



矮塔斜拉桥 施工技术

AITA XIELAQIAO SHIGONG JISHU

王 成 宁宏翔 ● 著



西南科技大学出版社

矮塔斜拉桥施工技术

AITA XIELAQIAO SHIGONG JISHU

王 成 宁宏翔 著

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目（CIP）数据

矮塔斜拉桥施工技术 / 王成, 宁宏翔著. —成都:
西南交通大学出版社, 2018.2

ISBN 978-7-5643-6035-1

I. ①矮… II. ①王… ②宁… III. ①斜拉桥—桥梁
施工 IV. ①U448.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 022742 号

矮塔斜拉桥施工技术

王 成
宁宏翔

著

责任编辑 姜锡伟

封面设计 何东琳设计工作室

印张 15.75 字数 258千

成品尺寸 170 mm×230 mm

版次 2018年2月第1版

印次 2018年2月第1次

印刷 四川煤田地质制图印刷厂

书号 ISBN 978-7-5643-6035-1

出版发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

定价 88.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

矮塔斜拉桥这一结构形式最早由法国教授Mathivat在1988年提出来，当时的正式提法为超配量体外索PC桥。Mathivat教授采用这一首创的桥梁结构体系作为法国西南部Alert Darre高架桥的备选方案，但最终未被采纳实施。此后，日本通过深入的研究，于1994年建成了世界上第一座矮塔斜拉桥——小田原港桥。2001年，日本在木曾川桥和揖斐川桥中首次引入了单索面、混合梁、多塔的概念，标志着矮塔斜拉桥的发展达到了一个新的高度。

1995年，我国著名桥梁专家严国敏先生首次将这一结构类型桥梁称为“部分斜拉桥”。再后来，国内工程界人士根据此种桥梁塔高较小的特点，将其称为“矮塔斜拉桥”。我国的矮塔斜拉桥虽然起步稍晚，但发展势头迅猛，2000年8月竣工的芜湖长江公、铁两用大桥是我国首座采用矮塔斜拉桥型的桥梁。此后陆续建成了漳州战备大桥、太原汾河斜拉桥等。其中，厦门同安银湖大桥、兰州小西湖黄河大桥等的建成，标志着国内矮塔斜拉桥建造技术已日趋完善。目前，我国已成为世界最大的在建、建成矮塔斜拉桥国家。

矮塔斜拉桥兼具纤细、柔美的美学效果和宏伟、壮观的感觉震撼，克服了连续梁桥主梁高度过大带来的

压迫感和桥梁上、下部结构不协调的弊端。矮塔斜拉桥跨径布置灵活，克服了多塔斜拉桥的刚度不足和各跨相互影响的弊端。矮塔斜拉桥施工简便、经济性好。该桥型每延米造价与连续梁桥基本持平，低于一般斜拉桥造价，具有可观的经济效益。

本书在总结矮塔斜拉桥建设经验的基础上，以元蔓高速公路红河段浪滩坡矮塔斜拉桥为工程实例，重点研究矮塔斜拉桥成套施工工艺和技术，为今后类似桥型的施工提供有益探索。

本书内容共分为七个章节。第1章为绪论，主要介绍了矮塔斜拉桥的起源、发展概况、体系分类及其特点。第2~4章结合浪滩坡特大桥工程实例，分别介绍了矮塔斜拉桥塔、主梁和斜拉索的构造及施工工艺。第5章研究了矮塔斜拉桥施工控制体系的建立与应用。第6章结合浪滩坡特大桥对矮塔斜拉桥进行了数字模拟分析，深化了索力优化。第7章介绍了BIM技术在矮塔斜拉桥中的应用，并实例分析了浪滩坡特大桥。

《矮塔斜拉桥施工技术》是一部专门为工程技术、教学科研人员及在校学生编写的工程指导用书，可用于工程研究、现场实践、教学培训等。当今土木工程发展迅猛，新知识、新技术、新工艺层出不穷，且由于作者水平有限，遗漏之处难免，敬请批评指正。

作者

2017年11月于昆明

01	第1章 绪 论	001
	1.1 矮塔斜拉桥的起源	001
	1.2 矮塔斜拉桥的发展概况	004
	1.3 矮塔斜拉桥体系分类及特点	019
02	第2章 索塔施工工艺	022
	2.1 索塔结构和类型	022
	2.2 索塔施工设备和布置	024
	2.3 索塔施工工艺	029
	2.4 工程实例	056
03	第3章 主梁施工工艺及方法	070
	3.1 主梁结构和类型	070
	3.2 主梁施工工艺	072
	3.3 主梁施工控制要点	093
	3.4 工程实例	095
04	第4章 斜拉索施工工艺	118
	4.1 斜拉索概述	118
	4.2 斜拉索制作	123
	4.3 斜拉索施工工艺	124

	4.4 斜拉索减振处理	138
	4.5 工程实例	141
05	第5章 矮塔斜拉桥施工控制体系	158
	5.1 桥梁施工控制简介	158
	5.2 施工控制体系理论简介	159
	5.3 矮塔斜拉桥施工控制体系建立	160
06	第6章 矮塔斜拉桥数值模拟分析	169
	6.1 工程概况	169
	6.2 数值模拟分析	170
07	第7章 BIM技术在矮塔斜拉桥中的应用	192
	7.1 BIM技术发展前景	192
	7.2 BIM技术运用	196
	7.3 安全管理	199
	7.4 信息管理	200
	7.5 质量管理	201
	7.6 进度管理	203
	7.7 成本管理	209
	7.8 工程实例	209
	参考文献	237

第1章 绪 论

矮塔斜拉桥又称部分斜拉桥，是介于连续梁桥与斜拉桥之间的一种斜拉组合体系桥，具有塔矮、梁刚、索集中的特点。矮塔斜拉桥主梁刚度较大，是主要的承重构件。斜拉索对梁起加劲、调整受力的作用。斜拉索的恒载索力占总索力的比重较斜拉桥大，斜拉索的应力变幅较小，疲劳问题不突出，工程造价相对较低。矮塔斜拉桥与连续梁桥相比具有结构新颖、跨越能力大、施工简单、经济等优点；与斜拉桥相比具有施工方便、节省材料、主梁刚度大等优点。这种介于梁桥和斜拉桥之间的半刚半柔桥梁结构的出现，填补了两者优势跨径之间的区域，综合考虑了经济性、施工性、美观性的要求，在 200 ~ 300 m 跨径范围内具有很强的竞争优势。此外，计算机结构分析、设计方法、新型材料、施工技术的进步，使得矮塔斜拉桥得到广泛而快速的发展^[1,2]。

1.1 矮塔斜拉桥的起源

20 世纪 90 年代以来，连续梁（刚构）桥和斜拉桥在理论研究和工程实践方面都已发展成熟，目前桥梁技术的发展更趋向于大跨度、轻量化以及梁桥、拱桥、索式桥等基本桥型的组合，矮塔斜拉桥就是介于连续梁（刚构）桥和斜拉桥之间的一种组合体系桥型，近年来得到了广泛的关注^[3]。

矮塔斜拉桥的最初雏形是反拱形梁（图1.1），这种桥型的主要受力构件尺寸与结构弯矩图相似，外形轮廓线像一个倒过来的拱圈，是一种受力合理的桥型。反拱形梁桥适合于中小跨径桥梁，一般用于桥下净空受到限制的地方。反拱形梁桥按其受力的特性，还是属于梁式桥的，但是从外形上看空腹式反拱梁桥已经有了斜拉体系桥的特性。

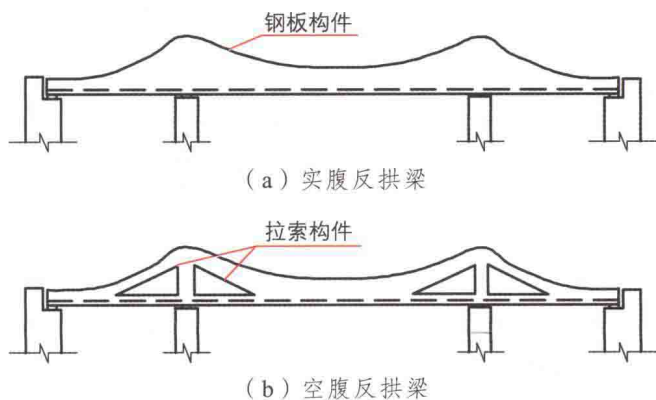


图 1.1 反拱型桥

1981 年，由瑞士著名桥梁设计师 Christian Menn 设计的甘特（Ganter）大桥（图 1.2），是斜拉-连续梁体系桥的先驱，其混凝土箱形梁由预应力混凝土斜拉板“悬挂”在非常矮的塔上，这座桥的索塔高度只有 11.1 m，为主跨径的 $1/16.7$ ，仅为一般普通斜拉桥塔高的 $1/8.7 \sim 1/7$ ，开创了低塔斜拉桥的结构形式。这种预应力混凝土斜拉板可以看成是一种刚性的斜拉索。该桥的出现形成了斜拉桥的一个分支——斜拉板桥，很小的高跨比使得整座桥梁看上去更加纤细美观，与自然环境的完美融合，成为一道靓丽的风景。甘特（Ganter）大桥的出现为其后矮塔斜拉桥的出现奠定了基础。

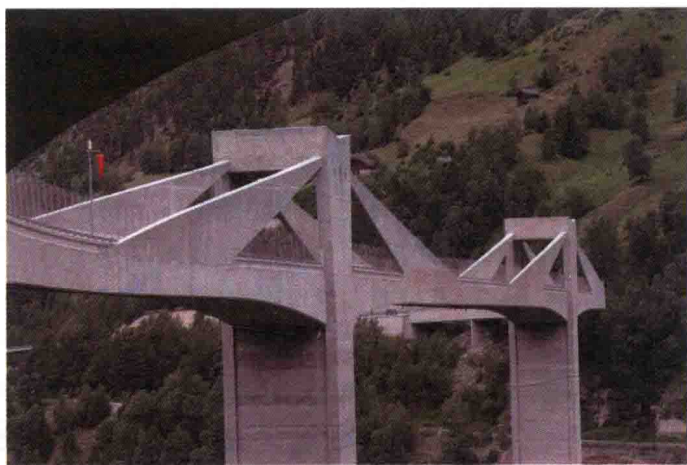


图 1.2 瑞士甘特（Ganter）大桥

1988 年，法国工程师 Jacques Mathivat 在设计位于法国西南部的阿勒特·达雷（Arrêt darré）高架桥的替代方案时，首次明确地提出了 Extradosed-Prestressed

Bridge（即部分斜拉桥）的概念（图 1.3）。其具体方案构思为：跨度为 100 m 的预应力混凝土箱梁和较低的索塔固结，斜拉索穿过设置在索塔上的索鞍与主梁锚固，外形上与斜拉桥相似，但从受力特性方面来说，其斜拉索与预应力混凝土体外索很相似。虽然这个方案没有实施，但是对矮塔斜拉桥的影响却是十分深远的。

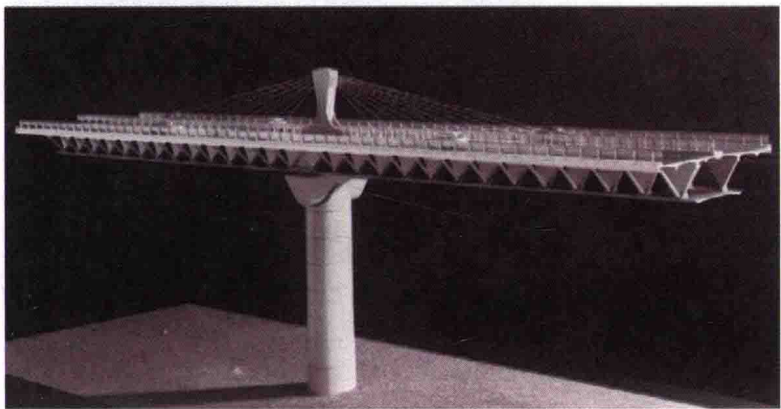


图 1.3 阿勒特·达雷高架桥设计模型

1990 年，德国工程师 Antonie Naaman 提出了一种体外预应力组合桥，中墩处主梁向上伸出的钢柱（有点类似桥塔）为体外索提供锚固，以加大偏心距来提高体外索的效率。主梁为钢桁架，上下面浇筑混凝土桥板，这种结构体系类似于阿勒特·达雷高架桥的设计。

法国工程师 Jacques Mathivat 在提出高架桥方案时，命名为“Extradosed PC bridge”，译为“超剂量预应力混凝土桥”。日本第一座真正意义的矮塔斜拉桥小田原港（Odawara Blueway）桥被称为世界上第一座“Extradosed PC Bridge”，在我国台湾地区直译为“脊背或拱背”线形 PC 桥。这一名词刚刚引入国内时，也有学者翻译成“超剂量”PC 桥。桥梁专家严国敏将其称为“部分斜拉桥”^[4]，取的是其结构构件功能上的特点，他认为此桥型的刚度主要来源于主梁，而斜拉索只起到体外预应力的作用，相当于只有传统斜拉索的部分功能。而王伯惠、顾安邦、徐君兰等学者则认为早期的稀索结构也有“部分”的性质，因此前者的称谓不够明确，没有表达出这种桥型外在形状和内在结构的特点，并提出应该叫“矮塔斜拉桥”，英文表述是“Extradosed cable-Stayed bridge”。本书采用后者说法，统一称为“矮塔斜拉桥”。

1.2 矮塔斜拉桥的发展概况

1.2.1 矮塔斜拉桥国外发展概况^[3,5-10]

瑞士、法国和德国的桥梁工程师提出矮塔斜拉桥设计方案雏形，其主要特点是将体内预应力移至体外，并借助梁上的矮塔完成预应力的体外布设。但这种创新性的设计方法并没有在欧洲得到应用，反而是在日本因为其技术、经济又颇具观赏性而引起了工程界的高度重视。通过对这种桥型的深入研究，日本于 1994 年建成了第一座真正意义上的矮塔斜拉桥小田原港（Odawara Blueway）桥（图 1.4）。该桥设计为三跨外部索 PC 箱梁桥，桥长 270 m，跨度为（74+122+74）m，桥面宽 13 m。全桥采用双塔双索面构造，索塔高 10.5 m，塔、梁、墩固结，斜拉钢索贯通桥塔锚固在两边的主梁上，其主塔上的索鞍锚固的方案对后来的矮塔斜拉桥借鉴意义很大，现在仍有新建的矮塔斜拉桥采用这样的锚固方式。随后这种桥型在日本得到迅速发展，先后建成了屋代南（北）铁路桥、冲原桥、蟹泽大桥、新唐柜大桥、木曾川桥、日见桥、栗东桥、土狩大桥等。



图 1.4 小田原港桥

日本北陆新干线上的第二曲川桥是一座具有斜拉桥重要特性的真正的混凝土双线铁路斜拉桥。位于同一区间的两座轻载铁路桥屋代南桥与屋代北桥建于 1995 年，虽然其形式看起来很像斜拉桥，起初统称为斜拉桥，但经过仔细研究发现，屋代南桥与屋代北桥与小田原港桥非常相似。

建于 2001 年的木曾川桥（图 1.5）首次引入多塔、单索面和混合梁的概念，极大地丰富了矮塔斜拉桥的结构类型。主梁采用混合梁结构，使得矮塔斜拉桥的跨径得到了极大的提高。



图 1.5 木曾川(Kiso) 桥

法国学者 Pierre Thirivans 提出的一种新型、更为合理的波形钢腹板预应力混凝土桥由于自重可减轻25%~30%，因此出现后在法国和日本很快得到了应用。矮塔斜拉桥和波形钢腹板预应力混凝土桥在 2004 年建造的栗东桥和日见桥中相互结合了起来，栗东桥是世界上第一座设计采用波形钢腹板的矮塔斜拉桥，日见桥为第二座。

栗东桥（图 1.6）大阪方向桥梁全长 555.0 m，跨径为（67.5+115+170+137.5）m，桥宽 16.5 m，采用双幅、单塔、单箱三室截面波形钢腹板 PC 箱；日见桥（图1.7）全长 365 m，跨径为（92.5+180+92.5）m，桥宽 12.95 m，采用的是双索面、波形钢腹板 PC 箱梁。

栗东桥是日本第二名神高速公路中的一座桥梁，桥位处于非常陡峭的山地上，山上有珍稀的植物。设计师考虑到地形限制和植被保护，不宜在山坡上设墩而应以大跨度跨越，因此考虑采用矮塔斜拉桥。该矮塔斜拉桥主梁采用波形钢腹板，有利于减轻主梁的自重、增大跨径、减小地震反应，同时又有利于施工的合理化、缩短工期、降低工程成本，也便于今后的运营维护。

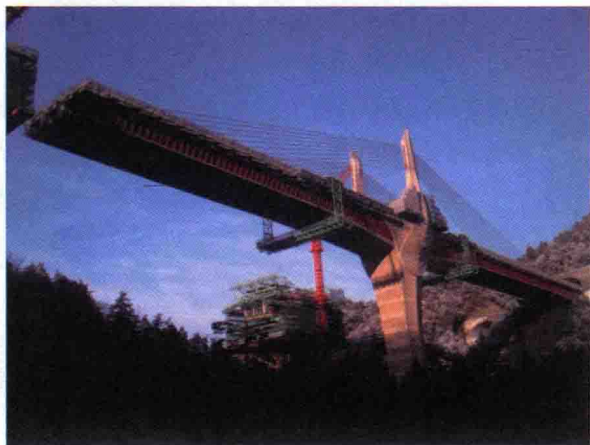


图 1.6 栗东(Ritto) 桥

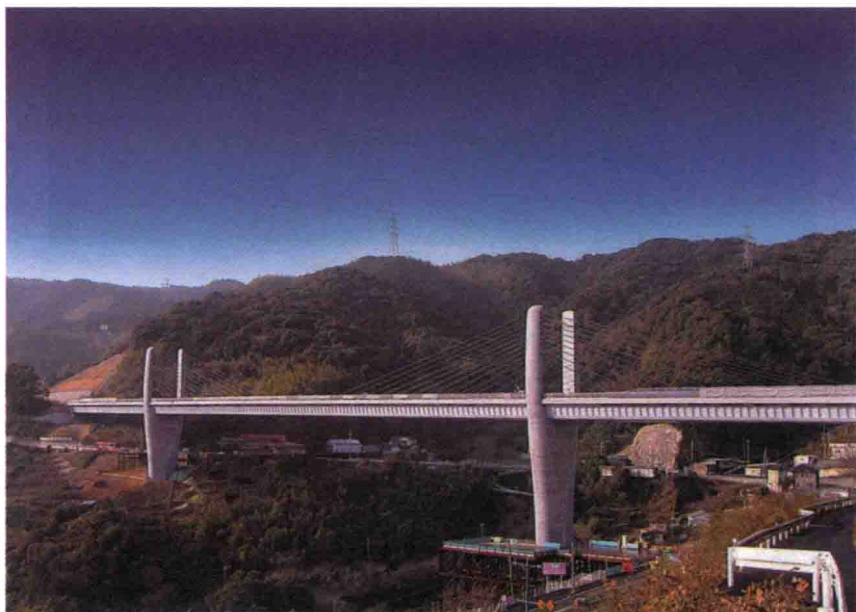


图 1.7 日见桥

矮塔斜拉桥在第一座建成后的十几年时间里得到了快速的发展。日本已建成这种桥型的桥几十座，其中木曾川（Kiso）桥跨度最大，达到了 275 m，桥面宽达到了 33 m，波形钢腹板箱梁和预应力混凝土钢梁的应用，丰富了桥梁的结构类型。日本不仅在本国大量建造此桥型，还积极将其推广到国外，日本援建菲律宾的麦克坦大桥、老挝的巴色桥等多座矮塔斜拉桥，取得了很好的社会和经济效益。

1996 年，瑞士甘特大桥的设计师 Christian Menn 又设计了另一座高架矮塔斜拉桥，即位于瑞士阿尔卑斯山 Kloster 镇的 Sunniberg 桥（图 1.8）。该桥于 1998 年建成，仅用时两年。其结构形式为五跨四塔连续双索面曲线矮塔斜拉桥，全长 526 m，跨径为 $(59+128+140+134+65)$ m，最大跨径为 140 m，平曲线半径为 503 m，桥宽为 12.378 m，主梁采用肋板式，跨中板高 0.32 m，塔根处板高 0.4 m，两边肋高 0.8 m，梁高与主跨之比只有 1/175，主梁受力更接近于传统意义上的斜拉桥。桥梁建成后，巨大的平曲线、超大跨径穿越峡谷、与环境更协调的矮塔，使得整桥极具桥梁美学效果，Sunniberg 桥也为当地旅游增添了一处绝佳的景致。这种刚性塔加柔性梁的组合也极大地丰富了矮塔斜拉桥的结构形式，并为矮塔斜拉桥灵活多变的设计风格开辟了新的道路。



图 1.8 Sunniberg 桥

随后，矮塔斜拉桥这种新兴发展起来的桥型受到许多国家桥梁工程师的关注，美国、韩国、克罗地亚、加拿大等国先后修建了矮塔斜拉桥。

2006 年，韩国修建了第一座矮塔斜拉桥 Kack-hwa 第一桥（图 1.9），该桥位于韩国光州，桥梁全长 270 m，跨径为 $(55+115+100)$ m，桥面宽 31.1 m。2007 年、2008 年，韩国相继建成了 Pyung-Yeo 2 Bridge（平荣 2 桥，图 1.10）、Gum-ga Grand bridge（高 GA 大桥，图 1.11）、Cho-rack Bridge（巧克力桥，图 1.12），2006—2009 年 4 年的时间，韩国建成多座矮塔斜拉桥，矮塔斜拉桥的设计水平和施工技术日渐成熟。



图 1.9 Kack-hwa 第一桥



图 1.10 Pyung-Yeo 2 Bridge (平荣 2 桥)



图 1.11 Gum-ga Grand Bridge (高 GA 大桥)



图 1.12 Cho-rack Bridge (巧克力桥)

2009 年，矮塔斜拉桥开始在美洲地区建造投入使用，加拿大的 The North Arm Bridge（图1.13）、美国的 Q Bridge（图 1.14）、玻利维亚的 The Triplets Bridge 桥（图 1.15）的相继建成，标志着矮塔斜拉桥已经在全球范围内得到了应用。

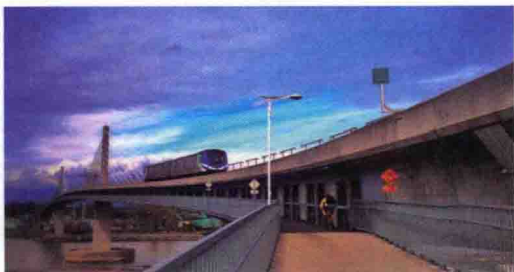
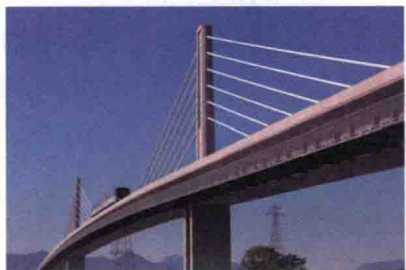


图 1.13 The North Arm Bridge (北桥大桥)



图 1.14 Q Bridge (珍珠港纪念桥)



图 1.15 The Triplets Bridge (三兄弟大桥)

1.2.2 矮塔斜拉桥国内发展概况^[10-14]

我国的矮塔斜拉桥设计、建造时间虽然相较欧洲和日本稍晚，但是深入的研究和探索，使得此桥型在国内的发展势头迅猛，取得了令人瞩目的成就。2000年9月建成的芜湖长江公、铁两用大桥（图 1.16），由于航空飞行限制，桥塔设计较一般斜拉桥要矮，被公认是国内第一座矮塔斜拉桥。该桥为钢桁梁结构，跨径为 $(180+312+180)$ m，桥面宽 21 m，大桥钢梁运用国产新材料 14MnNbq 和整体节点技术，是目前为止主跨度最大的矮塔斜拉桥。

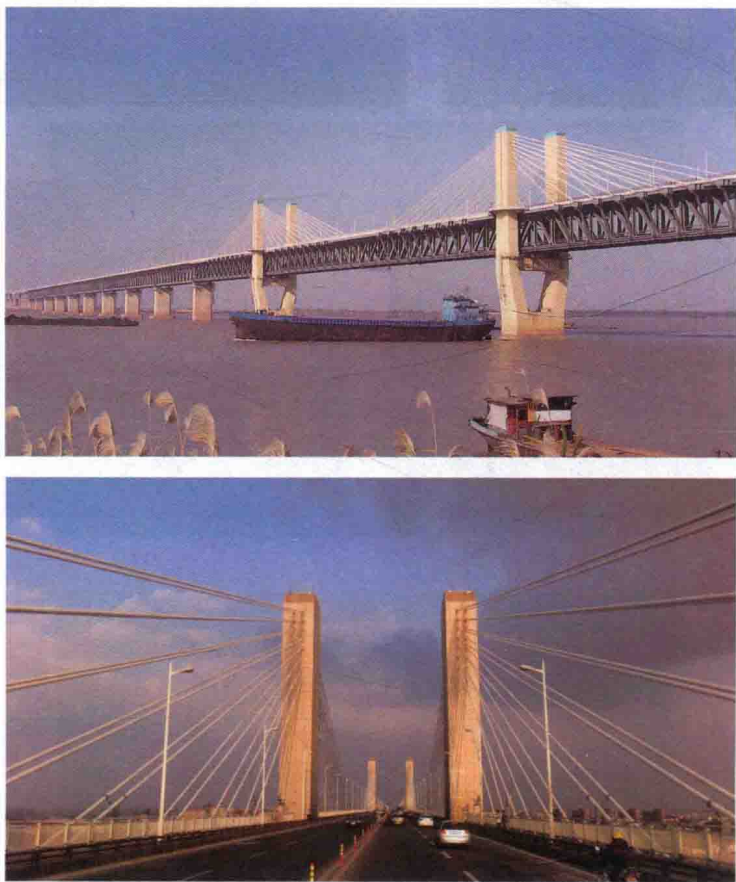


图 1.16 芜湖长江大桥

我国在首次采用矮塔斜拉桥型后，2001 年建成了国内第一座公路矮塔斜拉桥——漳州战备大桥^[10]（图 1.17），跨径为 $(80.8+132+80.8)$ m，桥面宽 27 m，塔高 16.5 m。自安徽芜湖大桥、福建漳州战备大桥之后，矮塔斜拉桥