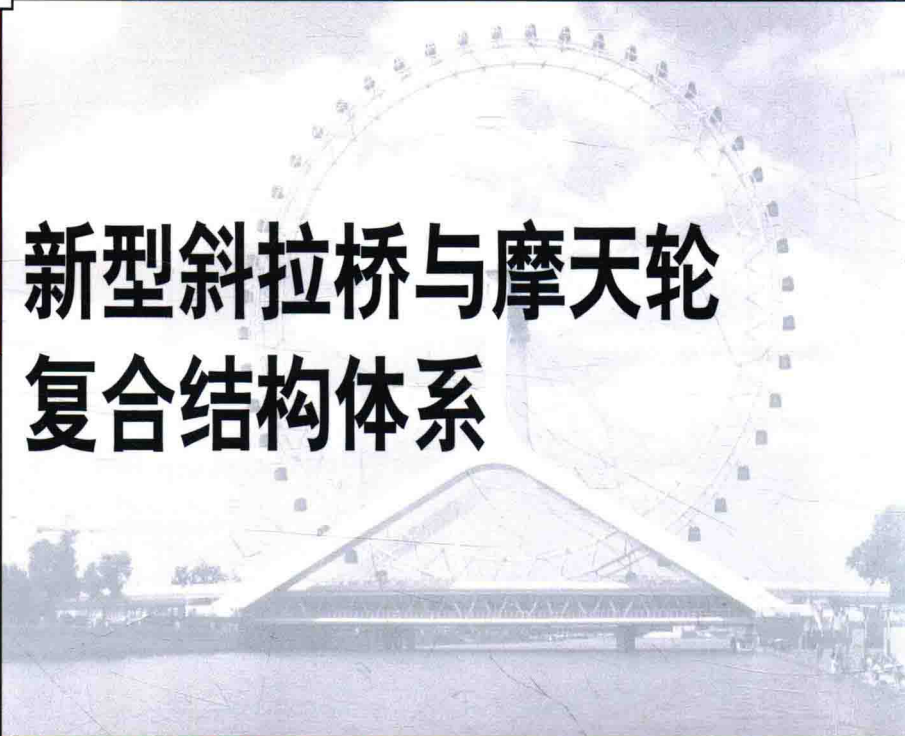




新型斜拉桥与摩天轮 复合结构体系

李毅佳 陈志华 著



科学出版社

新型斜拉桥与摩天轮 复合结构体系

李毅佳 陈志华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了斜拉桥的发展历史和趋势、新型斜拉桥与摩天轮复合结构体系的工程背景;主要论述了新型斜拉桥与摩天轮复合结构体系的静动力分析、动力特性分析、地震作用下的响应分析、施工过程分析、风场模拟分析、风洞试验分析、斜拉索的风致振动与抑振措施等内容。

本书可供从事桥梁设计、施工的工程技术人员参考,也可作为高等院校桥梁专业、土木工程专业本科生和研究生的学习资料。

图书在版编目(CIP)数据

新型斜拉桥与摩天轮复合结构体系/李毅佳,陈志华著. —北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-046829-1

I. ①新… II. ①李…②陈… III. ①斜拉桥—研究 IV. ①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 311325 号

责任编辑:裴 育 纪四穗 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 1 月第一次印刷 印张:13 1/4

字数:256 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

现代斜拉桥作为一种梁桥和悬索桥的组合体系,虽然起步较晚,但因其结构受力性能好、跨越能力大、结构造型多样化、抗震性能好等特点,在国内外得到迅猛发展,修建数量急剧增加,跨径纪录也被不断刷新。现代斜拉桥已成为大跨度桥梁的主要桥型之一,并促使悬索桥向更大跨度范围发展。

目前,国内外关于斜拉桥的专著不多,尤其是在复合结构体系斜拉桥的研究方面。天津永乐桥作为一种新型斜拉桥与摩天轮复合结构体系,因具有独特的造型,自建成以来就成为天津市的标志性建筑。此复合结构体系与一般斜拉桥存在着诸多不同,主要体现在斜拉桥桥塔的形式、斜拉索的布置、桥塔功能的利用、传力机制、动力特性等方面。本书重点介绍该复合结构体系在动力特性、地震响应、施工过程受力、风场分析、风振抑振等方面的研究,以期复合结构体系斜拉桥的发展提供设计和理论依据,为从事复合结构体系设计、研究及施工的人员提供参考。

全书共6章,第1章是斜拉桥的历史与发展,由李毅佳撰写;第2章是斜拉桥与摩天轮复合结构静动力特性分析,由李毅佳撰写;第3章是斜拉桥与摩天轮复合结构地震响应分析,由李毅佳撰写;第4章是斜拉桥与摩天轮复合结构施工过程分析,由陈志华撰写;第5章是斜拉桥风场数值模拟与风洞试验研究,由李毅佳、陈志华撰写;第6章是斜拉桥索的风致振动与抑振措施研究,由李毅佳撰写。

本书在撰写过程中得到了刘锡良先生的指导,王小盾教授也给予了大量的帮助,在此表示感谢。同时感谢同门师弟闫翔宇的鼎力相助。

限于作者水平,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015年9月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 斜拉桥的定义	1
1.2 斜拉桥结构	1
1.2.1 斜拉桥体系	1
1.2.2 斜拉索的布置	2
1.2.3 桥塔的造型	2
1.2.4 主梁形式	3
1.3 斜拉桥的历史和发展概况	4
1.3.1 斜拉桥的发展历史	4
1.3.2 斜拉桥发展的原因	6
1.3.3 斜拉桥的发展前景及发展趋势	8
1.4 摩天轮概述	9
1.5 新型斜拉桥与摩天轮复合结构	10
第 2 章 新型斜拉桥与摩天轮复合结构静动力特性	13
2.1 斜拉桥几何非线性理论	13
2.1.1 斜拉桥几何非线性问题的提出	13
2.1.2 梁柱效应	14
2.1.3 大位移效应	15
2.1.4 斜拉索垂度效应	17
2.1.5 单元刚度矩阵	18
2.1.6 非线性方程组的求解	22
2.2 新型斜拉桥与摩天轮复合结构静力分析	27
2.2.1 新型斜拉桥与摩天轮复合结构空间有限元模型	28
2.2.2 斜拉桥几何非线性分析在 ANSYS 中的实现	32

2.2.3	新型斜拉桥与摩天轮复合结构支承体系的选择	33
2.2.4	指定荷载工况下复合结构的静力几何非线性分析	37
2.3	新型斜拉桥与摩天轮复合结构动力特性分析	41
2.3.1	斜拉桥动力分析概述	41
2.3.2	结构动力特性分析有限元法	42
2.3.3	新型斜拉桥与摩天轮复合结构自振特性分析	43
第3章	新型斜拉桥与摩天轮复合结构地震响应分析	54
3.1	斜拉桥地震响应研究的发展与现状	54
3.1.1	静力法	54
3.1.2	动力反应谱法	55
3.1.3	动态时程分析法	56
3.1.4	随机振动法	57
3.2	一致性输入下的地震响应分析	57
3.2.1	斜拉桥地震响应时程分析法	58
3.2.2	地震响应时程分析在 ANSYS 中的实现	60
3.2.3	新型斜拉桥与摩天轮复合结构一致性输入地震响应分析	61
3.3	考虑行波效应下的地震响应分析	70
3.3.1	地震波输入	70
3.3.2	三向地震波一致输入下的地震响应分析	73
3.3.3	沿纵桥向考虑多点激励行波效应的结构响应分析	79
3.3.4	相位差变化对永乐桥位移和内力的影响	86
第4章	新型斜拉桥与摩天轮复合结构施工过程分析	89
4.1	斜拉桥施工过程分析概述	89
4.2	斜拉桥施工过程分析方法	90
4.2.1	前进分析法	90
4.2.2	倒退分析法	91
4.2.3	实时跟踪分析	91
4.3	新型斜拉桥与摩天轮复合结构施工过程分析	92
4.3.1	施工过程描述	92
4.3.2	施工状态 B 结构的受力分析	93

4.3.3	结果分析及改进措施	94
4.3.4	摩天轮施工过程研究	96
第 5 章	新型斜拉桥风场数值模拟与风洞试验研究	105
5.1	桥梁结构风荷载研究方法概述	105
5.1.1	现场实测	105
5.1.2	理论分析	105
5.1.3	风洞试验	105
5.1.4	数值风洞法	106
5.1.5	三种研究方法的比较	106
5.2	风场数值模拟理论基础	107
5.2.1	流场数值模拟的数学模型	108
5.2.2	$k-\epsilon$ 两方程模型	115
5.2.3	壁面函数法	118
5.2.4	微分方程的离散	118
5.2.5	SIMPLE 算法	123
5.2.6	边界条件	125
5.3	风场数值模拟	126
5.3.1	CFD 软件简介	127
5.3.2	物理模型和数学模型的选择	130
5.3.3	边界条件及壁面的处理	132
5.3.4	风场数值模拟分析结果	133
5.3.5	风洞试验风压系数结果分析	141
5.3.6	数值模拟与风洞试验比较结果	145
5.4	空气动力不稳定振动风洞试验	154
5.4.1	整体结构风力测定	155
5.4.2	倒 Y 塔架层风力系数	157
5.4.3	风洞试验结论	175
第 6 章	斜拉桥索的风致振动与抑振措施	176
6.1	斜拉索的风致振动	176
6.1.1	斜拉索振动的主要类型	176

6.1.2 风雨振的特点及形成条件	182
6.2 斜拉索的抑振措施	184
6.2.1 机械方法	185
6.2.2 空气动力学方法	189
6.3 斜拉索振动的典型事例及抑振措施	193
6.3.1 名港西大桥	193
6.3.2 柜石岛·岩黑岛桥	194
6.3.3 塔科马大桥	194
6.3.4 伯劳东纳桥	197
6.3.5 科尔布兰特桥	197
6.3.6 其他风振实例	197
6.4 永乐桥斜拉索的风致振动及抑振措施	198
参考文献	199

第 1 章 概 述

1.1 斜拉桥的定义

斜拉桥是由主梁、横向与纵向联结系、桥面、支撑部分以及斜拉索组成的承重体系,是一种以斜拉索受拉、桥塔受压、梁体受弯为特征的空间结构体系^[1]。在斜拉桥中,索、塔、梁都是承重构件,并借助斜拉索组成整体受力体系^[2]。

斜拉桥与悬索桥的区别在于:斜拉桥主梁上的荷载是通过锚固点直接传至斜拉索,而悬索桥则是经由吊索传至柔性承重索,因而两者的结构刚度有较大差别。悬索桥的承重索系锚固在桥台或台后专设的地锚上,主梁不承受轴向力,而斜拉桥主梁承受巨大的轴向力,形成偏心受压构件。斜拉桥可以进行内力调整,以获得合理的内力分布,悬索桥则不能。

1.2 斜拉桥结构

1.2.1 斜拉桥体系

按梁、塔、索三者的结合方式,斜拉桥可分为四种不同的结构体系(图 1-1),即飘浮体系(塔墩固结、塔梁分离,主梁除两端有支承,其余全部用拉索悬吊,为多跨弹性支承梁)、支承体系(塔墩固结、塔梁分离,主梁在塔墩上设置竖向

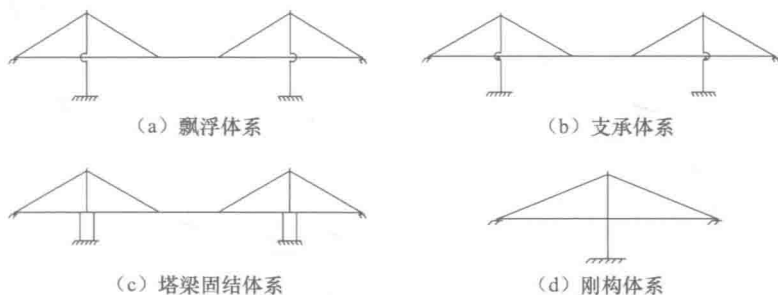


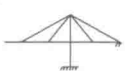
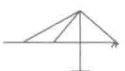
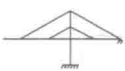
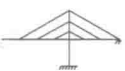
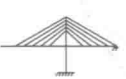
图 1-1 斜拉桥结构体系

支承,成为具有多点支承的连续梁或悬臂梁)、塔梁固结体系(塔梁固结并支承在墩上,斜拉索为弹性支承)和刚构体系(梁塔墩互为固结,形成跨度内具有多点弹性支承的刚构)。斜拉桥的主要特点是利用由桥塔引出的斜拉索作为梁跨的弹性中间支承,借以降低梁跨的截面弯矩、减小梁重影响、提高主梁的跨越能力^[3]。

1.2.2 斜拉索的布置

根据桥面的宽度以及美观要求,斜拉索分为双面索、单面索和多面索。索形应根据设计的整体构思、受力情况等因素确定,一般有辐射形、竖琴形、扇形、星形和非对称形等,见表 1-1。

表 1-1 斜拉索的布置方式

拉索形式		单索	双索	三索	多索	不对称索
1	辐射形					
2	竖琴形					
3	扇形					
4	星形					

1.2.3 桥塔的造型

桥塔的造型可简单地分为直线形塔和折线形塔。桥塔设计应满足强度、刚度、稳定等使用要求,并充分考虑施工方便、造价低及美观等要求。斜拉桥在纵桥向有单柱式、倒 Y 形和 A 字形等,如图 1-2 所示。斜拉桥横桥向索塔的形式有柱式、门式、A 字形、倒 Y 形及菱形,如图 1-3 所示。

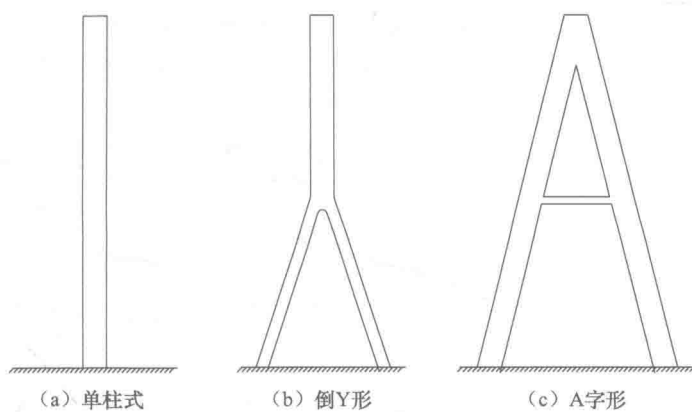


图 1-2 桥塔纵桥向布置形式

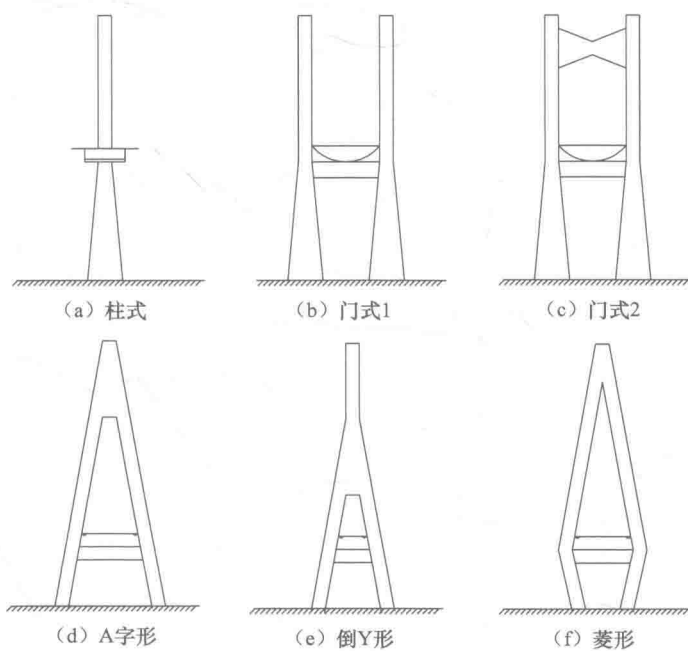


图 1-3 桥塔横桥向布置形式

1.2.4 主梁形式

斜拉桥的主梁按材料不同分为钢梁、混凝土梁及钢梁上加设混凝土桥面

板的结合梁三种,这也是钢斜拉桥、混凝土斜拉桥和结合梁斜拉桥的区别标志。而钢梁又按其结构形式分为钢桁架和实腹梁。各种钢实腹梁断面形式如图 1-4 所示。

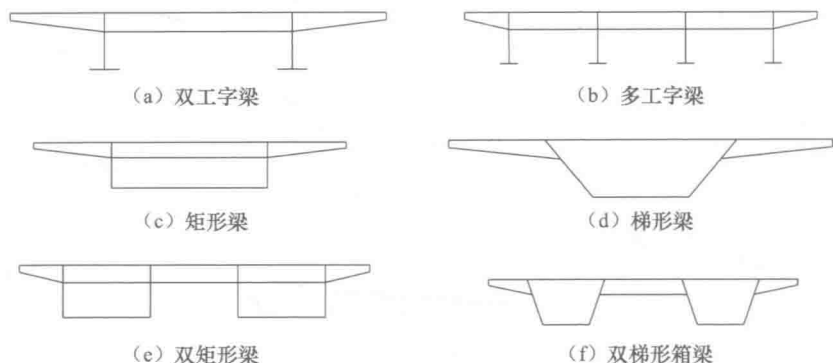


图 1-4 钢实腹梁断面形式

1.3 斜拉桥的历史和发展概况

1.3.1 斜拉桥的发展历史

斜拉桥的概念是比较古老的,老挝和爪哇很早就有原始的竹制斜拉桥,古代埃及的海船上也出现过用绳索斜拉的工作天桥。1617 年意大利人 Fraustus Verantius 设计的用铁杆铁链吊拉的桥梁,1784 年 Loscher 在德国设计的木斜拉桥,1817 年在英国出现的 King's Meadow 桥和 Dryburgh 桥,都已经初具斜拉桥的特点^[2]。当时修建的斜拉桥,由于缺乏高强度的材料,拉索易于松弛。而且对复杂的超静定结构缺乏计算手段,往往建成后不久就因整个体系松弛而造成很大的变形和破坏。随着斜拉桥事故的不断出现,当时调查这些事故的法国著名科学家 Navier 作出了悬索桥是比斜拉桥在力学上更为优越的桥型的结论。由此,直到近代斜拉桥诞生的一个世纪里,斜拉桥就不幸地被遗弃了^[4]。

20 世纪中期以后,斜拉桥的复兴是桥梁工程发展史上最伟大的成就之一。1938 年德国的工程师迪辛格尔(F. Dishinge)首先重新认识到斜拉桥结构体系的优越性,并于 1949 年发表了他的研究成果,从而为现代斜拉桥的发

展奠定了基础^[5,6]。他指出对钢斜拉索必须施加足够高的初始应力来消除斜索自重垂度带来的柔性影响,借以使梁体的变形保持在较低的范围^[2]。由于迪辛格尔等桥梁工作者的创造性工作,斜拉桥首先在德国得到发展^[3,5]。遵循迪辛格尔的思想,1955年在瑞典建成的 Stromsund 桥标志着现代斜拉桥发展的开端^[3,7]。1957年在德国 Dusseldorf 建成的 Theodor Heuss 桥巩固了现代斜拉桥的地位,被作为现代斜拉桥的早期代表作^[2]。1959年在德国 Cologne 建成的 Severvin 桥,跨径 302m,采用飘浮桥面,对斜拉桥的抗震提供了有效的控制^[1,8]。

20 世纪 60 年代初期,计算机被应用于高次超静定结构的分析,使得结构分析有了新的突破。此后,斜拉桥以其多姿多态的造型、方便的施工与竞争力在世界范围内得到了普遍推广和应用。1962 年在委内瑞拉建成的 Maracaib 桥,跨度 135m,为第一座预应力混凝土斜拉桥^[3,7]。1967 年德国波恩建成的 Friedrich-Ebert 桥,跨径 280m,为单索面的密索体系,它可使索锚固点的集中力减小,使梁体应力分布更加均匀,且易于悬臂施工,这个构思在以后许多斜拉桥设计中被遵循^[1]。1969 年在德国 Dusseldorf 建成的 Knie 桥,跨径 320m,为第一座混合式桥面系斜拉桥^[1,5,8]。1977 年法国建成的 Brotonne 桥,跨径 320m,单索面密索,整桥为混凝土结构^[1,8]。1978 年美国建成的 P-K 桥,跨径 299m,双索面密索体系,预制拼装桥面体系,预应力混凝土主梁。以上两座桥的建成,树立了混凝土斜拉桥设计的典范,对我国桥梁界影响较大^[9]。1986 年加拿大建成的 Annacis 桥,跨径 465m,该桥同印度 1987 年建成的 Second Hooghly 桥都是叠合梁斜拉桥的代表作^[10]。1988 年美国建成的 Dame Point 桥,为双塔双索面竖琴式混凝土斜拉桥,跨径 396m,Π 形主梁断面,其特点是施工时采用永久索支承挂篮,永久索与挂篮之间用临时杆联系。Π 形横断面与上述施工工艺成为当前双索面混凝土斜拉桥发展的主流^[1,9]。1991 年日本建成的 Ikuchi 桥,结合主梁,跨径 490m;同年挪威建成的 Skarnsundet 桥,跨径 530m,成为当前跨径最大的混凝土斜拉桥^[10]。

为使斜拉桥向更大跨径发展,20 世纪 90 年代出现了跨度能超越结合梁的复合梁斜拉桥^[10]。1995 年法国建成的 Normandy 桥,主跨 856m,采用结合梁形式^[5]。1999 年日本建成的 Tatara 桥,同样采用混合结构,主跨 896m,该桥为目前世界上已建成的跨度最大的斜拉桥^[11]。

我国斜拉桥的建设始于 20 世纪 70 年代。1975 年在四川省云阳县建成了中国第一座斜拉桥——云阳桥,主跨 76m;同年 10 月上海松江县的新五桥宣告建成,主跨 54m。这两座桥的建成揭开了我国斜拉桥建设的序幕^[12]。我

国在 70 年代末迎来了桥梁建设的春天,几十年的成就令世人瞩目。1980 年建成的四川省三台涪江桥,主跨 128m,为我国第一座采用预应力主梁的斜拉桥^[12]。1982 年上海建成的 200m 跨径的泖港大桥和同年稍后山东建成的 220m 跨径的济南黄河大桥在设计理论和施工技术方面均有较大突破^[12]。1987 年山东东营黄河大桥建成,主跨 288m,是当时中国唯一一座钢斜拉桥^[13];同年建成的天津永和桥,主跨 260m^[12],在该桥中首次使用了斜拉桥的施工控制技术。

进入 20 世纪 90 年代,我国斜拉桥的建设在数量、跨度、桥型、结构体系等方面都进入了一个新的发展高潮。一些斜拉桥,如上海南浦大桥、湖北郧阳汉江大桥、铜陵长江大桥、重庆长江二桥、上海徐浦大桥、香港汀九大桥、汕头磐石大桥等主跨都超过了 400m。1993 年建成的主跨 602m 的杨浦大桥,是当时世界上跨径最大的斜拉桥^[1]。2000 年 9 月武汉白沙洲长江大桥正式通车,为双塔双索面钢-混凝土混合型飘浮体系斜拉桥,主跨 618m,居世界斜拉桥跨度第四位。2001 年 3 月南京长江二桥建成通车,其南汉大桥钢箱梁主跨达到 628m,居世界斜拉桥跨度的第三位。2001 年建成的湖南岳阳洞庭湖多跨斜拉桥,主桥跨径组成为 130+2×310+130(m),三塔,主梁采用肋板式断面,飘浮体系,拉索为扇形双斜面索,索塔采用钻石形空心塔。2002 年建成的湖北荆沙长江大桥为主跨 500m 的双塔双索面扇形布置拉索的预应力混凝土斜拉桥,主梁采用预应力混凝土结构,主塔为 H 形预应力混凝土结构。香港于 2008 年建成的昂船洲大桥,其桥面主跨 1018m,桥塔高 290m,首次突破跨度 1000m 的大关。同年建成的苏通大桥主跨跨径达到 1088m,是世界第二大跨径的斜拉桥(截至 2013 年,最大斜拉桥主跨是俄罗斯的跨东博斯鲁斯海峡的俄罗斯岛大桥,其主跨 1104m);主塔高度达到 300.4m,为世界第二高的桥塔(第一高桥塔为俄罗斯的跨东博斯鲁斯海峡的俄罗斯岛大桥,其桥塔高超过 320m);主桥两个主墩基础分别采用 131 根直径 2.5~2.85m、长约 120m 的灌注桩,是世界最大规模的群桩基础;主桥最长的斜拉索长达 577m,也是世界最长的斜拉索。

我国至今已建成各种类型的斜拉桥 100 多座,其中有 50 余座跨径大于 200m。我国已成为拥有斜拉桥最多的国家,在世界十大著名斜拉桥排名榜上,中国有 7 座,尤其是苏通长江大桥主跨 1088m,为世界斜拉桥第二跨。由此可见,我国的斜拉桥建设已在世界桥梁界中占据了重要的地位^[14]。

1.3.2 斜拉桥发展的原因

现代斜拉桥的发展虽然起步较晚,但由于它的经济性,斜拉桥在国内外都

得到迅速发展,修建范围遍及世界 30 多个国家,修建数量急剧增加,跨径纪录也被不断刷新。现代斜拉桥在 200~800m 的跨度范围内已经显示出极大的优越性,成为大跨度桥梁的主要桥型之一,并促使悬索桥向更大跨度范围发展^[14,15]。2013 年世界前十位大跨度斜拉桥(截至 2012 年 8 月)如表 1-2 所示。

表 1-2 世界大跨度斜拉桥一览表

排位	桥名	国家	主跨/m	建成年份
1	俄罗斯岛大桥	俄罗斯	1104	2012
2	苏通大桥	中国	1088	2008
3	香港昂船洲大桥	中国	1018	2008
4	鄂东长江大桥	中国	926	2010
5	多多罗大桥	日本	890	1999
6	诺曼底大桥	法国	856	1995
7	南京长江三桥南汉桥	中国	648	2005
8	南京长江二桥南汉桥	中国	628	2001
9	武汉白沙洲长江大桥	中国	618	2000
10	福州青州闽江大桥	中国	618	2000

斜拉桥之所以得到迅速的发展,原因可综合如下。

(1) 考虑非线性影响的超静定结构计算理论的发展。这种理论便于计算机计算,当其用于斜拉桥时不仅能正确进行结构设计计算,还能精确地进行施工过程分析和控制。

(2) 轻型桥面结构的发展^[16]。以前的桥面结构是在纵梁上铺设桥面板,而纵梁由联结于主梁的横梁支承。因为假定纵梁和横梁各自独立起作用,所以必须有一个或两个纵向联结系以承受横向力。这种上部结构形式对斜拉桥是不合适的。1936 年德国采用正交异性板作为主梁的上翼缘和桥面系,但当时还未解决焊接的翘曲问题,后来由于焊接技术的进步,最主要的是自动焊接的进步,使正交异性板获得了成功。经过长期研究之后,现在正交异性板的设计计算及制造方法都达到了相当高的水平,给钢斜拉桥的发展创造了条件。这是因为正交异性板不但能作为主梁及横梁的上翼缘,而且能作为承受风力的横向杆件。这种使用正交异性板的桥梁比以往纵向联结系的结构具有更高的横向刚性,即使对于大跨度的斜拉桥,为了平衡钢索的水平分力,也不需要另外增加材料。

(3) 上部结构是连续的。斜拉桥的上部结构在塔及跨中多是连续的,这样即使地质条件不好,也可以采用斜拉桥这种连续梁结构。

(4) 高强度缆索和高疲劳强度锚具的发展。斜拉桥的刚度主要取决于斜拉索的刚度,而斜拉索的变形不但受斜拉索断面及弹性模量的影响,还受垂度的影响。而考虑垂度的钢索刚度与钢索应力的三次方成比例,所以斜拉桥的钢索必须使用高强度钢材。另外,斜拉桥由活荷载产生的应力变化比悬索桥大,因此发展具有高疲劳强度的锚具对斜拉桥是很必要的。

(5) 模型试验技术的发展。由于斜拉桥是高次超静定结构,且某些部位(如斜拉索的锚固区、塔梁连接部位等)应力分布又较复杂,所以常常依靠各种静、动模型试验来探求其设计参数和验证设计的安全性,可根据静力模型试验研究桥梁结构构件的应力传递;根据动力模型试验和风洞试验摸索其动力特性及抗地震、抗风振的能力;根据疲劳试验,研究构件和锚固系统的疲劳强度;根据光弹性模型试验决定锚固区的应力分布。

1.3.3 斜拉桥的发展前景及发展趋势

由于斜拉桥本身特有的优越性,斜拉桥将继续是大跨度桥梁的主要竞争桥型。由表 1-2 可见,对于 200~900m 的跨度范围,斜拉桥将保有其全部价值并极具发展潜力。正如 Rene Walther 指出,预应力混凝土加劲梁比较经济的跨度为 500~600m,叠(混)合梁可达 800m 甚至更大^[17]。Leonhardt 认为,即使跨度达 1300m,斜拉桥也是有效的利用形式。林元培也指出,根据目前的理论水平、材料水平和工艺水平,建造一座跨度在 1600m 的斜拉桥也是非常现实的^[1]。意大利已经为跨越 Messina 海峡设计了一座钢斜拉桥方案,主跨为 1800m,结构上并未遇到任何困难^[15]。而对于跨径直至 2000m 的斜拉桥,采用传统的结构体系来设计和修建被证明仍然是可能的和安全的。Muller 国际公司提出双锚索斜拉桥的新构思,认为据此可使斜拉桥的跨径突破 3000m^[8]。

从 1955 年瑞典建成第一座现代斜拉桥——Stromsund 桥至今,斜拉桥在短短的半个多世纪中取得了令人瞩目的辉煌成就;结构不断趋于轻型化;从初期的钢斜拉桥发展为混凝土和钢与混凝土的组合、复合斜拉桥;跨径不断增大^[18]。相信今后随着交通运输、科学技术和建筑材料的发展,大跨径和超大跨径斜拉桥将得到广泛应用,其发展前景将十分广阔。

今后斜拉桥的发展趋势主要有以下几个方面。

(1) 跨径不断增大,将刷新一个又一个跨度纪录。

- (2) 结构类型多样化。
- (3) 桥面轻巧化。
- (4) 斜拉索防腐保护的研究,以延长斜拉索的使用寿命。
- (5) 注重结构的动力性能分析,包括风振分析和抗震分析。
- (6) 施工阶段分析及控制,注重索力调整、施工观测与控制。
- (7) 注重桥塔功能的利用。

1.4 摩天轮概述

摩天轮又称巨型观览车,英文名字为 Giant Wheel,是一种在圆盘的周圈装上载客的轿厢,绕水平轴慢速回转的游乐设备。最初关于摩天轮的记载是18世纪初,在俄罗斯的一个公园里,人们架起一个织网,使它旋转,这可以说是摩天轮的原型。19世纪末,摩天轮开始采用钢结构并用电气驱动。世界上第一个真正意义上的现代摩天轮是在1893年由美国桥梁和隧道工程师 George Ferris 在芝加哥世界博览会上为纪念哥伦布发现美洲大陆400周年而建立的,直径约76.2m,座舱36个,每个座舱容纳60人,采用的结构为轮辐式,在轮中间有一圈环形桁架杆,整个结构支承在连接两个近似A形的塔柱的轮轴上,如图1-5所示。



图 1-5 第一个现代大型摩天轮

自1893年芝加哥出现第一台大型摩天轮以来,在世界范围内掀起了建造摩天轮的高潮。1894年,英国建起了直径84m的摩天轮。1907年,日本开始建造摩天轮,用于在东京召开的劝业博览会,高度约为40m。1970年在大阪万博会上建成了直径45m的摩天轮。1989年,在横滨建成了高度105m的摩