

公路桥梁设计丛书

悬索桥设计

雷俊卿 郑明珠 徐恭义 编著
杨 进 主审

Suspension Bridge Design



人民交通出版社

公路桥梁设计丛书

悬索桥设计

Suspension Bridge Design

雷俊卿 郑明珠 徐恭义 编著
杨 进 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以悬索桥设计基本理论和静动力分析计算为理论基础,以国内外常见的钢桁架加劲梁、钢箱加劲梁、预应力混凝土加劲梁为主导,结合国内成功修建的悬索桥实例,详细论述了不同类型加劲梁所适用的悬索桥的设计计算方法和施工技术,并给出了手算和电算的公式、步骤及设计图的绘制方法。

本书可作为高等院校桥梁工程专业的桥梁课程和毕业设计等教学环节的参考用书,亦可供从事桥梁工程的专业技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

悬索桥设计 / 雷俊卿编著. —北京: 人民交通出版社, 2001. 10
(公路桥梁设计丛书)
ISBN 7-114-04097-0

I.悬... II.雷... III. 悬索桥—设计
IV.U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 074545 号

公路桥梁设计丛书

悬索桥设计

雷俊卿 郑明珠 徐恭义 编著

杨 进 主审

正文设计:涂 浩 责任校对:刘高彤 责任印制:张 凯

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 29 字数: 723 千

2002 年 1 月 第 1 版

2002 年 1 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001~4000 册 定价: 56.00 元

ISBN 7-114-04097-0

U · 02995

《公路桥梁设计丛书》编委会

主任委员：杨炳成

委 员：(以姓氏笔画为序)

邬晓光 刘士林 杨炳成 胡兆同 胡大琳
贺栓海 徐 岳 黄平明 雷俊卿

《公路桥梁设计丛书》分册编写人员

预应力混凝土连续梁桥设计	徐 岳	王亚君	万振江
桥梁通用构造及简支梁桥		胡兆同	陈万春
混凝土弯斜梁桥		黄平明	杨炳成
悬索桥设计	雷俊卿	郑明珠	徐恭义
组合拱桥		李传习	贺栓海
斜拉桥			刘士林
刚架桥	邬晓光	邵新鹏	万振江
拱 桥			胡大琳

序

20世纪90年代中国悬索桥的建设实现了跨越式发展,从1991年12月28日江泽民主席为广东汕头海湾大桥开工典礼掀动开工按钮,拉开中国现代悬索桥建设的序幕,到1999年9月28日江泽民主席出席跨径中国第一、世界第四的江苏江阴长江大桥竣工通车典礼,在这短短的8年里,实现了中国建桥技术人员多年的梦想,使中国的桥梁建设跻身于世界桥梁建设先进水平之列,树立了20世纪中国桥梁工程建设新的里程碑。这些代表土木工程技术巨大成就的现代化桥梁,充分体现了中国桥梁界的广大建桥技术人员独立自主、自力更生、艰苦奋斗和不断创新的敬业精神和劳动硕果。目前,建成和正在建设的大跨悬索桥已超过10座,其中有:

广东汕头海湾大桥,1991年12月开工,1995年12月建成,是主跨452m的预应力混凝土加劲梁悬索桥,其跨径位居同类桥型世界第一,是国内第一座大跨度现代悬索桥;

湖北西陵长江大桥,1994年3月开工,1996年8月建成,主跨900m,首次实现一跨跨越长江,是中国自主设计施工建成的第一座全焊钢箱加劲梁悬索桥;

广东虎门大桥,1992年10月开工,1997年10月建成,主跨888m,是中国自主建造的第一座现代化六车道高速公路钢箱梁悬索桥;

江苏江阴长江大桥,1994年11月开工,1999年9月建成,是主跨1385m的钢箱梁悬索桥,是中国第一座跨径超越千米的特大桥,建桥技术达到国际先进水平。

福建厦门海沧大桥,1996年12月开工,1999年12月建成,主桥跨径为230m+648m+230m,是国内首座三跨连续漂浮式悬索桥,位居同类桥型亚洲第一,世界第二。

已建成通车的悬索桥还有重庆丰都长江大桥,重庆忠县长江大桥,湖北宜昌长江大桥。正在施工建设的江苏润扬长江大桥,重庆鹅公岩长江大桥、重庆万县长江大桥等大跨度现代悬索桥均各具特色且在科技创新方面有所成就。

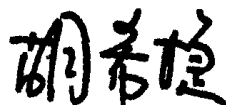
中国交通部规划的五纵七横高速公路之一的黑龙江同江至海南省三亚的高速公路将沿海跨越渤海湾、杭州湾、琼州海峡等交通障碍。在跨越上述交通障碍时,悬索桥将是首选桥型之一。目前中国正在规划的超大型悬索桥有:香港青龙大桥、青岛海湾大桥、珠海邻汀洋大桥、武汉天兴洲公铁两用大桥、武汉阳逻大桥等。

国外正在规划设计的悬索桥有意大利墨西拿海峡大桥、日本纪淡海峡大桥、欧洲——非洲之间的直布罗陀海峡通道等。

中国的交通事业在迅猛发展,正进入特大桥建设的黄金时期,中国的悬索桥必将继续创新进步。广大桥梁工作者还应继续协同攻关,研究探讨以下各个领域:新材料、新工艺、新的结构型式;超大跨悬索桥的力学性能分析;深水基础及软土地区锚碇和桥塔基础的设计与施工技术;悬索桥抗风、抗震以及车桥共振耦合分析与试验研究;特大桥施工及运营的工程监控及综合的科学管理;解决养护维修、可靠度、耐久性问题等。公路桥梁设计丛书之一《悬索桥设计》一书的编著与出版必将对我国悬索桥的建设和发展大有裨益。

我相信,在21世纪里,我国的桥梁工作者将不负国家和人民的重托,继续勤奋工作,刻苦钻研创新,借鉴国内外建桥经验,将我国的桥梁事业推向前进,在祖国辽阔的大江大河、山川、海湾之上建造出更好、更经济、更美丽、更宏伟的长大桥梁,为祖国的繁荣富强做出贡献,为实现中华民族的伟大复兴而努力奋斗!

交通部副部长:



2001年11月

前 言

悬索桥以其受力性能好,跨越能力大,轻型美观、抗震能力好,而成为跨越大江大河、海峡港湾等交通障碍的首选桥型。我国是悬索桥的发源地,古代悬索桥的修建比欧洲早一千多年,经历了竹藤、铁链悬索桥的古近代发展过程。现代悬索桥以高速公路发展为契机,揭开了新的历史篇章。从 20 世纪 90 年代起,已建成了汕头海湾大桥、西陵长江大桥、广东虎门大桥、江阴长江大桥、香港青马大桥、厦门海沧大桥、宜昌长江大桥等;还有几座悬索桥正在施工或规划设计之中。悬索桥也是桥梁工程专业方向课程教学中重点讲授和掌握的基本桥型。

本书在内容体系安排上,以悬索桥设计基本理论和静动力分析为理论基础,以国内外常见的钢桁架加劲梁、钢箱加劲梁、预应力混凝土加劲梁为主导,结合国内成功修建的悬索桥实例,详细论述了不同类型加劲梁所适用的悬索桥的设计方法和施工技术。为了便于读者深入理解悬索桥的设计理论和正确的计算方法,书中还详细介绍了手算和有限元法电算的公式及步骤,给出了实桥设计计算的数值结果及主要的设计图,以期能对桥梁工程专业的教学和从事桥梁设计、施工、监理和管理的技术人员有所裨益。

全书由雷俊卿教授、郑明珠(教授级)高工、徐恭义(教授级)高工主编。具体分工为:雷俊卿编写第一章第一、六、八、九节,第二章,第四章第一节,第七章第二、四节;郑明珠编写第三章,第五章;徐恭义编写第一章第二、三、四、五节,第六章第一、二、四、五、六节;王武勤(教授级)高工编写第一章第七节;第四章第二、三节由雷俊卿、罗昊冲编写;第六章第三节由李龙安、徐恭义编写;第七章第一节由雷俊卿、徐恭义编写;第七章第三节由雷俊卿、郑明珠、徐恭义编写。全书由雷俊卿负责组织并统稿,杨进(教授级)高工主审。

本书从 1995 年开始着手搜集素材和编写,后反复修改,经历了近七个春秋,终得以成书。在本书的编写过程中,得到了中国路桥(集团)中交公路规划设计院、中铁大桥勘测设计院、西安公路交通大学公路学院(现长安大学公路学院)、北方交通大学土木建筑学院的领导和同志们的支持和帮助;得到西南交通大学钱冬生教授、江阴长江大桥设计负责人交通部凤懋润总工程师、西安公路交通大学华孝良教授、中国路桥(集团)公路二局侯金龙总工程师的关心和鼓励;中铁大桥局桥梁科学研究院荆秀芬高工为本书提供了资料;本书中部分插图由尹红亮、傅战工、易海平等绘制;人民交通出版社的领导和编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动;谨在此一并表示诚挚的感谢!书中参考了许多悬索桥方面的文献,在此对为我国悬索桥的建设发展和科技创新做出贡献的同志们表示由衷的钦佩和敬意。

由于作者水平有限,书中难免有错误之处,敬请读者批评指正。来函请寄:

北京市海淀区西直门外上园村 3 号北方交通大学土木建筑学院雷俊卿(邮编:100044,电话:010-51840237);或寄:西安市南二环中段长安大学公路学院(邮编:710064)。

作 者

2001 年 6 月于北京

《悬索桥设计》编著者、审校者简介



雷俊卿 女,1956年12月出生于河南省南阳市唐河县,1982年1月毕业于西南交通大学桥梁专业,获工学学士学位;1987年5月西南交通大学桥隧专业研究生毕业,获工学硕士学位;现正攻读长安大学公路学院博士学位。自1982年1月起在西南交通大学桥梁教研室任教,1988年5月调入西安公路学院工作(后更名为西安公路交通大学,现为长安大学)。历任实习生、助教、讲师、副教授、教授、教研室副主任、桥隧系副主任。2000年8月调入北方交通大学土木建筑学院桥梁结构研究所工作。

主要编写专著和教材为:主编《桥梁悬臂施工与设计》、《土木工程项目管理手册》、交通部公路工程监理培训教材《合同管理》。共发表学术论文25篇,主要有:《超大跨悬索桥发展问题初探》、《既有公路悬索桥承载力与变形研究》、《论吊桥修复工程中缆索接长与内力调整》、《悬索桥的经济技术指标分析与研究》、《复合外力作用下箱梁的应力计算与分析》、《公路桥梁抗震防灾安全性评估分析》、《20世纪中国公路钢桥的现状评估与对策》、《世界上最大跨度的桥——日本明石海峡大桥设计简介》、《广东虎门大桥悬索桥养护维修检查指南》、《南京长江第二大桥南汊斜拉桥检查养护技术规程》等。

主持或参与的桥梁及管理类科研和设计及设计咨询共20余项,主要有中国首座平面曲线三跨预应力混凝土箱梁桥(青岛市八码头立交桥)施工监控试验研究,陕西咸阳渭河预应力混凝土斜拉桥竣工试验研究,陕西禹门口黄河公路悬索桥试验及维修加固研究,西安公路交通大学人行天桥中承式钢管拱桥竣工试验研究;青海省公伯峡黄河水电站重载钢管拱桥设计咨询与复核,陕西旬阳汉江大桥(预应力混凝土连续刚构桥)设计复核。广东虎门大桥悬索桥管理系统研究;南京长江第二大桥管理系统研究等。



郑明珠 女,1940年5月出生于浙江杭州,1964年毕业于唐山铁道学院(现西南交通大学前身)桥梁专业,先后在铁道部第一设计院、交通部公路规划设计院、中美合营华杰工程咨询公司从事铁路、公路桥梁勘察设计、计算机软件开发及应用等工作。历任实习生、技术员、工程师、高级工程师、教授级高级工程师及专业组长、华杰公司副总工程师、大桥设计项目负责人、设计总工程师、西南交通大学兼职教授。曾荣获交通部“七五”科技攻关一等奖及“有突出贡献科技人员”称号,广东省二线一桥(虎门大桥)建设标兵称号,主持设计的虎门悬索桥获国家设计金奖,交通部设计一等奖,虎门大桥成套技术荣获国家科技进步二等奖,交通部科技进步特等奖。

主要业务经历有公路桥梁综合计算程序的调试、移植及二次开发;七五科技攻关项目路线CAD系统桥涵子系统软件开发;广东虎门悬索桥设计;江苏润扬长江公路大桥设计。主要学术论文有《非线性分布的温度应力》、《公路桥梁综合计算程序在斜拉桥设计中的特点》、《虎门悬索桥设计》、《虎门悬索桥施工猫道设计》。



徐恭义 男,1963年3月出生于山东青岛,1984年7月毕业于西南交通大学土木工程系桥梁专业,分配至铁道部大桥工程局勘测设计院工作。先后从事桥梁设计电算程序编制、桥梁结构分析计算和桥梁结构设计工作,历任实习生、助理工程师、工程师、高级工程师、教授级高级工程师以及设计项目负责人、设计室副主任、主任、院副总工程师。先后荣获湖北省青年科技能手、铁道部青年科技拔尖人才、铁道部有突出贡献的中青年专家等。2000年考入西南交通大学土木工程系桥梁与隧道专业攻读博士学位。

主要参与项目有预应力混凝土及钢筋混凝土桥综合设计程序(PRBP)编制、杭州钱塘江二桥计算、茅岭江大桥(铁路连续梁桥)计算、汕头海湾大桥(预应力混凝土加劲梁悬索桥)设计、西陵长江大桥(钢箱梁悬索桥)设计、厦门海沧大桥(三跨钢箱梁悬索桥)设计审核、江阴长江大桥(钢箱梁悬索桥)设计优化、塞浦路斯罗密欧大桥(曲梁顶推)施工技术顾问以及青岛海湾大桥(特大跨度悬索桥)方案研究等。主要学术论文有《公路桥规中收缩徐变的程序算法》、《大跨度混合型斜拉桥结构体系比较计算》、《汕头海湾悬索桥预应力混凝土箱形加劲梁的施工设计》、《伶仃洋东航道悬索桥方案设计》等。



杨进 男,1930年9月出生于湖南衡阳,1953年9月毕业于华南工学院土木系,先后在铁道部中南设计分局、铁道部大桥设计事务所和铁道部大桥工程局勘测设计院从事桥梁设计工作,历任实习生、技术员、工程师、高级工程师、教授级高级工程师以及设计组长、设计室主任、设计院副总工程师和西南交通大学兼职教授,国家级有突出贡献的中青年专家,全国工程设计大师,第八届、第九届全国政协科技界委员。

主持设计的主要项目有汕头海湾大桥(预应力混凝土加劲梁悬索桥)、西陵长江大桥(钢箱梁悬索桥)、汕头岩石大桥(混合梁斜拉桥)和宜昌夷陵长江大桥(三塔预应力混凝土梁斜拉桥)以及泰国曼谷八世皇斜拉桥(加拿大公司设计)的设计审核等。主要学术论文有《深水桥墩双承台钢管柱基础》、《汕头海湾大桥主孔悬索桥设计构思及新技术因素》、《西陵长江大桥——我国首座大跨度全焊接钢箱梁现代悬索桥》、《汕头岩石大桥主桥钢箱梁设计》和《潮州韩江大桥方案设计与技术构思》。

王武勤 男,1956年6月生于陕西省韩城市,1982年1月毕业于西南交通大学桥梁工程专业,分配至铁一局工作。1987年赴日本研修“大跨度桥梁设计与施工技术”。1999年调入中国路桥(集团)总公司工作。现任中国路桥(集团)总公司副总工程师(教授级高工)。先后荣获铁道部青年科技拔尖人才、铁道部有突出贡献的中青年专家、陕西省技术明星、国务院政府特殊津贴等。参加及主持了公路和铁路二十余座大桥的施工技术及项目管理工作,主要获奖项目有:陕西安康汉江斜腿刚构薄壁箱型钢梁铁路桥项目获国家科技进步一等奖和国家优质工程金奖,大秦铁路北京怀柔郑庄重特大桥(铁路钢筋混凝土连续刚架桥)获铁道部科技进步三等奖,主持秦皇岛铁路刚性索斜拉桥转体施工技术工作,主持湖北襄樊汉江长虹特大桥(公路预应力混凝土连续梁桥)的施工技术工作,所采用悬臂现浇施工的滑动斜拉式轻型挂篮施工技术获铁道部工程总公司科技进步三等奖。

李龙安 男,1963年2月出生于湖北武穴,1986年7月毕业于兰州大学力学系,现为大桥工程局勘测设计院高级工程师。

罗昊冲 男,1976年生于广东番禺,1998年7月毕业于西安公路交通大学桥梁专业,现为天津市市政工程设计研究院助理工程师。

目 录

上篇 设计概论

第一章 悬索桥设计综述	3
第一节 悬索桥的发展与规划设计.....	3
第二节 悬索桥的总体构思与设计.....	8
第三节 悬索桥的结构与景观设计	15
第四节 扁平钢箱梁的结构细节设计	22
第五节 公路钢箱梁桥的桥面铺装	31
第六节 悬索桥的经济技术参数分析	36
第七节 悬索桥的施工与监控	40
第八节 悬索桥的试验	53
第九节 悬索桥的防腐涂装设计及技术指标	73
第二章 悬索桥设计计算基本理论及静动力分析	86
第一节 悬索桥设计计算基本理论	86
第二节 悬索桥的静力分析.....	104
第三节 悬索桥的动力分析.....	135
第三章 悬索桥施工猫道设计	184
第一节 国内外悬索桥施工猫道设计概况.....	184
第二节 施工猫道的设计与构造.....	185
第三节 施工猫道结构计算与线形控制.....	190
第四节 施工猫道架设.....	194
第五节 猫道设计与施工架设中若干问题的探讨.....	195

下篇 工程实践

第四章 钢桁加劲梁悬索桥设计	199
第一节 钢桁加劲梁的应用与发展.....	199
第二节 结构构造与总体设计.....	202
第三节 结构设计计算与验算.....	204
第五章 公路钢箱加劲梁悬索桥设计	256
第一节 总体设计.....	256
第二节 抗风与抗震试验研究.....	265
第三节 结构与构造.....	276

第四节	结构内力分析与应力验算·····	323
第六章	混凝土加劲梁悬索桥设计·····	358
第一节	混凝土加劲梁的应用与发展·····	358
第二节	混凝土加劲梁的结构特点与设计·····	359
第三节	抗风设计分析·····	368
第四节	混凝土加劲梁的施工·····	377
第五节	混凝土加劲梁的桥面·····	380
第六节	汕头海湾大桥设计概况·····	382
第七章	悬索桥的典型实例及发展展望·····	388
第一节	国内悬索桥实例简介·····	388
第二节	国外悬索桥实例简介·····	412
第三节	建设和筹划中的悬索桥·····	428
第四节	未来悬索桥发展探讨·····	444
参考文献	·····	449

上 篇

设计概论

第一章 悬索桥设计综述

第一节 悬索桥的发展与规划设计

一、悬索桥的发展历程

悬索桥是指以主缆索受拉为主要承重构件的桥梁结构。其结构构造包括基础、塔墩、锚碇、主缆索、吊索、加劲梁及桥面结构等。在桥梁设计时,当需要桥梁跨度在 600m 及以上时,总是首选悬索桥这一经典桥型。其主要原因是以高强钢丝作为主要承拉结构的悬索桥具有跨越能力大、受力合理、最能发挥材料强度和造价经济等特点,同时还以其整体造型流畅美观和施工安全快捷等优势而倍受推崇。

1. 中国悬索桥的发展历程

(1)中国悬索桥的发展历史较古老悠久。远在公元前 250 多年,在中国四川境内就修建了“笮桥”(即竹索桥),还修建有藤索桥。在中国漫长的封建社会,铁索已作为一种工具被使用,所修建的铁索桥则较多。据史书文献记载,早在公元前 50 年(即汉宣帝甘露 4 年)已在四川建成长百米的铁索桥。1665 年,徐霞客有一篇题为《铁索桥记》的游记曾被传教士 Martini 翻译到西方,该书详细记载了 1629 年中国贵州境内修建的一座跨度约 122m 的铁索桥。1667 年,法国的传教士 Kircher 从中国回去后,出版了《中国奇迹览胜》(China Monuments Illustrate),书中记述了建于公元 65 年的云南兰津铁索桥。该书曾被译成多种文字,并多次再版。据科技史学家研究,只是在上述书籍出版之后,索桥才传到西方。因此可以说,中国古代的悬索桥发展是独创发明并在国际上领先的。

(2)中国近现代悬索桥的发展。1938 年,湖南一座公路悬索桥建成,该桥可通行 10t 汽车,随后又有一批公路悬索桥建成通车。新中国成立后,共建成 70 多座悬索桥,但其结构形式都比较简洁,跨径不太大,工程规模较小。进入 20 世纪 90 年代,中国现代悬索桥的建设揭开了新的历史篇章,主跨 452m 的广东汕头海湾大桥被誉为中国第一座大跨度现代悬索桥,其主跨位居预应力混凝土加劲梁悬索桥的世界第一;西陵长江大桥,主跨为 900m,是国内自主设计制造的第一座全焊接钢箱加劲梁悬索桥;广东虎门大桥主航道悬索桥,主跨 888m;是中国第一座高速公路上的六车道悬索桥;香港青马大桥,悬索桥主跨为 1377m;江苏江阴长江大桥,主跨为 1385m 的钢箱加劲梁悬索桥,是目前列为世界第四的大跨径悬索桥;厦门海沧大桥,为三跨漂浮式钢箱加劲梁悬索桥,主桥为 230m + 648m + 230m。丰都长江大桥,是一座主跨为 450m 的浅加劲钢桁梁式悬索桥。宜昌长江公路大桥和重庆忠县长江大桥都已建成。江苏润扬长江大桥,重庆鹅公岩长江大桥等大跨度悬索桥也已相继开工建设。目前,正在筹划的珠海至香港伶仃洋公路大桥,已有多组悬索桥方案提出并进行比选。国内还有正在进行方案研究设计的青岛海湾特大跨度悬索桥;香港青龙悬索桥等。可以预见,随着我国桥梁科研、设计、施工队伍科技水平的不断提高,跨越中国辽阔大地上的江河湖泊、海峡港湾的悬索桥会修建得更多

更好。

2. 欧洲悬索桥的发展历程

(1)20 世纪以前欧洲的悬索桥。国外悬索桥的修建历史,较中国晚了一千多年,据文献史料记载,1734 年萨克森的军队远征但泽(今波兰格但斯克),途经奥得河时,修建了西方第一座临时性铁索桥。1741 年英国建成一座铁链悬索桥,叫侗氏桥,跨度为 21.34m,使用了 61 年,毁坏于 1802 年。当时的欧洲已经历了文艺复兴运动和宗教改革,资产阶级革命已取得了胜利。欧洲在政治、经济、文化和科技方面出现了很大进步。19 世纪英国修建了许多座铁链悬索桥,其中有代表性的为 Telford 修建的威尔士——梅来峡悬索桥,跨径为 174m; Brunel 修建的克里夫顿桥。当时英国的悬索桥跨稍大于中国的古桥,桥上可走行马车,有些还增加了斜拉索,桥的主缆已开始使用眼杆链。Telford 在修建悬索桥时除了根据经验外,还开始了试验尝试,用金属作了许多试验,试图以理论指导桥梁工程实践,认为设计容许应力不宜超过 $1/3$ 抗拉强度。

在法国,纳维尔(Navier)被派至英国学习并首先开始悬索桥的理论研究。1823 年,取得“稳定性随桥的重量与跨长而增加”的结论。同年,法国开始大量修建悬索桥,至 1870 年,共建 500 多座。其中最具代表性的为 1834 年建成的 Freiburg 桥,跨径为 265m。直至 19 世纪末,该桥为欧洲最大跨径桥。当时法国工程师 Sequin 和 G·Lame 还发明了用铁丝代替链条制成的悬索桥主缆,并提出了用无端索进行主缆施工的方法。1844 年,俄国工程师 S·K. Kerbedze 和 Souko 在彼得堡建成 Neva 河悬索桥,桥塔建在河中,将桥分为两跨,计 114.5m。

(2)20 世纪的欧洲悬索桥。欧洲悬索桥的建设继续发展并有所创新。法国于 1959 年建成了主跨为 608m 的坦卡维尔悬索桥,其创新之处为加劲桁梁连续,在塔墩处不断开,将主缆与加劲梁在主跨跨中点固接,桥塔为混凝土。

英国在 1964 年和 1966 年先后建成主跨为 1006m 的 Forth 公路悬索桥和主跨为 988m 的 Severn 桥。Forth 桥基本上属美国流派的悬索桥,主要技术是从美国引进的,其他方面有所改进,而 Severn 桥的建成则是悬索桥发展中的一个新的里程碑,该桥的创新特点体现在第一次采用了扁平纤细、截面具有良好抗风性能的全焊流线形钢箱梁,打破了钢桁架加劲梁一统天下的局面,另外该桥还采用了斜吊索以提高桥梁的抗风阻尼。

随后 1970 年在丹麦修建的主跨为 600m 的小贝尔特(Little belt)桥和 1973 年在土耳其建成的主跨为 1 074m 的 Bosphorus 一桥,主要结构构思均与 Severn 桥相似,为扁平流线形加劲钢箱梁。1981 年,英国又建成了 Humber 特大跨悬索桥,主跨为 1 410m,也是扁平钢箱加劲梁,采用混凝土桥塔,为当时世界上第一大跨径桥梁。1988 年土耳其又建成 Bosphorus 二桥,主跨为 1 090m,扁平加劲钢箱梁,采用了直吊杆。1998 年丹麦大贝尔特(Great belt)悬索桥建成,主跨为 1624m,也为扁平钢箱加劲梁。

欧洲现代大跨悬索桥的修建确定了混凝土桥塔、扁平流线型全焊加劲钢箱梁悬索桥的优势,且比桁架式加劲梁节省工程投资费用 10%左右。因为欧洲大部分悬索桥为英国人设计,所以形成了英国流派悬索桥的风格。

3. 美洲悬索桥的发展历程

(1)美洲 20 世纪前的悬索桥。李约瑟(Joseph Needham)认为,南美的古索桥是在公元前 7 世纪至公元 16 世纪的前哥伦布时代由中国人传播到那里的,美国在 1801 年,由 James Finley 修建了 Jacob 洞铁索桥。1830 年至 1832 年,美国人 Ellet 到法国学习,并将法国用优质锻铁丝主缆代替链条的技术带回美国,并于 1847 年至 1849 年修建了跨俄亥俄河的 Wheeling 悬索桥,跨径达 308m,创当时最大跨径桥纪录。但该桥于 1854 年 5 月 17 日为大风所毁。随后,美国的老

Robbling 针对 Wheeling 桥的事故详加研究,对悬索桥的设计与分析做了重要的贡献,其儿子 W·A·Roebing 也参加了悬索桥的建设和研究工作,并于 1883 年建成了美国 Brooklyn 桥,主跨达 488m,被称为当时世界工程的第八奇迹。

(2)20 世纪美国的悬索桥。20 世纪初叶,美国大城市的兴起,促进了大跨桥梁建设的发展。在 1920 年之前,美国相继建成的悬索桥有:匹兹堡桥、布鲁克林桥、威廉斯堡桥、曼哈顿桥等。接着在 1931 年,美国在国际上率先建成跨度超过千米的乔治华盛顿(George Washington)大桥,主跨达 1 067m;1937 年建成的旧金山金门(Golden Gate)大桥,主跨为 1 280m,曾保持世界上最大桥跨纪录达 27 年之久,使美国的悬索桥建设成就遥遥领先于其它各国。

1940 年,美国发生了塔科马海峡(Tacoma Narrows)老桥风毁事故,悬索桥建设步伐放慢。经过专家们的多方调查、风洞试验研究和科学分析,认识到风对悬索桥涡流和颤振的动力作用。即塔科马老桥用下承式钢板梁作为加劲梁,抗风可靠性极差。提出了相应处治对策。通过此风毁事故的教训,世界各国在较大跨悬索桥中,不再使用钢板梁作为加劲梁。

50 年代,美国的悬索桥又蓬勃发展起来,其代表作为 1964 年修建的韦拉扎诺海峡(Verrazano Narrows)桥,主跨达 1 298m,双层桥面,12 条车道,创造了新的桥梁跨径世界纪录,并保持 17 年之久。至今美国仍是世界上拥有悬索桥最多的国家,在科研、设计和施工技术上形成优势,使悬索桥成为惟一超过千米的成熟桥型。并形成了美国流派的悬索桥风格。

4. 日本悬索桥的建设

日本近代悬索桥发展势头迅猛,后来居上。日本 1962 年建成主跨为 367m 的若户大桥,随后主要在本州四国联络线中修建了 11 座特大跨径的悬索桥。较著名的悬索桥有:主跨为 770m 的因岛大桥,主跨为 876m 的大鸣门桥,主跨为 940m 的下津井濑户大桥,主跨分别为 990m 和 1 100m 的北、南备赞大桥,世界上第一大跨径 1990.8m 的明石海峡大桥也于 1998 年建成。日本的悬索桥,大部分为钢塔和钢桁加劲梁,并且大多为公铁两用悬索桥。

综上所述,国内外悬索桥的建设一次次刷新了桥梁的跨径纪录,并将在 21 世纪桥梁的建设中,继续显示出特大跨悬索桥的勃勃生机。

二、悬索桥建设工作的程序与规划设计

大跨度悬索桥的建设,要经过调研、规划、设计、制造和施工等阶段,常常需要十年左右的时间。从各种内容的调查研究到竣工通车的工作程序如图 1-1-1 所示。

实际的工作并不一定如图示那样顺利,而常常要反复进行桥梁方案比选、论证、修正和结构受力分析试算及工程造价的费用估算、概算和预算等。

下面就调研和规划设计阶段的主要工作内容予以论述。

1. 规划与可行性调研阶段

根据国民经济的发展,并在政府有关部门作出修建大跨度悬索桥规划的同时,应该开始各种基本情况的可行性调查与研究。

(1)基本情况调研。应对修建大跨度悬索桥的有关地区的现有交通情况,如交通组织、管理体制,交通流量等进行调查和研究,并对将来的交通量作出预测,据此选定长大悬索桥所在线路的设计标准。

(2)路线选定。根据实地调查和选定的路线设计标准,对包含大跨度悬索桥在内的整个线路进行比选。

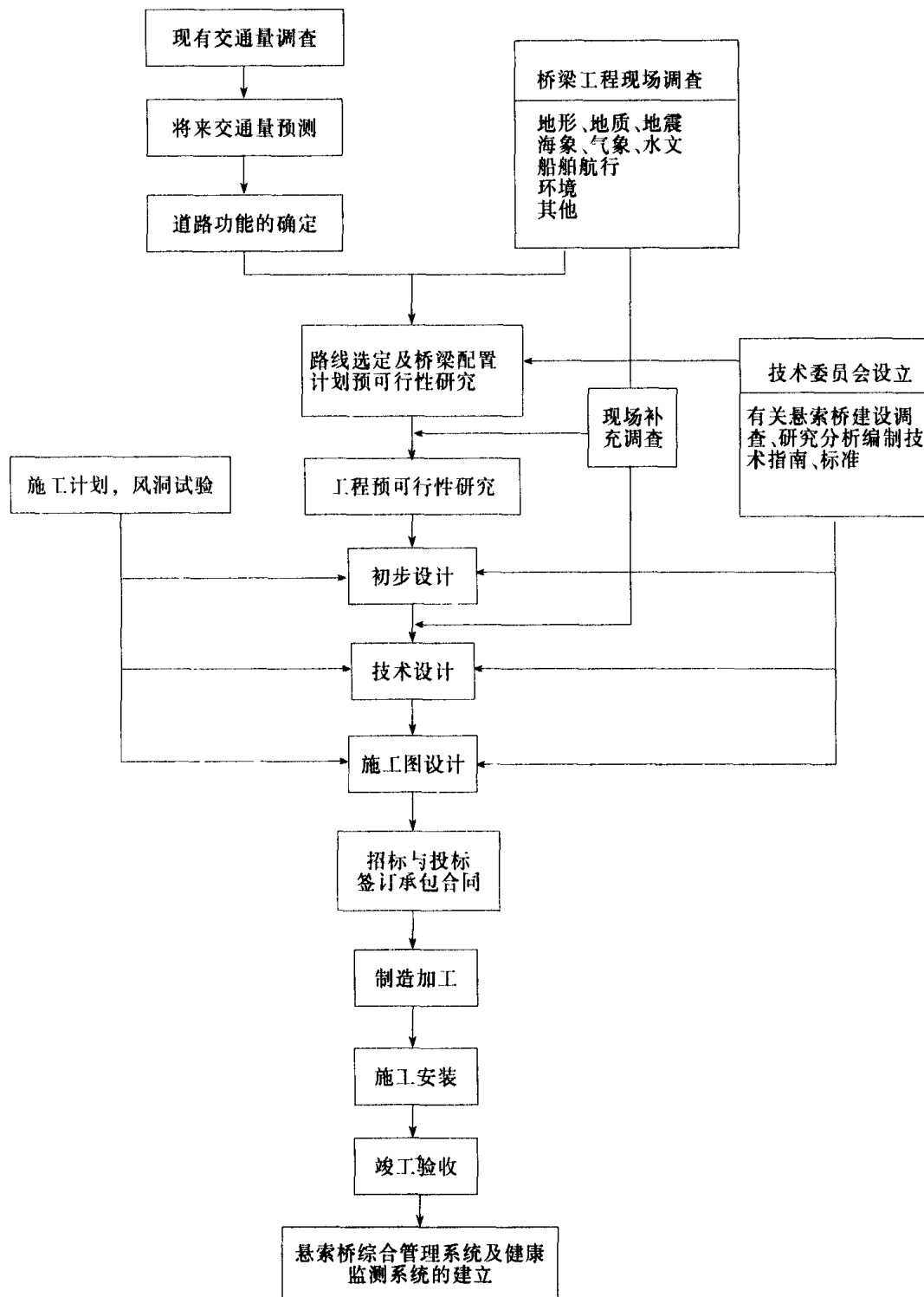


图 1-1-1 悬索桥建设的工作程序

线路选择时应选择 2~3 个可能线路,对各条线路的工程估算、悬索桥的规模、技术的难易程度、设计与施工的可行性,对环境的影响等方面进行比较,提出最优线路的有关资料。线路选择和桥梁配置及建桥规划是左右整个大桥建设计划最重要的过程,需要有丰富的技术经验和总体把握全局的观念。

(3)成立技术委员会。与桥梁选址和选型工作相平行,伴随悬索桥建设的过程设置专门的技术委员会,分领域进行慎重讨论研究并审定悬索桥相关的技术标准或规程及其它重要技术专题文件,如设计标准、制造标准、涂装标准等,这是非常重要且有益的。

设计标准中最重要的是包含活荷载、风荷载、地震作用等的荷载作用标准,及其荷载的组合和结构构件容许应力的提高系数,或者可靠度指标 β 的取值等。上述各项标准应根据悬索

桥的规模、使用寿命,是作为公路桥、铁路桥还是公铁两用桥的使用目的等优化确定。

线路和桥位选定之后要再一次进行实地调研,调研的项目和内容应比初次调研更具体、更详细,特别要注意悬索桥基础位置附近的地形和地质情况。

(4)详细调研内容。大跨度悬索桥必须的调研种类、内容和项目,如表 1-1-1 所示。

悬索桥详细调研种类、内容和项目

表 1-1-1

序号	调研种类	调研内容	调研项目
1	地质、地形	地形测量,地史、地质资料收集,物理探查,钻孔,标准贯入度试验,土质试验,岩石试验,探坑试验,平板荷载试验,地下水位	架桥位置,桥长,跨度划分,下部结构位置,持力层选定,土的容重、内摩擦角、粘着力、允许承载力、压实沉降量,施工方法的确定
2	海象、气象、水文、风力	潮水流、潮水位、波浪压力、波浪高度、航行船舶、风速、降水量、气温、雾、雪,抗风研究	计算水压、潮流压、波浪压力、决定跨度划分、桥下净空、风荷载、温度荷载、施工方法
3	河川、航道	流量、流速、水位、航行船舶,通航论证	决定跨度划分、桥下净空、施工方法、墩台类型
4	地震	地震记录、震害记录,地震危险性分析	决定设计震度、设防标准
5	附属结构物	电力、电信、输水管、煤气管等附属结构物	决定附属结构物的尺寸、重量及安装位置
6	环境保护	渔业、大气污染、噪声、振动、景观、文物、历史古迹,环保评价	环境保护对策,计划施工方法的决定

调研之前,应根据桥址的自然条件和周围的环境,选择调研项目,并应和有关部门协商,对调研工作取得一致意见,通力合作做好有关的调研工作。这些调研工作有以下几点应予特别重视:

①地形地质调研。首先应对可能的 2~3 个线路进行宏观区域地形地质调查。

调查目的是选定锚碇和桥塔基础的位置和形式,决定最优线路和跨度比。因此,在地质调查中,主要是进行预定的下部结构建设地点的物理探查、钻孔、岩石试验等,以明确地基的变形、承载能力等特性。

悬索桥的锚碇是主缆锚固的基础构件,锚碇区的地形和地质条件会直接影响悬索桥总体布局的合理性及全桥的经济性,应予特别重视。同时对受力较大的主塔基础附近也应进行重点勘探,以选择合适的墩位及合理的基础形式。

②水文、气象调研。水文、气象条件是决定悬索桥结构形式、抗风安全性和施工方案的重要基础数据。

对风荷载,除收集足够的历史观测资料外,还有必要进行现场的观测,以便建立桥址风速与历史资料之间的相关关系,从而对观测数据进行统计数学处理,作为长大跨悬索桥抗风安全设计、施工的基本条件。

此外,还应调查降水量、气温、雾、雪等资料。