



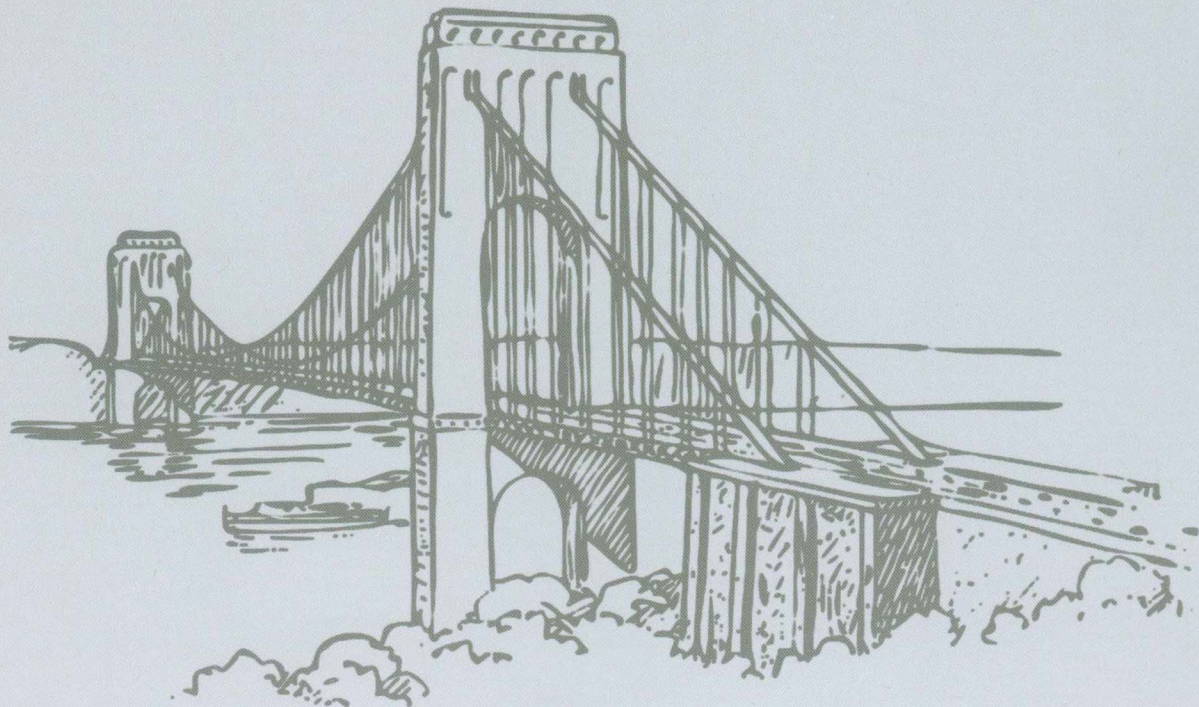
建筑与土木工程博士文库

Doctoral Thesis Collection in
Architectural and Civil Engineering

复杂地形地貌桥址区 风特性现场实测与数值模拟

FUZA DIXING DIMAO QIAOZHQU FENGTEXING XIANCHANG SHICE YU SHUZH MONI

■ 张明金 殷殿国 著



重庆大学出版社

内容提要

本书以西部复杂山区两个典型的深切峡谷桥址区地形为工程背景,采用现场实测和数值模拟相结合的研究方法,对峡谷地形桥址区的风特性进行了深入、系统的分析,重点讨论了桥址区热力效应、局部地形、来流风向等对桥址区风特性的影响规律,其研究成果可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂地形地貌桥址区风特性现场实测与数值模拟/
张明金,殷殿国著. -- 重庆:重庆大学出版社,2021.7
ISBN 978-7-5689-2771-0

I. ①复… II. ①张… ②殷… III. ①峡谷—长跨桥
—桥址—风载荷—数值模拟 IV. ①U448.431

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第108801号

复杂地形地貌桥址区风特性现场实测与数值模拟

张明金 殷殿国 著

策划编辑:林青山

责任编辑:李定群 版式设计:林青山

责任校对:王倩 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(营销中心)

全国新华书店经销

重庆新金雅迪艺术印刷有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:8.5 字数:205千

2021年7月第1版 2021年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5689-2771-0 定价:79.00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

山区峡谷地形较为常见,其地形复杂多变,现有相关规范和文献对山区风特性及其成因的研究较少。本书以两个典型的深切峡谷桥址区地形为工程背景,采用现场实测和数值模拟相结合的研究方法,对峡谷地形桥址区的风特性进行了深入、系统的研究。

首先,采用 MFAS 型相控阵声雷达(SODAR)风廓线仪和 CAWS600-RT 型四要素自动气象站对大桥桥址区风特性进行了现场实测,分析了桥位处的平均风速、阵风系数、风攻角、风剖面等风特性。研究表明,桥位处的阵风系数和地表粗糙度系数均比相关规范中常规平原地区的推荐值要大。桥面设计高度处的风攻角以负攻角为主,其数值也比相关规范中常规平原地区的要大,风攻角的散布范围和绝对值大小均随着高度的增加呈现减小的趋势。大桥位于高海拔高温差深切峡谷内,桥址区几乎每天下午起风,其平均风速往往达到 10.0 m/s。根据统计情况,桥位处的大风可分为两类:一类是受大尺度大气环流影响的大风降温过程;另一类是受小尺度范围内热力驱动而产生日常大风的过程。

其次,为探讨高海拔高温差深切峡谷桥址区日常大风的成因,采用四要素自动气象站、手持风速仪和便携式温度计对大桥桥址区风特性进行实测,分析了桥位处的平均风速与温度、日照及地形地貌等的相关性。结果表明,受热力驱动的小尺度局部大风基本上每天都存在,但风速不大,桥位处的设计风速仍受大范围的大气环流控制。小尺度的日常大风还受局部地形及随时间变化日照的影响,桥位处日常大风出现的概率较高,尽管不控制桥梁的设计基准风速,但影响桥梁的耐久性和行车舒适性。

再次,为研究高海拔高温差深切峡谷桥址区在热力效应作用下的风特性变化规律,在 FLUENT 中通过添加动量源项的方式实现了自然对流的模拟,并对模拟结果的正确性进行了验证。以位于四川西部深切峡谷区的某大桥为工程背景,结合桥址区现场实测的温度变化规律,采用 FLUENT 对考虑热力效应的桥址区风特性进行了数值模拟研究,讨论了不同热力因素对桥址区地表风特性的影响,分析了不同来流风速和热力效应联合作用下桥址区的风特性。分析结果表明,当来流风速为 0.0 m/s 时,热力效应引起的桥址区竖向最大风速为 3.0 m/s,水平风速为 6.4 m/s;当来流风速大于 5.0 m/s 时,热力效应的影响已不明显,此时桥址区的风场主要受来流风速、来流风向和局部地形的影响。考虑热力效应后,桥址区的地表温度分布显著不均匀,与不考虑热力效应时的计算结果差异明显。

最后,以计算流体力学软件 FLEUNT 为平台,采用有限体积法对计算域进行离散,基于 $k-\omega$ 湍流模型对桥塔附近的风特性进行研究,分析了不同来流风速及不同来流风向下桥塔附近风观测点的风速及风向变化规律,给出了相应的风速修正函数和风向角修正函数。研究表明,桥塔对测量结果的影响较大,塔上风传感器的安装位置应经过优化确定;风传感器位于迎风侧时风速比值在 0.45 ~ 1.30 波动,位于背风侧时风速比值在 0.05 ~ 1.25 波动;风速

仪较优的安装位置为离塔 1.0 倍特征尺寸以上且与来流方向的夹角为 $\pm(45.0^\circ \sim 56.5^\circ)$ 的区间内。基于优化后的安装位置在塔上和猫道上分别安装了风传感器,以现场实测数据为基础,对 V 形峡谷桥址区的风特性进行了分析,分别给出了桥址区低空和高空风参数的取值。

本书综合应用现场实测与数值模拟的研究手段,详细研究了复杂地形地貌桥址区的风特性,研究成果可为大跨度桥梁结构的风荷载设计提供依据。

著 者

2021 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 存在的问题	8
1.4 本书章节安排	9
第 2 章 桥址区平均风特性实测与分析	11
2.1 实测概况	11
2.2 风速	18
2.3 风向	24
2.4 阵风系数	27
2.5 地表粗糙度系数	28
2.6 风攻角	32
2.7 紊流度	33
2.8 不同站点风速相关性	35
2.9 小结	37
第 3 章 日常大风成因分析	39
3.1 观测概况	39
3.2 温度影响	40
3.3 局部地形影响	45
3.4 日照影响	46
3.5 综合分析	47
3.6 小结	48
第 4 章 考虑热力效应的桥址区风特性数值模拟	49
4.1 FLUENT 中自然对流的实现	49
4.2 模拟方法验证	50
4.3 有限元模型	54
4.4 结果分析	60
4.5 小结	75

第 5 章 塔上风传感器安装位置选择	76
5.1 工程背景	76
5.2 计算概况	78
5.3 塔周流场分析	80
5.4 风速的影响	83
5.5 风向的影响	84
5.6 观测结果修正	84
5.7 小结	85
第 6 章 桥址区脉动风特性实测与分析	87
6.1 观测概况	87
6.2 脉动风参数	89
6.3 风观测数据处理方法	93
6.4 脉动风特性分析	101
6.5 小结	115
第 7 章 结论与展望	117
7.1 结论	117
7.2 展望	118
参考文献	119

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景

近年来,随着“一带一路”倡议的实施和西部大开发进程的不断推进,社会发展对我国西部交通能力的要求也不断提高。因此,在西部复杂地形地貌区将修建越来越多的高速铁路和高速公路,西部多山地区也将修建越来越多的跨峡谷大桥,而为了确保桥梁结构和车辆在风荷载作用下的安全性,就必须合理确定桥址区的风特性,以便为桥梁的抗风设计和车辆的安全运营提供保障。

现行的抗风设计规范中对山区风通常只做了简单修正,如英国建筑风荷载设计推荐峡谷风平均风速应增大 10%^[1]。我国的《建筑结构荷载规范》^[2](GB 50009—2012)规定,对山间盆地、谷地等闭塞地形,可取修正系数为 0.75~0.85;对与风向一致的谷口、山口,可取修正系数为 1.20~1.50。同时,山区峡谷地形的不同以及大桥所处的高度差异将会导致地形修正系数在数值上的变化。由于大部分桥梁的桥面高度低于周边地形高度,因此,峡谷风的地形修正系数并非如规范中所描述的大于 1.0,而是与峡谷两侧地形边界层的发展有关^[2-8]。

一方面,已有的多数研究是针对沿海或内陆常规地区的风特性,部分文献研究是针对中低海拔山区桥梁风特性的现场实测,其河谷两岸山峰至谷底高差一般较有限(200~1 000 m)。目前,在建的位于西部峡谷区的大渡河大桥桥址区河谷两侧山峰海拔均超过 5 000 m,山峰至河谷底的海拔最大相差超过 3 500 m。大桥桥址区河谷两侧山顶均有终年不化的积雪,较为寒冷,而河谷内部(特别是底部)属于典型的干热河谷,温暖干燥。桥址区河谷下部与上部温差大,同时桥位处昼夜温差也较大。这些因素导致目前已有的研究成果很难直接应用到类似西部高海拔地区深切峡谷大桥的设计和施工中。

另一方面,山区风荷载对车辆的安全威胁也是巨大的,在国内有兰新铁路的“百里风区”^[9],最高风速可达 64 m/s^[10],每年八级以上的大风超过 100 d。自通车以来^[11](统计至 2002 年),兰新铁路因大风引起的列车脱轨、倾覆事故 30 起。2003 年,兰新铁路因大风封闭时间长达 50 h,造成直接经济损失 2 800 万元。2007 年我国新疆发生了 13 级大风,导致列车脱轨、倾覆,造成 4 人死亡,30 多人受伤的严重事故^[12]。日本自 1872 年开始铁路运输到 1986 年,共发生了 28 起由风引起的列车事故^[13-14]。2005 年,东日本铁道公司的“稻穗 14 号”新干线列车 6 节车厢全部脱轨,造成 4 人死亡,33 人受伤^[12]。调查表明,列车运行在桥梁上时横

向风的作用是引起列车出轨并翻倒的主要原因,而山区中桥梁受地形等因素的影响会使桥梁上的风荷载出现较明显的突变现象,这种较为复杂的风荷载无论是对列车还是汽车的安全运营均是较大的威胁。因此,明确山区桥梁桥址区的风特性显得尤其重要,它是保证强风作用下桥梁上车辆安全性和舒适性的基本前提。

综上所述,一方面,国内外目前对复杂地形地貌桥址区风场时空特性的认识较为有限,山区桥梁风场的时空特性又非常复杂,复杂的风场导致目前已有的桥梁抗风成果很难直接应用;另一方面,明确山区桥梁的风环境对保证车辆在桥上的安全运营有重要的意义。因此,对复杂地形地貌桥址区风特性的研究显得非常迫切和必要。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 地表风特性研究

1) 现场实测

现场实测研究一般首先通过区域内已有的气象站台或临时架设的观测点获得一定观测期内的风特性,然后根据某些相关关系或守恒特性建立区域内其他位置与已有风速资料观测点之间的联系,从而推算得到其他位置处的局部风特性。

关于风特性的现场实测开展得较早,在很多国家的建筑标准中所采用的 Davenport 谱^[15-16]就是 Davenport 在世界上不同地点、不同高度处进行风特性的观测,通过对 90 多次观测强风记录进行统计分析而得到的。Davenport 还提出了风剖面指数率模型和地面粗糙度等概念,描述了 3 种不同的地形类别,从而为风特性的研究奠定了基础。Duchene-Marullaz P.^[17]在 Nantes 地区进行了一系列风观测,在 3 个相互独立桅杆的不同高度处放置了风速仪,统计了两次强风实测数据,得出阵风因子、紊流积分尺度、风速谱等参数,并得到了湍流强度随高度增加而减小的规律,所得的风速谱和 Davenport 谱的形式是相同的。为了弥补各国规范中不同地表类别抗风参数不明确的问题,加拿大、英国、挪威、美国、日本^[18-22]等国家都开展了长期的风观测工作,按照风速、风向、地表类别等进行分类,建立了各自的基础资料数据库。对山区复杂地形的风环境观测,相关的学者也开展了大量的研究,如 Raupach 和 Finnigan^[23]、Miller 和 Davenport^[24]、Carpenter Paul 和 Locke Nicholas^[25]分别针对山顶区的风速加速效应、山体背风区的脉动风特性以及多重山脉的风场等进行了研究,给出了相应地区的实测风特性。Dickerson 和 Mascon^[26]、Sherman^[27]、Ludwig^[28]、Cheng 和 Shang^[29]、Finardi 和 Tinarelli^[30]基于质量守恒原理,根据已获得的观测资料,以地形特点和地表粗糙度为变量建立了复杂地形区内空气流动关系,得到研究区域内不同水平位置、不同高度处平均风的分布特点。其中,Finardi 和 Tinarelli 的分析结果与实测数据符合较好。

陈伏彬、李秋胜等^[31-33]以广州国际会展中心为工程背景,测试了 2008 年台风“鹦鹉”登陆时风特性及风致振动响应,获得了有实际工程意义的大跨结构风效应的实测数据。采用功率谱峰值拾取法、频域分解法和随机减量法拾取其振动模态,将实测结果与有限元数值计算结果进行对比,评估了数值计算的有效性;同时,基于近海岸 100 m 高测风塔的现场实测数据,

获得了台风登陆时平均风速剖面与湍流度剖面。在大气边界层风洞中,重现此台风风场与规范类风场条件,分别对某一体育场刚性模型开展了测压试验工作,详细分析与对比了两类风场条件下大跨屋面风荷载分布规律特征,评估了台风风场条件下风荷载取值。李秋胜、胡尚瑜等^[34-36]基于近海岸台风观测系统,获取了登陆台风10 m高度处三维风速数据,对在近海岸地貌强风条件下,10 m高度处的风特性和湍流特性进行了统计。对湍流强度的均值、阵风因子和湍流强度等风特性进行了分析,分析表明紊流积分尺度随湍流强度增加而相应减少。同时,基于双坡屋面试验房及台风观测系统,获取了近地台风风速实测数据,对近地边界层台风风特性进行了研究。近地边界层高度范围内的平均风速剖面符合对数律和指数律分布,平均湍流强度剖面符合指数律分布。与良态季风条件下相比,台风风剖面参数如摩擦速度值、地面粗糙度长度、风剖面幂指数值等相对变大,台风天气条件实测的平均湍流度相对季风实测值增大20%。Y. L. Xu等^[37]与我国香港特别行政区香港路政署合作,在青马大桥上建立了完善的风和结构健康监测系统,通过该系统对台风作用下桥梁的响应进行了实测,并将实测响应值与斜风作用的理论分析结果进行了对比。史文海^[38]对台风作用下低矮房屋及大跨度结构的风荷载进行了大量的现场实测,分析了台风荷载作用下建筑物所受风荷载的分布情况。王桂玲和蒋维楣^[39]、余琦和刘原中^[40]应用不同的插值方式由观测数据得到了所关注位置的风特性。

在桥址区风特性现场实测方面,宋丽莉、秦鹏、黄林宏等^[41-45]通过桥址区风速观测点的观测资料对考虑地形影响的桥址区风特性进行了分析,同时也对复杂山地近地层强风特性、广东沿海近地层大风特性以及新疆哈密地区的风特性进行了现场实测。庞加斌、林志兴、宋锦忠、李杏平等^[4,46-47]对上海市周边地区、苏通长江大桥桥址区和四渡河大桥桥址区风特性进行较长期的现场观测,分析了沿海和山区的强风特性,对峡谷区桥梁抗风设计风速的确定方法进行了讨论。朱乐东等^[48-50]对坝陵河大桥桥址区风特性进行了现场实测,分析了桥址区脉动风特性、风剖面形式以及设计基准风速等。武占科等^[51]对上海环球金融中心工程场地良态风环境特性进行了观测分析。胡峰强、陈艾荣等^[52]对四渡河大桥桥址区风特性进行了现场实测。刘健新、胡兆同、胡玥等^[53-58]对禹门口黄河大桥的风特性进行了现场实测,对桥址区的谱特性进行了分析。陈政清、张志田、金磊等^[59-61]采用悬索吊挂式系统对矮寨大桥的风特性进行了现场实测,分析了桥址区的风特性,确定了桥址区的设计基准风速。陈政清、柳成荫、倪一清^[62]通过岳阳洞庭湖大桥上安装的超声风速仪,对桥位处的风特性进行了长时间实测,实测结果表明桥位处的湍流强度比规范值要低很多,这种较低的湍流度导致了洞庭湖大桥容易发生风雨振动。刘峰、许德德等^[63]在北盘江大桥建立了风观测塔,对风速及风剖面短期风速测点与邻近气象站台进行同步观测,根据短期观测资料建立桥址区与气象站台间的相关关系,基于气象台站长期观测统计资料推算桥址区的设计风速,但其风速沿高度变化及脉动风特性分析中仍采用平坦开阔地区风特性规律,这种规律应用于复杂地形地貌桥址地区具有一定的局限性。大连理工大学欧进萍、胡俊等^[64-65]在东海某大跨度悬索桥上安装了风监测系统,对桥址区的风特性进行了长时间的实测分析。廖海黎、刘明等^[66]先后对苏通长江大桥和西堠门大桥风特性进行了现场实测,考察了桥址区的脉动风特性。李永乐等^[67]针对风速观测记录的特点,证明了利用不同高度处月最大风速记录推算地表粗糙度系数的可行性,并对通过最小二乘拟合得到的地表粗糙度系数进行了统计分析,并根据原始风速观测记录和基本风压分布图推算了实桥的设计基准风速。李永乐等^[6]基于深切峡谷桥址区现场实测风速记

录,分析了其与周边气象台站观测记录的相关性,指出风速相关分析中采用比值法的合理性,并针对深切峡谷区大跨度桥梁的特点提出了“复合风速标准”的概念,该桥风特性现场实测研究仍在进行中。黄国庆、彭留留、苏延文等^[68-69]开发了一套基于远程无线高效传输的风观测系统,该系统能在较恶劣的气候条件下工作,为山区峡谷地形中风参数的实测提供了便利。此外,气象部门也针对桥址区风特性开展了部分现场实测研究,如刘聪^[70]、陈正洪等^[71]。相关桥梁现场实测如图 1.1 所示。



图 1.1 现场实测照片

2) 风洞试验

地形模型风洞试验中,在模拟大气边界层的基础上,以实际地形为参照,按照一定缩尺比制作反映实际地形特点的地形模型,通过合理布置测点或流迹显示方式,获取特定位置的风特性和整个复杂地形区域内的风场分布。

Cheung 等^[72]对缩尺比分别为 1:200,1:1 500 的高 334 m 香港青衣山尾流区的风速、脉动特性及雷诺剪应力进行风洞试验测量。Rasouli 等^[73](2001)应用粒子显示技术,对香港地区 5.0 km × 5.0 km 范围(缩尺比 1:3 000)空气流动的水平及垂向速度分布进行了试验。

Yamaguchi 和 Ishihara 等^[74]对日本 Shakotan Peninsula 带悬崖地形特征的直径 8.0 km 地区(缩尺比 1:2 000)进行了地形模型风洞试验,对不同风向作用下不同位置的风特性进行了测量,指出在复杂地形下,风剖面不再以指数规律随高度变化。Gong 和 Ibbetson^[75]采用风洞试验的研究手段,对风场流经单个山体时的紊流特性进行了研究,给出了不同位置处的脉动风特性。Finnigan 和 Raupach^[76]以两个连续起伏的简单山体为研究对象,在风洞试验室中实测了两个山体不同位置,不同高度处的风场变化规律,其研究结果对复杂地形区的风特性研究有指导意义。Ferreira 等^[77]同样以两个连续起伏的简单山体为研究对象,给出了不同位置处的风场分布规律。Hyun Goo Kim 和 Choung Mook Lee 等^[78]通过风洞试验和数值模拟相结合的研究手段,研究了两个理想山体的紊流度、风剖面等分布规律,并且对两种研究手段的研究结果进行了对比分析。

同济大学胡峰强、陈艾荣和王达磊^[52]进行了桥址区半径 2.4 km 范围(缩尺比 1:1 000)的地形模型风洞试验。同济大学庞加斌、宋锦忠和林志兴^[4]建立了气象站台基本风速与海拔的拟合关系式,同时通过直径 10 km 范围(缩尺比 1:1 500)地形模型风洞试验对设计风速进

行地形修正。湖南大学陈政清、张志田和李春光等^[59,79]通过桥址区直径2 km范围(缩尺比1:500)的地形模型风洞试验,确定了桥梁的设计风速标准及脉动风特性。长安大学刘健新、胡兆同、张玥、张高良等^[54-58,80]对新疆、黄河等峡谷地区的风特性进行了风洞试验,并将试验结果和现场实测数据进行对比分析,研究了山区风特性参数风速剖面、湍流度、紊流积分尺度、风速功率谱等。重庆大学李正良、李鑫等^[81]通过风洞试验和数值模拟相结合的手段,分别系统地研究了简单山地地形(单个山体)和复杂山地地形(多个连续山体)的近地风特性,通过刚性山体模型风洞试验,对典型的单个三维山体风场进行分析,系统地探讨了不同的山体坡度、山体高度以及来流风速等对山体表面平均风速特性和脉动风速均方根值特性的影响。浙江大学项贻强、叶征伟等^[82]通过风洞试验和现场实测对山区高墩大跨连续刚构桥风环境及风荷载进行了研究。西南交通大学徐洪涛、王凯、廖海黎等^[83-85]先后对具有复杂地形地貌的坝陵河大桥进行了桥址区地形模型风洞试验的专题研究,研究表明坝陵河特大桥在横桥向来流作用下,跨中桥面高度处风速受到“峡管效应”的增速作用。峡谷内平均风剖面的分布具有明显的不均匀性,桥面高度处平均攻角范围高于规范要求值。桥面高度处的水平和竖向脉动风速功率谱与规范谱在高频区吻合较好,在低频区有较大差别。胡朋、李永乐等^[86-88]针对山区峡谷桥址区地形模型边界过渡段的合理形式,通过理想流体圆柱绕流推导出一种曲线过渡段,并与斜坡过渡段及不同长度的曲线过渡段的流动特性进行对比分析,提出了一种用于风洞地形模型试验的过渡段曲线形式,并将该过渡段应用到实际地形模型风洞试验中,取得了较好的效果。

上述地形模型风洞试验多数是面向工程应用的,在风场结构时空分布特性及空气流动机理等方面的基础性研究仍有较大的研究空间。桥址区地形对桥梁抗风性能的影响日益引起业界的重视,部分全桥气弹模型试验中已初步考虑了地形的影响,如日本多多罗大桥^[89]除进行大比尺(1/70)全桥模型风洞试验外,还进行了考虑周边地形的小比尺(1/200)全桥模型试验,但由于桥址区海拔高差不大,风洞试验中缩尺后的局部地形范围也较为有限。Maysville Bridge^[90]的1/150气弹模型在RWDI 4.9 m × 2.4 m风洞中进行试验,试验中考虑了地形的影响,但其两岸地形均为理想化的模型。Skarnsund Bridge^[91]施工阶段气弹模型风洞试验中考虑了西北部山体的影响,但其地形相对单一,此外风洞阻塞度超过了5%。西南交通大学郑史雄、李永乐、廖海黎^[92]在长沙浏阳河大桥气弹模型风洞试验中考虑了附近旧桥及周边地形的影响,分析了大桥在旧桥影响下的风荷载分布情况。需要指出的是,目前在气弹模型风洞试验中采用的地形模型多为抽象化的模型或相对简单的模型,考虑地形影响的气弹模型风洞试验研究尚处于探索阶段。国内几个大桥的地形模型风洞试验如图1.2所示。

3) 数值模拟

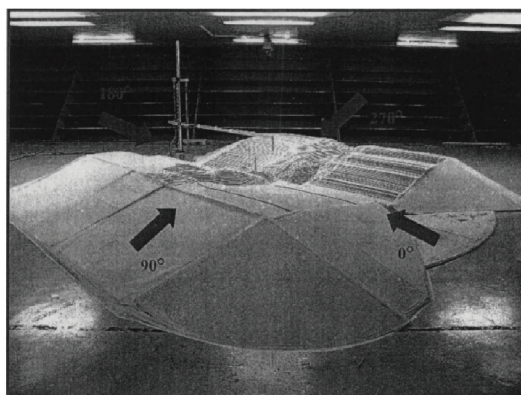
地形模型数值模拟通常以计算流体力学(CFD)为基础,计算模拟复杂地形区域上方的空气流动情况,从而得到边界层内不同位置处风特性分布规律。

Nomura^[93]在1997年应用有限元方法并考虑地球自转产生的科里奥利力(Coriolis force)对日本8.0 km × 8.0 km复杂地形区的风特性进行数值模拟,讨论了计算区域内风场的分布规律。Yamaguchi和Ishihara等^[94]在2003年,以日本某海边山区地形为研究对象,在进行风洞试验的同时基于雷诺时均流动方程与标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对该区域的风场进行了线性与非

线性的数值模拟,通过数值模拟得到了计算区域中的风速及风向分布情况,通过与试验结果的对比发现,非线性数值模拟结果与试验结果较吻合。Uchida 和 Ohya^[95] 在 2003 年,采用大涡模拟的方法对 $9.5\text{ km} \times 5.0\text{ km}$ 范围内复杂地形区空气流动进行了数值模拟,在数值模拟中使用粗糙方块制造了脉动风场,最后获得了计算区域内平均风速与脉动风速情况,研究了地形因素对风场的影响规律。Y. Q. Xiao 等^[96] 在 2007 年,针对 $10.1\text{ km} \times 6.9\text{ km}$ 区域内小岛的风速和风向进行了研究,在研究中应用不同的湍流模型进行了区域风场的仿真模拟,并将数值结果与实测结果进行了对比。Mouzakis 和 Bergeles 等^[97] 以二维山脊为研究对象,采用数值模拟的手段分析了气流通过该二维山脊时的流动规律。Coelho 和 Pereira^[98] 以简单地形为研究对象,采用二维和三维非结构化网格,通过数值模拟的方式对气流通过山体的流动规律进行分析。Maurizi A. 等^[99] 采用数值模拟的手段对葡萄牙北部一个山区的风环境进行了研究,给出了山区中风场变化规律。Kim H. G. 和 Patel V. C.^[100] 模拟了流体绕过山谷形成的风环境,其数值模拟结果与现场风观测的结果取得了较好的一致性。



(a) 四渡河大桥地形模型风洞试验



(b) 北盘江大桥地形模型风洞试验



(c) 矮寨大桥地形模型风洞试验



(d) 龙江大桥地形模型风洞试验

图 1.2 地形模型风洞试验

同济大学的胡峰强、陈艾荣等^[101] 以位于山区的贵州北盘江特大桥与湖北四渡河大桥所在周边地形为研究对象,开展了大型地形模拟风洞试验、桥位风观测和数值分析。采用 FLUENT 对桥位处的风特性进行了分析,探索了桥址区风场的分布规律,并在此基础上对山区桥梁的设计风速进行了合理推断。湖南大学陈政清、华旭刚等^[79,102] 开展了矮寨大桥桥址区风特性的研究,并且利用数值模拟的手段对大跨桥梁的耦合颤振问题进行了深入研究,提出

了一种在 ANSYS 中直接分析大跨桥梁三维全模态颤振的有限元模型和频域方法。哈尔滨工业大学肖仪清、李朝^[103-105]用不同的湍流模型对某山区地形的三维风场进行了数值模拟,提出了新的三维稳态轴对称静止型下击暴流和壁面冲击射流风场中径向速度的竖向形状函数,并改进了现有径向速度的径向形状函数的可调节性和精度。基于流体力学质量守恒方程,提炼了由径向速度形状函数推导竖向速度的形状函数的通用方法。长安大学刘健新、胡兆同、张玥等^[53-57]对峡谷河道变为宽浅河道的喇叭口地形风场进行了数值模拟。基于“数值风洞”模拟技术采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型按有实桥结构和无实桥结构两种情况建立数值计算模型,模拟了7种工况下桥位及其周边的风场,得到了桥位处风剖面、风场风速流线、压力流线、湍流等分布规律,并将计算结果和现场风观测数据进行了对比分析。西南交通大学祝兵等^[106-107]通过足尺现场的数值模拟和气象学资料建立了高耸建筑结构周围行人高度风环境的数学模型,并将所建立的数值模型应用于香港地区的建筑物周边风环境的评估。李永乐等^[5]针对深切峡谷桥址区进行了 $8.0\text{ km} \times 8.0\text{ km}$ 区域地形风场数值模拟分析,对比分析了不同风向情况下桥址区风速沿高度的变化情况,根据不同高度空气流动特点,提出将深切峡谷桥址区风场分为峡谷层、峰峦层和中高空层,根据风速沿主梁方向的变化特点,得出了平均风速和风攻角的联合分布,在一定程度上揭示了深切峡谷桥址区空间风场的分布特征。胡朋、李永乐等^[108]针对山区峡谷桥址区地形模型边界过渡段的合理形式,通过数值模拟的研究手段,找到一种较为合理的地形模型风洞试验过渡段曲线,并与斜坡过渡段及不同长度的曲线过渡段的流动特性进行对比分析。

近年来,数值模拟技术在风工程中的应用得到了较快的发展,CFD 方法能大大减少人力和资源的投入,且能定量地确定流场结构,有利于对空气流动机理的认识。但由于 CFD 方法在湍流与分离流模拟中的局限性,数值模拟计算结果的准确性有限,现阶段通常作为现场实测和风洞试验的补充研究手段。因此,在实际工程中应用的深度和广度仍有较大的空间。典型的数值计算网格和流线如图 1.3 所示。

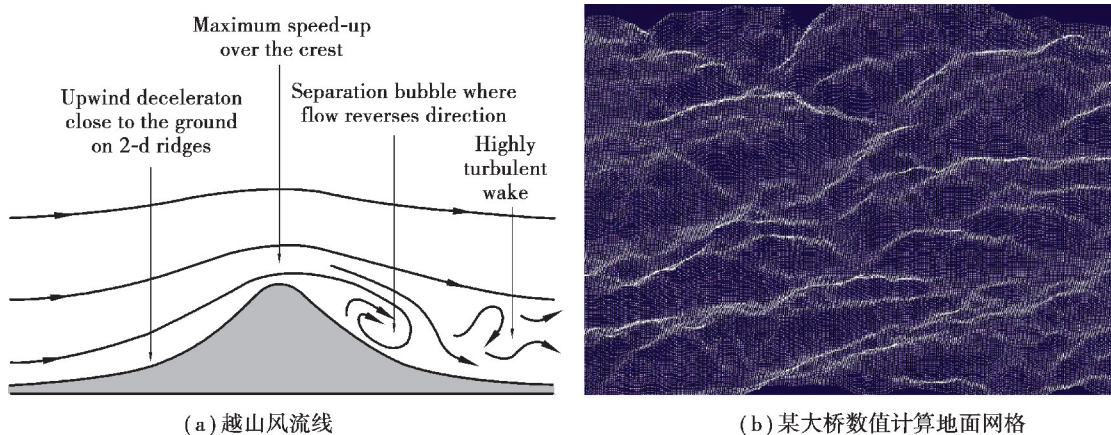


图 1.3 数值计算网格和流线

综上所述,风场时空分布特性的研究手段一般有现场实测、风洞试验和数值模拟3种。3种研究手段中,现场实测是最为直接和有效的,但现场实测往往受到地形和科研经费的限制,现场实测的风观测站数量通常也较为有限。在风洞试验中,可方便地对关心位置处的风特性进行测量,但是地形模型风洞试验的缩尺比通常较小,在如此小的缩尺比下如何保证风洞试

验的结果能代表实际地形的流动,这也是风洞试验的关键所在。同时,风洞试验中地形边界的处理也直接影响试验结果的准确度。数值模拟是几种研究手段中最为方便、投入最少的一种,但数值模拟的精度还有待进一步提高。因此,在地表风特性的研究中,通常采用几种研究手段相结合的方式。

1.2.2 热力效应对空气流动的影响

随着西部大开发的进一步实施,在川西高原地区将修建越来越多的大跨度桥梁。川西青藏高原过渡段常年少雨,山上植被较少,太阳照射较为强烈,同一地点的日温差波动通常为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。同时,桥址区地形极其复杂,桥位处小区域范围内地面海拔高度变化通常为 $3\ 000\text{ m}$ 以上,在桥位附近通常有终年不化的雪山存在,而峡谷内部通常为典型的干热河谷气候,温暖干燥,峡底和山峰顶部温差通常为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。在类似地区的风速也较大,因此,热力效应引起的空气流动不能轻易忽略。

在考虑热力效应引起的空气流动方面,相关学者的研究成果主要集中在室内通风换热和城市热岛效应两大方面。P. L. Betts 在 2000 年进行了小尺度封闭空间中(尺寸为 $2.100\text{ m}\times 0.076\text{ m}$)由热力效应引起的自然对流实测研究,实测了封闭空间中不同位置处的温度和风速分布情况^[109]。2011 年,M. E. Poulad 等考虑时间效应后,对小尺度封闭空间中(尺寸为 $0.970\text{ m}\times 0.056\text{ m}$)由热力引起的风特性进行了实测,实测了不同时刻下空腔中温度和风速的变化规律,同时也研究了温度在空腔内的传递过程^[110]。María José Suárez 和 Dominic O'Connor 用数值模拟的方式研究了地下室通风口的设置方式对对流换热的情况,并根据相关研究成果对通风口的设置进行了优化^[111-112]。Yuanshen Lu 通过试验分析了来流风和冷却塔之间的对流换热情况,通过研究以期提高冷却塔的效率^[113]。S. Suard 等研究了发生火灾时屋内的空气流动情况,研究结果可为火灾时逃生方案的制订提供参考^[114]。Kazuya Takahashi 等于 2004 年对东京市的商业区、大学校园和混凝土广场 3 个具有代表性的典型区域同时进行热量流动的观测,得到了不同区域的温度、湿度、风速以及显热、潜热等参量,分析了不同下垫面对热量流动的影响,然后利用计算流体动力学模型(CFD)模拟出气温、湿度、风速等参量,并与实测值进行比较,结果显示其计算模型能较好地预测城市热环境^[115]。Kuo H. L. 对大气和地表温度的变化规律进行了研究,但未考虑相应温度变化对风特性的影响^[116]。Ryozo Ooka 等在风洞中进行了考虑大气稳定程度的风洞模型试验,在试验中模拟了不同大气边界稳定程度下简单山体的风剖面特性^[117],但风洞试验中由于风洞尺寸的限制,风洞试验中也不能较好地考虑真实情况下由热力效应引起的空气自然对流现象。在国内,王翠云、李鹄分别以兰州和武汉为研究对象,基于遥感技术采用 CFD 仿真对城市的热岛效应进行了研究,分析了城市的温度、风速分布情况,其研究成果可为城市规划提供参考^[118-119]。

1.3 存在的问题

西部高海拔山区桥梁所处地理位置非常特殊,路线通过的绝大部分地区没有历史气象资料,缺乏沿线风特性相关的研究资料,同时国内外目前对高海拔高温差复杂地形地貌区风场时空特性的认识非常有限。此外,西部山区的大部分桥梁桥位较高,桥面距离谷底较高,桥位

处的风速可能受到地形的影响而有所加速,国内外如何确定类似地区桥梁基准风速的研究还没有统一的认识。因此,提出以下4个存在的问题:

(1) 复杂地形地貌区风参数实测研究

已有研究多数是针对沿海地区或丘陵地区的风特性,针对高海拔高温差复杂山区桥梁风特性的研究较为少见。在复杂地形地貌区,流场受到地形的影响较大,其风参数和常规平原地区有较大的区别,虽然目前已有相关学者进行了研究,但仍没达成统一的认识。不同地区所获得的风参数不能很好地应用到其他类似地区,如何通过多个桥位的现场实测得到具有代表性的风参数需要进一步研究。

(2) 复杂地形地貌桥址区日常大风成因

刘蓉娜等^[120]、廖晓春^[121]等通过现场实测,发现了在西部山区每天下午均会出现规律性波动的大风,但是相关文献中没有对这种日常大风形成的原因进行进一步的讨论。作者已有的观测也表明,在四川西部高海拔高温差山区存在着这种规律性的大风,其风速为10.0 m/s以上,几乎每天都会出现,出现的频率较高。同时,山区峡谷地形在我国中西部地区较为常见,其地形复杂多变,现有相关规范和文献中对这种日常大风的成因描述少有报道,分析这类日常大风的成因具有一定的挑战。

(3) 考虑热力效应的风特性数值模拟

通过相关文献发现,热力效应可引起空气的自然对流^[122-129]。以某大桥为例,大桥地处高山峡谷之间,桥位处峡谷接近南北方向,桥面设计高程为1 608 m,桥轴线向康定侧延伸10 km后,地面海拔高度由桥位处的1 608 m升高至4 500 m左右,桥轴线向雅安侧延伸5 km后,地面海拔高度由桥位处的1 608 m升高至3 700 m,峡谷两侧10 km范围内均有终年不化的雪山存在,而峡谷内部属于典型的干热河谷气候,温暖干燥,峡底和山峰顶部温差为20℃以上。因此,如何在数值计算中实现这种由局部温差引起的局部大风具有一定的难度。

(4) 现场实测中构筑物对风观测数据的影响

现场实测是目前山区桥梁桥址区风特性研究的主要手段之一。现场实测中,风观测点的选择大都是通过现场考察,结合现场地形后凭借研究人员的研究经验进行确定的。另外,风观测仪器通常是放在新建或已有的构筑物上,有必要针对构筑物对风观测数据的影响进行研究,以便对风观测仪器的安装位置进行优化,尽可能地减小构筑物对观测结果的影响。

1.4 本书章节安排

本研究拟围绕上述亟待解决的带有基础性的问题,以现场实测和数值模拟为主要的研究手段,以西部山区中两座在建的大跨度桥梁为研究背景,对桥址区的风特性开展研究。

本书第2章、第3章和第4章以大渡河大桥为工程背景,进行了桥址区平均风特性的现场实测和数值模拟研究;第5章和第6章以龙江大桥为工程背景,进行了桥址区脉动风特性的现场实测和分析。

本书的研究工作具体分为以下6个部分:

第1章:回顾并分析国内外已有的研究成果,基于已有的研究成果,提出在复杂地形地貌桥址区风特性研究中存在的一些问题和研究难点。

第2章:以位于高海拔高温差峡谷区的大渡河大桥为工程背景,采用 CAWS600-RT 型四要素自动气象站和声雷达风廓线仪,对桥址区的风特性进行了长时间现场实测,分析了桥址区的风速、风向、风攻角、阵风系数、地表粗糙度系数等风参数,并讨论了两个观测站点之间风速的相关性。

第3章:大渡河大桥位于高海拔高温差深切峡谷内,桥址区几乎每天下午起风,其平均风速往往为 10.0 m/s 以上。为探讨这类日常大风的成因,采用 CAWS600-RT 型四要素自动气象站、手持风速仪和便携式温度计对桥址区的风特性和温差场进行实测,分析了桥址区日常大风的形成原因。

第4章:结合现场实测的气象参数,以 FLUENT 为计算平台,通过二次开发实现了桥址区大尺度空间中考虑热力效应的空气流动数值模拟。采用数值模拟的方法,进行了仅考虑来流风速,仅考虑热力效应,同时考虑热力效应与来流风速,来流风向的影响,以及考虑时间效应不同工况的分析,讨论了不同工况下热力效应对桥位处风场的影响情况。

第5章:采用数值模拟方法对安装在桥塔上的风传感器位置进行优化,分析了桥塔上风传感器安装位置对测量结果的影响。

第6章:以龙江大桥为工程背景,在保山岸桥塔上离地 54.0 m 高度处安装了一套超声风速仪,同时在猫道上跨中处也安装了超声风速仪(超声风速仪离谷底 295 m)。通过两个观测点分别对桥址区低空(桥塔上)和高空(猫道上)的风参数进行了现场实测,给出桥址区高空和低空的紊流度、紊流积分尺度、功率谱等相关风参数。

第 2 章

桥址区平均风特性实测与分析

峡谷区风特性较平原地区有较大不同,峡谷区地形的不同以及大桥所处的高度差异将导致相关风特性有较大改变,而现场实测是较有效的一种研究手段。S. Finardi 等基于质量守恒原理,根据已获得的观测资料,以地形特点和地表粗糙度为变量建立了复杂地形区空气流动关系,得到研究区域内不同水平位置、不同高度处平均风的分布特点^[30]。国内一些学者分别对沿海平原地区的苏通大桥、西堠门大桥以及润扬大桥进行了桥址区风特性的实测^[46-47],也有一些学者对位于中西部山区的坝陵河大桥、四渡河大桥以及矮寨大桥进行了桥址区的风特性实测^[48-52]。但目前已有的多数研究是针对沿海或者是内陆丘陵地区的风特性,其河谷两岸山峰至谷底高差一般较有限。大渡河大桥桥址区为典型的 U 形深切峡谷,河谷两侧的山峰海拔均超过 5 000 m,山峰至河谷底的海拔相差超过 3 500 m。河谷两侧山顶均有终年不化的积雪,较为寒冷,而河谷底部温暖干燥,属于典型的干热河谷。本章以大渡河大桥为工程背景,针对这种高海拔高温差 U 形深切峡谷桥址区的平均风速、平均风向、风攻角、阵风系数及地表粗糙度系数等风特性进行实测与分析。

2.1 实测概况

2.1.1 观测站点设置

根据大桥所处的位置、走向、地区地形特点及已有气象站分布,经过多次现场勘察确定了观测点位置。2012 年 12 月 4 日在泸定县咱里村安装了 1 套 MFAS 型相控阵声雷达(SODAR)风廓线仪系统。该观测点位于大桥的下游(偏向泸定县城)约 500 m 处,向大桥跨中偏离康定侧桥塔约 250 m。测点精确位置采用专用手持 GPS 单点定位系统进行了定位测量,在有 5 颗卫星信号的情况下,声雷达风廓线仪观测站的经度为 E102°12'37",纬度为 N29°57'45",海拔 1 399 m,此时手持 GPS 测量精度为 6 m。

为考察桥址区典型位置 10 m 高度处的平均风特性,2012 年 12 月 23 日在桥位处风速较大的咱里村大风岗上安装了一座 CAWS600-RT 型四要素自动气象站。该位置处风速较大,四周开阔,没有树木和建筑物的遮挡,观测结果更具代表性。该观测站点位于大桥的轴线上,距