



普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

钢结构基本原理

主编 孙 强 马 巍
主审 王静峰



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材

钢结构基本原理

主 编 孙 强 马 巍
副主编 曹现雷 尹 楠
主 审 王静峰



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢结构基本原理/孙强,马巍主编.—武汉:武汉大学出版社,2014.1
普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材
ISBN 978-7-307-12340-3

I.钢… II.①孙… ②马… III.钢结构—高等学校—教材 IV.TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 306882 号

责任编辑:王亚明 孙 丽

责任校对:徐 纯

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:850×1168 1/16 印张:20.25 字数:548 千字

版次:2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-12340-3 定价:37.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

普通高等学校土木工程专业精编系列规划教材 编审委员会

(按姓氏笔画排名)

顾问: 干 洪 朱大勇 任伟新 张伟林 程 桦 颜事龙

主任委员: 丁克伟 徐 颖 高 飞

副主任委员: 戈海玉 方达宪 孙 强 杨智良 陆 峰 胡晓军

殷和平 黄 伟

委员: 马芹永 王 睿 王长柏 王佐才 韦 璐 方诗圣

白立华 刘运林 关 群 苏少卿 李长花 李栋伟

杨兴荣 杨树萍 肖峻峰 何夕平 何芝仙 沈小璞

张 洵 张 速 张广锋 陈 燕 邵 艳 林 雨

周 安 赵 青 荣传新 姚传勤 姚直书 袁文华

钱德玲 倪修全 郭建营 黄云峰 彭曙光 雷庆关

总责任编辑: 曲生伟

秘 书 长: 蔡 巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。

基本数字教学资源网站链接:<http://www.stmpress.cn>

前言

高等工程教育“卓越工程师教育培养计划”是为了贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要》而提出的重大改革计划。为了配合卓越计划的实施,安徽省各土木工程专业高校联合武汉大学出版社,启动了“安徽省高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划教材建设项目”,开展了面向区域特色的卓越人才培养模式研究,依据《卓越工程师教育培养计划通用标准》、《高等学校土木工程专业本科指导性专业规范》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》来实施项目建设,本书就是在此背景下撰写的。

本书内容包括概述、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件、钢结构的抗火设计方法,在每章前给出了重点与难点,以实例详述其基本构件的设计步骤与计算公式的应用。

本书内容新颖,密切结合我国现行的最新钢结构设计、施工、材料等有关规范、规程、标准(均截至2012年底),符合工程设计、施工的实际需求。

各章后均附有独立思考,用以练习解题方法和进行技术及构造布置,可收到较好的学习效果。本书可作为高等学校土木工程专业本科教材,经适当节选,也可用于相关专业的专科教材,另外也可作为土建工程技术相关人员的参考资料。

本书由安徽建筑大学孙强、马巍担任主编;安徽工业大学曹现雷、安徽理工大学尹楠担任副主编;安徽建筑大学陈东、李美娟、刘艳,皖西学院葛清蕴,安徽新华学院温学涛担任参编。全书由安徽建筑大学孙强统稿。

具体编写分工如下:

安徽建筑大学,孙强(前言、第1章、第6章);

安徽建筑大学,马巍(第3章);

安徽工业大学,曹现雷(第4章);

安徽理工大学,尹楠(第5章);

安徽建筑大学,陈东(第1章、第6章、附录);

安徽建筑大学,李美娟(第2章);

安徽建筑大学,刘艳(第2章、第3章);

皖西学院,葛清蕴(第2章、第5章);

安徽新华学院,温学涛(第2章)。

本书由合肥工业大学王静峰教授担任主审。

最后感谢本书所引用和参考资料的作者,感谢研究生田伟、胡妍为本书所做的工作。

编者

2013年11月

目录

1 概述	(1)
1.1 钢结构发展的历史、现状和趋势	(2)
1.2 钢结构的主要特点和应用	(12)
1.3 钢结构的设计方法	(14)
1.4 钢结构的材料与选用原则	(20)
1.5 钢结构的疲劳计算及防脆断设计	(28)
知识归纳	(33)
独立思考	(34)
参考文献	(34)
2 钢结构的连接	(35)
2.1 钢结构的连接方法	(36)
2.2 焊缝和焊缝连接的形式	(38)
2.3 对接焊缝的构造和计算	(43)
2.4 角焊缝的构造和计算	(47)
2.5 焊接残余应力和焊接残余变形	(56)
2.6 螺栓连接的排列与构造	(61)
2.7 普通螺栓连接的工作性能与计算	(64)
2.8 高强度螺栓连接的工作性能与计算	(72)
知识归纳	(90)
独立思考	(91)
参考文献	(93)
3 轴心受力构件	(94)
3.1 轴心受力构件的截面强度和刚度	(95)
3.2 轴心受压构件的整体稳定性	(98)
3.3 轴心受压构件的局部稳定性	(108)
3.4 轴心受压柱的设计	(112)
3.5 柱头和柱脚的构造设计	(118)
知识归纳	(132)
独立思考	(132)
参考文献	(133)
4 受弯构件	(134)
4.1 受弯构件的类型和应用	(135)
4.2 梁的强度和刚度	(136)
4.3 梁的扭转	(144)
4.4 梁的整体稳定性	(153)

4.5 梁的局部稳定和腹板加劲肋设计	(162)
4.6 受弯构件设计	(178)
4.7 梁的拼接、连接和支座	(191)
4.8 腹板开孔梁	(196)
知识归纳	(199)
独立思考	(200)
参考文献	(202)
5 拉弯和压弯构件	(203)
5.1 拉弯和压弯构件的类型与应用	(204)
5.2 拉弯和压弯构件的强度与刚度	(206)
5.3 压弯构件的整体稳定性	(209)
5.4 压弯构件的局部稳定性	(215)
5.5 压弯构件的计算长度	(217)
5.6 拉弯、压弯构件的设计	(221)
知识归纳	(241)
独立思考	(241)
参考文献	(244)
6 钢结构的抗火设计	(245)
6.1 钢结构抗火设计的基本概念	(246)
6.2 钢结构抗火设计的耐火极限要求	(246)
6.3 钢结构的材料要求及防火保护措施	(246)
6.4 钢结构的抗火设计方法	(248)
6.5 钢结构的防火保护措施和构造措施	(262)
知识归纳	(274)
独立思考	(274)
参考文献	(274)
附录	(275)
附录 1 钢材和连接强度设计值	(275)
附录 2 受弯构件的挠度容许值及构件截面类别	(279)
附录 3 蜂窝梁的计算	(281)
附录 4 轴心受压构件的整体稳定系数	(284)
附录 5 柱的计算长度系数	(288)
附录 6 疲劳计算的构件和连接分类	(290)
附录 7 型钢表	(297)
附录 8 螺栓和锚栓规格	(312)
附录 9 不同钢结构的回转半径	(313)



概 述

课前导读

内容提要

本章的主要内容为钢结构的特点及应用, 钢结构发展的历史、现状和趋势, 钢结构构件的组成和主要结构形式, 钢结构设计的方法, 钢结构的材料与选用原则以及钢结构的疲劳。本章的重点和难点是钢结构的主要特点及其应用范围, 以及钢结构按概率极限状态的设计方法。

能力要求

通过本章的学习, 学生应了解钢结构的发展状况, 掌握钢结构的主要特点及其合理应用范围、钢结构按概率极限状态的设计方法, 能够根据结构的功能要求合理地选择钢材的种类与规格, 能根据现行规范进行一般钢构件的疲劳验算。

1.1 钢结构发展的历史、现状和趋势

在钢结构的应用和发展方面,我国有着悠久的历史。据历史记载,远在公元1世纪五六十年代,为了与西域国家通商和进行文化及宗教上的交流,在我国西南地区通往南亚诸国的深山峡谷上,就成功地建造了一些铁索桥。如我国云南省景东地区澜沧江上的兰津桥建于公元58—75年,是世界上最早的一座铁索桥,它比欧洲最早出现的铁索桥要早70年。随后陆续建造的有云南省的沅江桥(建于400多年前)、贵州省的盘江桥(建于300多年前)以及四川省泸定县的泸定桥(建于1696年)等。泸定桥由9根桥面铁链、4根桥栏铁链构成,大桥净长100m,宽2.8m,可同时通行两辆马车。铁链锚定在直径20cm、长4m的锚桩上,每根铁链重达1.5t。无论在工程规模还是建造技术上,泸定桥当时都处于世界领先水平。

我国古代在各地还建造了不少铁塔。如湖北省当阳县的玉泉寺铁塔,计13层,高17.5m,建于1061年;江苏省镇江市的甘露寺铁塔,原为9层,现存4层,建于1078年;山东省济宁市的铁塔寺铁塔,建于1105年等。我国古代采用钢铁结构的光辉史绩,充分说明了我国古代在冶金技术方面是领先的。

近百余年来,随着欧洲兴起的工业革命,钢铁冶炼技术的迅速发展,钢结构在欧美一些国家的工业与民用建筑物中得到了广泛的应用,不但在数量上日渐增多,而且应用范围也不断扩大。但由于我国长期处于封建落后的状态,遭受帝国主义的侵略,所以发展很缓慢。那一时期,全国只建造了少量的民用与工业建筑(如上海18层的国际饭店、上海大厦、永安公司等)和一些公路和铁路钢桥,且主要由外商承包设计和施工。同一时期,我国的钢结构工作者在艰难的环境下也建造了一些钢结构建筑物,其中有代表性的有1931年建成的广州中山纪念堂、1934年建成的上海体育馆和1937年建成的杭州钱塘江大桥。钱塘江大桥是我国自行建造的第一座公路、铁路两用钢桥,安全使用到现在。

1949年新中国成立以来,随着我国冶金工业的发展,钢铁产量的增长,钢结构的设计、制造和安装水平有了很大的提高,为我国钢结构的发展创造了条件。

在新中国成立初期的几年时间内,我国建造了一批钢结构厂房和矿场,其中新建的主要有富拉尔基重型机器制造厂、长春第一汽车制造厂、哈尔滨三大动力厂、洛阳拖拉机厂、沈阳和哈尔滨的一些飞机制造厂等,扩建和恢复的有鞍山钢铁公司、武汉钢铁公司和大连造船厂等。此外,还新建了汉阳铁路桥和武汉长江大桥等。1959年在北京建成的人民大会堂,采用了跨度达60.9m、高度达7m的钢屋架和分别挑出15.5m、16.4m的看台箱形钢梁。1961年建成的北京工人体育馆,屋盖采用了直径为94m的车辐式悬索结构,能容纳观众15000人。1965年在广州建成的第一座高200m的电视塔,截面为八角形,八根立柱各由三根圆钢组成,缀条也采用了圆钢组合截面。1967年建成的首都体育馆,屋盖采用了平板网架结构,跨度达99m,可容纳观众15000人。

随后,在“文化大革命”时期,我国的基本建设几乎陷于完全停滞状态。这期间,只建成了少数几个钢结构工程。如1968年建成的南京长江大桥,采用了三跨连续桁架,并适当降低了中间支座,调整了桁架内力,取得了节约钢材10%的经济效果。1973年建成的上海万人体育馆,屋盖采用了直径达110m的圆形平板网架。1978年建成的武汉钢铁公司“一米七”轧钢厂,采用的钢结构用钢量达5万吨。在这十年中,我国无论是钢结构的理论研究,还是工程应用,基本上均处于停滞状态,进展缓慢。

1978年党的十一届三中全会以后,国家工作的重点转到了经济建设方面。从此,我国的社会

主义建设步入了一个新的发展时期,各行各业都出现了蓬勃发展的新态势,对钢结构建筑的需求量不断增加,促使钢产量逐年增长:1985年钢产量为4666万吨;1987年钢产量为5600万吨;1997年钢产量达到1亿吨;到2003年钢产量达到2亿吨;2005年钢产量已超过3亿吨,占世界钢产量的1/3。这促进了我国钢结构建筑的应用和发展。从20世纪80年代起,我国建成的主要大型钢结构工程有:上海宝山钢铁公司第一、二期工程,1986年建成的北京香格里拉饭店(高82.75 m),1987年完工的深圳发展中心大厦(高160 m),1996年竣工的九江长江大桥,2002年竣工的芜湖长江大桥等。

近年来我国高层建筑和大型公共建筑物大量兴建,其中主要有北京京广大厦(高208 m),北京京城大厦(高182.8 m),上海锦江饭店分馆(高153.2 m),再如深圳发展中心大厦,其有5根巨大的箱形钢柱,截面尺寸为1070 mm×1070 mm,钢板厚度达130 mm。1996年建成的深圳市地王大厦,地下3层,地上81层,高383.95 m(到旗杆顶),采用的箱形钢柱最大截面尺寸为2500 mm×1500 mm,钢板最大厚度为70 mm。近年来,钢管混凝土柱的应用也已进入到高层建筑领域。1999年建成的深圳赛格广场大厦(全部柱子为钢管混凝土柱),地下4层,地上72层。

近年来,我国各地建造的很多体育馆、剧场和大会堂等,采用了钢网架结构或悬索结构。例如,首都体育馆采用了尺寸为99 m×112.2 m的正交平板网架;1986年建造的吉林滑冰馆,采用了双层悬索屋盖结构,悬索跨度为59 m,房屋跨度为70 m;1998年为冬运会建造的长春体育馆,采用了两个部分球壳组成的长轴为191.68 m、短轴为146 m的方钢管拱壳屋盖结构,矢高4.067 m。

此外,钢结构还可应用于工业建筑中的飞机库、飞机装配车间等的建造。如1995年建造的首都机场四机位飞机库,是当今世界上规模最大的飞机库,跨度为(153+153)m。其屋盖采用大桥和多层四角锥网架相结合的形式,有10 t悬挂吊车,屋盖结构总重约5 400 t。此外,北京地毯厂、长春第一汽车制造厂、天津钢厂无缝钢管厂以及上海宝钢管坯连铸主厂房等,在厂房屋盖中也采用了网架结构,建筑总面积超过300万平方米。

1993年建成的黑龙江省大庆市电视塔,塔身高160 m,天线高100 m,是我国2000年前已建成的最高的钢电视塔。2000年新建成的黑龙江省电视塔,连天线总高336 m,是迄今世界第二高的钢电视塔。

此外,轻型钢结构发展得也很快。据不完全统计,20世纪90年代后期,我国每年建成的轻型钢结构工程达400万平方米之多。浙江吉利集团修建的临海机车工业有限公司厂房(计14.5万平方米)等工程均采用了轻型钢结构。

进入21世纪后,钢结构向高效钢材、新型结构体系方向发展,如新规范将Q420钢列入推荐钢种,推荐采用H型钢和T型钢,轻型钢结构、预应力钢结构、空间钢结构、膜结构、组合结构得到了广泛应用。以下是对近年来国内外著名钢结构建筑建筑概况及结构特点的介绍。

伦敦奥林匹克体育场(图1-1)俗称“伦敦碗”,是2012年夏季奥林匹克运动会的主场馆,位于伦敦斯特拉特福区,在2012年伦敦奥运会期间设置有大约80000个座位。“伦敦碗”以轻型框架为主要框架结构,配合基础部分的钢混结构形成场馆主体。“伦敦碗”由五层结构环组成:①天篷支架环;②装饰围护环;③看台面板环;④看台支架环;⑤地面看台环。作为2012年伦敦奥运会的主体体育场,伦敦奥林匹克体育场堪称节能型建筑的典范,比其他体育场少用了75%的钢材。伦敦奥林匹克体育场的另一大特色在于其建筑所使用的低碳混凝土,此种材料来源于工业废料,较一般水泥含碳量低了40%;而体育场的顶环更是由剩余的煤气管构筑而成。整座体育场以看得见的方式实践着2012年伦敦奥运会以“减量,再用,循环”的方式促进可持续发展的宣言。在设计上,将体育场下体构筑于碗形基底的策略进一步减少了钢材与混凝土的使用。

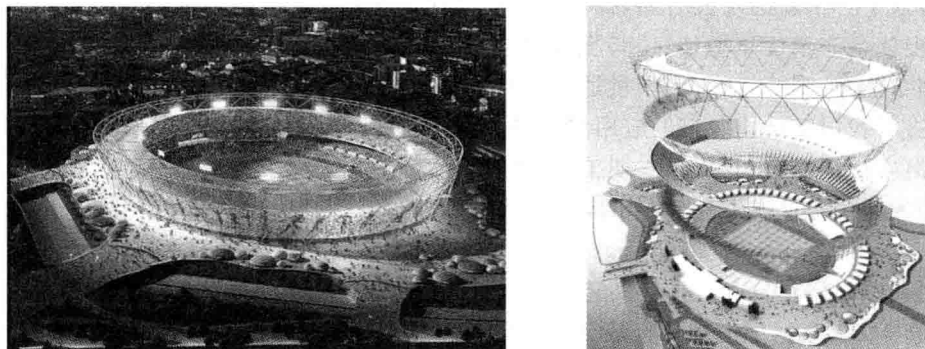


图 1-1 2012 年第 30 届奥运会主场馆——“伦敦碗”

“鸟巢”(图 1-2)工程占地面积 20.4 万平方米,总建筑面积 25.8 万平方米。该工程分体育场、基座和热身场地三部分,体育场建筑造型呈椭圆的马鞍形。其外壳由 4.2 万吨钢结构(用钢量为 $710 \sim 881 \text{ kg/m}^2$)有序编织成鸟巢状;内部为三层混凝土结构碗状看台;平面桁架系结构,椭圆平面尺寸为 $332.3 \text{ m} \times 297.3 \text{ m}$,中央开洞口尺寸为 $185.3 \text{ m} \times 127.5 \text{ m}$;钢结构屋顶上层为 4.2 万平方米 ETFE 单层张拉膜,下层为 5.3 万平方米 PTFE 膜声学吊顶。建筑物南北向(长轴)长 333 m,东西向(短轴)长 280 m;地下 2 层,地上 4~7 层,建筑物高 69.21 m(混凝土结构高 51.1 m), ± 0.00 相当于 43.50 m;钢结构主结构由 24 榀门式桁架组成,其中 22 榀是直线贯通或近似直线贯通。屋盖开口长轴方向(南北向)长度约为 185 m,开口边缘接近跑道的外侧;短轴方向(东西向)长度约为 125 m,边缘接近一层看台内侧。组合柱间共设置 12 对瀑布状大楼梯。



图 1-2 2008 年第 29 届奥运会主场馆——“鸟巢”

亚特兰大体育馆(图 1-3)的结构是一个空间桁架结构,其底部弦杆由环形索替代。其屋顶为 $240 \text{ m} \times 192 \text{ m}$ 的椭圆形,屋顶和外环的用钢量为 $(30+57) \text{ kg/m}^2$,是世界上同类索膜结构中最大的。它由涂有聚四氟乙烯的玻璃纤维膜覆盖。屋面呈钻石状,看上去如水晶一般。整个屋顶由 7.9 m 宽、1.5 m 厚的混凝土受压环固定,共 52 根支柱支撑着周长为 700 m 的混凝土受压环。钢焊接件被预埋进受压环内,以提供 26 个屋顶连接点。为了使屋顶的热膨胀不影响下部结构,受压环坐落在“特氟龙”承压垫上。这样,在外力作用下承压垫只能径向移动,并可将风力和地震力均匀传向基础。

上海金茂大厦(图 1-4)主楼平面基本呈正方形;建筑物高宽比约为 8:1;平面结构规则且双向对称;竖向布置均匀,没有过大的内收;构件截面由下而上逐渐减小,无突变;在 230~382 m 处有一中庭,净高 152 m。金茂大厦主楼主要由以下三个抗侧体系组成:

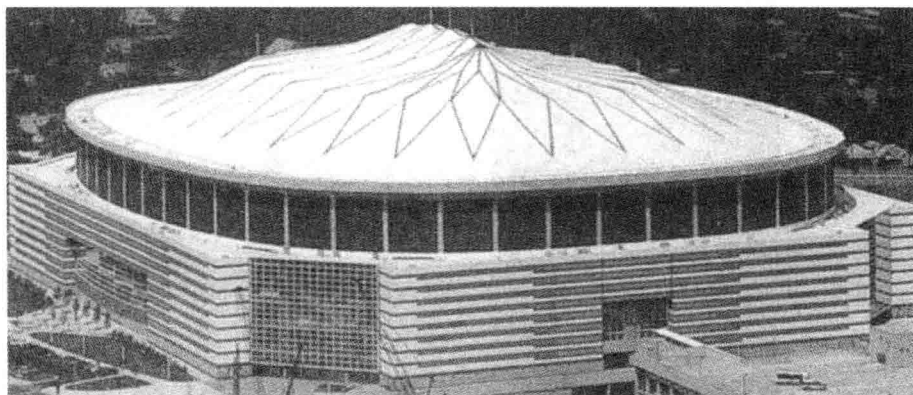
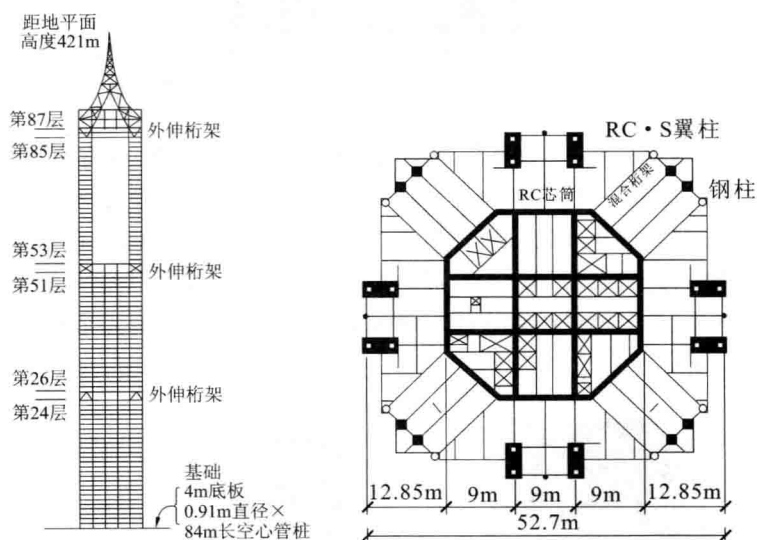


图 1-3 1996 年第 26 届奥运会主场馆——亚特兰大体育馆

图 1-4 金茂大厦(上海浦东, $n=88$, $H=421$ m, 1999 年)

- ① 复合巨型柱;
- ② 钢筋混凝土核心筒;
- ③ 巨型外伸桁架。

主楼的抗侧力构件由钢筋混凝土核心剪力墙, 钢筋混凝土联系梁, 复合巨型柱和位于 24~26 层之间、51~53 层之间、85 层与屋顶之间的钢外伸桁架梁结构组成。以上三个体系共同承担了由风和地震引起的倾覆弯矩, 复合巨型柱和钢筋混凝土核心筒承担了由风和地震引起的剪力。采用三种抗侧力体系为结构提供了极大的富余安全度, 加强了结构的抗侧性能。

埃菲尔铁塔(图 1-5)1887 年起建, 屹立在巴黎市中心的塞纳河畔, 高 320 多米, 相当于 100 层楼高, 极为壮观华丽。4 个塔墩由水泥浇灌, 塔身全部是钢铁镂空结构, 分为三层, 分别在离地面 57.6 m、115.7 m 和 276.1 m 处, 其中一、二层设有餐厅, 第三层建有观景台, 从塔座到塔顶共有 1711 级阶梯, 共用去 7000 t 钢铁, 12000 个金属部件, 259 万只铆钉。埃菲尔铁塔是世界上第一座钢铁结构的高塔, 就建筑高度来说, 当时是独一无二的。

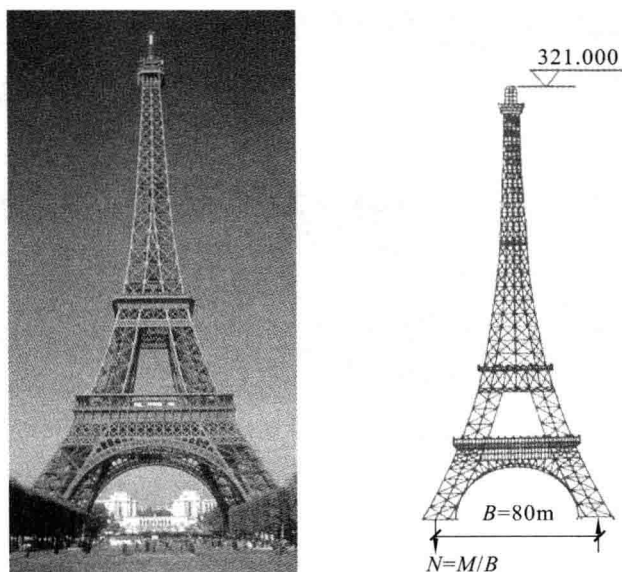


图 1-5 埃菲尔铁塔

空中之城(图 1-6)由 14 个玻璃层保护的 platform 构成,拥有大片的绿色空间。整体结构由巨型框架和巨型支承筒组成,整幢大楼拥有多种用途,可容纳常驻居民 3.6 万人,工人 10 万人,并有广阔空间可供办学校、开商场、建影院等。目前新一代三层电梯正在研发之中,将成为空中之城运输系统的支柱,人们从底层到顶层只需短短 2 min。理论上,空中之城可以将土地重新回收利用变成绿化空间。目前,这一项目尚处于提议阶段,但东京当局对其相当重视。空中之城或许会成为世界上第一个生态城市。

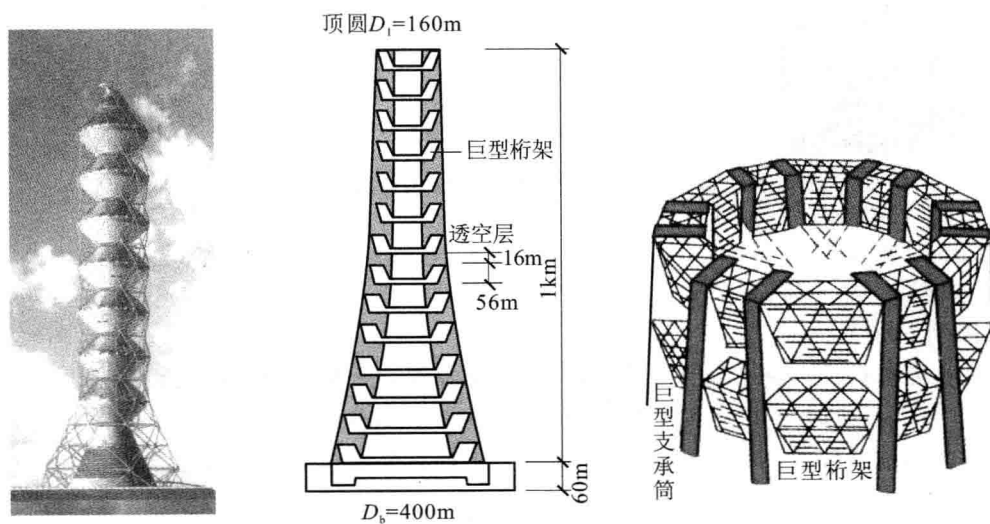


图 1-6 空中之城

中国国家大剧院(图 1-7)的建筑外形是指数为 2.2 的超椭球体,东西长轴为 212.20 m,南北短轴为 143.64 m,总高度 55.73 m,基础埋深-26.10 m。整个建筑的外观犹如漂浮在水面上的一颗明珠。国家大剧院主体建筑钢结构超椭球体壳为一个超大空间壳体,它集建筑、材料、设备等高科

技于一身,其外围装饰板面积约 36000 m^2 。巨大的壳体是建筑与结构的融合体,墙面与顶面浑然一体没有界线。整个钢壳体由顶环梁、钢架构成骨架,148 榀(其中 102 榀不露明,46 榀露明)弧形钢架呈放射状分布,钢架之间由连杆、斜撑连接,壳体钢架外观看似落在水中,实际上下部是支承在 3 m 宽、 2 m 高的巨大混凝土圈梁上。设计考虑到方便施工及加工周期问题,壳体钢结构构件尽量标准化,并易于装配。

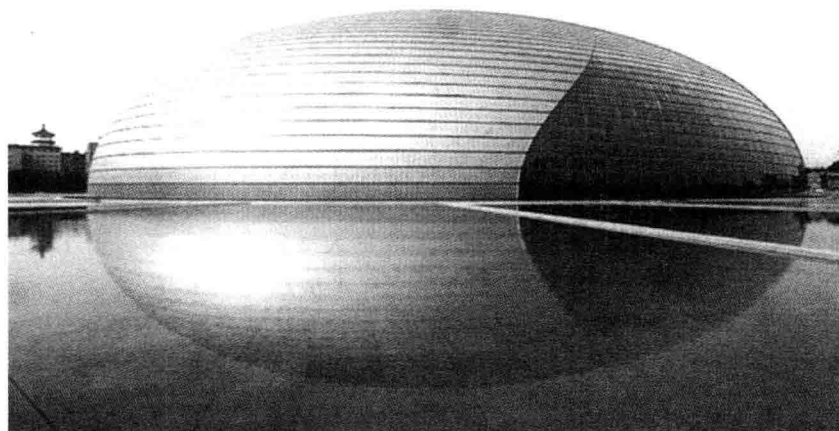


图 1-7 中国国家大剧院(用钢量:0.695 万吨,即 292 kg/m^2)

西尔斯塔楼(图 1-8)属于成束筒结构:钢结构框架焊接在一起,每升高一定的高度,就减少一个筒,所有的塔楼宽度相同,但高度不一。这样既满足了结构要求,也达到了建筑造型的要求,并且减少了因其高度所造成的风中摇动。大厦外面的黑色环带巧妙地遮盖了服务性设施区。西尔斯大厦有 110 层,一度是世界上最高的办公楼。每天约有 1.65 万人到这里上班。在第 103 层有一个供观光者俯瞰全市用的观望台。它距地面 412 m ,天气晴朗时可以看到美国的 4 个州。

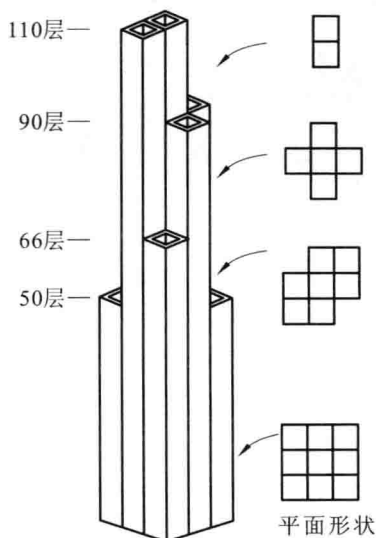


图 1-8 西尔斯塔楼(束筒,1974 年, $H=443.179 \text{ m}$, $n=110$,用钢量 161 kg/m^2)

世贸大楼(图 1-9)共 110 层,411 m 高,是由几幢建筑物组成的综合体。其主体(北楼和南楼)呈双塔形,塔柱边宽 63.5 m。地基扎在坚固的岩石层上。大楼采用钢框架套筒体系,用钢量为 7.8 万吨,楼的外围有密置的钢柱,墙面由铝板和玻璃窗组成,有“世界之窗”之称。大楼中的一切机器设备都用电脑控制,不论酷暑寒冬,均能自动调节,被誉为“现代技术精华的汇集”。大楼于 1966 年开工,历时 7 年,1973 年竣工(北塔在 1972 年,而南塔在 1973 年完工)。1995 年对外开放,整个工程耗资 7 亿美元。它共包括 7 栋建筑物,主要由两栋 110 层的塔楼(415.14 m)组成,此外还有 8 层的海关大厦和豪华级玛里奥特饭店等。第 9 层以下承重外柱间距为 3 m,9 层以上外柱间距为 1 m,标准层窗宽约 0.55 m,核心部位为电梯井,每座楼内设电梯 108 部。地下 1 层为综合商场,地下 2 层为地铁站,地下 3 层及以下为地下车库,可停放汽车 2000 辆。

自由塔(Freedom Tower,图 1-10)的正式名称为世界贸易中心一号大楼自由塔(One World Trade Center, Freedom Tower),是美国纽约新世界贸易中心的摩天大楼,坐落于 9·11 事件中倒塌的原世界贸易中心双子塔楼的旧址,高度为 541.3 m,地上 82 层(不含天线),地下 4 层,占地面积 241540 m²。就像世贸中心一样,它将有挑高达 24 m 的大型公共门厅,还有餐厅。但出于安全上的顾虑,最底部的 9 m 将没有窗户,而全赖人工照明;9~24 m 则透空采光;紧接其上的 37 m 也没有窗户。基座外墙覆盖反射性金属帷幕,会采用不锈钢和钛为材质。当太阳跨越天空,阳光照在这些反射性金属帷幕所交织成的切面上时,就会闪烁出各式的光芒。

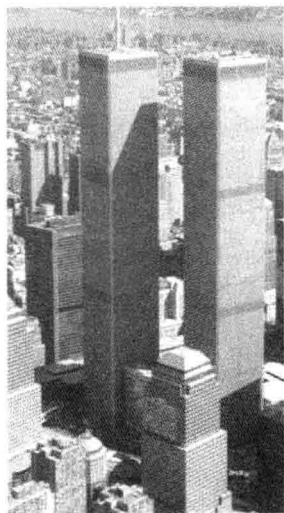


图 1-9 世贸大楼(框筒,1973 年)

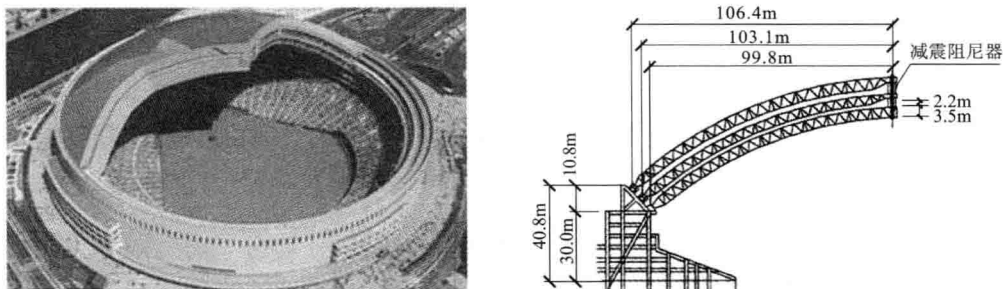
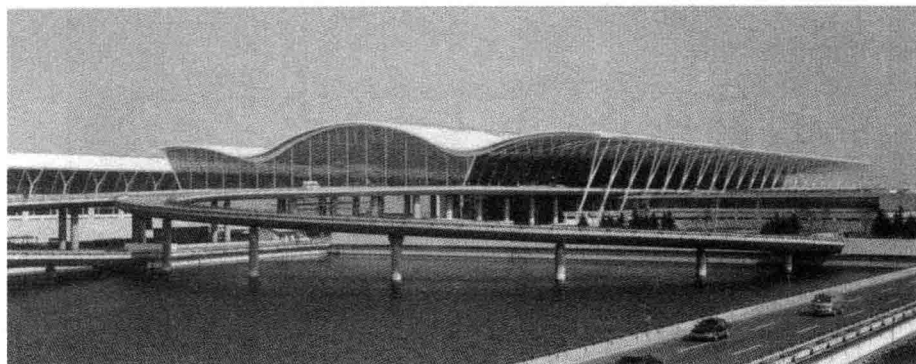


图 1-10 美国自由塔($H=541$ m)



日本福冈穹顶体育馆(图 1-11)建成于 1993 年,为棒球场及多功能比赛场,是日本第一座超大型开合屋盖结构体育场。其直径为 222 m,矢高为 43.2 m,室内场地最高高度 68.1 m,可容纳 4 万观众。该结构由 3 片网壳组成,最下一片固定,中片及上片可沿着圆的导轨移动,移动方式为鸟翼回转重叠式。全部敞开后呈 125°的扇形开口,各片网壳均由片状截面的网格组成且各自支承。

上海浦东国际机场航站楼(图 1-12)为一大跨度空间钢结构。屋盖采用预应力张弦梁结构,张弦梁纵向间距为 9 m,通过纵向桁架将荷载传给倾斜的 Y 形钢柱。Y 形钢柱的截面形式为沿轴线变截面(截面尺寸改变但形状不变)的箱形截面,纵向柱距为 18 m,横向根据建筑功能的要求,柱距不同,最大柱距为 89 m。

图 1-11 日本福岡穹顶(1993 年, $D=222\text{ m}$)图 1-12 上海浦东国际机场航站楼(张弦梁跨度小于 100 m)

东莞厚街体育馆(图 1-13)总投资 1.2 亿元,是东莞市属重点工程和厚街镇的重点民心工程。其建筑面积为 2.28 万平方米,设观众席位 7830 个。厚街体育馆钢屋盖采用椭圆抛物面稀索体系弦支穹顶结构,平面投影为椭圆形($127.875\text{ m} \times 93\text{ m}$),其中支座间长轴方向的结构净跨为 110 m ,短轴方向的结构净跨为 80 m 。上部单层网壳矢高为 9.4 m ,长轴矢跨比为 $1/11.7$,短轴矢跨比为 $1/8.5$ (相对于结构净跨)。屋盖投影面积为 9340 m^2 ,展开面积约为 9825 m^2 。单层网壳采用混合网格布置(联方型+凯威特型),其中在屋盖中心区域,为兼顾建筑美观和采光要求,设计为绽放的花瓣状网格。屋盖沿 $110\text{ m} \times 80\text{ m}$ 椭圆线支承在混凝土圈梁顶,共设固定铰支座 24 个,支座采用焊接空心球,球中心标高为 22.600 m 。

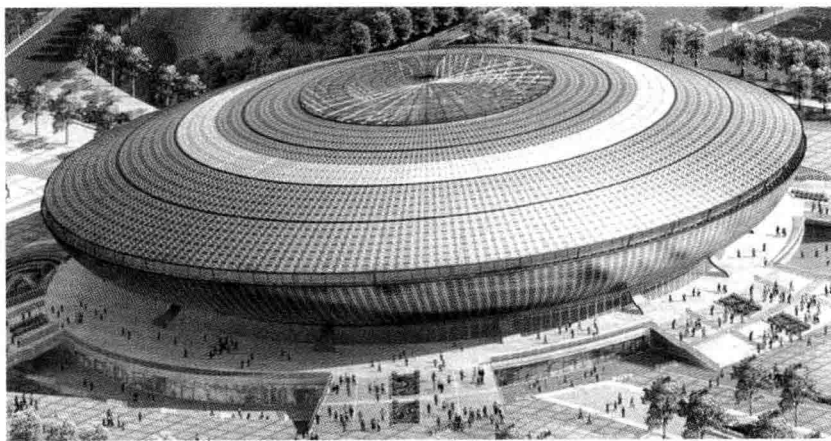


图 1-13 东莞厚街体育馆——弦支穹顶结构