



21世纪全国本科院校土木建筑类**创新型**应用人才培养规划教材

钢结构设计原理

主 编 胡习兵 张再华
主 审 舒兴平

赠送电子课件

- 突出应用，增加钢结构工程应用案例
- 参照注册结构工程师考试编排课后习题



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材

钢结构设计原理

主 编	胡习兵	张再华		
副主编	尹志明	戴益民	于 杰	
主 审	舒兴平			

 **北京大学出版社**
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书着重讲述钢结构基本原理, 主要内容包括钢结构材料、钢结构的连接和钢结构基本构件(轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件)的设计。本书后的附录, 列出了设计需要的各种数据和系数, 以供读者查用。各章还附有必要的设计例题和工程应用相关知识, 以便学生学习和掌握。

本书主要依据土木工程专业本科生培养方案编写, 但对相关知识点的数学推导过程等内容进行了部分调整。本书可作为本科和专科相关专业的教学用书, 也可作为工程设计人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计原理/胡习兵, 张再华主编. —北京: 北京大学出版社, 2012. 8

(21 世纪全国本科院校土木建筑类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-21142-7

I. ①钢… II. ①胡…②张… III. ①钢结构—结构设计—高等学校—教材

IV. ①TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 194015 号

书 名: 钢结构设计原理

著作责任者: 胡习兵 张再华 主编

策划编辑: 卢 东 吴 迪

责任编辑: 卢 东 林章波

标准书号: ISBN 978-7-301-21142-7/TU·0264

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京富生印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 362 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

近年来,我国经济发展迅速,钢结构在土木工程中的应用也越来越广泛。钢结构有结构轻、强度大等优点,但同时也存在易腐蚀、耐火性差等缺点,为了解决好这些问题,工程界的学者和技术人员进行了不懈的努力,取得了许多的成果,积累了丰富的经验,促使新技术、新方法不断涌现,由此钢结构的设计以及应用也得到了飞速的发展。

按照高等学校土木工程专业指导委员会关于“土木工程专业本科(四年制)培养方案”的要求,“钢结构设计原理”是高等院校土木类专业四年制本科教育的一门专业必修课,是继“混凝土结构设计原理”等主干课程之后开设的又一门重要专业课。本书主要作为高等学校土木工程专业钢结构课程的教材,严格按照最新修订的“钢结构设计原理”课程教学大纲要求和新的国家规范编写。本书主要介绍了钢结构的特点、应用和计算方法,钢材和连接材料的特性,钢结构的稳定理论,钢结构的连接方法及其计算构造原则,钢结构基本构件(轴心受拉、轴心受压、受弯构件、拉弯和压弯构件)的工作特性和基本的设计方法等。

本书内容共有6章,包括绪论、钢结构材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、拉弯和压弯构件。本书以《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)为依据,深入浅出地阐述了各种钢结构设计理论,强调适用性和可操作性,以达到解决工程实际问题的目的,并参照近年来注册结构工程师考试的内容和题型编写了例题和习题。

本书由中南林业科技大学胡习兵和湖南城市学院张再华担任主编,编写人员具体分工如下:第1章、第2章由中南林业科技大学胡习兵编写;第3章由湖南科技大学戴益民编写;第4章由湘潭大学尹志明编写;第5章由湖南城市学院张再华编写;第6章由中南林业科技大学于杰编写。

在本书编写过程中,得到了中南林业科技大学许多教师的大力支持,杨雨薇和陈达做了大量的工作,在此表示感谢!

此外,本书参考了一些相关专家的资料,湖南大学的舒兴平教授审阅了本书并给出了宝贵意见,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,还望广大读者批评指正。

编 者

2012年4月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.1.1 焊缝连接	28
1.1 钢结构概况	2	3.1.2 螺栓连接	28
1.2 钢结构特点	4	3.1.3 铆钉连接	30
1.2.1 钢结构的优点	4	3.2 焊接方法和焊接连接形式	30
1.2.2 钢结构的缺点	5	3.2.1 常用焊接方法	30
1.3 钢结构的工程应用	5	3.2.2 焊缝连接形式及焊缝形式	32
1.4 钢结构的发展趋势	9	3.2.3 焊缝缺陷及焊缝质量 检测	33
本章小结	10	3.2.4 焊缝符号、螺栓及其 孔眼图例	34
习题	10	3.3 对接焊缝的构造与计算	35
第 2 章 钢结构材料	11	3.3.1 对接焊缝的构造	35
2.1 钢材的力学性能	12	3.3.2 对接焊缝的计算	36
2.1.1 钢材的强度	12	3.4 角焊缝的构造及计算	39
2.1.2 钢材的塑性	13	3.4.1 角焊缝的构造	39
2.1.3 钢材的冷弯性能	14	3.4.2 直角角焊缝强度计算的 基本公式	42
2.1.4 钢材的抗冲击韧性	14	3.4.3 各种受力状态下直角角焊缝 连接的计算	44
2.2 钢材的破坏形态	15	3.4.4 斜角角焊缝的计算	52
2.2.1 钢材的脆性破坏	15	3.5 焊接应力与焊接变形	53
2.2.2 钢材的疲劳破坏	16	3.5.1 焊接应力的分类和产生的 原因	53
2.3 影响钢材性能的因素	16	3.5.2 焊接应力对结构性能的 影响	54
2.3.1 化学成分的影响	16	3.5.3 焊接变形	55
2.3.2 生产工艺的影响	17	3.5.4 减小焊接应力和焊接变形的 措施	56
2.3.3 钢材的硬化	18	3.6 普通螺栓连接的构造和计算	57
2.3.4 温度的影响	18	3.6.1 螺栓的排列及其他构造 要求	57
2.3.5 应力集中的影响	19	3.6.2 普通螺栓的受剪连接	60
2.4 钢材的分类	19	3.6.3 普通螺栓的受拉连接	64
2.5 钢材的选用	23	3.6.4 普通螺栓受剪力和拉力共同 作用	68
2.6 钢材的规格	24		
本章小结	26		
习题	26		
第 3 章 钢结构的连接	27		
3.1 钢结构的连接方法	28		

3.7 高强度螺栓连接的构造和计算	68	4.7.4 格构式轴心受压构件的 缀材计算和构造要求	96
3.7.1 高强度螺栓连接的工作 性能和构造要求	68	4.7.5 格构式轴心受压构件的 截面设计	99
3.7.2 高强度螺栓连接的 抗剪计算	69	4.8 柱头和柱脚的构造设计	103
3.7.3 高强度螺栓连接的 抗拉计算	70	4.8.1 柱头的构造设计	104
3.7.4 同时承受剪力和拉力的 高强度螺栓连接承载力 计算	70	4.8.2 柱脚的构造设计	105
3.7.5 高强度螺栓群的计算	71	本章小结	110
本章小结	74	习题	111
习题	74		
第4章 轴心受力构件	77	第5章 受弯构件	113
4.1 轴心受力构件的特点和 截面形式	79	5.1 受弯构件的种类和截面 形式	114
4.2 轴心受力构件的强度和刚度	80	5.1.1 实腹式受弯构件	114
4.2.1 强度	80	5.1.2 空腹式受弯构件	115
4.2.2 轴心受力构件的 刚度计算	80	5.2 受弯构件的强度和刚度	117
4.3 轴心受压构件的整体稳定	82	5.2.1 受弯构件的强度	117
4.3.1 轴心受压构件的 实际承载力	82	5.2.2 受弯构件的刚度	123
4.3.2 轴心受压构件稳定系数 φ 的 分类	83	5.3 受弯构件的整体稳定	123
4.4 轴心受压构件整体稳定计算的 构件长细比	86	5.3.1 概述	123
4.5 轴心受压构件的局部稳定	88	5.3.2 梁在弹性阶段的 临界弯矩	124
4.6 实腹式轴心受压构件设计	90	5.3.3 《钢结构设计规范》关于 梁整体稳定性计算的 规定	126
4.6.1 截面形式	90	5.4 受弯构件的局部稳定和 加劲肋设计	131
4.6.2 截面选择和验算	91	5.4.1 受弯构件的局部稳定	131
4.6.3 板件的连接焊缝	91	5.4.2 腹板的局部稳定计算	137
4.7 格构式轴心受压构件设计	94	5.5 考虑腹板屈曲后强度的 组合梁设计	145
4.7.1 格构式轴心受压构件的 截面形式	94	5.5.1 腹板屈曲后的 抗剪承载力 V_u	145
4.7.2 格构式轴心受压构件的 整体稳定承载力	95	5.5.2 腹板屈曲后的 抗弯承载力 M_u	146
4.7.3 格构式轴心受压构件的 分肢稳定性验算	95	5.5.3 考虑腹板屈曲后强度的 梁的计算式	147
		5.5.4 考虑腹板屈曲后强度的 梁的加劲肋设计特点	147
		5.6 型钢梁的设计	148
		5.6.1 单向弯曲型钢梁	148

5.6.2 双向弯曲型钢梁	150	6.4.1 单向压弯构件翼缘的 局部稳定	180
5.7 组合梁的设计	153	6.4.2 单向压弯构件腹板的 局部稳定	180
5.7.1 试选截面	153	6.5 实腹式单向压弯构件的计算	182
5.7.2 截面验算	155	6.5.1 截面形式与选择	182
5.7.3 组合梁截面沿长度的 改变	156	6.5.2 构件验算内容	183
5.7.4 焊接组合梁翼缘焊缝的 计算	158	6.5.3 构造要求	183
5.8 梁的拼接、连接与支座	163	6.6 格构式单向压弯构件的计算	184
5.8.1 梁的拼接	163	6.6.1 截面形式与选择	184
5.8.2 梁的连接	164	6.6.2 构件验算内容	184
5.8.3 梁的支座	165	本章小结	187
本章小结	167	习题	188
习题	167		
第 6 章 拉弯和压弯构件	170	附录 1 钢结构用钢化学成分和 机械性能	190
6.1 概述	171	附录 2 钢材和连接的强度设计值	192
6.1.1 拉弯构件	171	附录 3 轴心受压构件的稳定系数	195
6.1.2 压弯构件	172	附录 4 梁的整体稳定系数	200
6.2 单向压弯构件的强度和刚度	172	附录 5 受弯构件的容许挠度	204
6.2.1 单向压弯构件的 强度计算条件准则	172	附录 6 常用型钢规格及截面特性	205
6.2.2 单向压弯构件的 强度公式推导	173	附录 7 疲劳计算的构件和 连接分类	239
6.2.3 单向压弯构件的刚度	175	参考文献	242
6.3 单向压弯构件的整体稳定	175		
6.3.1 单向压弯构件平面内 失稳	175		
6.3.2 单向压弯构件平面外整体 稳定	178		
6.4 单向压弯构件的局部稳定	180		

第1章

绪论

教学目标

本章主要讲述钢结构工程的发展历程、特点、工程应用和发展趋势。通过本章学习，应达到以下目标。

- (1) 掌握钢结构工程的优缺点。
- (2) 熟悉钢结构的工程应用范围。
- (3) 了解钢结构工程的发展趋势。

教学要求

知识要点	能力要求	相关知识
钢结构的优缺点	(1) 理解钢结构优点 (2) 熟悉钢结构缺点对其应用的影响	(1) 钢结构迅速发展的原因 (2) 工程应用中克服其缺点的途径
钢结构工程应用范围	熟悉钢结构的常用结构形式	(1) 各结构形式的基本组成 (2) 典型的工程应用实例
钢结构的发展趋势	了解其发展动态	(1) 国内外发展现状 (2) 工程应用对钢结构发展的要求



基本概念

钢结构工程、大跨度结构、高耸结构、混合结构、轻钢结构



引例

近三十年来，随着改革开放政策的实行和推进，我国钢结构相关工作取得了突飞猛进的进展。1996年，我国钢产量首次突破亿吨大关；2011年，我国钢产量已达7.3亿吨，钢产量的增长为发展我国钢结构建设事业创造了极好的时机。然而，我国的建筑用钢总量仅占全部钢产量的20%~25%，而工业发达的国家则占30%以上，如美国和日本，该项指标均已超过50%。由此说明，我国钢结构的发展前景非常广阔。

钢结构(Steel Structure)作为土木工程项目中的一种常用结构形式，在现代工程结构中得到了极为广泛的应用，钢材本身所具有的特点对钢结构的发展起了决定性的作用。了解钢结构的发展历史、现状及发展趋势，理解钢结构所具有的特点和钢结构的工程应用范围，能为本课程的学习打下良好的基础。

1.1 钢结构概况

用 H 型钢(H Beam)、工字钢(I-Beam)、槽钢(Channel Steel)、角钢(Angle Steel)等热轧型钢和钢板(Steel Plate)组成的以及用冷弯薄壁型钢制成的承重构件或承重结构统称为钢结构。钢结构是各类工程结构中应用非常广泛的一种建筑结构,发展至今已有四千多年的历史了。最早可以追溯到公元前 2000 年左右,在美索不达米亚平原(位于今天的伊拉克境内的幼发拉底河和底格里斯河之间)就出现了早期的炼铁术。

作为较早发明炼铁技术的国家之一,早在战国时期,我国的炼铁技术已很盛行,在河南辉县等地出土的大批战国时代(公元前 475~公元前 221 年)的铁制生产工具就说明了这点。公元 65 年(汉明帝时代),已成功地用锻铁(Wrought Iron)为环,相扣成链,建成了世界上最早的铁链悬桥——兰津桥。此后,曾陆续建造了数十座铁链桥,其中跨度最大的要数四川泸定桥,如图 1-1 所示。1705 年(清康熙四十四年)建成的四川泸定大渡河桥,桥宽 2.8m,跨长 100m,桥身由 13 根碗口粗的铁链组成,左右两边各 2 根,每根铁链由 862~997 个手工打造的铁环相扣,质量达 21t 多,扶手与底链之间用小铁链相连接,将 13 根铁链形成一个整体,铁链两端系于直径为 20cm、长 4m 的生铁铸成的锚桩上。该桥比美洲 1801 年才建造的跨长 23m 的铁索桥早近百年,比号称世界最早的英格兰 30m 铸铁拱桥也早 74 年。除铁链悬桥以外,我国古代还修建了许多铁建筑物,如现存的建于公元 1061 年的湖北荆州玉泉寺 13 层铁塔、山东济宁铁塔和江苏镇江甘露寺铁塔等。这些表明我国对铁结构应用所取得的卓越成就。

虽然我国很早便将铁应用于承重构件,但由于长期受封建主义社会制度的束缚,钢结构技术并没有得到较快发展。在国外,自从 18 世纪欧洲工业革命以来,由于钢铁工业的发展,钢结构在欧洲各国的应用逐渐增多,范围也不断扩大。而国内直到 19 世纪末才开始采用现代化钢结构,并取得了一定的成就,如沈阳皇姑屯机车厂的钢结构厂房(1927 年)和广州中山纪念堂圆屋顶钢结构(1931 年)等。1937 年修建的杭州钱塘江大桥全长 1453m,分引桥和正桥两个部分,正桥 16 孔,桥墩 15 座,下层铁路桥长 1322.1m,单线行车,上层公路桥长 1453m,宽 6.1m,两侧人行道各 1.5m,该桥雄伟壮观,堪称当时钢结构工程的应用典范,如图 1-2 所示。



图 1-1 泸定桥



图 1-2 钱塘江大桥

新中国成立后,我国的冶金工业与钢结构设计、制造和安装水平有了很大提高,发展十分迅速,如1957年建成的武汉长江大桥,正桥3联9孔,每孔跨度为128m,全长1155.5m。1959年建成的北京人民大会堂总建筑面积为171800m²,钢屋架跨度为60.9m,高度为7m,大会堂会场挑台钢梁悬臂长度达16m。1961年建成的北京工人体育馆,能同时容纳15000名观众,比赛大厅屋盖采用轮式双层悬索结构,直径为94m,由索网、边缘构件(外环)和内环三部分组成。1967年建成的北京首都体育馆屋盖结构占地约70000m²,主馆建筑面积40000m²,长度为122.2m,宽度为107m,高度为28.5m,整个工程从设计、施工到材料、设备都是依靠我国的力量建造的。1968年建成的南京长江大桥为钢桁梁结构,共有9墩10孔,最大跨度为160m,主桁架采用带下加劲弦杆的平行弦菱形桁架,为双层双线公路和铁路两用桥。所有这些,都标志着我国钢结构已迈入一个新的发展阶段。

由于受到钢产量的制约,在其后的很长一段时间内,钢结构被限制在其他结构不能代替的重大工程项目中使用,在一定程度上影响了钢结构的发展。

改革开放以来,我国经济建设获得了飞速的发展,钢产量逐年增加。逐步改变了钢材供不应求的局面,我国的钢结构技术政策,也从“限制使用”改为“积极合理地推广应用”,钢结构得到了空前的发展和应用,不论在数量上或质量上都远远超过了过去。此时,我国在设计、制造和安装等技术方面都达到了较高的水平,掌握了各种复杂建筑物的设计和施工技术,钢结构进入飞速发展的阶段,从计算机设计、制图、数控、自动化加工制造到科学管理等方面都有了一套独特的方法,在工程应用中取得了巨大的成就。

1999年建成的上海金茂大厦高420m(图1-3),地上88层,地下3层。2007年建成的中央电视台新办公大楼高度尽管只有234m(图1-4),但由于其独特的造型被美国《时代》周刊评选为2007年世界十大建筑奇迹。2008年建成的北京奥运会主场馆——鸟巢(图1-5)最高点高度为68.5m,最低点高度为42.8m,总建筑面积为258000m²,可容纳9.1万人,是科技奥运的完美体现,自主创新研制的Q460钢材,撑起了“鸟巢”的钢筋铁骨。

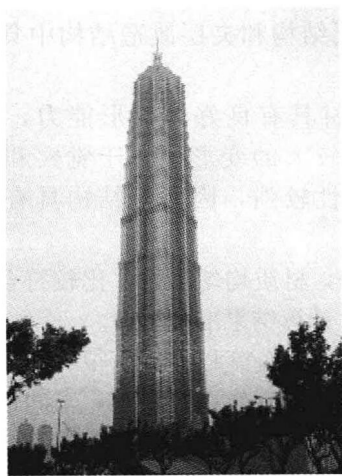


图 1-3 上海金茂大厦



图 1-4 中央电视台办公大楼

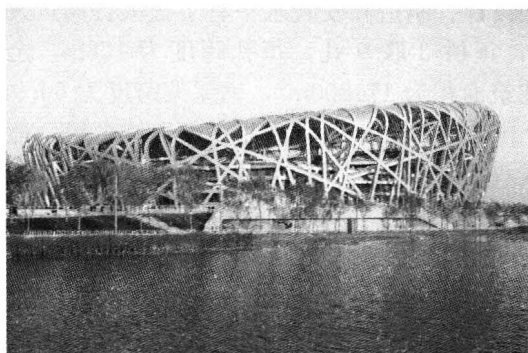


图 1-5 国家体育场“鸟巢”

在多年工程实践和科学研究的基础上,我国钢结构工程的设计、制作、安装和验收等各环节已趋于完善,步入成熟阶段。目前,涉及钢结构用的材质标准、型材标准、板材标准、管材标准、连接材标准、涂料标准和各种性能的试验方法标准共有百余种,为钢结构在我国快速发展创造了条件。

与此同时,钢结构在国际市场的地位也不容忽视,很多国家不仅在大型建筑中大量地运用钢结构,在小型基础建设上也开始大范围使用钢结构,如目前在美国、澳大利亚、芬兰、瑞典、丹麦以及法国,钢框架体系正在变得越来越普及,丹麦人早已建造了大量基于钢骨架体系的低层住宅,在芬兰和瑞典也有一些钢框架的低层住宅已建造完成。

1.2 钢结构特点

钢结构工程是土木工程(Civil Engineering)的主要结构类型之一,与其他材料建造的结构相比,具有许多特点。

1.2.1 钢结构的优点

(1) 质量轻而强度高。虽然钢材的密度较大,但它的强度(Strength)却比其他建筑材料(如混凝土、木材和砌块等)高很多,其密度与强度的比值相对较小,当承受的荷载和支座条件相同时,钢结构截面面积相对较小。例如,当跨度和荷载均相同时,钢屋架的质量仅为钢筋混凝土屋架的 $1/4 \sim 1/3$,冷弯薄壁型钢屋架甚至接近 $1/10$,为运输和吊装提供了方便。因而钢结构在大跨度结构、房屋加层结构和夹层改造结构中具有明显的优势。

(2) 塑性(Plastic)和韧性(Toughness)好。钢材具有良好的变形能力,一般不会因为荷载作用而发生突然断裂破坏,且破坏前有较大的变形,易于觉察和躲避。同时,钢材还具有良好的韧性,对动力荷载的适应性较强,因而钢结构具有好的抗震性能。

(3) 材质均匀。钢材由钢厂生产,质量控制严格,材质均匀性好,比较符合各向同性假设,与目前结构分析中采用的计算理论较为吻合,计算结果准确可靠。

(4) 工业化程度高,工期短。钢结构与其他结构在建造流程上有着很大的区别。钢结构建造流程可分为两个阶段:构件制作与现场安装。构件制作主要在工厂车间进行集中制作,工业化程度高,加工精确度高。制成的构件运到现场拼装,采用螺栓连接或焊接,施工效率高,施工不受季节影响,工期短。因而在现代工业厂房结构中,钢结构具有非常明显的优势。

(5) 密闭性好。钢材的组织非常密实,采用焊接(Weld)可以做到完全密封。一些要求气密性和水密性的高压容器、大型油库、输送管道等都适宜采用钢结构。

(6) 绿色环保。钢结构工程现场作业量较小,噪声、施工污水和灰尘等对周围环境的污染较少。同时,当房子使用寿命到期,结构拆除产生的固体垃圾也少,而废钢还可回收利用,因而被誉为“绿色建筑”。

1.2.2 钢结构的缺点

与其他材料的结构相比,钢结构有以下缺点。

(1) 耐热性好,防火性能差。钢材耐热而不耐高温。随着温度的升高,强度就会降低。当周围存在辐射热,温度在 150°C 以上时,必须在局部区域采取隔热保护措施。一旦发生火灾,未加防护的钢结构一般只能维持20min左右。为了提高钢结构的耐火极限,通常都用混凝土(Concrete)或砖(Brick)把它包裹起来。此外,还应根据建筑物的耐火极限时间,对承重构件采取有效的防护措施,如涂刷防火涂料等。

(2) 耐腐蚀性差。钢结构在湿度大和有侵蚀介质的环境下容易锈蚀,影响结构的耐久性和使用安全。为确保结构具有足够的耐久性,钢结构工程每隔一定时间都要重新刷防腐涂料。目前,国内外正在发展各种高性能的涂料和不易锈蚀的耐候钢。

(3) 造价相对较高。采用钢结构后结构造价会略有增加,往往影响业主的选择。据统计,对高层建筑而言,钢结构与钢筋混凝土结构间的价差约占工程总投资的 $5\%\sim 10\%$ 。这一差价常可由于采用钢结构后因自重轻而降低基础造价、增加建筑使用面积和缩短施工周期等得到相当程度的弥补,从而提高工程的综合经济效益。

1.3 钢结构的工程应用

钢结构是各类工程结构中应用比较广泛的一种建筑结构。针对房屋结构的自身特点,一些高度或跨度较大、荷载或吊车起重量较大、有较大振动或较高温度的工作环境、要求能活动或经常装拆的结构和在地震多发区的房屋结构,均可考虑采用钢结构。钢结构应用范围大致有以下几类。

1. 大跨度结构

在大跨度结构中,网架(Wire Frame)与网壳(Reticulated Structure)仍是当前我国常用的结构形式,如机库、航站楼、体育馆、展览中心、大剧院、博物馆等大跨度建筑的屋面采用钢网架或网壳结构形式较普遍。近年来,我国以钢网架及网壳为代表的空间网格结构得以迅速发展,100多米跨度的网架或网壳建筑已有多座,网架结构形式如图1-6所示。

随着数控技术的发展,空间钢管桁架(Truss)结构在我国现代大跨度结构中脱颖而出。这种结构简洁大方,能展现结构的力学美,其身姿更引人注目。目前我国在建的高铁客运站、候机楼和体育馆等大型公共建筑多采用这种结构形式,如图1-7所示。



图 1-6 某体育馆看台网架结构



图 1-7 长沙高铁站空间钢管结构

其余的大跨度结构形式还包括：框架(Frame)结构、拱式(Arch)结构、悬索结构(Suspended Cable)、悬挂结构(Suspended)和预应力(Pre-stressed)钢结构等。代表性建筑有 2008 年北京奥运会国家体育场馆、2009 年济南全运会体育场馆、2010 上海世博会会场、2010 年亚运会体育场馆和 2011 年深圳大运会体育场馆等。

2. 高层建筑钢结构

钢结构在高层和超高层建筑中应用非常广泛，如旅馆、饭店、公寓、办公大楼和住宅等。其常用的结构形式有支撑钢框架结构和钢框架-混凝土核心筒混合结构(以下简称钢-混混合结构)等。据统计，在我国在建和已建成的高层和超高层建筑中，钢-混混合结构所占比例约为 50%，世界第一高的哈利法塔(图 1-8)和上海环球金融中心(图 1-9)就是采用此结构类型。



图 1-8 哈利法塔

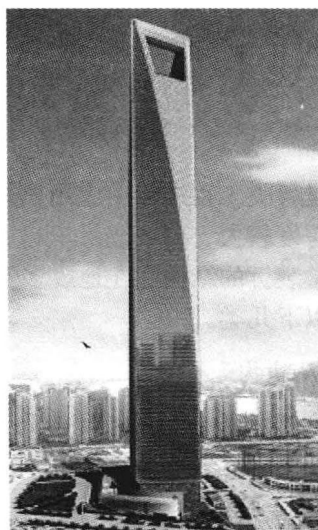


图 1-9 上海环球金融中心

20 世纪 80 年代至今，我国已建成和在建的高层钢结构达 100 多幢，总面积约 800 万 m^2 ，钢材用量 80 多万吨。在北京、上海、广州和深圳等经济较为发达的城市目前正在建和新建成的高层钢结构就达到十余幢。如上海中心大厦(高 632m，在建)、上海环球金融中心(高 492m)、北京电视中心(高 227m)和央视新办公大楼(高 234m)等。可见钢结构在此类

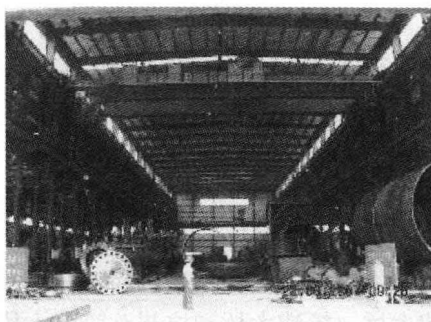
建筑类型中的运用和发展都非常迅速。早在 1998 年建大连国贸中心(高 201m)时,就做到了所用钢结构全采用国产钢材,体现了我国钢产业的生产实力,这实力促进了我国钢结构的发展。

3. 工业厂房钢结构

工业厂房(Industrial Plant)主要有轻型工业厂房和重型工业厂房两种。相对重型工业厂房而言,轻型工业厂房主要采用小截面型钢或焊接宽翼缘的 H 型钢建造,用钢量通常不超过 $50\text{kg}/\text{m}^2$,因而厂房内吊车吨位相对较小,这种结构常出现在我国各级城市的经济技术开发区内的工业建筑中。对于钢铁联合企业、冶金工业、重型机械制造业以及大型动力设备制造业的许多车间都适合采用重型工业厂房建造,如图 1-10 所示。



(a) 厂房外观



(b) 厂房内景

图 1-10 某重型化工厂

工业厂房中最常见的结构形式为门式刚架结构。在工程应用中,门式刚架(Portal Frame)结构跨度一般不超过 40m,个别达到 70m 以上,可用于单跨单层或多跨单层的厂房结构,也可用于二或三层建筑。目前,我国门式刚架结构已有较为完备的设计、施工和质量验收规范与规程。

4. 高耸钢结构

高耸钢结构为高而细的钢结构[如各类钢塔(Steel Tower)、钢桅杆(Steel Mast)等],主要应用在电视塔、风力发电塔、微波塔、通信塔、输电线路塔、大气监测塔、旅游瞭望塔、火箭发射塔和烟仓等各个方面。目前,量大且面广的高耸钢结构主要是通信塔和输电塔,随着信息和电力的开发,这种钢塔将遍布神州大地,如图 1-11 和图 1-12 所示。

5. 桥梁钢结构

各大城市将桥梁等交通基础设施建设作为经济发展的重要基础,钢结构在桥梁中运用的增多也带动了钢结构的发展。使用钢结构较多的桥梁结构有斜拉桥,主要应用在钢箱、缆索、桥塔等部位。据统计,600m 以上的特大桥梁均为钢结构桥梁;“十一五”前三年平均每年新建桥梁 3 万座,年平均用钢量 1300 万吨;目前在建高速公路混凝土桥梁中可实施改用钢结构桥梁 3480 座,改用钢结构后可净增加钢材用量 546 万吨。截至 2008 年底,全国 59 万座桥梁中钢结构桥梁不足 1%,与美国 60 万座桥梁中钢结构桥梁占 33%、日本 13 万座桥梁钢结构桥梁占 41%相比,差距较大。到 2015 年,我国要建 5 座跨海峡大桥,总用钢量预计为 625 万吨。

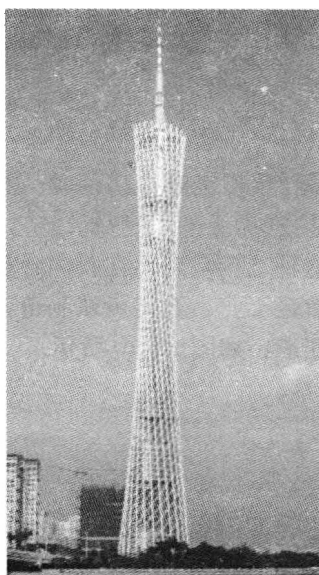


图 1-11 广州电视塔

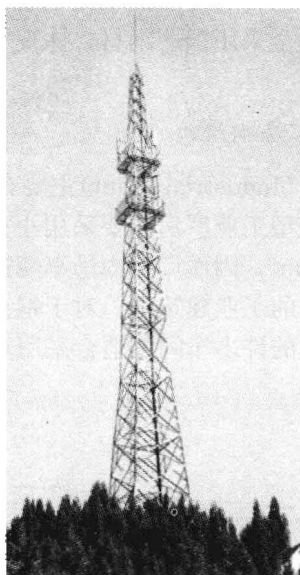


图 1-12 某通信铁塔

中国第一座全钢结构桥塔的桥是南京三桥，仅桥塔用钢量即达 1.44 万吨。此外，著名的南浦大桥、杨浦大桥和杭州湾跨海大桥(图 1-13)等都是钢结构桥梁。

6. 板壳钢结构

用于要求密闭的容器，如冶金、石油、化工企业中大量采用钢板做成的容器结构，包括油罐、煤气罐、高炉、热风炉等都是板壳(Plate and Shell)钢结构。此外，某些大型管道也是一种板壳钢结构。

7. 索膜结构

随着悬索和膜等张拉结构研究开发的深入和工程应用的推广，预应力空间结构开始得到应用，如英国的千年穹顶(图 1-14)、上海世博园核心区的世博轴“阳光谷”、城市广场膜结构等一大批新型钢结构建筑和构筑物不断涌现。索膜(Cable - Membrane)结构目前处于发展阶段，用量不大，国内已有多家膜结构工程公司承担了许多体育场馆、机场、公园和街道景观的设计和施工。目前，在工程中所采用的高中档膜材仍需进口(如 PTFE、ETFE)。

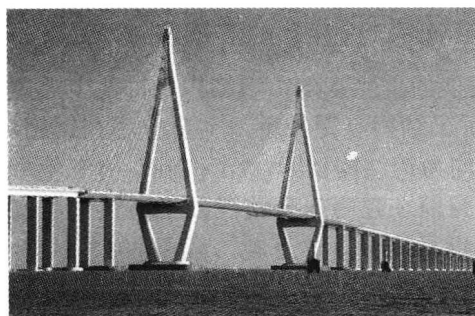


图 1-13 杭州湾跨海大桥

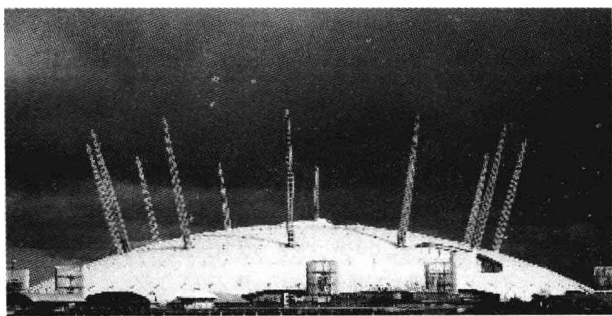


图 1-14 伦敦千年穹顶

8. 移动钢结构

由于钢结构具有强度高、质量相对较轻和便于拆装等特点,许多装配式房屋、水工闸门、升船机、桥式吊车、各种塔式起重机、龙门起重机和悬索起重机等都采用钢结构。现在也有一些钢结构采用移动房屋的设计方式,更为新颖的是,美国克利夫兰滨水地带的 Voinovich 公园将人行桥钢结构也设计成可移动的。

9. 钢-混凝土组合结构

钢-混凝土组合结构包括压型钢板混凝土组合板、钢-混凝土组合梁、钢骨混凝土结构(也称为型钢混凝土结构或劲性混凝土结构)和钢管混凝土(Concrete-filled Steel Tubular)结构等形式。

组合结构能充分发挥钢材和混凝土两种材料各自的优点,不但具有优异的静力和动力工作性能,而且能大量节约钢材、降低工程造价和加快施工进度,对环境污染较少,符合我国建筑结构发展方向。目前,组合结构在我国的发展十分迅速,已广泛应用于冶金、造船、电力和交通等部门的建筑中,并以迅猛的势头进入到桥梁工程和高层与超高层建筑中。

1.4 钢结构的发展趋势

目前,钢结构工程在我国土木工程中所占的比例远远低于其他国家,这也说明我国在钢结构工程这一领域还具有很大的上升空间。随着各方面条件的完善,我国的钢结构工程正面临着新的契机。可以预期,今后我国钢结构工程的发展方向主要在以下几个方面。

1. 提升钢产量,发展高强度低合金钢材

考虑到钢结构建筑的突出优点,2008年的国内十大产业振兴规划中的钢铁产业调整振兴规划也明确提出,要鼓励在建筑结构中提高用钢的比例。随着国内钢结构技术和企业的发展,我国“钢结构产量/粗钢产量”正努力向国际平均水平靠拢,为赶上国际水平,我国钢结构产量将大幅上升。据估计2015年“钢结构产量/粗钢产量”比例为8%、粗钢产量增速为3.5%,则未来3年钢结构产量增速将达15%以上,为钢结构建筑的发展提供保障。

除产量外,钢材的强度也是制约钢结构发展的很重要的因素,致力于研发和完善高强度低合金钢材是发展钢结构必不可缺的步骤。目前除了已有的Q235钢、Q345钢、Q390钢和Q420钢外,还研发了Q460钢,并已在国家体育场——鸟巢中应用。

2. 钢结构设计方法的改进

概率极限状态设计方法还有待发展,因为它计算的可靠度还只是构件或某一截面的可靠度,而不是结构体系的可靠度,同时也不适用于疲劳计算的反复荷载作用下的结构。另外,结构设计上考虑优化理论的应用与计算机辅助设计及绘图的发展,今后还应继续研究和改进。

3. 结构形式的革新

悬索结构、网架结构、超高层结构等近年来已得到飞速发展和应用,钢-混凝土组合

构件也已广泛应用。在已有的结构形式继续发展以及研究的同时,结构的革新也是今后值得深入探讨的课题。

4. 做好标准与规范的衔接

现行的《建筑行业工程设计资格分级标准》是针对一般工业与民用建筑的,不完全适用于钢结构工程;现行的《钢结构、网架工程企业资质等级标准》范围较窄,已不能适应当前的情况;目前住房和城乡建设部住宅产业化促进中心正在组织各有关科研设计单位、大专院校、生产企业共同编制行业技术标准《低层轻钢结构住宅技术要求》,这项标准发布后,将结束轻钢结构住宅在我国无技术标准可依的局面;我国《冷弯薄壁型钢结构技术规程》基本上不考虑用厚度 2mm 以下的钢材制作主要承重构件,对于国外大量采用的壁厚 0.8~1.6mm 的镀锌轻钢龙骨承重体系,我们既缺乏对其受力状况和结构安全性、耐久性的理论分析,也缺乏相关的试验数据,这就使得轻钢住宅的结构设计在我国寻找不到有针对性的规范作为依据。

5. 加强科研工作

全行业开展课题研究,总结设计、制作、安装经验,组织国内外技术交流,促进钢结构技术不断创新和发展,钢结构的设计、制造、施工及管理将会有更大的进步。目前钢结构主要的研究课题包括:①钢结构体系的创新;②钢结构设计的理念和实践;③钢结构施工工业化、施工和检测机具的革新;④与钢结构相匹配的建筑材料的开发;⑤钢结构设计、施工、防火、抗灾标准的补充、修订和完善;⑥钢结构制造、安装企业国内外市场竞争力的提高战略和现实的科学管理;⑦钢结构产业化和产业链发展的各种技术经济指标测算、分析和优化;⑧要重点研究解决钢结构防火、防腐及保温、隔声、防震动等性能以及住宅建筑防火、防腐蚀问题,并制订相应的设计、施工导则规程,以推进我国钢结构的健康发展。

本章小结

通过本章学习,可以了解钢结构的发展历程,掌握钢结构工程所具有的特点和钢结构工程的应用范围与发展趋势。

与其他材料所建造的结构相比,钢结构工程具有许多自身的特点,钢结构的工程应用范围均与其优点有关,其缺点制约了钢结构的发展和应用。

工程应用对钢结构提出了许多要求,这些要求将会引起钢结构技术的不断更新和发展。

习 题

1. 试查阅相关资料,了解国外钢结构的发展历程。
2. 试讲述你所见到的钢结构工程的特点。
3. 与其他材料所建造的结构相比,钢结构工程具有哪些优缺点?
4. 在钢结构工程应用过程中,克服其缺点的途径有哪些?