

Calculation Monitoring and
Assessment of Spatial Cable
Self-anchored Suspension Bridge

李建慧 李爱群 编著

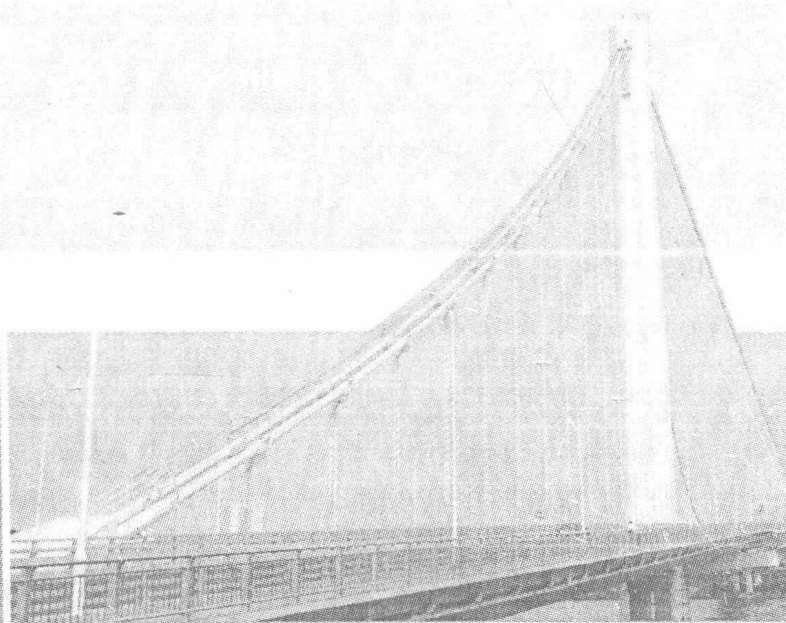
空间缆索自锚式悬索桥
计算、监控与评估



人民交通出版社
China Communications Press

Calculation Monitoring and
Assessment of Spatial Cable
Self-anchored Suspension Bridge

李建慧 李爱群 编著



空间缆索自锚式悬索桥
计算、监控与评估



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书以南京江心洲大桥为工程背景,对空间缆索自锚式悬索桥结构体系的部分关键技术问题以及自锚式悬索桥结构可靠度评估问题进行阐述。主要内容有:空间缆索自锚式悬索桥施工过程中缆索线形计算理论与软件开发;空间缆索自锚式悬索桥成桥理想状态确定方法;自锚式悬索桥关键子结构分析及塔梁监控;空间缆索自锚式悬索桥缆索系统施工控制及体系转换;南京江心洲大桥静力随机分析及正常使用状态下可靠度评估。

本书可供高等院校桥梁工程专业师生阅读,亦可供从事桥梁工程设计、施工与科研的专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

空间缆索自锚式悬索桥计算、监控与评估 / 李建慧,
李爱群编著. — 北京:人民交通出版社, 2011.7
ISBN 978-7-114-09328-9

I. ①空… II. ①李… ②李… III. ①悬索桥-桥梁
工程 IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 159191 号

书 名:空间缆索自锚式悬索桥计算、监控与评估

著 作 者:李建慧 李爱群

责任编辑:丁 遥

出版发行:人民交通出版社

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)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:化学工业出版社印刷厂

开 本:787×980 1/16

印 张:10.75

字 数:208 千

版 次:2011 年 7 月 第 1 版

印 次:2011 年 7 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09328-9

定 价:60.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



前言

Qianyan

近年来,自锚式悬索桥作为中等跨度桥梁中美观、经济的桥型而格外受到设计者的青睐,一些空间缆索体系的自锚式悬索桥也逐渐出现在桥型设计方案中,如已建成通车的韩国永宗大桥、天津富民桥、广州猎德大桥、南京江心洲大桥、杭州江东大桥以及正在施工中的美国旧金山奥克兰海湾大桥(San Francisco-Oakland Bay Bridge)等。空间缆索体系可以提高悬索桥的横向刚度和横向承载力,又不影响其竖向承载力,可增大自锚式悬索桥的跨度。但同时,三维缆索线形也给自锚式悬索桥的结构设计、计算分析以及施工控制等方面带来很大难度。

目前,对空间缆索自锚式悬索桥在理论和实践上的认识还很不全面,可供参考的文献资料也相对较少。随着空间缆索自锚式悬索桥的大量兴建及其跨度的不断增大,对其施工过程中空间缆索计算方法的深入研究、成桥状态的合理确定、关键子结构分析、空间缆索架设控制及体系转换等关键技术以及成桥状态可靠度评估成为目前亟待解决的问题。因此,依托实际工程对相关的关键技术问题进行研究具有很强的学术价值和现实意义。

本书共分6章。第1章为绪论,简述自锚式悬索桥的发展历史及计算理论,介绍自锚式悬索桥部分关键技术问题。第2章基于主缆分段悬链线理论、主缆无应力长度不变原理、空缆状态主缆线形与索鞍偏移量计算原理等,建立一套适用于自锚式悬索桥主缆成桥线形和施工过程中缆索计算的精确方法,在此基础上开发适用于各类悬索桥缆索线形计算分析与施工控制的缆索程序。第3章提出一种确定自锚式悬索桥结构合理成桥状态的综合优化算法。该算法将缆索解析程序与非线性有限元结构分析程序相结合,通过选择合适的目标函数、设计变量和状态变量来体现结构设计的意图,通过引入温度刚臂,考虑主梁、主塔的压缩量,利用结构优化方法获得自锚式悬索桥的基本成桥状态。在此基础上,采用应力平衡法调整与配置主梁预应力束,校核基本成桥状态,得到合理的最终成桥状态。第4章对空间缆索自锚式悬索桥几个关键子结构进行空间受力分析,在此基础上对主塔、主梁施工过程中监控要点及原则进行阐述。第5章针对南京江心洲大桥独特的结构特点,提出其吊索张拉与体系转换的总体原则,系统分析与总结体系转换过程中的力学特性。根据体系转换中受力特性的规律,将体系转换过程整体上划分为四个阶段,提出每一阶段的控制目标与实施要点,在此基础上制订相应的吊索张拉与体系转换方案。第6章提出一种用于自锚式悬索桥结构可靠度评估与参数敏感性分析的复合算法。采用该复合算法对江心洲大桥主跨跨中钢箱梁挠度及塔底弯矩进行结构参数静力随机分析,并对江心洲大桥主跨加劲梁跨中挠度在正常使用状态下的可靠度进行评



估。

本书的相关研究工作得到了国家杰出青年科学基金项目“结构健康监测”(50725828)、国家高技术研究发展技术(863 计划)项目“大跨悬索桥体系可靠度评估技术”(2006AA04Z416)、国家自然科学基金项目“大跨度斜拉桥风致灾变过程的多尺度分析与预测研究”(50978056)、国家自然科学基金项目“大跨斜拉桥结构安全性评估方法研究与应用”(50378017)等项目的资助。同时,在编写过程中得到了南京长江隧道公司、铁道部第四勘察设计研究院、中铁十五局、南京国博土木工程技术有限公司等单位领导和同仁的热忱帮助和大力支持,并得到作者所在科研团队——东南大学结构健康监测研究所相关老师和研究生的大力帮助,在此谨向他们一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,围绕空间缆索自锚式悬索桥这一复杂结构体系开展的相关工作一定会有疏漏和不足之处,敬请相关的专家和读者批评指正。E-Mail: subway96@126.com。

编著者

2011 年 6 月



目录

Mulu

第1章 绪论	1
1.1 自锚式悬索桥的发展概况	1
1.2 悬索桥计算理论	10
1.3 自锚式悬索桥涉及的部分关键问题	13
参考文献	14
第2章 自锚式悬索桥空间缆索线形计算方法及软件开发	18
2.1 概述	18
2.2 主缆线形计算的分段悬链线理论	19
2.3 成桥主缆线形计算原理	26
2.4 空缆状态缆索计算原理	33
2.5 空间索鞍切点位置计算方法	35
2.6 自锚式悬索桥施工过程缆索线形精细化计算方法	41
2.7 缆索系统程序开发	43
2.8 本章小结	51
参考文献	51
第3章 自锚式悬索桥成桥合理状态	53
3.1 概述	53
3.2 结构优化算法计算理论	53
3.3 结构应力平衡法	58
3.4 合理成桥状态的确定原则与优化参数选择	59
3.5 自锚式悬索桥理想成桥状态确定的综合算法	62
3.6 算例说明与实桥检算	64
3.7 本章小结	72
参考文献	73
第4章 自锚式悬索桥关键子结构分析及塔梁监控	74
4.1 概述	74
4.2 独柱塔结构分析	74
4.3 空间主鞍座结构分析	76
4.4 锚固横梁结构分析	80
4.5 混凝土钢箱混合主梁施工监控	85



4.6 独柱塔施工监控	88
4.7 本章小结	88
参考文献	89
第5章 自锚式悬索桥空间缆索架设控制与体系转换	90
5.1 概述	90
5.2 空间缆索架设控制	90
5.3 吊索张拉与体系转换过程分析与实施	95
5.4 最终成桥合理状态	125
5.5 本章小结	126
参考文献	128
第6章 自锚式悬索桥参数敏感性分析及可靠度评估	129
6.1 引言	129
6.2 可靠度基本理论	130
6.3 参数敏感性分析与可靠度评估复合算法	133
6.4 南京江心洲大桥参数敏感性分析	150
6.5 正常使用状态可靠度评估	153
6.6 本章小结	158
参考文献	159
附录 江心洲大桥建设实景图	162



第1章 绪 论

1.1 自锚式悬索桥的发展概况

从建造历史来说,自锚式悬索桥并不是一种新的桥型。19世纪后半叶,奥地利工程师约瑟夫·朗金(Josef Langer)和美国工程师查理斯·本德(Charies Bender)分别独立地构思出自锚式悬索桥的造型。本德在1867年申请了专利,朗金则于1870年在波兰建造了一座小型的铁路自锚式悬索桥。到20世纪初,自锚式悬索桥已经在德国兴起。1915年,德国设计师在科隆的莱茵河上建造了第一座大型自锚式悬索桥——科隆—迪兹桥(Cologne-Deutz Bridge),选择这种桥型主要是因为地质条件不允许修建锚碇。该桥主跨185m,用木脚手架支撑钢梁直到主缆就位。此后,美国宾夕法尼亚州匹兹堡跨越阿勒格尼河的3座桥和在日本东京修建的清洲桥都受科隆—迪兹桥的影响。虽然科隆—迪兹桥1945年被毁,但原桥台上的钢箱梁仍保存至今。匹兹堡的3座悬索桥比科隆—迪兹桥的跨径要小,但施工技术与科隆—迪兹桥相比有了很大的进步。科隆—迪兹桥建成后的25年内,在德国莱茵河上又修建了4座悬索桥,其中最著名的是1929年建成的科隆—米尔海姆桥(Cologne-Mulheim Bridge)。该桥主跨为315m,在1945年被毁。20世纪30年代以后,由于工程师们认为自锚式悬索桥加劲梁的轴力将使这种桥梁的受力性能接近于弹性理论,对地质条件要求不高,因而自锚式悬索桥在当时深受欢迎。基于弹性理论,这段时间美国和德国修建了许多座自锚式悬索桥。如美国1933年修建的密苏里州跨度为69m的Little Niangua桥和1939年修建的印第安纳州跨度为107m的Wabash桥,1954年德国工程师在Duisberg完成了一座跨度为230m的自锚式悬索桥。由于自锚式悬索桥跨越能力较小以及对施工有特殊要求,在接下来的30多年里,自锚式悬索桥的发展几乎处于停滞状态。20世纪90年代以来,自锚式悬索桥在沉寂多年后再度兴起。1990年,日本大阪修建了主跨跨径为300m的此花大桥(Konohana Bridge),该桥是1945年以来修建的第一座自锚式公路悬索桥,它使得自锚式悬索桥又重新回到人们的视野中。2001年建成的韩国永宗大桥(Yong Jong Bridge)的造型和尺寸都与此花大桥比较相似,是世界上第一座双层公铁两用自锚式悬索桥。正在建设中的美国旧金山—奥克兰海湾新桥包括1座单跨自锚式悬索桥和2座三跨自锚式悬索桥,其中单跨自锚式悬索桥的跨度为385m+180m,建成后将成为世界上最大的自锚式悬索桥。另外还有韩国Sorok岛桥(跨度为110m+250m+110m)及爱沙尼亚Muhu岛桥(跨度为200m+480m+200m)等自锚式悬



索桥正在进行设计施工。在传统地锚式悬索桥难以满足特定地形、地质条件下修建城市特殊景观桥梁需要的情况下,伴随着设计理论、架设施工技术以及工程材料等方面的进步,桥梁工作者们开始重新关注自锚式悬索桥,并进行了一系列新的尝试与工程实践。

1.1.1 国外自锚式悬索桥

近期国外自锚式悬索桥发展比较迅速,建成的较有影响的自锚式悬索桥有日本的此花大桥和韩国的永宗大桥以及正在施工中的美国奥克兰海湾大桥。

日本此花大桥建成于1990年,又名北港联络桥,如图1-1所示。该桥是1945年以来修建的第一座自锚式特大跨公路悬索桥,该桥跨径布置为 $120\text{m}+300\text{m}+120\text{m}$,加劲梁为单箱三室钢箱梁,梁宽 26.5m 。由于设计为单索面,为了满足抗扭的需要,箱高设计较大,达 3.17m ,高跨比为 $1:9.5$,矢跨比为 $1:6$,比一般自锚式悬索桥的矢跨比要大,这样可以减小主梁的轴力。该桥采用单根主缆,用PWS法施工,包含30束股,每束184丝,仅一个索面,吊索做成倾斜形,与钢箱梁一起构成三角形吊杆,体现了英国式悬索桥的特点。该桥桥塔为花瓶形,下塔柱较矮。人字形上塔柱要在加劲梁节段架设后才能安装。此花大桥的建造成为现代自锚式悬索桥的一个里程碑,掀起了自锚式悬索桥的建设热潮。

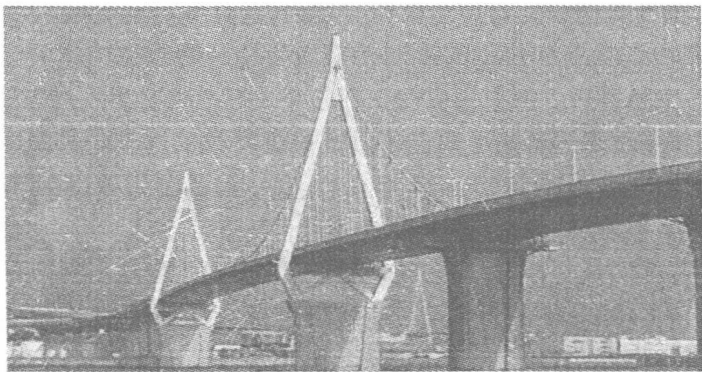


图1-1 日本此花大桥

韩国永宗大桥位于韩国汉城仁川国际机场通往汉城城区的高速公路上,是世界上第一座双层行车的公铁两用自锚式悬索桥,如图1-2所示。该桥跨径布置为 $125\text{m}+300\text{m}+125\text{m}$,矢跨比为 $1:5$,梁总高 12m ,宽 35m ,上层为公路双向6车道,下层为公路双向4车道和双线铁路。加劲梁的上层桥面系为一钢箱,以承受巨大的水平轴力。箱高 3m ,连同风嘴总宽 41m 。梁的施工分为8个节段,用 $3\,000\text{t}$ 的海上浮吊架设,全部放在临时排架或塔上。采用空中纺线法制索,主缆直径为 46.7cm 。主缆塔处横向间距受塔型限制,为 6.6m ,而在主跨中部则展宽为 35m (与梁宽相同),主缆与吊索呈三维空间曲面。永宗大桥结构造型和尺寸虽然都与此花大桥很相似, 300m 的主跨和A形桥塔与此花大桥完全相同,但永宗大桥和此花大桥有三个主要不同点:①为了减小加劲梁中主缆产生的轴向力,主缆的垂度加大到 60m ,比此花大桥增加了20%;②永宗大桥采用2根主缆,从塔顶



到加劲梁跨中呈空间三维曲线,加大了桥梁的横向稳定性;③加劲梁为桁架,在没有主缆的情况下很容易施工。

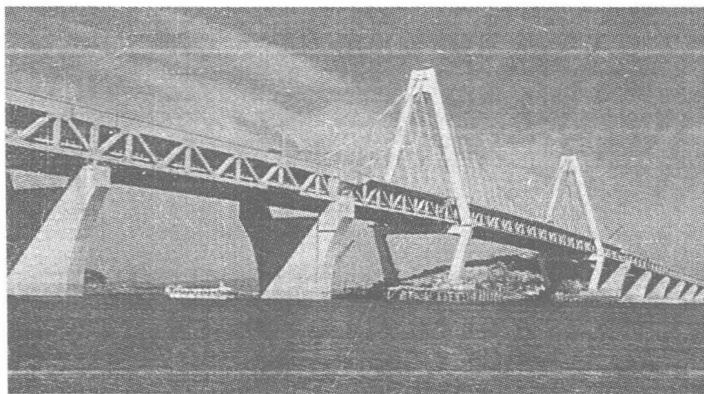


图 1-2 韩国永宗大桥

20 世纪 30 年代中期修建的旧金山奥克兰海湾大桥,全长 12.8km,是当时世界上最长的、技术水平很高的桥梁,至今仍为旧金山半岛至东海湾的主干线,交通繁忙,每天通行近 28 万车次。由于设计的地震力较小,其东桥(钢桁架桥)于 1989 年在里氏 6.9 级地震时局部坍塌,因此决定修建新海湾桥来代替现有东桥。奥克兰海湾新桥(New Oakland Bay Bridge),如图 1-3 所示,全长 3.6km,主航道桥为单塔自锚式悬索桥,跨径为 385m + 180m,两主缆直径为 0.78m,东侧(385m 侧)锚固在东墩处的梁上,其索鞍由箱梁支承,并

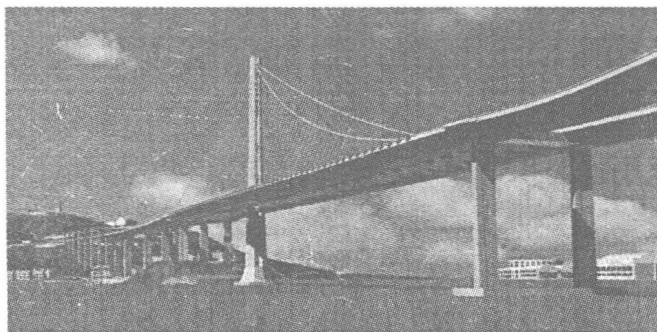


图 1-3 美国奥克兰海湾新大桥

设计成可移动的,以平衡两主缆索力差。西侧(180m 侧)主缆通过两分离的索鞍环绕在西墩上,这两个分离索鞍固定在西墩上,在施工期间采用一项先进的座板技术来平衡两主缆索力差异。西墩上设计一个预应力帽梁,其重量可以平衡因桥梁跨径不对称而在西墩产生的恒载拔力,也用以承受西墩两主缆在运营荷载和地震荷载作用时其索鞍产生的不同应力。该桥桥塔高 160m,由 4 柱组成,沿高度用剪力杆连接。塔柱为钢箱,柱间由间距 3m 的横隔梁连接。承台高 6.5m,支承在 13 根 $\phi 2.5\text{m}$ 的钢管桩上,桩内填灌混凝土,桩净长 20m,嵌入岩石。新桥两个方向均有宽 25m 的桥面,各包括 5 条车道和 1 条轻轨



铁路。南侧还有宽4.8m的人行道,考虑抗1500年一遇的地震。新桥上部结构为两个空心的各向异性板,并将吊杆荷载分布在箱梁上,箱梁间用宽10m、高2.5m、间距30m的横梁连接。该横梁承受吊杆横向72m跨的荷载,保证两箱在荷载、特别是风和地震荷载时的整体作用。吊杆设在两箱的外侧,形成空间索面,非常美观。目前该桥正在施工中,建成后将为世界最大跨度的自锚式悬索桥。

国外自锚式悬索桥加劲梁以钢结构为主,表1-1列出国外部分主要的自锚式悬索桥。

国外主要自锚式悬索桥

表 1-1

桥名	国家	跨径(m)	矢跨比	主梁结构	建成年份(年)
科隆—迪兹桥	德国	92.3+184.5+92.3	1:8.6	钢箱梁	1915
匹兹堡第七街桥	美国	67.5+134.8+67.5	1:8.1	钢箱梁	1926
清洲桥	日本	45.8+91.5+45.8	1:7.1	钢箱梁	1928
科隆—米尔海姆桥	德国	91+315.0+91	1:9.1	钢箱梁	1929
此花大桥	日本	120+300+120	1:6.0	钢箱梁	1990
永宗大桥	韩国	125+300+125	1:5.0	钢桁梁	1999
Sorok 岛桥	韩国	110+250+110	1:5.0	钢箱梁	建造中
奥克兰海湾新桥	美国	385+180	—	钢箱梁	建造中

1.1.2 国内自锚式悬索桥

尽管自锚式悬索桥在国外产生和发展得较早,在国内却很少建造。这种桥型在国内的发展远远落后于国外。1999年建成的常州广化桥是我国第一座自锚式刚性悬索桥。2001年底建成的广西桂林丽君桥是我国第一座自锚式柔性悬索桥,跨径为25m+70m+25m,采用钢桁梁和混凝土桥面板的结合加劲梁。2002年建成的大连金石滩大桥是世界上第一座钢筋混凝土自锚式悬索桥,主桥跨径为24m+60m+24m。2006年建成通车的广州佛山平胜大桥为独塔自锚式悬索桥,主跨350m,是目前我国跨径最大的自锚式悬索桥。近年来各地也相继修建了一些自锚式悬索桥,其中抚顺万新大桥、长沙三汊矶大桥、南京江心洲大桥、杭州江东大桥、广州猎德大桥等都具有相当的规模。这些造型美观、技术先进的桥梁为我国桥梁工程的建设 and 自锚式悬索桥计算理论的发展提供了宝贵的经验和启示。以下介绍三座国内比较典型的自锚式悬索桥。

抚顺万新大桥横跨浑河,地处城市闹市区,道路等级为城市主干路。万新大桥全长476.15m,主桥为双索面自锚式混凝土悬索桥,主跨160m,边跨70m,锚固跨15m。主梁为五跨连续箱梁,主缆中心距为26.5m,吊索沿顺桥向间距5m,主梁采用钢筋混凝土箱梁,箱梁标准断面为单箱五室,梁宽41m,梁中心高度为2.5m。箱梁内每5m设一道横梁,横梁中间厚度为40cm,端部加厚为95cm。索塔为H形,塔柱采用实体矩形截面。主缆中跨矢跨比为1:6,主缆直径为54.3cm,由85根 $\phi 54\text{mm}$ 镀锌钢丝绳组成。吊杆采用127根 $\phi 7\text{mm}$ 镀锌高强平行钢丝。万新大桥效果图如图1-4所示。

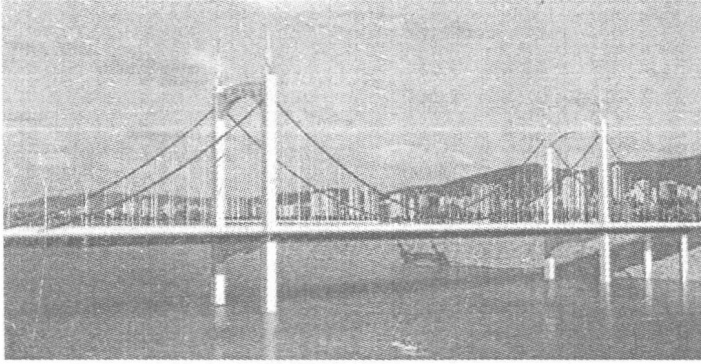


图 1-4 万新大桥效果图

长沙三汊矶湘江大桥是长沙市二环线跨湘江的关键及全线贯通控制工程,位于长沙市北区湘江下游,如图 1-5 所示。主桥自锚式悬索桥采用 $70\text{m} + 132\text{m} + 328\text{m} + 132\text{m} + 70\text{m}$ 跨径组合,两边对称布置。中跨主缆矢跨比为 $1:5$,边跨矢跨比为 $1:10.6245$ 。悬索桥主梁位于半径为 $24\,402.745\text{m}$ 的竖曲线上。索塔塔柱的截面形式是空心箱形,桥面以上为 71.752m ,基顶以上为 104.453m 。主缆由 37 束预制索股构成单缆,预制索股由 127 丝 $\phi 5.1\text{mm}$ 镀锌高强钢丝组成,主缆中心距为 25m 。吊索采用 85 根 $\phi 5.1\text{mm}$ 镀锌钢丝,每个吊点设两根吊索,吊索间距为 9m 。加劲梁为扁平闭口钢箱梁、正交异性板桥面。加劲梁高 3.6m (桥轴中心处),高跨比为 $1:91.1$,加劲梁全宽为 33.0m ,宽跨比为 $1:9.9$ 。

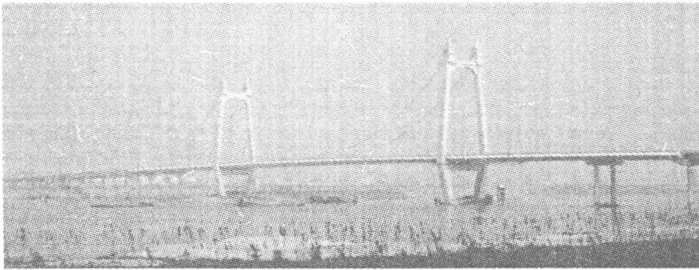


图 1-5 长沙三汊矶大桥

佛山平胜大桥位于佛山市南海区石啃和顺德的陈村花卉基地交汇处,如图 1-6 所示。桥跨布置为: $39.64\text{m} + 3 \times 40\text{m} + 30\text{m}$ (混凝土加劲梁及锚跨) + 350m (钢加劲梁) + $30\text{m} + 29.60\text{m}$ (混凝土锚跨),主桥全长 680.20m (含伸缩缝宽)。主塔采用三柱式,桥梁按分开的两幅共主塔,四平面主缆,主缆主跨计算跨径为 350m ,边跨计算跨径为 224m ,主跨矢跨比 $1:12.5$ 。全桥共设 27 对吊杆,吊杆标准间距为 12m ,靠塔侧吊杆离塔中心距为 19m ,远塔侧吊杆离 M9 号墩中心线 19m ,其中两对短吊杆设计成两端带铰的刚性吊杆,其他采用平行钢丝柔性吊杆。主跨主梁采用闭合钢箱梁、正交异性板结构,梁高 3.50m 。边跨采用 C50 混凝土加劲梁,外形与主跨钢加劲梁一致。半幅桥标准断面采用单箱三室。锚跨采用 C50 混凝土箱梁,钢混结合段设在离塔(墩)中心线 1.5m 处。



图 1-6 佛山平胜大桥

相对于国外自锚式悬索桥加劲梁以钢结构为主,国内该桥型加劲梁的材料较多样,有钢结构、普通钢筋混凝土梁、预应力混凝土梁和结合梁等;梁的形式也丰富多彩,有桁架、箱梁、边主梁等。但是主缆的结构主要为平面缆索体系,大多采用高强预制平行钢丝成品索,通过 PWS 法架设。表 1-2 列出国内部分主要的自锚式悬索桥。

国内主要自锚式悬索桥 表 1-2

桥 名	跨径 (m)	矢跨比	主梁结构	建成年份 (年)
金石滩金湾桥	24 + 60 + 24	1: 8.0	混凝土梁	2002
布尔哈通河局子街桥	69 + 162 + 69	1: 7.0	混凝土梁	2003
天津子牙河桥	58 + 115 + 58	—	钢箱梁	2004
金华康济桥	33 + 100 + 33	1: 7.5	叠合梁	2004
抚顺万新大桥	70 + 160 + 70	1: 6.0	混凝土梁	2004
永康溪心大桥	37 + 90 + 37	1: 6.0	混凝土梁	2005
江山北关大桥	40 + 118 + 40	1: 7.0	混凝土梁	2005
长沙三汊矶湘江大桥	70 + 132 + 328 + 132 + 70	1: 5.0	钢箱梁	2006
佛山平胜大桥	39.64 + 3 × 40 + 30 + 350 + 30 + 29.60	1: 12.5	混合梁	2006
杭州江东大桥	83 + 260 + 83	1: 4.5	钢箱梁	2008
广州猎德大桥	47 + 167 + 219 + 47	1: 12.5	钢箱梁	2009
南京江心洲大桥	35 + 137 + 248 + 35	1: 12.43	混合梁	2010
青岛海湾大沽河桥	80 + 260 + 190 + 80	1: 12.53	钢箱梁	建造中



1.1.3 本书工程背景

1.1.3.1 工程概况

南京江心洲大桥主桥为独柱塔空间缆索自锚式悬索桥,孔跨布置为 $35\text{m} + 77\text{m} + 60\text{m} + 248\text{m} + 35\text{m}$ 。主桥边跨跨度为 137m ,在边跨设置一个辅助墩,将边跨跨度划分为 $77\text{m} + 60\text{m}$;主跨跨度为 248m ,边跨与主跨跨度比为 0.55 。主梁分为两幅设置,净距为 8.2m ,两幅主梁之间用多道横梁连为一体,形成纵横梁受力体系。主跨主梁采用钢箱梁,边跨及锚跨主梁采用预应力混凝土箱梁。主塔在桥面以上塔高为 80m ,桥塔高跨比为 0.32 。主塔位于两幅主梁的横桥向中间位置,为独柱形式。主塔在主梁下方设置一道横梁,为主梁提供竖向支承。在主塔横梁端部设置有一对斜拉索,该斜拉索穿过主梁锚固在主塔上。在设计成桥状态下,主跨主缆理论垂度为 19.670m ,矢跨比为 $1:12.43$;边跨主缆理论垂度为 8.402m ,矢跨比为 $1:15.83$ 。主缆采用预制平行钢丝索股,共 2 根,每根含 55 股平行钢丝索股,每股含 127 丝 $\phi 5.3\text{mm}$ 镀锌高强钢丝。主缆在边跨位于竖直平面内,锚固于 8 号墩顶大横梁中部;在主跨为空间索形,锚固于 11 号墩顶大横梁两端。柔性吊索及斜拉索索股采用 $\phi 7.0\text{mm}$ 镀锌高强钢丝平行集束索体,吊索顺桥向间距为 10m 。主跨吊索下端锚固于钢箱梁横桥向两端的钢锚箱内,采用横桥向倾斜的单吊索;边跨吊索下端锚固于混凝土箱梁的横梁中部,采用竖直双吊杆(顺桥向中心间距为 60cm),吊索上下锚头均采用冷铸锚。南京江心洲大桥主桥总体布置如图 1-7 所示。

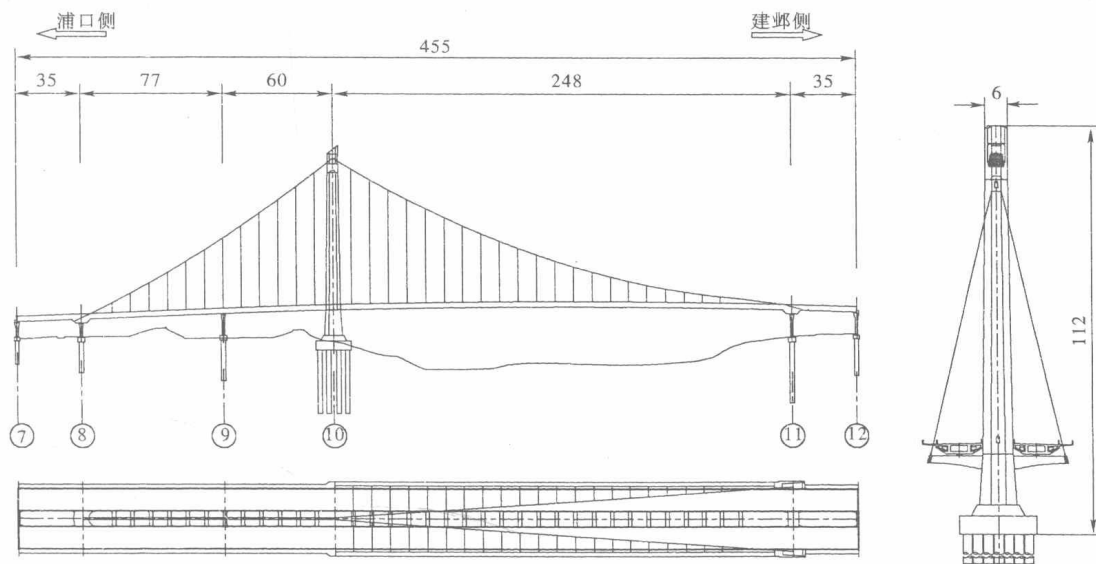


图 1-7 南京江心洲大桥总体布置(尺寸单位:m)

1.1.3.2 主塔结构设计

江心洲大桥主塔承台以上塔高 107m ,桥面以上塔高 80m ,桥塔高跨比为 0.32 。主塔构造如图 1-8 所示。桥塔底部 3m 段为塔座,采用实心圆形变截面,由直径为 14.3m 的塔



座底截面直线渐变至直径为 11.3m 的塔座顶截面。塔身为变截面,一般为空心截面,局部为实心截面,截面外轮廓由多段凹或凸的圆弧线围成,截面内轮廓为八边形。塔身在塔座顶部处的截面外轮廓尺寸为顺桥向宽 10m,横桥向宽 10m;在塔座顶部以上 14m 处的截面外轮廓尺寸为顺桥向宽 8m,横桥向宽 8m;在塔座顶部以上 89.2m 处及以上部分的截面外轮廓尺寸为顺桥向宽 6m,横桥向宽 6m。桥塔在主鞍座下设有 3m 厚的实体段,该实体段根据受力需要设有 $\phi 32\text{mm}$ 横向预应力粗钢筋。桥塔在与桥塔钢横梁相交处截

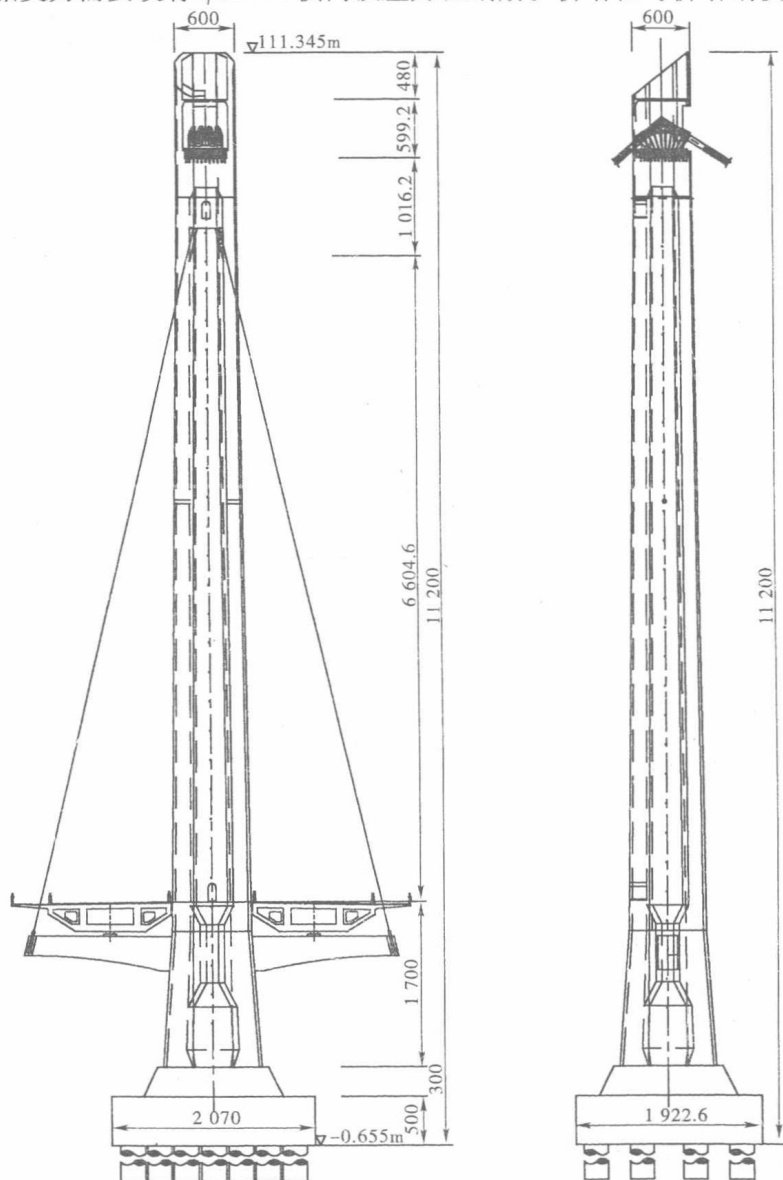


图 1-8 南京江心洲大桥主塔构造(尺寸单位:cm)



面局部加厚,在与斜拉索相交处设斜拉索锚固锯齿块。桥塔在这两个部位根据受力需要均设有环向预应力索,桥塔顶部设有鞍室及装饰段。为了确保桥塔的施工精度和施工质量,桥塔的钢筋骨架应当具有足够的刚度,设计中采用型钢制成劲性骨架进行加强。在主塔顺桥向中心线处设置一对斜拉索,该斜拉索下端锚固于塔下钢横梁端部的钢锚箱内,上端穿过主梁锚固在桥塔上。该斜拉索采用 PES7-241 预制平行钢丝束股(PWS),外包 PE 进行防护。

1.1.3.3 缆索系统设计

主缆采用预制平行钢丝索股,共 2 根,每根含 55 股平行钢丝索股,每股含 127 丝 $\phi 5.3\text{mm}$ 镀锌高强钢丝。索股锚头采用热铸锚,直接锚固在锚跨的锚固面上。图 1-9 为主缆截面图。本桥边跨两道主缆平行布置,中心距为 1.4m。考虑到结构受力、构造及美观要求,边跨索夹采用将两道主缆连接为一体的形式。该处索夹在顶部设有一道钢横梁,在每个索夹处顺桥向设有两根吊索,吊索上端与索夹钢横梁铰接,下端锚固于混凝土吊索横梁顺桥向两侧。索夹采用 ZG270-500 铸钢铸造。柔性吊索及斜拉索索股采用 $\phi 7.0\text{mm}$ 镀锌高强钢丝平行集束索体,刚性吊杆直径为 140mm,其杆体钢材采用 460 级。吊索顺桥向间距为 10m,吊索编号:边跨 DS1 ~ DS12,主跨 DS13 ~ DS33。边跨吊索下端锚固于混凝土箱梁的横梁中部,采用竖直双吊杆(顺桥向中心间距为 60cm),采用 PES7-121 预制平行钢丝束股(PWS),外包 PE 进行防护;主跨吊索下端锚固于钢箱梁横桥向两端的钢锚箱内,采用横桥向倾斜的单吊索,其中 DS13 ~ DS32 采用 PES7-85 预制平行钢丝束股(PWS),外包 PE 进行防护,而 DS33 由于较短,根据结构受力及结构需要采用 $\phi 140\text{mm}$ 刚性吊杆。吊索上下锚头均采用冷铸锚。

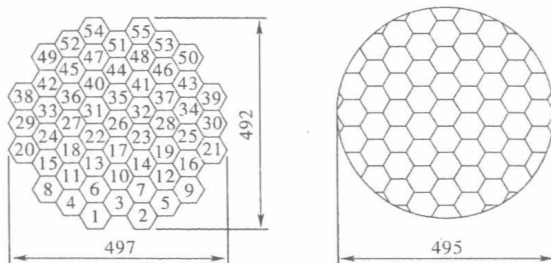


图 1-9 主缆截面(尺寸单位:mm)

1.1.3.4 主梁结构设计

主跨采用单箱三室全焊钢加劲梁,两侧边室各有一段斜底板,正交异性板结构箱梁一般截面梁高 3m,顶板厚 16mm,底板厚 14mm,外腹板厚 30mm,中、内腹板厚 14mm,顶、底板 U 形加劲肋厚 8mm,扁钢加劲肋厚 12mm。横隔板一般间距为 3.0m、3.5m,除钢—混凝土结合段、吊索处横隔板厚 12mm 外,其余横隔板厚度均为 10mm。纵隔板为实体式构造,板厚 10mm,板式加劲。边跨、锚跨主梁及主跨主梁部分梁段标准断面采用单箱三室,两侧边室各有一段斜底板。采用 C60 预应力混凝土箱梁,其中主跨两端混凝土梁靠主跨



跨中的 2m 段为钢—混结合段。混凝土箱梁一般截面梁高 2.965m,在主缆锚固横梁处局部增加至 4.965m。顶板宽 14.8m,水平底板宽 7m,腹板两侧斜底板宽 2.775m,顶板厚 26cm,底板厚 22cm。为加强混凝土加劲梁与钢箱梁的连接,在各墩、各主缆锚固横梁、主塔及钢—混结合段附近,箱梁顶板、底板、腹板根据受力和构造需要适当加厚。主梁标准截面如图 1-10 所示。

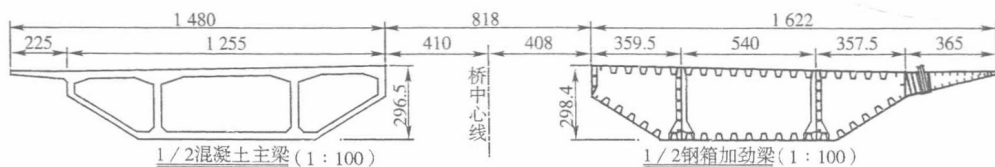


图 1-10 主梁标准横截面(尺寸单位:cm)

1.2 悬索桥计算理论

悬索桥的计算理论主要经过了弹性理论、挠度理论和有限位移理论三个阶段,体现了人们对悬索桥结构特性逐步深入认知的过程。

1.2.1 弹性理论

19 世纪以前,悬索桥还没有完整的力学分析方法。1823 年,法国 Navier 总结发表了无加劲悬索桥计算理论。英国的 Rankine 于 1858 年提出有加劲梁的悬索桥计算理论。该理论假定活载产生的吊索力集度等于所有活载除以跨长,且沿跨均布,因此求得的主缆和加劲梁变形不协调,计算结果不合理。1880 年前后,美国以 Levy 为代表的一批学者尝试用 Navier 及 Castiglian 建立的分析理论计算悬索桥内力。在欧洲,Navier 及 Castigliano 本人也进行了类似的尝试(此前他们的理论主要用于拱类结构),因而促成了最初的悬索桥弹性理论的出现。1913 年,D. B. Steinman 将这种理论整理成为实用的标准形式。

弹性理论的基本假定如下:

- (1) 主缆无弯曲刚度,加劲梁沿桥纵向抗弯刚度不变。
- (2) 恒载集度沿跨度方向均布且全部由主缆承受,恒载作用下主缆的几何形状为二次抛物线。
- (3) 活载作用下不考虑吊索的伸长。

根据以上假设,可以得到加劲梁任意截面的活载弯矩:

$$M = M_{q0} - H_q y \quad (1-1)$$

式中: M_{q0} ——相应简支梁弯矩,即活载使基本体系产生的内力;

H_q ——活载产生的主缆水平力;

y ——相应截面主缆竖向坐标(以塔顶为零点)。

弹性理论将悬索桥作为线弹性结构进行计算,叠加原理及影响线加载均适用,但没有考虑恒载对竖向刚度的贡献,也没有考虑位移的非线性影响,其计算结果是偏安全的。