

第二十一届全国桥梁学术会议 论文集（下册）

2014 · 大连

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会 编



人民交通出版社
China Communications Press

Di-ershiiy Jie Quanguo Qiaoliang Xueshu Huiyi Lunwenji
第二十一届全国桥梁学术会议论文集

(下册)

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会 编

2014 · 大连



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书为第二十一届全国桥梁学术会议论文集,由中国土木工程学会桥梁及结构工程分会精选的170余篇优秀论文汇编而成。本论文集包括大会报告,设计与分析,施工与控制,抗震、抗风与动力分析,检测、加固及其他五个部分,全面、系统地展示了近一时期我国桥梁工程建设的新动态、新理念、新成果和新经验。

本书可供从事桥梁工程设计、施工、检测、管理等相关工作的技术人员参考使用,也可供大中专院校相关专业师生阅读学习。

图书在版编目(CIP)数据

第二十一届全国桥梁学术会议论文集·下册 / 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会编. — 北京:人民交通出版社, 2014.5

ISBN 978-7-114-11404-5

I. ①第… II. ①中… III. ①桥梁工程—学术会议—文集 IV. ①U44-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 086365 号

Di-ershiyi Jie Quanguo Qiaoliang Xueshu Huiyi Lunwenji

书 名:第二十一届全国桥梁学术会议论文集(下册)

著 作 者:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会

责任编辑:张征宇 郭红蕊

出版发行:人民交通出版社

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:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:72.5

字 数:1719 千

版 次:2014 年 5 月 第 1 版

印 次:2014 年 5 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-11404-5

定 价:220.00 元(上、下册)

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

第二十一届全国桥梁学术会议

学术委员会

名誉主任 范立础
主任 项海帆
副主任 葛耀君
委员 (以姓氏笔画为序)
牛 斌 吉 林 孙利民 肖汝诚
邵长宇 孟凡超 赵基达 秦顺全
高宗余

组织委员会

主任 肖汝诚
副主任 刘 征 杨志刚 张 哲
委员 (以姓氏笔画为序)
华彦常 孙 斌 武肖良 松 宇 徐太波 黄才良
廖 玲 穆 玉

主办单位

中国工程院土木水利与建筑工程学部
中国土木工程学会
中国土木工程学会桥梁及结构工程分会
大连市城乡建设委员会
大连市星海湾开发建设管理中心

协办单位(排序不分先后)

中铁十九局集团第五工程有限公司	四川天元机械工程有限公司
中交一航局第三工程有限公司	镇江蓝舶工程科技有限公司
中交第二公路工程局有限公司	大连天禄防腐工程有限公司
大连理工大学土木工程建筑设计研究院有限公司	衡水宝力工程橡胶有限公司
中交第一航务工程局有限公司	大连顾德防腐工程有限公司
大连船舶重工集团有限公司	宁波路宝科技实业集团有限公司
中铁宝桥集团有限公司	中咨工程建设监理公司
江苏法尔胜股份有限公司	山东省交通工程监理咨询公司
	大连理工工程建设监理有限公司

承办单位

《桥梁》杂志社
大连理工大学

目 录(下册)

四、抗震、抗风与动力分析

127. 天津海河吉兆桥抗震设计概述——混合耗能减隔震系统的应用 韩振勇 袁 涌(819)
128. 大连星海湾跨海大桥抗风性能研究..... 张 哲 许福友 应旭永(823)
129. 大连星海湾跨海大桥的减震设计研究..... 朱巍志 张 哲 付 裕 姜 霖(831)
130. 大跨度自锚式悬索桥黏滞阻尼器减震控制..... 张连振 陈天亮 饶建雄(838)
131. 黄冈公铁两用斜拉桥抗震性能研究..... 阮怀圣 李龙安 何友娣 屈爱平(844)
132. 地震作用下高墩大跨桥梁时变易损性分析..... 李立峰 吴文朋 胡思聪 刘守苗(851)
133. 结构参数对连续梁桥抗震性能的影响
..... 柏小勇 杨 扬 魏红一 王志强 闫兴非(857)
134. 既有城市高架桥抗震能力评价与加固分析研究
..... 李永波 闫兴非 郭卓明 王志强 魏红一(864)
135. 跨断层简支梁桥的抗震措施研究..... 刘雪松(871)
136. 多球面滑动摩擦隔震支座力学性能研究
..... 韩 强 林亮亮 温佳年 许紫刚 贾俊峰(877)
137. 考虑变摩擦系数的 FPB 隔震桥梁抗震性能研究 李立峰 胡思聪 王辉辉(885)
138. 桥梁横向新型金属阻尼器及其应用..... 王晓伟 倪晓博 沈 星 叶爱君(892)
139. 超大跨度斜拉桥空气静力和动力稳定性研究..... 张新军 姚 美(900)
140. 大跨度缆索承重桥并列索气动力的雷诺数效应
..... 杜晓庆 张利平 刘庆宽 马文勇 刘小兵(909)
141. 典型桥梁断面静力三分力系数研究..... 马 凯(914)
142. Π 形截面平行双幅桥的颤振稳定性及其气动控制措施的试验研究

.....	钱国伟	周 锐	曹丰产	葛耀君(924)
143. 大跨度斜拉桥裸塔气弹模型新型高精度风振响应测试技术.....	高广中	朱乐东(932)		
144. 大跨度双层桥面钢桁架悬索桥动力特性分析				
.....	应旭永	张 哲	许福友	檀永刚(939)
145. 基于多体动力学的铁路简支梁桥车—桥振动分析.....	何旭辉	邓朋儒	朱 伟(947)	
146. 小跨宽比缆索承重钢箱梁桥模态分析主梁有限元模型研究.....	陈炳耀	朱乐东(954)		
147. 曲线箱梁桥动力特性正交法参数分析				
.....	黄新艺	卓卫东	上官萍	魏祥湘 陈力波(961)
148. 固支—铰支拉索近似频率计算公式及求解条件讨论.....	秦小平	廖敬波	孟利波(969)	

五、检测、加固及其他

149. 大连星海湾跨海大桥钢桁架整体节点设计及疲劳试验研究				
.....	王会利	张 哲	付 裕(977)	
150. 试论桥跨与修订内河通航标准问题.....	陈国虞(982)			
151. 基于红外热成像的钢桥疲劳裂纹检测研究.....	叶华文	段 熹	杨军川(990)	
152. 基于实测应变数据的斜拉桥疲劳评估.....	汪 威	白植舟	陈德伟 区达光(996)	
153. 基于 MATLAB 平台的传感器优化布置工具箱的集成开发及应用				
.....	梁 鹏	王晓光	李 斌	吴向男 陈文强(1003)
154. 基于监测数据统计特征的拱桥安全预警系统设计	邱 园	孙利民	孙守旺(1014)	
155. 大跨连续刚构桥墩梁固结处模型试验	杨炎华	周仁忠	郑和晖(1021)	
156. 两种爬拱式桥梁检查车走行系统 ...	王春芳	游 冰	张 剑 刘 俊 刘 熊(1030)	
157. 中小跨径混凝土桥梁加固决策支持系统设计				
.....	项贻强	邢 骋	张 翔 邢 渊	邵林海(1036)
158. 公路桥梁加固技术分析	陈存夫(1042)			
159. 拱桥吊杆加固体系的应用探讨	石 伟	华剑平	郑国坤	王瀚德 雷 欢(1047)
160. 等跨无梁板桥病害成因分析及加固措施研究	潘 聪	廖碧海	祝云峰(1053)	
161. 梁桥加固中遇到的若干问题及解决方案	王 骞	张 哲(1061)		
162. 预应力碳纤维板快速加固新工艺在厦门大嶝大桥中的应用				
.....	卓 静	龚黎明	李高华	赵乐渝 钟 建(1068)
163. 亡羊补牢 犹未为晚——防止船撞桥灾害性事故再度发生的迫切性和可能性	朱海涛(1074)			
164. 下白石特大桥非通航孔桥墩船撞风险分析	钟 元	王 峰	张可成(1080)	
165. 大连星海湾跨海大桥引桥设计——跨海大桥墩身浪溅区腐蚀机理及防腐措施的运用	宋芝芝	侯 凯	熊明威	吴晓峰(1086)
166. 预应力混凝土斜拉桥长期性能的研究	刘德启	白植舟	陈德伟(1095)	
167. 混凝土桥梁钢筋锈蚀寿命简化数值评估方法	涂 熙	狄 谨(1101)		
168. CLT 与钢筋混凝土材料对环境影响的对比分析	张志伟	傅梅珍	李 娜(1108)	
169. 铜陵长江公路大桥桥墩冲刷与防护研究	王国民(1113)			

170. 桥梁坍塌成因与应对措施 彭栋木(1120)

171. 油性密封蜡在拉索锚具防腐填充的运用
..... 黄永玖 冯亿生 闫云友 李华萍 梁黎霞(1127)

172. 40SiMnVBE 高性能新钢在桥梁及结构工程上的应用 韩建中 白 涛(1133)

127. 天津海河吉兆桥抗震设计概述

——混合耗能减隔震系统的应用

韩振勇¹ 袁 涌²

(1. 天津城建集团有限公司; 2. 华中科技大学)

摘 要:天津海河吉兆桥为三跨变截面连续钢—混凝土组合桁架桥,位于高烈度地震区,地震动峰值加速度为 $0.15g$ 。针对吉兆桥的结构特点,提出了采用由铅芯隔震橡胶支座和软钢耗能阻挡装置组成的混合耗能减隔震系统进行减隔震设计的新思路,达到了提高结构抗震性能、降低工程费用的目的。本文主要介绍吉兆桥的抗震设计思想、减隔震设计方法及主要技术内容。

关键词:吉兆桥 组合桁架桥 铅芯隔震橡胶支座 软钢耗能阻挡装置 混合耗能减隔震系统

1 引言

我国是世界上多地震国家之一,具有强度大、频率高、震源浅的特点。近年来,我国地震活动较为频繁。随着城市化及经济的高速发展,对交通线的依赖越来越强,重要桥梁作为震时生命线工程的重要组成部分,其抗震性能的保障和提高显得尤为重要。

传统桥梁结构主要依靠增强自身的强度和变形能力来抵御地震作用,但 1994 年美国北岭地震、1995 年日本阪神大地震和 2008 年我国 5·12 汶川地震中,大量结构倒塌,说明以“抗”为主要途径的传统方法存在问题。研究者开始研究通过在结构上布置减隔震装置,寻求“隔”、“减”的方法来抵御地震灾害。

对于桥梁减隔震设计,一般需要使用一种水平刚度较小的支承,如水平力分散型橡胶支座,也可使用集水平刚度小、带有较大耗能功能于一体的支承,如铅芯隔震橡胶支座、高阻尼橡胶支座等。但是,所有这些支承,在地震时都需要发生大的变位,才能发挥其功效,也就是其支承的上部结构在地震时都需要发生大的位移,才能减少地震作用,产生好的减隔震效果,这对结构设计是不利的。特别是桁架桥,由于隔震后的桥梁自振周期较长,上部结构的位移很大,容易发生桥梁碰撞。

对于类似于桁架桥的减隔震设计,理想的目标是在有效减隔震的同时,将位移控制在较小、可控的范围内。本文根据吉兆桥的结构特点,对实现上述理想减隔震设计目标的关键技术问题论述与探讨。

2 工程背景

天津海河吉兆桥地处天钢柳林地区城市副中心,跨越海河,是继海河上游综合改造开发后,海河中游后五公里提升改造的第一座过河桥梁。结合周边建筑情况,吉兆桥整体设计采用欧式风格。吉兆桥主桥为三跨变截面钢—混凝土组合桁架梁桥,全长 200m,跨径布置为 55m+90m+55m;桥宽 40m,横向共由 9 榀桁架组成,桁架中心间距为 4.6m。吉兆桥采用的组合桁架结构形式,与钢箱组合梁桥相比,具有节省钢材及工程造价等优点。针对吉兆桥结构特点,在负弯矩区桥面板采用了新型抗拔不抗剪 T 形连接件,并结合部分组合技术、双重组合技术,以及优化的施工工序,有效解决了负弯矩区混凝土桥面板易开裂、中支点位置下弦杆钢板易失稳等设计难题。吉兆桥场地抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为 $0.15g$,属于高烈度地震区。图 1 和图 2 为吉兆桥实景图。

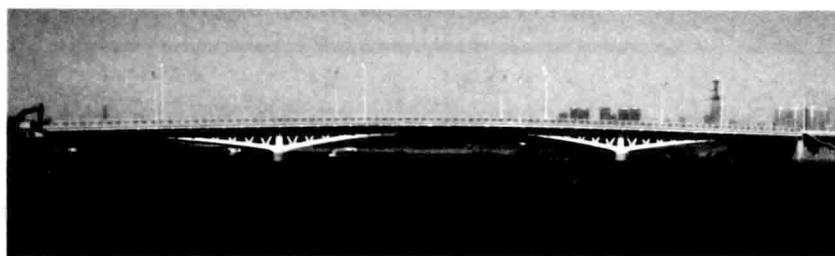


图 1 吉兆桥实景图(1)



图 2 吉兆桥实景图(2)

3 减隔震设计

3.1 铅芯隔震橡胶支座

铅芯隔震橡胶支座,是在普通叠层橡胶支座中插入铅芯,以改善橡胶支座阻尼性能,目前,已较多应用于桥梁减隔震设计中,尤其是国家行业标准《公路桥梁铅芯隔震橡胶支座》(JT/T 822—2011)的颁布,为其大规模推广提供了契机。

铅芯隔震橡胶支座的水平刚度较小,可以使地震位移反应集中在支座上,通过延长结构的基本周期,避开地震能量集中的范围,从而降低结构的地震力;同时,可将地震力均匀地分散到各个桥墩,避免了地震力集中作用在某一个桥墩上。宏观表现为:地震时,支座发生大的变位,其所支承的桥梁上部结构绝对位移较大,可能造成设计上的困难,甚至导致桥梁碰撞或落梁。

目前,铅芯隔震橡胶支座有单铅芯隔震橡胶支座及多铅芯隔震橡胶支座等多种产品,国内支座厂家产品的静力特性(耐久性、温度稳定性、竖向承载能力等)、动力特性(刚度及阻尼、大变形能力及动力参数)均较良好且稳定。

3.2 软钢耗能阻挡装置

软钢耗能阻挡装置如图 3 所示,为位移型耗能装置,可通过软钢腹板的剪切变形,实现在小变形条件下,耗散大量能量的目的。其特征如下:①在正常使用条件下,可保证梁体自由移动,不产生附加内力。②对地震产生的梁的快速变形,能迅速耗能,减小梁的加速度和位移。③与黏滞流体阻尼器不同,对速度无要求。④可承受多次反复地震作用。⑤造价低,安装简便,易更换,可靠性佳,是混凝土抗震挡块的理想替代品。目前,该装置在日本等地震多发国家已经得到了广泛应用。

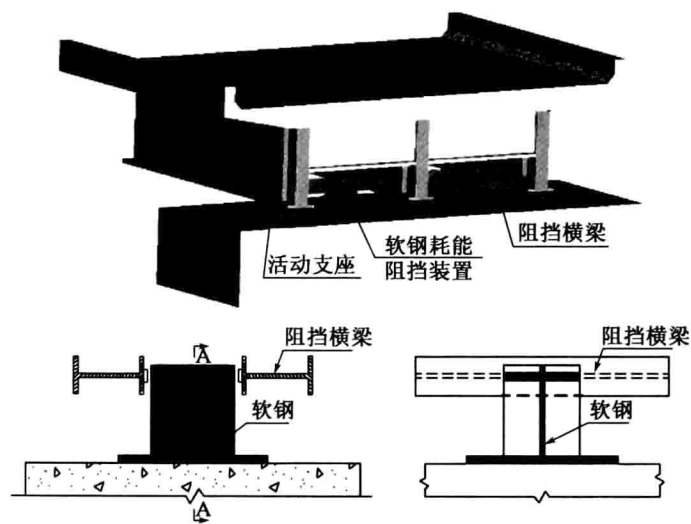


图 3 软钢耗能阻挡装置

目前,国内软钢产品主要有屈服点为 160MPa 和 225MPa 的两种产品,屈强比均小于 80%,伸长率接近 60%,延性非常好。

设计研究阶段,为了避免软钢耗能阻挡装置腹板过早发生破坏,分别将腹板做成了正方形、镜片型、两边凹型和两边凹并加固型四种形态;针对其材料特殊的特点,进行了专门的焊接工艺评定,并对其安装形式进行了研究。其中,采用两边凹并加固型腹板的软钢耗能阻挡装置的滞回曲线比较饱满,其典型力学实验曲线如图 4 所示。

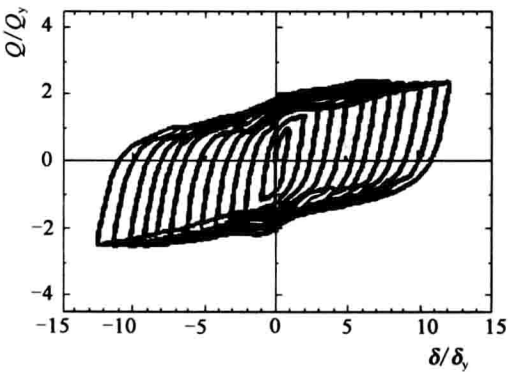


图 4 软钢耗能阻挡装置典型力学实验曲线

3.3 混合耗能减隔震系统

吉兆桥采用的混合耗能减隔震系统,由铅芯隔震橡胶支座和软钢耗能阻挡装置组成,如图 5 所示。

混合耗能减隔震系统的减隔震设计思想为:铅芯隔震橡胶支座与软钢耗能阻挡装置的间隙之间由隔震支座发挥作用,当上部结构触及软钢耗能阻挡装置时,由软钢的耗能作用来减小上部结构的地震位移响应。减隔震系统的模拟采用三折线弹簧单元恢复力模型,如图 6 所示。

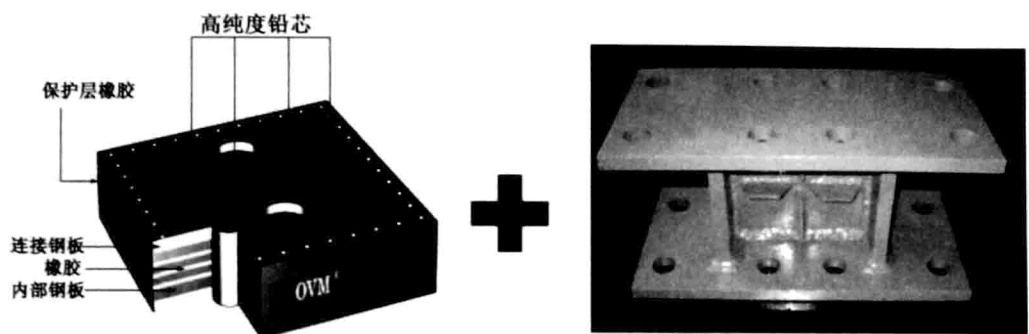


图 5 混合耗能减隔震系统

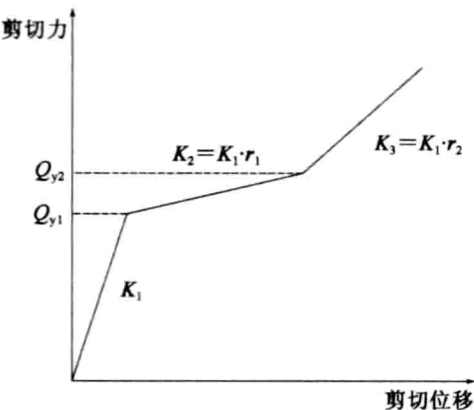


图 6 三折线弹簧单元恢复力模型

图中, K_1 -铅芯隔震橡胶支座屈服前刚度;
 K_2 -铅芯隔震橡胶支座屈服后刚度;
 K_3 -位移增大至阻挡装置发挥作用后, 铅芯隔震橡胶支座与软钢耗能阻挡装置的组合刚度。
 吉兆桥在国内首次用软钢耗能阻挡装置取代普通的混凝土挡块, 形成了混合耗能减隔震系统, 使得结构在小震时, 只有铅芯隔震橡胶支座发挥作用; 在大震时, 通过软钢耗能阻挡装置, 对大位移变形采取柔性阻挡, 并耗散地震能量减少上部结构的位移量, 防止落梁及梁间碰撞, 有效地提高了桥梁的抗震性能。

4 结语

天津海河吉兆桥工程首次用软钢耗能阻挡装置取代普通的混凝土挡块, 形成了混合耗能减隔震系统, 充分发挥了铅芯隔震橡胶支座及软钢耗能阻挡装置的优势, 实现了有效减隔震的同时, 地震位移较小、可控的目标。其中, 软钢耗能阻挡装置具有造价低、安全性能好、可承受反复地震作用、便于更换、性能可靠等优点, 可有效避免落梁及碰撞, 是刚性抗震混凝土挡块的理想替代品, 具有广泛的推广应用价值。尽管当前我国对软钢耗能阻挡装置的应用远不及日本普遍, 相信不久的将来一定会得到应有的重视与发展, 这正是本文的目的所在。

参 考 文 献

[1] 范立础, 王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

128. 大连星海湾跨海大桥抗风性能研究

张 哲 许福友 应旭永
(大连理工大学风洞实验室)

摘 要:大连星海湾跨海大桥既是我国首座双层桥面钢桁架柔性悬索桥,也是我国首座双锚碇都修建在海中的大跨度悬索桥。本文介绍了通过风洞试验及数值模拟对该桥进行抗风性能研究的部分工作,主要包括全桥结构自振特性分析、基于主梁节段模型的桥梁颤振稳定性风洞试验、斜风条件下双层钢桁架主梁在不同攻角时的静风力系数测定风洞试验、基于三维桥塔整体模型的基底风载内力风洞试验及大涡数值模拟。研究结果为桥梁抗风性能设计提供了重要的依据和参考。

关键词:桥梁 风工程 斜风 数值模拟

1 引言

大连市星海湾跨海大桥是我国首座双层桥面钢桁架柔性悬索桥,也是我国首座双锚碇都修建在海中的悬索桥。该桥跨径布置为 $180\text{m}+460\text{m}+180\text{m}$,建成后为我国长江以北主跨最大的桥梁。主梁为高 10m ,宽 24.8m 钢桁式加劲梁,上层桥面宽 21.46m ,下层桥面宽 17.46m 。主缆成桥矢跨比为 $1/6.63$,横桥向间距 25.2m ,成桥状态下跨中垂度为 69.36m 。桥塔为钢筋混凝土塔,高 112.3m ,横桥向为门式框架结构,每根桥塔的塔柱间设置两根横梁连接,在主塔内侧壁与主梁间安装横向抗风支座。由于该桥地处大连星海湾地区,当地风速较高,因此有必要对该桥的抗风性能进行全面研究,以策安全。本文首先介绍了该桥有限元建模分析方法,为进行桥梁主梁节段模型设计提供模态参数;然后介绍了颤振稳定性试验及主要结论;接着通过风洞试验获得了双层钢桁架主梁断面在不同攻角和偏角条件下的静风力系数;最后介绍了基于三维桥塔整体模型通过风洞试验及大涡数值模拟两种方法进行基底风载内力(系数)的对比研究。

2 结构自振特性分析

桥梁结构自振特性采用空间有限元分析获得,因此动力反映结果的正确与否直接取决于空间有限元模型建立的是否合理,能否用来真实地模拟实际结构。影响桥梁结构的自振特性分析的因素主要有结构本身刚度和质量的分布及结构的边界约束。本文采用 ANSYS 公司授

权的结构分析软件对该桥进行结构自振特性分析。钢桁架加劲梁采用三维弹性梁单元 beam4 模拟;主塔塔柱及横梁采用三维渐变不对称梁单元 beam44 模拟;主缆及吊杆是只受拉构件,采用三维杆单元 link10 模拟,并定义 link10 的只受拉特性,在其受压时,单元刚度矩阵为零,可以模拟索的松弛;刚性吊杆及中央扣斜拉索采用刚臂单元模拟;行车桥面系和附属人行道等恒载的质量采用质量单元 mass21 模拟,分析时只计入其质量而未计入其刚度。根据结构设计图纸,耦合了加劲梁与主塔在横桥向及竖向自由度;主缆与塔顶三个线位移自由度全部耦合;主缆和主塔底部完全固结,未考虑桩土效应;加劲梁端部节点纵向自由度释放,约束横向及竖向自由度。悬索桥为非线性大位移的柔性缆索结构体系,在恒载作用下,柔性的缆索处于受拉状态,具有初始拉力的缆索可提高结构的抗弯刚度,帮助结构承受活载,这部分恒载引起的刚度称为重力刚度。此外,主缆的线形及应力随着施工阶段的不同而不断变化,通常的自振特性分析均是在设计成桥状态的基础上展开的。所以,有限元建模过程的重要一步便是调节主缆的初始应力,使得恒载作用平衡状态与设计成桥线形一致,以“主梁竖向挠度及内力最小”目标,通过不断迭代试算,最后得到与成桥线形较吻合的平衡状态,即为自振特性分析的起始状态。在进行结构自振特性分析时,采用 Block Lanczos 方法求解,该方法是经典 Lanczos 的改进,用于求解大型系统的特征值问题,具有求解速度快、可以指定特征值范围等特点。桥梁自振特性分析有限元模型见图 1。

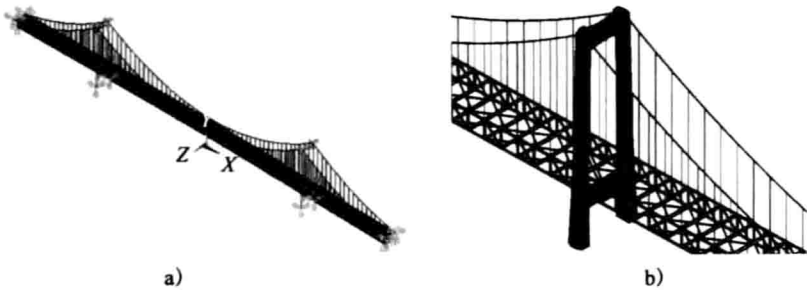


图 1 三维有限元模型

在进行主梁节段模型质量系统模拟时应使用考虑了全桥振动效应和振动空间特性的主梁等效质量和等效质量惯矩。主梁等效质量和等效质量惯矩可分别计算为:

$$m_{eq}^d = \frac{\widetilde{M}}{\int_{L_g} \varphi_d^2(x) dx} \tag{1}$$

$$J_{meq}^x = \frac{\widetilde{M}}{\int_{L_g} \varphi_{\theta x}^2(x) dx} \tag{2}$$

- 式中: $\widetilde{M}$ ——各阶固有模态对应的广义质量;
 $\varphi_x(x)$ ——各阶固有模态主梁 x 处沿纵桥向振型值;
 $\varphi_y(x)$ ——各阶固有模态主梁 x 处沿竖向振型值;
 $\varphi_z(x)$ ——各阶固有模态主梁 x 处沿侧向振型值;
 $\varphi_{\theta x}(x)$ ——各阶固有模态主梁 x 处绕纵桥向转角的振型值;
 L_g ——大桥主梁全长。

一阶正对称竖弯和一阶正对称扭转振型是影响桥梁颤振临界风速的主要振型,这两个振型的频率分别为 0.261Hz 与 0.727Hz,对应的等效质量与等效质量惯性矩分别为 37.99t/m 与 3 848t·m²/m。

3 颤振稳定性检验

采用节段模型进行颤振稳定型检验,试验模型安装采用弹簧悬挂二元刚体节段模型的方式,即节段模型通过 8 根弹簧悬挂在外置式支架上。根据实桥主梁断面尺寸和风洞试验段尺寸以及直接试验法的要求,选取节段模型的缩尺比为 $\lambda_L=1/40$ 。模型悬挂支架位于风洞外壁,吊臂全长 1.1m,有效吊点间距为 0.72m。模型全长 2.96m,模型宽度 0.62m,长宽比接近 5:1。刚体节段模型的骨架由方铝管制作。成桥状态考虑了位于桥面的防撞栏,防撞栏用 ABS 塑料板制成。试验在均匀流场中进行,采用直接试验法对成桥状态进行了一5°、-3°、0°、+3°和+5°五种攻角的竖弯和扭转两自由度耦合颤振试验,实桥与模型风速比为 6。各种条件下的颤振导数不再给出,成桥状态节段的颤振临界风速试验结果汇总于表 1。

成桥状态节段模型颤振临界风速试验结果 表 1

攻角(°)	-5	-3	0	-3	-5
试验风速(m/s)	>15	>15	14.8	14.3	14
换算实桥风速(m/s)	>99	>99	97.7	94.4	92.4
颤振检验风速(m/s)	<70.9	<70.9	70.9	<70.9	<70.9

试验结果表明:成桥状态 5 种初始风攻角条件下的颤振临界风速均超过 90m/s,该桥能够满足颤振检验风速 70.9m/s 的要求。

4 主梁节段模型测力试验

由于该桥主梁断面为双层钢桁架结构,因此在斜风条件下的风荷载比正交风条件更为不利,因此需要通过风洞试验获得不同风向角条件下的静风荷载系数,为桥梁抗风分析提供必要的参数。节段模型安装在风洞中的转盘上,如图 2 所示,由位于风洞底板下、转盘机构上的高精度高灵敏度底支式六分量应变天平支撑,作用在节段模型上的气动力由该六分量应变天平测量。模型比例 1:40,模型的长度 L 、宽度 B 和高度 D 分别为 2.9m、0.62m 和 0.275m。试验工况包括:成桥状态攻角: -6°~+6°,间隔 2°,施工状态 0°,风偏角范围:0°~90°,步长 5°;风洞试验风速 15m/s。

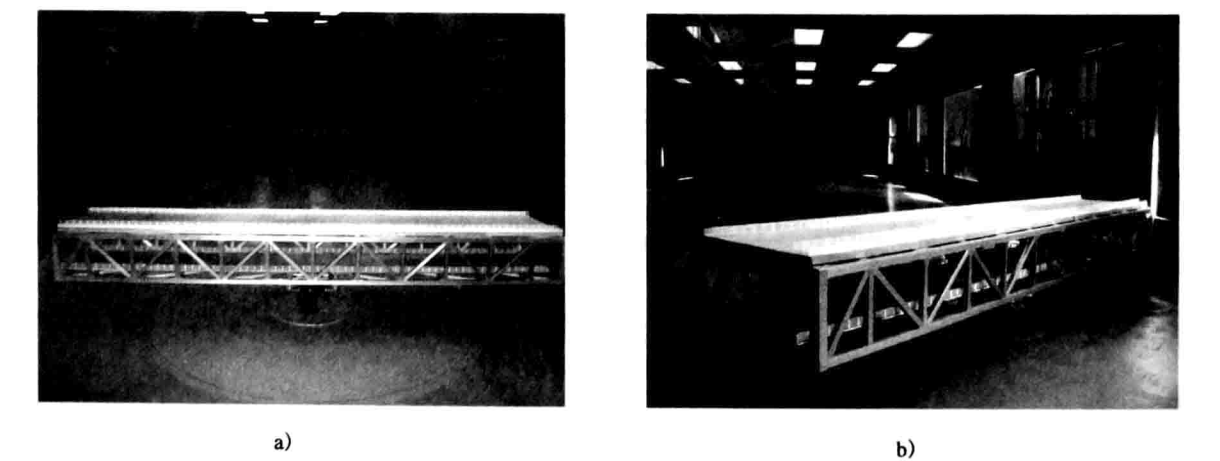


图 2 风洞中主梁测力模型

风轴系下的轴力系数、阻力系数定、升力系数、升力矩系数分别定义如下:

$$C_A = \frac{F_A}{1/2\rho U_\infty^2 HL}$$

$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho U_\infty^2 HL}$$

$$C_L = \frac{F_D}{1/2\rho U_\infty^2 BL}$$

$$C_M = \frac{M_T}{1/2\rho U_\infty^2 B^2 L}$$
(3)

式中： U_∞ ——试验风速；

ρ ——空气密度， $\rho=1.225\text{kg/m}^3$ ；

L ——节段模型长度。

其中轴力和阻力系数以主梁高度 H 为参考长度，升力系数和扭矩系数以主梁断面的宽度 B 为参考长度。试验所得的成桥和施工状态主梁断面气动力系数随风攻角和风偏角变化曲线如图 3 所示。由此可见：

(1) 成桥状态下的轴力系数与攻角基本没有关系，即攻角对轴力系数基本没有影响；在 $0^\circ\sim 55^\circ$ 范围内，轴力系数随风偏角的增加而增大，在 $55^\circ\sim 90^\circ$ 范围内，轴力系数随风偏角的增加而减小；风偏角在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 范围内，施工与成桥状态轴力系数基本一致；随着风偏角的增加，施工状态的轴力系数高于成桥状态轴力系数；成桥状态和施工状态轴力系数极大值分别约为 0.265 和 0.29，分别约为对应阻力系数极大值的 50% 和 70%。

(2) 施工状态下的阻力系数明显低于成桥状态阻力系数；随着风偏角的增大，两种状态下的阻力系数都随之降低。成桥状态下，攻角越大，阻力系数也越大。

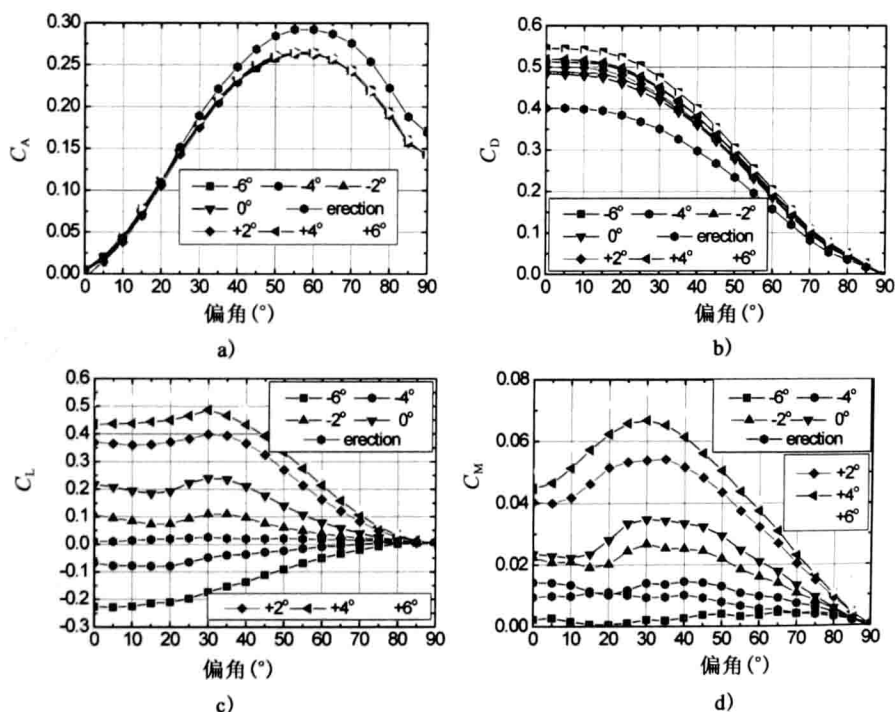


图 3 不同风攻角和偏角条件下的主梁静风荷载系数

(3) 相同风偏角、不同攻角条件下升力系数差异非常明显；施工状态在各种风偏角条件下的升力系数都很小；风偏角在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 范围内，各种风攻角条件下成桥状态升力系数变化不明

显;当风偏角大于 $2^{\circ}\sim 0^{\circ}$,升力系数绝对值随着风偏角的增加而降低,说明偏角越大,越有利于减小升力。

(4)对于 -6° 风攻角条件下成桥状态升力矩系数,在各种风偏角下都非常接近于 0;施工状态和 -6° 风攻角条件下成桥状态升力矩系数也较小;其他四种风攻角条件下成桥状态升力矩系数,风偏角在 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内,升力矩系数随风偏角的增加而增大,当风偏角在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内,升力矩系数随风偏角的增加而减小。

(5)根据本文双层桥面主梁的 4 种静风荷载系数可知,正交风条件下的静风荷载未必是最不利的,需要综合考虑多种斜风条件下的风荷载。

5 桥塔基底内力风洞试验与数值模拟

一般而言,在风荷载作用下,桥塔根部内力最大。以往研究桥塔风荷载系数一般基于桥塔节段模型测力或数值模拟,然后通过积分获得桥塔根部内力。本文采用全桥模型测力试验和三维大涡数值模拟获得基底内力系数,并对两种方法获得的结果进行对比分析。

5.1 风洞试验

模型的缩尺比为 $1/100$,采用钢管作为芯梁,用 ABS 板制作外衣。该模型在保证足够的刚度之外,仅要求几何形似,试验风速为 16m/s 。风洞中桥塔整体试验模型如图 4 所示,模型固定在六分力高频测力天平上。模型的测量坐标系为: x 轴与桥的纵轴一致, y 轴与桥的横轴一致, z 轴与塔的竖向对称轴一致。采用逆时针转动模型来实现不同的来流风向角, 0° 风向角表示来流为横桥向(即与 y 同向), 90° 风向角表示来流为纵桥向(即与 x 轴同向)。风洞从 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$,每隔 5° 进行了 18 个风向角的测力试验。风洞测力试验在均匀流场中进行,风洞试验和数值模拟得到的各个力和力矩分量均做无量纲化处理,并定义桥塔塔底截面体轴风载系数:

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 S_x}$$

$$C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 S_y}$$

$$m_x = \frac{M_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 S_y H}$$

$$m_y = \frac{M_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 S_x H}$$

(4)



图 4 桥塔刚性模型的风洞试验

式中: ρ ——空气密度;
 U ——风速;
 S_x ——纵向投影面积;
 S_y ——横向投影面积;
 H ——模型的高度;
 C_x 和 C_y ——纵向阻力系数和横向阻力系数;
 m_x 和 m_y ——横向阻力距系数和纵向阻力距系数。

5.2 数值模拟

与风洞试验模型比例相同,数值计算模型也按 1 : 100 缩尺比,并严格按照工程设计方案的 比例尺寸建立 3D 几何实体模型。依次把两根塔柱横桥方向分为左、右两塔柱,每根塔柱从 底部到顶部分为 8 块;塔柱之间的横梁分为下横梁和上横梁,总共分块 18 块,模型分块编号如 图 5 所示。针对每个分块各方向的体型系数,其系数定义与式(4)类似。放置在计算域中轴线

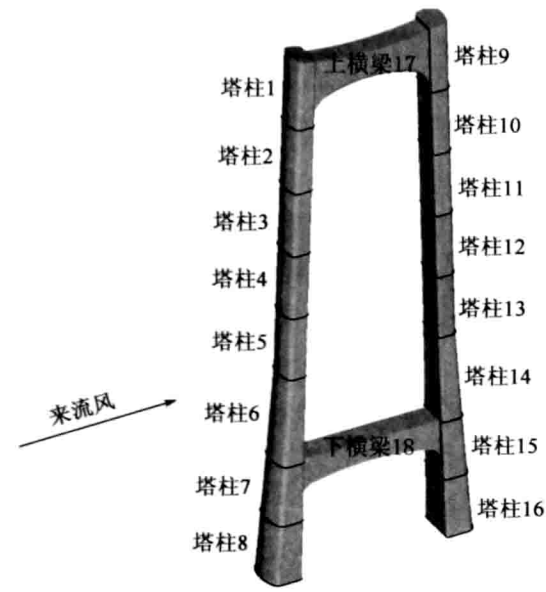


图 5 模型分块编号(0°风向角)

上的桥塔模型宽 0.395m,高 1.11m,计算区域尺寸 长×宽×高为 6m×2m×2m,模型置于流域沿流动 方向前 1/3 处,阻塞率为 1.6%,满足数值模型外 流场中一般认为的小于 3%的原则。为了提高计 算效率,同时兼顾现有的计算资源,将计算域做分 块处理:在原流域中心分割出一个小长方体形成内 域(内域尺寸长×宽×高为 1.5m×1m×1.2m),使 用加密四面体非结构化网格进行离散;内域和原流 域的边界面之间称为外域,由于这部分形状比较规 则,采用六面体结构化网格进行离散。在入口及模 型前端采用与流场方向平行的六面体网格可以准 确的保持流场特性,避免四面体网格的离散误差。 计算域整体网格布置和模型局部网格如图 6 所示。 三维大涡数值模拟计算量非常大,因此本文仅计算 了 0°、15°、30°、45°、60°、75°、90°7 个风偏角工况。

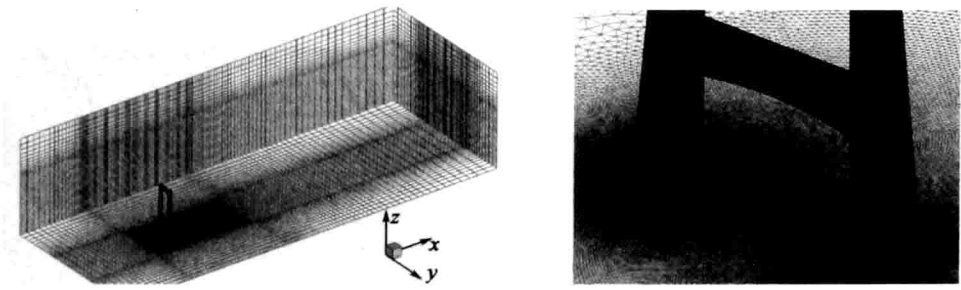


图 6 桥塔三维整体模型网格示意图

5.3 结果对比分析

风洞试验及数值模拟计算对比结果见图 7。鉴于篇幅,每分块数值模拟结果不再给出。 由图 7 可见:

- (1)对于沿桥轴向的 C_x 而言,风洞试验和数值模拟结果吻合良好。在风偏角 $0^{\circ}\sim60^{\circ}$ 范围 内, C_x 随着风偏角的增加而提高,然后随之降低,这意味着并非风向沿桥轴向条件下桥塔沿桥 轴向的风荷载最大,风洞试验结果表明 90° 和 60° 条件下的差值比例达到 15%以上。
- (2)对于沿桥轴向的 C_y 而言,风洞试验和数值模拟结果基本吻合,但相对 C_x 吻合度较 差。在风偏角 $0^{\circ}\sim30^{\circ}$ 范围内, C_y 随着风偏角的增加而提高,然后随之降低,这意味着并非风 向沿桥横向条件下桥塔沿桥横向的风荷载最大,风洞试验结果表明 0° 和 30° 条件下的差值比 例达到 80%以上。
- (3)因此在计算桥塔风荷载时,务必需要考虑斜风条件下的不利效应,否则可能会带来一