



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 模型试验与分析技术

张劲泉 李万恒 樊平 等 编著

Multi-pylon Multi-span
Suspension Bridge Technology :
Model Analysis and Experimental Techniques



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

**Multi – pylon Multi – span Suspension Bridge Technology :
Model analysis and experimental Technigues**
多塔连跨悬索桥模型试验与分析技术

张劲泉 李万恒 樊 平 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”为依托,主要介绍了课题模型试验研究的主要内容,体现了项目组在国内外首次开展多塔连跨悬索桥静动力特性模型试验研究、抗震性能模型试验研究和抗风性能模型试验研究过程中,在结构体系分析理论、试验验证技术等方面取得的一系列原创性成果。

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

多塔连跨悬索桥模型试验与分析技术 / 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 978-7-114-10738-2

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 140452 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:多塔连跨悬索桥模型试验与分析技术

著 作 者:张劲泉 李万恒 樊 平 等

责任编辑:周 宇

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:10.5

字 数:240 千

版 次:2013 年 6 月 第 1 版

印 次:2013 年 6 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10738-2

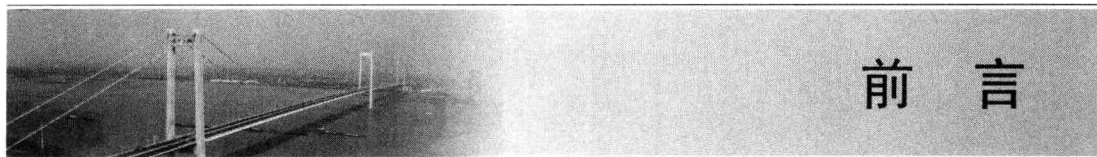
定 价:30.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

《多塔连跨悬索桥模型试验与分析技术》

编写人员

交 通 运 输 部	张劲泉	李万恒	樊 平	吴寒亮
公 路 科 学 研 究 所	王 陶	吕建鸣	宋建永	傅宇方
	陈 可	王兵见	毛 燕	曲兆乐
	杨 昀	曹一山	韩立中	
江苏省长江公路大桥	冯兆祥	阮 静	林海峰	陆 宇
建 设 指 挥 部	顾碧峰	周 畅	朱梦雅	
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



在交通大发展的背景下,我国公路桥梁建设处于一个前所未有的繁荣期,期间涌现出许多新的结构体系,多塔连跨悬索桥便是其中之一。多塔连跨悬索桥是在传统两塔悬索桥的基础上增设若干个中间塔,使悬索桥具备更大的跨越能力。世界上第一座千米级多塔连跨悬索桥是中国泰州长江公路大桥。关于该类桥型的结构力学性能,现有研究仅为理论、数值分析,且存在较多的假设与简化,这对于该类桥型的技术成熟和应用推广是远远不够的,因此,开展模型试验研究意义重大,这也是本书的立意。

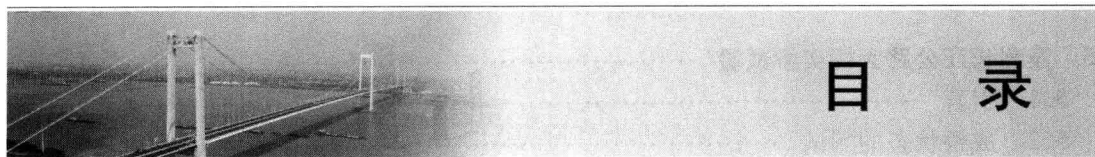
长期以来,模型试验一直是解决新型结构或复杂课题的重要手段之一。随着人类科学技术的发展,桥梁结构试验技术从初期的简单模拟、验证性工程行为,已经发展成为以先进量测技术、大吨位加载设备为试验手段,具备严格的模型相似理论体系,试验目的多样、试验进程精确可控的科学研究过程。面对多塔连跨悬索桥,如何开展模型试验,本身就是一个需要研究的问题。国家科技支撑计划课题“多塔连跨悬索结构及示范工程”首次对大跨度多塔连跨悬索桥结构开展了模型试验与分析技术研究。

本书以泰州长江公路大桥为试验原型,通过实验室模型试验对多塔连跨悬索桥的结构静动力特性、抗震性能及抗风性能进行研究,同时结合竣工验收,开展了实桥测试。本书详细介绍上述试验研究的具体过程与试验数据,并总结归纳了相关的试验技术与分析技术。

本书由交通运输部公路科学研究院张劲泉、李万恒、樊平等编著。

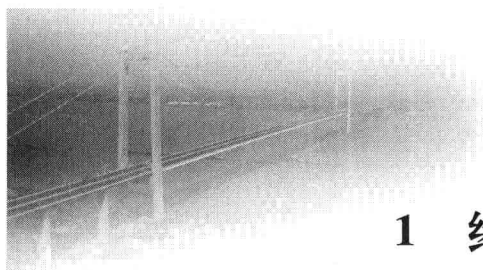
由于我们水平所限,编写时间比较紧迫,书中难免有不妥或疏漏之处,敬请读者批评指正。

作者
2013年6月于北京



1 绪论	1
1.1 桥梁模型试验概况	1
1.2 多塔连跨悬索桥的特点	8
1.3 本书的主要内容	16
本章参考文献	17
2 多塔连跨悬索桥静动力特性模型试验研究	18
2.1 引言	18
2.2 研究目的与内容	18
2.3 三塔模型试验研究	19
2.4 五塔模型试验研究	56
2.5 静动力性能模型试验结论	66
本章参考文献	66
3 多塔连跨悬索桥抗震性能模型试验研究	69
3.1 引言	69
3.2 研究目的与内容	69
3.3 非线性地震反应数值分析	70
3.4 大比例振动台组模型试验	73
3.5 合理的抗震结构体系	89
3.6 抗震性能模型试验结论	101
本章参考文献	102
4 多塔连跨悬索桥抗风性能模型试验研究	103
4.1 引言	103
4.2 研究目的与内容	103
4.3 刚体节段模型试验	104
4.4 桥塔气弹模型试验	117
4.5 全桥气弹模型试验	120

4.6 抗风性能模型试验结论	128
本章参考文献	128
5 泰州长江公路大桥实桥试验	129
5.1 引言	129
5.2 成桥状态的测试	130
5.3 静力荷载试验	138
5.4 动力荷载试验	152
本章参考文献	156
索引	157



1 绪 论

1.1 桥梁模型试验概况

1.1.1 模型试验理论与方法

桥梁结构模型试验是将在一定作用下桥梁原型(实桥)的力学行为,缩小(或放大)到模型上,通过量测模型的响应(应力、应变、位移、速度及加速度等),推算出原型的力学行为,实现对原型桥力学性能的再现。同时,结合数值分析结果,对试验数据进行比较、分析及延展,实现对原型桥结构性能系统、深入的研究。以往经验表明,在模型试验研究中,正确的相似关系、合理的模型材料、可行可控的加载与量测方案,是试验研究成功的基本要求和保障前提。

1) 模型相似理论

桥梁结构试验模型是仿照原型并按一定的比例关系复制而成的试验代表物,它具有实际结构的全部或部分特征。在试验研究过程中,第一步就是根据相似理论进行试验模型设计,最后一步则是按照相似理论来推算出原型的实际工作性能。因此,相似理论是桥梁结构模型试验研究的基础理论。

相似理论的基本原理是:当所研究对象的实际力学定律(如基本微分方程)已知时,如果据此导出的解析关系对模型和原型都同样适合,那么这些力学定律就可用于模型与原型之间的相互转换。以满足动力相似的两个质点系为例,其质量分别为 $m_i (i=1,2,\dots)$ 和 M_i ,作用力为 f_i 和 F_i ,位移为 l_i 和 L_i ,时间为 t_i 和 T_i 。在动力相似下,各同名物理量之间具有固定的比例常数(相似常数),即 $m_i/M_i = C_M$, $f_i/F_i = C_F$, $l_i/L_i = C_L$, 以及 $t_i/T_i = C_T$ 。根据牛顿运动定律,有:

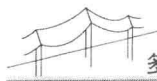
$$f_i = m_i \frac{d^2 l_i}{dt^2} \quad (1.1)$$

$$F_i = M_i \frac{d^2 L_i}{dt^2} \quad (1.2)$$

通过相似常数 C_M 、 C_F 、 C_L 及 C_T ,式(1.2)可表示为:

$$F_i \frac{C_M C_L}{C_F C_T^2} M_i \frac{d^2 L_i}{dt^2} \quad (1.3)$$

进一步可得:



$$\frac{m_i l_i}{f_i t^2} = \frac{M_i L_i}{F_i T^2} = \pi \quad (1.4)$$

可见,相似判据能把两个相似现象中的物理量联系起来,以判别两个现象是否相似,并实现将某一现象研究所得的结果推广到另一相似现象中去。因此,两个现象满足相似性要求的必要条件是相似判据相等。

相似判据可由方程式分析法或量纲分析法的推导得出。其中,方程式分析法比较确实可靠,但现实中遇到的问题往往复杂而无法建立方程,如大跨缆索桥梁的力学方程,无法获得相似判据。与此不同,量纲分析法(也称为因次分析法),是根据方程量纲和谐的原理,不要求建立现象的方程,而只要确定哪些物理量参加所研究的现象,以及指导测量这些量的单位系统的量纲就够了,被普遍用于桥梁结构模型试验中。例如,设某一物理现象的物理方程为:

$$j = f(j_1, j_2, \dots, j_k, \dots, j_n) \quad (1.5)$$

其中 $j_1, j_2, \dots, j_k$ 为该物理现象的 k 个基本物理量,其量纲可表示为 $[j_1], [j_2], \dots, [j_k]$, 其余 $(n-k)$ 个导出物理量的量纲为 $[j^{p_{1i}}], [j^{p_{2i}}], \dots, [j^{p_{ki}}]$ 。

$$[j_i] = [j^{p_{1i}}, j^{p_{2i}}, \dots, j^{p_{ki}}] \quad (i = k+1, k+2, \dots, n) \quad (1.6)$$

把几个物理量构成的物理方程无量纲化为 $(n-k)$ 个无量纲群的关系式:

$$\pi_n = F(\pi_{k+1}, \pi_{k+2}, \dots, \pi_j, \dots, \pi_n) \quad (1.7)$$

由此即可确定相似判据。式(1.5)~式(1.7)为量纲分析的基本过程。

量纲分析法为许多复杂问题提供了相似判据确定的有效方法,应用中需要注意以下事项:①量纲分析要求研究者对试验问题受力特征具有充分的洞察力,能正确认定与问题相关的全部物理量,正确辨识独立物理量,并计入量纲分析中;②量纲分析没有考虑物理现象的单值条件。

2) 模型材料

选择合适的模型材料是桥梁结构模型试验成功的先决条件,正确选取模型材料应满足以下基本要求:①符合试验目的要求,即根据试验目的来选取模型材料,如试验目的在于研究弹性阶段的应力状态,则模型材料应尽可能符合一般弹性理论的基本假定(匀质、各向同性、应力应变关系线性、泊松比不变等),如试验目的在于研究结构的破坏过程,则采用与原型材料相似度最大或相同的模型材料;②保证模拟的要求,即能满足模型设计中的相似准则,可将模型上量测的物理量换算成原型结构上相应的物理量;③保证量测的要求,即模型材料应具有适当的弹性模量,以产生足够的变形,使量测仪器(表)有足够的读数;④保证加工制作的要求,即具备良好的加工性能,价格适宜。目前,桥梁结构试验中常用的模型材料包括金属(钢、铝等)、细石混凝土、水泥砂浆、塑料(有机玻璃)、石膏、木材等。

3) 模型加载与量测

模型试验荷载是对实际荷载进行比例缩小和等效处理后确定的,且应满足以下基本要求:①精确地体现原型荷载的大小和方向;②易于施加、卸除,重复性好;③不能对模型有约束作用;④应尽量避开测点位置;⑤应具有安全保护措施,必要时具备自动停止功能。

现代的测试技术涵盖了电学、电磁学、声学、光学、核物理学等多领域,可以说,模型试验的发展很大程度上受制于模型物理量的可测性、测试精度、稳定性及效率。桥梁结构模型试验中,需要量测的物理量通常包括:应变(应力)、变形(位移或转角)、裂缝、力、温度、徐变和收缩、

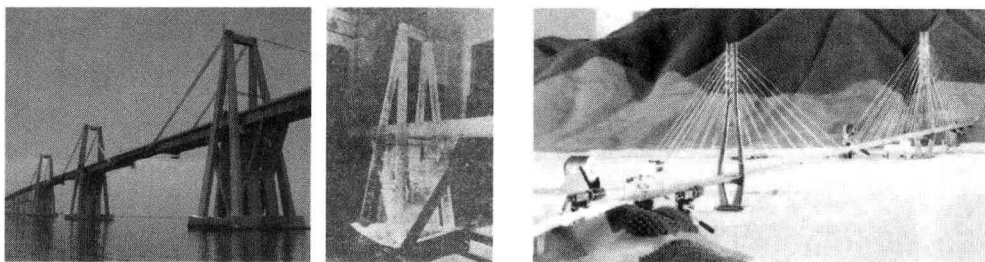


动力响应(速度、加速度等)等,试验中应根据模型特点及精度要求选择合适的量测装备。

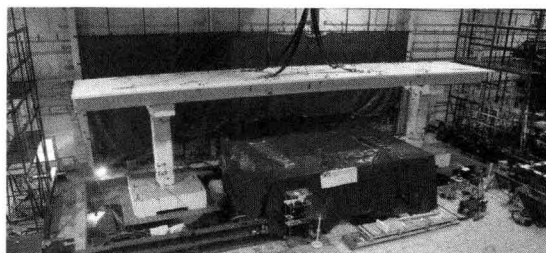
1.1.2 模型试验发展回顾

桥梁结构模型试验研究,最早开始于德国,1755年德国工程师 Grubenmann 为了在莱茵河上修造木桥,首先借助模型试验验证了设计的可靠性。之后,Telford 提出了采用模型试验验证吊桥性能的必要性。1846年英国 Stephenson 和 Fainbairn 为了修建横跨 Menai 海峡的 Britannia 桥,进行了 1/6 的桥梁结构模型试验;后来,又对另一座管形结构的 Conway 铁路桥做了模型试验。这些早期研究工作提高了桥梁建造和设计水平,为桥梁结构试验自身的发展奠定了基础。

20 世纪以来,随着光弹性学技术、机械和光学应变计、电阻应变计等测试技术的发展,大型、复杂加载设备的使用,以及计算机在试验设计和数据处理方面的应用,桥梁结构模型试验进入精细化、大比例化及数字化时代。国外已开展了大量桥梁结构试验(图 1.1),如里斯本国家工程试验室对世界上首座混凝土斜拉桥——委内瑞拉的 Lake Maracaibo 桥进行了结构试验等。自从 1940 年美国 Tacoma 桥遭受风灾后,大型风洞开始引入桥梁结构试验研究中,斜拉桥等缆索桥梁结构的气动效应试验广泛开展。20 世纪中后期发生的几次大地震,促使人们越来越关注桥梁的抗震性能,采用振动台作为加载设备的桥梁结构抗震试验为桥梁抗震设计提供了重要的基础数据。值得一提的是,日本在 20 世纪后期围绕“本州—四国”联络线,大规模、成系统地开展了长大桥梁试验研究,尤其在抗震能力、施工过程影响、疲劳性能、水—结构相互作用、气动效应及海洋环境耐久性等方面,这些试验研究有力地支撑了“本州—四国”联络线的建设,大大提高了日本在长大桥梁方面的建设和管养水平,也代表了桥梁模型试验的国际领先水平。

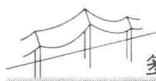


a) Lake Maracaibo 桥及试验模型 (里斯本国家工程试验室) b) Tataru 桥的风洞试验 (本州—四国联络高速道路株式会社)

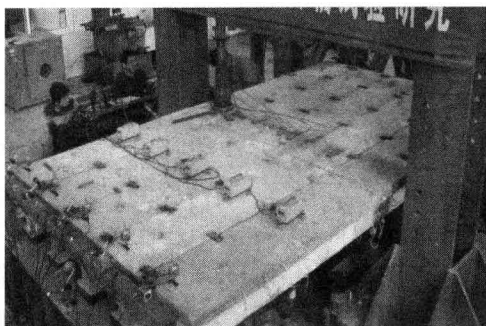


c) 桥梁结构的振动台试验 (美国国家地震工程研究中心, Buffalo)

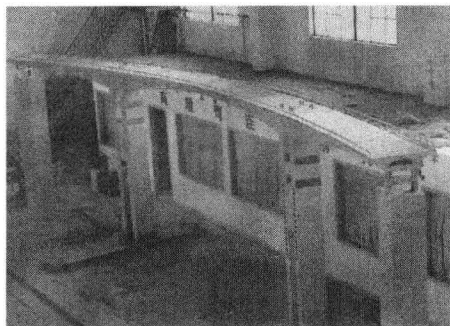
图 1.1 国外的代表性桥梁模型试验



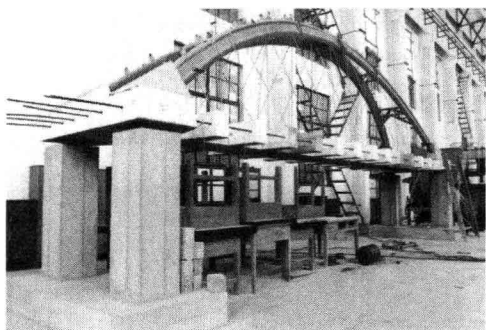
我国的桥梁结构试验始于 20 世纪五六十年代,原铁道部大桥局桥科院对我国首座大跨度的简支钢桁梁进行模型试验。随后,伴随着我国桥梁建设的蓬勃发展,国内相关研究院(所)和高校在吸收国际先进技术的同时,针对我国地理、地域特点,开展了大量桥梁结构模型试验研究(图 1.2),尤其在混凝土简支梁桥、高墩弯桥、大跨拱桥、预应力混凝土斜拉桥等方面取得了丰硕成果。



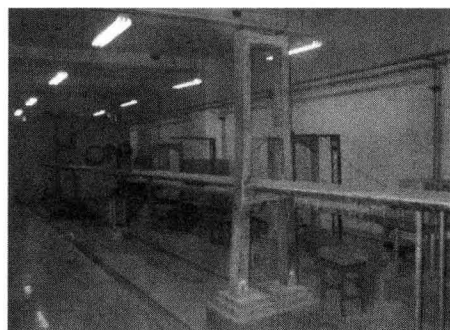
a)混凝土简支梁桥试验(长安大学)



b)高墩弯桥试验(交通运输部公路科学研究所)



c)大跨拱桥试验(西南交通大学)



d)预应力混凝土悬索—斜拉桥试验(大连理工大学)

图 1.2 国内的代表性桥梁模型试验

1.1.3 悬索桥模型试验实例

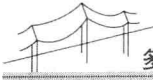
现代悬索桥的出现已有百余年历史,在这一过程中,国内外开展的悬索桥结构试验主要包括:面向设计需要的成桥静力试验、车载动力试验、风洞试验等,面向施工控制的施工阶段模拟试验、通车检定试验,以及长期观测试验等。表 1.1 列出了近年来国内外主要的悬索桥模型试验情况,其中国内近年来开展的悬索桥试验如图 1.3 所示。从已开展的试验研究可知,采用大缩尺比例(1/100 左右)模型可以满足对结构基本静力、动力性能的试验要求,在模型材料选择方面,主缆和吊杆一般选用高强钢丝,桥塔选用钢材焊接成型(静动力、抗震)或有机玻璃(抗风),加劲梁可以选用钢板或铝合金制作,这些经验为开展多塔连跨悬索桥的模型试验研究提供了参考。

国内外悬索桥结构模型试验概况

表 1.1

序号	原型名称	几何缩尺比例	主要试验信息	模型材料	单位
1	日本关门桥 (主跨 712m)	1/100	研究加劲梁架设阶段桥跨结构各部分的变形状态,为施工架设顺序设计提供参考。 试验分两部分进行:第一部分仅有 1 根主缆,研究在加劲梁架设中竖向荷载作用下的行为;第二部分有 2 根主缆,研究梁设过程中水平荷载作用下的行为	主缆:钢丝; 加劲梁:铝合金; 桥塔:钢板	本州—四国联络线 公司,1970 年
		原型	车载、温度作用下桥跨变形和应力检定,桥跨的振动特性测定和行车试验测定(原型)。 风速、风向监测,地震监测,桥跨结构振动加速度测定,加劲梁结构位移测定等	不详	不详
2	汕头海湾大桥 (主跨 452m)	1/60	挂缆及加劲梁架设过程中的受力和位移状态,校核设计计算结果,为施工架设设计提供参考资料,探索成桥状态后在设计活载工况下的应力与位移。 加劲梁节段倒拆试验、正装试验,施工阶段横风试验	主缆:高强度钢丝; 加劲梁:型钢(施工试验); 铝合金(成桥试验); 桥塔:钢板; 吊杆:高强度铝合金薄板	原铁道部大桥局桥 科院
3	江阴长江公路大桥 (主跨 1 399m)	1/260	竖向荷载试验、横向荷载试验	主缆:钢绞线; 加劲梁:有机玻璃; 吊杆:钢丝	同济大学
4	日本东海道、东北新干线 (主跨范围: 540m, 800m,1 100m 及 1 400m)	1/67 ~ 1/100	研究高速列车过桥的动力问题,获得冲击系数,并对动力模型的精度进行检定。 包括 22 个试验模型,在模型车+轨道、附加弹簧质量的模型车、动轮偏心块锤击等加载方式下,加劲梁顺桥向位移、梁端转角位移等	主缆:钢丝绞扭; 加劲梁:钢板; 吊杆:钢丝; 桥塔:角钢; 中央扣:钢丝; 斜拉索:钢丝	平井敦、伊藤学,20 世纪 50 年代末





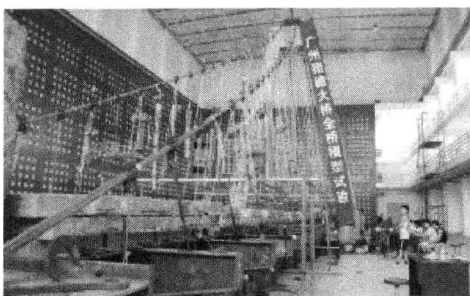
续上表

序号	原型名称	几何缩尺比例	主要试验信息	模型材料	单位
5	加拿大阿·默里麦凯桥 (主跨 429m)	1/320	在均匀气流和边界层紊流中作对比试验	不详	不详
6	日本明石海峡大桥 (主跨 1 991m)	1/350	列车引起的振动,地震效应等	主缆:钢捻线; 加劲梁:内包刚性棒、外包薄钢板; 桥塔:内包刚性棒、外包薄钢板; 吊杆:聚酯纤维的钓鱼线	东京大学、石川岛播磨重工业株式会社 (IHI)、日本钢管株式会社 (NKK)
7	美国金门大桥 (主跨 1 280m)	原型	在车辆往来、风及海洋波浪等作用下的振动	不详	美国海岸及地质调查局, 1933 ~ 1942 年
8	润扬长江公路大桥 (主跨 1 490m)	原型	台风情况下的抖振测量	不详	东南大学, 2007 年
9	某桥 (主跨 580m)	1/100	研究损伤情况下加劲梁挠度、应变,主缆及吊杆应变,自振特性,包括加劲梁损伤(角钢失效)、主缆损伤(锚碇松弛)、吊杆损伤模拟(吊杆松弛)	主缆:天然纤维芯钢丝; 加劲梁:角钢 + 钢板; 桥塔:H 型钢	大连海事大学, 2009 年
10	龙城大桥 (主跨 114m)	1/20	测量各施工阶段模型主缆、加劲梁及线形变化及拱形桥塔变位,研究其变化规律,进而验证施工顺序的合理性。 通过使用阶段、空间受力特性及极端受力情况模型试验,测量主缆及加劲梁线形变化,斜拉索、主缆及吊杆的内力,桥塔及加劲梁在使用阶段的应力状态	主缆:平行钢丝; 加劲梁:钢、铝合金; 桥塔:混凝土、钢管混凝土	长安大学



续上表

序号	原型名称	几何缩尺比例	主要试验信息	模型材料	单位
11	江东桥 (主跨 260m)	1/16	自锚式悬索桥的施工过程模拟及动力特性研究	钢	不详
12	虎门大桥 (主跨 888m)	1/50	施工过程控制	主缆: 高强度钢丝; 吊杆: 铝板; 加劲梁: 铝合金; 桥塔: 钢	交通运输部公路科学研究所
13	吉首矮寨特大悬索桥 (主跨 1 176m)	1/23	结构性能试验(主缆线形、索鞍预偏、主缆锚点力) 轨索张拉力	主缆: 平行钢丝; 吊杆: 高强度钢丝; 加劲梁: 钢管; 桥塔: 钢板	长沙理工大学
14	大连湾跨海大桥 (主跨 400m)	1/100	研究自锚式斜拉—悬索协作体系桥的结构性能, 为实际工程提供计算和设计依据; 静载试验、动载试验, 混合梁对动力特性的影响	主缆、斜拉索: 钢丝; 加劲梁: 铝合金; 吊杆: 钢丝; 桥塔: 钢管混凝土	大连理工大学, 2009 年
15	广州猎德大桥 (主跨 219m)	1/10	自锚式双索面悬索桥的施工过程、静动力试验	钢	广州大学



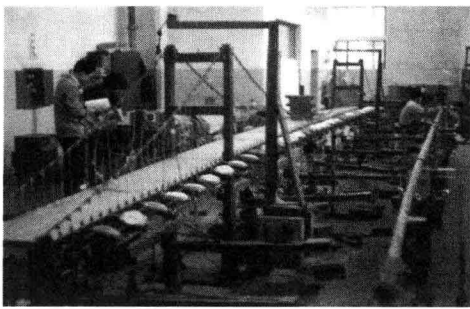
a)广州猎德大桥



b)广州虎门大桥



c)吉首矮寨大桥



d)汕头海湾大桥

图 1.3 国内开展悬索桥的模型试验研究

1.2 多塔连跨悬索桥的特点

1.2.1 结构力学特点

悬索桥是一种柔性预应力结构,成桥后的静动力性能受主缆、吊杆的预(拉)应力影响很大,在车辆荷载下加劲梁和主缆都将产生较大的纵向、横向位移,且两者的变形不同步。与传统的双塔悬索桥相比,多塔连跨悬索桥最主要的结构变化是增加了中间塔。中间塔纵桥向两侧都是主跨,相比对边塔的约束作用,主缆对中间塔的约束要弱得多,引起了“中间塔效应”,即:一方面,中间塔要有一定的纵向刚度,来抵抗自身的弯曲变形,不至于造成加劲梁竖向位移过大;另一方面,中间塔也要有一定的纵向柔度,来协调鞍座两侧主缆的拉力比或紧松比,保证主缆与鞍座不产生相对滑移。图 1.4 为三塔两主跨悬索桥在单跨车辆荷载作用下的结构变形图。

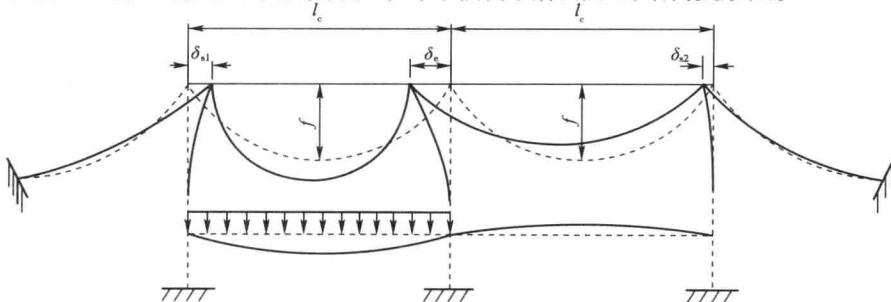


图 1.4 三塔两主跨悬索桥在单跨车辆荷载作用下的结构变形图

注:图中 l_c 表示单跨跨度, δ_{s1} 和 δ_{s2} 表示边塔塔顶水平位移, δ_e 表示中间塔塔顶水平位移; f 表示主缆重度



另外,由于悬索桥的刚度较小,其基频一般很低,在风力作用或风-雨作用下,容易产生抖振、涡激振动、弛振、扭转颤振和弯曲扭转耦合颤振等现象。再者,由于悬索桥一般跨度较大,在地震作用下,具有明显的行波效应,并且加劲梁在纵向无约束时的纵向位移量比较大,可能发生碰撞。除上述成桥后的行为特征外,由于悬索桥的施工特点,主缆线形、内力随着加劲梁的架设而不断变化,因此施工过程对悬索桥的性能影响较大。

1.2.2 结构发展回顾

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桥型,是跨越宽阔水域的理想桥型。多塔悬索桥的结构体系发展可分为以下三个阶段。

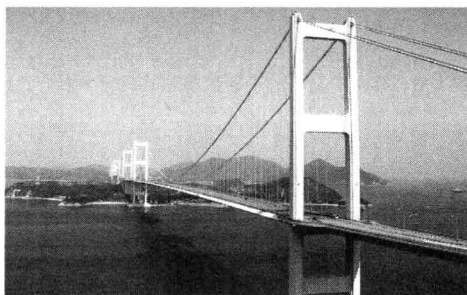
(1) 第一阶段,通过共用锚碇将大跨度多塔悬索桥相连,本质上是几座独立受力的两塔悬索桥的组合,如旧金山奥克兰西海湾大桥(美国,1936年)、本州—四国联络桥之南北备赞濑户大桥(日本,1988年)以及来岛海峡大桥(日本,1998年),见图1.5。



a) 奥克兰西海湾大桥



b) 南北备赞濑户大桥



c) 来岛海峡大桥

图1.5 共用锚碇式的多塔悬索桥

(2) 第二阶段,具有中间塔的小跨度多塔连跨悬索桥,真正实现了多塔连跨,如 Chateau-neuf 桥(法国,1937年)、Chatillon 桥(法国,1951年)、小鸣门桥(日本,1961年)、Save 桥(莫桑比克,1965年),见图1.6。

(3) 第三阶段,大跨度多塔连跨悬索桥,主跨跨度飞跃式发展,实现了千米级的多塔连跨悬索桥,如已建成的泰州长江公路大桥(中国江苏,2012年),在建的马鞍山长江公路大桥(中国安徽,2011年开工)、鹦鹉洲长江大桥(中国湖北,2011年开工)(见图1.7),以及进行了方案设计的奥克兰西海湾大桥(美国)、Chacao 海峡大桥(智利)、墨西拿海峡大桥(意大



利)、直布罗陀海峡大桥(西班牙),及国内的青岛海湾大桥、武汉阳逻长江大桥、郑州黄河四桥、南京长江四桥等。



a)Chateaufort桥



b)Chatillon桥



c)小鸣门桥



d)Save桥

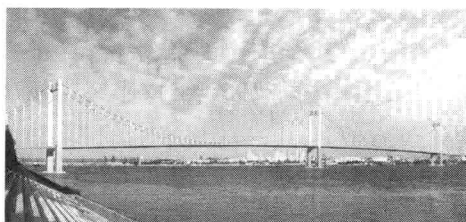
图 1.6 具有中间塔的小跨度多塔连跨悬索桥



a)泰州长江公路大桥



b)马鞍山长江公路大桥



c)鹦鹉洲长江大桥

图 1.7 千米级的多塔连跨悬索桥