

中国现代公路桥梁技术丛书

斜拉桥结构发展和中国经验

王伯惠 编著

(上册)

(索桥类)



人民交通出版社

中国现代公路桥梁技术丛书

斜拉桥结构发展和中国经验

上 册

王伯惠 编著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书主要介绍斜拉桥的结构和发展,本书上册共分为8章,其主要内容分别为:斜拉桥结构的基本情况,斜拉桥的4种基本结构体系,索塔形式斜拉桥的发展,斜拉桥主梁的新形式,刚性索的发展系列,斜拉桥与其他桥型的协作,斜拉桥跨径的发展,以及国内外桥梁工作者提出的属于斜拉体系的新型桥结构。

本书在介绍各个桥例的情况时,着重在其创新的构思和概念以及一些特殊细节的设计和方面,希望对桥梁设计者能有所启发和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

斜拉桥结构发展和中国经验. 上册 / 王伯惠编著.
北京: 人民交通出版社, 2003
ISBN 7 - 114 - 04663 - 4

I. 斜… II. 王… III. 斜拉桥. 桥梁结构
IV.U448.273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 029146 号

中国现代公路桥梁技术丛书

Xielaqiao Jiegou Fazhan He Zhongguo Jingyan

斜拉桥结构发展和中国经验

上 册

王伯惠 编著

正文设计: 彭小秋 责任校对: 尹 静 责任印制: 张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京明十三陵印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 32.5 字数: 814 千

2003 年 9 月 第 1 版

2003 年 9 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—3000 册 定价: 65.00 元

ISBN 7-114-04663-4

《中国现代公路桥梁技术丛书》
编辑委员会名单

主 编：	陈明宪	上官兴			
编 委：	王伯惠	张继尧	楼庄鸿	彭宝华	经德良
	张联燕	郑明珠	李文琪	高征铨	胡崇武
	田克平	欧阳效勇	吴建华	董 荧	张征宇
编辑组：	吴同鳌	李晚成	郑荫藩	李 葵	

序

改革开放以来,随着我国经济的蓬勃发展,公路包括高速公路的建设突飞猛进,桥梁建设也取得了十分辉煌的成果,在梁桥、拱桥以及大跨径斜拉桥、悬索桥等各方面都积累了许多宝贵的、创新的经验,其中不少技术居于世界前列。及时总结和交流这些新技术、新经验,对桥梁技术革新、提高质量、降低成本、加快进度必将起着很大的帮助和推动作用。为此,我们编写了《中国现代公路桥梁技术丛书》,该套丛书具有如下特点:

1. 以我国桥梁自己的经验和创新为主,着重反映我国当代桥梁建设的水平;
2. 每个技术专题一册,详细介绍有关设计、施工的具体细节,以便运用和推广;
3. 邀请亲自在桥梁建设第一线参加设计、施工、科研的技术工作者执笔编写,充分利用有关的第一手资料,使内容更加新颖、翔实。

该套丛书计划编写三十余个分册,即将陆续出版,以后随着桥梁建设的不断发展,将继续组织其他专题出版。

《中国现代公路桥梁技术丛书》编委会

前 言

斜拉桥是一种古老而又年轻的桥型结构。自 1956 年建成的瑞典 Strömsund 桥以来,现代斜拉桥已有 50 年历史,已遍布全世界,结构形式日新月异,丰富多采。中国自 1975 年建成四川云阳桥以来,已建成各式各样斜拉桥 190 余座,设计施工经验十分丰富。尤其近 10 年来,更向特大跨径发展,主跨即将超过 1000m 级,形势十分喜人。

国内目前已经出版的由国人编著和翻译国外的斜拉桥专著已有六、七种,对于其一般构造、设计和施工方法等皆已叙述甚详,本书则拟专门从结构学的角度全面而系统地讨论这种桥型的结构发展并介绍中国的经验与失误。

本书上册即着重讨论斜拉桥的结构和发展,共分 8 章。第一章介绍斜拉桥结构的基本情况。第二章讨论斜拉桥的 4 种基本结构体系。第三章讨论索塔型式的发展,包括独塔、斜塔、独斜塔、多塔、高低塔、低塔等各种塔型的斜拉桥,以及近期出现的若干新塔型。第四章讨论主梁的新型式,包括弯、坡、斜斜拉桥以及降低主梁重量的各种措施和新梁型。第五章讨论刚性索发展系列,包括板拉桥、鱼鳍梁桥、斜拉桁架桥等。第六章讨论斜拉与其他桥型的协作,包括与简支梁桥、斜撑桥、连续梁桥、连续刚构桥、T 构桥、拱桥、悬索桥、反拉索桥等的协作。第七章讨论斜拉桥跨径的发展,包括向 50m 以下小跨径和 1000m 以上特大跨径的发展问题。第八章则介绍一些国内外桥梁工作者曾经提出过的属于斜拉体系的新桥型结构。

本书资料收集截止到 2000 年。国内、外资料繁多,要全面系统整理这些资料,工作更为繁重。在介绍各个桥例的情况时,着重在其创新的构思和概念以及一些特殊细节的设计和处理方面,希望对桥梁设计者能有所启发和借鉴。资料收集很难全面,叙述也常会挂一漏万,不足之处尚希读者指正。

特别应当感谢的是铁道部大桥局的严国敏学长,他提供给作者大量有关斜拉桥的翻译资料。不幸的是他在完成他的巨著《现代斜拉桥》一书之后不久即仙逝。本书的完成也有他的许多贡献。

作者

目 录

第一章 斜拉结构和斜拉桥	1
第一节 斜拉——一种常见的结构支承方式	1
第二节 斜拉桥——一种古老而年轻的桥型结构	3
第三节 斜拉桥技术发展的四个时代	5
第四节 斜拉桥的主体结构(一) 索塔	10
第五节 斜拉桥的主体结构(二) 主梁	16
第六节 斜拉桥的主体结构(三) 拉索	46
主要参考文献	68
第二章 斜拉桥的结构体系和尺寸优化	70
第一节 四种基本结构体系	70
第二节 一些结构措施的作用	80
第三节 斜拉桥结构尺寸优选	87
主要参考文献	100
第三章 斜拉桥的发展(一) 索塔的布局	101
第一节 独塔斜拉桥	101
第二节 斜塔斜拉桥	113
第三节 独斜塔半索面斜拉桥	123
第四节 多塔斜拉桥	137
第五节 高低塔斜拉桥	155
第六节 低塔斜拉桥	161
第七节 一些新塔型	177
主要参考文献	186
第四章 斜拉桥的发展(二) 主梁的新型式	189
第一节 主梁适应路线线形(一) 弯斜拉桥	189
第二节 主梁适应路线线形(二) 斜拉斜桥	208
第三节 主梁适应路线线形(三) 多肢斜拉桥	211
第四节 主梁轻型化(一) 箱梁的改进	211
第五节 主梁轻型化(二) 梁板式截面的革新	231
第六节 主梁轻型化(三) 从平面桁架到空间桁架	241
第七节 其他新的主梁截面型式	250
主要参考文献	253
第五章 斜拉桥的发展(三) 刚性索系列	255
第一节 概述	255
第二节 刚性索	257

第三节	板拉桥	273
第四节	多幅板拉桥	290
第五节	鱼鳍梁桥	293
第六节	斜拉桁架桥	297
	主要参考文献	313
第六章	斜拉桥的发展(四) 与其他桥型的协作	315
第一节	斜拉桥与简支梁桥相协作	315
第二节	斜拉桥与斜撑桥相协作	317
第三节	斜拉—连续梁协作桥	320
第四节	斜拉—连续刚构协作桥	332
第五节	斜拉—T 构协作桥	339
第六节	斜拉桥与拱桥相协作	341
第七节	斜拉—悬索协作桥	353
第八节	斜拉桥与“反拉索桥”相协作	366
	主要参考文献	378
第七章	斜拉桥的发展(五) 跨径的发展	381
第一节	斜拉桥向小跨径的发展	381
第二节	斜拉桥向特大跨径的发展	388
	主要参考文献	491
第八章	斜拉新结构构思	494
第一节	V 型架斜拉桥	494
第二节	网架斜拉桥	495
第三节	多重塔索斜拉桥	499
第四节	索桁桥	500
第五节	反拉索桥	503
第六节	索托桥	504
	主要参考文献	509

第一章 斜拉结构和斜拉桥

第一节 斜拉——一种常见的结构支承方式

斜拉是一种常见的结构支承方式。一个物体不是从下面用强劲的支撑来支承而是从上面用柔软的拉索来吊住,在生活中也是常见的,图 1-1 所示为一般民间旧式住房的木窗户,当打开窗户时,图 1-1a)是在下面用一根木棍来斜支住,而图 1-1b)则是在上面用一根绳子来斜拉住,这一支一拉、一下一上,就产生了显然不同的差别,主要是:

- (1) 支撑杆件要承受压力,须用适当的抗压材料,而拉吊杆件承受拉力,须用适当的抗拉材料;
- (2) 支撑杆件要占用结构的下部空间,而拉吊杆件要占用结构的上部空间。
- (3) 从下斜撑时结构本身要承受一定的水平拉力,而从下斜拉时则要承受一定的水平压力。

在日常生活和生产中利用斜拉结构的例子十分普遍。

由于受压的长支撑杆件存在压屈问题,必须加大截面或降低使用强度,而受拉杆件则无此问题,因此采用长大的拉索杆件经常能得出轻型经济、美观简洁的结构,尤其现代工业能提供高强的钢丝之后,拉索结构蓬勃发展,现在已经形成了一种新型的拉索结构体系,在技术、经济、美学上都取得了突出的成就。

图 1-2 所示是房屋建筑方面的一些例子:

图 1-2a)为我国内蒙呼和浩特民航机库,大跨钢架屋盖用斜拉索加劲;

图 1-2b)为我国沪杭高速公路枫泾收费站,两个对称的斜塔斜拉。屋盖显示了特殊而新颖的造型。

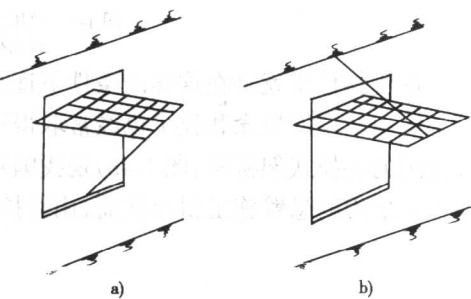


图 1-1 民间木楼房窗户的开启方式
a)斜撑式;b)斜拉式

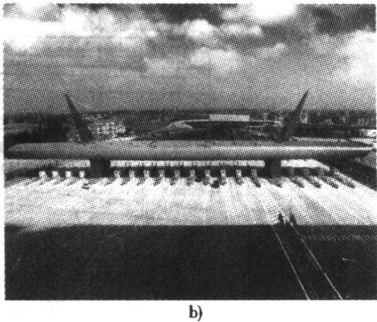
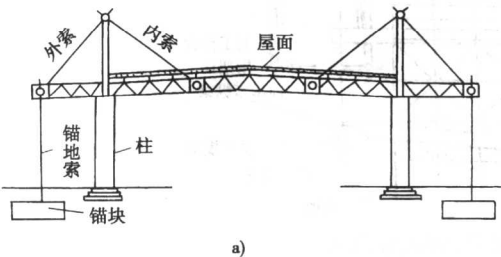


图 1-2 一些斜拉房屋建筑实例

a)我国内蒙呼和浩特民航机库;b)我国沪杭高速公路枫泾收费站

图 1-3 所示是桥梁和建筑施工中经常使用的大型起重设备浮吊和伸臂吊机,依靠几根纤细的拉索来平衡成百上千吨起吊重量。

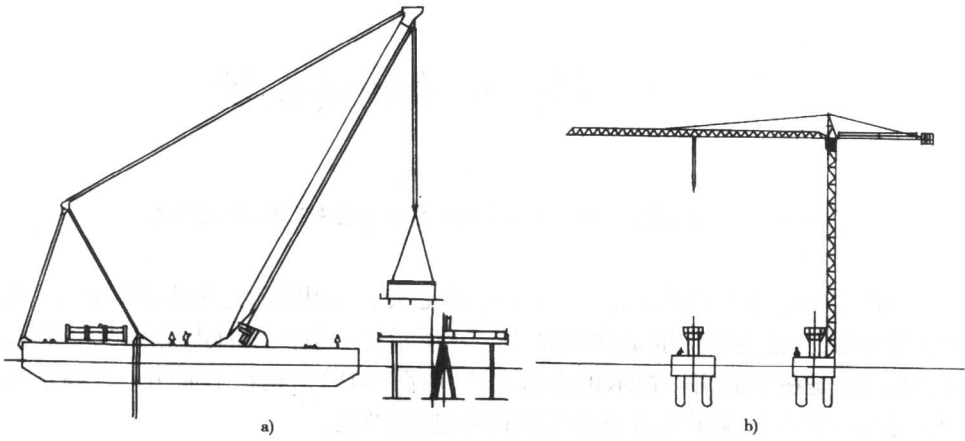


图 1-3 常用大型起重设备中斜拉索的作用
a)大型浮吊;b)伸臂起重機

现代斜拉桥就是在这样的条件下逐步发展和成熟起来的。不但桥梁本身,即使一些施工设备运用斜拉的概念和技术也经常取得可喜的技术经济效果。图 1-4a)所示是科威特 Bubiyan 桥使用的斜拉式架桥机,图 1-4b)是我国郑州产斜拉式架桥机,用于 50mT 梁安装;图 1-4c)是我国常有采用的悬臂施工斜拉挂篮,用斜拉结构使这些设备重量极度减轻。

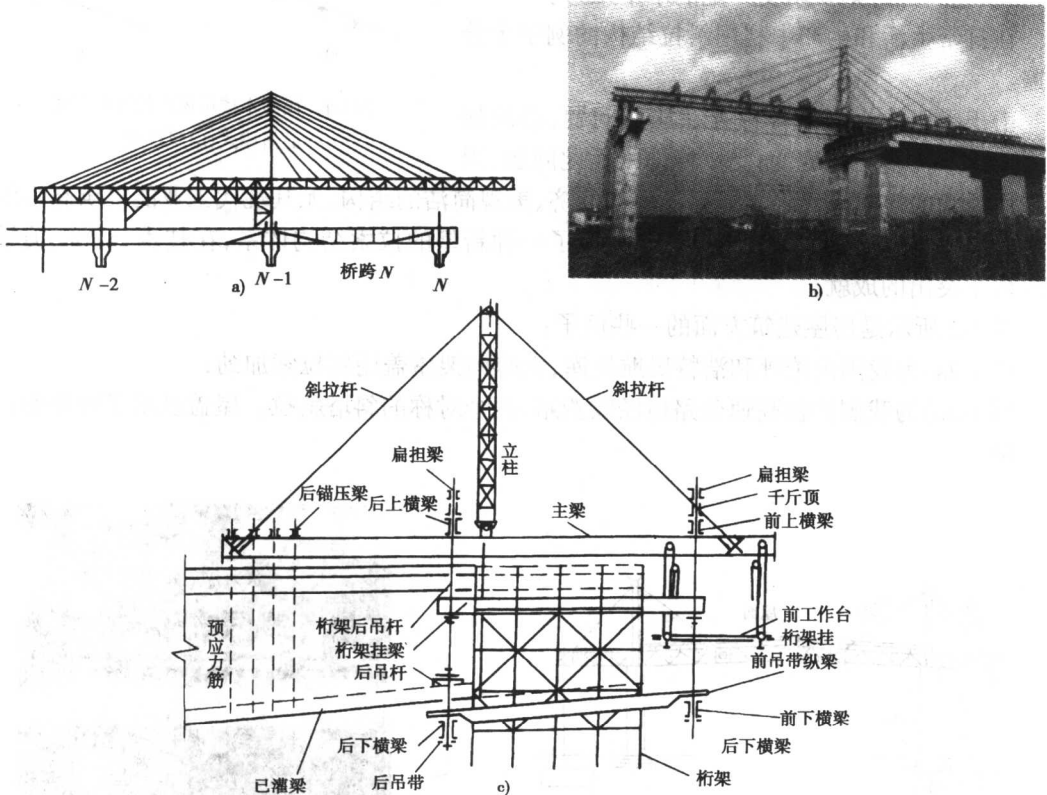


图 1-4 桥梁施工临时设备,采用斜拉结构

a)科威特 Bubiyan 桥斜拉式架桥机;b)我国郑州产斜拉式架桥机(用于江阴长江大桥 50mT 梁安装);c)我国常用桥梁悬臂施工挂篮

第二节 斜拉桥——一种古老而年轻的桥型结构

桥梁为了扩大跨径或减少水中基础等原因,自古常有采用斜撑式的,如普通的木梁桥(图 1-5a),这为人们所熟知。将下面的斜撑转移到上面作成斜拉(图 1-5b),则比较少见,主要原因是缺乏强有力而变形又小的拉索材料。但是,古代通行行人、马等轻型荷载的斜拉结构桥梁,世界各地颇不少见。在亚洲的老挝、爪哇皆有发现用藤条和竹子架设的斜拉结构人行桥。^[1]

在我国古代,用藤和竹多建成吊桥型式,还未发现斜拉型式,但我国古代战争期间在城墙外面的护城河上架设的可以开启的桥梁应属于斜拉式,古典小说《三国演义》中的插图,也显示了这种桥型。敌人进攻期间可以通过拉索和铰链把桥悬吊起来,阻止敌人渡过护城河进攻城楼,而需要时则可将桥放平以利己方人员出入。

在 18 世纪,德国人就曾提出过木制斜张桥的方案,1817 年英国架成了一座跨径 34m 的人行木制斜张桥,桥塔是铸铁的,缆索使用铁丝。以后英、法、德等国都曾修建过一些木制斜张桥,但不久都毁坏了,主要原因是限于当时的工业水平,缆索只能用铁丝或铁丝网,还没有高强度钢丝,同时限于当时的理论水平,还不能计算这种多次超静定结构。1824 年,英国在 Nienburg 跨越 Saale 河修了一座用铁链条和铸铁杆作拉索的斜拉桥,跨径 78m(图 1-6)。荷载试验时已证实该桥太弱,致使仍需依靠施工支架支持,后来给予了加固,但一年以后,由于一次火炬游行致使倒坍,造成 50 人丧生,在当时是一大悲剧。1818 年修建的一座人行桥,跨径 79m,铁链斜

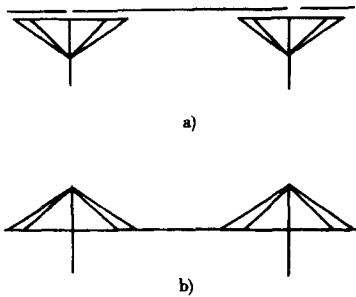


图 1-5 斜撑桥和斜拉桥
a)斜撑桥;b)斜拉桥

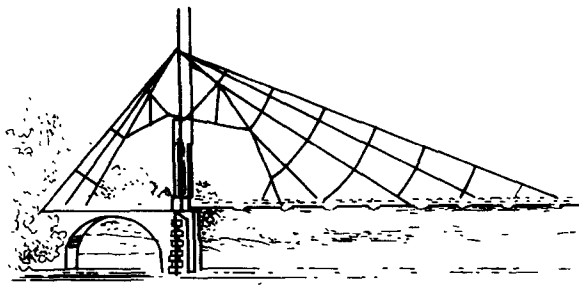


图 1-6 英国 Nienburg 的 Saale 河桥(1824)
(铁链条和铸铁杆作拉索的斜拉桥,跨径 78m,1824 年建成,1825 年在一次游行时倒坍)

拉,也毁于风振。因此,1930 年一位法国著名的工程师 Navier 在研究了这些桥的事故之后,著文声称斜拉桥概念是模糊不清的,是不能成立的,并宣布了斜拉桥的死刑。Navier 认为毁坏的原因是由于没有精确计算力的变化过程,同时对一些细节考虑不周。他构思的方案是用悬索桥和斜拉桥相互结合的方案,这种型式早在 1855 年美国的 Roebling 就曾采用来建成了几座出名的大桥,如图 1-7 所示的型式,其中最著名者为纽约的 Brooklyn 桥,跨径 286m + 486m + 284m,为当时世界上最大跨径的桥梁。

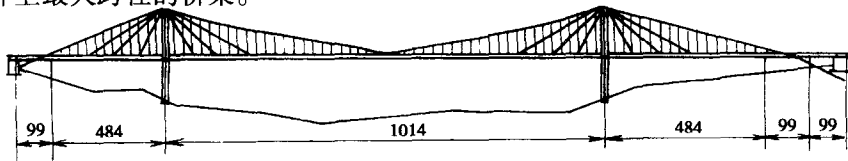


图 1-7 美国 Roebling 体系:悬索与斜拉混合

1938 年,德国的 Dischinger 采用了 Navier 的意见设计了在汉堡跨易北河的一座铁路桥,如图 1-8 所示。这里悬索部分与斜拉部分清楚分开而相互连接。

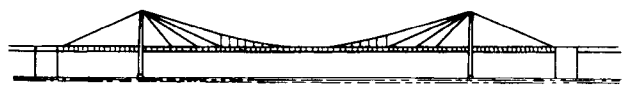


图 1-8 德国 Dischinger 体系:悬索与斜拉连接

如果说前述那些早期毁坏的斜拉桥是由于“没精确计算力的变化过程”的话,则图 1-7 和 1-8 两种悬索 + 斜拉结构超静定次数更高,更难计算。实际上那些“链条 + 木桥面”的那种老式的斜拉桥,由于链条难于拉紧,垂度很大,在荷载下发生很大的变形,主梁出现很大的二次应力,超过其承载能力的极限,这是毁坏的主因。

另外,悬索 + 斜拉结构除了计算之外,建筑时还需两种设备、两种工艺,未必是经济合理的。

直到第二次世界大战之后,1955 年,Dischinger 设计建成了世界上第一座现代化的大跨斜拉桥:瑞典的 Strömsund 桥,主跨 182.6m,如图 1-9 所示。这里放弃了他原先在 1930 年提出的如图 1-8 所示的悬索 + 斜拉的观点,而全部采用斜拉结构。主梁为钢板梁,中间用横梁连接,双塔式,每塔只用了两对高强钢丝拉索,梁上索距 35m 左右,梁高 3.25m 为跨径的 1/56,塔高 28m 为跨径的 1/6.5。

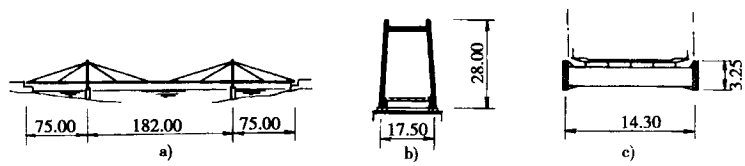


图 1-9 瑞典的 Strömsund 桥(德 Dischinger, 1955)——世界第一座现代化斜拉桥

a)侧视图;b)索塔正视图;c)主梁横截面

这座桥从现代的观点来看虽然在细节上尚有一些不足之处,如桥面采用分离的混凝土梁方案,索塔造型尚欠美观等,但在桥梁结构上却是开创了一个新纪元,创造了一个新体系,其主要优点是显而易见的:

- (1)用少量几根拉索就可取代河中深水桥墩,不但节省费用、减少施工困难,而且提供很大的跨径,便于通航和排洪;
- (2)主梁由于有了拉索作中间弹性支承,虽然跨径很大而梁高却可以减小,不但主梁本身以及两端引桥皆得以降低造价;
- (3)拉索自锚于梁上,梁身能得到免费的预压应力,在很多情况下,尤其对于中等跨径桥梁是有利的,和悬索桥相比还可节省庞大而昂贵的地锚;
- (4)拉索和塔、梁组成多个三角形结构,稳定性高,刚度大,静、动力性能皆良好;
- (5)整体结构新颖,造型宏伟美观。

这时,正值德国战后恢复重建时期,这样一种技术先进、造价经济、外形美观的新桥型一出现,立即得到社会的欣赏和认识,并大量进行推广,从 Strömsund 桥建成的第二年起即建成了杜塞尔多夫的 Theoder Heuss 桥等诸多有名的斜拉桥,平均约每年完成一座。这些桥大多采用当时开始盛行的轻型钢结构正交异性桥面,而各桥无一座相同,不仅外形各异,而且技术构思上亦互有区别。在这个过程,斜拉桥在世界各地也逐渐广泛流行起来。

现代斜拉桥之所以能够成功建造和广泛流行,主要由于下述客观条件:

- (1)高强度、高弹性模量钢丝的生产,用以制造斜拉索能确保结构的承载能力且不发生过大的变形;
- (2)有限单元法和计算机技术的开发,能可靠地分析高次超静定结构的整体和局部内力;
- (3)平衡悬臂施工工艺的开发,使在深水大河情况下由索塔向两侧无支架悬臂施工成为简便易行。

因此,一般认为,某个地区或国家能否用自己的力量设计和施工斜拉桥,可以成为该地区或国家建桥技术水平的一个标志。如果能自力更生修建斜拉桥,就说明能自己生产高强钢丝,掌握计算机设计技术和悬臂法施工工艺,建桥技术就已达到先进的现代化水平。

在我国,1975 年开始修建斜拉桥——四川云阳试验桥以来及今 25 年间已建成约 190 余座,几乎遍及全国各省、市、自治区,而世界其他国家则估计约在 350 座以上,其发展的势头是十分兴盛的。

第三节 斜拉桥技术发展的四个时代

1. 第一代斜拉桥:稀索体系

斜拉桥刚出现的时候,斜拉索布置得比较少,例如 Strömsund 桥,跨径 182.6m,每塔只布置 2 对索,梁上索距达 35m。有些设计,如意大利 Morandi 教授设计的多座连孔混凝土斜拉桥,虽然混凝土梁较重,而每塔只布置一对索,如图 1-10 所示。索少的缺点是梁的无支承长度很长,梁高须很大,同时仅有的几根索,索力很大,在梁上锚固点处的应力集中问题突出,较难处理。在以后设计的一些桥,逐步将拉索增多,但梁上索距一般还保留在 15~20m 左右,一般认为这是第一代斜拉桥:稀索体系。

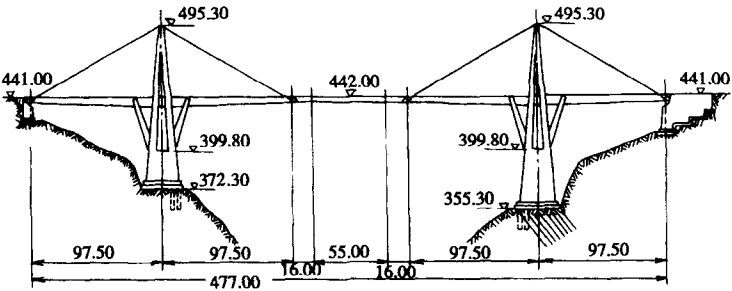


图 1-10 Morandi 体系斜拉桥示例——利比亚 Wadi kuf 桥 (L = 282m, 1972)

2. 第二代斜拉桥:密索体系

德国 F. Leonhardt 和 Homberg 等专家研究和倡导了把拉索加密的问题,终于在 1972 年 Finsterwald 在设计法兰克福的 Höchst 化工厂的第二 Mein 河桥时实现了这个意愿,该桥构造如图 1-11 所示,主跨 148.23m,独塔 13 对索,梁上索距减小到 6.3m,第一次降到 10m 以下。这座桥要求通过专线铁路、输油管路和 6 个汽车道,桥面总宽 30.95m,主梁为混凝箱形截面,高仅 2.6m。密索的主要优点十分显著:

- (1)可降低梁高、减轻梁重,相应可少用拉索,降低墩台、基础工程量;
- (2)简化斜拉索锚固装置,消除锚固点应力集中现象;
- (3)按索距(或一半索距)布置悬臂施工节段,能全面采用悬臂施工工艺,无需支架(如 Morandi 体系一般需支架施工);
- (4)加强了整体结构的抗风稳定性。

人们把这种构造称为密索体系,认为是第二代斜拉桥结构。这之后,密索体系广泛流行,稀索者则极为少见。目前,一般混凝土梁以索距 10m 以内称为密索,而钢梁则以 20m 以内称为密索。

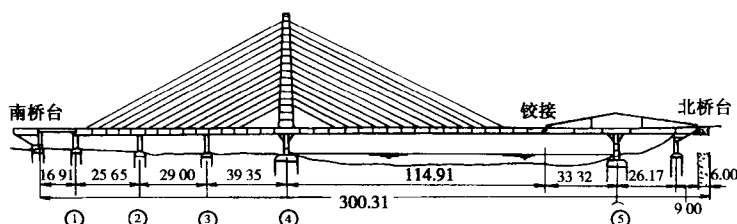


图 1-11 德国 Höchst 化工厂第 2 Mein 河桥
(第一座密索体系斜拉桥,主跨 148.23m,混凝土主梁索距 6.3m)

3. 第三代斜拉桥:主梁柔薄化

拉索加密以后,主梁支承间距(索距)缩短,主梁高度自然可以减低,人们常把梁高和跨径之比作为一个指标来显示主梁的柔度。第一座现代斜拉桥 Strömsund 的高跨比为 1/56,在稀索时代这个比例很少小于 1/100,而密索时代这个比例就急剧减小了,对于混凝土梁,梁高减小对于降低恒载重量尤有重要意义,下面是一些较著名的例子:

美国 East Huntington 桥,1985 年建成,独塔主跨 274.32m,梁板式主梁高为 1.52m,高跨比 1/180,如为双塔式,可达 1/280;为德国 Leonhardt 设计;

美国 Dame Point 桥,1988 年建成,双塔主跨 396.24m,梁板式主梁高 1.524m,高跨比 1/260;

挪威 Skarnsundet 桥,1991 年建成,双塔主跨 530m,为当前世界最大跨径混凝土斜拉桥,三角形主梁高 2.15m,高跨比 1/247;

我国湖北荆沙长江大桥,2001 年建成,双塔主跨 500m,为当前世界第二大跨径混凝土斜拉桥,梁板式主梁高 2.4m,高跨比 1/208;

挪威 Helgeland 桥,1991 年建成,双塔主跨 425m,梁板式主梁高 1.2m,高跨比 1/354,为当前世界斜拉桥最小的梁跨比;

我国香港昂船洲桥 2000 年设计招标,2003 年开工,主跨 1018m,钢箱主梁高 3.2m,高跨比 1/318。

上述各桥详细情况在第四章第五节中有详细介绍,综观可见,当前斜拉桥主梁日趋柔薄化,主梁高跨比视跨径大小、主梁材料和结构形式、单、双索面等在 1/150 ~ 1/300 之间变化,甚至更低。这是第三代斜拉桥的主要特征。

随着拉索的加密,研究认为可以把斜拉桥比拟为弹性地基上的连续梁,主梁活载应力在截面面积相同情况下与梁高无关,而主要取决于主梁形状系数 $\frac{c}{r}$ 值(c 为主梁截面最外纤维到中性轴距离, r 为截面回转半径,详见第四章第五节)。主梁越柔薄,越能少吸收活载引起的弯矩,因此又进一步发展了混凝土薄板式主梁,已有的型式见表 1-1。

斜拉桥主梁向薄板式的发展

表 1-1

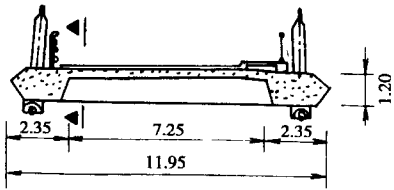
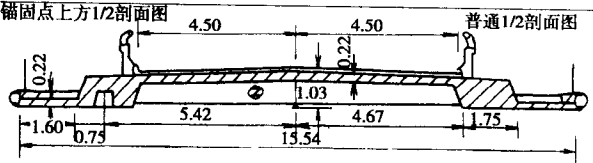
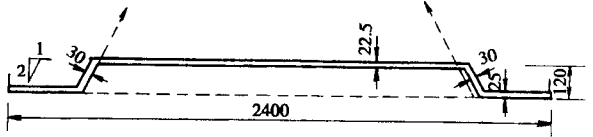
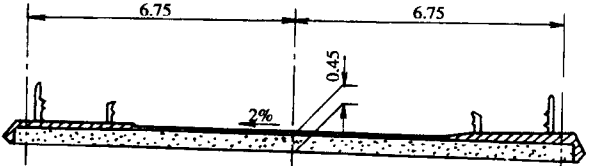
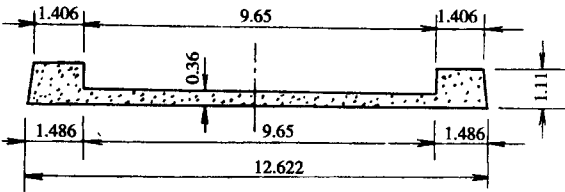
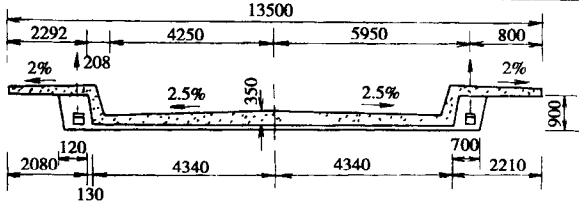
编号	桥名	建成年	主跨(m)	梁高: 跨径	薄板式主梁截面
1	挪威 Helgeland	1991	425	$\frac{1}{354}$	
2	法国 Chalon Saône	1992	151.8	$\frac{1}{147}$	
3	美国 East Fork White River	1999	197	$\frac{1}{164}$	
4	希腊 Evripos	1999	215	$\frac{1}{478}$	
5	加拿大 ALRT	1991	340	$\frac{1}{306}$	
6	玻利维亚 Santa Rosa	1994	131.06	$\frac{1}{146}$	

表 1-1 中,1 为常规的梁板式前述,挪威的 Helgeland 桥高跨比已达 1/354;

2 为梁板式两侧加下翼缘悬臂人行道,又称覆盆式;

3 为将 2 的两侧边梁也减薄,板厚仅 22.5 ~ 30cm,又称草帽式;

4 为一块单纯的薄板,厚仅 45cm,Leonhardt 认为这种形式最宜用于跨径 200m 左右及以内的斜拉桥,宽 15 ~ 20m,厚 50 ~ 60cm;

5 为槽形梁,相当于梁板式截面的翻转,可利用桥面两侧的防撞墙作梁身,使更经济合理;

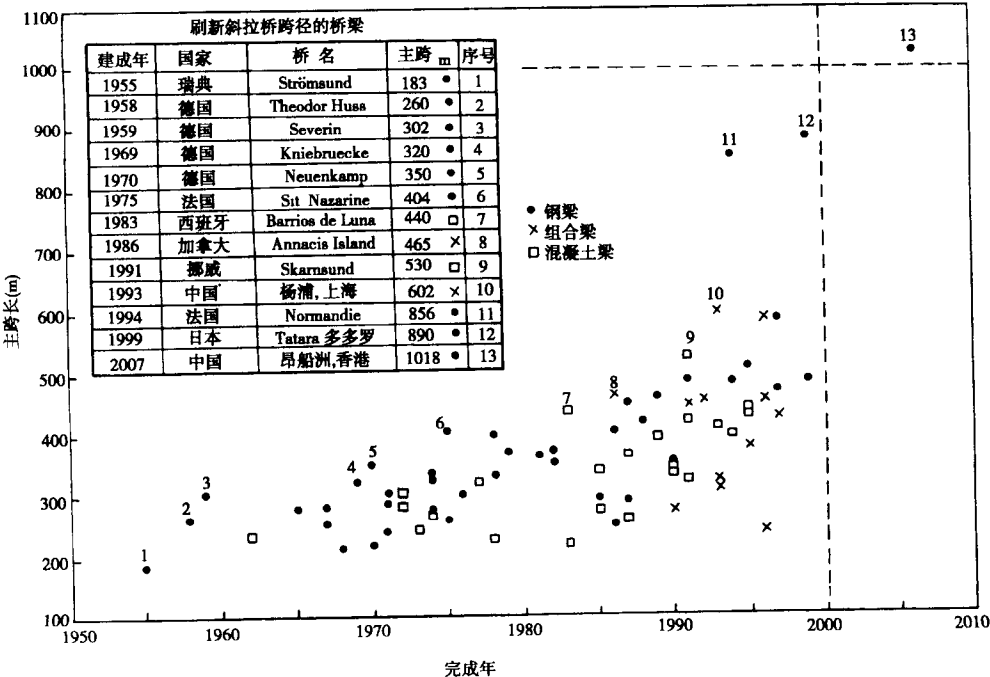
6 为 5 的两边梁减薄,再加上翼缘人行道,如草帽式的翻转,板厚只有 35cm。

这种薄板式截面方兴未艾,还有其他一些桥例,瑞士 R. Walther 教授对这种薄板截面的强度、压屈稳定性等进行了专门的试验研究,详见 4、5 章。

4. 斜拉桥的发展进入了第 4 代:向大跨径和特大跨径进军。

1956 年,第一座现代斜拉桥瑞典 Strömsund 桥建成,跨径 183m。第二年,1957 年,德国杜塞尔多夫 Theodor-Heuss-Bruke 建成,跨径即加大到 260m。再过两年,1959 年,德国科隆 Severn 桥又把跨径加大到 302m。这之后,直到 1975 年,法国的 St. Najarine 桥才把跨径加大到 404m。到 1991 年,瑞典的 Skarnsund 桥建成,才突破 500m 的跨径,达到 530m。从跨径 300m 到 500m 花了 30 年时间。

斜拉桥诞生初期,人们认为它只是适宜于 250 ~ 500m 跨径之间的经济桥型,也正好填补了这个跨径段桥型的空白。因为一般认为,250m 以下以梁式桥(连续梁或连续刚构)为经济,而 500m 以上则以悬索桥为经济。但 30 年来世界各地广泛修建过程中,斜拉桥结构各部分设计越来越改进创新,施工经验越来越完善成熟,造价也越来越经济,不但在 50 ~ 100m 的小跨径桥在某些桥位条件下也适用和合理,尤其在 1000m 以上大跨径桥梁也有很大的竞争力。结果在最近的 10 年间,1991 ~ 2000 年,斜拉桥跨径由 500m 一跃而达 1000m,其中主要的里程碑为 1993 年,中国上海杨浦桥(602m);1994 年,法国 Normandie 桥(856m);1999 年日本多多罗桥(890m);而 2000 年中国香港昂船洲桥,设计方案已经两次国际竞标优选决定为主跨 1018m 斜拉桥,定于 2004 年开工,2007 年竣工。各年度世界主要斜拉桥跨径及主梁型式如图 1-12 所



示,图中并附各时期刷新跨径的桥梁表。

与此同时,世界许多知名专家如德国的 F. Leonhardt,法国的 J. Muller,丹麦的 J. Gimsing 等对特大跨径斜拉桥作了大量理论研究和实际设计工作,对一些世界重大桥位都提出了特大跨径斜拉桥的方案和设计。表 1-2 中是若干实例,其中,对意大利的 Messina 海峡桥,F. Leonhardt 已作了跨径 1800m 斜拉桥的初设方案;跨欧、非两洲的 Gibraltar 海峡大桥,摩洛哥 Wisniewski 教授已作了多跨 2625mV 塔斜拉桥的方案;丹麦 Gimsing 教授等人还有一孔 8400m 甚至 15000m 斜拉桥跨越的设想,这些概念都十分具有开拓精神。

1000m 以上超大跨斜拉桥设计和方案建议 表 1-2

国 别	桥 名	设计性质	主跨径(m)	提 出 者	提 出 年	附 注
丹麦	Great Belt 东	概念设计	1204	Leonhardt Cowi	1985	钢
希腊	Rion Antririon 海湾	初步设计	1166	Leonhardt	1987	钢箱
意大利	Messina 海峡	初步设计	1800	Leonhardt	1982	钢箱
英国	Edinburgh	方案	1000		1991	
摩洛哥 ~ 西班牙	Gibraltar 海峡	方案	4700 + 8400 + 3100			
摩洛哥 ~ 西班牙	Gibraltar 海峡	初步设计	6 × 2625	摩洛哥 Wisniewski	1987	V 塔
摩洛哥 ~ 西班牙	Gibraltar 海峡	方案	15000	N. J. Gimsing		空间 4 索面新材料
中国	广东伶仃洋	初设竞标	1000	湖南公路设计院	1997	钢管混凝土梁
马来西亚	Sungai Johor 海峡	方案竞赛	1000	J. Muller	1999	钢管桁架
中国	香港昂船洲桥	竞标方案冠军	1018	英 Halcrow, 上海市政院	2000	钢梁独柱塔
中国	香港昂船洲桥	亚军	1019	港 Scott Wilson, 德 Leonhardt	2000	钢梁
中国	香港昂船洲桥	季军	1001	T. Y. Lin	2000	钢梁, 双柱塔
中国	香港昂船洲桥	第 4 名	1000	美 HNTB, 广东虎门 咨询公司	2000	钢梁分肢拉索
中国	香港昂船洲桥	第 5 名	1017	芬兰 korres	2000	钢梁
中国	香港昂船洲桥	内部方案	1040	中国广州四航设计院	2000	钢管混凝土空间桁架

注:表中未包括斜拉-悬索协作方案。

上述各主要大跨径斜拉桥和方案详见第 7 章。

以前认为,500 ~ 1000m 尤其 1000m 以上桥梁为悬索桥的独占领域,而现在,斜拉桥以其独特的优点已成为悬索桥的强劲竞争对手,两者主要的优缺点比较见表 1-3。

斜拉桥与悬索桥比较 表 1-3

斜 拉 桥	悬 索 桥
1. 斜拉索自锚于主梁,锚固简单;	1. 主缆地锚,需要庞大的锚碇,锚固复杂;
2. 索塔高与主跨比 1:4 左右,塔较高,但拉索施于梁体的水平力较小;	2. 塔高与主跨比 1:10 左右,塔较矮,但主缆施于锚碇的水平力很大;
3. 索塔承受拉索的垂直力主要为恒、活载重量,塔身和基础可较轻型;	3. 索塔承受主缆的垂直力除恒活载重力外还有锚碇反力,一般可大于斜拉桥 40% 以上,因而塔身和基础要加大;