



第二十二届全国桥梁学术会议 论文集（上册）

2016 · 广州

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会 编



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

Di-Ershier Jie Quanguo Qiaoliang Xueshu Huiyi Lunwenji
第二十二届全国桥梁学术会议论文集

(上册)

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会 编

2016 · 广州



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

内 容 提 要

本书为第二十二届全国桥梁学术会议论文集,是由中国土木工程学会桥梁及结构工程分会精选的190余篇优秀论文汇编而成。本论文集包括虎门二桥,设计,施工,抗风与抗震,检测、加固、试验与新材料五个部分,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

第二十二届全国桥梁学术会议论文集 / 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会编. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016. 4

ISBN 978-7-114-12911-7

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(2016)第 065026 号

书 名:第二十二届全国桥梁学术会议论文集(上册)

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.ccpress.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:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:85.75

字 数:2124 千

版 次:2016 年 4 月 第 1 版

印 次:2016 年 4 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-12911-7

定 价:220.00 元(上、下册)

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

第二十二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 左智飞 吉 林 孙利民 苏权科 肖从真
肖汝诚 宋神友 邵长宇 孟凡超 高宗余

组织委员会

名誉主任 刘士杰
主 任 肖汝诚
副 主 任 陈冠雄 李建钢 朱永灵 吴玉刚 刘刚亮 杨志刚
委 员 (以姓氏笔画为序)
王福敏 卢正宇 冯为军 华彦常 孙 斌 李 冰
李 霆 杨 雪 汪德全 张 君 张 洁 张 敏
张 鸿 张少锦 陈伟乐 武肖良 松 宇 欧阳效勇
罗国强 罗艳莉 赵 军 贺拴海 秦一栋 高 璞
崖 岗 梁立农 梁振西 韩 玉 韩振勇 谢正元
詹建辉 廖 玲

编辑委员会

主 任 肖汝诚
副 主 任 孙 斌 杨志刚
委 员 (以姓氏笔画为序)
于淑霞 牛 斌 吉 林 肖从真 邵长宇 孟凡超
秦一栋 高宗余 郭海龙 葛耀君 穆 玉

主办单位

中国土木工程学会桥梁及结构工程分会

广东长大公路工程有限公司

协办单位

广东省公路建设有限公司虎门二桥分公司

广州珠江黄埔大桥建设有限公司

中交第二公路工程局有限公司

天津城建设计院有限公司

德阳天元重工股份有限公司

柳州欧维姆机械股份有限公司

长安大学

上海浦江缆索股份有限公司

迪奇亚(中国)工业技术有限公司

招商局重庆交通科研设计院有限公司

广东省交通规划设计研究院股份有限公司

土木工程防灾国家重点实验室

港珠澳大桥管理局

长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室
(中交二航局)

中铁大桥勘测设计院集团有限公司

广西路桥工程集团有限公司

湖南省大岳高速洞庭湖大桥建设开发有限公司

江苏法尔胜缆索有限公司

中国建筑第六工程局有限公司

中南建筑设计院股份有限公司

湖北省交通规划设计院

广东华路交通科技有限公司

广州之窗商务港

承办单位

《桥梁》杂志社

目 录(上册)

一、虎 门 二 桥

1. 虎门二桥工程关键技术..... 张喜刚 代希华 吴明远 张太科 梅 刚(3)
2. 大跨度悬索桥地震作用分析的反应谱 CQC 法假定影响研究
..... 李保木 苏 成 陈太聪 代希华 鲜 荣(13)
3. 大跨度悬索桥吊索振动控制技术研究
..... 汪正兴 王灿东 梅 刚 王 波 柴小鹏(20)
4. 双跨连续悬索桥结构体系比选 赵 磊 王 策 梅 刚(27)
5. 行波对虎门二桥坭洲水道桥结构地震响应的影响分析 冯清海 李 冲(34)
6. 纤维对混凝土早期塑性裂缝抑制作用研究与应用
..... 张文忠 罗超云 何 涛 李林贵(39)
7. 坭洲水道桥东锚碇圆形基坑施工监测与数值模拟研究
..... 王中文 罗超云 王晓佳 罗人昆 贺 炜(45)
8. 坭洲水道桥索塔景观及横梁造型方案比选及分析 马玉全 孙向东 陈枝洪(53)
9. 虎门二桥 1 960MPa 主缆索股技术研发与应用
..... 崖 岗 张家锋 徐国平 吴明远 梅 刚(60)
10. 虎门二桥 BIM 建养一体化建设期应用实践 代希华 李法雄 杨 昀 鲜 荣(67)
11. 虎门二桥 S2 标主塔承台大体积混凝土温度裂缝控制技术
..... 朱小金 丛 磊 杨宏坤 贺佳文 王 伟(74)
12. 虎门二桥 S2 标索塔承台基坑开挖施工关键技术
..... 赵廷建 朱小金 王根生 苗创开 杨 超(82)
13. 虎门二桥工程总体设计..... 吴玉刚 吴明远 代希华(87)

14. 虎门二桥大沙水道桥西锚碇基坑开挖数值模拟分析	徐进	朱小金	赵廷建	王博	武尚伟	杨涛	(100)
15. 虎门二桥大跨度悬索桥动力特性及抗震性能研究	王昊	王灿东	梅刚				(107)
16. 虎门二桥引桥总体设计	徐德志	万志勇	梁立农				(113)
17. 虎门二桥节段拼装箱梁结构设计	徐德志	彭李立	彭亚军				(119)
18. 虎门二桥坭洲水道桥索塔结构设计及受力分析	马玉全	孙向东	陈枝洪				(125)
19. 虎门二桥项目大沙水道桥节段模型风洞试验	肖飞	鲜荣	马存明				(132)
20. 虎门二桥钢箱梁外表面涂层配套防腐性能研究	李杰	梅刚					(140)
21. 虎门二桥桥位处风场特性观测研究	张太科	鲜荣	薛冰洁				(147)
22. 虎门二桥高效平稳安全钢箱梁检查车研发设计	吴明远	梅刚	张家锋				(154)
23. 虎门二桥流塑状淤泥地层超大型钢板桩围堰设计计算	武尚伟	朱小金	鲜亮	张典杰	郭雷刚		(159)
24. 虎门二桥清水混凝土模板体系研究	朱超	卢靖宇	邓春林				(167)
25. 虎门二桥深厚流塑状淤泥层旋挖钻施工工艺及质量控制	朱小金	吴建军	丛磊	王德港	宗帅		(172)
26. 虎门二桥超大型地下连续墙施工关键技术	杨敏	朱小金	王博	鲜亮	赵廷建		(178)
27. 虎门二桥锚碇基础设计	陈占力	梅刚	吴明远				(186)
28. 钢护筒效应对嵌岩灌注桩的水平受力特性影响因素分析	夏熙	黄雨梦					(193)
29. 钢桥面板 U 形肋与面板连接焊缝检测技术	姚志安	曾志斌					(197)
30. 高精度智能全站仪在虎门二桥跨河高程测量中的应用	苏慈	王晓佳	陈宇琪	朱书敏			(205)
31. 掺疏水化合孔栓物砂浆力学性能研究及应用	王晓佳	何涛	王访晖	韦桂深	吴楠		(211)
32. 基于二维码扫描的短线法预制梁厂动态管理研究	郭佳	李法雄	代希华	鲜荣	黄厚卿	郭毅霖	(218)
33. 混凝土结构耐久性关键技术							
——腐蚀环境调研及结构耐久性评估	李彦兵	王胜年	邓春林				(223)
34. 超软地基现浇内衬底模施工技术	唐孝全	彭波	范恒				(231)
35. 超厚流塑状淤泥覆盖层地连墙成槽关键技术浅析	唐孝全	彭波	黄维				(237)
36. 超深地连墙流塑状淤泥覆盖层下地连墙渗水情况分析	李开心	郑红杰	唐孝全	李宁	唐炫		(243)
37. 锚碇地连墙开挖施工监测中数值计算的指导意义	钟建锋	王晓佳	樊荣	匡一成	蔡俊华	马玉刚	(252)
38. 锚碇地连墙基础垂直度控制关键技术	王晓佳	樊荣	罗超云	蔡俊华	匡一成		(258)
39. BIM 在短线法预制梁厂可视化管理中的应用	闫振海	郭毅霖	黄厚卿	王晓夫	杨昀	李法雄	(264)
40. BIM 技术在虎门二桥三维协同设计应用研究	周旭东	王煦	李茜	董军	郭佳	郭毅霖	(269)

41. BIM 技术在虎门二桥海鸥互通交通工程中的应用
..... 曹植英 陈建璋 赖嘉华 李法雄 黄厚卿(274)

42. BIM 技术在桥梁工程中的应用展望
..... 杨 昀 刘汉勇 李法雄 吴玉刚 代希华(278)

43. C40 聚丙烯纤维混凝土工作性能及抗压强度影响因素研究
..... 罗超云 何 涛 王晓佳 陈晓芳 范 鹏 黄 生(284)

二、设 计

44. 中国港珠澳大桥桥梁设计与技术特点
..... 孟凡超 刘明虎 吴伟胜 张革军 张 梁 常志军(293)

45. 一种考虑人群随机性的人行桥横向动力失稳临界人数计算方法
..... 彭友路 吴定俊(307)

46. 一般大气环境下基于可靠度的钢筋混凝土桥梁退化研究 程利鹏 肖汝诚(313)

47. 三塔自锚式悬索桥静力性能参数分析 陈 辉 肖汝诚 孙 斌(325)

48. 大宽跨比空心板桥荷载横向分布系数计算方法比较分析
..... 刘 超 马汝杰 徐 栋(332)

49. 广州南沙凤凰三桥方案竞赛与设计创新 梁立农 何 海 魏朝柱 陈万里(338)

50. 中国与欧洲规范关于梁轨相互作用的对比研究 刘文硕 戴公连(350)

51. 中国青岛海湾大桥设计与项目特点 孟凡超 张革军 杨晓滨 王 麒(357)

52. 中美欧公路桥规的局部承压构件计算方法对比分析
..... 王晓春 黄 侨 梁程亮 王 涛(366)

53. 节段预制拼装桥墩技术及其应用 赵松华 李国平(374)

54. 节段预制拼装箱梁桥的混合配束设计研究 刘 钊 郑开启 惠 卓 贺志启(385)

55. 北京兴延高速桥梁设计创新实践 潘可明 肖永铭 贺大朋(392)

56. 四线连续梁拱组合桥梁设计研究 杨欣然 苏 伟 冯 沛 延力强(401)

57. 外伸跨加劲梁对单跨悬吊悬索桥静动力特性影响的分析
..... 黄 振 沈锐利 李 京(407)

58. 在役铆接钢桁架桥疲劳剩余寿命评估与试验研究 耿 波 袁 佩(414)

59. 有限元辅助设计优化模型试验 金 剑 贾丽君 肖汝诚(422)

60. 轨道交通 U 梁板厚对结构振动影响的研究 程石利 李 奇(428)

61. 自锚式斜拉—悬吊协作体系关键力学性能研究 续慧杰 孙东利 陈 辉(436)

62. 创新设计是开启桥梁强国的金钥匙 林长川(443)

63. 多塔斜拉桥刚构体系概念设计新技术
..... 王解军 岳 推 黄 佳 张贵明 王 卿(448)

64. 多跨连续梁桥 T 构到 II 构合龙过程研究 叶再军 周翔海 杨学峰(452)

65. 异型系杆拱桥稳定性参数分析 郭 路 贾丽君 回海博(456)

66. 连续钢箱梁的轻型组合桥面结构设计 郑楷柱 何 海 梁立农 邵旭东(462)

67. 松原市天河大桥悬索桥设计要点

——一座独特的双塔三跨式空间缆索自锚式悬索桥

- 苗家武 王维红 赵进锋 康仕彬 刘化淦(466)
68. 单跨独斜塔地锚式斜拉桥静力计算简化模型 孙测世 周水兴(472)
69. 波形钢腹板组合梁斜拉桥腹板剪力分配规律研究
..... 邓文琴 张建东 刘 朵 胡 隽(478)
70. 组合梁斜拉桥桥面板斜向布置预应力筋研究 ... 文 艺 刘玉擎 蔺钊飞 房 涛(484)
71. 城市桥梁与建筑美学
——桥梁工程师的创新、创意与创作..... 徐利平(490)
72. 某无背索斜拉桥主塔裂缝成因分析 石雪飞 张智然 阮 欣(497)
73. 某高架桥盖梁开裂分析 张振宇 陈德伟(504)
74. 钢板—混凝土组合桥面板连接件受力机理分析 廉径超 刘玉擎 徐晓青(509)
75. 香火岩大桥主拱构造设计与钢管应力计算
..... 周水兴 杨 健 万 麟 张 敏 孙测世(516)
76. 独塔地锚式悬索桥结构设计及受力分析 马玉全 孙向东 郭文华 钟健聪(522)
77. 桥梁用高强度混凝土抗氯离子侵蚀性能的几个关键因素分析 董 礼 李国平(530)
78. 索塔横梁设计中的关键性问题 黄 琛(535)
79. 预应力活性粉末混凝土连续箱梁桥的设计与施工
..... 方 志 郑 辉 黄政宇 吴罗明 吕东生 石钰胜 马 威(543)
80. 预制节段拼装双线薄壁槽型梁简介与设计计算 邢晓辉(552)
81. 预制拼装桥墩的力学性能研究及工程应用 周 良 闫兴非 李雪峰(558)
82. 波形钢腹板组合梁箱梁挠度实用计算方法 何 鹏 顾 萍(564)
83. 基于全耦合法的桥梁焊接节点疲劳损伤分析 李立力 刘 纲(570)
84. 基于拓扑优化的桩基承台传力机理研究 杨介立 王同华 魏红一 王志强(577)
85. 基于肯特指数法的桥梁工程设计风险评估 刘 畅(583)
86. 悬索桥主缆缠丝力分析 张培君 马 磊(588)
87. 斜拉桥换索设计方法探讨与研究 李竹箐 贾丽君 徐 驰 张 川(594)
88. 混凝土桥塔非线性温度场分布特性研究 王 凯 宋 军 阮 欣(600)
89. 智能支座的研究现状与发展 李燕峰 袁万城(608)
90. 漕溪路系杆拱连续梁桥换索计算分析 刘亚敏 张海荣 王召祐 苏 伟(614)
91. 薄壁圆环截面构件的空间网格模型 赵 莉 徐 栋(621)
92. PC 折线塔斜拉桥成桥恒载状态静力平衡特征分析 李艳凤 梁 力 王福春(627)
93. V 形桥塔单索面斜拉桥黏滞阻尼器参数分析 周 希 王 杰 李建中(633)

一、虎 门 二 桥

1. 虎门二桥工程关键技术

张喜刚¹ 代希华² 吴明远¹ 张太科² 梅 刚¹

(1. 中交公路规划设计院有限公司; 2. 广东省公路建设有限公司虎门二桥分公司)

摘 要:虎门二桥建设条件复杂,工程规模大、技术难度大。为了提高大桥的安全性和耐久性,进行了多项创新性设计:1 960MPa 高强度钢丝主缆索股技术、全面集成主动式防腐体系、合理结构体系及关键装置研发、良好抗风稳定性的整体式钢箱梁、复合地连墙锚碇基础设计方法、可更换多股成品索预应力锚固系统、高效平稳安全的钢箱梁检查车,以及 BIM 在大桥建设中的应用。

关键词:高强度钢丝主缆 全面集成主动防腐体系 整体式钢箱梁 复合地连墙锚碇基础 预应力锚固系统 桥梁检查车 BIM 技术

1 工程概况

虎门二桥工程是珠三角七条过江公路通道之一,全线均为桥梁,桥梁宽度 40.5m,由坭洲水道桥、大沙水道桥和引桥及四座互通立交组成,坭洲水道桥采用主跨 1 688m 双跨吊悬索桥,大沙水道桥采用主跨 1 200m 单跨吊悬索桥,引桥采用 30~62.5m 预应力混凝土箱梁,设东涌、驹东(规划预留)、海鸥岛、沙田四座立交,工程总长度 12.886km,总投资约 111.8 亿元,已于 2014 年开工建设,预计 2019 年通车,如图 1 所示。



图 1 过江通道平面布置图

2 工程特点及难点

虎门二桥工程建设具有以下几方面特点及难点。

2.1 建设条件较复杂

- (1)施工水域宽广,受径流潮汐两方面影响,水流、波浪条件复杂。
- (2)桥址区域台风较频繁、风速较高,是桥梁结构设计和施工的控制工况之一。
- (3)地质情况变化大,海鸥岛软岩承载能力低,砂岩区段成桩困难。
- (4)项目临近人口密集区域施工和运营期间的环保要求较高。
- (5)桥址处航运繁忙,穿越桥轴线的航道情况复杂,通航等级高。
- (6)水利防洪要求高,阻水率要求严格,对桥梁方案选择影响较大。

2.2 工程规模大、技术难度大

虎门二桥工程中的主跨 1 688m 的坭洲水道桥建成后将成为世界上最大跨径钢箱梁悬索桥,采用世界上最大直径的锚碇圆形地连墙基础(直径 90m),最宽的整箱断面钢箱梁(宽 49.7m),最大混凝土用量的索塔(单塔 40 000m³),国内最大主缆(5 万 t 缆力、3km 缆长)。除此之外,虎门二桥另外一座大沙水道桥亦是千米级的特大型桥梁。虎门二桥工程作为世界级超大规模工程项目,在复杂的自然条件和施工环境下,对整个项目的设计、施工、协调管理、风险管控等多方面提出了很高的要求,是我国交通建设史上的巨大挑战。

3 桥梁设计

3.1 坭洲水道桥设计要点

坭洲水道桥跨径布置为 658m+1 688m+522m(钢箱梁长度为 548m+1 688m),矢跨比 1/9.5。在西塔处加劲梁连续,为半漂浮体系,东边跨为锚跨,西边跨和中跨均采用悬吊体系,过渡墩设限位拉索约束主缆位移,如图 2 所示。

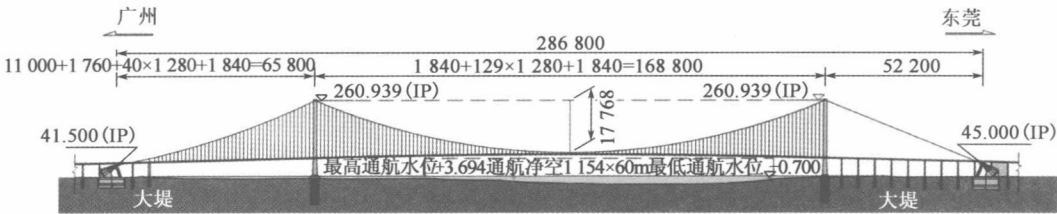


图 2 坭洲水道桥桥型布置简图(尺寸单位:cm)

主梁方案采用整体式钢箱梁,梁高 4m、宽 44.7m,主缆横向间距 42.1m;索塔高 260m,设三道横梁。哑铃型承台厚 7m,64 根直径 2.8m 群桩基础。主缆通长索股有 252 股,西边跨另设 6 根背索,索股由 127 丝、直径 5.0mm 强度 1 960MPa 高强钢丝组成。锚体顺向长 73.5m,横向为整体式,外轮廓宽 68m。地连墙外径 90m,壁厚 1.5m,采用逆作法施工,如图 3 所示。

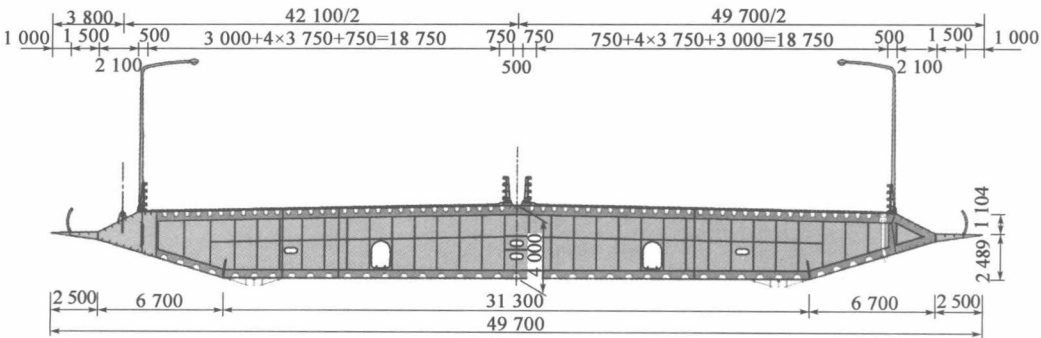


图 3 钢箱梁断面简图(尺寸单位:cm)

3.2 大沙水道桥设计要点

大沙水道桥为单跨吊悬索桥,跨径布置为 $(360+1\,200+480)\text{m}$,矢跨比 $1/9.5$,如图 4 所示。

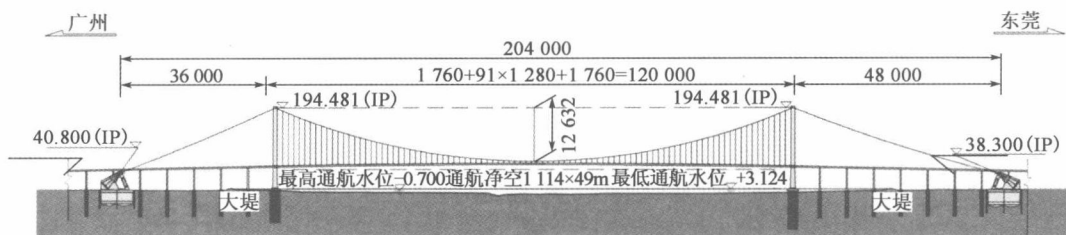


图 4 大沙水道桥桥型布置简图(尺寸单位:cm)

主梁断面与坭洲水道桥相同。索塔高 191.1m,设两道横梁。哑铃型承台厚 6m,52 根直径 2.5m 群桩基础。主缆有 169 股,索股由 127 丝、直径 5.20mm 强度 1 770MPa 高强钢丝组成。锚体顺桥向长 66.5m,横桥向为分离式,单体外轮廓宽 23m。地连墙外径 82m。

4 关键技术

虎门二桥工程在设计和建造中采用了有多项关键技术。

- (1) 1 960MPa 高强度钢丝主缆索股技术研究。
- (2) 全面集成主动式防腐体系。
- (3) 合理结构体系及关键装置研发。
- (4) 良好抗风稳定性的整体式钢箱梁。
- (5) 复合地连墙锚碇基础技术。
- (6) 可更换多股成品索预应力锚固系统。
- (7) 高效平稳安全的钢箱梁检查车。
- (8) BIM 在工程建设中的应用。

4.1 1 960MPa 高强度钢丝主缆索股技术研究

随着悬索桥主跨跨径的增大,主缆单位跨径的自重呈非线性加速增长,使得悬索桥单位跨径总自重也加速增大。在悬索桥发展过程中,主缆材料的每一次更新都对悬索桥发展起到了决定性的推动作用。高强度高性能主缆材料研发及产业化是下一次悬索桥产业升级的关键。标准强度为 1 770MPa 的高强镀锌钢丝在国内外桥梁缆索上已得到广泛应用^[1],1 860MPa^[2]和 1 960MPa^[3]的高强钢丝在悬索桥主缆上的应用刚刚起步,国内悬索桥尚无应用。

虎门二桥创新性地开展了 1 960MPa 级高强度钢丝主缆索股技术的研究及应用,推进了国内桥梁缆索技术水平的发展,达到了同行业世界领先水平。其主要技术创新点如下。

(1) 开发了高强盘条材料,并保证盘条具有良好拉拔性能的组织控制方法。实现了盘条高强度化的合金成分设计方法,掌握高碳盘条成型技术,高索氏体化盘条冷却技术。

(2) 开发了出抗拉强度 1 960MPa 悬索桥主缆用高强度镀锌铝钢丝,扭转次数 ≥ 8 次,既有较高强度,又有良好的韧塑性和松弛稳定性等综合性能。

(3) 开发了出适用于 1 960MPa 主缆索股的锚具。

(4) 实现 1 960MPa 级主缆索股的产业化和推广应用。

虎门二桥开发出的 1 960MPa 级主缆钢丝应用到桥梁设计上有很多明显的好处。

(1) 缆索的强度用以承担其自身重量的比例减小,用于承担使用荷载的比例相对提高,承

载效率大大提高。

(2)主缆钢丝强度提高,主缆钢丝用量减少,虽然钢丝单价稍有提高,但是主缆总体造价降低。

(3)缆索系统各构件如索夹、索鞍和缆套等的结构尺寸减小,降低工程材料用量和造价。

(4)高强度钢丝缆索的开发可以进一步提高悬索桥的极限跨越能力。

4.2 全面集成主动式防腐体系

主缆是悬索桥的生命线,它是悬索桥中最重要的受力构件,承担了全桥上部结构所有的静载和动载。它与锚碇、索塔、索鞍共同构成大桥的第一受力体系,在悬索桥设计理论中,这些构件的设计基准期都是按 100 年考虑的,在 100 年设计基准期内,构件不考虑更换。悬索桥的主缆是由数以万计的钢丝组合而成,在跨江、跨海的自然环境下,容易因腐蚀而失效。为了保证和延长悬索桥的安全使用寿命,采用有效的主缆防护体系至关重要^[4]。

虎门二桥采用全面集成主动式防腐体系:首先主缆和吊索钢丝采用耐腐蚀性更为突出的镀锌铝钢丝,主缆钢丝外面缠绕 S 形钢丝,外层涂覆全新铠装系统,再配备全面智能的主缆内部干空气除湿系统。主要创新点如下。

(1)主缆吊索采用镀锌铝钢丝,大大提高自身耐腐蚀性能。与纯锌镀层相比,锌铝合金镀层有最佳的防腐能力^[5]。锌铝共晶合金均匀组织造就了高耐蚀的金属保护镀层。盐雾试验中,纯锌的腐蚀速率比锌铝合金快 2~3 倍,如图 5 所示。

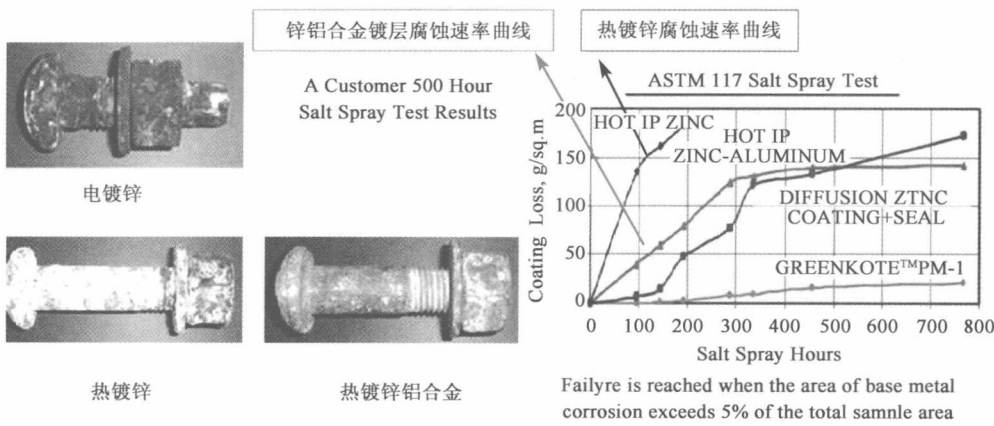


图5 锌铝合金镀层与锌镀层腐蚀速率对比图

热浸镀锌铝合金层并不改变钢丝的力学性能、工艺性能,镀锌铝合金的主要工艺参数与镀锌过程基本一致。虎门二桥用锌铝合金镀层钢丝替代镀锌钢丝,理论上可以延长大桥使用寿命一倍以上。

(2)全面集成主动式除湿系统。虎门二桥采用全面集成主动式防腐体系,不仅将传统的钢箱梁、锚室、鞍室及主缆采用除湿防腐,还创新性地将吊索、锚固索等关键部件进行了除湿防腐,从而实现了缆索系统的全面除湿防腐。同时,在各部位的除湿防腐采用了全新的空气流程设计,使全桥除湿系统形成一个相辅相成的整体,真正实现一个完整的全桥除湿防腐系统。这一创新具有很多优势:

- ①整合设备,降低总装机容量,降低维护难度。
- ②设备采取备用自动切换设计,提高系统抵抗故障的能力。

③利用钢箱梁空气进行二次处理,将极大降低主缆除湿的能耗,对钢箱梁的影响可以忽略不计。

④有组织空气循环代替除湿分区,实现更多针对性循环,提高湿度均匀性,减少湿度控制盲区。

⑤对于后续的可能需求,例如锚头、U 肋内部等末梢,只需对气流组织进行调整,以极低的造价进行系统覆盖的升级。

(3)全新的铠装系统,提供更优异防护性能。虎门二桥主缆外层铠装采用高耐候长寿命主缆柔性密封防护体系,全新的铠装系统,相比于原有刚性涂层,使用柔性环氧防锈底漆代替原有的环氧云铁中间漆,丙烯酸聚氨酯涂料使用柔性氟碳涂料予以代替,大大提高了涂层的柔性,减少了脆性裂纹的产生。相比于日本的柔性涂层体系,在中间增加一层聚硫胶,明显加大了防护涂层厚度,使得 S 形钢丝在制造和施工产生的缺陷也获得良好防护。

4.3 合理结构体系及关键装置研发

为了解决大桥较大的梁端纵向位移,控制伸缩装置规模,提高大桥的安全性和经济性^[6],大桥结构系统采用了静力限位—动力阻尼约束体系。即静力工况下:在一定行程范围 d 内塔梁间自由变形,当达到某一指定相对位移时,塔梁相对运动受到约束而限制主梁纵向变形;动力工况下阻尼器在其冲程范围内正常工作。

针对静力限位阈值 d 、限位刚度 K 、阻尼系数 C 及度指数 α 开展研究,确定了大桥静力限位—动力阻尼约束体系的最优参数,解决了虎门二桥纵向梁端位移大的技术难题。限位间隙参数对梁端纵向位移影响如图 6 所示。

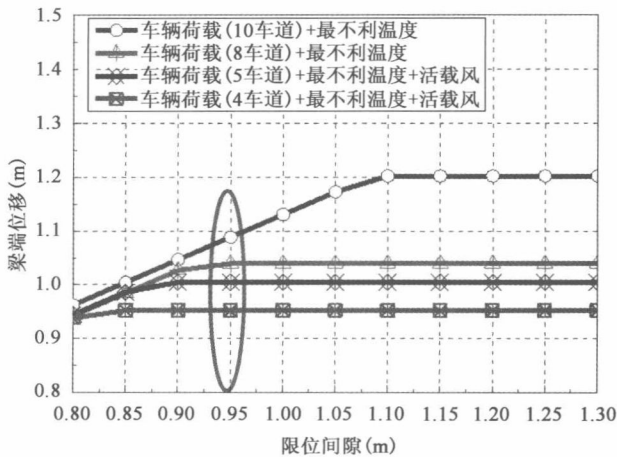


图 6 限位间隙参数对梁端纵向位移影响

传统悬索桥横向约束通常采用横向刚性抗风支座,其主要特点为:抗风支座无减震耗能功能,抗风支座与主梁之间存在一定间隙,在大风、地震等作用下发生撞击。虎门二桥首次研发了碟形弹簧与动力阻尼组合的新型减震抗风支座,弥补了传统抗风支座缺点,改善了桥梁横向静动力受力性能。

4.4 良好抗风稳定性的整体式钢箱梁

桥梁的风致振动主要依赖于结构的外形、刚度、阻尼和质量特性等。以往研究认为强风区内超过 1 500m 的悬索桥需要采用桁架梁或者分离式钢箱梁解决颤振稳定问题,但是桁架梁造价高,分离箱又较容易出现低风速涡激共振问题。

坭洲水道桥结构整体阻尼比小,刚度柔,桥位处颤振检验风速为 63m/s,低于明石海峡大桥(78m/s)和西堍门大桥(79m/s)等外海桥位风速,可以探索通过改善主梁气动外形实现结构整体抗风稳定性是最有效的方法。本项目通过反复试验研究,不断优化最终确定采用整体式钢箱梁,梁宽 44.7m,两侧各设 2.5m 导流板(兼作检修道),主缆横向间距 42.1,梁高 4m,斜底板与平底板夹角 17.3° 。

根据风洞试验报告,成桥状态颤振临界风速为 78m/s,远大于检验风速 63m/s;并且没有出现明显的竖弯或扭转涡激振动,满足抗风要求。优化气动外形后的整体式箱梁可以同时解决颤振和涡振问题,而且具有重量更轻、桥梁规模更小、造价更经济的特点。横向减震抗风支座竖向载荷—变形试验曲线如图 7 所示。钢箱梁在 $+3^{\circ}$ 攻角下的流速图如图 8 所示。

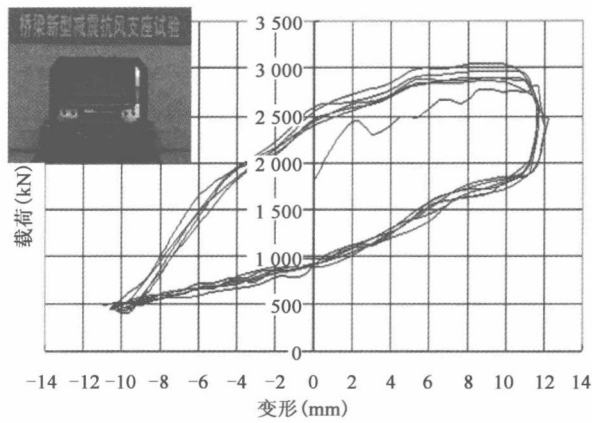


图 7 横向减震抗风支座竖向载荷—变形试验曲线

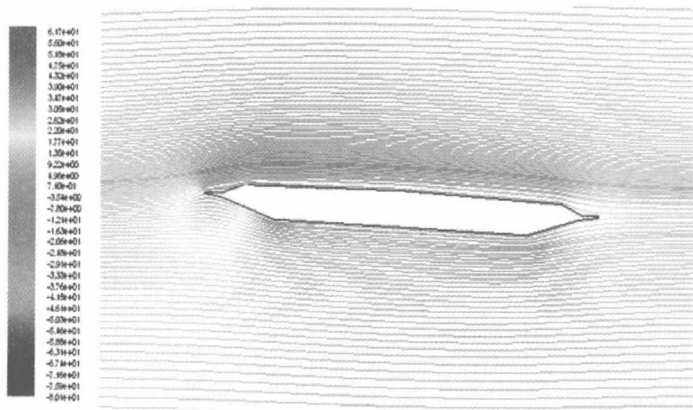


图 8 钢箱梁在 $+3^{\circ}$ 攻角下的流速图

4.5 复合地连墙锚碇基础技术

重力式锚碇在进行整体稳定性分析时作为刚体考虑^[7],且作为悬索桥下部构造中最重要的结构,任何滑移和倾覆都是不允许发生的。由于不考虑地下连续墙对锚碇承载力的提高,重力式锚碇一般规模巨大、造价较高。坭洲水道桥西锚碇简图如图 9 所示。

虎门二桥单根缆力接近五万吨,锚碇受荷大,锚碇规模较大,圆形地连墙基础直径达到 90m。因此明确复合锚碇基础适用地层,揭示地下连续墙—锚碇协同工作机理,提出相关设计参数确定方法,建立了复合锚碇基础设计方法从而优化结构设计就变得非常有意义。复合地连墙锚碇基础设计方法主要创新点如下: