

北方 工业大学 学术文库

土木工程卷

主 编 王晓纯
副主编 吴晚云
 郑文堂
 李正熙



1946—2006

人民日报出版社



北方工业大学学术文库

土木工程卷

主 编 王晓纯

副 主 编 吴晚云 郑文堂 李正熙

本卷主编 王 珊

图书在版编目(CIP)数据

北方工业大学学术文库. 土木工程卷/王晓纯主编. —北京:

人民日报出版社, 2006. 8

ISBN 7-80208-410-5

I. 北... II. 王... III. ①北方工业大学—文集 ②土木工程—文集 IV. Z427

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 096804 号

书 名:北方工业大学学术文库·土木工程卷

主 编:王晓纯

责任编辑:曼 嫒

封面设计:侯凤斌

出版发行:人民日报出版社

社 址:北京金台西路2号

邮 编:100733

电 话:(010)65369524 65369530

经 销:新华书店

印 刷:北方工业大学印刷厂

开 本:880×1230 毫米 1/16

字 数:4800 千字

印 张:190

印 数:1—1000 册

印 次:2006 年 9 月第 1 版 第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-80208-410-5/G·212

总 定 价:580.00 元

《北方工业大学学术文库》编委会

主 编 王晓纯
副 主 编 吴晚云 郑文堂 李正熙
策 划 史仲文
委 员 (以姓氏笔画为序)

王素娟 史仲文 刘永祥 李宇成 李世英
吴永林 吴润衡 张广庆 张卫平 张常年
陈 穗 邹建成 罗学科 周 洪 屈铁军
胡应平 秦志勇 高建岭 郭 涛 韩效有

本卷主编 王 珊
副 主 编 胡应平
委 员 (以姓氏笔画为序)

王建省 王运霞 白玉星 孙世国 张燕坤
张全辉 韩 燕

努力提高学术水平 促进学校全面发展

——“北方工业大学学术文库”代序言

王 晓 纯

为纪念建校 60 周年,我们编纂了这套学术文库,文库收录了 5 个学科 459 篇论文,总计 500 余万字,其中相当一部分为国际重要检索刊物收录。借此机会,我向全校师生、历届校友以及关注学校发展的社会各届领导、朋友介绍学校的历史发展和关于今后学校主要工作的思考。

回顾学校 60 年的发展历程,大体经历了两个阶段。第一个阶段是 1949 年至 1978 年。这期间学校从国立北平高级工业职业学校先后更名为北京重工业学校、北京冶金专科学校、石景山冶金学院等。30 年间,平均 6 年改一次校名,反映了学校在这一阶段办学经历的曲折与艰辛。

学校发展的第二个阶段是 1978 年十一届三中全会以后至今。1978 年经国务院批准,在原冶金部的领导下,学校更名为北京冶金机电学院。1984 年学校划转到原中国有色金属工业总公司管理后,于 1985 年更名为北方工业大学,1998 年学校又划转到北京市管理。在这个阶段,虽然学校的隶属关系几经变化,但在各级领导部门和社会各界朋友的大力支持下,在我校师生的努力下,学校始终保持健康、快速的发展,学校的面貌发生了根本性的变化:实现了由专科学校到本科院校的转变;实现了由单科性学院向多科性大学的转变;实现了办学规模、办学条件、办学水平和办学实力的多层面、深层次转变。

目前学校有 25 个本科专业,22 个硕士学位授权点,全日制在校生达到 10612 人,研究生超过了 1000 人,形成了以工为主,文理交融,理、工、文、经、管、法多科性协调发展的专业格局。教学仪器设备总值超过了 1 亿元;教师中具有硕士学位以上的近 80%;具有博士学位的近 20%;在北京地区我校有 4 个专业进入重点院校招生批次,在北京以外地区,我校大多数专业录取分数均高于当地重点院校录取分数线。我校是国家大学生文化素质教育基地,也是具有单考单招高水平运动员的高校。多年来我校学生大学英语四

级考试首次通过率均高于全国重点大学的平均通过率。另外,在全国以及北京市的大学生电子设计竞赛、数学建模竞赛、英语竞赛、物理竞赛、“挑战杯”竞赛等活动中亦有突出表现。毕业生一次就业率也较北京地区高校的平均水平为高。

2003年,学校新征土地148亩。自2000年至今,新建了体育馆、第三、第四、第五教学楼,新建了学生八公寓、九公寓及留学生公寓等,新增建筑面积达15万平方米。生均住宿面积达到11.24平方米,部分本科生实现了4人1室的标准。校园环境和办学条件得到了很大改善。

“十五”期间学校总计获得科研经费10041.4万元,在编教师人均经费4.78万元。获得国家科技进步二等奖1项,省部级奖14项,发明实用新型专利16项,科研成果转让139项,发表学术论文1312篇。科研实力明显增强。

在国际交流方面,与26所国外院校建立了校际交流合作关系,与3所美国高校,2所英国高校签订了互相承认学分联合培养本科生的(2+2)协议。2005年派出交换学生50人。2003年取得招收港澳台学生资格。

今年是“十一五”计划的开头之年。回顾过去,我们为学校所取得的成绩深受鼓舞;面向未来,我校又站在了一个新的发展起点上,进入了一个新的战略转型期。换句话说,就是学校从扩大规模和改善办学条件向提高质量、提高办学水平方向发展。学校今后的主要任务可以用18个字概括“提高教育质量,培育办学特色,增强科研实力”。这三个方面的工作,本质上都是学术工作。简而言之,今后学校的核心工作是提高学术水平。

提高学术水平,首先要树立学术工作优先发展的战略理念与地位。我校大规模的基本建设基本完成,今后在经费的使用上,要优先向学术建设倾斜,保证学术工作优先发展。学校的学术水平高低,取决于师资队伍的水平,因此,加强师资队伍的建设,不但势在必行,而且须持之以恒。我们的阶段性目标是:“十一五”期间生师比达到17:1的标准;正教授人数达到100人以上,具有博士学位的教师达到150人以上,具有硕士学位以上的达到85%;适时有序地选送优秀青年教师攻读博士学位、到国外大学进修培训;试行教师带薪休假制度。对于学术成就大的学科、实验室要重点建设;对于学术成就大的教师要重点支持,对学术发展潜力大的教师要重点培养。今后五年,计划投资2000万元经费用于师资队伍建设,力争使我校教师人均

科研经费和人均发表论文数量在市属市管高校中处于先进行列。

提高学术水平,要营造学术氛围、建设学术环境。学术环境和氛围是大学组织的特有产物,支撑着大学的存在和发展。最近几年我校在办学环境的硬件建设方面,取得了很大的成绩,今后将更加高度重视校园的“软环境”建设。软环境包括办学思想、办学理念、办学特色、治学精神等内容,它是专业环境、学术环境、人文环境的总称。学校一定要形成尊重教育规律、尊重办学规律、尊重知识、尊重人才、尊重学术的良好氛围与传统。

重视“软环境”建设,首先要抓教风和学风建设。突出强调教师严谨自律的治学态度和学术精神;强调教师遵守学术道德,率先垂范的引领作用;强调教师的言传身教、为人师表、教书育人的关键作用;从而以良好的教风带动和促进学风建设。

校园“软环境”建设的另一项工作是强化我校人文素质教育的特色。我校长期坚持文化素质教育,成效显著,在全国有一定影响。2006年又成为国家大学生文化素质教育基地,标志着我校的文化素质教育进入了新的阶段。今后我们将进一步加强校园文化建设,整合优势资源,丰富文化素质基地建设的内涵,推进文化素质教育与专业教育的结合,营造具有特色的育人环境和学术氛围。

提高学术水平,须强化学术管理。学术管理和行政管理是有区别的。行政管理是自上而下的,学术管理则多是自下而上的。行政管理应有利于、有助于学术管理的健全与发展。我校现行的管理体制基本上是学术管理与行政管理相统一的体制。学术管理由于自下而上,时间上容易滞后;没有单独的学术管理机构,学术问题容易被弱化。我们要把科学研究、学科建设、专业建设、学术讨论与研究统一纳入到学术活动的范畴,统一规划,统一管理;逐步形成能够充分发挥学术活动活力的体制和机制。在校、院二级学术委员会和校学科建设委员会的统一领导下,统筹安排,协调工作。现阶段,首先须制定出科学的全方位的提高学术水平的具体措施。为此,校各行政管理部门必须切实树立为教学研究人员服务的思想,树立为学术建设服务的思想,服务优先,因势利导,建立健全工作机制,力求在不长的时间内将我校建设成学术发展充分、学术地位突出、学术氛围浓厚的文明校园。

2006年8月8日

土木工程发展简史

本书为《北方工业大学学术文库·土木工程卷》，共收录学术论文 79 篇，是北方工业大学土木工程学科成立以来的主要研究成果汇总。为便于读者尤其是年轻学者阅读，特撰写土木工程发展简史，使人们对土木工程发展有一个概括的了解。

土木工程是建造各类工程设施的科学技术的总称，也是地球上所有人造的构筑物的总称。它是人们所进行的勘察、设计、施工和维护等生产技术活动；也指工程建设的对象，即人们建造的地上或地下、路上或水下等为人类生活、生产、军事和科学研究服务的各种工程设施，如房屋、道路、铁路、隧道、桥梁、运河、堤坝、港口、电站、机场、海洋平台、给排水工程等。

任何工程设施都承受着恒载、活载，以及风、温度、冰雪、地震等作用，工程设施应具备能承受以上各种荷载综合作用的能力。

土木工程的发展与新材料相适应。决定土木工程发展的是社会需求和技术上的可能性。对土木工程发展起关键作用的是工程物质基础—土木建筑材料，其次是设计理论和施工技术。每当有新型的建筑材料出现，土木工程就有飞跃式的发展。

砖瓦的使用：人们早期只能用泥土、木料和其它天然材料从事建造活动，后来发明了砖瓦这种人造材料。中国在公元前 11 世纪西周时期就能制造砖瓦，建造房屋。直到现在，砖瓦一直是土木工程的重要材料，为人类文明做出了伟大贡献。

钢材的使用：17 世纪 70 年代开始使用生铁，19 世纪初开始使用熟铁建造桥梁和房屋。19 世纪中叶冶金技术发展很快，生产出强度高、延性好、材质均匀的钢材。钢结构发展迅速，出现了梁柱组成的框架结构、杆件组成的桁架结构、网架结构，还有悬索结构等。工程促进了理论的发展。在牛顿力学的基础上，材料力学、结构力学、工程结构设计理论应运而生。施工机械、施工组织、施工技术也发展很快，促进了土木工程的前进。

混凝土的兴起：19 世纪 20 年代波特兰水泥制成后，混凝土问世。随后出现了钢筋混凝土，钢材受拉、混凝土受压，利用了各自的优点。20 世纪初以来，钢筋混凝土广泛应用于土木工程的各个领域。30 年代出现了预应力混凝土，预应力混凝土结构在抗裂性能、刚度和承载力等方面都大大高于钢筋混凝土结构，因而用途更加广泛。土木工程进入了钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土占统治地位的历史时期。

从 17 世纪中叶到 20 世纪中叶的 300 年间，是土木工程发展最快的历史时期。在材料方面：由石材、木材、砖瓦为主，到开始广泛使用铸铁、钢材、混凝土、钢筋混凝土、预应力钢筋混凝土时代。在理论方面：材料力学、结构力学、土力学、工程结构设计理论等学科逐步形成，设计理论的发展保证了工程结构的安全。在施工方面：由于新机械、新工艺等施工技术的进步，建造规模随之扩大，建造速度相应加快。土木工程逐步发展到包括房屋、道路、桥梁、铁路、隧道、港口、市政、卫生工程建筑和工程设施，不仅能够地上，而且能够在地下和水下修建。

1 工程力学

力学是物理学的一个分支，物理科学的建立则是从力学开始的。力学与数学在发展中始终相互推动，相互促进。一种力学理论往往和相应的一个数学分支相伴产生，如运动基本定律和微积分，运

动方程的求解和常微分方程定性理论,弹性力学及流体力学的基本方程和数学分析理论,天体力学中运动稳定性和微分方程定性理论等。有人甚至认为力学是一门应用数学。

力学是一门技术科学,它是许多工程技术的理论基础,又在广泛的应用工程中不断得到发展。当工程学还只分民用工程学(即土木工程学)和军事工程学两大分支时,力学在这两个分支中已起着举足轻重的作用。工程学越分越细,各分支中许多关键性的进展都有赖于力学中有关运动规律、强度、刚度等问题的解决。力学和工程学的结合促使工程力学各分支的形成和发展。无论是历史较久的土木工程、还是生物医学工程等,都或多或少有工程力学流脉其中。

力学按所研究的对象区分为固体力学、流体力学和一般力学三个分支,流体包括流体和气体。固体力学和流体力学可统称为连续介质力学,它们通常都采用连续介质模型。固体力学和流体力学从力学分出后,余下部分组成一般力学。一般力学通常是指以质点、质点系、刚体、刚体系为研究对象的力学,有时还把抽象的动力学系统也作为研究对象。一般力学除了研究离散系统的基本力学规律外,还研究某些与现代工程技术有关的新兴学科的理论。一般力学、固体力学、流体力学这三个主要分支在发展过程中又因对象或模型的不同而出现一些分支学科和研究领域。属于一般力学的有理论力学(狭义的)、分析力学、外弹道学、振动理论、刚体动力学、陀螺力学、运动稳定性等。属于固体力学的有早期形成的材料力学、结构力学,稍后形成的弹性力学、塑性力学,近期出现的散体力学、断裂力学等。流体力学是由早期多相流体力学、渗流力学、非牛顿流体力学等分支。各分支学科间的交叉结果又产生粘弹性理论、流变学、气动弹性力学等。

力学也可按研究所采用的主要手段区分为三个方面:理论分析、实验研究和数值计算。实验力学包括实验应力分析、水动力学实验和空气动力实验等。用数值计算手段的计算力学是广泛使用电子计算机后出现的,其中有计算结构力学、计算流体力学。对于一个具体的力学课题或研究项目,往往需要理论、实验和计算三方面的相互配合完成。

力学在工程技术方面的应用结果形成工程力学或应用力学的各种学科分支,诸如土力学、岩石力学、爆炸力学、复合材料力学、工业空气动力学、环境空气动力学等。

力学和其他基础科学的结合也产生一些分支,最早的是与天文学结合产生的天体力学。在20世纪特别是60年代以来,出现更多的这类交叉分支,其中有物理力学、物理—化学流体动力学、等离子体动力学、电流体动力学、磁流体力学、热弹性力学、理性力学、生物力学、生物流变学、地质力学、地球动力学、地球构造动力学、地球流体力学等。力学分支的这种错综复杂情况,是自然科学研究中综合和分析这两个不可分割的方面在力学发展过程中的反映。科学的发展总是分中有合,合中有分。

2 建筑工程

2.1 砖石结构

从公元前1世纪,中国东汉时砖石结构就有所发展,有砖石拱卷、砖塔和石拱桥。如公元6世纪建于河南登封的高岳寺砖塔。15世纪建的河北赵州石拱桥。欧洲古代房屋建筑以石拱结构为主。公元2世纪罗马砌筑下水道、隧道、陵墓、城墙、桥梁等就已经大量使用石拱等。中世纪西欧各国仍继承罗马的建筑风格,以比萨大教堂建筑群为代表。后来以法国为中心,发展了哥特式教堂建筑的新结构体系。哥特式建筑采用骨架券拱顶的承重构件。巴黎圣母院的圣母教堂是早期哥特式教堂建筑的代表。16世纪标志意大利文艺复兴建筑开始的佛罗伦萨教堂穹顶(1420—1470),是世界上最大的穹顶,在结构和施工技术上均达到很高的水平,集中了16世纪意大利建筑、结构和施工成就是罗马圣彼得大教堂。

2.2 木结构

中国古代房屋建筑主要采用木结构体系。根据气候和木材产地不同,在汉代即分为抬梁、穿斗、

并干三种不同的结构方式,柱间砌墙或安装门窗。公元8世纪建的山西五台山南禅寺正殿和9世纪建的佛光寺大殿,是至今保存较为完整的中国木构架建筑的代表。公元11世纪建成的山西应县佛宫寺释迦塔,塔高67.3米,八角形,底层直径30.27米,每层梁柱斗拱组合成稳定的构架体系,9层结构有8层使用3米左右的柱子支顶重叠而成。塔身采用内外两层环柱网,各层柱子均向中心倾斜,柱上斗拱用交圈的扶壁拱组成双层套筒式结构。这座木塔是世界上现存最高的木结构之一。明朝建设的北京紫金城皇宫是世界上现存的最大的砖石木结构建筑群。

2.3 钢结构

随着1855年英国人发明贝氏转炉炼钢法和1865年法国人发明平炉炼钢法,以及1870年成功轧制出工字钢之后,形成了工业化大批量生产钢材的能力,强度高且韧性好的钢材渐次成为建筑领域内的主要材料。20世纪初焊接(welding)技术的出现,以及1934年高强度螺栓(high-strength bolts)连接的出现,极大地促进了钢结构的发展。

2.3.1 高层建筑钢结构

高层钢结构建筑是在19世纪中期产业革命后逐步发展起来的,在国外已有110年历史。1801年英国建造的曼彻斯特棉纺厂,高7层,是最早以铸铁框架作为承重骨架的建筑物。19世纪末美国经济发展迅速,建筑技术也相应地发展,高层建筑首先在美国芝加哥兴起。1871年芝加哥城发生一场大火,八公里范围内的房屋几乎焚烧一空,以后重建城市,开始出现高层建筑。它们多采用铸铁梁柱、砖拱楼板、砖石墙,且外观简朴,高度在10层左右。1885年詹尼设计的建于芝加哥的10层家庭保险公司大楼(The Home Insurance Building)高55米,是世界上第一栋高层钢结构建筑。随着钢结构设计方法的改进,高层钢结构发展很快。1907年在纽约建造的47层辛尔大楼,高187米,是第一栋高于金字塔的近代建筑。

1931年美国帝国大厦在纽约落成,高378米,102层,建筑面积16万平方米,从此高层建筑进入了一个新的超高层领域。1972年在纽约建造了两座同样大小的世界贸易中心大楼,高412米110层,在2002年被基地组织用民航飞机击毁。1974年在芝加哥建成了西尔斯大厦(Sears Building),高443米110层。它采用九个束筒结构,长时间为世界最高建筑。

1996年在马来西亚吉隆坡建成了双塔建筑石油大厦(Petron Tower),高452米95层。1997年在德国法兰克福建成了商业银行大楼,高298米63层,是欧洲最高的超高层建筑。2000年在台北建成了101大厦,楼顶高448米101层,总高度508米,建筑面积19万平方米。

中国大陆在1976年改革开放以后,高层钢结构有了突飞猛进的发展,陆续建设了几十栋高层钢结构,其中有上海金沙江大厦,锦江大厦,希尔顿大厦,金贸大厦;北京建有京城大厦,长富宫大厦,香格里拉大厦,北京国际贸易中心,康泰大厦等。1978年建成的京广中心,高205米50层。1997年建成的上海金贸大厦,总高421米95层(高度为395米)为世界第三高度。日前上海正在建设世界最高建筑环球贸易中心,高492米101层,建筑面积37.7万平方米。

2.3.2 巨型框架和巨型桁架结构

由于高层建筑主要承受风荷载和水平地震作用,控制层间位移和顶层位移是建筑的适用性要求,因此出现了巨型框架和巨型桁架结构。如香港汇丰银行大厦,高度为178米48层,采用八个钢管组合巨型柱和巨型桁架大梁构成四根巨型框架结构体系,巨型柱由四根直径1400×100的钢管构成,间距4800×5100,每六层一组楼面悬挂在水平桁架大梁上。日本千叶县NEC办公大楼高180米43层,一到十三层设置内部大庭园,十三到十五层开洞为透空层,采用四根桁架式巨型柱和四根桁架式巨型梁构成空间框架,巨型柱由间距为11.2×10.8的方钢管柱组成。香港中国银行高315米70层,平面为52×52米,利用正方形对角线将平面分为四个三角区,每隔25或13层减少一个三角区,它由五根型钢混凝土柱及八根平面支撑组成巨型支撑体系。美国芝加哥汉考克大厦高332米100层,体形为上小下大的矩形锥体,底平面79.2×48.7米,顶平面48.6×30.4米,沿框筒四周设置了巨型交

叉支撑,构成了巨型支撑框筒结构体系。2005年北京建成的新北京电视中心为巨型框架结构,高288米,设有中心花园。

2.3.3 大跨度钢结构

随着高强度钢材以及各种轧制型材出现,施工技术的进步,使建设大跨度的空间结构有了可能。于是出现了大跨度空间钢结构。如多功能体育场馆,会议展览中心,博物馆,候机厅,飞机库等。60年代跨度最大的平板网架建在美国洛杉矶加利福尼亚大学体育馆,为正放四角锥,跨度 91×122 米;70年代最大跨度的双层网壳结构,系建在美国休斯敦的宇宙穹顶(Astro dome)球壳,其直径为196米;九十年代在日本名古屋,建成了世界最大跨度的单层网壳,跨度187米,采用三角网格,刚性节点的单层网壳结构体系。

1952年建成的美国雷里体育馆,平面为 91.58×91.5 ,是世界上第一个现代的鞍形索网体系。1967年浙江省人民体育馆,平面椭圆形,长短轴为 80×60 米,屋盖采用双曲抛物面预应力鞍形索网,悬挂于周边钢筋混凝土空间曲梁上。1960年建成的北京工人体育馆,屋盖采用车辆式双层索网,下索由72根索,上索由40根索组成,中环为 11×9 米钢环,外环直径92米。1980年建成的莫斯科第22届奥运会中心体育场为椭圆型平面, 224×183 米,屋盖采用了正高斯曲率的悬挂薄膜结构,采用弹性索辐射设置且悬挂于内外环上,钢膜为5毫米厚低合金钢板。1996年奥运会主体育馆在美国亚特兰大建成,椭圆型平面 186×235 米,为张拉整体索膜结构。1993年建成的日本福冈体育馆为最大开合钢结构,直径222米;1989年加拿大多伦多天空穹顶(Sky dome)直径203米。1973年上海建成的万人体育馆,圆形平面直径110米,采用三向斜交网架,采用钢管焊接空心球节点。1998年建成的千年穹顶(The Millenium Dome),建在英国伦敦泰晤士河南岸,直径320米,为世界最大跨度的索膜结构。它由12根100米的桅杆,通过72根成对经向索和7根环向索,支撑144块双层巨幅白色特福隆涂层玻璃纤维布薄膜,总面积为8万平方米,为世界上最大跨度的索膜结构。2000年北京首都机场机库($2-153\times 90$ 米),采用三层斜放四角锥结构,可以同时容纳四架波音747飞机维修。2005年北京建成的国家大剧院为“金蛋式”网壳式结构,长短轴为 212.20×143.64 米。

2.3.4 高耸结构

由于现代化大城市的与 현대大工业的发展,需要建设输电铁塔,把电能长距离输送到大城市和大企业。文化传媒事业的发展需要建设电视发射塔和电视插转台;监视城市大气环境需要建设环境监测塔;监测地球地貌、森林火灾和大气臭氧层变化,需要卫星监测,要建设火箭发射塔发射卫星。目前在世界上建造了大量的输电铁塔,电视塔,环境监测塔,火箭发射塔等。1889年法国巴黎建成了325米高的埃菲尔铁塔。1930年英国在伦敦建造了325米高的电视发射塔。1973年北京建造了325米高桅杆式环境监测塔。1973年日本东京建造了330米的电视发射塔。1975年加拿大多伦多建造了553米的电视发射塔,为世界第一高塔。

2.4 钢筋混凝土结构

现代混凝土结构是随着水泥和钢铁工业的发展而发展起来的,至今已有150年的历史。1824年,英国约瑟夫·阿斯匹丁(Joseph Aspdin)发明了波特兰水泥并取得了专利。1850年,法国蓝波特(L. Lambot)制成了铁丝网水泥砂浆的小船。1861年法国约瑟夫·莫尼埃(Joseph Monier)获得了制造钢筋混凝土板、管道和拱桥等的专利。德国学者1866年发表了计算理论和计算方法,1887年又发表了试验结果,并提出了钢筋应配置在受拉区的概念和板的计算方法。美国学者1850年即进行过钢筋混凝土梁的试验,但其研究成果直到1877年才发表并为人们所知。19世纪70年代初有学者曾使用过某些形式的钢筋混凝土,并且于1884年第一次使用变形(扭转)钢筋并形成专利。1890年在旧金山建造了一幢两层楼、长度95m的钢筋混凝土美术馆。从此以后,钢筋混凝土在美国获得了迅速的发展。

从1850年到20世纪20年代,可以算是钢筋混凝土发展的初步阶段。从20世纪30年代开始,从材料性能的改善,结构形式的多样化,施工方法的革新,计算理论和设计方法的完善等多方面开展了大量的研究工作,工程应用十分普遍,使钢筋混凝土结构进入了现代化的阶段。

世界各国所使用的混凝土平均强度,在20世纪30年代约为10MPa,到20世纪50年代已提高到20MPa,20世纪60年代约为30MPa,20世纪70年代已提高到40MPa。到20世纪80年代初,C60级混凝土已经在发达国家得以普遍采用,而高效减水剂的应用更加促进了混凝土强度的提高。近年来国内外采用附加减水剂的方法已制成强度为200MPa以上的混凝土。高强混凝土的出现更加扩大了混凝土结构的应用范围,为钢筋混凝土在防护工程、压力容器、海洋工程等领域的应用创造了条件。

改善混凝土性能的另一个重要方面是减轻混凝土的自重。从20世纪60年代以来,轻骨料(陶粒、浮石等)混凝土和多孔(主要是加气)混凝土得到迅速发展,其重度一般为 $14\sim 18\text{kN/m}^3$,而普通钢筋混凝土的重度为 25kN/m^3 。用轻集料混凝土制作墙、板时,不但可以承重,而且建筑物理性能也优于普通混凝土。

1928年法国工程师弗雷西涅(E. Freyssinet)成功地将高强钢丝用于预应力混凝土,使预应力混凝土的概念得以在工程实践中成为现实。其实预应力混凝土的概念在19世纪80年代已提出,但是当时因钢筋强度偏低及对预应力损失缺乏深入研究,使预应力混凝土未能成功地实现。预应力混凝土的广泛应用是在1938年弗雷西涅发明锥形楔式锚具(弗式锚具)和1940年比利时的门格尔(G. Megel)发明门格尔体系之后。预应力混凝土使混凝土结构的抗裂性得到根本的改善,使高强钢筋能够在混凝土结构中得到有效的利用,使混凝土结构能够用于大跨结构、压力贮罐、核电站容器等领域中。

在结构形式方面,从1925年德国第一次采用折板结构大型煤仓开始,薄壁空间结构逐渐在屋盖以及贮仓、水塔、水池等构筑物中得到广泛应用。

20世纪50年代以来,钢筋混凝土在高层建筑中的应用也有了迅猛的发展。高强混凝土的发展,促进了混凝土结构在超高层建筑中的应用。1976年建成的美国芝加哥水塔广场大厦达74层,高262m。朝鲜平壤的柳京大厦,105层,高305m,也是混凝土结构。美国、俄罗斯等国在高层建筑中采用的混凝土,强度已达C80~C100。美国西雅图市的Two Union Square大厦(58层)60%的竖向荷载由中央四根直径为10英尺(3.05m)的钢管混凝土柱承受,钢管内填充的混凝土强度等级达C135。

钢筋混凝土结构的发展同样反映在桥梁、特种结构、水利工程、海洋工程、港口码头工程等各个领域内。

在计算理论与设计方法方面,20世纪30年代以前,只是将钢筋混凝土视为理想弹性材料,按材料力学的允许应力法进行设计计算。20世纪初,即开始了对钢筋混凝土构件考虑材料塑性性能的研究。前苏联在1938年颁布了世界上第一本按破坏阶段设计钢筋混凝土构件的规范,标志着钢筋混凝土构件承载力计算的实用方法进入了一个新的发展阶段。20世纪30年代以后,在钢筋混凝土超静定结构中考虑塑性内力重分布的计算理论也取得了很大进展,从20世纪50年代开始,已在双向板、连续梁以及框架的设计中得到了应用。20世纪60年代以来,随着电子计算机的普及与计算力学的发展,将有限元法用于钢筋混凝土的理论研究与设计计算,大大促进了钢筋混凝土理论及设计方法的发展。

在结构的安全度及可靠度设计方法方面,20世纪50年代以前,基本上处于经验性的允许应力法阶段。20世纪50~60年代,世界各国逐步采用半经验半概率的极限状态设计法。20世纪70年代以来,以概率论数理统计学为基础的结构可靠度理论有了很大的发展,使结构可靠度的近似概率法进入工程设计中。总之,钢筋混凝土这种材料以其非凡的优势,广泛地应用于多层和高层建筑设计,在未来的工程建设中,必将发挥更大的作用。它的设计理论和研究也必将展现更加广阔的前景。

3 桥梁工程

3.1 桥梁科学技术的发展

18世纪中叶工业革命后,钢、水泥、钢筋混凝土及预应力混凝土等人工材料的发展和运用,推动了近代桥梁科学技术的革命。人工材料在桥梁工程上的应用是近代桥梁建筑的历史性标志。19世纪中期,钢材的出现,开始了土木工程的第一次飞跃。随后又产生了高强钢材,于是钢结构得到蓬勃

发展,结构跨度从砖石木结构的几米、几十米跃到百米、几百米甚至千米以上,开创了在大江、海峡上修建桥梁的奇迹。1867年钢筋混凝土诞生,实现了土木工程的第二次飞跃。有了钢筋混凝土才有可能建造跨越能力很大的桥梁,并使形式多样化。1905年,比利时出现了单跨55m的钢筋混凝土桥,1930年,法国的弗莱西奈建造了跨度178m的钢筋混凝土拱桥。1928年高强度钢丝用于预应力混凝土,使在混凝土中建立永存的预压应力成为可能,从而奠定了现代预应力混凝土的实用基础,大大提高了混凝土结构的抗裂性能、刚度和承载能力,使土木工程发生了又一次飞跃。

20世纪中叶,第二次世界大战以后,由于科学技术与经济的强大推动,使桥梁科学技术获得了比历史上任何时期都快的发展。主要表现为:高强轻质材料(如高强混凝土、超高强混凝土、轻质混凝土、聚合混凝土、碳纤维混凝土、超高强度钢丝、高强度钢材、耐腐蚀性钢材等)的研究和应用;跨度的不断增大,形式的多样化与结构的整体化;分析方法和工具的发展(风洞试验和计算的计算机化);制造的工业化、自动化与程序化,施工工艺的提高。由于设计方法与计算理论、材料科学、制造工艺、安装方法、基础施工技术等方面的不断改进,当今桥梁工程规模之巨大、技术之复杂已今非昔比。已建成桥梁跨度接近2000m(明石海峡悬索桥跨度为1991m),水下深度超100m的基础工程,高出地面接近200m的桥墩。总之,桥梁工程还将向更高的记录攀登。

3.2 桥梁跨度的发展

桥梁是一种跨越建筑,因此桥梁的大跨度始终是人们追求的目标。20世纪以来,各种桥梁形式在国内外的桥梁建设中得到了飞速发展,不同桥型的适用跨度伴随着技术的进步在不断扩大。图1为20世纪各种典型的桥型,如悬索桥、斜拉桥、悬臂桁架桥、桁架桥、拱桥、连续梁桥等的最大跨径发展变迁情况。从图1可清晰地看到近百年来桥梁跨径的发展历史、各种桥型的发展及其适应跨径范围、当今世界大跨径桥梁的发展水平,以及预测桥梁跨径的发展趋势—悬索桥和斜拉桥是大跨径桥梁发展的主流。近二十年来发展最快的大跨径桥梁是斜拉桥,而遥遥领先的则是悬索桥,除此之外,单跨能超过500m的其它结构类型桥仅有2种,即悬臂桁架梁和钢拱桥。

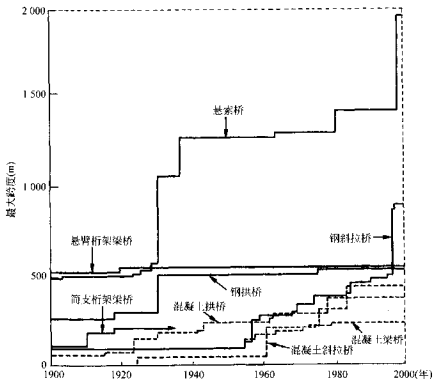


图1 20世纪各种桥型最大跨度的变迁

3.3 不同桥梁结构形式的发展

按照受力特点的不同,桥梁结构形式大致可以分为梁式桥、拱式桥、悬索桥、斜拉桥等4大类。

3.3.1 梁式桥

梁式桥是一种使用最广泛的桥梁类型,按其结构形式可以分为简支梁、连续梁、连续刚构、带V型墩或支撑的连续梁(刚构)体系。近代高强度钢材和水泥的出现,使钢梁桥、钢筋混凝土梁桥和预应力混凝土梁桥得到迅速发展。结构型式也随着材料和技术的进步而不断演进,由简支梁发展到悬臂梁和连续梁,由实腹板梁发展到桁梁和箱梁桥,亦由单一材料和单一结构体系发展到结合梁和组合梁。在施工方法上除采用现场浇筑外,大量采用预制的装配式桥梁,实现制造安装工业化和设计标准化。近半个世纪以来,梁式桥发展的一个方向是箱型截面梁(简称箱梁)。当跨度增大、梁高增高时,把梁的横断面做成闭口箱型,可以大大增加梁的整体刚度特别是抗扭刚度,减轻梁的自重,使梁肋在偏心活载作用下受力比较均匀。这种结构的腹板可以做得很薄、很经济,外观也更为简洁美观,因而在现代桥梁中得以广泛应用。

刚构桥由于将主梁与墩台刚性固结,主梁的弯矩可以传递给墩台,故可以跨越更大的跨度。工程上习惯将刚构桥分为:单跨刚构桥、多跨刚构桥、斜腿刚构桥、预应力混凝土(PC)T型刚构桥、PC连续刚构桥等。预应力混凝土T型刚构桥在施工阶段与运营阶段受力形式基本相同,能充分发挥材料性能,但因主梁跨中设较,跨中挠度较大,且较也不易制造、安装和养护,近年来已较少采用。世界上跨度最大的预应力混凝土T型刚构桥是1978年建成的南美巴拉圭亚森桥,跨度为270m。我国最大的T型刚构桥是四川重庆长江大桥,主跨174m。PC连续刚构桥能适合于高桥墩、大跨度的情况,跨中不设较,行车舒服,而且比PCT型刚构桥有更大的跨越能力。因而,近年来各国修建了很多PC连续刚构桥,如1998年挪威建成了世界第一的Stolma桥(主跨301m)和Raftsundet桥(主跨298m),而我国1997年建成的虎门珠江辅道桥(主跨270m)为当时PC连续刚构桥跨度的世界第一,它标志着我国PC连续刚构桥型的建桥技术,已居世界领先地位。

表1是按跨度大小世界上排名前十位的梁桥。

表1 世界前十名最大跨度梁桥

序号	桥名	主跨/m	桥址	建成年
1	斯托尔玛通道(Stolmasundet)桥	301	挪威	1998
2	希尔瓦海岸(Costa-e Silva)桥	300	巴西	1974
3	拉夫特通道(Raftsundet)桥	298	挪威	1998
4	巴拉圭河(Paraguai River)桥	270	巴拉圭	1979
4	虎门珠江辅道桥	270	中国	1997
5	奈卡河谷(Neckar-Tal)桥	263	前联邦德国	1978
6	萨瓦(Sava)一桥	261	前南斯拉夫	1956
6	萨瓦(Sava)二桥	261	前南斯拉夫	1978
7	门道(Gate way)桥	260	澳大利亚	1986
7	维托利亚(Vitoria)3桥	260	巴西	1989
7	新瓦洛德(New Varodd)桥	260	挪威	1994

3.3.2 拱式桥

拱式桥是一种弧形承重结构桥,型式多样,构造各异。按所使用的建筑材料可分为:圬工拱桥、钢筋混凝土拱桥、木拱桥及钢拱桥。按拱上建筑型式可分为实腹式和空腹式拱桥。前者适合中、小跨径,后者一般适用于大、中跨径。按主拱轴线的线型可分为圆弧拱、抛物线拱及悬链线拱等。按桥面位置可分为上承式拱桥、下承式拱桥和中承式拱桥。将拱脚用系杆连接或与行车道系组合共同受力,可以形成系杆拱。

早在1934年,瑞典斯德哥尔摩就建成了主跨181m的特拉讷山谷桥(Tranebergabron),这是当时世界上最大跨度的混凝土拱桥。到1942年,西班牙在埃斯拉河上建成了主跨192m的马丁·吉尔(Martin Gil)高架铁路桥,使混凝土拱桥的跨度接近200m。随后,到1943年,瑞典的跨翁厄曼河桑多桥的跨度就超过了200m,并以主跨264m保持了20年最大跨度的记录。直到1963年,葡萄牙在波尔图的杜罗河上建成了主跨270m的阿拉比迪(Arrabide)桥。1964年建成的在巴西和巴拉圭边界上,跨越巴拉那河的友谊桥,主跨为290m,从而使混凝土拱桥的跨度接近于300m,但该记录仅保持了很短的时间,就在同一年,澳大利亚悉尼建成了跨越帕拉马塔河的格莱兹维尔桥,主跨305m,使混凝土拱桥的跨度首次突破了300m的记录。1980年,在当时的南斯拉夫(位于现在的克罗地亚)建成克尔克岛桥。该桥主跨390m,边跨244m,从而使混凝土拱桥的跨度记录接近400m。1997年我国四川建成的万县长江大桥,主跨420m,为世界最大跨径的混凝土拱桥。表2列出了目前世界上已建成的排名前十位的钢筋混凝土拱桥。其中,1995年建成的贵州江界河桁式组合拱桥,以主跨330m跨越乌江,桥面距水面高达惊人的263米。

表 2a 世界前十位最大跨度混凝土拱桥

序号	桥名	主跨/m	桥址	建成年
1	万县长江大桥	420	中国 四川	1997
2	克尔克一桥	390	克罗地亚 克尔克岛	1980
3	江界河大桥	330	中国 贵州	1995
4	温江大桥	312	中国 广西	1998
5	格莱兹维尔桥	305	澳大利亚 悉尼	1964
6	友谊桥	290	巴西 佛贝多伊瓜苏 巴拉圭 埃斯特城	1964
7	勃劳克兰斯桥	272	南非 勃劳克兰斯河	1983
8	阿拉比达桥	270	葡萄牙 波尔图	1963
9	桑多桥	264	瑞典 克拉姆什	1943
10	沙托布里扬桥	261	法国	1991

表 2b 世界前十位最大跨度钢拱桥

序号	桥名	主跨/m	桥址	建成年
1	卢浦大桥	550	中国 上海	2003
2	新河拱桥	518	美国 弗耶特维尔	1977
3	贝水桥	504	美国 纽约	1931
4	悉尼港桥	503	澳大利亚 悉尼	1932
5	弗里芒特桥	383	美国 波特兰	1973
6	曼港桥	366	加拿大 温哥华	1964
7	塔歇尔桥	344	巴拿马 巴拉那	1962
8	拉比奥莱特桥	335	加拿大 三河城	1967
8	朗克里桥	330	英国 默西河	1961
9	兹达可夫桥	330	捷克 澳尔利克斯	1967

至今世界上主跨超过500m的钢拱桥共有4座。其中,建于1924~1932年的澳大利亚悉尼港桥是最著名的一座,该桥主跨长503m,是世界上最大跨度的钢拱桥。悉尼港桥是世界上主跨超过500m的长跨桥中最宽的桥梁,全桥宽48.8m,桥上设有2条高架电气化铁道、8条公路车道、1条自行车道及1条人行道。1977年建成的美国西弗吉尼亚的新河拱桥,以主跨518m成为世界上最大跨度的钢拱桥,该桥桥面在新河峡谷水面以上267m,为世界上通航净空最高者之一。2002年10月合拢的上

海卢浦大桥,主跨 550m,被誉为“世界第一拱”,为全焊接钢结构拱桥。我国在建设大跨径拱桥技术方面居世界领先地位。

表 2 和表 3 是按跨度大小世界上排名前十位的混凝土拱桥和钢拱桥。

此外,钢管混凝土拱桥近几年在我国发展很快,2000 年建成的广州丫髻沙珠江中承式钢管混凝土拱桥(主跨 360m),为世界第一钢管混凝土拱桥。

3.3.3 悬索桥

悬索桥是特大跨径桥梁的主要型式之一,被公认为桥梁领域中最优美的桥型。它一般是由缆索、塔和锚碇三者组成,在两个高塔之间悬挂两条缆索,靠缆索吊起桥面,缆索固定在高塔两边的锚碇上,由锚碇承载整座桥的重量。现在主缆一般用许多根高强度钢丝做成,按 AS 法(空中选丝法)或 PPWS 法(预制束股法)制造。主缆两端由锚碇固定,锚碇由大体积混凝土做成,也有在山体中开挖隧道,然后浇筑混凝土形成。

1883 年美国建成的布鲁克林桥(主跨 486m)标志着现代悬索桥的开始,当时其设计主要凭经验。1909 年修建的曼哈顿桥(主跨 448m),第一次采用了考虑几何非线性的“挠度理论”。20 世纪 30 年代,相继建成的美国乔治华盛顿桥(主跨 1 067m)和旧金山金门大桥(主跨 1 280m),使悬索桥的跨度超过了 1 000m。1995 年日本神户大地震,经受地震考验的明石海峡大桥成功的抗震设计,使悬索桥的技术得到空前发展。

明石海峡大桥是世界上第一座主跨超过 1 英里(为 1 609m)及 1 海里(合 1 852m)的桥梁。两边跨也很大,每跨达 960m,是目前世界上最长的边跨。钢桥塔高为 297m,是世界上最高的桥塔。其采用桁架式加劲梁,横截面尺寸为 35.5m×14.0m,创造了梁高纪录。该桥桥面设有 6 车道,通航净空高为 65m,2 根主缆直径为 1 122mm,为世界上直径最大的主缆;主缆钢丝的极限强度为 1 800MPa,也是世界记录。主缆由预制平行钢丝束组成,这项工艺也适用于同样规模的悬索桥。牵引钢丝由直升飞机牵引跨越明石海峡,这是世界上首次应用的新工艺。

我国现代悬索桥虽然起步较晚,但近年来发展迅速。1997 年建成我国第一座大型悬索桥——广东虎门桥,主跨 888m;1999 年建成江阴长江公路大桥,主跨 1 385m;2005 年 4 月建成通车的润扬长江公路大桥,主跨 1 490m,跨径居世界第三位。我国悬索桥设计和施工水平已迈入世界先进行列。目前我国正在规划建设青岛海湾大桥、琼州海峡大桥等项目。

目前世界上已建成的最大跨度的十大悬索桥见表 3。

表 3 世界前十名最大跨度悬索桥

序号	桥名	主跨/m	桥址	建成年
1	明石海峡大桥	1991	日本神户-鸣门	1998
2	大贝尔特东桥	1624	丹麦 科瑟	1998
3	润扬大桥	1490	中国江苏省	2005
4	恒比尔桥	1410	英国赫尔	1981
5	江阴长江大桥	1385	中国江苏省	1999
6	青马大桥	1377	中国香港	1997
7	维拉扎诺海峡桥	1298	美国纽约	1964
8	金门大桥	1280	美国旧金山	1937
9	霍加库斯腾桥	1210	瑞典韦达	1998
10	麦基诺峡谷桥	1158	美国密歇根州麦基诺城	1957

3.3.4 斜拉桥

斜拉桥又称斜张桥,是一种用斜拉索(或斜拉杆)悬吊桥面的桥梁,由斜拉索、塔柱和主梁组成。高强度钢材制成的斜拉索将主梁多点吊起,并将主梁的恒载和活载传给塔柱,再由塔柱传给基础。斜拉

桥的路径稍低于悬索桥,但在可达到的跨度内较悬索桥经济、刚度大、空气动力性能好。斜拉索常布置成单索面和双索面,主要型式有:辐射型、竖琴型、扇型等。塔柱有柱式、门式、A型、钻石型、倒Y型等,按数量有独塔、双塔或多塔。主梁有混凝土梁、钢箱梁、结合梁和混合梁等。斜拉桥的结构体系可能的选择范围宽广,按斜拉索、塔柱和主梁三者的不同结合方式可分为:悬浮体系、支承体系、塔梁固结体系、刚构体系和协作体系等。斜拉索、塔柱和主梁的不同变化和组合,可以构成不同结构性能、力学特点和美学效果的斜拉桥。在密索体系条件下,可按塔梁墩连接方式、塔的数量、索面数、锚固方式、索的排列形状等,组合成数十种桥型。

1955年在瑞典建成的Stroemsund桥是世界上第一座现代斜拉桥,主跨为182.6m。

1959年,在德国科隆建成了跨越莱茵河的萨维林(Severins)桥,这是座不对称的斜拉桥,主跨302m,采用A形钢塔。该桥是第一座主跨超过300m的斜拉桥。

1975年,法国纳赞雷(Nazaire)桥通车,该桥以主跨404m跨越卢瓦尔河,使斜拉桥主跨跨度的记录达到了400m。

1991年,挪威的斯卡尔桑德桥竣工,使斜拉桥的主跨首次超过半公里的记录。该桥主跨长530m,采用混凝土双塔,塔高为152m,用混凝土结构的加劲梁,明显纤细,其横截面尺寸为13m×21.5m。

中国上海的杨浦大桥,跨黄浦江,主跨长602m,为第一座主跨超过600m的斜拉桥。采用倒Y形混凝土双塔,塔高220m。加劲梁采用结合梁,横截面尺寸为32.5×2.8m。

1995年,法国勒阿弗尔的一座跨越塞纳河的诺曼底桥通车,该桥以主跨856m超过杨浦大桥记录跨度的42%。诺曼底桥加劲梁采用钢和混凝土混合梁,主跨中部624m部分为流线型的钢箱梁,横截面尺寸为23.6m×3.0m,其它部分为预应力混凝土梁,桥塔采用倒Y形混凝土双塔,塔高214m,通航净空高55m。通车之前,对该桥进行了加载试验,采用80辆重15t的卡车慢速过桥,观测到桥面挠度为120cm,塔顶位移为20cm,与计算结果相吻合。

1999年,在日本建成主跨890m的多多罗大桥。该桥位于本州与四国之间的尾道-今治线上。多多罗大桥桥塔采用钻石形及倒Y形组合而成的钢塔,两座桥塔高均为230m,主跨及部分边跨的加劲梁为流线型钢箱梁,横截面尺寸为27.4×2.7m,边跨的远端为混凝土加劲梁,通航净空高42m。该桥为世界上已建成的最大跨径斜拉桥。

目前世界上已建成的最大跨度的十大斜拉桥列于表4。

表4 世界前十位最大跨度斜拉桥

序号	桥名	主跨/m	桥址	建成年
1	多多罗大桥	890	日本 尾道-今治线上	1999
2	诺曼底大桥	856	法国 勒阿弗尔	1995
3	南京长江二桥	628	中国 江苏	2001
4	武汉长江三桥	618	中国 湖北	2002
5	青州闽江大桥	605	中国 福州	1999
6	杨浦大桥	602	中国 上海	1998
7	徐浦大桥	590	中国 上海	1997
7	名港中央大桥	590	日本 名古屋	1998
8	Rion-Antirion	3×560	希腊 科林斯	2004
9	斯卡尔桑德桥	530	挪威 特隆赫姆峡湾	1991

另外,目前在建的大跨度斜拉桥有香港昂船洲大桥(主跨1018m)和连接苏州与南通两座古城的苏通大桥(跨径1088m),设计跨度突破千米。