

国家出版基金项目

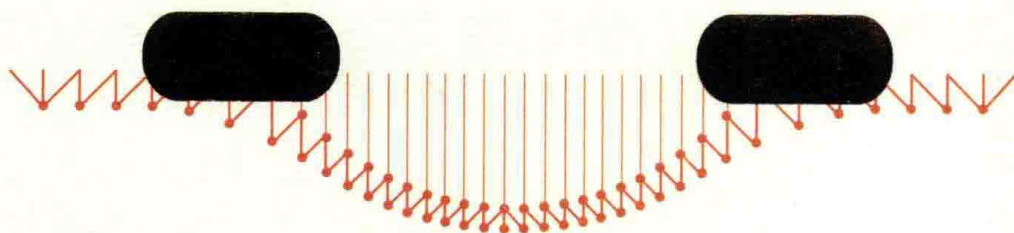
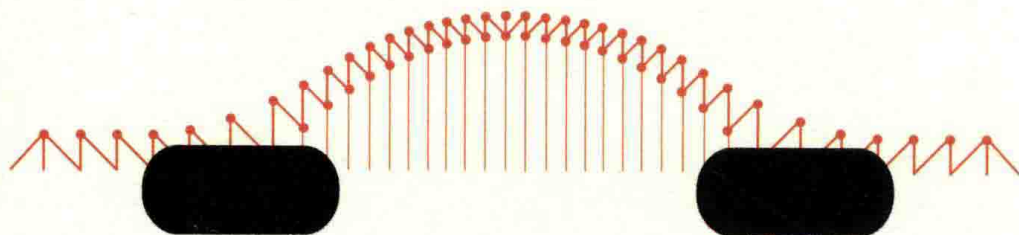
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

Design of
Special Bridge
for Long-span
Rail Transit
in Mountainous Cities

山地城市交通创新实践丛书
Innovative Practice of Urban
Transportation in Mountainous Cities

山地城市大跨度轨道交通 专用桥设计

刘安双 马振栋 ◇ 著



重庆大学出版社

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

山地城市交通创新实践丛书

山地城市大跨度轨道交通 专用桥设计

刘安双 马振栋 ◇ 著

重庆大学出版社

内容提要

本丛书针对大跨度城市轨道交通的建设特点,从大跨度城市轨道交通桥梁设计创新、设计规范解读、大跨度轨道悬索桥合理刚度选择、大跨度城市轨道交通桥梁钢箱梁疲劳设计计算以及工程实践出发,形成了概述、城市轨道交通桥梁设计创新及规范解读、大跨径轨道悬索桥合理刚度研究、大跨度城市轨道交通桥梁钢箱梁疲劳设计研究、组合梁桥突破极限、梁拱组合创新标志、斜拉桥梁合理布置、自锚悬索创纪录等内容。

本书通过理论研究和项目实践经验的总结,提出了大跨度城市轨道交通专用桥设计的创新思路,可供业内同行参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

山地城市大跨度轨道交通专用桥设计 / 刘安双, 马振栋著. -- 重庆: 重庆大学出版社, 2022.6

(山地城市交通创新实践丛书)

ISBN 978-7-5689-2118-3

I. ①山… II. ①刘… ②马… III. ①山地—城市铁路—轨道交通—长跨桥—桥梁设计 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 098410 号

山地城市交通创新实践丛书

山地城市大跨度轨道交通专用桥设计

Shandi Chengshi Da Kuadu Guidao Jiaotong Zhuanyongqiao Sheji

刘安双 马振栋 著

策划编辑:张慧梓 范春青 林青山

责任编辑:姜 凤 范春青 版式设计:范春青

责任校对:夏 宇 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

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:16 字数:342千

2022年6月第1版 2022年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5689-2118-3 定价:148.00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

丛书编委会

EDITORIAL BOARD OF THE SERIES

杨 进 蒋中贵 狄 谨 李和平

李小荣 任国雷 刘安双 龚华凤

刘雪山 陈晓虎 史宁强 王有为

序 一

FOREWORD

多年在旧金山和重庆的工作与生活，使我与山地城市结下了特别的缘分。这些美丽的山地城市，有着自身的迷人特色：依山而建的建筑，起起落落，错落有致；滨山起居的人群，爬坡上坎，聚聚散散；形形色色的交通，各有特点，别具一格。这些元素汇聚在一起，给山地城市带来了与平原城市不同的韵味。

但是作为一名工程师，在山地城市的工程建设中我又深感不易。特殊的地形地貌，使山地城市的生态系统特别敏感和脆弱，所有建设必须慎之又慎；另外，有限的土地资源受到许多制约，对土地和地形利用需要进行仔细的研究；还有一个挑战就是经济性，山地城市的工程技术措施比平原城市更多，投资也会更大。在山地城市的各类工程中，交通基础设施的建设受到自然坡度、河道水文、地质条件等边界控制，其复杂性尤为突出。

我和我的团队一直对山地城市交通给予关注并持续实践；特别在以山城重庆为典型代表的中国中西部，我们一直关注如何在山地城市中打造最适合当地条件的交通基础设施。多年的实践经验提示我们，在山地城市交通系统设计中需要重视一些基础工作：一是综合性设计（或者叫总体设计）。多专业的综合协同、更高的格局、更开阔的视角和对未来发展的考虑，才能创作出经得起时间考验的作品。二是创新精神。制约条件越多，就越需要创新。不局限于工程技术，在文化、生态、美学、经济等方面都可以进行创新。三是要多学习，多总结。每个山地城市都有自身的显著特色，相互的交流沟通，不同的思考方式，已有的经验教训，可以使我們更好地建设山地城市。

基于这些考虑，我们对过去的工作进行了总结和提炼。其中的一个阶段性成果是2007年提出的重庆市《城市道路交通规划及路线设计规范》，这是一个法令性质的地方标准；本次出版的这套“山地城市交通创新实践丛书”，核心是我们对工程实践经验的总结。

丛书包括了总体设计、交通规划、快速路、跨江大桥和立交系统等多个方面，介绍了近二十年来我们设计或咨询的大部分重点工程项目，希望能够给各位建设者提供借鉴和参考。

工程是充满成就和遗憾的艺术。在总结的过程中，我们自身也在不断地反思和总结，以做到持续提升。相信通过交流和学习，未来的山地城市将会拥有更多高品质和高质量的精品工程。

美国国家工程院院士

中国工程院外籍院士

林同棻国际工程咨询（中国）有限公司董事长



2019年10月

序 二

FOREWORD

山地城市由于地理环境的不同,形成了与平原城市迥然不同的城市形态,许多山地城市以其特殊的自然景观、历史底蕴、民俗文化和建筑风格而呈现出独特的魅力。然而,山地城市由于地形、地质复杂或者江河、沟壑的分割,严重制约了城市的发展,与平原城市相比,山地城市的基础设施建设面临着特殊的挑战。在山地城市基础设施建设中,如何保留城市原有的山地风貌,提升和完善城市功能,处理好人口与土地资源的矛盾,克服新旧基础设施改造与扩建的特殊困难,避免地质灾害,减小山地环境的压力,保护生态、彰显特色、保障安全和永续发展,都是必须高度重视的重要问题。

林同棣国际工程咨询(中国)有限公司扎根于巴蜀大地,其优秀的工程师群体大都生活、工作在著名的山地城市重庆,身临其境,对山地城市的发展有独到的感悟。毫无疑问,他们不仅是山地城市建设理论研究的先行者,也是山地城市规划设计的探索者。他们结合自己的工程实践,针对重点关键技术问题,对上述问题与挑战进行了深入的研究和思考,攻克了一系列技术难关,在山地城市可持续综合交通规划、山地城市快速路系统规划、山地城市交通设计、山地城市跨江大桥设计、山地城市立交群设计等方面取得了系统的理论与实践成果,并将成果应用于西南地区乃至全国山地城市建设与发展中,极大地丰富了山地城市规划与建设的理论,有力地推动了我国山地城市规划设计的发展,为世界山地城市建设的研究提供了成功的中国范例。

近年来,随着山地城市的快速发展,催生了山地城市交通规划与建设理论,“山地城市交通创新实践丛书”正是山地城市交通基础设施建设理论、技术和工程应用方面的总结。本丛书较为全面地反映了工程师们在工程设计中的先进理念、创新技术和典型案例;既总结成功的经验,也指出存在的问题和教训,其中大多数问题和教训是工程建成后工程师们的进一步思考,从而引导工程师们在反思中前行;既介绍创新理念与设计思考,也提供工程实例,将设计

理论与工程实践紧密结合，既有学术性又有实用性。总之，丛书内容丰富、特色鲜明，表述深入浅出、通俗易懂，可为从事山地城市轨道交通基础设施建设的设计、施工和管理的人员提供借鉴和参考。

中国工程院院士
重庆大学教授

周绪红

2019年10月

前 言

PREFACE

改革开放以来,随着国民经济及交通事业的发展,我国桥梁结构发展较快,跨山谷、跨沟壑、跨江河、跨海湾等工程日益增多,桥梁建设向“更长、更高、更轻”的趋势发展,跨度日益增大,体型越来越复杂,新材料的应用日益增多,设计理念越来越先进,结构体系越来越新颖,施工技术越来越成熟。我们设计并建成了一大批世界级桥梁。

世界上第一条地下铁道的诞生,为人口密集的大都市如何发展公共交通提供了宝贵经验。特别是 1879 年电力驱动车的研究成功,使地下客运环境和服务条件得到了空前改善,地铁建设显示出强大的生命力。从此以后,世界上一些著名的大都市相继建造地下铁道。城市轨道交通号称“城市交通的主动脉”,成为占用土地和空间最少、运输能量最大、运行速度最快、环境污染最小、乘客最安全舒适的理想交通方式,已经历了约 150 年的发展历史。100 多年来,已有近 80 个国家、500 余座城市修建了轨道交通,线路总长度达数万公里,各大城市的地铁、轻轨、城市铁路等都得到了很好的发展,为城市的交通和经济发展作出了重要贡献。

在中国城市发展的过程中,随着城市数量的不断增加和城市人口的急剧增加,出现了一个人类社会发展的新趋势——城市化。随着人们生活水平的提高、城市规模的扩大及功能的不断完善,新建、改建和扩建交通通道已成为城市发展的重要交通节点,这就要求大跨度桥梁通过合理的规划布局,使其能发挥便捷、迅速、高效、畅通的交通优势,形成多种运输方式有机组合的综合跨越通道体系,才能满足城市日益增长的跨越需求。大跨度桥梁作为跨越山谷、沟壑以及江河的城市轨道交通连接动脉,既要考虑工程造价又要考虑城市景观,已成为现代化城市赖以生存和发展的重要载体,在城市现代化进

程中发挥着越来越重要的作用。

针对轨道交通桥梁本身的安全性和舒适性要求高、我国对应规范少的现状,本书通过对轨道交通桥梁设计规范的解读、悬索桥合理刚度的研究、钢箱梁疲劳设计研究,为城市轨道交通跨江大桥设计提供一套方法;通过对组合梁桥突破极限、单肋拱创新标志、斜拉桥梁合理选择及自锚悬索世界纪录的分章论述和依托工程的介绍,为大跨度城市轨道交通专用桥设计提供一套创新思路。

结合几个轨道交通跨江大桥设计项目,汇集成书,希望在面对山地城市轨道交通跨江大桥设计挑战时,给予大家一些启示,为山地城市轨道交通跨江桥梁的建设发展有所贡献。同时,希望对从事城市桥梁建设的同行有所裨益。

参与本书编写的人员还有:黎小刚(第3章、7.2节、8.4节)、赵亮(第5章)、漆勇(7.3节、8.2节)、安永日(7.4节),对他们为本书付出的辛勤劳动表示感谢!感谢赖亚平、刘亢为本书提供全面校核和提出的宝贵意见。

最后,向参与本书技术审核、林同棣国际工程咨询(中国)有限公司的专家、同事表示感谢!感谢重庆大学出版社对我们的鼓励、信任和支持。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请各位同行、专家及读者斧正。



2021年6月于重庆

目 录

CONTENTS

第 1 章 概述	/1
1.1 大跨径桥梁	/2
1.2 轨道交通	/9
1.3 大跨度城市桥梁	/22
第 2 章 城市轨道交通桥梁设计创新及规范解读	/30
2.1 跨江大桥设计创新	/30
2.2 《城市轨道交通桥梁设计规范》解读	/39
第 3 章 大跨径轨道悬索桥合理刚度研究	/56
3.1 大跨径轨道悬索桥概述	/56
3.2 桥梁刚度现状分析与限值建议	/56
3.3 基于风-车-桥耦合振动分析的大跨径轨道 悬索桥刚度控制研究	/60
3.4 基于刚度变化的大跨径轨道悬索桥运营性 能分析	/68
3.5 小结	/75

第4章	大跨度城市轨道交通桥梁钢箱梁疲劳设计研究	/76
4.1	概述	/76
4.2	钢箱梁疲劳设计现状分析	/77
4.3	钢箱梁正交异性桥面板及轨道结构设计	/81
4.4	列车荷载	/91
4.5	列车荷载的影响范围	/92
4.6	减震垫、轨下纵梁和轨枕板的影响分析	/94
4.7	钢箱梁正交异性桥面板关键构造细节疲劳参数分析	/97
4.8	钢箱梁正交异性桥面板关键构造细节疲劳强度计算方法	/99
4.9	实例验证	/103
第5章	组合梁桥突破极限	/110
5.1	概述	/110
5.2	嘉华嘉陵江轨道专用桥设计	/113
5.3	钢箱梁段合理长度的确定	/117
5.4	计算结果	/118
5.5	关键构造设计	/131
第6章	梁拱组合创新标志	/144
6.1	概述	/144
6.2	广州市轨道交通六号线白沙河大桥设计理念	/144
6.3	桥梁设计的关键构造设计	/157
6.4	关键施工流程	/160
6.5	风-车-桥系统耦合振动分析	/162

第 7 章 斜拉桥梁合理布置	/172
7.1 概述	/172
7.2 蔡家轨道专用桥设计	/175
7.3 南纪门轨道专用桥设计	/188
7.4 高家花园轨道专用桥设计	/196
第 8 章 自锚悬索创纪录	/205
8.1 概述	/205
8.2 鹅公岩轨道专用桥设计	/209
8.3 鹅公岩轨道专用桥运营安全评价指标研究	/230

第1章 概述

最新统计资料显示,截至2020年年底,全球有77个国家和地区的538座城市开通了城市轨道交通系统,总里程超过33 346 km,其中,地铁、轻轨、有轨电车各占53%、5%和42%。截至2020年12月31日,我国内地累计有45座城市开通运营轨道交通,运营里程共计7 969.7 km。按线路敷设方式划分,地下线5 422.3 km,占比68.1%;地面线990.5 km,占比12.4%;高架线1 556.9 km,占比19.5%。2020年全年共完成轨道交通建设投资6 286亿元,同比增长5.5%,在建项目的可研批复投资累计45 289.3亿元,在建线路总长6 797.5 km,年度完成建设投资创历史新高。

截至2020年年底,共有65座城市的轨道交通线网规划获批,其中,城市轨道交通线网建设规划在实施的城市共计61个,在实施的建设规划线路总长7 085.5 km,2020年,共有8座城市新一轮城市轨道交通建设规划或规划调整获国家发改委批复并公布,获批项目中涉及新增线路长587.95 km,新增计划投资4 709.86亿元。根据《重庆市主城区轨道交通线网规划(2019—2035年)环境影响报告书征求意见稿公示》,重庆市主城区至2035年形成“22线1环”的线网布局,包括轨道快线和轨道普线,线网规模1 252 km(不含璧山、江津地区线路长41 km);规划至远景年形成“29线1环”的轨道线网1 473 km(不含璧山、江津地区线路长57 km)。

随着国民经济的高速发展和城市化进程的不断推进,大规模的城市轨道交通网络已成为城市发展集约化交通的必然选择,节能、环保、便捷的城市轨道交通已逐步成为城市居民出行首选的交通方式。

大跨度城市桥梁一般具有跨越山谷、沟壑、江河或城市内河流汇合的特点,如四川泸州从沱江和长江的交汇处逐渐拓展,重庆朝天门则是长江和嘉陵江汇合口,涪陵有长江和乌江流经,合川则有渠江、嘉陵江和涪江三江汇合。随着城市的发展,城市用地越来越少,人均

用地密度越来越高,城市需要向更广阔的地方拓展。随着城市郊区化程度的增加,社会经济的发展和人们生活质量的不断提高,居民对出行的质量要求也越来越高,地面公共交通拥堵问题更为突出,为了解决这一问题,满足人们对美好生活的追求,更有必要修建城市轨道交通。

随着轨道交通的发展,城区人流量的增加,更应加密核心区轨道网,城市中原有的跨江桥梁需要改建、扩建,城市发展新区需要新的过江通道。改建、扩建和新建的跨江大桥成为城市“内联”的有机结构,托起城市发展的未来,成为城市发展的脊梁,能更好地改善人们的生活质量。

1.1 大跨径桥梁

对桥梁按结构体系分类是以力学特征为基本着眼点,以主要的受力构件为基本依据,可分为梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥四大类。

1.1.1 梁桥

1) 连续梁桥

梁式桥种类繁多,是桥梁中较常用的桥型,其跨度为 20~300 m。最常用的大跨径梁桥主要为预应力混凝土连续箱梁桥。20 世纪 70 年代,我国开始修建连续箱梁桥,到目前为止,我国已建成多座连续箱梁桥,如一联长度 1 340 m 的钱塘江第二大桥和跨越高集海峡全长 2 070 m 的厦门大桥等。目前,我国预应力混凝土连续箱梁最大跨径为 165 m(南京长江二桥北汊主桥)。由于预应力混凝土连续箱梁具有桥面接缝少、梁高小、刚度大、整体性强、外形美观、便于养护等在构造、施工和使用上的优点,已成为成熟可靠的桥梁类型。其发展趋势为:减轻结构自重,采用高标号混凝土。随着建筑材料和预应力技术的发展,其跨径也可相应地增大。葡萄牙已建成 250 m 的连续箱梁桥,若超过这一跨径,不太经济。大跨径梁桥的上部结构大多采用箱形截面,是因为箱形截面有较大的抗扭刚度,箱梁允许有更大的长细比,同 T 形梁相比,其徐变变形较小。由于嵌固在箱梁上的悬臂板,其长度可以发生较大幅度的变化,且腹板间距也能放大,能适应各种使用条件,特别适合预应力混凝土连续梁桥、变宽度桥,因此,箱梁可灵活地建成弯斜桥。

连续箱梁桥的施工方法多种多样,因时因地,可根据安全经济、保证质量、降低

造价、缩短工期等因素综合考虑选择。一般常用方法有:搭设支架就地现浇、预制拼装(可以整孔、分段串联)、悬臂浇筑、顶推、用滑模逐跨现浇施工等。预应力钢束采用钢绞线,可以分段或连续配束,一般采用大吨位群锚。为了减轻箱梁自重,必要时可以采用体外预应力钢束。虽然连续箱梁桥采用预应力混凝土建造,能就地取材、工业化施工、耐久性好、适应性强、整体性好且美观。这种桥型在设计理论及施工技术上都发展得比较成熟。但是由于结构本身的自重大(占全部设计荷载的30%~60%),且跨度越大其自重所占的比值显著增大,大大限制了其跨越能力。还有大跨径连续箱梁要采用大吨位支座,如南京长江二桥北汊桥165 m变截面连续箱梁,盆式橡胶支座吨位达65 000 kN。大吨位支座性能如何、将来如何更换等一系列问题有待进一步研究。

2) 刚构桥

20世纪80年代以后,特别是90年代以来,随着交通业的迅速发展,要求行车平稳舒适,使连续梁桥得到迅速发展,但由于需设置大吨位的支座,增加了工程费用及养护成本,于是预应力混凝土连续刚构桥应运而生,近年来得到较快发展。刚架结构体系桥梁的上部结构梁(板)与下部结构墩柱(竖墙)整体结合在一起,梁与墩柱的结合处具有很大刚性。连续刚构在竖向荷载的作用下,梁(多为箱形)主要受弯,而在柱脚处有水平反力,其受力状态介于梁桥与拱桥之间,梁因柱的抗弯刚度而得到卸载作用。刚构又分为T型刚构、连续刚构、斜腿刚构和V型刚构。

(1) T型刚构

早期的刚构桥大多为T型刚构。T型刚构分为跨中设挂梁(如福州乌龙江大桥,主跨144 m,保持跨径纪录10年)和跨中带剪力铰(如福州洪塘大桥)两种基本形式。跨中设挂梁属静定体系,各T型刚构单元单独作用而使受力和变形均较大,存在一定的结构缺陷;跨中带剪力铰是一种超静定结构,该结构的特点是剪力铰起到传力(只传递竖向剪力而不传递纵向水平力和弯矩)和牵制悬臂端变形的作用。但存在跨中挠度大、行车不顺,剪力铰不易制造安装、年久容易变形损坏等缺点,并且各种外因都能产生结构的附加应力。

重庆长江大桥又称为石板坡长江大桥,修建于1981年,主跨度174 m,属于T型刚构桥,目前属国内同类结构中最大跨度的预应力混凝土T型刚构桥梁,如图1.1所示。



图 1.1 石板坡长江大桥

(2) 连续刚构

T 型刚构体系在设计中不断改进,逐步与连续梁体系的优点相结合。T 型刚构的粗大桥墩被柔性薄壁墩所取代,形成墩梁固的连续刚构体系,开辟了大跨度桥梁向轻型结构发展的途径。预应力混凝土连续刚构桥数跨相连,跨中不设铰或挂梁,行车舒适,特别适用于大跨度、高桥墩的情况。它是利用薄壁高墩的柔性来适应各种外力所引起的桥梁纵向位移。此外,桥墩柔性大,对梁的嵌固作用小,其受力情况接近连续梁桥。但柔性墩需要考虑主梁纵向变形与转动的影响,以及墩身偏心受压时的稳定性。当连续长度太大时,宜设置伸缩缝,做成数座分离式的连续刚构。2006 年建成的重庆石板坡长江大桥复线桥以主跨 330 m 成为当今世界第一跨径梁桥,如图 1.2 所示。结构体系采用长联大跨径混凝土刚构-连续混合梁桥,桥跨布置为 $87.75\text{ m}+4\times 138\text{ m}+330\text{ m}+133.75\text{ m}$,全长 1 103.5 m,全桥除主跨 330 m 中部有 108 m 钢梁外,其余均为预应力混凝土结构,单向四车道,桥面全宽 19 m。