

现代桥梁新技术系列

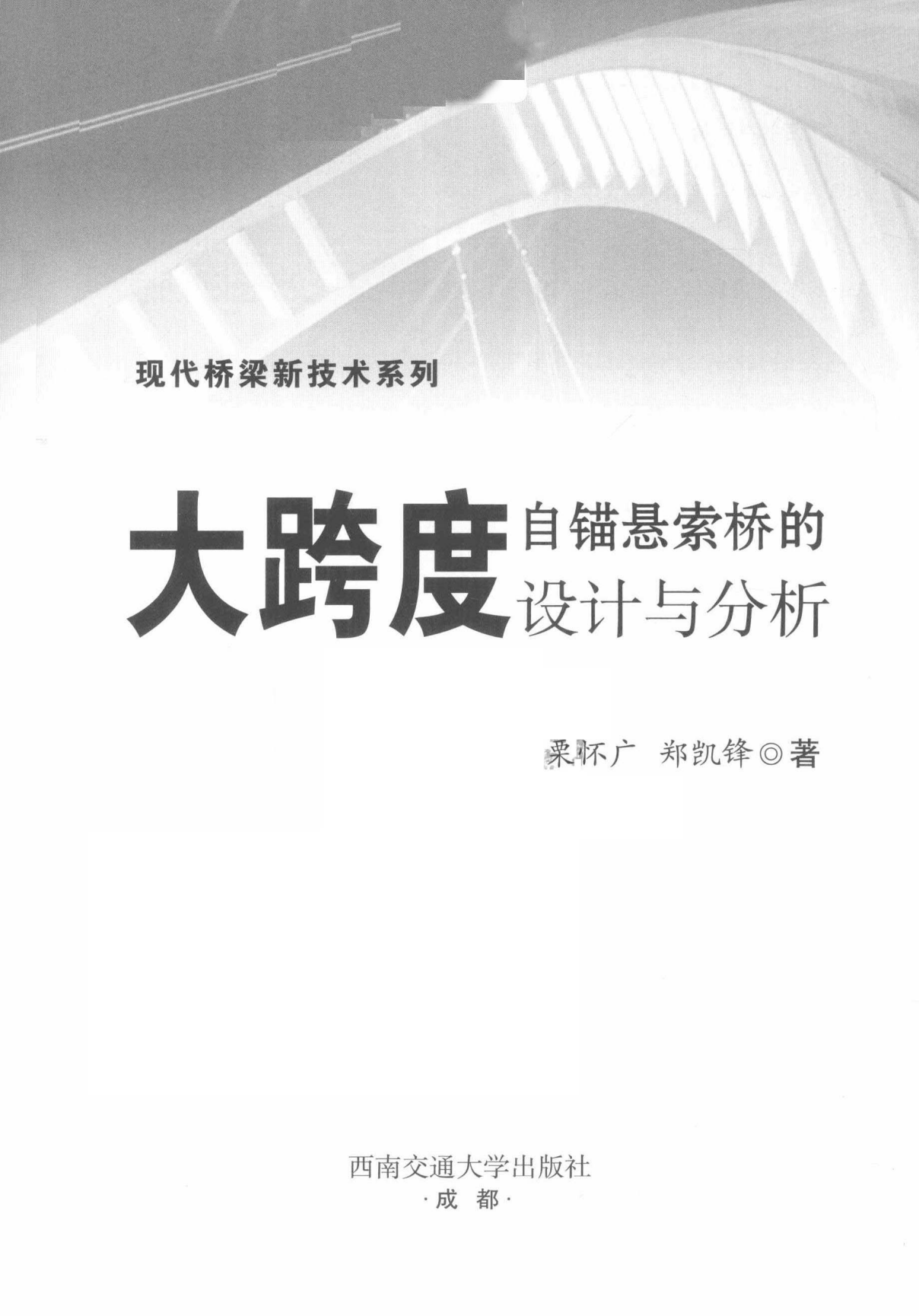
大跨度自锚悬索桥的设计与分析

Design and Analysis of Large Span Self-Anchored
Suspension Bridge

栗怀广 郑凯锋◎著



河南交通大学出版社



现代桥梁新技术系列

大跨度自锚悬索桥的设计与分析

栗怀广 郑凯锋◎著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

大跨度自锚悬索桥的设计与分析 / 栗怀广, 郑凯锋
著. —成都: 西南交通大学出版社, 2016.10
ISBN 978-7-5643-5047-5

I. ①大… II. ①栗… ②郑… III. ①大跨度结构 -
悬索桥 - 桥梁设计 IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 218933 号

Dakuadu Zimao Xuansuoqiao de Sheji yu Fenxi

大跨度自锚悬索桥的设计与分析

栗怀广 郑凯锋 著

责任编辑 杨 勇
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话 028-87600564 028-87600533
邮政编码 610031
网 址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸 170 mm × 230 mm
印 张 6.75
字 数 115 千
版 次 2016 年 10 月第 1 版
印 次 2016 年 10 月第 1 次
书 号 ISBN 978-7-5643-5047-5
定 价 28.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

本书以猎德大桥为背景，阐述了自锚悬索桥合理成桥状态的计算方法，以及自锚悬索桥结构静力、动力行为的设计方法。

自锚悬索桥的合理成桥状态的方法包括两个步骤：（1）恒载作用下对吊索张拉力进行优化；（2）精确空间主缆线形的计算。第一部分工作使用了通用有限元程序 ANSYS 的优化设计模块，优化吊索张拉力的竖向分量，优化目标函数定义为加劲梁弯曲变形能。在空间主缆线形计算时，假设主缆为弹性分段悬链线，根据得到的最优吊索力竖向分量和设计参数，经迭代计算得到精确的主缆空间坐标、主缆和吊索内力、加劲梁内力及相应弹性压缩量。

进一步在第 3 章中，根据得到的合理成桥状态，设计者可建立自锚悬索桥大桥的空间有限元模型。书中详细叙述了主梁简化和建模过程，包括加劲梁扭转刚度的等效计算，集中质量的参数计算和修正，预应力筋的等效，以及主塔桩基础的等效刚度计算。同时，根据合理成桥内力状态，计算相应的模型初始输入参数。

第 4 章根据上述的方法确定了猎德自锚悬索桥的合理成桥状态，并进行了恒载分析和活载分析。

第 5 章研究了自锚悬索桥施工吊索张拉过程，并根据结果优化了吊索张拉工序。

第 6 章对猎德大桥在常遇地震作用下进行了分析。

上述内容未涵盖猎德大桥的设计与验算，主要从结构体系的角度探讨了该类桥梁结构的相关思考与结果。

书中部分图片和数据参数来自相关论文文献，我们向这些作者、单位表示感谢。

本书是西南交通大学教材建设研究立项项目。

作 者

2016 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 自锚悬索桥的应用与发展	1
1.2 自锚悬索桥的弹性分析理论	6
1.3 主要内容	9
第 2 章 猎德大桥有限元模型的建立	10
2.1 引 言	10
2.2 猎德大桥简介	10
2.3 猎德大桥有限元模型	12
2.4 预应力筋的等效	20
2.5 主塔底部边界条件	20
2.6 小 结	23
第 3 章 自锚悬索桥的合理成桥状态	24
3.1 引 言	24
3.2 吊索力的优化分析方法	25
3.3 空间主缆线形的精确计算	27
3.4 主缆坐标近似计算方法	31
3.5 猎德大桥合理成桥状态的确定	33
3.6 小 结	39
第 4 章 猎德大桥静力分析	40
4.1 引 言	40
4.2 猎德大桥恒载分析	40
4.3 自锚悬索桥活载分析	44
4.4 小 结	53

第 5 章 猎德大桥吊索张拉过程分析	55
5.1 引 言	55
5.2 主缆的空缆状态和鞍座预偏量计算	55
5.3 吊索的合理张拉顺序	58
5.4 吊索张拉过程的有限元分析	59
5.5 结构内力和位移分析结果	64
5.6 小 结	68
第 6 章 猎德大桥动力分析研究	70
6.1 引 言	70
6.2 猎德大桥自振特性分析	71
6.3 猎德大桥抗震分析	73
6.4 反应谱分析	74
6.5 动力时程分析	79
6.6 小 结	83
第 7 章 猎德大桥钢箱梁的设计与分析	85
7.1 引 言	85
7.2 钢箱梁体系应力分析	86
7.3 吊索锚箱局部应力分析	93
7.4 小 结	98
第 8 章 结 论	99
参考文献	101

第 1 章 绪 论

1.1 自锚悬索桥的应用与发展

1.1.1 引 言

自锚悬索桥的主要特点是不需要像传统悬索桥一样建造庞大的锚碇，主缆直接锚固在加劲梁的端部，主缆的水平分力主要由加劲梁承担，端支座仅需要承受主缆的竖向分力和结构的部分自重，因此自锚悬索桥非常适合在地质条件不允许建造大型锚碇的桥址处建造。

自锚悬索桥的加劲梁必须在主缆架设之前安装就位，因为加劲梁需要承受主缆的水平分力，这样的施工顺序也限制了自锚悬索桥只能适用于中等跨度的桥梁。在进行结构分析时，也必须考虑主梁所承受的巨大轴向力对整体结构刚度的影响。

1.1.2 自锚悬索桥的历史

19 世纪后半叶，奥地利工程师 Josef Langer 和美国工程师 Charles Bender 分别提出了自锚悬索桥的概念。1859 年 Langer 第一次记录了他的这一想法，而 1867 年 Bender 也发表了关于发明了自锚悬索桥的声明，并且申请了相关专利。当时这两位自锚悬索桥之父都没有采用连续主缆，主缆在纵向就被划分为两段，分段主缆锚固在中跨的主梁上。1870 年，Langer 首先在波兰建造了一座跨度很小的铁路自锚悬索桥，而 Bender 却一直没有机会实现他的想法。

1915 年，第一座大型自锚悬索桥——科隆杜伊斯桥在德国科隆的莱茵

河上建成，跨度 185 m 的中跨主梁建造时采用了木制临时脚手架。在建设初期，该桥的艺术委员会因为自锚悬索桥良好的美学效果很快选定了该方案，结构工程师也意识到了桥址处的地质条件不适合修建大型的锚碇，因此也接受了这个方案。目前，桥梁工程师们普遍认为，科隆杜伊斯桥创造性地建成影响了 15 年后美国匹兹堡市的 3 座同类型桥梁，以及 20 世纪 30 年代日本的 Kiyosu 大桥。如图 1-1 所示。

匹兹堡市的 3 座市内桥梁（三姐妹桥）几乎是科隆杜伊斯桥的翻版，只是跨度小了约 30%（131 ~ 135 m）。但美国工程师在施工方法上做了很大的创新，这三座桥均采用悬臂法施工，施工时在主缆和主梁之间设置了临时的抗压支撑，主梁从主塔同时向跨中铺设直至合龙，施工方法上的改进使得三座桥的工期只有 15 个月。其中的第六大街桥通车后，还荣获美国钢结构协会颁发的首届年度最漂亮的桥梁奖。如图 1-2 所示。

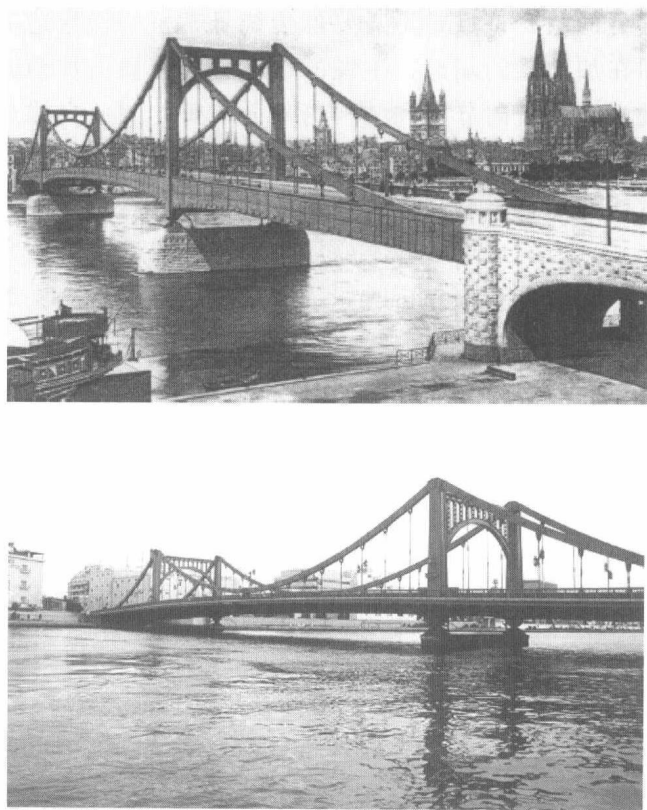


图 1-1 科隆杜伊斯桥和 Kiyosu 桥

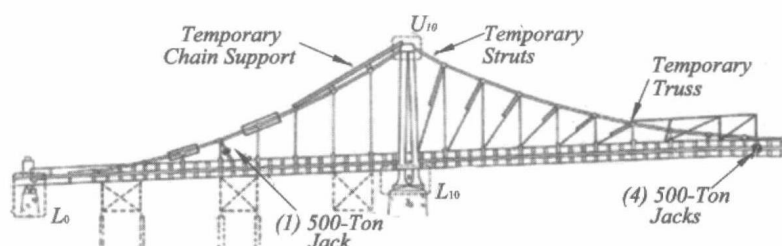
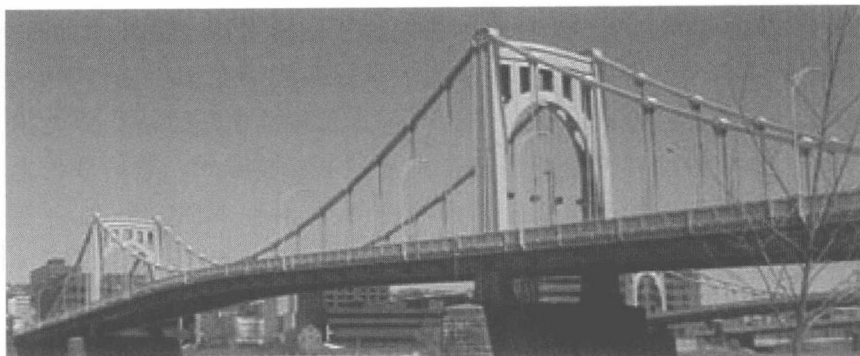


图 1-2 第六大街桥及其悬臂施工工艺

科隆杜伊斯桥对德国桥梁工程建设产生了深远的影响，表现在其通车后的 25 年里，莱茵河上又陆续建成了 4 座自锚悬索桥，其中最著名的是 1929 年通车的科隆曼海姆桥。该桥在第二次世界大战期间被盟军炸毁，战后在原址重建了现有的结构，不过由于战后德国钢铁紧缺，所以重建选择了结构轻盈的地锚悬索桥方案，跨度为 315 m 的科隆曼海姆桥是当时欧洲最大的悬索桥。如图 1-3 所示。

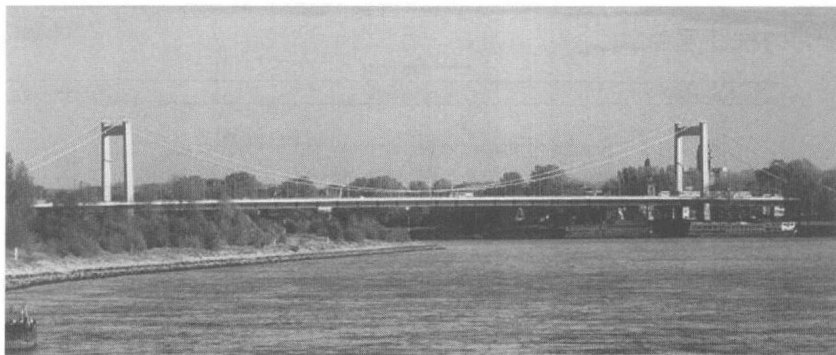


图 1-3 科隆曼海姆桥

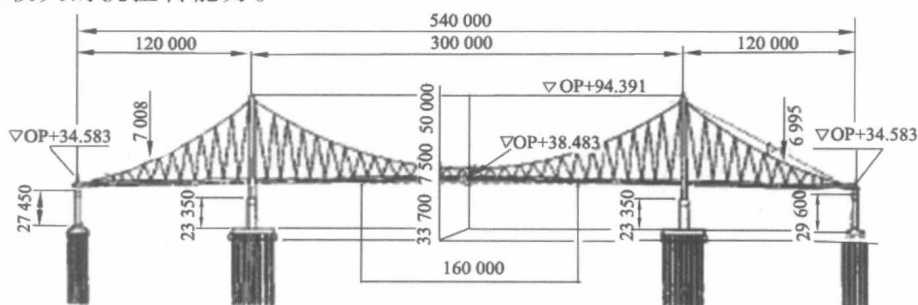
20 世纪 30 年代以后, 学者们逐渐发表了一些支持自锚悬索桥的文章, 不是因为不需要大型重力锚碇, 而是因为自锚悬索桥在结构分析中的方便。尽管当时挠度理论已经被广泛接受为分析悬索桥的精确方法, 但美国和法国的学者主张用弹性理论分析自锚悬索桥是足够准确的。这一理论上的认识也推动了德国和美国的自锚悬索桥的建设。具有代表性的是 1954 年德国杜伊斯堡建成的一座主跨 230 m 的自锚悬索桥。

在随后的近半个世纪里, 由于认识到斜拉桥的施工简便性和大跨度, 自锚悬索桥逐渐淡出了桥梁工程师们的视野, 直到 20 世纪 90 年代。

1.1.3 现代自锚悬索桥

由于施工技术的进步, 20 世纪 90 年代自锚悬索桥在沉寂了近半个世纪以后重新引起了桥梁设计者的注意。1990 年, 日本工程师在 Kiyosu 桥建成 60 年后又建成了第一座具有现代意义的自锚悬索桥——此花大桥 (Konahana 桥)。如图 1-4 所示。该桥除了重新采用自锚的概念以外, 还借用了 Leonhardt 提出的单主缆和倾斜吊索的设计思路。主跨主缆采用的 1/6 矢跨比远小于传统悬索桥, 也大大减小了主梁的轴向力, 倾斜布置的吊索具有纵向的桁架效应, 使得主梁恒载弯矩和挠度较平行吊索方案减小了近 30%, 同时也增加了桥梁纵向的振动阻尼, 提高了结构的抗震性能。

此花大桥采用正交异性板流线型闭口钢箱梁, 以浮运吊装的方法施工, 施工时驳船将在工厂拼装好的 120 m 的钢箱梁节段运到桥下, 2 700 吨位的吊机一次将其吊装就位, 为此在中跨布置了两个临时墩, 钢箱梁的强度按施工吊装的要求进行设计。闭口钢箱梁采用的单主缆方案也使全桥具有较大的抗扭转能力。



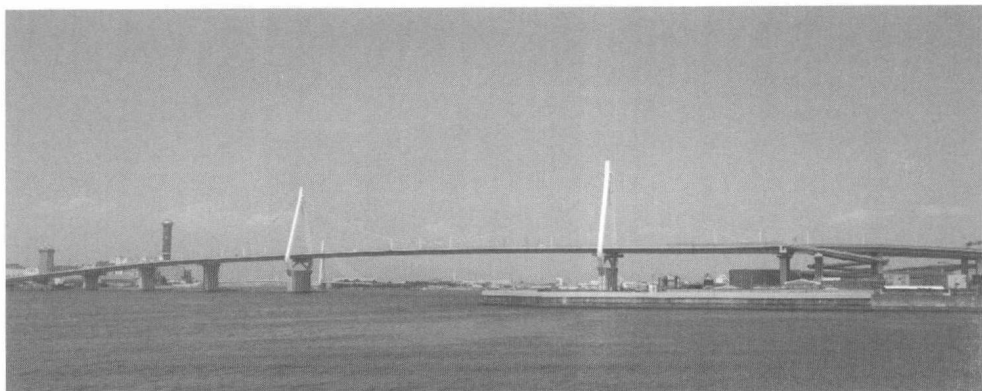
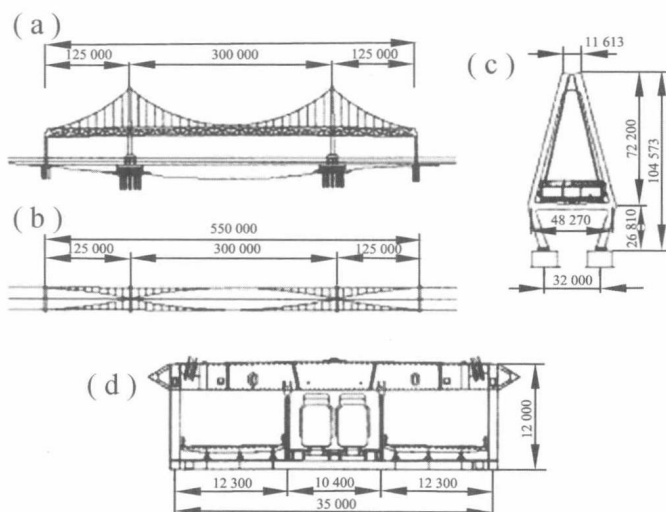


图 1-4 此花大桥（摘自 Wikipedia）

永宗大桥是韩国桥梁建设的一个里程碑。如图 1-5 所示。该桥位于连接韩国西海岸仁川国际机场和首尔的联络线上，全长 4 400 m，主桥为跨度 550 m 的自锚悬索桥。该桥采用双空间主缆形式，提高了结构的横向稳定性。跨度组合与此花大桥几乎相同，中跨跨度为 300 m，边跨 125 m。主梁采用双层桥面，桥面宽 36 m，梁高 12 m，高度为 7 m 桁架式，上层桥面设 6 车道，下层桥面设双线轻轨和两汽车车道。该桥中跨主梁恒载达到了 50 t/m，所以主缆竖向垂跨比增加到了 1/5，目的是进一步减小主梁的轴向力。



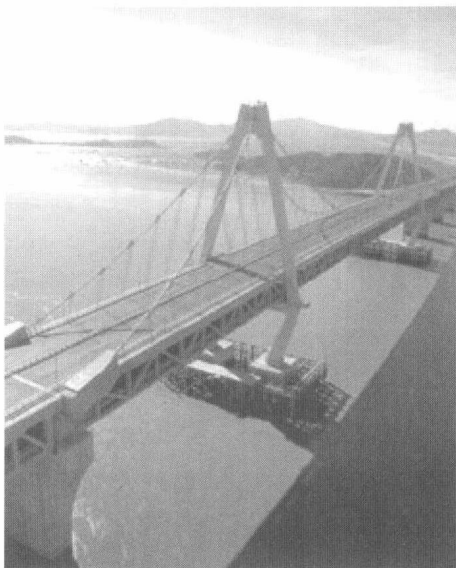


图 1-5 永宗大桥

随着经济的发展，近年来我国也建成了多座自锚悬索桥，目前尚有多座桥梁正在进行施工或设计，这些桥梁中既有采用混凝土箱梁方案的，也有采用扁平钢箱加劲梁的，既有连续三跨的结构，也有连续五跨的结构，主要的设计参数汇总于表 1-1 中。本书以猎德大桥工程为例，该桥也是一座独塔双跨自锚悬索桥，它位于广州市新城市中轴线上，是跨越珠江的新通道，其详细的结构设计参数见第 2 章。

1.2 自锚悬索桥的弹性分析理论

在过去的近一个世纪里，悬索桥的计算分析主要采用两种理论——弹性理论和挠度理论。弹性理论假定主缆的几何形状和长度都不因活载而改变，因此没有考虑主缆受荷时的硬化刚度，其结果是过高地估计了加劲梁弯矩，而挠度理论由于考虑了主缆的二阶刚度可以准确地计算加劲梁的实际受力情况。自 20 世纪 30 年代开始，桥梁设计师逐渐认识到挠度理论的准确性和经济性，因此弹性理论也逐渐地不再用于悬索桥的设计中了。

根据弹性理论，加劲梁上任一处的弯矩可以表示为：

$$M = M' - hy \quad (1-1)$$

式中： M' 为等代简支梁的活载弯矩； h 为活载引起的主缆的水平分力增量； y 为主缆在恒载作用下的竖坐标。由此可见，活载引起的主缆水平力增量降低了等代简支梁上的活载弯矩。

弹性理论没有考虑恒活载共同作用下主缆水平分量对加劲梁弯矩的进一步折减。而挠度理论却考虑了主缆的刚度，加劲梁中的弯矩因此可以写成：

$$M = M' - hy - (H + h)v \quad (1-2)$$

由于加劲梁要承受主缆内力的水平分量，因此对自锚悬索桥的分析也需要对传统悬索桥的分析理论进行适当的修正。当自锚悬索桥的加劲梁水平放置时，其承受的轴向力等于主缆内力的水平分量，当主缆在活载作用下发生了 v 的挠度，加劲梁的轴向力将引起加劲梁产生附加的正弯矩 $(H + h)v$ 。将该附加弯矩叠加到式 (1-2) 中，即得到弹性理论的基本方程式 (1-1)。可见，简单的弹性理论可以用于分析自锚悬索桥的二阶效应。对于大跨度自锚悬索桥，弹性理论可以提供近似的结果，但是当跨度大于 200 m 时，弹性理论的计算结果存在较大误差。

因此，尽管挠度理论可以用于分析大跨自锚悬索桥，但对于较为复杂的结构行为，首选工具是非线性有限元方法[郑凯锋等，1998]。

表 1-1 我国的自锚悬索桥

桥 名	跨度组合/m	加劲梁类型	主缆规格	主缆矢跨比	吊索规格	桥址	备注
金石滩桥	24+60+24	混凝土梁	139× ϕ 7 镀锌高强钢丝	1 : 8.2	ϕ 5@3 m	辽宁大连	2002
溪心桥	38+90+38	混凝土箱梁	19×127× ϕ 5 镀锌高强钢丝		127 ϕ 5@5 m	浙江永康	2002
丽泽桥	25 + 70 + 25	钢桁-混凝土叠合梁	451× ϕ 7 镀锌高强钢丝	1/5.49	ϕ 7@3 m	广西桂林	2002
索山大桥	30 + 90 + 30	钢-混凝土叠合梁	19×61× ϕ 7 镀锌高强钢丝		73 ϕ 7@5 m	江苏苏州	2003
义乌江桥	36+100+36	钢-混凝土叠合梁				浙江金华	
子牙河桥	48 + 115 + 48	钢箱梁	19×127× ϕ 5 镀锌高强钢丝		ϕ 7@5 m	天津	2004
万新大桥	70+160+70	单箱五室混凝土箱梁	85× ϕ 54 镀锌钢丝绳	1/6	121 ϕ 7@5 m	辽宁抚顺	2004
松花江大桥	90 + 240 + 90	单箱四室混凝土箱梁	61×127× ϕ 5 镀锌高强钢丝	1/8	139 ϕ 7@6 m	吉林兰旗	
康济桥	36 + 100 + 36	钢-混凝土叠合梁	19×127× ϕ 5 镀锌高强钢丝	1/7.549		浙江金华	
北关大桥	40 + 118 + 40	混凝土边主梁	19×127× ϕ 5 镀锌高强钢丝	1/7	121 ϕ 7@5 m	浙江江山	
平胜大桥	主跨 350	扁平钢箱梁	48×127× ϕ 5 镀锌高强钢丝	1/12.5	73 ϕ 5@12 m	广东佛山	2003
三汊矶大桥	132 + 328 + 132	扁平钢箱梁	91×61× ϕ 5 镀锌高强钢丝	1/5, 1/10.5	85 ϕ 5@12 m	湖南长沙	

1.3 主要内容

本书内容包括：

(1) 介绍一种新的确定自锚悬索桥的合理成桥状态的方法，并通过猎德大桥合理成桥状态的确定验证该方法的准确性。

(2) 通过猎德大桥全桥简化有限元模型的建模过程，总结大跨度桥梁有限元简化模型建立的一般方法和具体参数的计算方法。

(3) 运用几何非线性到拆分析的方法，对猎德大桥的吊索张拉过程进行分析，依次确定合理的吊索张拉顺序和张拉参数。

(4) 分析猎德大桥的恒载、活载作用下结构的内力和变形，以及动力特性和抗震能力。

下面分别介绍各章的主要内容。

第1章为绪论部分，回顾了自锚悬索桥的发展历史，总结了自锚悬索桥的概念的产生、主要技术进步和具有代表性的几座自锚悬索桥。

第2章详细总结了猎德大桥简化空间有限元模型的建模过程、具体参数的计算方法和修正方法。

第3章首先阐述了非线性规划理论中的梯度搜索法，该方法广泛应用于结构优化分析的，并介绍了 ANSYS 优化模块的优化原理；其次，引入弹性悬链线索的几何方程，并将其推广到空间主缆坐标计算中，运用修正牛顿迭代法编制主缆坐标计算程序；并对猎德大桥设计方案的合理成桥状态进行了研究。

第4章在前面两章的基础上对猎德大桥进行了恒载和活载分析研究。

第5章对猎德大桥设计方案的吊索张拉过程进行了到拆分析，并根据结果确定了合理的吊索张拉施工顺序。

第6章主要是对猎德大桥进行了动力特性分析，并运用弹性反应谱法和动力时程法进行了强度验算分析。

第7章利用大型有限元分析软件 ALGOR 对猎德大桥的钢箱梁设计方案进行了局部应力分析。

第8章总结全书的研究工作，分析结果，并进行总结。

第2章 猎德大桥有限元模型的建立

2.1 引言

自锚悬索桥主缆的几何坐标与桥面的结构自重和二期恒载分布密切相关,结构的动力特性如频率、振型不仅与结构的刚度分布有关,同时也受全桥的质量分布的影响。目前,有限元方法因其简单、准确而被工程设计人员和学者广泛用来进行大跨桥梁结构的分析和研究,“鱼刺梁模型”是目前进行大跨桥梁的静动力分析和设计中应用最广泛的方法之一,但目前却很少有资料对其中建模的细节做完整的总结和论述。因此,本章通过猎德大桥空间有限元模型的建立过程,详述了大跨桥梁的一般有限元建模方法,包括“鱼刺形”主梁的质量、刚度计算和修正,以及动力计算时桩基边界条件的模拟。

2.2 猎德大桥简介

猎德大桥是珠江新城的一座核心建筑,是一座跨珠江的独塔双跨自锚悬索桥,主桥桥跨布置为 $(47+167+219+47)$ m,如图 2-1 所示。猎德大桥上下游两根主缆在塔顶的中心间距为 4 m,在梁上锚固点处的横向距离为 27.1 m;吊索在梁上两锚固点的距离为 27.1 m,主缆吊索组成一空间曲面。主缆采用预制平行丝股(PWS),每根主缆由 33 根 127 丝 $\phi 5.20$ mm 的镀锌高强度钢丝组成,钢丝极限强度 1 670 MPa;采用预制平行索股逐根架设的方法施工。索夹采用骑跨式,每根吊索处采用 4 根钢丝绳吊索,热铸锚具底端锚固。主缆在设计过程中,经过反复的优化,选择了塔高合理、