



Theory and application of long span
steel-concrete composite bridge

大跨度钢-混凝土组合桥梁 理论与应用

李 勇 著



科学出版社

(TU-1167.01)

Theory and application of long span
steel-concrete composite bridge

大跨度钢-混凝土组合桥梁 理论与应用

科学出版社 工科分社
联系电话: 010-64010637
E-mail: gk@mail.sciencep.com

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-039434-7



定价: 68.00 元

大跨度钢-混凝土组合桥梁 理论与应用

李 勇 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了钢-混凝土组合桥梁的工作机理,针对组合桥梁的发展趋势,创新性地提出了组合拱桥理论、组合零弯矩理论、组合桥梁体系转换技术、影响线加载弯矩调幅方法、压型钢板组合桥面、曲线组合结构斜拉桥、组合结构桥梁顶推施工等。本书将理论与工程应用结合,介绍了各类组合结构桥梁的典型工程实例。

本书可供从事桥梁工程设计、施工、科研等的科技工作者及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度钢-混凝土组合桥梁理论与应用 / 李勇著. —北京: 科学出版社, 2013.12

ISBN 978-7-03-039434-7

I. ①大… II. ①李… III. ①长跨桥—钢筋混凝土桥—组合桥梁—研究 IV. ①U448

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 310212 号

责任编辑: 匡 敏 余 江 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 霍 兵 / 封面设计: 迷底书装

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 12 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 296 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

20 世纪初,焊接技术的发明为钢-混凝土组合结构桥梁(Steel-Concrete Composite Bridge)的发展提供了有利条件。20 世纪 30 年代是欧美各国和日本桥梁工程设计理论与工程应用的重要发展时期。

钢-混凝土组合桥梁需要解决的核心技术问题是,如何使两种性质完全不同的结构材料有效地共同工作,充分发挥出钢与混凝土材料各自力学性能的优势。

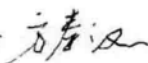
钢桁腹 PC 组合桥梁与钢-混凝土组合箱梁,界面剪力的形成机理完全不同。只有真正掌握了这一本质差别,才能根据力学特点有效解决好其关键技术难题。前者产生机理主要是节点应力重分布,后者产生机理主要是主梁的弯剪作用。

该书作者首次提出了大跨度异型组合拱桥理论,发明了组合拱桥新结构,针对大跨度拱桥水平推力、横向稳定、施工安装三大关键技术难题提出了新的解决思路与技术方法,实现了大跨度组合拱桥力学与美学的统一。

无弦杆桁元法,通过组合式节点形成大桁段,构思独特,技术新颖。作者发明了钢桁腹 PC 桥梁的无弦杆桁元法——组合式节点。组合式节点轻质、高强,抗疲劳性能好,为钢桁腹 PC 桥梁发展提供了新的方法,工程应用前景广阔。

该书基于组合桥梁在结构体系转换前后的内力与位移变化过程,为改善附加弯矩产生的附加应力问题,根据弯曲还原的力学原理,提出了钢-混凝土组合梁结构桥梁体系转换新技术,及钢-混凝土连续组合桥梁影响线加载弯矩调幅新技术。通过结构体系转换与影响线加载进行弯矩调幅,降低组合桥梁控制截面应力,改善组合桥梁结构受力状况。

该书作者长期从事钢-混凝土组合结构桥梁的理论、设计、研究与工程应用工作,在组合结构桥梁研究领域取得了许多创新性成果。希望作者及其团队在组合结构桥梁理论与应用方面作出更大贡献。

中国工程院院士 

2013 年 10 月 8 日

前 言

桥梁是人类文明的重要标志之一。钢-混凝土组合结构桥梁采用高强、高性能的材料组合,形成大跨、经济、美观的结构形式及其环保的施工建造技术。为了解决大跨度组合桥梁理论、新结构及其建造关键技术难题,作者在国家自然科学基金、省部级科技计划项目的支持下,通过联合技术攻关,对钢-混凝土组合结构桥梁“理论-设计-施工-制造”成套技术进行研发与应用,创新性地提出了大跨度组合桥梁新理论、新结构、新技术、新工艺。

本书分4部分,共9章。第一部分含第1章、第2章,介绍组合桥梁基本原理;第二部分含第3章~第6章,介绍组合桥梁新的理论;第三部分含第7章、第8章,介绍组合桥梁新结构的设计方法;第四部分为第9章,介绍组合桥梁顶推施工技术。其中第二部分所含的第3章~第6章是本书重点内容。

第1章概论。主要介绍钢-混凝土组合结构桥梁的发展历史、主要结构形式及工程应用前景。

第2章钢-混凝土组合桥梁基本原理。介绍钢-混凝土组合桥梁的基本理论、钢-混凝土组合桥梁的力学特点、钢-混凝土组合桥梁设计施工方法。

第3章大跨度异型组合拱桥理论。简单介绍国内外拱桥的发展历史,提出大跨度拱桥关键技术难题与解决思路。首次提出了大跨度异型组合拱桥基本理论,建立了大跨度组合拱桥拱轴线一般方程,发明了组合琴拱桥新结构。

第4章大跨度刚构桥梁组合零弯矩理论。针对国内外PC连续梁计算与施工存在的问题,提出恒载+活载的组合零弯矩原理,以及控制梁桥持续下挠的措施。

第5章钢-混凝土组合桥梁体系转换新技术。介绍钢-混凝土组合桥梁三阶段受力理论,包括简支组合梁与连续组合梁体系转换技术,铁路预应力纵-横格构式桥面漂浮体系转换,高速铁路斜拉-连续刚构组合桥梁体系转换。

第6章组合桥梁影响线加载弯矩调幅方法。介绍钢-混凝土组合梁预应力传递效率试验、钢-混凝土组合梁支座弯矩调幅试验,首次提出了钢-混凝土组合桥梁影响线加载弯矩调幅新方法。

第7章压型钢板组合桥面。介绍压型钢板和波形钢板组合桥面的受力特点,压型钢板疲劳应力及桥面抗裂等问题。

第8章曲线组合结构斜拉桥。介绍曲线组合结构斜拉桥技术特点及多座曲线斜拉组合结构斜拉桥的工程实例。

第9章组合结构桥梁顶推施工。介绍中国桥梁顶推发展概况,提出了顶推存在的问题及解决思路,介绍了波形钢腹板PC组合梁、钢桁腹PC组合梁、波-桁组合梁顶推的设计方法和施工技术。

本书内容包含了作者多年来有关的设计研究成果及在工程应用中的认识和体会。除本

书所列的参考文献外，还广泛参考和借鉴了国内外大量的研究成果及工程资料。陈宣言、焦少鹏、卿三惠、张建东、李敏、上官兴、郭帅、史鸣、肖芳芳、万宗江、刘念琴等在相关的理论、试验、设计、施工等过程中出色完成了大量的技术工作，许多同行给予了大力支持，并提出了许多宝贵的建议，在此一并向他们表示感谢。

本书得到了方秦汉院士、聂建国院士等的热情指导与帮助，并在百忙之中对全书进行审阅，方院士还为本书作序。在此向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，敬请专家和读者批评指正。

李 勇

2013 年 12 月

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 桥梁发展概述	1
1.2 组合结构桥梁的发展历史	10
1.3 组合结构桥梁的主要形式	12
1.4 组合结构桥梁的应用前景	17
参考文献	18
第 2 章 钢-混凝土组合桥梁基本原理	21
2.1 钢-混凝土组合桥梁的基本理论	21
2.2 钢-混凝土组合桥梁的力学特点	29
2.3 钢-混凝土组合桥梁的设计施工方法	31
参考文献	33
第 3 章 大跨度异型组合拱桥理论	34
3.1 国内外拱桥的发展历史	34
3.2 大跨度拱桥关键性技术难题	40
3.3 大跨度异型组合拱桥理论	45
3.4 大跨度异型组合拱桥的拱轴线方程	47
3.5 大跨度异型组合拱桥的力学特征	50
3.6 大跨度异型组合拱桥新结构	54
3.7 大跨度桥梁缆索吊装施工方法	56
3.8 外倾式钢箱拱肋节段调整	62
3.9 曲线钢箱梁精确调整定位	67
参考文献	68
第 4 章 大跨度刚构桥梁组合零弯矩理论	69
4.1 大跨度 PC 连续刚构桥的主要问题	69
4.2 恒载+活载组合零弯矩理论	72
4.3 组合梁桥悬臂施工的力学特点	74
4.4 桥梁预拱度与混凝土收缩徐变	76
4.5 连续刚构桥后期下挠主要控制措施	78
参考文献	87

第5章 钢-混凝土组合桥梁体系转换新技术	88
5.1 钢-混凝土组合桥梁三阶段受力理论	88
5.2 简支组合桥梁体系转换新技术	90
5.3 多跨连续组合桥梁体系转换技术	92
5.4 铁路预应力纵-横格构式桥面漂浮体系转换	93
5.5 高速铁路斜拉-连续刚构组合桥梁体系转换	95
参考文献	97
第6章 组合桥梁影响线加载弯矩调幅	98
6.1 钢-混凝土组合梁预应力效率模型试验	98
6.2 钢-混凝土组合梁支座调整弯矩调幅	106
6.3 组合桥梁影响线加载弯矩调幅	109
6.4 支点负弯矩区拉应力问题	120
6.5 曲线组合桥梁预应力施工方法	122
参考文献	132
第7章 压型钢板组合桥面	133
7.1 压型钢板与波形钢板力学特点	133
7.2 压型钢板组合桥面抗裂问题	134
7.3 正交各向异性板疲劳应力问题	134
7.4 施工阶段压型钢板强度和变形验算	135
7.5 压型钢板端部与钢梁的连接方式	135
7.6 工程应用	136
参考文献	141
第8章 曲线组合结构斜拉桥	143
8.1 组合斜拉桥概况	143
8.2 曲线组合斜拉桥技术特点	148
8.3 曲线组合斜拉桥的设计	150
8.4 工程应用	159
参考文献	169
第9章 组合结构桥梁顶推施工	170
9.1 桥梁顶推发展概述	170
9.2 顶推施工技术原理	173
9.3 顶推施工关键技术	176
9.4 顶推存在问题的解决思路	181
9.5 波形钢腹板 PC 组合梁顶推施工	181
9.6 钢桁腹 PC 组合桥梁顶推施工	186
参考文献	189

第 1 章 概 论

1.1 桥梁发展概述

1. 古代桥梁

在原始时代,人类为了跨越水道和峡谷,会利用自然倒下来的石头或者树木、自然形成的石梁或石拱、溪涧突出的石块、谷岸生长的藤萝等。人类有目的地伐木为桥或堆石、架石为桥始于何时已难以考证。据史料记载,中国在周代(公元前 11 世纪~前 256 年)已建有梁桥和浮桥,如公元前 1134 年左右的西周,在渭水架有浮桥^[1]。古巴比伦王国在公元前 1800 年建造了多跨的木桥,桥长达 183m^[2]。古罗马在公元前 621 年建造了跨越台伯河的木桥,在公元前 481 年架起了跨越赫勒斯旁海峡的浮船桥。古代美索不达米亚地区,在公元前 4 世纪时建起挑出石拱桥(拱腹为台阶式)^[3]。

古罗马嘉德石拱桥(图 1.1)位于嘉德河上,长 275m,高 49m。桥的第一层为道路,第三层顶部是 1.8m 高、1.2m 宽的引水管。桥的三层均是由琢石建造而成。古罗马塞戈维亚引水渠桥(图 1.2),是双层拱桥,长 728m,第一层最高的拱柱约 29m。

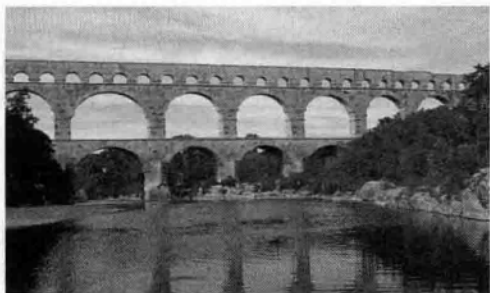


图 1.1 古罗马嘉德石拱桥(公元 14 年)



图 1.2 古罗马塞戈维亚引水渠桥(公元 109 年)

中国赵州桥又名安济桥(图 1.3),建于公元 605~618 年,净跨径为 37m,是首座在主拱圈上加小腹拱的空腹式(敞肩式)拱桥。北京颐和园十七孔桥始建于清乾隆十五年(1750 年),长 150m,是我国皇家园林中现存的最长的桥(图 1.4)。



图 1.3 中国赵州桥(公元 618 年)



图 1.4 北京颐和园十七孔桥(1795 年)

在 17 世纪前, 古代桥梁一般是用木、石材料建造的。石桥的主要形式是石拱桥, 中国早在东汉时期(公元 25~220 年)就出现石拱桥^[4], 中国古代石拱桥的拱圈和墩一般都比较薄, 结构比较轻巧^[5]。

石梁桥是石桥的又一形式。中国陕西省西安市附近的灞桥原为石梁桥, 建于汉代, 距今已有 2000 多年^[6]。公元 11~12 世纪南宋泉州地区先后建造了几十座较大型的石梁桥, 其中有洛阳桥、安平桥^[7]。安平桥(五里桥)原长 2500m, 362 孔, 现长 2070m, 332 孔。英国达特穆尔地区现存的石板桥, 有的已有 2000 多年历史^[8]。

早期木桥多为梁桥, 如秦代在渭水上建的渭桥, 即为多跨梁式桥。木梁桥跨径不大, 伸臂木桥可以加大跨径^[9]。中国 3 世纪在甘肃安西与新疆吐鲁番交界处建有伸臂木桥, “长一百五十步”。公元 405~418 年在甘肃临夏附近河宽达 40 丈处建悬臂木桥, 桥高达 50 丈。16 世纪意大利的巴萨诺桥为八字撑木桥。八字撑木桥和拱式撑架木桥可以加大跨径。

木拱桥出现较早, 公元 104 年在匈牙利多瑙河建成的特拉杨木拱桥, 共有 21 孔, 每孔跨径为 36m^[10]。中国在河南开封修建的虹桥为木拱桥, 建于公元 1032 年^[11]。日本修建的锦带桥为五孔木拱桥, 建于公元 300 年左右, 是中国僧戴曼公独立禅师帮助修建的^[12]。

中国西南地区有用竹篾缆造的竹索桥。著名的竹索桥是四川灌县珠浦桥, 桥为 8 孔, 最大跨径约 60m, 总长 330 余 m, 建于宋代以前^[13]。

在罗马时代开始采用围堰法施工, 即打木板桩成围堰, 抽干水后在其中修筑桥梁基础和桥墩。

1209 年建成的英国泰晤士河拱桥, 其基础就是用围堰法修筑, 但是, 那时只能用人工打桩和抽水, 基础较浅。中国 11 世纪初, 著名的泉州洛阳桥在桥址江中先遍抛石块, 其上养殖牡蛎二三年后, 胶固而成筏形基础, 是第一座海湾桥梁^[14]。

2. 近代桥梁

18 世纪初, 铁的生产和铸造为桥梁提供了新的建筑材料。但铸铁抗冲击性能差, 抗拉性能低, 易断裂, 并非良好的造桥材料。19 世纪 50 年代以后, 随着酸性转炉炼钢和平炉炼钢技术的发展, 钢材成为重要的造桥材料。钢的抗拉强度大, 抗冲击性能好。19 世纪 70 年代出现钢板和型钢, 为桥梁构件在工厂组装创造了条件, 使钢材的应用日益广泛^[15]。

铁桥包括铸铁桥和锻铁桥。铸铁性脆, 宜于受压, 不宜受拉, 适宜作拱桥建筑材料。世界上第一座铸铁桥是英国科尔布鲁克代尔厂所造的塞文河桥, 建于 1779 年, 为半圆拱, 由 5 片拱肋组成, 跨径 30.7m。锻铁抗拉性能比铸铁好, 19 世纪中叶, 跨径大于 60~70m 的公路桥都采用锻铁链吊桥^[16]。铁路因吊桥刚度不足而采用桁桥, 如 1845~1850 年英国建造的布列坦尼亚双线铁路桥, 为箱型锻铁梁桥。19 世纪中叶以后, 相继建立起梁的定理和结构分析理论, 并出现多种形式的桁梁^[17]。由于对桥梁抗风的认识不足, 1879 年 12 月大风吹倒了才建成 18 个月的阳斯的泰湾铁路锻铁桥, 主要原因是桥梁没有设置横向连续抗风构^[18]。

18 世纪初, 发明了用石灰、黏土、赤铁矿混合煅烧而成的水泥, 其材料抗压强度较高。19 世纪 50 年代, 开始采用在混凝土中放置钢筋以弥补水泥抗拉性能差的不足。此后, 于 19 世纪 70 年代建成了首座钢筋混凝土桥^[19, 20]。

英国伦敦塔桥(图 1.5)是一座吊桥,是一座拥有 6 条车道的水泥结构桥,桥身分为上、下两层,上层为宽阔的悬空人行道,下层可供车辆通行。澳大利亚悉尼大桥(图 1.6)是世界上第一座大跨度拱桥,大桥从 1857 年开始设计,1932 年竣工,是连接港口南北两岸的重要桥梁。桥拱的跨度为 503m,最高处距离海面 134m。美国金门大桥(图 1.7)于 1933 年动工,1937 年 5 月竣工。钱塘江大桥(图 1.8)全长 1453m,南、北引桥分别为 93m 和 288m,铁路桥由 16 空跨度为 65.84m 的简支华伦式桁梁和两孔 14.63m 板梁组成,公路桥为 16 孔桁梁。



图 1.5 伦敦塔桥(1886 年)



图 1.6 悉尼大桥(1932 年)



图 1.7 美国金门大桥(1937 年)



图 1.8 钱塘江大桥(1937 年)

中国 1705 年修建了四川大渡河泸定铁链吊桥,桥长 100m,宽 2.8m,至今仍在用。欧洲第一座铁链吊桥是英国的蒂斯河桥,建于 1741 年,跨径 20m,宽 0.63m。1820~1826 年,英国在威尔士北部梅奈海峡修建一座中孔长 177m、用锻铁眼杆的吊桥,这座桥由于缺乏加劲梁及抗风构,于 1940 年重建。世界上第一座不用铁链而用铁索建造的吊桥是瑞士的弗里堡桥,建于 1830~1834 年,桥的跨径为 233m。这座桥用 2000 根铁丝就地放线,悬在塔上,锚固于深 18m 的锚碇坑中^[21]。

美国密苏里州圣路易市密西西比河的伊兹桥,建于 1867~1874 年,是早期建造的公路铁路两用无铰钢桁拱桥,跨径为 (153+158+153)m。19 世纪末弹性拱理论已逐步完善,促进了 20 世纪 20~30 年代修建较大跨钢拱桥,较著名的有:美国纽约的岳门桥,建成于 1917 年,跨径 305m;纽约的贝永桥,建成于 1931 年,跨径 504m;澳大利亚的悉尼港桥,建成于 1932 年,跨径 503m。3 座桥均为双铰钢桁拱^[22]。

19 世纪中期出现了根据力学设计的悬臂梁。英国人根据中国西藏木悬臂桥的样式,提出锚跨、悬臂和悬跨三部分组合的设想,并于 1882~1890 年在英国爱丁堡福斯河口建造

了铁路悬臂梁桥。这座桥共有 6 个悬臂, 悬臂长为 206m, 悬跨长为 107m, 主跨长为 519m。20 纪初期, 悬臂梁桥曾风行一时, 如 1901~1909 年美国建造的纽约昆斯堡桥, 是一座中间锚跨为 190m、悬臂为 150m 和 180m、无悬跨、由铰联结悬臂、主跨为 300m 和 360m 的悬臂梁桥。1900~1917 年加拿大建造的魁北克桥也是悬臂钢桥^[23]。

近代桥梁建造实践, 促进了桥梁科学理论的兴起和发展。1857 年由圣沃南 (Saint Venant) 在前人对拱的理论、静力学和材料力学研究基础上, 提出较完整的梁理论和扭转理论, 连续梁和悬臂梁理论也基本建立。在桥梁桁架结构分析方面, 出现了华伦桁架和豪氏桁架分析方法。

19 世纪 70 年代, 经德国人 K. 库尔曼、英国人 W.J.M. 兰金和 J.C. 麦克斯韦等人的努力, 结构力学获得很大的发展, 能够对桥梁各构件在荷载作用下产生的应力进行分析。这些理论的发展, 推动了桁架、连续梁和悬臂梁的发展。19 世纪末, 弹性拱理论已较完善, 促进了拱桥发展。20 世纪 20 年代土力学的兴起, 推动了桥梁工程基础的理论研究。

3. 现代桥梁的发展

20 世纪 30 年代, 预应力混凝土和高强度钢材相继出现, 材料塑性理论和极限理论的研究、桥梁振动的研究和空气动力学研究, 以及土力学的研究等获得了重大进展。从而为节约桥梁建筑材料、减轻桥重、预计基础下沉深度和确定其承载力提供了科学的依据。现代桥梁按建桥材料可分为预应力钢筋混凝土桥、钢筋混凝土桥和钢桥^[24]。

1928 年, 法国弗雷西内工程师经过 20 年的研究, 用高强钢丝和混凝土制成预应力钢筋混凝土。这种材料克服了钢筋混凝土易产生裂纹的缺点, 使桥梁可以用悬臂安装法、顶推法施工。随着高强钢丝和高强混凝土的不断发展, 预应力钢筋混凝土桥的结构也得到不断改进, 建桥跨度不断提高。

预应力钢筋混凝土桥主要有梁桥、悬臂梁桥、拱桥、桁架桥、刚架桥、斜拉桥等桥型。

瑞士位于 Klosters 镇的 Sunniberg 桥 (图 1.9) 长 526m, 高约 60m, 是阿尔卑斯山上最大的桥梁之一。

法国米约大桥 (图 1.10) 是斜拉索式的长桥。它是目前世界上第二高的大桥, 全长达 2.46km, 但只用 7 个桥墩支撑, 其中 2、3 号桥墩分别高达 245m 和 220m。



图 1.9 瑞士 Sunniberg 桥 (1998 年)

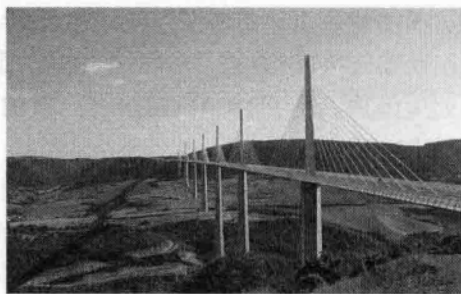


图 1.10 法国米约大桥 (2004 年)

简支梁桥的跨径多在 50m 以下。连续梁桥如 1966 年建成的法国奥莱隆桥, 是一座预应力混凝土连续梁高架桥。

悬臂梁桥如1964年联邦德国在柯布伦茨建成的本多夫桥,其主跨长为209m;中国1980年完工的重庆长江大桥,主跨为174m。

1960年建成的前联邦德国芒法尔河谷桥采用桁架桥,跨径为(90+108+90)m,是世界上第一座预应力混凝土桁架桥。

中国铁路桥梁建设起步较早,有代表性的6座里程碑式的桥梁如下:

(1) 武汉长江大桥(1957年,图1.11),钢桁梁,主跨128m,钢材:Q235。

(2) 南京长江大桥(1968年,图1.12),钢桁梁,主跨160m,钢材:16Mnq。



图 1.11 武汉长江大桥(1957年)



图 1.12 南京长江大桥(1968年)

(3) 九江长江大桥(1993年,图1.13),钢桁拱,主跨216m,钢材:15MnVNq。

(4) 芜湖长江大桥(2000年,图1.14),板-桁斜拉桥,主跨312m,钢材:14MnNbq。



图 1.13 九江长江大桥(1993年)

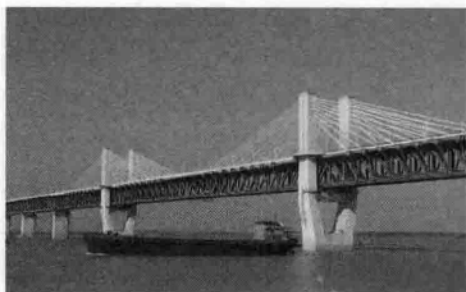


图 1.14 芜湖长江大桥(2000年)

(5) 天兴洲长江大桥(2009年,图1.15),钢桁斜拉桥,主跨504m,钢材:Q370qe。

(6) 大胜关长江大桥(2011年,图1.16),异型钢桁拱,主跨336m,钢材:WNQ570。



图 1.15 天兴洲长江大桥(2009年)



图 1.16 大胜关长江大桥(2011年)

1951 年联邦德国建成的杜塞尔多夫至诺伊斯桥,是一座正交异性板桥面箱形梁,跨径 206m。1957 年联邦德国建成的杜塞尔多夫北桥,是一座 6 孔 72m 钢板梁结合梁桥。1957 年南斯拉夫建成的贝尔格莱德的萨瓦河桥,是一座钢板梁桥,跨径为 (75+261+75)m,为倒 U 形梁。1973 年法国建成的马蒂格斜腿刚架桥,主跨为 300m。1972 年意大利建成的斯法拉沙桥,跨径达 376m,是目前世界上跨径最大的钢斜腿刚架桥。1966 年美国建成的俄勒冈州阿斯托里亚桥,是一座连续钢桁架桥,跨径达 376m。1966 年日本建成的大鸣门桥,是一座连续钢桁架桥,跨径达 300m。1964 年美国建成的纽约维拉扎诺吊桥,主孔 1298m,吊塔高 210m。1966 年英国建成的塞文吊桥,主孔 985m。这座桥根据风洞试验,首次采用梭形正交异性板箱形加劲梁,梁高 3.05m。1980 年英国完工的恒比尔吊桥,主跨为 1410m,也用梭形正交异性板箱形加劲梁,梁高仅 3m^[25]。

20 世纪 60 年代以后,钢斜拉桥发展起来。第一座钢斜拉桥是瑞典建成的斯特伦松德海峡桥,建于 1956 年,跨径为 (74.7+182.6+74.7)m。1959 年联邦德国建成的科隆钢斜拉桥,主跨为 334m;1971 年英国建成的厄斯金钢斜拉桥,主跨 305m;1975 年法国建成的圣纳泽尔桥,主跨 404m。通过对钢斜拉桥抗风抗震性能的改进,使桥的跨径增大^[27]。

1962 年委内瑞拉建成的马拉开波湖桥是斜拉桥,这座桥为 5 孔 235m 连续梁,由悬在 A 形塔的预应力斜拉索将悬臂梁吊起。斜拉桥的梁是悬在索形成的多弹性支承上,能减少梁高,且能提高桥的抗风和抗扭转震动性能,并可利用拉索安装主梁,有利于跨越大河,因而应用广泛。1971 年利比亚建造的瓦迪库夫桥是预应力混凝土斜拉桥,主跨 282m。中国已建成十多座预应力混凝土斜拉桥,1982 年建成的山东济南黄河桥,主跨为 220m^[26]。九江长江大桥的建设发明了双壁钢围堰技术,为江河海洋深水基础施工提出了新方法。

世界上建成的大跨度斜拉桥是俄罗斯岛大桥(图 1.17)主跨 1104m,于 2012 年建成;苏通长江大桥(图 1.18)主跨 1088m,于 2008 年建成;香港昂船洲大桥(图 1.19)主跨 1018m,于 2008 年建成;日本多多罗大桥主跨 890m,于 1999 年建成;美国 Sunshine 桥(图 1.20)主跨 365m,于 1987 年建成。我国至今已建成各种类型的斜拉桥 100 多座,其中 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,中国目前共有 8 座,其中苏通长江大桥主跨 1088m。

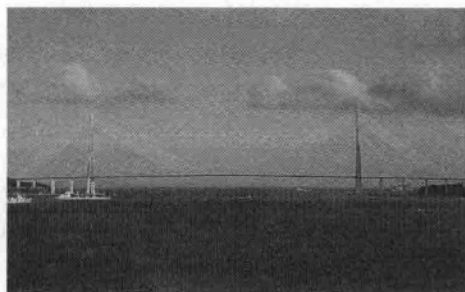


图 1.17 俄罗斯岛大桥(2012 年)



图 1.18 苏通长江大桥(2008 年)

世界上著名的 12 座悬索桥如下:日本明石海峡大桥(图 1.21)主跨 1991m,于 1998 年建成;中国舟山西堠门大桥主跨 1650m,于 2009 年建成;丹麦大带桥主跨 1624m,于 1998 年建成;中国润扬长江大桥主跨 1490m,于 2005 年建成;中国南京长江四桥主跨 1418m,

于 2012 年建成;英国亨伯尔桥主跨 1410m,于 1981 年建成;中国江阴长江大桥主跨 1385m,于 1999 年建成;中国香港青马大桥(图 1.22)主跨 1377m,于 1997 年建成;美国韦拉扎诺桥主跨 1298m,于 1964 年建成;中国坝陵河大桥(图 1.23)主跨 1088m,于 2009 年建成;中国矮寨大桥(图 1.24)主跨 1176m,于 2012 年建成。



图 1.19 昂船洲大桥(2008 年)



图 1.20 美国 Sunshine 桥(1987 年)

美国金门大桥(图 1.7)主跨 1280m,于 1933 年动工,1937 年 5 月竣工。桥长 2737m,桥面宽度 27m,桥塔高度 342m。这两个高 342m 的桥塔直到 1998 年日本明石海峡大桥竣工前还是世界上最高的悬索桥桥塔。

1964 年之前,金门大桥一直是世界上最长的悬索桥,拥有世界上悬索桥中最大跨度的纪录达 27 年之久。2011 年首次进行整体重漆,仍然使用国际橘,这是金门大桥开通 74 年来首次整体重漆。金门大桥新颖的结构和超凡脱俗的外观,使其成为美国乃至整个太平洋西岸的标志性建筑,它被国际桥梁工程界广泛认为是桥梁美学典范。

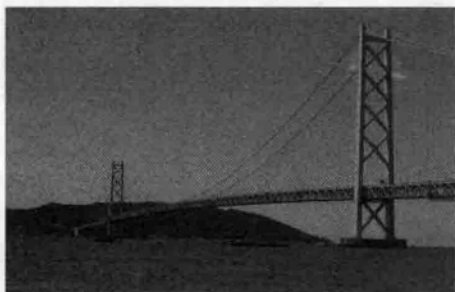


图 1.21 明石海峡大桥(1998 年)



图 1.22 香港青马大桥(1997 年)



图 1.23 坝陵河大桥(2009 年)



图 1.24 矮寨大桥(2012 年)

世界上著名的拱桥如下：阿联酋迪拜赛义德大桥主跨 667m，预计 2015 年建成；中国重庆朝天门大桥(图 1.25)主跨 552m，2008 年建成；中国上海卢浦大桥(图 1.26)主跨 550m，2003 年建成；美国新河谷大桥(图 1.27)主跨 518.2m，1997 年建成；美国贝尔桥Bayonne主跨 504m，1931 年建成；澳大利亚悉尼港大桥主跨 503m，1932 年建成；中国重庆巫山长江大桥主跨 492m，2005 年建成；中国重庆万县长江大桥(图 1.28)主跨 420m，1997 年建成；中国重庆菜园坝长江大桥(图 1.29)主跨 420m，2007 年建成；克罗地亚KRK 大桥含两座拱桥，大跨 390m，小跨 240m，1980 年建成。



图 1.25 重庆朝天门大桥(2009 年)



图 1.26 上海卢浦大桥(2003 年)



图 1.27 美国新河谷大桥(1977 年)

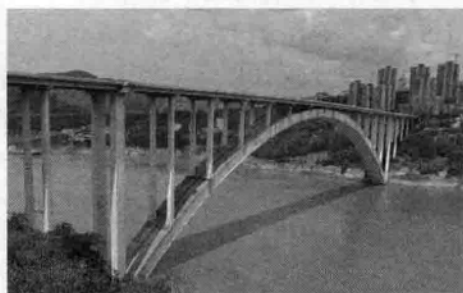


图 1.28 万县长江大桥(1997 年)



图 1.29 重庆菜园坝长江大桥(2007 年)



图 1.30 江界河大桥(1995 年)

迪拜赛义德大桥(图 1.31)是阿联酋一座在建的桥梁，桥梁总长度为 1600m，主跨 667m，建成后将成为世界上跨度最大、桥拱最高的拱桥。大桥宽 64m，高 190m，桥下至水面净空高 15m。大桥将耗资 25 亿迪拉姆，预计 2015 年建成。