



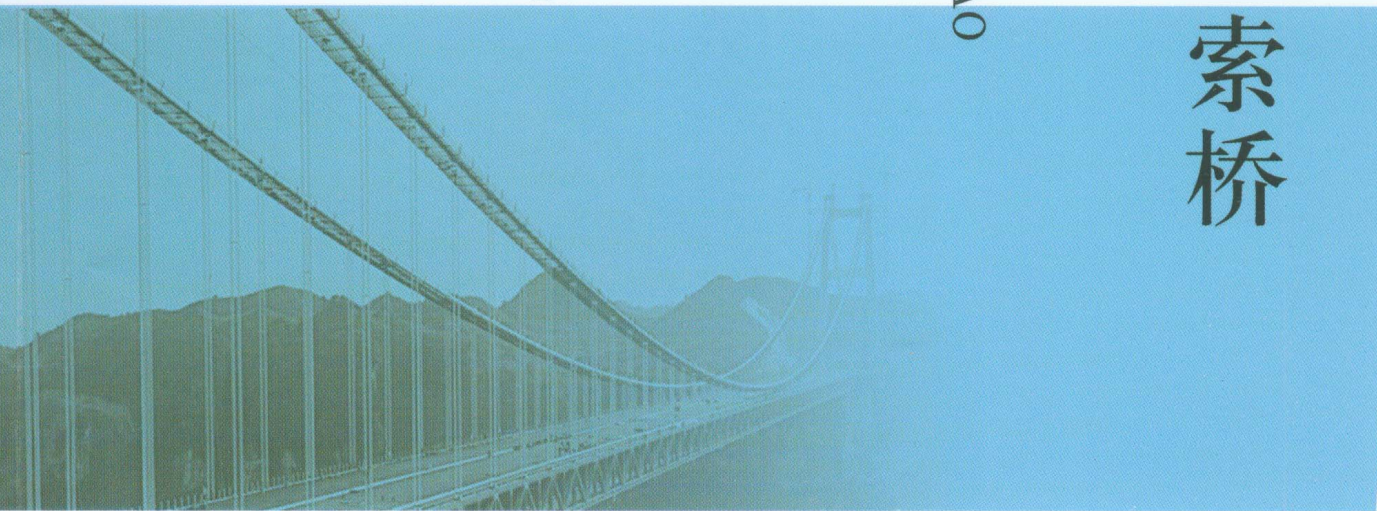
建筑与土木工程博士文库

Doctoral  
Thesis  
Collection  
in  
Architectural  
and  
Civil  
Engineering

杨  
阳  
著

# 西部山区大跨度悬索桥 风致振动研究

XIBU SHANQU DAKUADU XUANSUOQIAO  
FENGZHI ZHENDONG YANJIU



重庆大学出版社

## 内容提要

随着公路桥梁建设的飞速发展,越来越多的大跨度悬索桥出现在西部山区,本书以位于西部的典型山区城市重庆市的大跨度悬索桥——寸滩长江大桥为工程背景,采用现场实测、风洞试验、理论分析和数值计算相结合的方法,对桥址处风环境特性及参数、西部山区风下桥梁的抖振响应、宽体式扁平钢箱梁涡振响应、颤振特性、风-汽车-桥梁系统振动特性进行了研究。本书适用于桥梁专业研究生及相关研究人员参阅。

### 图书在版编目(CIP)数据

西部山区大跨度悬索桥风致振动研究 / 杨阳著. --  
重庆: 重庆大学出版社, 2020.5  
ISBN 978-7-5689-1635-6

I. ①西… II. ①杨… III. ①山区—长跨桥—悬索桥  
—风致振动—研究—中国 IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 172269 号

## 西部山区大跨度悬索桥风致振动研究

杨 阳 著

策划编辑:王 婷

责任编辑:姜 凤 版式设计:王 婷

责任校对:关德强 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:饶帮华

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn) (营销中心)

全国新华书店经销

重庆共创印务有限公司印刷

\*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:12.25 字数:307 千

2020 年 5 月第 1 版 2020 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-1635-6 定价:59.00 元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前 言

## Preface

悬索桥因其良好的跨越能力成为目前大跨度桥梁的主要形式。大跨度悬索桥随着桥梁跨度的增长,结构刚度和阻尼减小,因此提高了对风荷载的敏感性。学者们通过优化桥梁截面、提高结构刚度,已基本可避免大跨度悬索桥在设计使用期限内发生风致颤振。但由于其跨度及桥宽不断增加,使风致抖振问题日益突出,大跨度悬索桥在风荷载作用下的振动特性仍是一个备受关注的问题。

相对于长江中下游地区宽阔平坦的地形地貌,以重庆市为中心的三峡库区则是典型的山区地貌,其风场特性与平原地区有较大的区别。研究西部山区大跨度悬索桥风致振动响应,能够为其在西部山区进一步应用提供科学依据。

本书是作者在其博士论文的基础上进一步完善总结完成的,主要包括6章内容。以位于西部的典型山区城市重庆市的大跨度悬索桥——寸滩长江大桥为工程背景,采用现场实测、风洞试验、理论分析和数值计算相结合的方法,对桥址处风环境特性及参数、西部山区风下桥梁的抖振响应、宽体式扁平钢箱梁涡振响应、颤振特性、风-汽车-桥梁系统振动特性进行了研究。

本书由作者负责编写全书的主要内容,导师张亮亮教授、姚刚教授对全书的撰写进行了精心指导。重庆大学华建民教授、重庆市建筑科学研究院刘连杰博士对本书的研究工作给予了大力支持。博士研究生吴波参与了本书的部分工作。本书得到了国家自然科学基金项目(51808076,51778093,51608074)、中央高校基本科研项目(106112017CDJXY200009)、重庆市研究生科研创新项目(CYB17042)、复杂环境下典型土木工程结构力学特性和动力性能项目(2019CDXYTM0032)的大力资助。

由于作者水平有限,书中难免存在诸多不足之处,欢迎广大读者批评指正,在此深表谢意!

重庆大学土木工程学院 杨 阳

2018年5月

<b>1 绪 论</b> .....	001
1.1 工程背景及研究意义 .....	001
1.2 国内外研究现状及评述 .....	005
1.3 主要研究内容 .....	014
<b>2 西部山区桥址处风特性现场实测及分析</b> .....	016
2.1 引言 .....	016
2.2 风特性参数 .....	018
2.3 风环境数据测量 .....	023
2.4 实测风速数据分析 .....	027
2.5 本章小结 .....	041
<b>3 大跨度悬索桥抖振响应分析</b> .....	043
3.1 引言 .....	043
3.2 脉动风的数值模拟 .....	043
3.3 工程背景及静力三分力试验 .....	048
3.4 风荷载处理 .....	055
3.5 不同因素对抖振响应影响分析 .....	061
3.6 本章小结 .....	067
<b>4 大跨度悬索桥涡振响应分析</b> .....	069
4.1 引言 .....	069
4.2 影响宽体式扁平钢箱梁静力三分力的因素 .....	069
4.3 影响宽体式扁平钢箱梁涡振性能的因素 .....	086
4.4 涡振性能数值分析 .....	096
4.5 本章小结 .....	104
<b>5 大跨度悬索桥颤振特性分析</b> .....	106
5.1 引言 .....	106
5.2 颤振导数的基本理论 .....	106

5.3	颤振临界风速的测定及颤振导数识别 .....	118
5.4	颤振性能数值分析 .....	127
5.5	本章小结 .....	151
<b>6</b>	<b>风-汽车-桥梁系统振动特性分析</b> .....	<b>153</b>
6.1	引言 .....	153
6.2	汽车-桥梁系统运动方程 .....	154
6.3	不同因素对汽车-桥梁系统振动特性的影响 .....	159
6.4	桥上行车安全临界风速 .....	163
6.5	桥上行车安全临界车速 .....	168
6.6	本章小结 .....	175
	<b>参考文献</b> .....	<b>176</b>

# 1 绪 论

## 1.1 工程背景及研究意义

随着社会的高速发展,我国建造的公路桥梁工程越来越大、结构越来越复杂,桥址处的环境也变得更加险峻。以上因素导致了工程的投资加大,技术难度提升,灾害发生率增大。大跨度桥梁是重要的交通工程,在其正常的使用状态下,桥梁应能正常地工作、具有足够的安全性和可靠性、不能因其失效而造成生命或者财产的损失。

在四类基本桥型(梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥)中,跨越能力最好的是悬索桥。斜拉桥出现前,当桥梁跨度超过 500 m 时,悬索桥是唯一可选的桥型。斜拉桥出现后,经过近半个世纪以来的飞速发展,其跨越能力已突破千米,但当斜拉桥跨度超过 1 400 m 时,由于斜拉桥拉索垂度的非线性效应及主梁中承受的轴压力的二阶效应,其结构力学性能将急剧弱化,经济指标不断下降。因此,在 1 400~5 000 m 跨度的跨江(海)工程中,悬索桥仍然是经济合理的优先备选桥型。

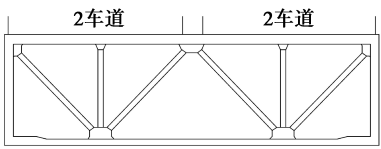
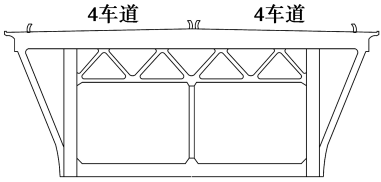
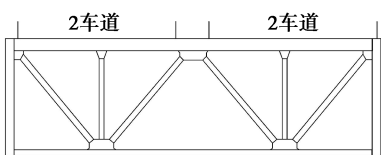
桥梁所遭遇到的灾害主要分为桥梁抗风、桥梁防撞和桥梁抗震三类。风灾是自然灾害中发生频率非常高和造成损失非常严重的灾害之一。目前,悬索桥越来越轻柔,结构刚度和阻尼显著下降,对风的作用更敏感,极易容易被外界干扰而产生振动。1818—1940 年,世界上已经被风摧毁的悬索桥至少有 11 座。1940 年,塔科马大桥(主跨为 853 m)在低于 20.0 m/s 的风速下发生了强烈振动,主梁被折断。这一风致振动毁坏桥梁事故全面拉开了桥梁工程界和空气动力学界研究大跨度桥梁风致振动和气动弹性理论的帷幕。截至 2018 年,全世界已建成的跨度超过千米的悬索桥共有 22 座,其中有 12 座桥的主梁为钢箱梁,10 座为钢桁架梁。在设计和使用过程中,有 7 座都出现了因风致振动导致的问题,其中 6 座为颤振,1 座为涡振。

通常情况下,在江面或海峡地区风速相对较大,但近年来,各地气候在全球变暖的影响下发生了巨大变化:大风出现的频率有所提高,强度增加,路径不规则。以重庆市为中心的长江三峡库区是我国西部山区经济发展的重要地区,江面因库区蓄水而变宽,修建桥梁时的跨度增大。同时,随着城市经济和社会的发展,城区修建的跨江桥梁宽度需要增加到 6 车道


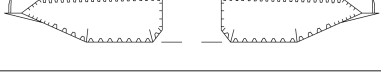
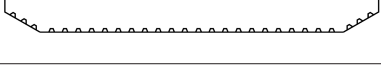
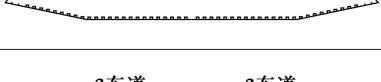
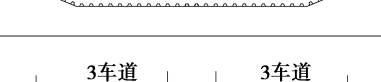
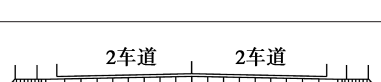
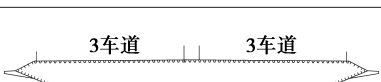
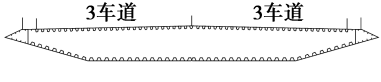

或者 8 车道,即需要建造宽度达到或超过 35.0 m 的宽体式梁体。若继续采用一般宽度(4 车道)的钢箱梁,后续急速增长的交通量则可能带来桥面强行拓宽的问题。桥梁跨度增加会增大桥梁的风致响应程度,抗风设计难度加大;桥面宽度增加要求梁体的刚度增加,但从经济性角度考虑,梁体高度不宜明显增大,且梁体高度较低时气动性能相对较好。若考虑桁架梁,势必会显著增大梁高导致造价突升。若采用 PK 梁,其中央的开槽又将显著削弱气动性能,尤其是涡激振动性能。综上所述,宽体式扁平钢箱梁成了新建跨江桥梁的首选梁型。经过二十余年的飞速发展,以宽体式钢箱梁为主梁的大跨度桥梁在长江中下游地区获得了成功的应用。

重庆地区目前主要以牌楼长江大桥(主梁宽度为 37.0 m)和寸滩长江大桥(主梁宽度为 42.0 m)为代表。相对于长江中下游地区宽阔平坦的地形地貌,以重庆市为中心的三峡库区则是典型的山区地貌,具有风速高、紊流强度大、风速垂直突变大、风速沿峡谷横向分布不均匀等特点,与平原地区截然不同。对于在西部山区修建大跨度桥梁,其抗风设计与沿海地区有很大差别,例如,其设计风速不能简单采用桥址所在地区的基本风速进行推算。现行的《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018,以下简称《规范》)中,没有明确给出西部山区桥梁抗风设计的依据与措施,而国内外对大跨度桥梁的抗风研究工作也主要集中在沿海地区,关于西部复杂山地地貌下的大跨度桥梁抗风研究的成果极为有限。目前,我国在建和已建的超过 800 m 的公路悬索桥共有 23 座,见表 1.1。其中,有 16 座悬索桥的主梁为钢箱梁,且 11 座位于我国西部地区(所占比例为 68.75%)。因此,研究在西部山区风场条件下宽体式扁平钢箱梁的风致振动特性,能够揭示宽体式箱梁气动参数和所处风场条件对其结构风致特性的影响规律,并为大跨度悬索桥在西部山区的进一步应用提供科学依据。

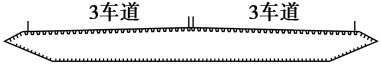
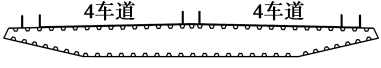


表 1.1 国内悬索桥主梁概况

桥名	主跨	类型	截面	高	宽	宽/高
贵州坝陵河特大悬索桥	1 088	钢桁		10.00	28.0	2.80
镇江五峰山公铁大桥	1 092	钢桁		16.00	46.0	2.88
矮寨大桥	1 176	钢桁		7.50	27.0	3.60

续表

桥名	主跨	类型	截面	高	宽	宽/高
青马大桥	1 377	钢箱		7.65	41.0	5.36
西陵长江大桥	900	钢箱		3.00	20.6	6.87
宜昌长江大桥	960	钢箱		3.00	24.4	8.13
龙江大桥	1 196	钢箱		3.00	28.5	9.50
西墩门大桥	1 650	钢箱		3.51	34.0	9.69
南溪长江大桥	820	钢箱		3.00	29.8	9.93
驸马长江大桥	1 050	钢箱		3.20	32.0	10.00
龙门跨海大桥	1 160	钢箱		3.00	31.0	10.33
江阴长江大桥	1 385	钢箱		3.02	32.5	10.70
宜昌至喜 长江大桥	838	钢混		3.08	33.2	10.78
黄埔大桥 (南汉)	1 108	钢箱		3.50	38.5	11.00
马鞍山 长江大桥	1 080	钢箱		3.50	38.5	11.00
南京长江四桥	1 418	钢箱		3.50	38.8	11.09

续表

桥名	主跨	类型	截面	高	宽	宽/高
虎门大桥	888	钢箱		3.01	35.6	11.83
寸滩长江大桥	880	钢箱		3.50	42.0	12.00
润扬长江大桥	1 490	钢箱		3.00	36.3	12.10
阳逻长江大桥	1 280	钢箱		3.00	37.5	12.50

注:表中宽度栏数值不包含钢箱梁的风嘴尺寸。

2010年5月5日,重庆市瞬时风速达到了30.0 m/s,摧毁房屋2万余间。而在《规范》附表A中,给出的百年一遇最大风速为27.5 m/s。处于复杂的西部山区风环境下的桥梁,其风环境特性与《规范》中所给出的四类地表类别所对应的特性明显不同,如果按照《规范》规定的风参数进行设计,将会高估桥梁的颤振与涡激振动,显著低估了桥梁的抖振响应带来的不利影响。在重庆地区的设计风速下,颤振破坏的可能性较小,抖振和涡振发生的可能性较大,会引起疲劳破坏,影响桥上行车安全。一旦桥梁上发生风引起的行车事故,不仅会带来经济损失,还会影响行人的心理,甚至有可能带来不良的社会影响。因此,风的作用对大跨度悬索桥的动力行为和对桥面行车安全的影响就成了一个不得不解决的问题。目前,在该领域开展的研究工作比较少,对于复杂山地地貌下的宽体式扁平钢箱梁悬索桥的抗风开展的研究更少。因此,开展西部山区风下的风-汽车-桥梁系统振动的研究,对山地地形附近新建桥梁的合理选址及抗风设计、老桥的维修加固及疲劳分析都有着十分重要的意义。

基于此,本书在充分借鉴前人研究成果的基础上,以位于西部山区典型城市重庆市的主梁为宽体式扁平钢箱梁的寸滩长江大桥为研究对象,采用桥址处风环境实测、节段模型风洞试验、理论分析和数值计算等相结合的方法,开展西部山区风环境下宽体式扁平钢箱梁悬索桥抗风性能研究,根据桥址处的风环境实测数据给出了脉动风功率谱函数;通过节段模型风洞试验得到了桥梁的静力三分力系数,并将所获得的试验结果用软件编程实现程序化计算悬索桥抖振响应;研究了桥面粗糙度、栏杆透风率、导轨、桥上车辆类型、车辆数目和车辆间距等因素对宽体式扁平钢箱梁的涡振响应和颤振性能的影响;通过力的相互作用关系和位移的协调关系建立了风-汽车-桥梁振动系统,研究了不良天气下车辆通过桥梁的安全限速,进行了侧风作用下行车安全的概率评价。研究成果对深入认识西部山区宽体式扁平钢箱梁悬索桥的抗风特性具有重要的理论意义,可为西部山区大跨度悬索桥的设计、抗风性能分析及桥上安全行车限速等提供一定的借鉴和参考。

## 1.2 国内外研究现状及评述

### 1.2.1 西部山区桥址处风环境

#### 1) 风环境研究方法

风环境研究方法主要有现场实测、风洞试验和数值模拟 3 种。

##### (1) 现场实测

现场实测是研究风环境最直接、最真实的一种手段,是用风速仪进行现场观测和记录,从而得到风特性参数和结构振动情况,但其具有投资大、成本高和测量周期长的局限性。目前,桥梁风环境现场观测已在 9 座大桥上得到了应用。

##### (2) 风洞试验

大型桥梁中应用风洞试验较多,通过在风洞中模拟桥址处地形及其风场环境来得到桥址处风特性参数。

##### (3) 数值模拟

数值模拟是用计算流体动力学分析和模拟风对结构的影响。数值风洞技术从比较简单的断面气动参数模拟发展到复杂的断面气动参数模拟,从二维流场计算发展到三维流场计算,从基于时间平均的雷诺应力湍流模型发展到基于瞬态求解的大涡模拟 (LES) 湍流模型。

#### 2) 国内外风环境研究状况

在风场特性研究中,Davenport 等进行了开拓性的工作,提出了著名的 Davenport 风速谱,给出了风剖面指数模型、地面粗糙度及 3 种地形(中高层建筑密集区、中高层建筑稀少区和低层建筑稀少区)概念的具体描述,Davenport 得出的不同地形下的风剖面指数模型,如图 1.1

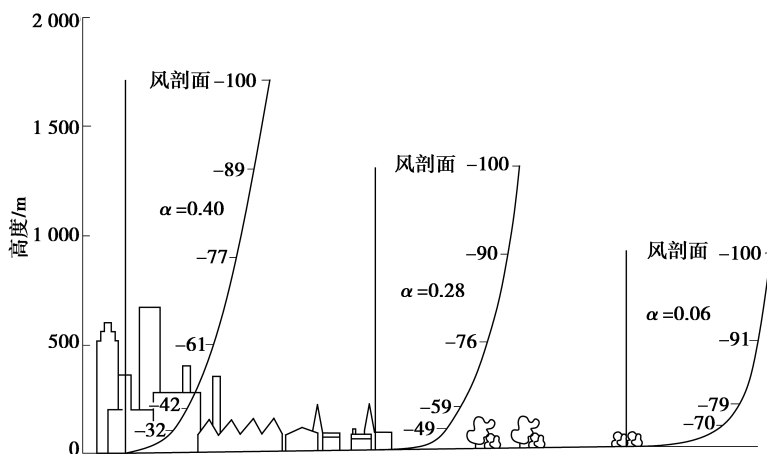


图 1.1 不同地形下的风剖面指数模型/ft

所示。

Richards 等通过实例证明了标准  $k-\varepsilon$  模型、RNG  $k-\varepsilon$  模型、威尔科特斯  $k-\omega$  模型和 LRR 模型四种湍流模型在风工程中应用的可行性和可信性。Bowen 等发现复杂地形的模型尺寸比例小于 1/500 时,在风洞试验中测出的该地形下的强风特性参数与实际有较大误差。Louka 等将卡尔曼滤波作为后处理方法来预测风速和风能,发现其误差小。Baker 等通过足尺模型风洞试验和 CFD 数值模拟技术用表面压力分布描述了无风下和侧风下行驶列车周围的流场变化情况。Tsang 等通过建立一个覆盖域为建筑物背风侧 400 m 范围的风洞模型试验研究了风和结构的交互影响。Blocken 等和 Montazeri 等为改善城市风环境质量,都应用 CFD 数值模拟技术建立了风舒适和安全评估模型,将仿真结果与现场长期测量结果进行对比。Razak 等应用大涡模拟(LES)对 5 种非等高、不同纵横比的建筑区域周围流场进行了模拟,对市区内行人所处的风环境进行了评价。An 等将风洞试验和 CFD 数值模拟技术相结合,对经过市区环境后的风速和湍流动能变化进行了研究。Meroney 等和 Blocken 等对近五十年计算机风工程应用的可行性、计算机模拟出的工程受到风荷载作用、工程对周围风环境的影响等方面做了总结。Vernay 等应用系统识别技术提高了建筑周围的风环境模拟的精确程度。Tominaga 等通过实例分析了稳定和非稳定雷诺时均  $N-S$  方程(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations)模拟大规模的波动对风速统计量的影响。Patlakas 等应用跨阈值方法(越界峰值法)和年极值法,对希腊群岛 10 年风速数据建立了风速分析和预测模型,经过敏感性测试和调整,得到了希腊群岛 50 年风速极值地图。

国内对风环境的研究始于 20 世纪 90 年代初期。王存忠等和刘小红等分析了边界层脉动谱特征和强风边界层。王蓓蕾等应用 1989 年 12 月—1990 年 1 月在重庆地区收集到的实测资料对自然风的风特性参数进行了研究。杨杰、胡晓红、赵林等分析了台风特性。庞加斌等对两次台风过程和四渡河峡谷大桥桥址处风特性进行了实测。李春光等在数值模拟上采用了简易模型,在试验上采用了真实复杂地形模型,将二者相结合,总结了收缩性山区峡谷地形风场特性的分布规律。陈正洪等通过已有气象资料应用比值法求得武汉阳逻长江大桥的桥址处风速。刘聪等在苏通长江公路大桥桥位南岸建立了 80 m 高风观测塔进行了 3 年的风特性实测。胡峰强等提出了梯度风速修正法推测出桥址处风速,并用传统的指数律法和桥位风观测分析法进行了验证和比较。王浩等发现带拐点的谱曲线表达式能比较准确地模拟出沿海地区桥址处的三维脉动风场。郑毅敏等修正了常用的脉动功率谱。史文海等通过实测得到了台风“海鸥”的风特性参数。张亮亮等在大宁河大桥桥址处和寸滩大桥桥址处开展了现场实测,得到了平均风速、风向、风攻角、湍流强度、湍流积分尺度等山区风环境特性参数。陈政清等通过风洞试验发现桥址处山区峡谷风场分布具有三维性,目前参考《规范》规定的四类地形不能满足工程需要。李永乐等指出深切峡谷桥址区风场特性复杂。通过对高海拔、高温差深切峡谷内的大渡河大桥桥址处风环境进行实测,发现引起桥位处的大风原因有大尺度大气环流和小尺度范围内热力驱动,也受局部地形及随时间变化的日照的影响,桥位处日常大风出现的频率较高。徐洪涛以贵州坝陵河大桥为研究对象,通过 CFD 数值模拟技术和节段模型风洞试验,对山区峡谷地形的湍流风进行了深入研究。朱乐东等在坝陵河大桥采集到了两年多的桥址处风速数据,推算出高海拔桥址处的设计基准风速。

### 3) 风场特性研究的必要性

桥梁在可能出现的最大风速情况下、规定的时间范围内,不应该发生毁灭性的自激发散振动,即驰振和颤振。规定的时间范围是指桥梁在设计的使用年限内;空间范围是指桥的位置所在的区域范围内,并且当风速未达到破坏性风致振动时,桥梁的振幅要满足结构的疲劳、行车的安全可靠性和行车的舒适度要求。

在桥梁设计中,设计基准风速过低时,桥梁会因发生自激发散振动而被毁坏;设计基准风速过高时,桥梁成本会大大增加,造成桥梁整体造价较高,引起不必要的经济损失。为在保证桥梁结构安全的同时控制桥梁造价,桥址处的百年一遇最大风速应尽可能精确。表 1.2 是风荷载和桥梁风致响应的分类。

表 1.2 风荷载和桥梁风致响应的分类

自然风分类	桥梁状态	风荷载类型	描述参数	结构响应类型与特征
平均风	固定状态 (假定)	平均风力	三分力系数	静变形
		涡激力	斯托罗哈数	静力失稳
脉动风	微振动	自激力	颤振导数	介于强迫振动和自激振动
	结构固定 (假定)	抖振力	气动导纳	颤振、驰振(自激的可能发散的振动)
				抖振限幅振动(强迫振动)

《规范》中气象资料给出的风速(包括风速大小、风向等)是开阔平坦地区,10 m 标高,百年一遇的 10 min 平均风速,没有给出湍流特性方面的资料。对于大跨度桥梁的动力响应问题,湍流特性(特别是脉动功率谱、湍流积分尺度、阵风强度和相关函数)的正确模拟尤为重要,它们是引起桥梁结构抖振响应和涡激振动的主要因素,可能导致桥梁结构的疲劳,甚至引起桥梁结构的涡激共振。西部山区风被不均匀地形破碎成小漩涡,导致了湍流变化急剧强烈。山区的公路交通设施因这些特殊的地形条件制约而落后于沿海和平原地区。我国西部地区属于峡谷山区地形,其地形地貌复杂,因此自然风特性也相当复杂。目前,山区桥梁和大型结构建设项目日益增多。尽管国内各科研单位逐步开展了一些西部山区风环境研究,但对西部山区风环境现场的测试研究十分有限,而风场特性直接影响桥梁的抗风设计。对西部山区风环境开展现场测试,得到桥址处风场特性后,可以根据西部山区风场的特点(如西部沿江的峡谷风场),有针对性地对大跨度桥梁的主梁进行气动设计和优化,以最大限度地适应西部山区跨江、跨河桥梁的建设。随着我国西部大开发的逐渐扩大,以及近年来内陆地区经济的高速增长,在西部山区建造的大跨度桥梁已不是个案,随着桥梁建设投入的加大、桥梁跨度的增大,对桥址处风场特性的研究迫在眉睫,尤其是作为西部山区经济增长高地的重庆市三峡库区长江沿线的风场特性研究。从已有的文献看,目前开展的相关研究工作还亟待提升。

## 1.2.2 大跨度悬索桥抖振响应

桥梁的抖振是指桥梁在湍流场作用下的被迫随机振动,它会导致疲劳破坏,影响车辆在桥上行驶的安全性和行人过桥的舒适性。

### 1) 国内外研究现状

国外学者 Scanlan 等在颤振分析理论的基础上提出了准定常气动力抖振模型。Lin 等在随机振动理论的基础上,用卷积积分表达自激力。Jain 等在 Scanlan 的研究基础上引入了颤振导数导致的气动耦合及模态交叉产生的力学耦合。Katsuchi 等在 Jain 的基础上又做了改进,分析了明石海峡大桥多模态耦合的颤振和抖振响应。Xu 等结合虚拟激励法提出了能够全面考虑固有模态及模态间耦合效应的抖振分析方法。Kovacs 等和 Boonyapinyo 等分别用不同的方法模拟风速,对海格兰德大桥(Helgeland Bridge,主跨为 425 m)和明石海峡大桥(Akashi Kaikyō Bridge,主跨为 1 991 m)进行了时域抖振分析。Chen 等和 Ding 等都应用时域法对大跨度悬索桥进行了抖振分析,Chen 将抖振力用有理函数表示,Ding 突出了各种非线性因素。Karmakar 等模拟了非服从高斯分布的风速,应用模拟结果对文森特·托马斯大桥(Vincent Thomas Bridge,主跨为 457 m)进行了抖振响应分析。Seo 等分别应用蒙特卡洛法和拟蒙特卡洛法预测计算了因气动弹性加载而引起的大跨度桥梁抖振响应误差。Phan 等通过研究,发现了扁平钢箱梁的腹板的位置,角度和长度对悬索桥的模态起着控制作用,因此,其对悬索桥的颤振和抖振有较大影响。Kim 等通过 CFD 数值模拟技术建立了三维实体桥梁模型分析桥梁抖振响应,发现其分析结果与传统二维振动分析一致,可以用来代替传统的风洞试验分析桥梁的振动特性。Domaneschi 等应用 ANSYS 软件研究了考虑和不考虑鲁棒性时调谐质量阻尼器抑制悬索桥抖振响应的差别。

近年来,国内学者对桥梁抖振分析也进行了较为深入的研究:王浩等对台风作用下的苏通长江公路大桥、实测脉动风速谱与规范风速谱下和有无桥塔风下的润扬长江大桥的抖振响应进行了研究。应用 ANSYS 中的 matrix27 矩阵形式的输入来表达气动自激力,实现了直接由风环境数据得到大跨度桥梁抖振响应的时域分析。龙晓鸿等通过 Geodatis 改进型的谱表示法模拟脉动风分析了四渡河特大桥的抖振响应。张茜等对杭州湾跨海大桥北通航孔斜拉桥施工中最大双悬臂及最大单悬臂状态进行了风致抖振响应时域分析。李少鹏等利用 Davenport 提出的相干函数经验式计算了自然大气紊流场中抖振力的相关性并进行了验证。胡俊等根据实测风速风向分布规律分析了大跨悬索桥的抖振疲劳寿命,对风雨共同作用下的大跨度悬索桥加劲梁进行了抖振响应分析。马存明等通过测压法,用三维导纳分析了桥梁抖振。刘明、赖马树金、韩万水、赵凯、晏致涛、李宁、彭丹、张志田、胡钢、杨转运、喻梅、黄国庆等也对大跨度桥梁抖振响应进行了分析,分析时考虑了几何非线性、气动自激力、风速谱、气动导纳、多模态、斜风效应、模态耦合效应、山区非平稳强风等多种因素的影响。李立、马麟等综合了时域分析和频域分析的优点,用时频混合法分析了大跨度桥梁在脉动风激励下的抖振响应。

### 2) 开展西部山区桥梁抖振研究的必要性

处于西部山区的桥梁,其风环境特性与《规范》中所给出的四类地表类别所对应的特性

明显不同,如果按照《规范》规定的风特性参数进行抖振计算,与实际情况会发生较大的出入,若实际中脉动风较《规范》中大,可能会引起悬索桥节点部位的疲劳破坏进而引发安全事故,同时对桥上行驶车辆的舒适度也会产生很大的影响。因此,应根据实际测量出的风环境特性参数——西部山区的悬索桥进行抖振计算,研究西部山区风特性参数下与规范中风特性参数下桥梁抖振响应的区别,可以为西部山区桥址处的宽体式钢箱梁悬索桥的设计、施工和运营提供一定的参考。文中在风-汽车-桥梁振动系统中的侧翻力学模型中,考虑了桥梁抖振所产生的水平惯性力及竖向惯性力,因此研究桥梁的抖振响应是风-汽车-桥梁系统振动研究的前提。

### 1.2.3 大跨度悬索桥涡振响应

国内外学者针对近流线型断面进行了大量的涡振试验研究,发现这种断面一般都会产生涡激振动,且涡振强烈程度与断面外形、结构动力特性、漩涡脱落强度、雷诺数效应等有密切关系。一般而言,旋涡脱落强度大、阻尼小、正攻角来流对应高幅值涡激振动。由于断面涡激振动的产生与近尾流区漩涡脱落形式密切相关,因此,这类断面的涡振形式、临界风速、幅度、锁定区范围、尾流模式等也将随断面外形、雷诺数效应、结构动力特性等发生剧烈变化。在风的作用下,车辆和桥梁间的气动力存在着相互影响,桥梁断面的形状会影响车辆的气动力,桥上通过的车辆类型、车辆数量及车辆间距也会改变桥梁断面附近的风场,影响桥梁的气动力,研究其规律和对桥梁的影响能够为桥上行车准则提供依据。

#### 1) 国内外研究现状

国外学者 Baker 等最先通过油迹试验和相关的流体力学理论对车辆气动力系数变化作出了基本解释,并对 3 种不同比例的列车做了风洞试验,发现车辆的边界层仅在全尺寸模型中可用二维流场描述,小尺寸模型的流场区需要用三维流场描述。Baker 还通过试验发现小风偏角下车辆的速度对车辆气动力系数的影响大。在实车测试了横向风作用下车辆的气动荷载,并与模型风洞试验结果进行了比较。Suzuki 发现车辆的气动力特性不仅与车辆自身的外形相关,还与它们所处的环境有密切联系,在桥面上行驶的列车和汽车的气动力特性与在路面行驶的列车和汽车的气动力特性有很大差别;研究了在 3 种不同主梁高度下的 4 种类型的车辆(双层巴士、单层巴士、小轿车、集装箱车)的气动力系数变化情况,发现气动力系数随主梁高度的增加而增大。Sterling 将风洞试验、现场足尺模型试验和 CFD 数值模拟三者相结合,研究了单辆货车在桥上行驶时风的作用下货车受力和力矩的作用机理。Cheli 在米兰理工大学进行了一系列风洞试验,通过测量车辆表面的压力分布变化情况,研究了车辆类型、车辆尺寸、车辆所处周边环境(平地、路堤、单双高架桥)、车辆空载和满载、车辆迎风和逆风等因素对作用于重型车辆空气动力载荷的影响。Kozmar 制作了桥梁和厢式货车的玻璃模型来进行瞬态气动加载试验,发现随着阵风速度的增加,厢式货车的平均侧向力和倾覆力矩以近线性增加,确定了影响厢式货车行驶状态的两个主要因素为经过桥梁和厢式货车的涡脱和阵风因子。Dorigatti 研究了当横风风速大于  $10.0\text{ m/s}$  且桥面上有车流通过时的典型桥梁断面的气动力特性变化,发现升力系数、阻力系数和力矩系数与横风平均风速及车辆的偏航角度有关。

国内对风-汽车-桥梁系统气动力性能的研究首先是在铁路上,葛玉梅发现列车-桥梁影响相互的气动力参数。祝志文建立客车-桥和客车-路模型,研究了客车在桥和地面行驶时的气动力参数的差别。韩万水对桑卡纳、厢式货车、小客车和拖车进行风洞试验并获得了4种车型车辆的气动力系数。李永乐考虑了列车与桥梁间相互的气动力性能影响,建立了风-列车-桥系统,进行了非线性空间耦合分析。通过移动的车辆模型风洞试验,测试了不同工况下车辆、桥梁的气动力系数,解释了不同因素对其气动力性能的影响。岳澄对风压分布进行分析,得到了考虑风-汽车-桥梁相互影响时的外流场的特性。韩艳发现汽车-桥梁间的相互干扰明显,在不同交通状态下,车辆会引起桥梁气动力和局部风压的变化,并拟合了一套考虑桥梁影响的车辆气动力系数计算式,通过研究发现桥梁气动力参数对桥梁和车辆耦合动力响应都有较大的影响,而车辆气动力参数对车辆耦合动力响应有较大影响,对桥梁耦合动力响应基本没有影响。周立研究了6种工况下汽车-桥梁系统的涡振响应,发现桥上无车时涡振范围会提前,车辆改变了主梁的气动外形,因此,汽车应对桥梁的涡振响应引起足够重视。

### 2) 扁平钢箱梁气动力性能国内外研究现状

扁平钢箱梁气动力性能优良,因此在大跨度悬索桥和斜拉桥中被广泛应用。许多学者通过风洞试验研究了附属构件(栏杆、导流板、阻尼、风嘴及桥面减振板)对涡振的影响,发现主梁截面的形状及其附属物对均匀流低风速下的涡振响应影响很大,长时间的涡振响应会导致构件疲劳,影响乘客及驾驶员的舒适度,因此,避免大幅度涡振不仅能保证结构安全还能提高使用者的舒适度。

国外学者 Larsen 和 Luca 在风洞试验中研究了风嘴导流板及形式、栏杆等构件对气动力性能的影响。Miyata 和 Wilde 探讨了不同主梁外形、主动翼板控制系统对气动力稳定性的影响。Yang 给出了提高大跨度桥梁颤振临界风速的措施。

目前,国内对扁平钢箱梁的气动力特性做出的研究主要有:李春光对宽高比为11.08的扁平钢箱梁进行了节段模型试验,研究了移动检修轨道位置、有无安装悬臂、变化轨道导流板尺寸以及有无底板竖直稳定板时主梁涡振性能的变化。孙延国对宽高比为11.086的扁平钢箱梁进行了节段模型试验,研究了人行道栏杆、检修轨道、导流板对其涡振性能的影响。鲜荣对南京长江四桥主梁进行了两种缩尺比的涡振试验,研究了宽高比为10.771的扁平钢箱梁阻尼比、模型细部构造对其涡振区间和振幅的影响。辛大波对宽高比为8.589的扁平钢箱梁进行了节段模型试验,研究了风雨共同作用下开口钢箱梁模型和闭口钢箱梁模型涡振的起振风速、幅值及区间的变化。李永乐对宽高比为10.953的扁平钢箱梁进行了节段模型试验,研究了检修车轨道、栏杆、分流板、风攻角和阻尼等因素对主梁涡振性能的影响。朱思宇对宽高比为11.167的扁平钢箱梁进行了节段模型试验,发现了在大攻角来流作用下扁平钢箱梁涡振性能的改变。李薇对宽高比为9.6的扁平钢箱梁雷诺数改变时的静力三分力系数进行了计算。刘志文、宋锦忠、刘慈军研究了扁平钢箱梁成桥状态和施工状态、扁平箱梁外形、栏杆及下方路缘石对其气动力特性的影响。

### 3) 开展宽体扁平钢箱梁气动力性能研究的必要性

1966年,扁平钢箱梁首次出现在英国的威尔士塞文桥(主跨988 m,宽22.86 m)上。这

种全新的桥梁断面除了风阻系数和用钢量显著小于桁梁外,其颤振性能同样优秀,且后期的维护工作量和花费也显著降低。在全世界跨度排名前 10 位的斜拉桥和排名前 10 位的悬索桥中,使用扁平钢箱梁断面的就占了 11 座(悬索桥 5 座,斜拉桥 6 座),如果只计入主跨的梁型,则前 10 位的斜拉桥均采用了扁平钢箱梁。

前人研究主要关心的是有无车辆(汽车、列车)、不同车流及不同主梁断面形式下车辆-桥梁系统的气动力响应,很少有人研究具体车型、车辆数目及车流间距对涡振性能的影响,宽体式扁平钢箱梁出现时间较短,是一种比较新颖的梁型,因此,对宽体式扁平钢箱梁风-汽车-桥梁系统气动力性能研究的文献更为少见。但随着社会的发展,宽体式扁平钢箱梁将会被越来越广泛地应用于大跨度桥梁中,因此有必要对其进行研究。本书以位于西部的典型山区城市重庆市的寸滩长江大桥为工程背景,此桥的主梁是少见的宽高比高达 12 的宽体式扁平钢箱梁,采用风洞试验与数值模拟相结合的方法,对主梁自身以及该梁的汽车-桥梁系统的气动力特性进行研究,研究了大攻角、栏杆透风率、桥面粗糙度、不同车辆类型、车辆数目及车流间距对宽体式扁平钢箱梁气动力性能的影响,为后续的研究提供了一定的经验。

#### 1.2.4 大跨度悬索桥颤振特性

桥梁风致振动按照后果严重程度大致可分为两大类:一类是灾难性后果,产生的气动力会致使桥梁出现失稳现象,更有甚者会致使桥梁毁灭。这一类主要表现为发散性振动特征,如颤振和驰振。另一类并非灾难性后果,产生的气动力会致使桥梁出现限幅振动现象但不会出现毁灭。这一类主要表现为收敛性振动特征,如涡振和抖振。

##### 1) 国内外研究现状

风洞试验进行颤振导数识别最早出现并采用的是节段模型自由振动法;Scanlan 提出了采用分状态自由振动法进行颤振导数识别的理论;Beliveau 分别在风洞试验均匀流和紊流流场中进行主梁节段模型的颤振导数试验,并采用非线性最小二乘法的原理对试验数据进行处理,成功识别了颤振导数;Kumarasena 采用耦合状态自由振动法进行颤振导数识别的理论,成功识别了主梁断面的颤振导数;Shinozuka 在进行颤振导数识别的数据处理方法中引入了 ARMA 模型方法;Imai 等全面总结了基于 ARMA 模型方法的颤振导数识别理论;Yamada 等从耦合状态自由振动方法得到的时程曲线中采用扩展卡尔曼滤波法(Extended Kalman Filter, EKF)对主梁断面的 8 个颤振导数进行了同时识别;国内学者中,张若雪于 1998 年采用总体最小二乘法原理对主梁断面的 8 个颤振导数进行了识别;丁泉顺于 2001 年提出采用总体最小二乘法原理进行颤振导数识别的方法所存在的不妥之处,在其基础上得到了修正最小二乘法原理识别颤振导数的方法;李永乐于 2003 年在总结前述理论的基础上提出了加权整体最小二乘法,并成功地在节段模型风洞试验中对颤振导数进行识别;Chowdhury 于 2004 年引入迭代状态空间法对自由振动法风洞试验得到的位移时程曲线数据进行处理,成功地对 3 自由度方向的 18 个颤振导数进行了识别。

同时,风洞试验中发展起来的另一种颤振导数识别方法就是节段模型强迫振动法;Matsumoto 于 1995 年首次通过节段模型强迫振动法对颤振导数进行识别,通过变换不同的断面

形式定性总结了一定规律;Jensen 于 1997 年设计了一套强迫振动装置用于进行节段模型风洞试验的颤振导数识别(该装置为悬臂支撑,可通过分状态振动的方式对颤振导数进行一一识别);Cigada 于 1999 年设计了一套二自由度的强迫振动装置用于进行节段模型风洞试验的颤振导数识别,该装置为了消除传动机构中摩擦力对试验结果的影响,采取了直接由测力元件驱动的方式。国内学者,陈政清等于 2000 年开发了一套二自由度的强迫振动装置,通过采用节段模型强迫振动的方法对颤振导数进行了识别。发展至今,采用节段模型风洞试验识别桥梁颤振导数的方法已得到广泛应用。

计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)是以流体动力学作为基础,采用先进计算机进行数值计算,从而求解各种流动问题。随着计算机技术的发展,到 1960 年前后,计算流体动力学最早用于航天航空技术中,模拟飞行中的空气流动问题,后续应用范围扩展到能源、汽车等行业。直到 1990 年以后,计算流体动力学开始应用于土木工程行业中模拟结构的空气动力响应。

Larsen 等首先通过数值计算识别了理想平板的颤振导数,并依据临界风速计算方法得到了理想平板的颤振临界风速,接着又以丹麦大贝尔特桥(Great Belt Bridge)为基础,识别了主梁流线型断面的颤振导数,并经计算得到了颤振临界风速。Ostenfeld 通过采用计算流体动力学中的离散涡法和有线差分法对 5 种不同类型的主梁模型分别进行计算,识别了其各自的颤振导数,并经计算得到了颤振临界风速,总结了一定的规律。Ostenfeld、Larsen 等又采用数值模拟的方法对旧塔科马大桥的风毁过程进行了分析,获得了风毁过程中围绕主梁断面的旋涡脱落以及受到的气动力数据,同时得到了整个过程中风与结构相互作用的机理。随后,计算流体动力学在我国也取得了快速的发展,曹丰产等在计算流体动力学中引入有限元方法(Finite Element Method, FEM),通过采用数值计算和风洞试验两种方法对江阴长江大桥等多座大桥进行了抗风研究,经过对比分析获得了丰硕的成果,并验证了采用有限元法进行数值计算的可行性。祝志文等在计算流体动力学中引入了有限体积法(FVM),通过对平板进行数值计算识别颤振导数,同时又采用风洞试验的方法进行多次对比,验证了采用有限体积法进行数值计算的可行性。杨咏昕、刘儒勋等运用计算流体动力学的方法对中间开槽的主梁断面进行气动稳定性分析,并与相同条件下的风洞试验得到的结果进行对比,验证采用数值计算的方法进行气动稳定性分析的可行性。

流体动力学理论为桥梁抗风数值模拟方法奠定了理论基础,并逐步形成了计算流体动力学这种研究方法。与风洞试验模拟不同,数值模拟的方法采用计算机来对流场条件和桥梁结构进行模拟,并同时考虑两者之间的相互作用。由于受到计算机计算能力以及数值模拟方法等的限制,最开始实现的是均匀流场中的二维结构断面模拟,然后逐步向紊流场以及三维结构模拟的方法发展。与风洞试验相比,计算流体动力学具有很多方面的优势,虽然现在还不能取代风洞试验方法,只能作为一种辅助研究方法,但是随着计算机计算能力的提高以及数值模拟方法的不断更新,这种研究方法将成为未来发展的重点方向。

## 2) 开展颤振研究的必要性

颤振形成的气动力会导致桥梁发生失稳现象,桥梁结构出现的颤振现象主要包括分离流颤振和弯扭耦合颤振。分离流颤振的颤振较为普遍,常发生在非流线型断面的桥梁结构中,或者是流线型不好的断面桥梁结构中。气流流经桥梁的钝体断面,在迎风面的棱角处发