



大跨悬索桥施工抗风

李胜利 著



科学出版社

大跨悬索桥施工抗风

李胜利 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地阐述了大跨悬索桥施工抗风的理论、方法和应用。第一章和第二章重点介绍大跨悬索桥桥塔施工期的驰振和抖振性能分析方法；第三章和第四章主要论述大跨悬索桥施工猫道的动力特性和静风稳定性分析方法；第五章和第六章重点阐述大跨悬索桥主缆施工期驰振性能及控制方法；第七章主要介绍大跨悬索桥施工期吊梁的颤振可靠性分析。

本书可供从事悬索桥研究、设计、施工与管理的广大科技人员参考，亦可作为高等学校土木工程、交通工程、道路桥梁与渡河工程等专业的研究生和高年级本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大跨悬索桥施工抗风/李胜利著. —北京: 科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-046760-7

I. ①大… II. ①李… III. ①长跨桥—悬索桥—抗风结构—桥梁施工—研究 IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 308600 号

责任编辑: 童安齐 / 责任校对: 王万红

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 9 1/4

字数: 170 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换(京华虎彩))

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62130750

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

大跨悬索桥是道路工程跨越大江、大海和大峡谷的重要基础设施，是重要的地标或标志性建筑，常常反映一个地区或一个国家的桥梁技术水平和经济发达状况。自 1931 年美国建成最大跨径为 1067m 的千米级大跨悬索桥——乔治·华盛顿桥以来，随着各国经济和桥梁建造技术的不断发展，世界上已建造近 30 座千米级大跨悬索桥。近来，我国已建成包括世界第二大跨悬索桥——西堠门大桥在内的千米级大跨悬索桥十余座。随着我国经济社会的发展，大跨悬索桥不断涌现。

大跨悬索桥施工期暂态结构刚度较低、工期较长、风环境复杂，成桥时不会发生的风效应存在发生的可能性。具有费时、费力、费财特点的风洞试验，主要针对影响施工安全的关键工况进行研究，对于影响小、工期短的工况不太适合，然而这些工况的施工在一定程度上是以牺牲时间或工作人员的安全性和舒适性为代价的。当前，随着大跨悬索桥跨度不断增大，对施工要求愈来愈高，施工时间更加宝贵，施工人员的安全性和舒适性也越来越受到重视。同时，随着具有省时、省力、省财特点的数值技术日新月异，用理论知识和计算机来解决大跨悬索桥施工抗风各种问题成为可能。因此，进行大跨悬索桥施工期暂态结构的抗风性能更加细致入微的理论分析和数值模拟研究具有一定的理论与实际意义。

本书包括绪论和第一～第七章，较系统地阐述了大跨悬索桥施工抗风的理论、方法和应用。绪论较全面地综述了本书相关研究与应用的进展和发展趋势；第一章是大跨悬索桥施工期桥塔驰振性能分析，介绍了一种变截面高耸结构驰振分析的实用数值方法，利用该方法系统分析了大跨悬索桥桥塔施工期典型工况的驰振性能并研究了气动干扰效应对双塔柱驰振性能的影响；第二章是大跨悬索桥桥塔施工期风致抖振性能及舒适性评定，介绍了某大跨悬索桥混凝土桥塔施工期各工况的抖振响应以及组合框架结构形式的混凝土桥塔施工期的舒适性。第三章是大跨悬索桥无抗风缆猫道动力特性分析，介绍了预应力索结构模态分析方法，对大跨悬索桥无抗风缆猫道动力特性进行了研究，理论推导了无抗风缆猫道 1 阶竖向、侧向和扭转振动频率公式，数值分析了各参数对猫道振动特性的影响。第四章是大跨悬索桥无抗风缆猫道非线性静风稳定性分析，介绍了东海某大跨悬索桥无抗风缆猫道的有限元建模方法，综合考虑由有效风攻角和有效风速构成的静风荷载非线性和猫道几何非线性的双重影响，采用增量双重迭代搜索法，研究了猫道静风失稳的全过程以及各参数对猫道静风稳定性的影响。第五章是大跨悬索桥施工期暂态主缆驰振分析，介绍了施工期暂态主缆未采取抗风措施时两种常见的施工方案各工况截面的驰振力系数，比较了两种施工方案的优劣，然后针对较优的施

工方案, 计算了其驰振临界风速。第六章是大跨悬索桥施工期暂态主缆驰振控制, 介绍了东海某大跨悬索桥施工期暂态主缆的辅助索制振措施、具体方案以及各组成部分对辅助索制振效果的影响, 最后研究了辅助索控制暂态主缆驰振的具体方案。第七章是大跨悬索桥施工期吊梁颤振可靠性分析, 介绍了采用风洞试验和可靠性计算相结合的研究方法, 结合东海某大跨悬索桥, 编制了可靠度计算程序, 对大跨悬索桥施工期吊梁颤振可靠性及影响参数进行了研究。

感谢浙江舟山大陆连岛工程指挥部总工程师、中交公路规划设计院高级工程师许宏亮提供了大量西堠门大桥的资料, 以及四川路桥总工程师卢伟博士提供的猫道抗风试验等资料; 大桥局桥梁科学研究院陈开利董事长、武汉桥梁建筑工程监理公司邹焕祖总监和朱治宝总监, 他们为作者提供西堠门大桥的现场实践机会, 使作者掌握了大量第一手资料。感谢武汉桥梁建筑工程监理公司西堠门监理处的余屏孙工程师、彭伟工程师、李海龙工程师、丁超工程师等, 他们给作者提供了许多施工过程中的图片和资料, 并带作者深入现场实地观察, 熟悉桥塔、猫道、主缆、锚碇和加劲梁等构件, 对作者提出的问题, 他们均给予耐心讲解。另外, 还要感谢指挥部副总工程师陈德荣女士, 她为作者提供了她自己的一些很有见地的资料。在本书撰写过程中, 作者请教并有幸得到了西南交通大学的廖海黎教授、清华大学的刘晶波教授、郑州大学水利与环境学院的魏建东教授、宁波工程学院建筑工程学院的黄林博士的指导, 在此一并致谢。

本书的研究内容得到了国家自然科学基金青年基金(项目编号: 51208471)、高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号: 20114101120008)、中国博士后科学基金资助项目(项目编号: 2011M501190)、河南省科技攻关计划项目(项目编号: 142102210486)、河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(项目编号: 12A560010)、郑州大学优秀青年教师发展基金(项目编号: 1421322059)的大力资助, 作者表示衷心的感谢!

本书作者及其课题组近 10 年来在桥梁抗风方面的研究一直得到作者的博士生导师、中国工程院欧进萍院士的指导, 在此特表由衷的感谢! 感谢作者的硕士生导师王东炜教授、博士后合作导师陈淮教授对作者的有关桥梁抗风研究工作的指导, 以及郑州大学土木工程学院郭院成院长对本书出版的大力支持! 作者的研究生徐婷婷、毋光明、郑舜云、武昊等帮助整理、修改和编辑本书, 在此对他们为本书相关内容所做出的贡献表示感谢!

李胜利

于郑州大学

2015 年 11 月

主要符号

A	塔柱迎风面的面积
A_1	广义驰振力系数
B	气动系数计算的特征尺寸
C_D	阻力系数
C_L	升力系数
C_M	扭矩系数
D	体轴坐标系下断面的阻力
f	结构振动频率
F_b	抖振力
F_{st}	静风荷载
H_d	猫道承重绳的恒载水平张力
H_v	猫道承重绳张力在水平方向因振动而引起的增量
I	截面惯性矩
K	狄克曼指标
L	体轴坐标系下断面的升力
M	体轴坐标系下断面的扭矩
m	猫道单位跨径长度的质量
$M, [M]$	质量, 质量系数矩阵
Re	雷诺数
$S(\omega)$	功率谱
U	无穷远处来流风速
u	脉动风速
Y_1	第一阶广义坐标
β	风攻角
ε	应变
$\phi_1(z)$	第一阶振型函数
φ	地表粗糙度系数
ρ	空气密度
σ	应力
ω_1	模态圆频率
ξ_1	模态阻尼比
ξ_{eq}	暂态主缆等效阻尼比

目 录

前言

主要符号

绪论	1
0.1 大跨悬索桥发展概况	1
0.2 大跨悬索桥施工抗风研究现状	6
0.2.1 悬索桥抗风研究方法	6
0.2.2 桥塔施工期抗风研究	7
0.2.3 猫道抗风研究	13
0.2.4 主缆施工期抗风研究	18
0.2.5 加劲梁施工期抗风研究	19
第一章 大跨悬索桥施工期桥塔驰振性能分析	22
1.1 引言	22
1.2 桥塔施工期变截面塔柱的驰振分析方法	22
1.2.1 基本假定	22
1.2.2 驰振响应计算公式	22
1.2.3 驰振临界风速的判定	25
1.2.4 本节方法的验证	25
1.3 桥塔塔柱静风系数识别的数值方法	26
1.4 变截面双塔柱桥塔施工期驰振性能分析	27
1.4.1 工程实例	27
1.4.2 数值建模	29
1.4.3 考虑气动干扰效应的塔柱驰振性能分析	30
1.5 桥塔施工期驰振临界风速的计算	38
1.5.1 桥塔施工期暂态结构动力特性	38
1.5.2 桥塔施工期暂态结构驰振判定	39
1.6 本章小结	40
第二章 大跨悬索桥桥塔施工期风致抖振分析及舒适性评定	41
2.1 引言	41

2.2	桥塔时域抖振分析	42
2.2.1	桥塔有限元模型及其施工期动力特性分析	42
2.2.2	脉动风速场模拟	44
2.2.3	风荷载计算	47
2.3	桥塔施工期抖振响应	48
2.4	桥塔施工舒适性评定	49
2.5	本章小结	51
第三章	大跨悬索桥无抗风缆猫道动力特性分析	53
3.1	引言	53
3.2	理论建模	53
3.2.1	无抗风缆猫道的竖向固有振动	53
3.2.2	无抗风缆猫道的侧向固有振动	54
3.2.3	无抗风缆猫道的扭转固有振动	55
3.3	有限元建模	55
3.4	数值分析	56
3.5	无抗风缆猫道动力特性影响因素分析	57
3.5.1	桥塔对无抗风缆猫道振动特性的影响	58
3.5.2	无抗风缆猫道矢跨比对其振动特性的影响	58
3.5.3	无抗风缆猫道横向天桥对其振动特性的影响	59
3.5.4	无抗风缆猫道材料性能对其振动特性的影响	61
3.5.5	联结索对无抗风缆猫道振动特性的影响	62
3.6	本章小结	62
第四章	大跨悬索桥无抗风缆猫道非线性静风稳定性分析	64
4.1	引言	64
4.2	非线性静风稳定理论	65
4.2.1	非线性静风荷载	65
4.2.2	非线性静风稳定理论	66
4.2.3	非线性静风稳定性全过程分析方法	66
4.3	工程实例分析	67
4.3.1	工程概况及计算模型	67
4.3.2	猫道非线性静风稳定性分析	69
4.4	本章小结	80

第五章 大跨悬索桥施工期暂态主缆驰振分析	81
5.1 引言	81
5.2 主缆的驰振分析方法	83
5.3 主缆静风三分力系数识别的数值方法	84
5.4 主缆驰振力系数比较分析	85
5.4.1 工程实例	85
5.4.2 数值建模	85
5.4.3 结果分析	86
5.5 某大跨悬索桥施工期暂态主缆驰振判定	93
5.5.1 暂态主缆动力特性	93
5.5.2 暂态主缆驰振判定	94
5.6 本章小结	99
第六章 大跨悬索桥施工期暂态主缆驰振控制	101
6.1 引言	101
6.2 工程背景、有限元建模及计算工况	102
6.3 暂态主缆竖向振动影响参数分析	104
6.3.1 辅助索位置对暂态主缆 1 阶竖向振动频率的影响	104
6.3.2 辅助索纵向布置方式对暂态主缆 1 阶竖向振动频率的影响	105
6.3.3 辅助索刚度对暂态主缆 1 阶竖向振动频率的影响	106
6.3.4 辅助索对暂态主缆等效阻尼比的影响	106
6.4 暂态主缆驰振控制	110
6.5 本章小结	112
第七章 大跨悬索桥施工期吊梁颤振可靠性分析	113
7.1 引言	113
7.2 工程背景	114
7.3 颤振概率模型	115
7.3.1 极限状态方程	115
7.3.2 桥位极值风速效应模型	115
7.3.3 颤振临界风速抗力模型	117
7.4 颤振可靠性方法	118
7.4.1 基于 Matlab 的 Monte Carlo 颤振可靠性计算	118
7.4.2 JC 法	119
7.5 颤振可靠性分析	119

7.5.1 东海某大跨悬索桥施工期吊梁颤振分析	119
7.5.2 影响参数分析	121
7.6 本章小结	130
主要参考文献	132

绪 论

0.1 大跨悬索桥发展概况

悬索桥是当今建造跨度超过 1000m 的桥的首选桥型。目前,除中国的 1088m 最大跨径的江苏苏通长江大桥是斜拉桥外,全世界跨度超过 1000m 的桥均为悬索桥。已建成的跨度超过 1000m 的悬索桥共有 19 座,包括在建的共有 24 座,其中最大跨径的悬索桥是 1998 年 4 月建成的日本明石海峡大桥(图 0-1),世界第二大跨悬索桥是 2008 年建成的中国浙江舟山西堠门大桥(图 0-2)。目前正在建设的意大利墨西拿海峡大桥最大跨径是 3300m,建成后将成为世界第一大跨悬索桥(图 0-3),国内正在建设的泰州三塔悬索桥为三塔两跨悬索桥,一经建成就是世界上第一座连续双主跨超千米的悬索桥(图 0-4)。大跨悬索桥的最大跨径在不断地被刷新(图 0-5)。在 20 世纪桥梁工程取得伟大成就的基础上 21 世纪的桥梁工程将进入跨海连岛大桥建设的新时期,而大跨悬索桥是跨海大桥的首选桥型。日本计划修建的纪淡海峡大桥主跨为 2500~3000m,日本跨越丰予海峡及津轻海峡悬索桥方案也在 3000m 以上。筹建中的西班牙与摩洛哥之间的直布罗陀海湾大桥、美俄之间的白令海峡大桥等还将刷新墨西拿海峡大桥的纪录,主跨预计接近 4000m。国内,正在实施的沿太平洋海岸的同三线上将依次修建跨越渤海湾、长江口、杭州湾、珠江口以及琼州海峡等 5 个大型跨海工程,此外舟山与本土、青岛至黄岛甚至是大陆至台湾之间等都在建设和规划大型连岛工程,为避开深水基础设施施工的困难和满足特大型船舶的通航要求,这些跨海连岛工程中将会建造主跨在 2000m 以上的悬索桥。表 0-1 列出了到目前为止,国内外已建在建的最大跨径为 1000m 以上的悬索桥(贺媛,2007;周孟波,2003)。由表可见,世界上千米级悬索桥最早是美国 1931 年建造的乔治·华盛顿(George Washington)桥,1937 年美国又建造了主跨为 1280m 的金门大桥(Golden Gate),但是由于当时对悬索桥抗风缺乏认识,导致了 1940 年建成不久的 Tacoma 大桥在平均风速不到 20m/s 的风毁事故(图 0-6)(项海帆,2005)。

1940 年,美国华盛顿州的塔科马峡谷上花费 640 万美元,建造了一座主跨度 853.4m 的悬索桥。建成 4 个月后,于同年 11 月 7 日遭受了一场风速为 19m/s 的风影响。虽风速不大,但该桥发生了剧烈的扭曲振动,且振幅越来越大(接近 9m),直到桥面倾斜到 45° 左右,吊杆逐根拉断导致桥面钢梁折断而塌毁,坠落到峡谷之中。当时正好有一支好莱坞电影队在以该桥为外景拍摄影片,记录了桥梁从开

始振动到最后毁坏的全过程，它后来成为美国联邦公路局调查事故原因的珍贵资料。人们在调查这一事故收集历史资料时，惊异地发现：从 1818 年到 19 世纪末，由风引起的桥梁振动已至少毁坏了 11 座悬索桥（表 0-2）（王振东，2006）。



图 0-1 明石海峡大桥



图 0-2 西堠门大桥



图 0-3 墨西拿海峡大桥效果图



图 0-4 泰州三塔悬索桥效果图

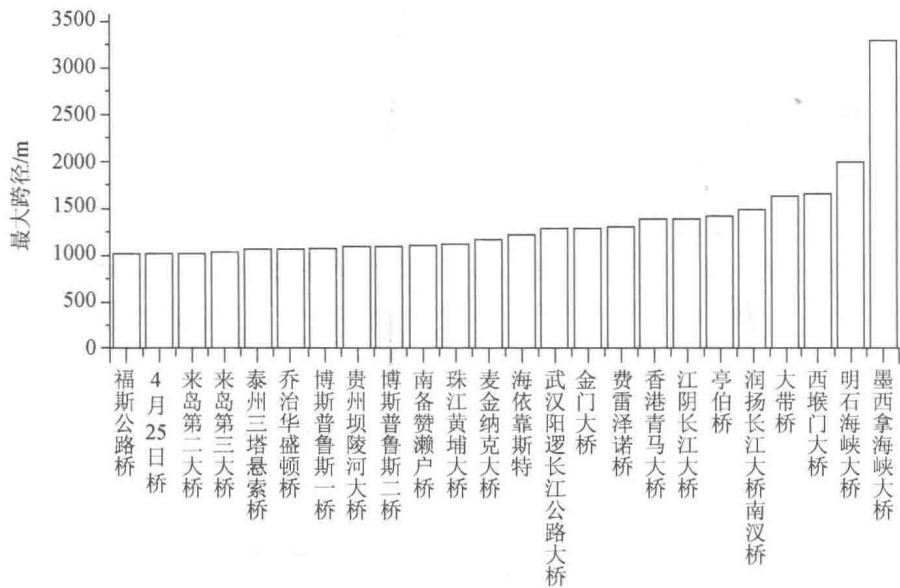


图 0-5 国内外已建在建千米级大跨悬索桥最大跨径比较

表 0-1 国内外已建在建大跨悬索桥（1000m 以上）

桥名	国家	竣工年份	跨径/m	加劲梁形式	桥塔形式、材料及高度
墨西拿海峡大桥	意大利	2011	960+3300+810	钢箱梁	四道横梁双柱式门式钢桥塔，370m
明石海峡大桥	日本	1998	960+1991+960	钢桁架	十道斜撑加劲双柱式钢桥塔，297m
西堠门大桥	中国	2008	578+1650+485	钢箱梁	三道横梁双柱式混凝土南桥塔和两道横梁北桥塔，211m
大带桥	丹麦	1998	535+1624+535	钢箱梁	三道横梁双柱式混凝土桥塔，254m
润扬长江大桥 南汊桥	中国	2005	470+1490+470	钢箱梁	三道横梁双柱式混凝土桥塔，216m
亨伯桥	英国	1981	280+1410+530	钢箱梁	四道横梁双柱式混凝土桥塔，155m
江阴长江大桥	中国	1999	369+1385+309	钢箱梁	三道横梁双柱式混凝土桥塔，197m
香港青马大桥	中国	1998	355+1377+300	钢桁架	四道横梁双柱式混凝土桥塔，206m
费雷泽诺桥	美国	1964	370+1298+370	钢桁架	三道横梁双柱式钢桥塔，207m
金门大桥	美国	1937	343+1280+343	钢桁架	四道横梁双柱式钢桥塔，210m
武汉阳逻长江公路 大桥	中国	2007	250+1280+440	钢箱梁	混凝土桥塔，157m
海依靠斯特	瑞典	1997	318+1210+288	钢箱梁	三道横梁双柱式混凝土桥塔，180m
麦金纳克大桥	美国	1957	549+1158+549	钢桁架	四道横梁双柱式钢桥塔，157m
珠江黄浦大桥	中国	2008	1108	钢箱梁	混凝土桥塔，190m
南备赞濑户桥	日本	1988	274+1100+274	钢桁架	桁架式桥塔，194m
博斯普鲁斯二桥	土耳其	1988	210+1090+210	钢箱梁	单格型断面的门形钢塔，111m
贵州坝陵河大桥	中国	2009	248+1088+228	钢桁架	东塔高 186m，西塔高 201m
博斯普鲁斯一桥	土耳其	1973	231+1074+255	钢箱梁	门子型钢桥塔，165m
乔治·华盛顿桥	美国	1931	186+1067+198	钢桁架	钢桥塔，170.54m
泰州三塔悬索桥	中国	2010	390+1060+1060+390	钢箱梁	中塔钢塔，182.5m，边塔为混凝土桥塔，178m
来岛第三大桥	日本	1998	260+1030+280	钢桁架	钢桥塔，183.9m
来岛第二大桥	日本	1998	250+1020+245	钢桁架	钢桥塔
4 月 25 日桥	葡萄牙	1966	483+1013+483	钢桁架	桁架式桥塔，190m
福斯公路桥	英国	1964	409+1006+409	钢桁架	桁架式桥塔，159m

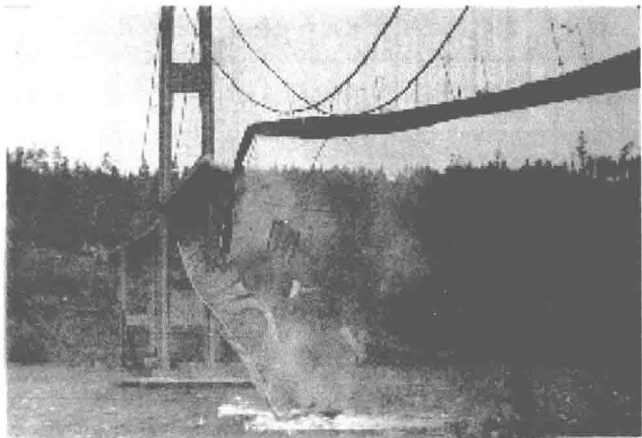


图 0-6 塔科马桥风毁事故

表 0-2 桥梁风毁事件（项海帆，2005）

风毁年份	桥 名	桥址	主跨/m	设 计 者
1818	Dryburgh Abbey	苏格兰	79	John&William Smith
1821	Union	英格兰	137	Sir Samuel Brown
1834	Nassau	德国	75	Lossen&Wolf
1836	Brighton Chair Pier	英格兰	78	Sir Samuel Brown
1838	Montrose	苏格兰	132	Sir Samuel Brown
1839	Menai Strait	威尔士	177	Thoenas Telford
1852	Roche-Beruard	法国	195	Le Blane
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	Loon Moisseiff

桥梁建造者从塔科马的风毁事故中认识到，加劲梁必须具有足够的扭转刚度，同时断面气动的选型也是非常重要的。此后，风对桥梁的动力作用被广泛地加以研究，航空空气动力学的成果与研究方法被应用和改造，产生了一门新的学科——桥梁风工程。

众所周知，大跨径桥梁的风致效应包括诸如颤振、驰振、抖振与涡激振动的动力响应和静变形与静力失稳的静力效应（表 0-3）（陈政清，2005），其中颤振是一种可能发散的自激振动，可能造成如旧塔科马桥那样的灾难性后果；驰振是一种发散性的自激振动，对于一些非对称圆截面的细长结构，当风速超过某一临界值后，空气中将产生空气动力负阻尼分量，以致振动产生后愈演愈烈，一直到达极大的振幅而破坏，这就是所谓的横风向驰振；抖振是一种强迫振动，幅度通常是有限的，不至于造成桥毁事故，但可能威胁行车或施工安全，降低疲劳寿命等；

涡激振动是由于气流经过桥梁后产生漩涡脱落引起的, 介于强迫振动和自激振动之间, 当风速位于某一区段时漩涡脱落频率恰好接近桥梁自振频率, 则会导致自激共振, 不过一般也是限幅振动 (陈政清, 2005); 静风失稳是指结构在给定风速作用下发生扭转和弯曲变形, 进而导致其所受风荷载的改变, 并反过来促进结构的扭转, 最终导致结构发生扭转失稳, 静风失稳发生前无任何预兆, 突发性强, 因而破坏性很大 (罗建辉, 2007)。

表 0-3 风荷载与风致响应的分类 (陈政清, 2005)

自然风的分量	结构状态	风荷载类型	描述风荷载的无量纲参数	结构响应类型与特征
平均风 (定常流)	假定固定	平均风力	三分力系数	静变形与静力失稳
		涡激力	斯托哈特数	介于强迫振动与自激振动之间
	微振动	自激力	颤振导数	颤振、驰振 (自激可能发散的振动)
脉动分量	假定固定	抖振力	气动导纳	抖振限幅振动 (强迫振动)

随着经济的不断发展和科技的不断进步, 世界各国特别是中国的大跨悬索桥必将刷新世界纪录。然而, 随着悬索桥跨径的增大使得其刚度、阻尼相对降低, 导致其对风的敏感性增加, 这就为桥梁建造者提出了更多的科研难题。

目前, 众多文献主要研究加劲梁的颤振、涡激振动和静风稳定性, 桥塔的涡激振动等成桥的抗风问题, 而对施工期大跨悬索桥的抗风问题, 主要研究加劲梁的颤振问题, 对其他施工期暂态结构的抗风问题研究较少。然而, 由于大跨悬索桥一般建造工期较长, 施工风环境恶劣, 再加上施工期大跨悬索桥暂态结构刚度较低, 抗风性能较差, 所以一些在成桥时不会发生的风效应在施工期间存在发生的可能性。大跨悬索桥施工主要包括桥塔、猫道、主缆、吊索和加劲梁等暂态结构的施工, 而施工期这些暂态结构的抗风性能对桥梁能否正常施工起决定性作用。从刚刚建成的世界第二、国内第一大跨悬索桥——西堠门大桥的施工情况来看, 风是该桥施工中的重要因素, 从桥的可行性研究阶段、设计阶段到施工阶段, 有关部门投入大量人力、财力进行了抗风性能研究, 但对于台风期能否吊梁还存在很大争议 (徐风云, 2009)。受众多因素的影响, 风洞试验主要针对一些可能影响施工安全的关键工况进行了研究, 研究成果对保证安全施工意义重大, 对于一些影响不是太大, 施工时间不是太长的工况尚未引起重视, 然而这些工况的施工在一定程度上是以牺牲时间或工作人员的安全性和舒适性为代价的。考虑到风洞试验代价较高, 故寻找经济、实用和可靠的手段来解决这些结构的抗风问题便显得至关重要。当前, 随着现代各种先进技术的发展, 特别是计算机来模拟各种现实问题的日渐成熟, 用计算机和理论知识来解决诸如悬索桥施工抗风等问题成为可能; 同时随着和谐社会建设的开始以及人们对生活质量追求的不断提高, 施工人员的安全性和舒适性也越来越受到重视; 最后, 随着大跨悬索桥跨度的不断增大,

对桥梁施工要求愈来愈高,施工时间会更加宝贵,因此,进行大跨悬索桥施工期暂态结构的抗风性能和控制得更加细致入微的理论分析和数值模拟研究意义重大。

0.2 大跨悬索桥施工抗风研究现状

0.2.1 悬索桥抗风研究方法

桥梁风工程的研究方法主要有理论分析、风洞试验、现场观测、数值模拟以及上述方法的联合使用等。

理论分析方法就是运用空气动力学原理,建立各类风荷载的数学模型,然后应用结构动力学方法,求解各类风致振动和稳定问题。Theodorsen 的理想平板颤振自激理论解、Scanlan 的桥梁断面颤振理论、Davenport 的抖振准定常理论都发挥了且仍发挥着重要的作用(陈政清, 2005; Simiu, 1996)。桥梁颤振和抖振的理论研究较多,驰振和涡振的理论研究较少(项海帆, 2007),且有关桥梁风致振动的理论研究的突破性进展难度较大。

风洞试验也称作物理风洞试验,是空气动力学研究的一个十分重要且不可替代的手段。国外大跨度桥梁抗风实验研究始于塔科马桥事故,并且逐步形成了以全部构件所有气动弹性性能模拟为目标的全桥气弹模型风洞实验、以桥梁主要构件例如桥面刚性节段气动外形和弹簧支撑刚度模拟为目标的节段刚性模型风洞实验、用拉条模拟实际桥梁总体刚度和用节段刚性模拟桥面气动外形的拉条弹性模型风洞实验等 3 种方法(陈政清, 2005; 项海帆, 2007)。中国桥梁的风洞试验是从 20 世纪 80 年代开始的,第一个桥梁节段模型风洞试验是以上海浏港桥为工程背景,由同济大学完成的(项海帆, 1982);第一个全桥气弹模型风洞实验是同济大学完成的广东汕头海湾大桥全桥气动弹性模型风洞试验(顾明, 1994)。经过多年学习和研究,国内桥梁风洞试验技术比较成熟了。

现场观测也是一种很好的研究手段,尤其是在桥梁发生风致病害时进行观测,研究价值更大,例如旧塔科马桥风毁过程的实况摄影,更是起到了促成桥梁风工程学科诞生的重要作用。Hikami 于 1986 年在日本名港西大桥首次观察到了斜拉索的风雨振现象(Hikami, 1988),国内的陈政清等也观测到了这一现象(陈政清, 2004)。国内学者进行了风特性的现场观测(李永乐, 2002; 张玥, 2008),甚至对台风的风特性进行实测(王浩, 2008; 谢以顺, 2009)。针对风致抖振现象,国内学者也进行了现场实测(刘刚亮, 2002; 王浩, 2008; 王中文, 2002; 谢以顺, 2009)。廖海黎等对正在建设的西堠门大跨悬索桥施工期台风特性和其作用下大桥的加速度和桥面风压力进行了现场实测(廖海黎, 2009)。到目前为止,风致振动中的颤振、驰振和抖振现象已有现场实测的先例,对于涡激振动和静风失稳现象还没有现场实测的记录,同时,已有的这些现场实测仅仅记录了一些数据,怎样

处理这些数据才能和风致振动现象取得联系,尚需要进一步研究。

数值模拟也称作数值风洞试验,是应用计算流体力学(CFD)的方法模拟气流经过桥梁结构时结构周围的流场分布情况。目前,CFD数值模拟方法在许多大型桥梁工程得以应用(550m主跨卢浦拱桥、1650m主跨西堠门悬索桥、1088m主跨苏通斜拉桥等),但主要集中在初步设计阶段,并且主要模拟了颤振导数(崔益华,2007;葛耀君,2008)、静力三分力系数(邓文,2006;李开言,2004;瞿伟廉,2007)、涡激振动、驰振(黄伟峰,2008)等。详细设计与施工图设计阶段仍以试验分析为主要手段,且纯CFD数值模拟桥梁颤振、抖振、驰振和涡激振动等风致振动,以及风致桥梁的静力稳定性分析尚需进一步研究。可见,单纯运用CFD的方法完全替代物理风洞试验尚待时日。

目前,随着计算机技术的发展,众多研究者开始采用上述几种抗风研究方法的联合使用取得了不错的成果。刘竹钊等采用半解析半试验的方法得到了大跨悬索桥施工阶段的颤振临界风速(刘竹钊,2002)。考虑到全桥模型风洞试验受各种条件的限制,众多研究者都采用了节段模型风洞试验和数值计算相结合的方法,具体是采用节段模型风洞试验结果进行有限元计算,很多学者自编了有限元程序,也有人对大型商业软件ANSYS等进行二次开发来计算风荷载的响应(韩万水,2007;华旭刚,2002;华旭刚,2007)。这种研究方法经济、快速,相对准确,是当前主要的研究方法。

0.2.2 桥塔施工期抗风研究

1. 桥塔抗风性能

悬索桥桥塔一般采用单层或多层框架结构,其顺桥向结构形式有刚性塔、柔性塔等;横向结构形式有刚构式、桁架式等(图0-7)。目前桥塔的材料一般用混凝土、钢材或者两者组合。以往大多悬索桥采用钢塔,由于钢材可以极大地缩短工期、提高施工控制精度、减轻自重。现在,因为混凝土强度提高、施工方法改进、价格较低,许多新桥已改用混凝土塔。我国的悬索桥大都采用混凝土桥塔(贺媛,2007;裘伯永,2007)。

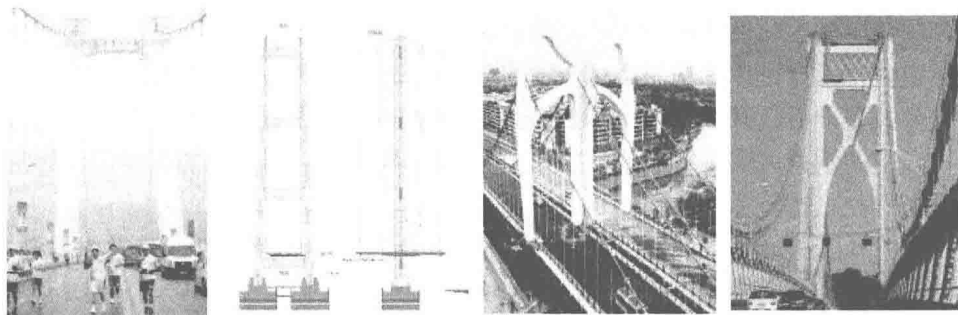


图 0-7 悬索桥桥塔形式