



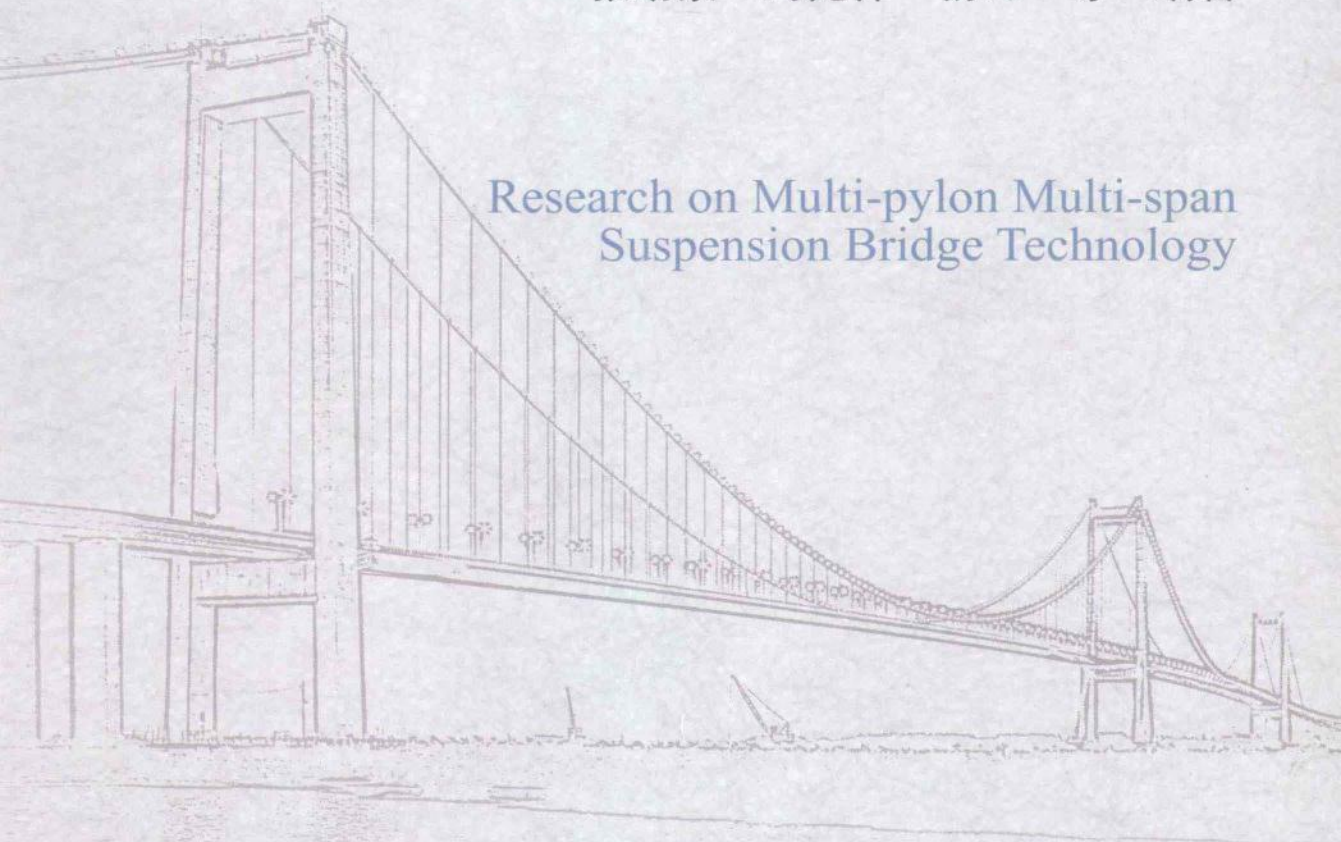
跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书
多塔连跨悬索结构及工程示范



多塔连跨悬索桥 技术研究

张劲泉 冯兆祥 杨昀 等 编著

Research on Multi-pylon Multi-span
Suspension Bridge Technology



人民交通出版社
China Communications Press

跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书
多塔连跨悬索结构及工程示范

**Research on Multi – pylon Multi – span
Suspension Bridge Technology**
多塔连跨悬索桥技术研究

张劲泉 冯兆祥 杨昀 等 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以国家科技支撑计划项目“多塔连跨悬索结构及工程示范”子课题“多塔连跨悬索结构体系与结构性能研究”为依托,以多塔悬索桥结构体系和性能为主线,首先介绍多塔悬索桥发展概况,并重点引出克服“中塔效应”的几种方式,然后分结构体系、结构刚度、计算分析方法、抗震抗风、车辆荷载等专题讲述,最后介绍泰州大桥设计与施工技术。

本书可供从事桥梁设计、科研、施工的技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

多塔连跨悬索桥技术研究 / 张劲泉等编著. — 北京:
人民交通出版社, 2013. 6

(多塔连跨悬索结构及工程示范)

ISBN 978-7-114-10711-5

I. ①多… II. ①张… III. ①长跨桥—悬索桥—研究
IV. ①U448.25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 125346 号

跨越——中国大型桥梁建设工程技术总结丛书

多塔连跨悬索结构及工程示范

书 名: 多塔连跨悬索桥技术研究

著 作 者: 张劲泉 冯兆祥 杨昀 等

责任编辑: 王文华

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.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 14

字 数: 350 千

版 次: 2013 年 6 月 第 1 版

印 次: 2013 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10711-5

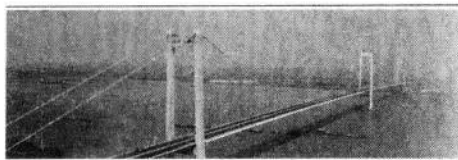
定 价: 42.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《多塔连跨悬索桥技术研究》

编写人员

交 通 运 输 部 公路科学研究所	张劲泉	杨 昀	李万恒	吕建鸣
	曲兆乐	樊 平	宋建永	陈 可
	吴寒亮	王兵见	王 陶	傅宇方
	曹一山	韩立中	毛 燕	赵 安
	陈云海	吴婷婷	殷 颇	
江苏省长江公路 大桥建设指挥部	冯兆祥	吉 林	陈 策	陆 宇
	王 俊	崔 佳	张向群	戴俊平
同 济 大 学 抗 风 课 题 组	马如进	陈艾荣	王达磊	
同 济 大 学 抗 震 课 题 组	李建中	彭天波	周 良	邓育林
同 济 大 学 建 筑 设 计 研 究 院 (集团)有限公司	罗喜恒	邓 婷	谢雪峰	
中交公路规划 设计院有限公司	裴岷山	黄李骥	赵君黎	冯 莧
	李文杰			



前言

悬索桥是大跨径桥梁结构形式之一,当跨径超过 1 200m 后,悬索桥几乎成为桥型的唯一选择。传统悬索桥都是双塔结构,其材料选择、主缆和加劲梁结构形式、结构静动力计算,以及施工方法等,大多都是围绕双塔展开的,这一阶段经历了约 300 年。目前建成的最大跨径双塔悬索桥是 1998 年建成的日本明石海峡桥,主跨径 1 990m,正在施工的最大跨径双塔悬索桥是意大利的墨西拿海峡大桥,主跨径达 3 300m。

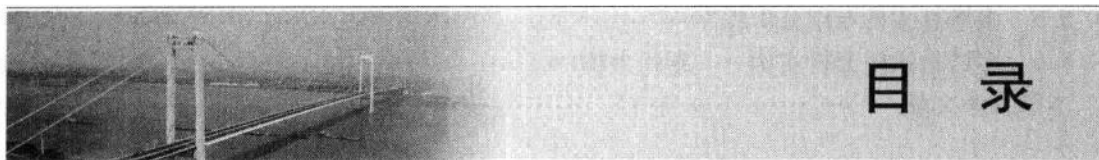
多塔悬索桥是在传统两塔悬索桥的基础上,通过增设一个或多个中间塔的方式,实现多主跨连续布设的悬索结构。由于中间塔的力学特性与边塔截然不同,因此,从传统双塔悬索桥向多塔悬索桥发展是悬索桥建设技术的一次飞跃。在悬索桥技术发展历程中,相当一段时间内工程师对采用三塔以上悬索桥结构都持怀疑态度,比如 1995 年出版的《大跨度吊桥》一书中有这样的阐述:“三跨以上的多跨吊桥,由于结构柔性大,固有振动频率低,以及在活载作用下桥塔将产生较大变位等原因是吊桥所忌用的形式”。的确,在现实悬索桥建设中,双塔悬索桥一直是主流,虽然对多塔悬索桥技术很早就开始探索了,但一直限于小跨径,工程实例也不多。

直到 2004 年开始建造江苏泰州长江大桥,国内工程界才开始关注和研究三塔悬索桥。由于泰州大桥主跨径首次突破 1 000m,有许多未知问题需要解决,故围绕结构体系与刚度、中塔形式和抗震抗风等关键技术问题展开了系统研究。三塔结构只是多塔结构的一部分,为了探索解决宽阔水域上多连跨悬索桥的建设技术,2009 年科技部列国家科技支撑计划项目“多塔连跨悬索结构及工程示范”,旨在解决多连跨悬索桥多塔效应及相关的支撑技术。

本书以国家科技支撑计划项目“多塔连跨悬索结构及工程示范”课题 1“多塔连跨悬索结构体系与结构性能研究”为主,系统介绍了多塔连跨悬索桥结构体系与刚度、静动力计算、抗风抗震设计方法等,是一部以研究为主的专著。

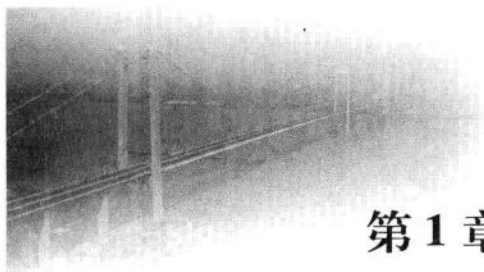
作者

2013 年 5 月 20 日



第1章 绪论	1
1.1 多塔悬索桥力学特性	1
1.2 多塔悬索桥需要探索的主要问题	2
第2章 多塔悬索桥发展概况	4
2.1 概述	4
2.2 国内外发展历程	4
2.3 克服中塔效应的几种方式	10
第3章 多塔悬索桥静力适宜结构体系	11
3.1 概述	11
3.2 活载控制指标与控制工况	12
3.3 纵向约束	15
3.4 支承体系	19
3.5 结构体系适宜性分析	24
3.6 结构体系设计原则	32
第4章 多塔悬索桥承重构件适宜刚度	34
4.1 概述	34
4.2 总体参数	34
4.3 承重构件	36
4.4 构件刚度匹配分析	39
4.5 中塔刚度适宜区间估算公式	47
4.6 构件刚度设计要点	51
本章参考文献	52
第5章 多塔悬索桥结构几何非线性与稳定分析方法	54
5.1 概述	54
5.2 结构几何非线性分析方法	54

5.3 悬索桥施工过程分析方法	63
5.4 多塔连跨悬索桥成桥稳定性分析方法	67
5.5 多塔悬索桥专用分析程序	73
5.6 多塔悬索桥分析实例——泰州大桥	81
本章参考文献	89
第6章 多塔悬索桥结构抗震性能与设计方法	91
6.1 概述	91
6.2 非一致地震输入下的多塔悬索桥地震反应特性	91
6.3 主桥和引桥相互耦联及碰撞效应	99
6.4 基于性能的多塔悬索桥抗震设计方法	107
第7章 多塔连跨悬索结构抗风性能技术研究	127
7.1 概述	127
7.2 多塔连跨悬索结构动力特性分析研究	127
7.3 多塔悬索桥风致振动及减振措施研究	138
7.4 多塔连跨悬索桥静风荷载、稳定性与顺桥向适宜体系	145
7.5 基于性能的多塔悬索桥抗风设计方法	153
本章参考文献	164
第8章 三塔悬索桥结构设计与施工	166
8.1 概述	166
8.2 泰州大桥设计	166
8.3 泰州大桥关键构造和控制指标的取值	171
8.4 车辆荷载专题研究	184
8.5 泰州大桥施工	202
本章参考文献	212
索引	216



第1章 绪 论

1.1 多塔悬索桥力学特性

现代悬索桥是由主缆和加劲梁构成的一种柔性悬挂组合体系,兼有索和梁的受力特点。主缆是这个组合体系的主要承重构件,其在荷载作用下的变形直接影响到整个组合体系的内力分配;加劲梁虽直接承受外荷载,但与主缆相比,不是根本的承重构件。因此,悬索桥呈现出的静动力特性与主缆特性息息相关。

主缆的静力特性是在外荷载作用下呈现几何大位移,整个组合体系的平衡是建立在变形后的状态上,由于主缆在初始恒载作用下,具有较大的初拉力,当缆索发生几何形状改变时,初始拉力对外荷载作用下产生的位移就存在抗力,因为它与位移有关,因此缆索呈现出较强的几何非线性性质。又由于恒载产生的初拉力较大,从而减小了活载产生的竖向位移,提高了结构整体竖向刚度。

与其他桥型相比,悬索桥刚度小、固有频率底。对于悬索桥这种悬索组合的柔性结构体系,其结构的自由振动可分为纵向挠曲振动和耦合挠曲扭转振动。提高结构体系挠曲振动的固有频率有利于抵抗挠曲振动;提高挠曲和扭转振动的固有频率,并尽可能拉开两者的差距,则有利于避免复杂的耦合振动。

悬索桥对风的动态反应十分复杂,这种反应是抖振、涡激振、驰振、扭转颤振和弯曲扭转耦合颤振的复合。实际结构中这种反应将随风荷载的变化而变化,并受到桥梁结构自身动力特性的左右。

从双塔悬索桥向多塔悬索桥发展,最主要的结构变化是增加了中间塔。中塔与边塔不同,中塔纵桥向两侧都是主跨,主缆对中塔的约束比主缆对边塔的约束弱得多,因为中塔两侧主缆垂度大。以三塔两跨悬索桥为例,如图 1.1 所示,在单跨满布的汽车荷载作用下:一方面,中塔要有一定的纵向刚度,来抵抗自身的弯曲变形,不至于造成加劲梁下挠过大;另一方面,中塔也要有一定的纵向柔度,来协调鞍座两侧主缆的拉力比(紧松比),保证主缆与鞍座(图 1.2)不产生相对滑移。由此可见,中塔的刚度要适宜,要使两侧主缆不平衡力适中,既要满足鞍座(图 1.2)抗滑安全性要求,也要满足行车舒适性要求(挠跨比)。中塔这种区别于边塔的力学特性,被称为多塔悬索桥的“中塔效应”,是多塔悬索桥特有的力学现象。

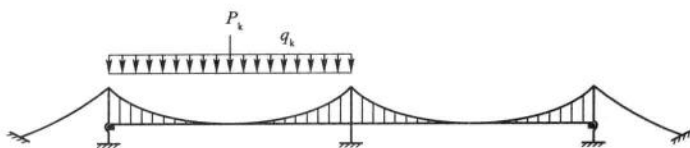


图 1.1 三塔悬索桥中塔效应

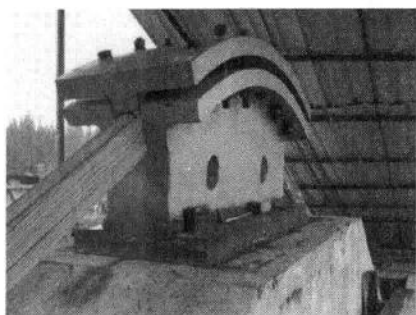


图 1.2 中塔塔顶鞍座

中塔效应对全桥刚度影响较大。工程界一直对采用多塔悬索桥存有疑虑,主要就是顾忌中塔效应。正因为如此,多塔悬索桥一般采用柔性中塔。活载单跨满布时(图 1.1),三塔两跨悬索桥的整体位移如图 1.3 所示,可见中塔 IP 点的纵向位移远大于边塔。柔性中塔易弯曲,使主缆重心向加载跨偏移,加劲梁顺势纵飘,导致多塔悬索桥比两塔悬索桥更柔、加劲梁更易纵飘。

对三塔悬索桥而言,就一个中塔效应,情况相对简单;三塔以上,四塔、五塔、六塔,甚至更多的中塔,还存在多塔效应,即中塔之间的相互作用对全桥刚度的影响。由上述可见,多塔悬索桥的中塔效应是有别于传统双塔悬索桥的主要区别点。正因为中塔效应,多塔结构体系相对更柔,结构静动力特性也会因中塔设置而带来变化。

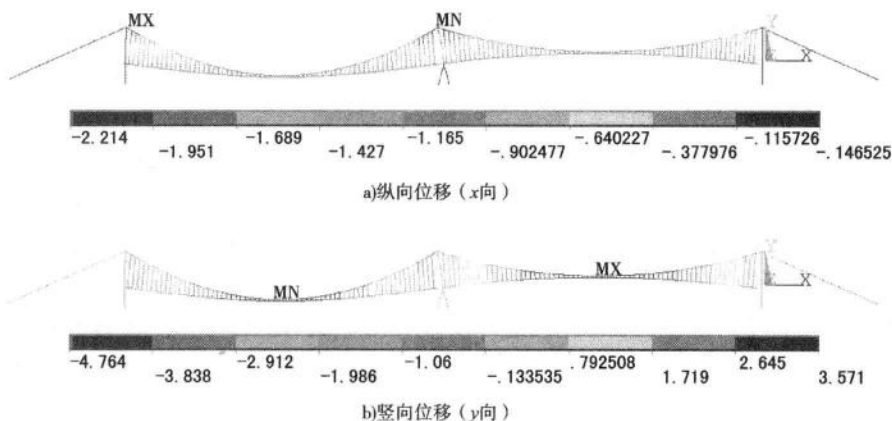


图 1.3 活载单跨满布时三塔两跨悬索桥的整体位移(单位:m)

1.2 多塔悬索桥需要探索的主要问题

传统双塔悬索桥技术已日趋成熟,三塔大跨径(800m 以上)悬索桥目前仅限于国内泰州、马鞍山和鹦鹉洲大桥,三塔以上大跨径悬索桥目前还没有工程实例。对于三塔以上的多塔悬索桥,需要解决的是多个中间塔之间的效应,即多塔效应。但三塔结构的中塔效应是研究多塔结构体系的龙头,由此引出多塔悬索桥需要解决的共性问题如下。

(1) 结构体系与刚度适宜性。多塔连跨悬索桥从结构层面上,需要解决合理结构体系、



支撑方式、主要承重构件刚度匹配和多塔效应等关键问题。

(2) 结构几何和稳定非线性分析手段。多塔连跨悬索桥需要准确模拟结构主塔与加劲梁、主塔与主索鞍、主缆与主索鞍、主缆与散索鞍的相互关系和结构行为,需要解决在统一设计参数下建立不同类型有限元计算模型、提高计算效率和准确度、大位移几何非线性收敛等关键问题。

(3) 结构抗震性能及减震技术。多塔连跨悬索桥的主桥与引桥动力特性(振动周期)相差较大,在地震作用下导致相邻联发生非同向振动,造成主桥与引桥伸缩缝处相邻梁体的碰撞和较大的梁体相对位移,进而导致伸缩缝破坏和落梁。多塔连跨悬索桥主梁超长,行波和非一致地震输入也会加大碰撞甚至落梁发生的几率。上述两个问题是多塔连跨悬索桥抗震需要解决的关键问题。

(4) 结构抗风性能及减震技术。大跨多塔连跨悬索桥因桥联长,一般的大型风洞难以模拟,常规的风洞试验技术很难解决其抗风试验问题。因此,在一般的大型风洞试验条件下,通过合理等效将多塔连跨悬索桥简化为单跨或二跨悬索结构气弹模型,是解决多塔连跨悬索桥抗风试验研究的关键问题。

(5) 结构设计方法。多塔连跨悬索桥是与两塔悬索桥不同的全新结构体系,目前国内外除泰州大桥外还没有建成的千米级多塔连跨悬索桥工程实例。泰州三塔悬索桥原型设计需要解决结构体系、优化选型与合理构造等设计方法,以及汽车荷载和疲劳荷载模型、作用水平、计算方法、主要参数和控制指标的取用等方面的关键问题。



第2章 多塔悬索桥发展概况

2.1 概述

多塔悬索桥是在传统的双塔悬索桥基础上发展起来的一种新的桥型,虽然从它的出现到突破千米大关中间停留了相当一段时间,但目前已建和正在建的三座大跨径三塔悬索桥,即泰州大桥($L=1\ 080\text{m}$)、马鞍山大桥($L=1\ 080\text{m}$)和鹦鹉洲大桥($L=850\text{m}$),显示出强大的生命力,它为跨越宽阔水域提供了坚实的技术支撑。

本章主要介绍多塔悬索桥的发展历程及主要技术特点。

2.2 国内外发展历程

进入20世纪,桥梁工程取得了举世瞩目的成就,随着一座座超大跨度桥梁的落成,桥梁工程师开始设想解决更宽广的水域跨越问题。这样的桥梁必须具备两个条件:大跨度和连续跨越。前者要求是因为跨度小了,桥墩和基础就多,如此不但造价高还可能因为水深无法实现;后者要求是因为跨越海峡就目前的技术不可能一跨而过。满足这两个条件的最佳桥型是悬索桥,因为悬索桥的单一成熟跨度已经达到 $1\ 600\text{m}$,而斜拉桥的经济跨度一般不超过 $1\ 000\text{m}$;若悬索桥能实现多塔连跨(斜拉桥已实现),那么它具备的优势将超过斜拉桥。

从实现这两个条件的历程来看,大跨度多塔悬索桥的发展大致分为三个阶段。

第一阶段,通过共用锚碇将大跨度两塔悬索桥相连。

全世界已有三座著名大桥采用了这种方式:

(1)1936年美国建成的旧金山奥克兰西海湾大桥,由两座孪生悬索桥(主跨跨度 701m)相连,如图2.1所示。

(2)1988年日本建成的本州四国联络桥之南北备赞濑户大桥,由南备赞大桥(主跨跨度 $1\ 100\text{m}$)与北备赞大桥(主跨跨度 990m)相连,如图2.2所示。

(3)1998年日本建成的来岛海峡大桥,由三座不同悬吊形式的悬索桥相连,为世界首创,如图2.3所示。

第二阶段,增设中塔,尝试小跨度多塔连跨悬索桥。

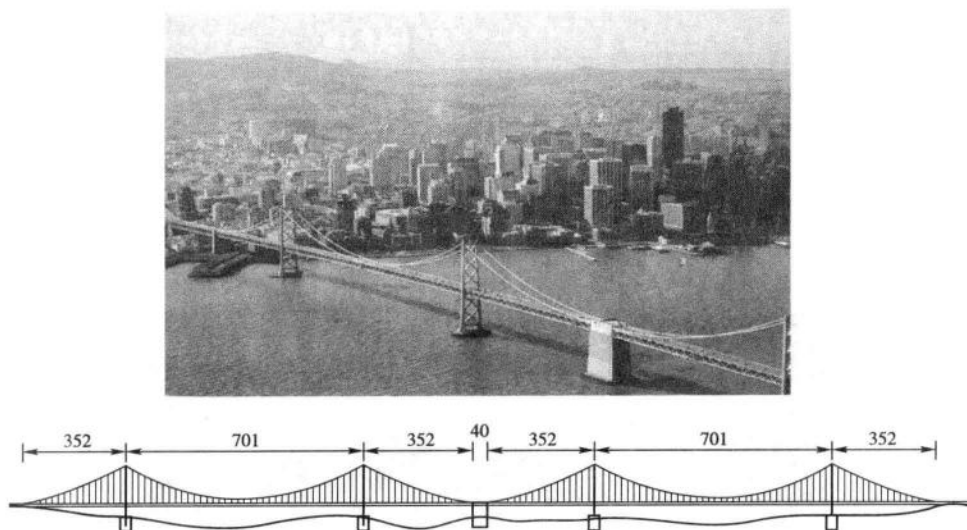


图 2.1 美国旧金山奥克兰西海湾大桥(尺寸单位:m)

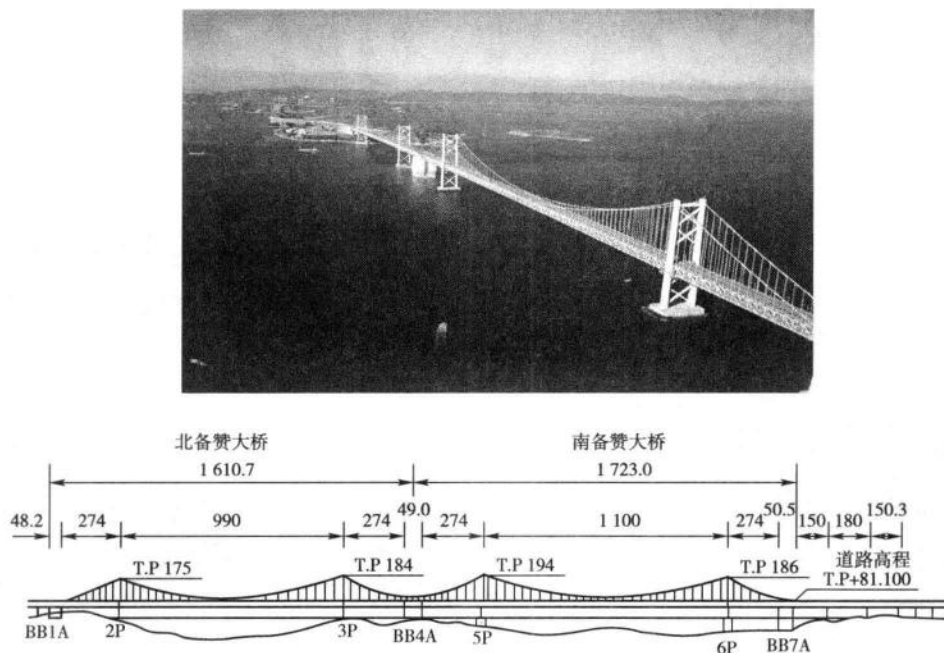


图 2.2 日本南北备赞濑户大桥(尺寸单位:m)

20 世纪上半叶,欧洲修建了多座小跨度多塔悬索桥,其中以位于法国中部的两座为典型代表。一座是 1937 年建成的 Chateauneuf 桥(四塔五跨悬索桥),如图 2.4 所示,桥跨布置为 $49.15\text{m} + 3 \times 59.50\text{m} + 49.15\text{m}$,桥宽 7m ,加劲梁为钢混叠合梁,桥塔为钢结构,支承在圬工桥墩上。另一座是 1951 年建成的 Chatillon 桥(三塔四跨悬索桥),如图 2.5 所示,桥跨布置为 $92\text{m} + 2 \times 76\text{m} + 92\text{m}$ 。Chatillon 桥与 Chateauneuf 桥的不同之处在于桥塔是圬工材料,相同之处在于它们都是利用纵向水平缆连接各桥塔塔顶来约束塔顶纵向位移,提高悬索桥整体刚度。

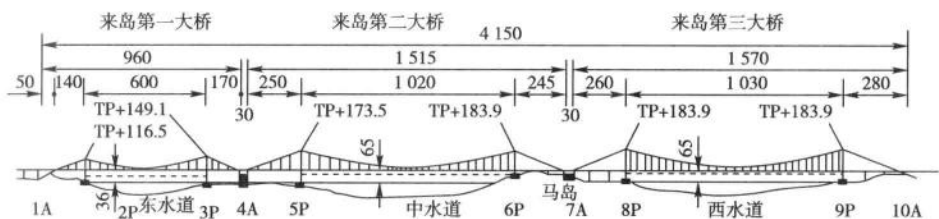


图 2.3 日本来岛海峡大桥(尺寸单位:m)

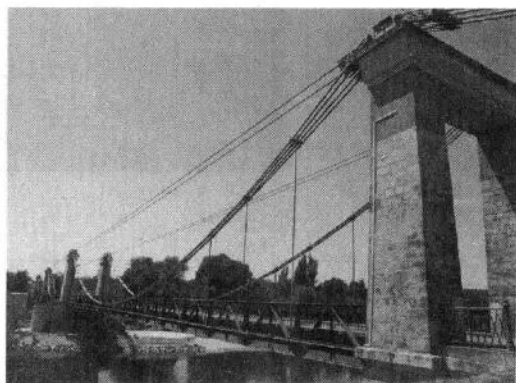


图 2.4 法国 Chateauneuf 桥

图 2.5 法国 Chatillon 桥

1961 年日本建成的小鸣门桥是一座三塔四跨悬索桥,如图 2.6 所示,桥跨布置为 $70.6\text{m} + 2 \times 160\text{m} + 50.8\text{m}$,桥宽 7m ,钢桁架主梁,采用纵向 A 字形的钢筋混凝土刚性中塔(建在小鸣门海峡的孤岛上),主缆在中塔处全部断开并锚固于中塔,回避了主缆与中塔鞍座的抗滑问题。

1965 年莫桑比克独立前由其宗主国葡萄牙建造的 Save 桥是一座四塔五跨悬索桥,如图 2.7 所示,桥跨布置为 $110\text{m} + 3 \times 210\text{m} + 110\text{m}$,桥宽 10.6m ,主缆垂跨比 $1/8.4$,桥面由支承在横梁上的鱼腹式预应力混凝土板构成,横梁间距、吊索间距均为 10m 。

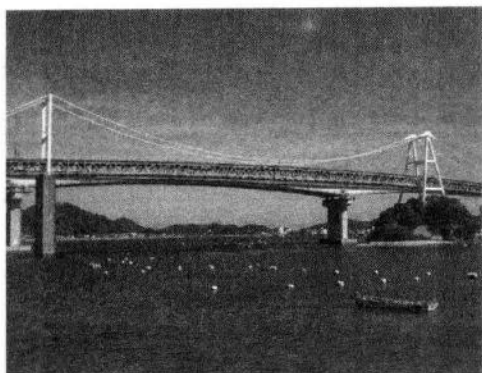


图 2.6 日本小鸣门桥



图 2.7 莫桑比克 Save 桥

第一阶段形式上实现了悬索桥的大跨度和多塔连跨,本质上是几座独立受力的两塔悬索桥的组合。如果共用锚碇设在水中,不但造价高、施工难,还会增加航运要道的船撞风险。第二阶段真正实现了多塔连跨,最大主跨跨度 210m,均为小跨度。大跨度多塔悬索桥由于种种原因未能开展,例如在美国旧金山奥克兰西海湾大桥的初步设计阶段,曾提出过大跨度三塔四跨悬索桥方案,桥跨布置为 $393\text{m} + 2 \times 1\,036\text{m} + 393\text{m}$,如图 2.8 所示。

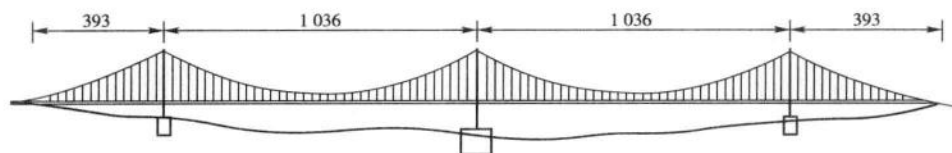


图 2.8 美国旧金山奥克兰西海湾大桥的三塔悬索桥方案(尺寸单位:m)

早些年前就已开始研究的智利 Chacao 海峡大桥的设计方案是一座大跨度三塔四跨悬索桥,如图 2.9 所示,桥跨布置为 $240\text{m} + 1\,100\text{m} + 1\,055\text{m} + 240\text{m}$,采用 A 字形的刚性中塔。



图 2.9 智利 Chacao 海峡大桥三塔悬索桥效果图

墨西拿海峡(Strait of Messina)位于意大利与西西里岛之间,连接第勒尼安海和爱奥尼亚海。海峡宽 3.3km,水深达 120m,海底有断层,属于强烈地震带。尽管如此,建造一座联系亚平宁半岛与西西里岛的跨海大桥,一直都是意大利人的梦想。1973 年, A. M. Toscano 提出了三塔两跨悬索桥方案,桥跨布置为 $850\text{m} + 2 \times 1\,750\text{m} + 1\,000\text{m}$,如图 2.10 所示。



图 2.10 A. M. Toscano 提出的墨西拿海峡大桥方案(尺寸单位:m)



直布罗陀海峡(Strait of Gibraltar)位于西班牙与摩洛哥之间,连接地中海和大西洋,是隔断欧非大陆的“天堑”。在三条可能的渡桥路线中,有一条长 14km,水深超过 800m。1984 年,林同炎公司针对这一路线,提出了三塔四跨悬索桥方案,桥跨布置为 $2\,500\text{m} + 2 \times 5\,000\text{m} + 2\,500\text{m}$,如图 2.11 所示,深水桥墩高度 450m。

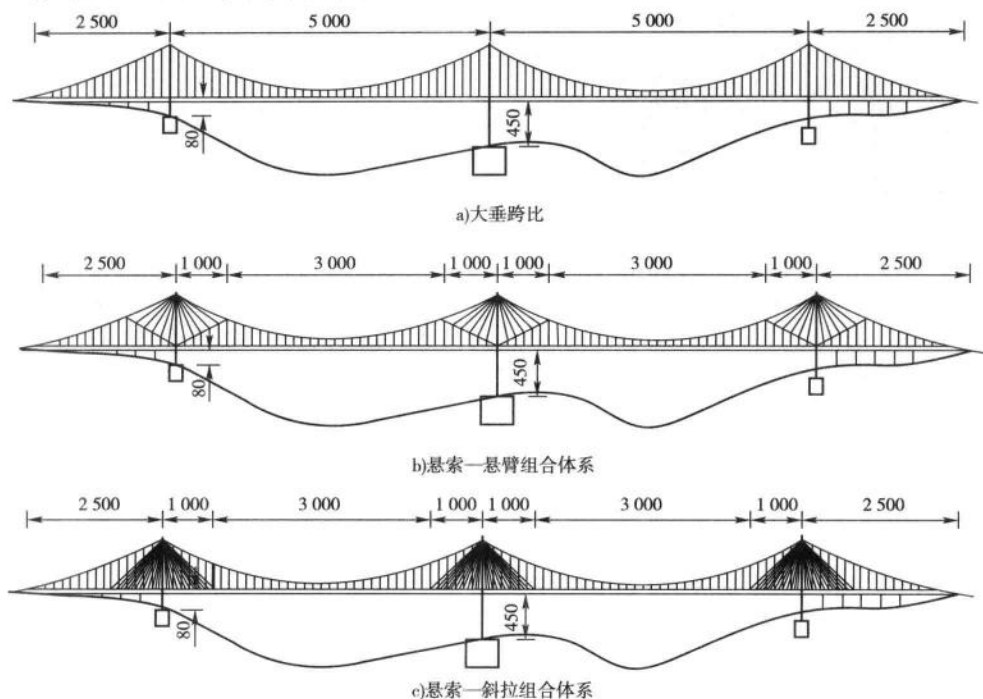


图 2.11 林同炎公司提出的直布罗陀海峡大桥方案(尺寸单位:m)

在国内,青岛海湾大桥、武汉阳逻长江大桥、郑州黄河四桥和南京长江四桥的初步设计阶段都曾提出过三塔悬索桥方案,前两座大桥的方案效果图如图 2.12、图 2.13 所示。

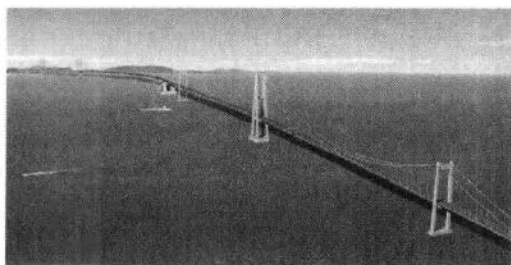


图 2.12 青岛海湾大桥三塔悬索桥效果图



图 2.13 武汉阳逻大桥三塔悬索桥效果图

第三阶段,尝试大跨度多塔悬索桥,主跨跨度飞跃式发展。

目前,国内有三座大跨度三塔悬索桥陆续开工建设。

泰州大桥采用三塔两跨悬索桥,如图 2.14 所示,桥跨布置为 $390\text{m} + 2 \times 1\,080\text{m} + 390\text{m}$,是世界首座主跨跨度千米级的三塔悬索桥,垂跨比 $1/9$ 。主要技术特色:采用全飘浮体系 + 弹性索;采用纵向人字形的全钢中塔;中塔采用沉井基础。

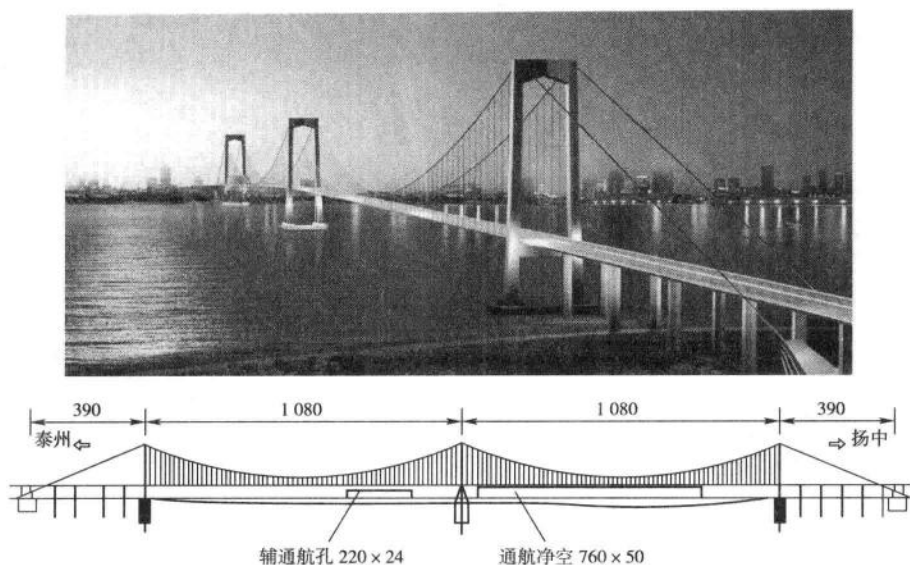


图 2.14 江苏泰州大桥(尺寸单位:m)

马鞍山大桥采用三塔两跨悬索桥,如图 2.15 所示,桥跨布置为 $360\text{m} + 2 \times 1\,080\text{m} + 360\text{m}$,平了泰州大桥的主跨跨度纪录,垂跨比 $1/9$ 。主要技术特色:采用塔梁固结体系(固结处钢箱梁梁高由 3.5m 递增至 5m);采用纵向 I 字形的钢—混组合中塔。

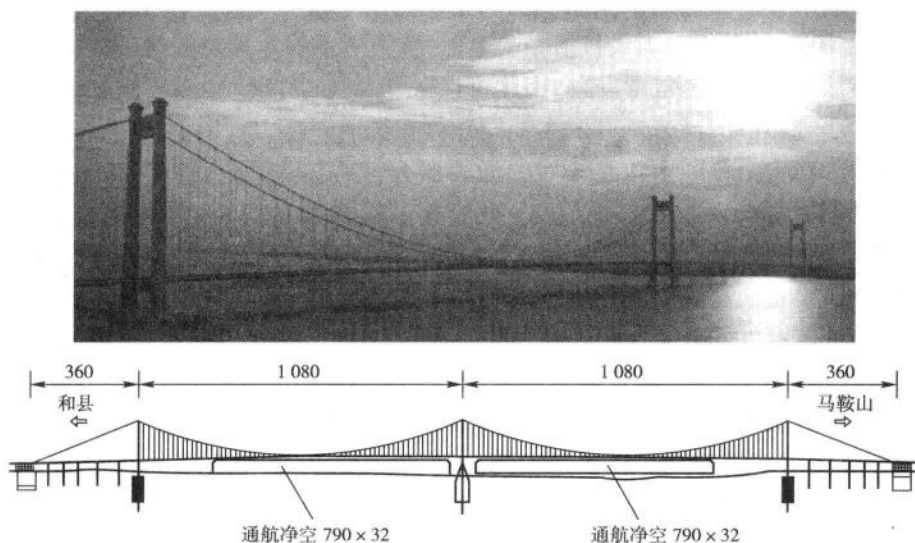


图 2.15 安徽马鞍山大桥(尺寸单位:m)

鹦鹉洲大桥采用三塔四跨悬索桥,如图 2.16 所示,桥跨布置为 $225\text{m} + 2 \times 850\text{m} + 225\text{m}$,垂跨比 $1/9$ 。主要技术特色:采用简支体系,边、中塔和边墩处均设上、下游竖向拉压支座,中塔和边墩处加设纵向固定支座;采用钢—混组合中塔,钢结构塔柱纵向人字形;采用钢—混组合加劲梁。

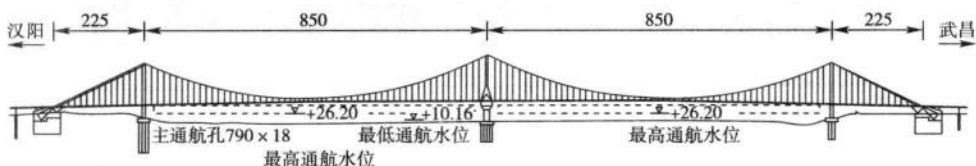


图 2.16 武汉鹦鹉洲大桥(尺寸单位:m)

2.3 克服中塔效应的几种方式

从目前多塔悬索桥的工程实践来看,克服中塔效应的方法主要有三种:通过纵向水平缆连接各桥塔塔顶;将主缆在中塔处全部断开并锚固于中塔;设计合理的整体刚度。

第一种方法的本质是边塔依靠紧绷的水平缆约束中塔。当跨度增大后,自重产生的垂度将使水平缆难以紧绷,约束力大打折扣。显然,该方法不宜在大跨度多塔悬索桥中应用。

第二种方法回避了主缆抗滑问题,因此可以采用 A 字形刚性中塔。由于需要将主缆全部断开,而不能只断开部分(未断开的主缆同样存在抗滑问题),这一做法很难适应大跨度多塔悬索桥。因为在中塔锚固不像在锚碇中锚固那么容易,需要交叉锚固,构造很复杂,国内三座大跨度悬索桥都没有采用这种方式。虽然有一些措施可提高主缆抗滑稳定性,如对鞍座内主缆加压、使用黏结剂、设置摩擦板,但是都不足以保证主缆能够连续通过中塔。

第三种方法是正面克服中塔效应的方法。多塔悬索桥力学特性的改变,本质上是增设的中塔引起的整体刚度的改变。影响整体刚度的因素从大的层面来看,包括结构体系和主要构件的刚度,这部分内容是本书第 3、第 4 章的主要内容。

除上述三种方法外,有学者设想改变缆索体系来克服中塔效应,即在第一种方法的基础上,用吊索将纵向水平缆与其下同侧的主缆相连,构成双缆体系多塔悬索桥,如图 2.17 所示。目前对双缆体系的研究存在争论,当活载单跨满布时,有学者认为,下缆水平力增大,上缆水平力减小,总水平力不变,中塔保持平衡。还有学者认为,总水平力增大,且中塔纵弯后,满载侧吊索拉力减小,不但活载全部由下缆承担,上缆承担的恒载也向下缆转移,即上缆



图 2.17 双缆体系多塔悬索桥

卸载,说明下缆拉力增幅很大;空载侧恒载由下缆向上缆转移,说明上缆拉力增幅很大。所以,两侧主缆截然相反的拉力变化趋势会使抗滑问题更突出。