放四十年来,我国桥梁事业蓬勃发展,建成了一批跨越江河湖海的特大型桥梁,取得了举世瞩目的辉煌成就。西堠门大桥主跨 1 650m,是舟山大陆连岛工程的控制性工程,也是世界上最大跨度的钢箱梁悬索桥;苏通大桥主跨 1 088m,是世界上首座跨径超过千米的斜拉桥;杭州湾大桥总长 36km,横跨强潮影响的杭州湾口,是当时世界上最长的跨海大桥;嘉绍大桥是主跨 428m 的五跨六塔斜拉桥,是世界上最长、最宽的多塔斜拉桥;刚刚通车的港珠澳大桥,全长 55km,是世界上最大的桥-岛-隧集群工程。这些桥梁,不论是斜拉桥、悬索桥还是跨海长桥,都创出了中国桥梁的靓丽名片。

“十三五”期间,建成或正在建设的有泉州湾大桥、虎门二桥、深中通道等多座特大型桥梁;“十四五”期间,计划建设琼州海峡大桥、六横岛跨海大桥等多座跨海、跨江和山区的桥梁工程。同时,随着“一带一路”倡议实施和国际区域经济融合发展,世界各国都在加快规划研究更加宏伟的跨国和跨洲大通道,如巴拿马运河大桥、波斯普鲁斯海峡跨海工程、直布罗陀海峡跨海工程、费马恩海峡跨海工程、巽他海峡跨海工程等。特大型桥梁也将迎来更大发展空间。

当桥梁建设从内陆走向外海,从平原走向山岭,不仅面临着更复杂、更恶劣的建设条件,也面临着更艰巨的挑战,比如强震、强风、深水、巨浪、船撞、软基等。我国是世界上发生自然灾害最严重的国家之一,灾害种类多、频次高、分布广,美国、日本也是灾害多发国家,比如中国的汶川地震,美国的洛杉矶大地震、卡特里娜飓风,日本的阪神地震,这些灾害给人们带来了巨大的伤害和严重的财产损失。鉴与此,桥梁工程防震减灾形势严峻,使得学术界和工程界对防震减灾学科进行了深入思考。

桥梁作为交通生命线工程中的重要组成部分,在防震减灾体系中承担着维系国民经济正常运转、保障灾害发生情况下基本通行的重要职责,特大型桥梁更是在整个交通网中具有举足轻重的重要地位;我们需要研究桥梁自身在灾害中的损伤、破坏、甚至倒塌的灾变响应,甚至还需要关注次生灾害所造成的更大范围影响。特大型桥梁的防震减灾,重点在于两方面,一方面是“防”,即做好防护和预防工作,降低灾害向桥梁传递的能量;另一方面是“减”,即减少和减轻桥梁在灾害情况下所受的损失。这两方面都是用代价最小并且成效显著的措施来提升防震减

灾能力,增强运行的可靠性和耐久性,迅速恢复灾后交通承运能力。

如规划建设的琼州海峡大桥,水深超过 50m,100 年设计风速 51m/s,地质、水文及气象等建设条件极其复杂,为满足 30 万吨级油轮和 15 万吨级集装箱船通航要求,主通航孔可能会优先考虑修建 1000m 级三塔斜拉桥、3000m 级双塔悬索桥或协作桥。随着跨径的增大,桥梁构件更高、更长、更柔,结构特性表现出自身刚度越来越小、阻尼越来越低的趋势,对地震、强风等动力作用更加敏感。这几种桥型方案技术要求超出国内外现有的桥梁技术水平,为了应对这些挑战,特大型桥梁防灾减灾技术已经从依赖结构自身能力抵御确定性单一动力灾变,向着利用防灾减灾技术系统与装备来高效控制多种动力灾变下结构响应的方向发展,迫切需要研究解决复杂条件下特大型桥梁的灾变效应和控制机理,研发防灾减灾系统与装备,从而解决防灾减灾技术问题,保障特大型桥梁结构与运营安全。针对我国灾害频发,交通基础设施、防灾减灾技术相对薄弱的状况,以及面对未来重大工程需求,交通运输部设立了“十二五”交通运输建设重大科技专项,专门进行特大型桥梁防灾减灾技术系统与装备的研究。

## 1.2 桥梁灾害与特大型桥梁防灾减灾系统

桥梁灾害是特定时段发生的,作用于桥梁结构和相关设施的,可能超出桥梁承受能力的非常遇事件的总称。

桥梁的主要灾害包括自然灾害和人为灾害。自然灾害包括强风、暴雨等气象灾害;地震灾害、山体崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害;洪水、风暴潮、海啸等水灾害等,人为灾害有船撞、环境污染、火灾、爆炸、交通事故和恐怖袭击及战争等。

在桥梁结构设计阶段,主要考虑的危害为强风(风雨)和地震。

风对桥梁的作用是一个十分复杂的现象,它受到风的特性、结构的动力特性和风与结构的相互作用三方面的制约。风致破坏的典型桥梁是美国华盛顿州的塔科马 Tacoma 悬索桥。在为调查这一事故而收集的桥梁风毁资料中,人们还发现,自 1818 年起至少有 11 座悬索桥遭到风毁。对于特大型桥梁,涡振和颤振是可能导致灾害的重要风致振动;对于缆索承重桥梁,斜拉索和吊索(也称“吊杆”)等构件柔度大,对风致振动也非常敏感。

我国是地震频发的国家,地震时地面运动引起桥梁结构的振动,使结构内力和变形大幅度增加,从而导致结构破坏甚至倒塌。2008 年的汶川地震、2013 年的雅安地震、2014 年的昭通地震都给桥梁道路等基础设施带来了巨大损失。桥梁的震害主要是上部结构、下部结构及其支承连接构件破坏。上部结构自身在地震中较少破坏,而在地震中的移位往往导致碰撞、甚至落梁,下部结构的震害轻微时为混凝土剥落,严重时发生截面的弯曲破坏甚至剪切破坏。桥梁支座、伸缩缝、剪力键、支承连接件等,被认为是桥梁结构体系中抗震性能比较薄弱的环节,可能发生支座移位、锚固螺栓拔出、剪断,以及连接件破坏等。

针对风-雨和地震等灾害,本书对特大型桥梁中的关键构件——缆索构件和塔梁墩及其连接装置的灾变效应与控制机理、防灾减灾系统和装备进行了系统阐述,提出了缆索阻尼系统和多种阻尼器、索网系统和塔梁墩关键装置,为特大型桥梁防灾减灾提供了系统解决方案。

## 1.3 国内外发展现状

### 1.3.1 缆索结构灾变效应及控制机理

对特大型桥梁缆索结构而言,灾变效应主要来自外界的环境作用,包括车辆荷载、风、风雨共同作用及地震、火灾、甚至爆炸等各种荷载效应。然而,从缆索结构自身而言,灾变效应主要来自风、风雨激励以及车辆荷载效应。

大跨度悬索桥的吊杆为长细比大、强度高的钢丝绳索,具有质量轻、阻尼小的特征,在外界环境激励下极易产生多种形式(包括涡激共振、参数振动、抖振、斜吊杆索的风-雨振、冰振以及驰振)的风致振动。大跨度悬索桥的吊杆索大多为一组并列或两组并列布置,这就给尾流驰振创造了条件,并且平行索的尾流驰振是所有吊杆风致振动响应最为剧烈的一种,振幅可达索直径的十多倍,常常造成吊杆索之间碰打,导致吊杆索防护层失效和钢丝绳的损伤断丝,诱发吊杆索的过早疲劳破坏,并且造成行人恐慌,危及交通安全。尾流驰振可能发生在两索相距很近的情况,也可能发生在两索相距很远的情况,根据近年来的研究可分为近距失稳区、稳定区及远距失稳区。大量调查报告显示,几乎所有的并列索都会发生尾流驰振。当风速在 30m/s 左右时,由于雷诺数超过了临界范围的值,尾流驰振有可能不发生。

目前,吊杆振动控制措施主要有三类:机械控制措施、结构控制措施和空气动力学控制措施。机械控制措施是一种通过在吊杆(拉索)上附加阻尼器来提高构件系统阻尼,从而达到降低风致振动目的的减振方法。对于平行吊杆(拉索),工程上常采用在吊杆(拉索)与桥面之间加阻尼器的方法来增加吊杆阻尼,日本 Kurushima-Kaikyo 桥的吊杆就采用了这种振动控制措施。结构控制措施到目前为止分为两种:一种是早期国外悬索桥采用的水平稳定索,另一种是采用输电线工程中的间隔器,目前大多沿用此方案。利用空气动力学措施进行减振,如 Akashi-Kaikyo 桥吊杆采用的就是螺旋线措施来改变上下游拉索的气动外形,从而有效地抑制平行吊索的相互干扰效应所引起的风致振动。

在理论研究方面,国内外学者对于影响双圆柱尾流驰振的因素研究基本集中在索间距、风偏角和固有频率。另外,也有对雷诺数、结构阻尼、折减风速、约束条件等的研究,并通过试验、数值分析两种手段得到了一些相同的结论:①上游模型的干扰会导致下游模型发生面外振动为主的尾流驰振;②当来流风偏角较小和较大时,拉索是稳定的,在风偏角的中间区域是不稳定的,会产生尾流驰振;③随间距减小,尾流驰振临界风速相应降低;④固有频率变大可相应提

高发生尾流驰振的临界风速;⑤当上游圆柱可自由振动时,下游圆柱的振动反应出现滞后的现象,且随  $W/D$  的增加而增加;⑥结构阻尼的增加会提高临界驰振风速,但对驰振产生的条件(如索间距的范围、不利风偏角等)还未得到定论。

虽然国内外研究学者对尾流驰振现象的研究已经做了不少的工作,但仍然存在许多的问题,如对于尾流驰振的研究,以往的学者往往以试验方法居多,得到的结果离散性比较大,采用数值分析手段的少之又少;少数研究采用了数值方法分析尾流驰振,但大多工作集中在通过下游吊杆的运动方程解的稳定性来简单地判断尾流驰振是否发生,对于具体振动现象的研究很少,且得不到振动的轨迹。

拉索是超长跨径斜拉桥的关键构件,长细比大、阻尼小质量轻,在风雨、交通活载作用下容易发生振动,由于其基频很低,模态密集,因此在较低的风速下就可引起拉索的复杂振动。自从 1974 年在德国汉堡某桥上观察并记录拉索振幅达 1m 的振动开始,学者们关于拉索的振动研究陆续展开。国内方面,关于斜拉桥斜拉索振动记录也有很多,比如杨浦大桥在 1995 年发现发生了数次斜拉索大幅振动;洞庭湖大桥上拉索的风雨激振的振幅也有 0.4m 等。

持续的拉索振动对于拉索的使用十分不利,其根部会由于反复的弯曲应力而导致疲劳破坏,同时,拉索的振动还会引起刚性护筒及其锚具的破坏,严重时造成拉索失效,且拉索的反复振动也会使人对桥梁的安全和可靠性产生怀疑,从而导致心理上的不安。所以对斜拉桥拉索振动抑制的研究是目前特大型斜拉桥的研究重点。

拉索振动的控制主要包括空气动力学措施和机械措施。前者主要通过改变拉索的断面形状,使其空气动力学性能得到改善,目前这一措施的具体方案主要通过风洞试验来提出;后者通过在拉索上附加阻尼器或辅助索等机械结构装置,增加拉索的阻尼或形成有干扰效应的索网结构,达到减小振动的目的。

Gimsing 曾在书中提到用辅助索减小斜拉索垂度效应,用来保证斜拉索中统一的轴向刚度。纽约 Brooklyn 桥的缆索承重系统,即采用斜拉索加筋来提高结构刚度的 Roenling 体系,也可以被视作一种由辅助索和主索共同构成的“索网结构”。近几年来,辅助索在拉索振动方面有一定应用,例如丹麦的 Farø 桥、日本本州-四周联络工程的 Yobuko 桥、法国的 Normandie 桥、英国的 Second Severn 桥、瑞典的 Oresund 桥、挪威的 Helgeland 桥、美国的 Fred Hartman 桥、Charles River 桥和 Dames Point 桥都采用了将辅助索作为抑振的措施,而且采取辅助索的措施之后,拉索的振动得到了较好的抑制,这也在很大程度上推动了辅助索的研究和发展。

在理论研究方面,美国的 Ehean 和 Scanlan 首先运用有限元的方法分析了三维索网结构减振效果,从能量重分布的角度探讨了辅助索的减振机理。Virlogeux 描述了观察到的法国诺曼底大桥上某一根辅助索断裂的现象。分析指出,辅助索的减振效果和其刚度、初拉力以及内阻尼有关,设计合理时辅助索减振的效果十分明显。试验方面,日本的 Yamaguchi 等基于能量-阻尼理论对辅助索减振机理进行了分析,并开展了一系列关于简单索网结构的试验,索网