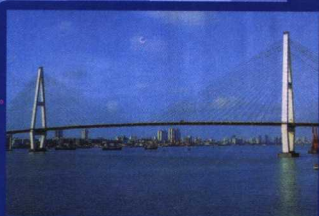
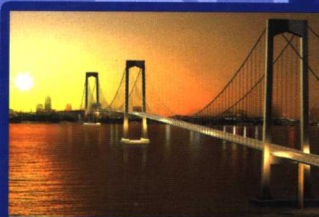


Long Span Bridge

大跨度桥梁 结构理论与应用

Structure Theory and Application

雷俊卿 编著
钱冬生 主审

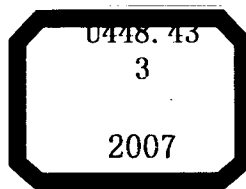


清华大学出版社



北京交通大学出版社





大跨度桥梁结构理论与应用

雷俊卿 编著
钱冬生 主审



清华大学出版社
北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

《大跨度桥梁结构理论与应用》一书,是为土木工程专业本科生开设的专业拓展课程教材,也是为桥梁工程专业研究生开设的专业课程而编写的教材。

本教材重点讲述大跨度桥梁的梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥的主要结构形式、构造特点、基本理论、力学分析、基本设计原则与设计计算方法;结合稳定和疲劳理论、大跨度桥梁设计与施工的专业技术规范与理论,可使学生完成由基础理论知识到实际大跨度桥梁结构研究、设计计算、施工与应用的过渡。教材重视基础理论的系统性与完整性,加强大跨度桥梁结构理论与桥梁典型案例实践的结合,每类大跨度桥梁结合2~4个实际典型桥例,使学生和工程技术人员学以致用。

读者对象:主要用作大学四年级土木工程专业本科生的专业拓展课程教材、桥梁与隧道工程专业和防灾与减灾专业研究生的专业课程教材;部分还可供博士研究生继续深造使用;也可供各桥梁科研、设计、施工、管理的专业技术人员与领导参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

大跨度桥梁结构理论与应用/雷俊卿编著. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2007.3

ISBN 978-7-81082-949-6

I. 大… II. 雷… III. 长跨桥-桥梁结构 IV. U448.433

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第018233号

责任编辑:赵彩云

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969 <http://www.tup.com.cn>

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京瑞达方舟印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:21 字数:525千字

版 次:2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81082-949-6/U·15

印 数:1~4000册 定价:30.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监局反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

《大跨度桥梁结构理论与应用》，是土木工程专业本科生的专业拓展课程教材，是桥梁与隧道工程专业硕士研究生的专业课程教材，部分还可供博士研究生继续深造；也可供从事桥梁科研、设计、施工、管理的专业技术人员与领导参考。

目前，国内外还没有专门的大跨度桥梁教材或专著，《大跨度桥梁结构理论与应用》教材的编写，必将填补这方面的空白，属于开拓性工作。大跨度桥梁的梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等内容都分散于各本专著之中，不利于教学的开展。为了搞好土木工程专业本科生的专业拓展课程建设，搞好桥梁与隧道专业研究生的专业课程建设，编写《大跨度桥梁结构理论与应用》教材，是非常必要和及时的。

2006年，北京交通大学土木建筑工程学院开设的《桥梁工程》课被评为北京高等教育精品课。为了完善《桥梁工程》系列精品课程建设，力争建设成国家级精品课，需要进行《桥梁工程》系列课程的教材建设。因此，有必要编写《大跨度桥梁结构理论与应用》教材，以利于教学工作的深入开展。

桥梁是架起来的路，它们横跨江河湖海，飞越深沟峡谷，使天堑变通途。在中国辽阔美丽的大地上，山川河流交织，桥梁多姿多彩。桥梁的发展与国民经济发展、科学技术进步、文化教育水平等密不可分。随着中国近年来所开展的全球最大规模的交通基础设施建设，通过引进和自主创新相结合，中国的桥梁科技和工程建设突飞猛进、日新月异，取得了大量的创新成果。我国现有各类桥梁总数约为50万座，其中半数的桥梁，约合66%的桥梁总长度，是在过去15年里建成的。这一个时期建设的桥梁工程的特点是桥梁类型多、跨径突破大、技术进步快、自主创新强。

在铁路大跨度桥梁方面，在武汉长江大桥（连续钢桁梁，主跨为128 m，1957年建成）、南京长江大桥（连续钢桁梁，主跨为160 m，1968年建成）、九江长江大桥（连续钢桁梁，其中有三跨连续柔性钢拱桥，主跨为216 m，1995年建成）的基础上，芜湖长江大桥（主跨312 m，2000年建成）成为全世界公铁两用的、跨度最大的、钢桁与混凝土桥面板结合的矮塔斜拉桥；在建的武汉天兴洲长江大桥（主跨504 m）则是世界上跨度最大、荷载最重的公铁两用三片主桁的钢桁架斜拉桥；而京沪高速铁路南京大胜关长江大桥又将是世界上跨度最大、荷载最重的公铁两用连续钢桁架拱桥（主跨336 m）。

在公路和城市大跨度桥梁方面，二十余年来我国高速公路建设迅猛发展，公路和城市桥梁经历了一个辉煌的发展时期，建成了一大批结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、现代化品位和科技含量高的大跨度桥梁。特别是在大跨度桥设计、制造、施工和质量检测方面积累了丰富的设计和施工经验，取得了举世瞩目的成就。重庆石板坡大桥（钢和混凝土混合梁，主跨330 m）跨径居实腹梁式桥的世界第一；上海卢浦大桥（三跨系杆钢箱拱桥，主跨550 m）、重庆巫山长江大桥（钢管拱桥，主跨460 m）分别位居同类拱桥跨径的世界首位；南京长江三桥（主跨648 m）和二桥（主跨628 m）分别居于世界斜拉桥跨径的第3和第4

位；润扬长江大桥（主跨 1 490 m）和江阴长江大桥（主跨 1 385 m）分别居于世界悬索桥跨径的第 3 和第 5 位。在风大浪急、气候恶劣的海象条件下，还成功地修建了 32.5 km 长的东海大桥，使洋山深水港成为上海市的海港；而 36 km 长的杭州湾跨海大桥也已在建设之中。此外，还有几座世界级的桥梁正在建设，例如，苏通长江大桥（主跨 1 088 m）和香港昂船洲大桥（主跨 1 018 m），它们是世界跨度超千米的斜拉桥，舟山西堠门大桥将成为世界第二大跨度（主跨 1 650 m）的悬索桥，重庆朝天门长江大桥将成为世界最大跨径（主跨 552 m）的钢桁肋拱桥等。

随着我国大跨度桥梁的日益增多，在大跨度桥梁科研、设计、施工、质量检测及验收等方面已积累了不少的宝贵经验。总结我国桥梁工程建设积累起来的成功技术和宝贵经验，探索桥梁建造技术创新的方向，是有现实意义且非常必要的。这也为《大跨度桥梁结构理论与应用》教材的编写创造了有利条件。但与国外同类技术相比，我国还有很多方面需要引进与自主创新相结合而继续发展。大跨度桥梁结构理论和应用，涉及内容较多，还存在缺少可遵循的规范及理论不够完善尚需继续研究的状况，急需总结，编写成专著和教材。

《大跨度桥梁结构理论与应用》教材，针对大跨度桥梁的梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥的主要结构形式、构造特点、基本理论、力学分析、基本设计原则与设计计算方法，结合大跨度桥梁设计与施工工程实践，完成由基础理论知识到实际大跨度桥梁结构研究、设计、施工与应用的过渡。本书重视桥梁基础理论的系统性与完整性，重视大跨度桥梁结构理论与大跨度桥梁典型案例的结合，每类大跨度桥梁将结合 2~4 个实际桥例，使学生和工程技术人员可以学以致用。

在本教材的编写过程中，得到了北京交通大学学校与相关部门领导、土木建筑工程学院的领导和老师们的关心和大力支持；得到北京交通大学出版社的领导和编辑们的关心和通力协作，特别是赵彩云编辑的辛勤劳动；得到北京交通大学教材出版基金的资助。谨在此表示衷心感谢！

在本教材的编写过程中，西南交通大学 88 岁高龄的钱冬生教授认真负责地主审了本教材，除总体把关外，对于关键部分，还逐字逐句修改，令作者感激不尽；钱冬生教授治学的严谨、为人的高尚风范、培养后人的无私奉献精神，值得我们学习。西南交通大学的强士中教授、李亚东教授等，都对本书的编写提出了宝贵的修改意见。作者还大量地引用了桥梁科研、设计、施工等专业技术人员发表的文献资料，谨在此表示由衷的敬意和感谢！

在本教材的编写过程中，我的研究生李华明、林昱、董春燕、孙勇、赵磊在资料整理、编写与校对方面做了大量的工作。还得到我已毕业的 10 多位研究生的大力协助，以及作为读者所提出的宝贵编写意见。谨在此表示衷心的感谢！

本教材由雷俊卿教授编著第 1~9 章，夏禾教授和郭薇薇讲师参编第 10 章。本教材是在雷俊卿教授自编讲义《大跨度桥梁》的基础上，进一步完善编写而成。该讲义曾在本科生中使用一届、在研究生中使用三届。由于本教材编写时间较紧，教材中出现缺点错误在所难免，敬请同行专家和读者批评指正，我们会继续修改与完善。来信请寄：邮编 100044 北京市西直门外上园村 3 号 北京交通大学 土建学院 雷俊卿 收；电子邮件请发送到：lei_jq@126.com；电话请直拨：010-51683769。

雷俊卿

2007 年 2 月于北京交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大跨度桥梁结构理论与应用课程简介	1
1.2 我国大跨度桥梁建设的伟大成就	2
1.3 大跨度桥梁的组成与分类	7
1.4 大跨度桥梁的创新与发展	8
参考文献	11
第 2 章 大跨度钢桥疲劳计算理论和方法	12
2.1 概述	12
2.2 抗疲劳设计原理	13
2.3 荷载谱与应力谱	25
2.4 钢桥抗疲劳设计的一般方法	28
2.5 正交异性钢桥面板的疲劳验算	31
2.6 钢桥结构的疲劳评估	34
2.7 钢桥结构的疲劳监测与应用	35
2.8 小结	36
参考文献	37
第 3 章 大跨度桥梁的稳定理论	39
3.1 概述	39
3.2 第一类弹性及弹塑性稳定分析	41
3.3 拱桥稳定分析和非保向力效应	43
3.4 第二类稳定问题和极限承载力全过程分析	47
3.5 大跨度桥梁的稳定性应研究的内容	49
3.6 小结	51
参考文献	51
第 4 章 正交异性钢桥面板的计算分析	52
4.1 概述	52
4.2 正交异性板平衡微分方程式及其解	53
4.3 Pelikan-Esslinger 法 (P-E 法)	58
4.4 有限条分析法和有限元法	74
4.5 正交异性钢桥面板与桥面铺装层共同作用的分析	74
4.6 小结	75
参考文献	75

第 5 章 大跨度梁类桥计算理论与应用	77
5.1 概述	77
5.2 大跨度混凝土梁类桥结构的基本原理	81
5.3 大跨度混凝土梁桥温度变化引起的附加内力与变形计算分析	82
5.4 大跨度梁类桥混凝土收缩徐变引起的附加内力与变形的计算分析	94
5.5 大跨度梁类桥因基础不均匀沉降引起的附加内力与变形的计算分析	97
5.6 大跨度 PC 梁类桥的挠度与开裂问题分析	98
5.7 大跨度混凝土梁类桥的典型应用桥例	103
5.8 小结	112
参考文献	112
第 6 章 结合梁桥计算理论与应用	114
6.1 概述	114
6.2 符号系统	114
6.3 结合梁桥的计算原理	116
6.4 结合梁桥中的混凝土徐变效应计算分析	118
6.5 连续结合梁桥的内力计算分析	129
6.6 混凝土收缩内力计算	133
6.7 结合桥梁工程应用实例	133
6.8 小结	142
参考文献	144
第 7 章 大跨度拱桥的计算理论与应用	145
7.1 概述	145
7.2 大跨度拱桥挠度理论的控制方程与求解	157
7.3 变截面拱的方程与基本解	162
7.4 等截面拱的摄动法简介	171
7.5 大跨度拱桥的非线计算分析	174
7.6 大跨度拱桥工程应用实例	176
7.7 小结	198
参考文献	198
第 8 章 斜拉桥计算理论与应用	200
8.1 概述	200
8.2 斜拉桥恒载受力状态的变化	205
8.3 斜拉桥有限位移理论分析	211
8.4 斜拉桥的稳定计算	214
8.5 考虑二阶效应的近似计算	218
8.6 大跨度斜拉桥斜拉索的风雨振分析	219
8.7 大跨度斜拉桥工程应用实例	226
8.8 小结	233
参考文献	233

第 9 章 悬索桥计算理论与应用	235
9.1 概述	235
9.2 悬索桥设计与分析理论	240
9.3 悬索桥施工至成桥状态的精确分析	246
9.4 索塔结构分析	249
9.5 数值风洞或虚拟风洞	251
9.6 悬索桥的工程实例	251
9.7 小结	277
参考文献	277
第 10 章 大跨度桥梁的振动理论与应用	279
10.1 大跨度桥梁的振动分类	279
10.2 列车作用下大跨度桥梁的振动问题	287
10.3 车桥系统动力相互作用分析模型	296
10.4 车桥系统共振机理	312
10.5 车桥系统动力响应分析应用实例	317
10.6 小结	326
参考文献	326

第 1 章 绪 论

桥梁是线路的组成部分,大型桥梁往往是交通的咽喉要道,在国民经济建设中起着举足轻重的作用。桥梁是随着国民经济发展对交通的需求和科学技术的进步而发展的。20 世纪世界桥梁发展突飞猛进,形成了一整套设计施工理论体系。中国桥梁技术紧跟世界桥梁技术的发展潮流,形成了完备的设计理论、设计方法、施工技术和科研体系。改革开放以来,桥梁的建设规模、建设速度和技术创新都进入了一个前所未有的飞速发展的黄金时期,建成了一大批结构新颖、技术复杂、设计和施工难度大、现代化品位和科技含量高的大跨度桥梁。

大跨度钢桥和结合桥是各种桥梁类型中最有竞争力的桥梁,特别是在跨越大江、大河及海峡时,大跨度钢桥和结合桥以其轻质、高强、美观、快速及跨越能力大等特点而成为首选之桥型。20 世纪后半叶,预应力混凝土桥梁迅猛发展,与大跨度钢桥展开了激烈竞争,促使大跨度钢桥在材料性能、结构类型、制造加工、施工架设等方面不断开拓与创新,越来越向长大跨度的极限挑战,如中国润扬长江公路大桥主跨已达 1 490 m,日本明石海峡大桥主跨已突破 1 990 m。但是,由于以往大跨度桥较少,没有对大跨度桥的科技设计施工及各个方面做过系统研究,空白点比较多。在这种条件下,对大跨度桥梁的设计、施工等技术及科研教学发展进行专题讨论研究便具有重大的现实意义。

二十年来,我国桥梁建设有了突飞猛进的发展。交通部和铁道部都提出交通建设要实现技术创新的跨越式发展,桥梁建设从初期的简单积累、模仿,到现在已进入到跨越式发展阶段。在此阶段,桥梁工程技术陆续涌现出一大批创新成果。桥梁建设向“更长、更高、更轻”的趋势发展,许多大跨度桥梁都采用了结合结构以应对这一需求。如大跨度悬索桥有广东虎门大桥、江苏江阴长江大桥、福建厦门海沧大桥、湖北宜昌长江大桥、西陵长江大桥、江苏润扬长江大桥、浙江舟山大陆连岛跨海的西堠门大桥、武汉阳逻长江大桥等;大跨度斜拉桥有南京长江二桥、南京长江三桥、武汉军山长江大桥、深港西通道跨海大桥、杭州湾跨海大桥、上海崇明长江大桥、上海闵浦大桥、香港昂船洲大桥、江苏苏通长江大桥等;钢—混凝土结合斜拉桥有上海南浦大桥、杨浦大桥、徐浦大桥、福州青江闽州大桥等;钢—混凝土混合接力型斜拉桥有武汉白沙洲长江大桥、浙江舟山大陆连岛跨海的桃夭门大桥等;钢拱桥有上海卢浦大桥、重庆菜园坝长江大桥、厦门钟宅湾大桥、舟山新城大桥等;南京长江三桥还采用了钢塔结构,在建中的苏通大桥和杭州湾跨海大桥的主塔锚固区采用了钢锚箱的钢和混凝土结合结构。许多造型独特的城市桥梁由于受力比较复杂,也采用了钢结构,如佛山平胜自锚式悬索桥和长沙三汊矶自锚式悬索桥等。

1.1 大跨度桥梁结构理论与应用课程简介

(1) 大跨度桥梁结构理论与应用课程的地位

“大跨度桥梁结构理论与应用”是土木工程专业任选课,是为大学四年级本科生开设的桥梁方向拓展课,是为桥梁与隧道工程专业硕士研究生开设的对桥梁方向深入学习研究的

课程。其中部分内容可供博士研究生学习深造使用。

(2) 大跨度桥梁结构理论与应用教学的主要内容

该课程主要的教学内容为大跨度桥梁的构造原理、结构受力与变形的原理、设计与计算理论和方法、施工技术与典型大跨度桥梁工程案例；课程的主要内容为大跨度桥梁总体绪论，讲述梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等结构理论和计算方法、各种典型桥梁案例，以及与此相关的疲劳、稳定等计算理论和方法。

(3) 与该课程教学相关的课程

主要有大学四年级和硕士研究生已经学习过的“结构力学”、“桥梁工程”、“混凝土桥设计”、“钢桥设计”、“桥梁施工”、“桥梁电算”、“有限元程序设计”、“桥梁高等预应力混凝土结构”、“工程抗震”及其他专题报告等。

大跨度桥梁是各种线路工程的关键所在，是交通生命线的咽喉要道，主要体现在总的跨度大、难度大、造价高、工期长，又是跨越大江大河和海峡的主要方法。大江大河如黄河、长江等，海峡如琼州海峡、台湾海峡通道等，而且也是跨越山谷等障碍的首选。

1.2 我国大跨度桥梁建设的伟大成就

改革开放以来，尤其是 20 世纪 90 年代以来，随着国民经济和交通事业发展的需要，我国高速公路和高速铁路的建设得到了前所未有的发展，大跨度桥梁建设进入了一个崭新的发展时期。在这一历史阶段，各种桥梁形式建设都取得了斐然成绩。在已经通车和正在建设的前十名世界级桥梁中，我国的梁桥占 4 座（排名详见表 1-1），拱桥占 5 座（排名详见表 1-2），斜拉桥占 8 座（排名详见表 1-3），悬索桥占 5 座（排名详见表 1-4）。

1.2.1 大跨度梁类桥

钢梁桥可分为钢板梁桥和钢桁架梁桥。简支钢桁架梁最大跨度为 192 m 的四川三堆子金沙江桥，位于成都至昆明的铁路线上，一孔简支，桁高 24 m、桁宽 10 m，主梁与横梁采用 16Mnq 低合金钢，其余杆件用 A3 钢，钢梁用伸臂法施工，于 1969 年 10 月建成。

钢桁架连续梁桥方面，中国有 1957 年建成通车的武汉长江大桥，为 3 联 3×128 m 的钢桁架连续梁桥（公铁两用）；1968 年建成通车的南京长江大桥，为 3 联 3×160 m 的钢桁架连续梁桥（公铁两用）；1972 年 10 月建成通车的山东北镇黄河公路钢桁架连续梁桥 4×112 m；1977 年建成的北京白河铁路钢桁架连续梁桥 3×128 m，采用了 15MnVNq 新钢种。

各国修建了不少的钢连续梁桥或悬臂梁桥。世界上最大跨度的钢桁架梁桥是加拿大的魁北克桥，主跨达到 548.64 m，于 1918 年建成，为公铁两用的静定悬臂桁架梁桥。

我国 1982 年建成的陕西安康汉江斜腿刚架桥，主跨为 176 m，这座铁路大跨度斜腿刚架钢桥迄今为止仍是世界同类桥型跨度之冠。

钢与混凝土结合结构桥梁方面，逐步进行波纹钢腹板结合梁桥、钢桁架腹杆结合梁桥、钢管混凝土结合梁桥、钢管混凝土桁架桥、钢桁架与混凝土桥面板结合桁架梁、钢与混凝土混合梁斜拉桥等新型结合结构桥梁的研究与实施，对各种新型结合桥梁结构正在制定相应的设计和施工规范。

1886 年至 1928 年间，预应力混凝土技术经历了尝试、发明、试运用的过程。1928 年法

国人 E·弗莱西奈开始采用高强度钢丝施加预应力,标志着现代预应力混凝土进入一个新的发展阶段。1939 年,在发明了安全又经济的张拉方法和端头锚具后,预应力混凝土技术开始得到广泛的应用。尤其是在第二次世界大战后,德国和法国等西欧国家因受战争的破坏,大量桥梁急需修复,而当时钢材奇缺,这为预应力桥梁的发展提供了非常有利的环境,预应力混凝土桥于是大量涌现出来。连续梁桥的发展中,由于各桥具体条件不同,存在着两个突破方向,其中一个即是向大跨度发展,这方面较有代表性的有我国主跨 100 m 全连续长度 1 308 m 的襄樊汉江长虹大桥及主跨 80 m 全连续长度 1 340 m 的杭州钱塘江二桥。

随着连续梁桥跨径的增大,这种结构的支点反力大幅度增加,一座跨径在 100 m 左右、桥宽在 12 m 左右的连续梁桥,一个桥墩上往往需要至少安装 2 个承载能力在 2 000 吨以上的支座;而一座跨径在 170 m 左右、桥面宽在 12 m 左右的连续梁桥,一个桥墩上往往需要至少安装 2 个承载能力在 4 000 吨以上的巨型支座,大反力的巨型支座设计制造和后期的养护变成了一个十分重要的问题,同时造价也是很昂贵的。现阶段国内外大反力支座绝大部分为橡胶盆式支座,桥梁投入运营几十年后,由于橡胶的老化,使支座的性能降低而引起的支座更换问题,将会成为桥梁界的一个新难题。

刚构桥是墩梁固结结构,因而没有连续梁桥支座的问题,在墩顶与主梁固结的这一区域,构造和受力远较连续梁桥简单。能否将刚构桥不设支座的优点和连续梁桥上部变形连续、使用性能好的优点结合起来呢?源于这样的构思,连续刚构桥梁开始出现,连续刚构桥在墩顶是一个墩梁固结的 T 型结构,在跨中合拢区域是一个连续结构。其上部主梁的受力与连续梁桥大致类似;下部桥墩由于结构的整体性,温度和收缩徐变造成的内力十分显著,但一般来讲,如果全连续长度在 600 m 左右,桥墩的受力基本没有问题。这方面世界上较有代表性的刚构桥梁为挪威于 1998 年建成的主跨 298 m 的纳夫·山德桥(Raft Sundet),全长 $86+202+298+125=711$ m;我国 1997 年建成的主跨 270 m 的虎门大桥辅航道桥,全长 $150+270+150=570$ m。澳大利亚 1985 年建成的著名的主跨 260 m 的门道桥(Gateway),它曾保持世界最大混凝土梁式桥纪录达 12 年之久,全长 $145+260+145=550$ m。

随着计算机技术的发展,梁部设铰的 T 型刚构桥逐步失去市场,连续梁桥成为混凝土桥梁的主要桥型,1984 年建成的湖北沙洋汉江大桥,桥跨布置为 $62.4+6\times 111+62.4=790.8$ m,是我国首座跨径逾百米的预应力混凝土连续梁桥;1990 年建成的主跨 100 m 的湖北宜城汉江大桥,是国内首座大跨度双支点连续梁桥,国内有代表性的连续梁桥还有 1986 年建成的主跨 120 m 的湖南常德沅水大桥和 1991 年建成的主跨 154 m 的云南六库怒江大桥,目前国内最大的预应力混凝土连续梁桥是已经完工的主跨 165 m 的南京长江第二大桥北汊桥。

由于有大跨度 T 型刚构桥和大跨度连续梁桥建造的基础,国内的连续刚构桥一开始就有较高的起点,1988 年建成的广东的洛溪大桥为我国较早建造的连续刚构桥,该桥的跨径组合为 $65+125+180+110=480$ m,其主跨径居当时亚洲混凝土梁式桥之首、世界第七。十多年过去了,虽然连续刚构桥在我国取得了很大发展,但该桥的一些设计理念对现在的混凝土桥梁设计还有很大的影响。洛溪桥之后,连续刚构桥的设计可以说是异彩纷呈,跨径纪录屡屡被打破,较有影响的桥梁有 1993 年建成的主跨 160 m 的三门峡黄河大桥,1996 年建成的主跨 245 m 的黄石长江大桥等,1997 年建成的主跨 270 m 的虎门大桥辅航道桥,打破了澳大利亚门道桥的跨径纪录。表 1-1 列出了目前全世界主跨 250 m 以上的预应力混凝土梁类桥。

表 1-1 世界主跨 250 m 以上的混凝土梁类桥一览表

序号	桥 名	主跨/m	国 家	竣工时间
1	重庆石板坡大桥 (主跨 PC 混凝土梁加钢梁)	330	中 国	2007
2	斯托尔马大桥 (PC 混凝土)	301	挪 威	1998
3	Raft Sundet 大桥 (PC 混凝土)	298	挪 威	1998
4	Sundoya 桥	298	挪 威	2003
5	Asuncion 桥 (多跨带铰 PC T 构)	270	巴 拉 圭	1979
6	广东虎门大桥辅航道桥 (PC)	270	中 国	1997
7	苏通大桥辅航道桥 (PC)	268	中 国	2008
8	门道大桥 (PC)	260	澳大利亚	1986
9	瓦罗地 2# 大桥 (PC 混凝土)	260	挪 威	1994
10	宁德下白石大桥	260	中 国	2003
11	隆纳高速泸州长江二桥	252	中 国	2000
12	奥坡托大桥 (PC)	250	葡 萄 牙	1991
13	SKYE 大桥 (PC)	250	英 国	1995
14	重庆黄花园嘉陵江大桥	250	中 国	1999
15	重庆马鞍石嘉陵江大桥	250	中 国	2002

1.2.2 大跨度拱桥

在中国大跨度拱桥近年来的发展也很迅速。根据工程条件不同采用了支架法、劲性骨架法、缆索吊装架设法、转体法等施工技术。广州丫髻沙大桥 (主跨 312 m 的中承式钢管混凝土拱桥)、重庆万县长江大桥 (主跨 420 m 的型钢劲性骨架混凝土拱桥)、上海卢浦大桥 (主跨 550 m 的中承式钢箱拱桥) 均创造了该类型拱桥的世界纪录。自 20 世纪 90 年代以来, 已建成跨径大于 200 m 的十余座钢管混凝土拱桥, 如巫山长江大桥 (主跨 460 m)。这些钢与混凝土结合的钢管混凝土拱桥的建成, 标志着中国在这一领域达到了世界先进水平。

表 1-2 列出了目前全世界主跨 400 m 以上的拱桥。

表 1-2 世界主跨 400 m 以上的拱桥一览表

序号	桥 名	主跨/m	国 家	竣工时间
1	重庆朝天门长江大桥 (钢桁拱)	552	中 国	2008
2	上海卢浦大桥 (钢箱拱)	550	中 国	2003
3	韩国傍花大桥	540	韩 国	2000
4	美国新河谷 (New River Gorge) 桥	518	美 国	1977
5	美国纽约贝永 (Bayonne) 桥	503.6	美 国	1931
6	悉尼港公铁两用大桥 (钢桁拱)	503	澳大利亚	1932
7	印度卡特拉 Chenab 桥	480	印 度	2007
8	巫山长江大桥 (钢管混凝土拱)	460	中 国	2005
9	湖北支井河特大桥 (钢管混凝土拱)	430	中 国	在建
10	中国广州新光大桥	428	中 国	2006
11	重庆万县长江大桥	420	中 国	1997
12	重庆菜园坝长江大桥 (钢桁、钢箱组合拱)	420	中 国	2008

1.2.3 大跨度斜拉桥

斜拉桥作为一种缆索承重体系,比梁类桥有更大的跨越能力,并具有良好的力学性能和经济指标,已成为最主要的大跨度桥梁桥型,在跨径 200~800 m 的范围内占据优势,在跨径 800~1 100 m 的特大跨度中也将扮演重要角色。我国已建成各种类型斜拉桥近 200 座,其中跨径大于 200 m 的有 50 多座,已成为拥有斜拉桥最多的国家。多年来,我国在钢斜拉桥及钢混结合或混合斜拉桥设计、施工技术、施工控制、斜拉索的防风雨振等方面,积累了丰富的经验。1991 年建成的主跨为 423 m 的结合梁斜拉桥——上海南浦大桥开创了我国修建 400 m 以上大跨度斜拉桥的先例,大跨度斜拉桥如雨后春笋般发展起来。据不完全统计,到目前为止,中国在建和业已建成的跨度大于 400 m 的斜拉桥共有 29 座。整体来说,我国斜拉桥的设计施工水平已进入国际先进行列,部分成果达到国际领先水平。我国正在建设的香港昂船洲大桥、江苏苏通长江大桥,均为钢斜拉桥,其主跨均达到 1 000 m 以上。

中国钢斜拉桥的发展,方兴未艾,具有强劲的势头,并开始出现多跨斜拉桥。已建成的钢箱斜拉桥如南京长江第二大桥南汊桥,主跨 628 m;武汉军山长江大桥,主跨 460 m;南京长江第三大桥,主跨 648 m;还有白沙洲大桥、东海大桥、杭州湾跨海大桥等。结构不断趋于轻型化,从初期的钢斜拉桥,发展为结合梁和接力型斜拉桥。近几年我国开始修建钢与混凝土的接力型斜拉桥,如汕头岩石大桥,主跨 518 m;已建成的上海南浦大桥(主跨 423 m)和杨浦大桥(主跨 602 m)及安徽芜湖长江公铁两用大桥(主跨 312 m)等为钢与混凝土的结合梁斜拉桥。香港汲水门桥($L=430$ m, 1997 年)和汀九桥($L=475+448$ m, 1998 年)也成为中国桥梁大家庭的成员。

中国斜拉桥的钢主梁以正交异性板钢箱为主,也有边箱中板式、钢桁架梁式等。现在已建成的斜拉桥有独塔式、双塔式和三塔式。以钢筋混凝土塔为主,但南京三桥为钢桥塔。塔形有 H 形、倒 Y 形、A 形、钻石形等。斜拉索仍以传统的平行镀锌钢丝、冷铸锚头为主。汕头岩石大桥采用了钢绞线斜拉索。钢绞线用于斜拉索,无疑使施工操作简单化,但外包 PE 的工艺还有待研究。拉索一般采用自锚体系,但也有用自锚和部分地锚相结合的斜拉桥,如西班牙的鲁纳(Luna)桥,主桥 440 m;我国的湖北郧县汉江大桥,主跨 414 m。地锚体系使得斜拉桥的跨径布置能够结合地形条件,节省建桥费用。

正在建设的苏通长江公路大桥主跨为 1 088 m,它成为世界跨度最长的斜拉桥;正在建设的香港昂船洲(Stonecutters)大桥主跨 1 018 m,为分离双箱斜拉桥。表 1-3 列出了目前在建和已建成的全世界 600 m 以上跨径的斜拉桥排名情况。

表 1-3 世界主跨 600 m 以上的斜拉桥一览表

序号	桥 名	主跨/m	国 家	竣工时间
1	苏通长江大桥	1 088	中 国	2008
2	香港昂船洲大桥	1 018	中 国	2008
3	多多罗大桥	890	日 本	1998
4	诺曼底大桥	864	法 国	1994
5	上海长江大桥	730	中 国	在建
6	上海闵浦大桥	708	中 国	在建

续表

序号	桥 名	主跨/m	国 家	竣工时间
7	南京长江第三大桥	648	中 国	2005
8	南京长江第二大桥	628	中 国	2000
9	浙江舟山金塘跨海大桥	620	中 国	在建
10	武汉长江公路第三大桥 (白沙洲大桥)	618	中 国	2000
11	福州青洲大桥	605	中 国	1997
12	上海杨浦大桥	602	中 国	1993

1.2.4 大跨度悬索桥

当跨径大于 800 m 时,悬索桥方案几乎具有垄断地位。中国悬索桥的建设在 20 世纪 90 年代大量展开,建成的有:湖北省西陵长江大桥(主跨 900 m);广东虎门大桥(主跨 888 m);宜昌长江大桥(主跨 960 m);厦门海沧大桥,三跨悬吊连续,其跨径为 230 m+648 m+230 m,可称世界同类桥梁的第二位;江苏江阴长江大桥(主跨 1 385 m);重庆忠县的长江大桥(主跨 560 m 的钢管桁梁悬索桥);公铁两用桥名列第一位的香港青马大桥(主跨 1 377 m);江苏润扬长江大桥南汊钢悬索桥(主跨 1 490 m)等。正在开工建设浙江舟山西堠门大桥(主跨 1 650 m 的钢箱梁悬索桥)、香港青龙大桥(主跨 1 418 m 的钢箱梁悬索桥)、贵州坝陵河大桥(主跨 1 088 m 的钢桁梁悬索桥)、湖南矮寨钢桁梁悬索桥等大跨度悬索桥。由此可见,现代悬索桥在我国已具有相当规模和水平,且已进入世界悬索桥的先进行列。

随着悬索桥跨径的增大,动力问题将是一个突出的矛盾。所以,对特大跨桥梁来讲,斜拉桥和悬索桥混合而成的接力型体系桥梁也成为近年来国内外研究的一个热点。这种桥型目前还在研究之中,并未在特大桥付诸实施。另外,近年来自锚式悬索桥、单主缆悬索桥、独塔悬索桥、多塔悬索桥等结构形式也有新的发展。

悬索桥逐渐向超大跨发展,珠江口连接香港、珠海、澳门的港珠澳大桥提出了 1 688 m 钢悬索桥方案,青岛—黄岛连接工程和舟山连岛工程中都提出了跨径超过 1 600 m 的钢悬索桥方案,在跨越长江口的崇明越江通道工程中也提出了跨径 2 300 m 的钢悬索桥方案。表 1-4 列出了目前世界十大悬索桥的排名。

表 1-4 世界十大悬索桥一览表

序号	桥 名	主跨/m	国 家	竣工时间
1	明石海峡大桥	1 991	日 本	1998
2	舟山西堠门大桥	1 650	中 国	在建
3	大贝耳特海峡东桥	1 624	丹 麦	1998
4	润扬长江大桥	1 490	中 国	2005
5	亨伯桥	1 410	英 国	1981
6	江阴长江大桥	1 385	中 国	1999
7	香港青马大桥	1 377	中 国	1997
8	维拉扎诺桥	1 298	美 国	1964
9	金门大桥	1 280	美 国	1937
10	武汉阳逻长江大桥	1 280	中 国	在建

1.2.5 中国大跨度桥梁的建设成就

截至 2005 年年底,我国公路桥梁的总数已达 336 648 座,共计 14 747 542 延米;其中特大桥 402 座,共计 310 059 延米;大桥 7 665 座,共计 1 895 594 延米。全国铁路公路和城市桥梁等共有约 50 万座,而大跨度桥梁数以百计。

1.3 大跨度桥梁的组成与分类

1.3.1 大跨度桥梁的组成

大跨度桥梁的组成包括:桥跨结构及其支座、桥墩、桥台、桥梁基础等。

- ① 桥跨结构及其支座(也叫上部结构):直接承受使用荷载。
- ② 桥墩、桥台(也叫下部结构):将上部结构的荷载传递到基础中去;挡住路堤的填土;保证桥梁的温差伸缩。
- ③ 桥梁基础:将桥梁结构的反力传递到地基。

1.3.2 大跨度桥梁的分类

- ① 按跨径大小分类:我国公路工程技术标准桥梁分类,如表 1-5 所示。

表 1-5 中国公路工程技术标准桥梁分类表

桥梁分类	多孔跨径总长 L/m	单孔跨径 L_k/m
特 大 桥	$L \geq 1\,000$	$L_k \geq 150$
大 桥	$100 \leq L < 1\,000$	$40 \leq L_k < 150$
中 桥	$30 < L < 100$	$20 \leq L_k < 40$
小 桥	$8 \leq L \leq 30$	$5 \leq L_k < 20$

- ② 国际特大跨度桥梁分类标准,如表 1-6 所示。

表 1-6 国际特大跨度桥梁分类表

桥 型	跨径 L_k/m	桥 型	跨径 L_k/m
悬索桥	$L_k \geq 1\,000$	混凝土拱桥	$L_k \geq 300$
斜拉桥	$L_k \geq 500$	混凝土梁桥	$L_k \geq 200$
钢拱桥	$L_k \geq 500$		

1.3.3 大跨度桥梁的类型

- (1) 按桥面的位置划分

上承式——视野好、建筑高度大;

下承式——建筑高度小、视野差;

中承式——兼有上面两者的特点。

- (2) 按桥梁用途来划分

可分为公路桥、铁路桥、公路铁路两用桥、农用桥、人行桥、运水桥（渡槽）和其他专用桥梁（如通过管路、电缆等）。

（3）按材料来划分

可分为大跨度预应力混凝土桥，大跨度钢桥，大跨度钢与混凝土结合类桥。

（4）按结构体系划分

可分为拱桥——主拱受压；梁式桥——主梁受弯；刚架桥——构件受弯压；缆索承重桥——缆索受拉；组合体系桥——几种受力的组合。

1.4 大跨度桥梁的创新与发展

1.4.1 大跨度桥梁技术发展的主要方面

① 新材料的应用。

② 预应力技术的应用。

③ 计算机技术的应用。

④ 洲际联络工程与跨海大桥的修建。

⑤ 基础工程：水深 50 m 已经解决；水深 100 m 以上尚待探索。

⑥ 设计理论与方法：从容许应力法、极限状态法、可靠度理论近似概率统计法、全寿命成本周期理论、可持续发展环保生态桥梁设计理论。

1.4.2 大跨度桥梁技术的主要研究领域

大跨度桥梁技术的发展趋势和主要研究领域主要有以下几个方面。

① 大跨度桥向更长、更大、更柔的方向发展，引发了对各种接力型组合体系及三向组合结构和混合结构等结构体系的研究，以发挥不同材料和体系的优点，并获得高效的经济指标、可靠的结构细部连接及安全方便的施工工艺。

② 高性能、耐久型钢材品种的研制和应用。新钢材应具有高强、高韧性的特点。玻璃纤维和碳纤维增强塑料复合夹心钢板将作为建筑材料的一个发展方向。

③ 在设计理论和计算分析方面，借助计算机和非线性数值方法的不断进步，提高仿真技术使力学模型精细化。可以在设计阶段逼真地描述大跨度桥梁在地震、强风、海浪等恶劣自然条件下施工和运营的全过程，为决策提供动态的虚拟现实图像。

④ 大型工厂化预制节段和大型施工设备的整体化安装将成为大跨度桥施工方法的主流，计算机远程控制的建筑机器人将逐渐代替目前工地浇筑或小型块件的拼装施工。在运用新技术的桥梁工程精细化施工中，工期的可控性大大加强，现场操作人员大量减少，而且施工安全性也容易得到保证；材料、构件尺寸及质量等的检测与可控性加强，使得工程质量整体提高。同时有条件采用抗腐蚀性能良好的复合塑料夹心钢材及采用标准化方法对钢结构进行防护性涂装，提高钢材和结构的耐久性，延长桥梁的使用寿命。

⑤ 大型深水基础工程的新进展。可以使桥梁基础深度逐步达到甚至超过 100 m。

⑥ 桥梁的健康监测和旧桥加固。随着行车速度的提高，大跨度桥梁在运营阶段可能出现结构振动过大及构件的疲劳、老化失效、开裂等问题。这就需要建立完善的健康监测系

统,对容易发生损伤的部位及时作出诊断和警报,对桥梁结构的健康状况进行评定,并向养护部门提供维修或加固的决策,以保证桥梁的使用寿命。同时,随着交通事业的迅猛发展,既有桥梁存在的荷载等级不足、年久失修等问题逐渐显现,旧桥检测和加固的重要性也日益提高。通过正确评估旧桥的现有承载能力,以及研究发展旧桥的加固方法,可以延长桥梁结构的使用寿命,保障交通畅通。

⑦ 重视桥梁美学及环境生态保护。著名的大跨度桥梁往往是宝贵的空间艺术品,是一种人文与自然生态结合的景观。21 世纪的大跨度桥梁结构必将更加重视建筑艺术造型,重视美学和景观设计,重视环境生态保护,达到人文景观同环境生态景观的完美结合与和谐。

⑧ 大型桥梁工程的营建管理技术。随着工程规模的扩大,对管理者的要求也日益提高。对大型的复杂工程,各工序的前后衔接安排及工期控制,物力和财力的安排及调度,设计、施工、监理、工程控制管理等各方的工作关系协调等问题成为制约工程质量的因素。通过营建管理技术的研究,培养一批既有工程技术又有管理经验的高素质工程主管人员,对提高大型桥梁工程的质量至关重要。

⑨ 大跨度桥梁的组装。在今后的发展中,有关部门会加强装配式大跨度桥梁的标准图设计研究和制造,节省设计资源;形成规模化、标准化构件制造与拼装,有利于国防;可提高施工质量,降低施工费用;使用高强度钢材,保证栓焊连接的性能等,以减轻结构自重,提高跨越能力。

⑩ 桥梁设计、施工规范及技术标准的更新。近年来桥梁建设中出现了一些工程质量事故,对我国桥梁规范的适用范围提出了疑问。普遍的看法是目前的规范用于跨度小于 200 m 的桥梁是合理的,但不适应跨度增大的桥梁工程。需要针对大跨度桥梁推出专门的规范。

⑪ 进一步提高我国大跨度桥梁的科技水平,向国际领先水平冲刺。我国大跨度桥经过了“学习与追赶”、“提高和跟踪”两个发展时期,现在正逐步进入“创新和赶超”时期。要想在国际大跨度桥梁界占有一席之地,必须提高我国大跨度桥梁的科技含量,有自己的原创科学技术成果。开发桥梁抗震分析和设计用大型集成软件平台并争取实现我国“桥梁抗震规范”的软件化;研究纤维增强复合材料对大跨度桥塔和大跨度桥节点的抗震性能的有效加固措施和方法;利用智能材料的自调节功能和良好的滞回耗能特性,开发新一代的桥梁减、隔震装置和支座。抗风方面,考虑巨大的静风变形、几何非线性、由结构运动和紊流引起的气动力非线性,寻找更为合适的理论分析方法和气动力表达式及相应的新型实验技术;进行更多的实现自然风和振动响应的现场实测及结构风振响应的再分析。通过实测与分析的不断比较来检验所用理论的可靠性,并不断对其进行改进;通过各种手段(包括理论分析、CFD 分析、PIV 流迹试验等)对桥梁风致振动的机理,以及许多现阶段只能通过风洞试验来验证的抗风设计中的流体和结构的互相作用机理作进一步的研究;进一步完善桥梁 CFD 技术,为建立“数值风洞”和更进一步的“桥梁抗风虚拟现实”奠定更科学和坚实的理论基础。

⑫ 大跨度桥梁设计和营建能力达到国际先进水平。21 世纪我国进入建设跨海工程的高峰期。中国沿太平洋高速公路包括五个工程,从北到南依次为:渤海海峡、长江口、杭州湾、珠江口和琼州海峡。此外还有舟山连岛工程、台湾海峡工程等,以及大规模的城际高速铁路的建设。其中,全长 32 km 的东海大桥已经建成,全长 36 km 的杭州湾跨海大桥正在建设之中。

⑬ 知识经济引领 21 世纪中国大跨度桥建设的新纪元。21 世纪是中国腾飞的世纪,21