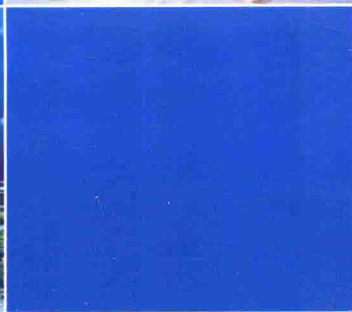
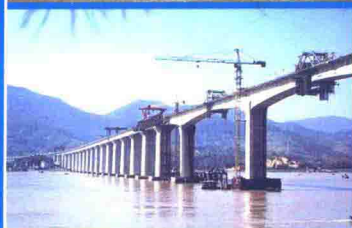


大跨度桥梁 结构理论与应用

(第2版)

雷俊卿 编著
钱冬生 主审

LONG SPAN BRIDGE
STRUCTURE THEORY AND APPLICATION



清华大学出版社
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.com.cn>



大跨度桥梁结构理论与应用

(第 2 版)

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、及养护维护应用的过渡。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、管理养护维护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. —2 版. —北京:北京交通大学出版社:清华大学出版社,2015.3

ISBN 978-7-5121-2219-2

I. ① 大… II. ① 雷… III. ① 桥梁结构-大跨度结构 IV. ① U448.433

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039243 号

责任编辑:赵彩云 特邀编辑:林夕莲

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://www.bjtu.com.cn>

印刷者:北京艺堂印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:21.5 字数:537 千字

版 次:2015 年 3 月第 2 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-2219-2/U·192

印 数:1~1 500 册 定价:49.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。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。

再版前言

近七年多来,随着国民经济及交通事业的飞速发展,国内外大跨度桥梁结构发展很快,跨江跨海的大跨度桥梁工程日益增多,港珠澳大桥正在建设之中,新开工的沪通长江大桥以1092米的主跨,建成后将成为世界上最大跨度的公铁两用斜拉桥。琼州海峡、渤海湾、台湾海峡、广饶的中西部的铁路、公路交通建设等,都在进行着长大桥梁的前期规划与设计研究。桥梁建设向“更长、更高、更轻、更新、更耐久”的趋势发展,桥梁的跨度日益增大,体形越来越复杂,新材料的应用日益增多,结构体系越来越新颖,施工技术和装备越来越先进。工程建设的需求极大地促进了大跨度桥梁结构理论的发展。

2009年,北京交通大学土木建筑工程学院开设的“桥梁工程”课程,已经被评为国家级精品课程。我们围绕着“桥梁工程”的系列课程也在建设完善之中。《大跨度桥梁结构理论与应用》一书,作为本科生的专业拓展课程、研究生的专业课程用书,同学们反响较好;也为从事大跨度桥梁研究、设计、施工、养护维修、管理的技术人员提供了参考。现在书已经售罄。因此,我们进行了修订再版,修改比较多的是第一章,其他章节也有修改。重点对读者提出的个别问题,进行了订正。增加了每一章后面的近年的参考文献,供读者延伸学习。主审本书的钱冬生教授今年是96岁高龄,依然身体健康矍铄,还在著书立说工作着。

我们的桥梁科研教学团队,近年来除承担了多项国家级和省部级的基础理论研究的科研课题外,还积极参加国民经济主战场的国家高速铁路桥梁、高速公路桥梁、城镇化的市政桥梁的科研工作,我们团队的老师和研究生们深入桥梁设计与设计咨询复核、施工监控监测、检测评定、健康监测、养护维修工程现场,参加或主持了一系列的长大跨度桥梁的试验研究与理论计算分析。主要有:沪通长江大桥公铁两用斜拉桥、南京长江二桥斜拉桥、武汉天兴洲长江大桥公铁两用斜拉桥、浙江舟山金塘大桥斜拉桥、浙江嘉绍六塔斜拉桥—多塔长大斜拉桥关键技术研究;南京大胜关长江大桥钢桁拱桥、重庆朝天门大桥公轨两用钢桁拱桥、哈大高铁长春新开河钢箱叠合拱桥、青海公伯峡水电站钢管拱桥;虎门大桥悬索桥养护检查维修指南、虎门二桥(1688米悬索桥)设计指导准则编制研究、南京长江隧道工程独柱塔自锚式悬索桥关键结构研究;钢桥设计施工成套技术研究子课题—钢桥防腐涂装和钢材可靠度指标研究;养护设备、防水材料、复合材料等产品系列标准研究;交通行业标准《公路钢结构桥梁设计规范》修订编制研究工作;武广客运专线大跨度预应力混凝土桥梁技术研究、沿海客运专线桥梁结构设计与耐久性技术的研究、提升桥梁耐久性的施工改进技术和质量控制方法的研究、大跨径混凝土桥梁长期变形和开裂控制技术;流冰、船舶撞击桥墩对桥上高速列车运行安全效应的研究等。

大跨度桥梁结构理论与应用的发展趋势是:逐渐地从简单结构向大型复杂结构发展;从传统的结构类型向新型结构和新材料结构发展;从线性计算分析向非线性计算分析发展;从静力计算分析为主向静动力全过程计算分析发展;从确定性理论向不确定性理论发展;从简化分析的平面结构向精细化的空间结构分析发展;新的智能结构理论、灾变理论、基于性能

的设计理论、全寿命耐久性理论、绿色环保可持续发展理论，在桥梁结构设计理论、计算分析、施工技术、养护维修等方面正在孕育着新的突破。我们期待着大跨度桥梁理论和建设新的进步与飞跃。

雷俊卿

2014 年 12 月于北京交通大学土木工程楼

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和设计方法、施工技术和科研体系。80 年代以来,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期,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应运而生。

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,舟山西堠门大桥主跨达 1 650 米,日本明石海峡大桥主跨已突破 1 991 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等做过系统研究,空白领域比较多。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,就具有重大的现实意义。

六十多年来,我国桥梁建设有了突飞猛进的发展。交通运输部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。桥梁建设正向着“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。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、南京大胜关长江大桥重庆朝天门大桥、等;南京长江三桥还采用了钢塔结构,已建成通车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”是土木工程专业的任选课,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，又是桥梁向前跨越大江大河和海峡的主要方法，如黄河、长江，如琼州海峡、台湾海峡通道等，而且也是跨越深山峡谷等障碍的首选。

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 Bridge), 全长 711 m; 我国 1997 年建成的主跨 270 m 的虎门大桥辅航道桥, 全长 570 m。澳大利亚 1985 年建成的著名的主跨 260 m 的门道桥 (Gateway Bridge), 它曾保持世界最大混凝土梁式桥纪录达 12 年之久, 全长 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。洛溪桥建成之后, 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）、重庆万州长江大桥（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 世界上主跨 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	2009
2	上海卢浦大桥（钢箱拱）	550	中 国	2003
3	四川合江波司登长江大桥	530	中 国	2013
4	美国新河谷（New River Gorge）大桥	518	美 国	1977
5	美国纽约贝永（Bayonne）大桥	503.6	美 国	1931
6	悉尼港湾大桥（钢桁拱）	503	澳大利亚	1932
7	巫山长江大桥（钢管混凝土拱）	460	中 国	2005
8	宁波明州大桥	450	中 国	2011
9	湖北支井河大桥（钢管混凝土拱）	430	中 国	2009
10	广州新光大桥	428	中 国	2008
11	重庆万州长江大桥（劲性骨架拱桥）	420	中 国	1997
12	重庆菜园坝长江大桥	420	中 国	2007
13	湖南莲城大桥	400	中 国	2007
14	重庆巫山县大宁河大桥	400	中 国	2010

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 800~1 200 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 2014 年 7 月为止,全世界已建成主跨超过 400 m 的斜拉桥有 110 座,而中国已建成的跨度大于 400 m 的斜拉桥就有 56 座,超过一半。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。我国已建成通车的香港昂船洲大桥、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,并开始出现多塔多跨斜拉桥。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、嘉绍六塔斜拉桥等。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。高速铁路中的公铁两用武汉天兴洲大桥(主跨 504 m),铜陵长江公铁两用大桥斜拉桥(主跨 630 m)已建成投入使用。

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、三塔式和多塔式。其中多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 套管的耐久性还有待研究。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。

于 2008 年建成通车苏通长江公路大桥主跨为 1 088 m,已成为当时世界跨度最长的斜拉桥;于 2009 年建成通车的香港昂船洲(Stonecutters)大桥主跨 1 018 m,为分离双箱斜拉桥。于 2012 年 7 月建成通车的俄罗斯海参崴的俄罗斯岛大桥以其 1 104 m 的主跨长度,成为世界上主跨最长的斜拉桥。表 1-3 列出了目前已建成的全世界主跨 700 m 以上斜拉桥,全世界仅有主跨超过 600 m 的斜拉桥 22 座,其中 17 座位于中国。正在建设的沪通长江大桥为公铁两用斜拉桥,主跨为 1 092 m,铁路四线,公路六车道。

表 1-3 世界主跨 700 m 以上的斜拉桥一览表

序号	桥 名	主跨/m	国家	竣工时间
1	俄罗斯岛大桥	1 104	俄罗斯	2012
2	苏通长江公路大桥	1 088	中 国	2008
3	香港昂船洲大桥	1 018	中 国	2009
4	鄂东长江大桥	926	中 国	2010
5	多多罗大桥	890	日 本	1999
6	诺曼底大桥	856	法 国	1995
7	九江长江公路大桥	818	中 国	2013
8	荆岳长江大桥	816	中 国	2010
9	仁川大桥	800	韩 国	2009
10	厦漳大桥北汉桥	780	中 国	2013
11	金角湾大桥	737	俄罗斯	2012
12	上海长江大桥	730	中 国	2009
13	闵浦大桥	708	中 国	2010

1.2.4 大跨度悬索桥

当跨径大于 1 200 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);浙江舟山西堠门大桥(主跨 1 650 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、泰山长江大桥三塔两跨悬索桥等。2014 年 12 月刚开工建设的武汉杨泗港长江大桥,为 1 700 主跨的双层钢桁梁悬索桥。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,广东虎门二桥设计为 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。意大利墨西拿海峡桥提出了 3 300 m 悬索桥方案。表 1-4 列出了目前世界主跨 1 200 m 以上悬索桥的排名。

表 1-4 世界主跨 1 200 m 以上的悬索桥一览表

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	2009
3	大贝尔特桥	1 624	丹 麦	1998
4	李舜臣大桥	1 545	韩 国	2012

续表

序号	桥 名	主跨/m	国 家	竣工时间
5	润扬长江大桥	1 490	中 国	2005
6	南京长江第四大桥	1 418	中 国	2012
7	亨伯桥	1 410	英 国	1981
8	江阴长江大桥	1 385	中 国	1999
9	香港青马大桥	1 377	中 国	1997
10	哈当厄大桥	1 310	挪 威	2013
11	韦拉札诺大桥	1 298	美 国	1964
12	金门大桥	1 280	美 国	1937
13	阳逻长江大桥	1 280	中 国	2007
14	高地海岸大桥	1 210	瑞 典	1997

1.2.5 中国大跨度桥梁的建设成就

截至 2013 年年底, 全国公路通车总里程已超过 435 万公里我国公路桥梁的总数已达 73.53 万座, 共计 3 977.80 万延米; 其中特大桥 3 075 座, 共计 564.14 万延米; 大桥 67 677 座, 共计 1704.34 万米延米。全国高速铁路更以桥梁代替道路, 如京沪高铁全长 1 318 km, 桥梁长度为 1140 km, 占 86.5%。

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。