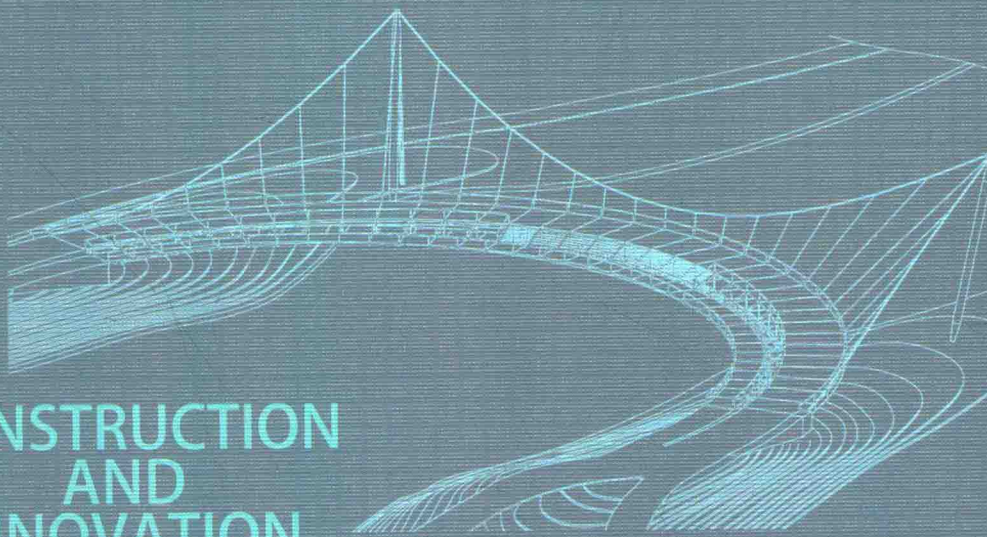




CONSTRUCTION AND INNOVATION

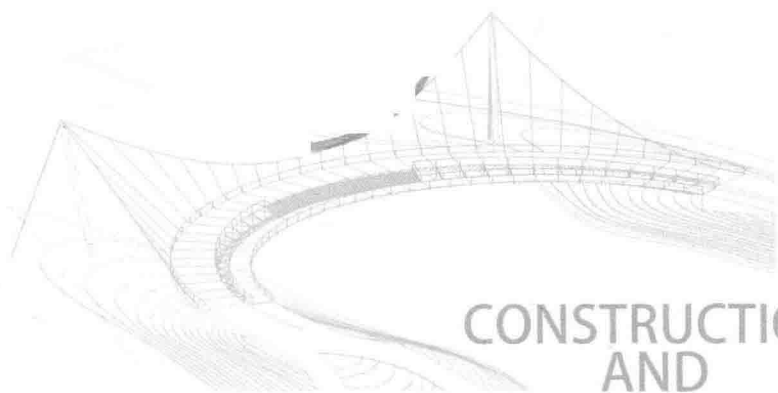
OF SINGLE SIDE SUSPENSION FOOTBRIDGE WITH
THREE DIMENSIONAL CURVED DUAL DECKS

空间曲梁双桥面单边悬索桥 建设与创新

■ 庞学雷 于 辉 编著
方亚非 主审



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



CONSTRUCTION AND INNOVATION

OF SINGLE SIDE SUSPENSION FOOTBRIDGE WITH
THREE DIMENSIONAL CURVED DUAL DECKS

空间曲梁双桥面单边悬索桥 建设与创新

庞学雷 于 辉 编著
方亚非 主审



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

内 容 提 要

本书概括性地介绍了空间曲梁双桥面单边悬索桥的建设过程,系统梳理了空间曲梁双桥面单边悬索桥在设计、深化、加工、施工、监测、荷载试验、验收、BIM 建模过程中的主要内容和步骤,系统总结了上述建设过程中的技术特点及难点,并总结归纳了空间曲梁双桥面单边悬索桥的成功经验和启示。

本书旨在为有意了解或参与此类桥梁设计、施工、监控、管理等企业、大专院校、科研单位和社会各界提供参考和帮助。

图书在版编目(CIP)数据

空间曲梁双桥面单边悬索桥建设与创新 / 庞学雷, 于辉编著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.8

ISBN 978-7-114-13000-7

I. ①空… II. ①庞… ②于… III. ①悬索桥—研究
IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 099919 号

书 名: 空间曲梁双桥面单边悬索桥建设与创新

著 作 者: 庞学雷 于 辉

责任编辑: 卢俊丽

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.ccpres.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: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 17.25

字 数: 386 千

版 次: 2016 年 8 月 第 1 版

印 次: 2016 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-13000-7

定 价: 75.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前言

FOREWORD

上海国际旅游度假区内的两座空间曲梁双桥面单边悬索桥位于度假区内的星愿湖边,紧邻上海迪士尼乐园(Shanghai Disney Resort),分别位于星愿湖的西南侧和东南侧。两座桥均为弧形平面、单侧悬挂的空间悬索结构,因其主副桥拼合结构的设计理念成为国内首创,世界第一。

两座桥顺桥跨度分别为120m和90m,每座桥均由主副桥拼合而成,主桥宽6m,副桥宽3m,主副桥在平面上都是半径不同的圆形曲线,桥面分为内侧副桥的玻璃桥面和外侧主桥的钢桥面,只在中间部位通过踏步进行拼合连接,让游客在主副桥之间转换通行,抑或可以坐在踏步上观赏风景。主副桥的起坡高度与坡度不同,分离的主副桥之间形成一个月牙形的空隙,由此形成了主副桥之间复杂的空间关系,行走时在四条不锈钢扶手的引导下形成动态变化的视觉体验。

本书将以东桥为例,对桥梁的设计、施工等过程中所进行的思考与创新进行叙述,希望能为今后同类桥梁的建设提供借鉴与帮助。

本书共分为12章。第1章概述,主要介绍了空间曲梁双桥面单边悬索桥工程的特点及难点;第2章单边悬索桥建设条件和主要技术标准,详细介绍了空间曲梁双桥面单

边悬索桥工程设计概况;第3章单边悬索桥结构设计与分析,详细介绍了空间曲梁双桥面单边悬索桥结构设计与分析计算;第4章单边悬索桥抗风抗震性能分析,介绍了空间曲梁双桥面单边悬索桥抗风、抗震分析计算;第5章单边悬索桥人致振动舒适性研究,介绍了人致振动舒适性评估计算以及减振设计方法;第6章单边悬索桥钢结构和索缆加工,介绍了空间曲梁双桥面单边悬索桥钢结构及索缆的制造工艺及流程;第7章单边悬索桥成桥施工,介绍了空间曲梁双桥面单边悬索桥成桥方案的选择、施工阶段计算分析以及施工过程关键步骤的控制;第8章单边悬索桥施工监测,介绍了施工监测的目的、工作内容和结果;第9章单边悬索桥静力荷载试验,介绍了静力荷载试验目的、内容和结果;第10章单边悬索桥动力荷载试验,介绍了动力荷载试验目的、内容和结果;第11章单边悬索桥验收标准,详细介绍了空间曲梁双桥面单边悬索桥验收标准;第12章单边悬索桥BIM技术的应用,介绍了本项目中BIM技术在施工图BIM、建筑效果和项目管理方面的应用。

本书由上海申迪项目管理有限公司总工程师庞学雷(教授级高级工程师)负责组织和定稿,庞学雷、于辉编写,方亚非审校,于超和蒋垠芜为本书的编写也做了大量的工作。



空间曲梁双桥面单边悬索桥的建设得到了申迪集团领导全方位的大力支持。申迪集团有限公司董事长范希平、总裁是明芳、副总裁王庆国、副总裁程放的英明决策和信任,为这一创新成果奠定了基础、提供了空间;上海申迪建设有限公司总经理金大成,上海申迪项目管理有限公司总经理王强、副总经理冯双平在项目建设阶段给予的支持和全力的配合,是项目得以顺利完成的重要保障。

在上海申迪集团的领导下,由申迪项目管理公司总工程师庞学雷先生带领的申迪项目管理团队策划、组织并主导了整个项目的科研、设计、施工、监理、咨询、施工控制、监测、加工制造等,创造性地完成了全部的建设工作。

阿法建筑设计咨询(上海)有限公司(RFR 上海)于辉先生完成了桥梁的系统方案和初步设计,在项目的前期做了大量协调工作,在后期的施工实施过程中解决了很多重大技术问题,为本项目的成功建设起到了重要作用,Florian Rochereau 先生主要负责了桥梁的参数化设计和结构找形计算。

上海现代建筑设计(集团)有限公司花炳灿、孙洲、郑沁宇、于军峰、罗辑、朱华军在项

目的设计、施工图绘制及 BIM 模型的建立等方面负责了出图和分析建模工作,参与了全过程的技术研究工作。

上海市工程设计研究总院(集团)有限公司方亚非、李鹏、罗东伟全面负责了本桥梁的设计复核工作,并对施工过程与调试检测工作提出了十分专业的意见,对本桥的建设起到了技术把关的作用。除此之外,上海市工程设计研究总院(集团)有限公司大桥设计研究院总工方亚非先生担任本书主审,提出了诸多宝贵的意见。

上海建工集团股份有限公司邓福弟、陈路伟、毕俊成、徐宝成、伍小平、李鑫奎、苏昱晟、吕晓天、况中华、李怀翠在项目设计、施工过程中做了大量组织协调工作。

上海市基础工程集团有限公司蔡忠明、邓文武、金仁兴、钱建兴、马晓云、王星、阮再兴针对本工程的基础设计和施工提出了具体的工程技术解决方案并组织了施工。

上海建科工程项目管理有限公司黄斌、应培堃、李火龙、唐志明、张三明、阵震毕、陆秀明负责了本项目的监理工作。

上海建科院上海市工程结构新技术重点实验室邢云、谭长建、崔鑫在桥梁的监测和试



验方面提出了很多建设性的意见并实施了全部的监测工作。

中国建筑西南设计研究院有限公司彭建华、唐海峰、王颖、周钧、崔孝凯、刘高、许建、孙德铭组织实施了本项目的地质勘察。

广东坚朗五金制品股份有限公司王晓丽、尚景联、李海勋、陈广宁，江苏中泰钢结构股份有限公司陈红波、陆桃峰、李磊、章健、陆健在缆索及配件的科研、制作安装、钢结构深化设计及加工拼装过程中做了大量卓有成效的工作，圆满地实现了设计的意图。

同济大学孙利民教授和杨伟博士为桥梁的人致振动分析做出了大量卓有成效的工作。同济大学蒋垠茏、陈轶迪、袁远、王瑞雪、崔杨同学对书籍的资料整理和文字校对也做出了很大的贡献。

在此，对于上述参与项目建设各方面工作，付出努力的领导、合作者、建设者表示诚挚的谢意！

谨以此书献给所有为此项目付出艰辛工作的单位和个人。

本书介绍的内容引用了 RFR 上海、上海现代建筑设计（集团）有限公司、上海市政工程设计研究总院（集团）有限公司、上海建科

院上海市工程结构新技术重点实验室、上海建工集团股份有限公司、广东坚朗五金制品股份有限公司、江苏中泰钢结构股份有限公司、同济大学，在桥梁结构初步设计、桥梁结构深化设计、桥梁施工和桥梁试验方面做出的杰出工作成果，在此一并表示感谢。同时，本书的编写过程中也参考了很多国内外同行的相关资料、图片及论著，并尽其所能在参考文献中予以列出，但如有疏漏之处，敬请谅解。

由于作者水平有限，且成书时间较紧，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

庞学雷

二〇一六年六月于上海



目录

CONTENTS

第 1 章 概述

1.1 工程背景.....	4
1.2 桥梁景观构思.....	5
1.3 单边悬索桥工程的特点及难点.....	7
1.4 参考项目.....	11

第 2 章 单边悬索桥建设条件和主要技术标准

2.1 自然地理条件.....	22
2.2 主要设计指标.....	26
2.3 主要技术标准.....	27

第 3 章 单边悬索桥结构设计与分析

3.1 结构受力原理.....	30
3.2 结构方案比选.....	33
3.3 结构找形分析.....	35
3.4 人行动力分析.....	41
3.5 主要结构构造.....	54
3.6 主桥结构计算分析.....	61
3.7 节点局部计算分析.....	65
3.8 下部结构计算分析.....	69



第 4 章 单边悬索桥抗风抗震性能分析

4.1 单边悬索桥抗风分析.....	74
4.2 单边悬索桥抗震分析.....	79

第 5 章 单边悬索桥人致振动舒适性研究

5.1 研究目的与内容.....	100
5.2 人致振动舒适性评估.....	100
5.3 人致振动分析.....	103
5.4 人行桥减振设计.....	106
5.5 TMD 减振效果仿真.....	107
5.6 结论.....	112

第6章 单边悬索桥钢结构和索缆加工

6.1 钢结构制作工艺方案	116
6.2 钢箱梁制造	117
6.3 Y形臂制造	125
6.4 钢塔制造	126
6.5 密封拉索制造	128
6.6 索夹制造	133

第7章 单边悬索桥成桥施工

7.1 施工方案	140
7.2 施工阶段计算分析	144
7.3 施工过程关键步骤的控制	162
7.4 突发事件应急预案	165

第8章 单边悬索桥施工监测

8.1 监测目的	170
8.2 施工监测依据的技术规范	170
8.3 施工监测工作内容	170
8.4 监测结果	173
8.5 建议	183

第9章 单边悬索桥静力荷载试验

9.1 静力荷载试验目的及内容	186
9.2 试验依据	188
9.3 选用的仪器和设备	188
9.4 静力荷载试验结果	188
9.5 静力荷载试验结论	196
9.6 调索	197

第10章 单边悬索桥动力荷载试验

10.1 动载试验目的及依据	202
10.2 TMD 锁定状态试验	202
10.3 TMD 解锁状态试验	208
10.4 结论	216

第11章 单边悬索桥验收标准

11.1 总则	220
11.2 术语	220
11.3 基本规定	220
11.4 通用性验收项目	221
11.5 特殊验收项目	221

第12章 单边悬索桥 BIM 技术的应用

12.1 TEKLA 模型	226
12.2 VDP 模型	228
12.3 项目管理平台	229

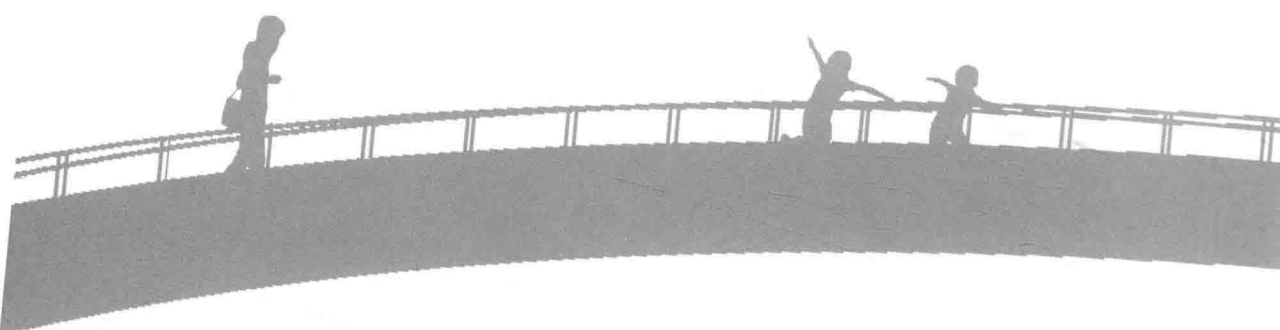
附录1 大事记

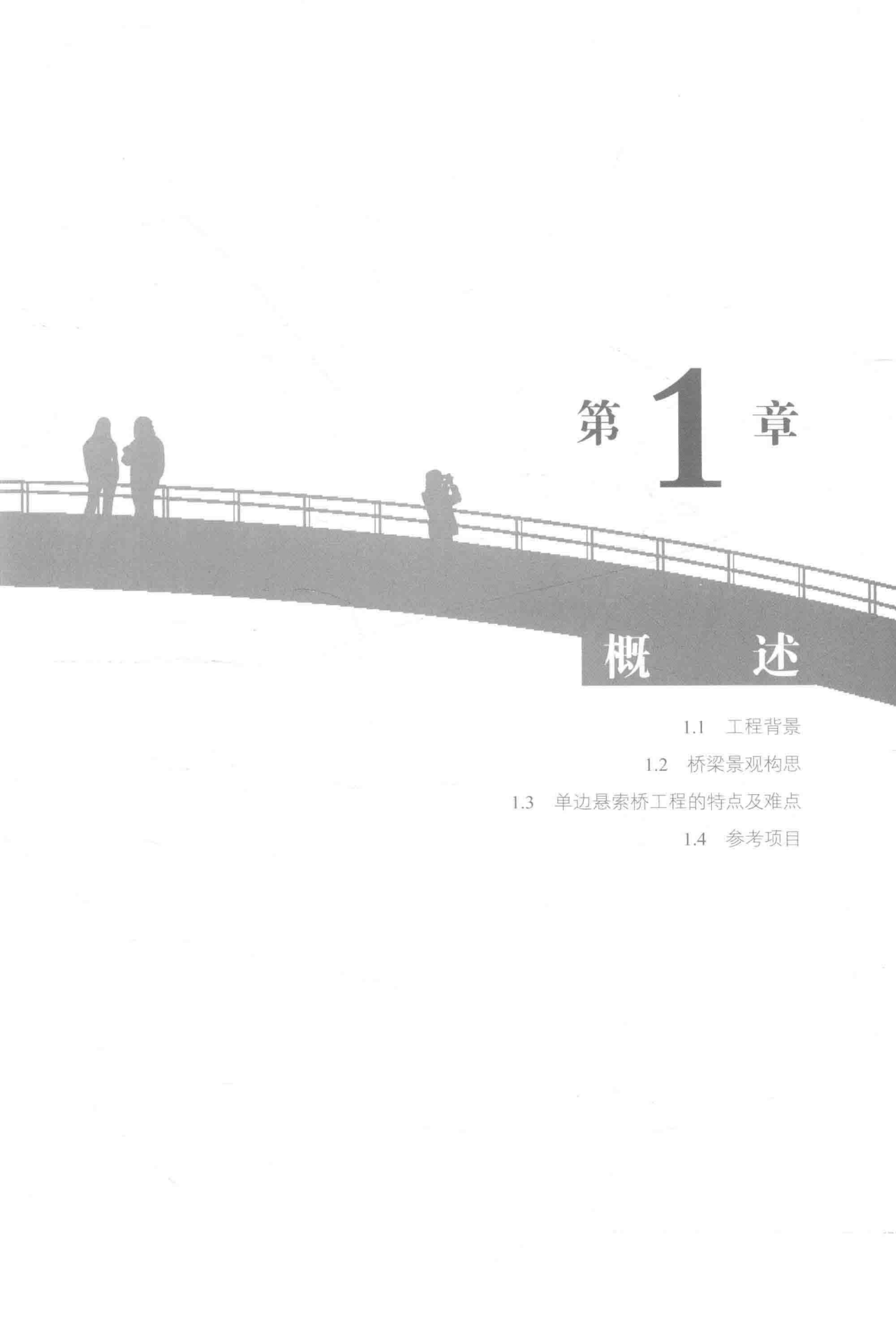
附录2 施工过程图集

附录3 单边悬索桥通用性验收项目

参考文献





The background of the page is a grayscale photograph showing the silhouettes of three people standing on a bridge or walkway with a railing, looking out over a bright, hazy sky. The bridge railing runs diagonally across the frame.

第 1 章

概 述

1.1 工程背景

1.2 桥梁景观构思

1.3 单边悬索桥工程的特点及难点

1.4 参考项目

1.1 工程背景

上海国际旅游度假区内的两座空间曲梁双桥面单边悬索桥位于度假区内的星愿湖边,紧邻上海迪士尼乐园(Shanghai Disney Resort)。两座悬索桥分别位于星愿湖的西南侧和东南侧,均为弧形平面、单侧悬挂的空间悬索结构和主副桥拼合结构,此设计理念为世界第一、国内首创,如图 1.1 所示。



图 1.1 上海国际旅游度假区地理位置图

该工程所属的星愿湖公园景观项目为迪士尼主题乐园周边配套公园,位于浦东新区的上海国际旅游度假区核心区内,核心区北临迎宾高速公路(S1),西临沪芦高速公路(S2),东临唐黄路,南临航城路。作为度假区的亮点,星愿湖周边以合理的规划布局、环湖绿化景观的营造以及基础设施的建设,自然衔接各功能区域并为游客创造出独特、舒适、迷人的室外湖滨休闲场所,而这两座景观性桥梁则作为全公园内最令人瞩目的点睛之作。同时,由于这两座在同类桥梁中主桥宽度最大、主副桥复杂拼合,目前成为该类桥梁中的世界第一。

本书将以东桥为例,对桥梁的设计、施工等过程中所进行的思考与创新进行叙述,希望能为今后同类桥梁的建设提供借鉴与帮助。

桥梁全称为“空间曲梁双桥面单边悬索桥”，下文为了叙述方便，在各章标题中简称为“单边悬索桥”。

1.2 桥梁景观构思

在上海国际旅游度假区星愿湖公园边，南侧蜿蜒起伏的木栈道伸向湖的尽头，两座弧形曲线景观桥如同彩虹飘逸在水面，跨越了微波荡漾的湖面，连通着湖泊公园东南区域的薰衣草园和远处的香草园。

站在主桥中央，眺望远方迪士尼城堡高高耸立的塔顶和欧美风格的迪士尼小镇，或者立足悬出主桥的钢悬臂副桥，透过防滑玻璃弧形桥面，静静地观赏脚下清澈的流水、远处宽阔的湖面，如同在湖面上荡漾，令人心旷神怡。

夜晚，被泛光灯照亮的纤细的索缆，将主桥轻轻拉起，嵌入在扶手内的LED灯，把副桥的玻璃桥面渲染得如童话世界般晶莹剔透。站在桥上近赏湖中桥静谧优雅的灯光倒影，远望湖对岸灯火璀璨的建筑，美轮美奂。

每晚烟火表演时分，伫立桥上，天空中七彩起舞的烟火与湖水中变形的色彩倒影如同现代抽象派油画，波光粼粼，交相辉映。而景观桥也因其主副桥拼合双向曲线的弧形，从不同的角度述说着结构美的风姿。具体如图1.2～图1.8所示。

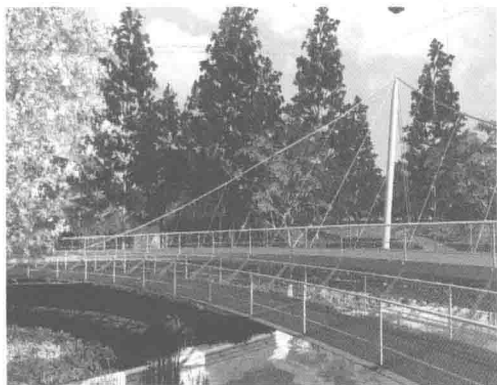


图 1.2 景观桥近景模拟图



图 1.3 景观桥远眺模拟图

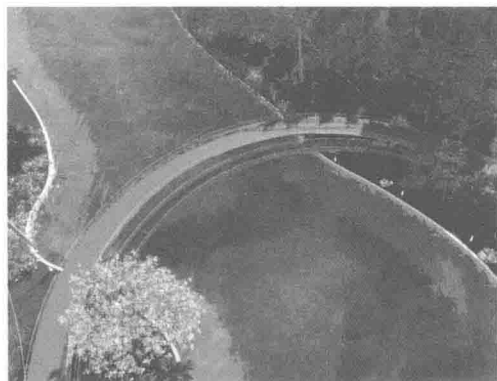


图 1.4 景观桥俯瞰模拟图

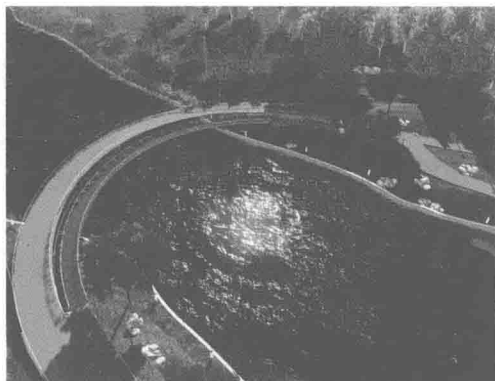


图 1.5 景观桥模拟图



图 1.6 桥梁竣工图(1)



图 1.7 桥梁竣工图(2)

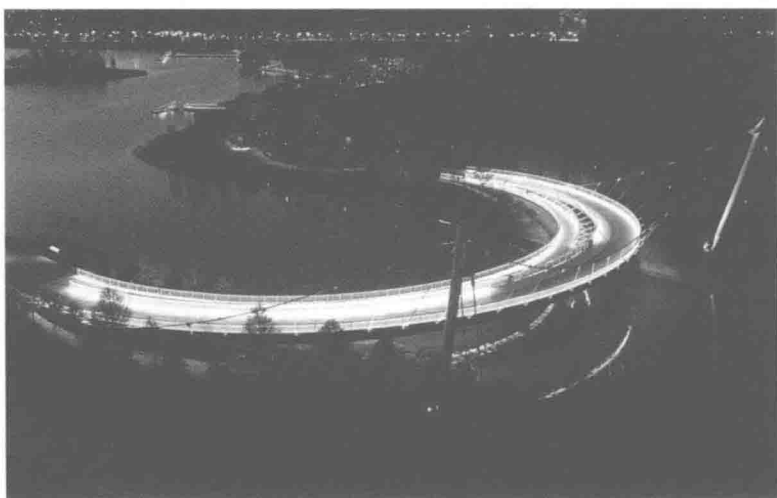


图 1.8 桥梁夜景图

1.3 单边悬索桥工程的特点及难点

1.3.1 结构分析与设计

因全桥由混凝土结构、钢结构和索缆体系组成荷载支承力学体系,索缆体系“柔性”的自平衡特性与钢筋混凝土及钢结构的“刚性”,导致桥梁在不同形态时的受力状况变化以及空间找形与力学计算极其复杂,可谓“牵一发而动全身”。因此,对桥梁进行了参数化建模,并进行了细致的找形分析(图 1.9),最终选定主桥宽 6m、高 1.7m。

人行桥结构的静力分析比较复杂,需要考虑各种设计荷载(如恒、活、风、雪、地震、温度等)及其组合、材料徐变、基础变形和沉降等各种因素的综合作用,并充分考虑荷载不对称分布的不利影响。进行结构分析的同时,还要考虑桥梁环索张拉施工的各中间过程的受力情况。因此,在使用 GSA 软件对本桥进行计算的同时,还采用 Midas Civil 软件进行了复算(图 1.10),并使用大型有限元分析软件 ANSYS 进行辅助计算。

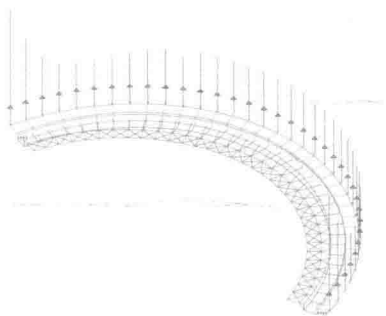


图 1.9 结构找形分析

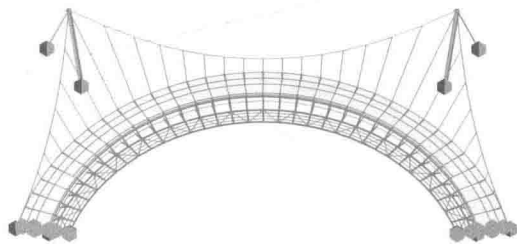


图 1.10 Midas Civil 计算模型

由于桥梁的设计计算基频在 3Hz 以下,需要对人致振动进行分析,并提出合理的调频处理方法,以提高行人的舒适度。为此,委托同济大学桥梁系孙利民教授(长江学者)进行人致振动专题研究,以复核舒适度指标并论证采取 TMD 减振措施及布置方法,最终确定在东桥的 1/4、1/2、3/4 跨径处和西桥的 1/2 跨径处设置 TMD 阻尼器(图 1.11),在全桥完成基频测试后进行调节。

此外,为确保风荷载以及地震作用下结构的安全,对全桥进行了数值风洞验算,并进行了抗震验算。图 1.12 所示为桥梁数值风洞模型。

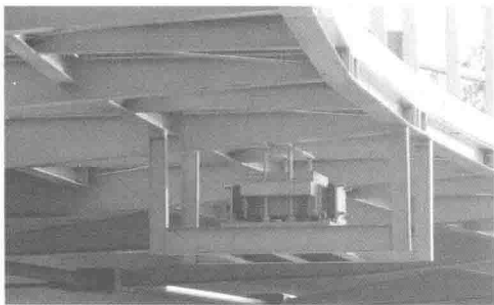


图 1.11 桥梁跨中 TMD 阻尼器

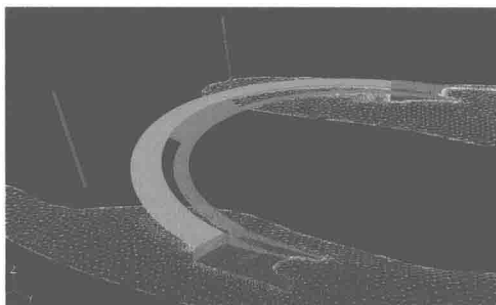


图 1.12 桥梁数值风洞模型

由于桥梁的主塔倾斜会对基础产生水平推力,且主塔在使用过程中会随着各种荷载组合的不同变化,向不同方向产生偏转,因此为主塔基础与背索基础自身及相互间提供稳定的支承、有效解决主塔下端支承问题十分重要。由于现有沉桩设备可实现的最大倾角为 78° ,因此,将主塔倾角选为与斜桩相同的 78° 。图 1.13 所示为索塔和背索系统构造图。

主缆与环向索为该桥的主要受力构件,而该桥又为行人桥,行人可以近距离地观察、触摸到部分主缆与环索,这就对主缆与环向索的耐久性与美观性提出了很高的要求。由于该工程中部分主缆索与吊索之间的角度较大,索夹与索缆之间易产生滑移,因此,选择了 GALFAN (95% 锌 + 5% 铝) 防腐涂层的进口封闭索。GALFAN 镀层的延展性和可变性极强,防腐性能优异,不会出现变色、老化、龟裂等影响美观的问题。图 1.14 所示为 GALFAN 涂层封闭索与索头。针对索夹滑移的问题,工程中通过内衬锌膜与调整索夹内部细纹,提升了抗滑性能。

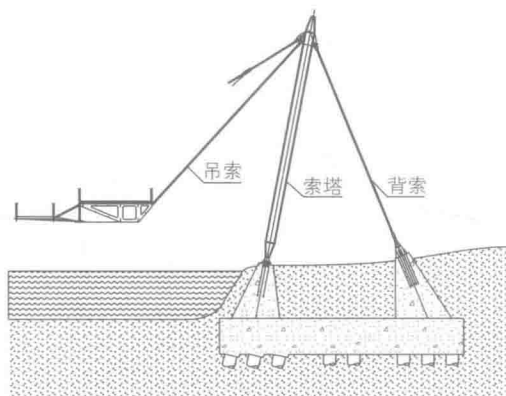


图 1.13 索塔和背索系统构造图



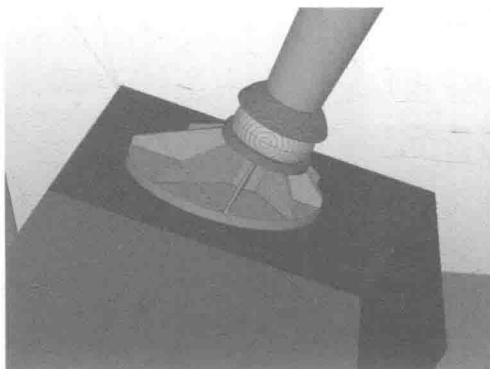
图 1.14 GALFAN 涂层封闭索与索头

1.3.2 主要部件设计与制作

由于主塔底部会产生不定方向的空间转角,因此,主塔与基础间采用球铰连接。球铰结构给加工、制作和安装提出了很高的要求,经过制造厂商与设计施工单位的充分沟通,分析了质量可靠性与制作难度。本项目采用反向碗扣与固定的铸钢球进行无限位铰接,保证了主要受力点的安全可靠。并对铸钢球进行超声波探伤,保证其加工质量,图 1.15 所示为主塔铰接部分。



a) 结构实拍



b) BIM 模型

图 1.15 主塔铰接部位