

高校土木工程专业规划教材

GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

钢结构进展

郝际平 主编

GANG JIEGOU JINZHAN

中国建筑工业出版社

高校土木工程专业规划教材

钢结构进展

郝际平 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢结构进展/郝际平主编. —北京: 中国建筑工业出版社,
2017. 2

高校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-112-20165-5

I. ①钢… II. ①郝… III. ①钢结构-高等学校-教材
IV. ①TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 308609 号

本书结合钢结构设计、加工、制作、施工及检测,系统地介绍了钢结构的发展历史、特点及应用情况,主要内容包括:钢结构新材料和新产品、钢结构体系和设计方法、钢结构加工连接、钢结构加工技术、钢结构检测与鉴定及钢结构配套技术等方面的最新进展。

本书可供土木工程专业及相关专业作为教材使用,也可供工程设计和施工人员在工作中参考。

* * *

责任编辑:高延伟 吉万旺

责任校对:焦 乐 姜小莲

高校土木工程专业规划教材

钢结构进展

郝际平 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:12 $\frac{1}{2}$ 字数:301千字

2017年3月第一版 2017年3月第一次印刷

定价:25.00元

ISBN 978-7-112-20165-5

(29635)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

钢结构作为一种广受欢迎的结构形式在国内外已有上百年的历史，但在我国发展缓慢，除观念外，经济发展水平也是制约因素之一。随着我国经济的发展，钢铁工业进步飞快，钢铁产量不断增加，我国的钢结构建筑也越来越多，不仅在超高层建筑和大跨结构中使用，在其他结构中的应用也逐渐增加。2016年“两会”上，李克强总理在政府工作报告中明确提出：“积极推广绿色建筑和建材，大力发展钢结构和装配式建筑，提高建筑工程标准和质量”。地方和相关部门已经或正在制定促进钢结构建筑发展的相关政策，这必将会在很大程度上促进钢结构行业的发展。

大力发展钢结构离不开钢结构专业人才，在培养钢结构专业人才的过程中，一方面要传授学生专业基础理论知识，让学生掌握钢结构的基本原理和方法，另一方面还要让学生了解钢结构发展的前沿动态，让学生及时掌握钢结构的最新进展和今后的发展趋势。鉴于此，从2011年起，作为钢结构人才培养的重要基地，西安建筑科技大学在土木工程学院给本科生开设了“钢结构进展”这门课程，深受学生欢迎。为方便使用，现在出版这本书。

全书共分7章。第1章介绍钢结构的发展历史、计算方法、特点及各类新建钢结构，阐明钢结构是绿色建筑；第2章介绍新型钢结构材料及其工程应用，并介绍了新型钢结构部件产品；第3章分别介绍轻型门式刚架结构、多高层钢结构、大跨空间结构等结构体系及计算方法，以及钢结构设计方法的研究进展；第4章介绍钢结构中常用的加工方法和连接方法；第5章介绍高层及超高层钢结构、大跨空间钢结构、高耸钢结构的施工技术及力学模拟；第6章分别介绍钢结构材料、构件、连接与节点、承重结构体系、围护结构体系的检测与鉴定；第7章介绍墙体材料、楼盖系统、建筑外窗及防腐防火等钢结构的相关配套技术。

本书虽为《钢结构进展》，但主要还是以传统的工业和民用建筑为主，其他钢结构涉及较少。本书可以作为土木工程、工程管理等专业的本科生和研究生教材，还可作为土建设计人员、建筑学专业从业人员等的参考用书。

本书编写工作的人员分工如下：第1章杨俊芬，第2章王先铁，第3章田黎敏，第4章李峰，第5章郑江，第6章钟炜辉，第7章樊春雷。全书最后由郝际平统稿并审定。

钢结构涉及面广，且在不断发展中，本书难免有所疏漏及偏颇，欢迎大家批评指正。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 钢结构的发展历史	1
1.2 钢结构计算方法的发展	3
1.3 钢结构的特点	4
1.4 钢结构是绿色建筑	5
1.5 各类新建钢结构	6
1.6 钢结构新的发展方向	18
思考题	19
第 2 章 钢结构新材料、新产品	20
2.1 (超) 高强度钢	20
2.2 低屈服点钢材	23
2.3 耐候钢	25
2.4 耐火钢	27
2.5 厚钢板	29
2.6 热轧 H 型钢	31
2.7 厚壁钢管	34
2.8 镀锌板	35
2.9 压型钢板	38
2.10 屈曲约束支撑	40
2.11 钢板剪力墙	44
思考题	48
第 3 章 结构体系及计算方法	49
3.1 轻型门式刚架结构	49
3.2 多高层钢结构体系	53
3.3 大跨空间结构体系	66
3.4 钢结构设计方法的研究进展	79
思考题	83
第 4 章 钢结构的加工和连接方法	84
4.1 钢结构的加工准备	84
4.2 钢结构的加工方法	87
4.3 钢结构连接的基本方法	92
4.4 钢结构连接的工程应用	97
思考题	108

第 5 章 钢结构施工技术及力学模拟..... 109

5.1 钢结构施工技术的发展 109

5.2 现代钢结构的体系和规模 110

5.3 高层及超高层钢结构施工技术 114

5.4 刚性大跨度空间钢结构施工技术 117

5.5 高耸钢结构施工技术 121

5.6 钢结构施工过程力学模拟方法 122

5.7 复杂刚性钢结构施工预变形的计算方法 132

思考题..... 137

第 6 章 钢结构的检测与鉴定..... 138

6.1 钢结构检测与鉴定的基本要求 138

6.2 钢结构材料的检测与鉴定 142

6.3 钢结构构件的检测与鉴定 144

6.4 钢结构连接与节点的检测与鉴定 151

6.5 承重钢结构系统的可靠性鉴定 154

6.6 围护结构体系的检测与鉴定 163

思考题..... 166

第 7 章 钢结构的相关配套技术..... 167

7.1 墙体材料 167

7.2 楼盖系统 178

7.3 钢结构建筑外窗 184

7.4 钢结构的防腐与防火 186

思考题..... 190

参考文献..... 191

第 1 章 概 论

1.1 钢结构的发展历史

钢结构作为一种近现代结构,受到各个国家和地区的普遍欢迎,这不仅是因为它有诸多的优点,还与钢结构和人类社会的发展密不可分。

材料的发展对人类社会的作用非同一般,历史学家甚至用材料的名称来表示某个特定的时期,比如以使用打凿石器为主的时代就称之为“旧石器时代”,以使用磨制石器为主的时代就称之为“新石器时代”,以使用刀、枪、剑等兵器为主的时代就称之为“冷兵器时代”,以使用枪、炮、导弹等兵器为主的时代就称之为“热兵器时代”。

用于建造钢结构的钢材是一种铁碳合金材料,人类采用钢结构的历史和炼铁、炼钢技术的发展是密不可分的。

中国是发现和掌握炼铁技术最早的国家,早在 3300 多年以前就认识了铁,熟悉了铁的锻造性能,识别了铁与青铜在性质上的差别,把铁铸在铜兵器的刃部,加强铜的坚韧性。经科学鉴定,证明铁刃是用陨铁锻成的。随着青铜熔炼技术的成熟,逐渐为铁的冶炼技术的发展创造了条件。

我国的冶铁术发明始于西周晚期,战国时期已普遍使用;冶铁术发明后,对生产力的提高起着极为重要的作用。

提起中国的科学技术发明,人们通常首先想到的是造纸术、活字印刷术、指南针、火药这四大发明,这是以对西方近代文明的推动和影响程度为标准的,也是欧洲学者提出的。如果以对中国文明的发展所起的作用为标准把中国古代的创造发明排序的话,钢铁技术应排在第一位。

钢结构在我国有悠久的历史。在古代主要有铁链桥和宗教铁塔。公元 65 年(汉明帝时代),已成功地用锻铁为环,相扣成链,建成了世界上最早的铁链悬桥——霁虹桥(图 1-1),史称“兰津桥”,该桥 20 世纪 80 年代被冲毁前仍在通行。此后,为了便利交通,跨越深谷,曾陆续建造了数十座铁链桥。其中跨度最大的为 1706 年(清康熙)建成的四川泸定大渡河桥(图 1-2),桥宽 3m,净跨长 100m。现存的古铁塔有建于 967 年的广州光孝寺 7 层铁塔(图 1-3)、建于 1061 年的湖北玉泉寺 13 层铁塔(图 1-4)等。所有这些都表明,中华民族对铁结构的应用,曾经居于世界领先地位。

欧美等国家中最早将铁作为建筑材料的当属英国,但直到 1840 年以前,还只采用铸铁来建造拱桥。1840 年以后,随着铆钉连接和锻铁技术的发展,铸铁结构逐渐被锻铁结构取代,随着 1856 年英国人亨利·贝氏麦发明贝氏转炉炼钢法和 1865 年德裔英国人西门子兄弟发明平炉炼钢法,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才开始在建筑领域逐渐取代锻铁材料,自 1890 年以后钢成为金属结构的主要材料。20 世纪初焊接技术的出现以及 1934 年高强度螺栓连接的

出现,极大地促进了钢结构的发展。除西欧、北美之外,钢结构在苏联和日本等国家也得到了广泛的应用,逐渐发展成为全世界所接受的重要结构体系。



图 1-1 霁虹桥

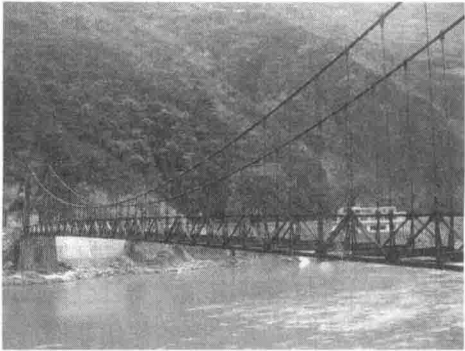


图 1-2 泸定桥



图 1-3 广州光孝寺 7 层铁塔

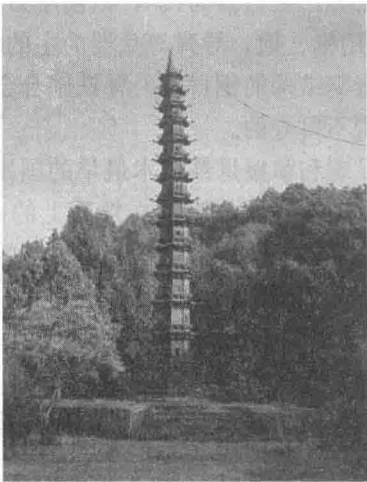


图 1-4 湖北玉泉寺 13 层铁塔

我国在 1907 年才建成了钢铁厂,年产钢只有 0.85 万 t。新中国成立后,随着经济建设的发展,钢结构曾起过重要作用,如第一个五年计划期间,建设了一大批钢结构厂房、桥梁。但由于受到钢产量的制约,在其后的很长时间内,钢结构被限制使用在其他结构不能代替的重大工程项目中,一定程度上影响了钢结构的发展。自 1978 年我国实行改革开放政策以来,经济建设获得了飞速发展,钢产量逐年增加。

世界钢铁协会的统计数据显示,1996 年,我国粗钢材产量为 10124 万 t,跃居世界第一;2010 年达到 63874 万 t;2011 年达到 70197 万 t;2012 年达到 73104 万 t;2013 年达到 82200 万 t;2014 年达到 82270 万 t。我国钢产量逐年增加,并且连续 19 年位居世界第一,已成为世界产钢大国。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。所有这些,为钢结构在我国的快速发展创造了条件。

钢结构发展到现在,主要在以下几个方面取得了长足的进步:

(1) 钢结构计算方法的改进

钢结构计算方法的改进对于钢结构的发展具有举足轻重的作用,没有计算方法的进步

就很难有今天的各种钢结构，目前钢结构的设计方法已经发展到以结构二阶非线性分析为基础的钢结构高等分析理论。

(2) 结构形式日益多样化和复杂化

现代钢结构已不再局限于传统单一结构形式，新结构形式和各种组合结构形式不断涌现。如多面体空间刚架结构、弦支穹顶结构、张弦桁架结构、斜拉结构、悬挂结构、张拉结构等。

(3) 结构跨度越来越大，钢材强度越来越高

现代钢结构由于建筑功能需要，跨度越来越大，跨度超百米已屡见不鲜，且采用了大量高强度级别钢材及厚钢板。

(4) 预应力技术的大量应用

预应力技术得到充分应用，涌现出索穹顶、张拉整体结构和索膜结构等新型结构形式。

(5) 节点形式复杂多样

现代大型钢结构大多采用仿形建筑，为满足建筑造型，采用各种各样的节点形式，如铸钢节点、锻钢节点、球铰节点等。

(6) 构件数量越来越多，截面构造越来越复杂

这类工程都由几万个、甚至几十万个构件组成，而且这些构件的截面形式均不相同。

(7) 施工技术难度高

由于结构新、跨度大，为保证经济、安全，建造过程中必须采用先进的施工技术才能顺利完成。

1.2 钢结构计算方法的发展

钢结构设计方法经历了由容许应力设计法、塑性设计法到现在广泛应用的荷载抗力系数设计方法的发展过程。

容许应力设计法以线性弹性理论为基础，以构件危险截面的某一点或某一局部的计算应力小于或等于材料的容许应力为准则，是工程结构中的一种传统设计方法，目前仍应用于公路、铁路工程设计中。它的主要缺点是由于单一安全系数是一个笼统的经验系数，因此，给定的容许应力不能保证各种结构具有比较一致的安全水平，也未考虑荷载增大的不同比率或异号荷载效应情况对结构安全的影响，在应力分布不均匀的情况下，如受弯构件、受扭构件和静不定结构，用这种设计方法比较保守。

塑性设计法对结构进行一阶塑性铰分析，允许结构中出现内力重分布，但没有考虑几何非线性和渐变塑性效应的影响。

荷载抗力系数设计方法则通过对一阶弹性分析进行放大或直接二阶弹性分析来考虑几何非线性效应，其最大不同之处在于它是一种以概率理论为基础的极限状态设计方法，用概率及统计学的方法引入了荷载抗力系数来度量结构抗力和荷载对结构的综合效应。但这种设计方法实际是以组成框架的杆件为基础来安排的，即设计是在杆件级别上进行的，只是依靠引入的有效长度系数来度量结构整体与其组成杆件之间的相互作用，虽然颇为实用和流行，但有很大的局限性。首先，由于它不能直接考虑单个构件与结构整体之间的强度

及稳定方面的相互作用，所以不能精确预测结构的失效模式。众所周知，结构体系的实际失效模式与有效长度系数 K 为基础的弹性屈曲失效模式几乎完全不同。同时，确定 K 系数的过程过于烦琐，且不方便使用计算机进行计算。

更重要的是当前两阶段设计方法的不合理性：通过一阶线弹性理论分析计算结构在各种荷载作用下的内力，即结构分析；然后再将结构分析求得的内力用极限状态理论的相关方程进行逐个杆件的截面验算，即构件设计。这种设计方法的缺陷之一就是结构内力分析模式与构件承载力计算模式不一致：极限状态理论在构件截面的验算中考虑了材料本构关系的非线性，但用于结构分析的弹性理论只能粗略地给出结构的整体反应，不能考虑各种非线性因素在整体结构中引起的内力重分布现象。按线弹性理论分析求得的结构各构件内力并不是该构件达到极限承载力时的实际内力，因此不能确保所有杆件都能有效地承担结构的设计荷载。第二个缺陷是不能对结构进行完全的整体分析，而必须采用规范中的计算公式对单个构件进行强度和稳定验算。

随着计算机技术和相关软件的迅速发展，直接设计方法（不通过计算 K 系数）作为当前设计方法的替代，越来越具有吸引力和可操作性，许多研究者和工程师提出了结构二阶非弹性的高等分析理论，高等分析能通过精确的一次非线性分析，完善地考虑结构的二阶效应及其他因素的影响，完成目前两阶段设计所做的工作。由于它分析时能充分描述结构系统及构件的强度和稳定性，直接考虑结构的几何、材料非线性性能，从而避免对构件的承载力进行逐个验算，与传统设计方法相比，大大简化了设计过程。如图 1-5 所示为两种设计方法的对比图示。

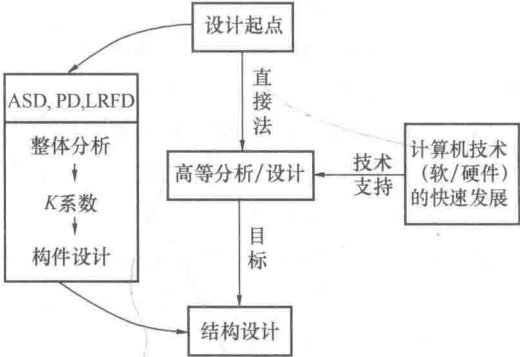


图 1-5 两种设计方法的对比

1.3 钢 结 构 的 特 点

截至 2010 年，世界上已建成的 102 幢超高层建筑，钢筋混凝土结构 16 幢，纯钢结构 59 幢，不同形式的钢-混凝土混合结构 27 幢。2014 年 6 月 5 日，RET 睿意德中国商业地产研究中心发布的研究报告指出：目前全球有 464 座 250m 以上的建成、在建、待建超高层项目，这些项目大多为纯钢结构或不同形式的钢-混凝土混合结构。毋庸置疑，钢结构的发展促进了建筑业、冶金工业、机械工业、汽车工业、农业、石油工业、商业、交通运输业的迅速发展。为什么钢结构的生命力越来越强大？这要归功于钢结构“轻、快、好、省”的四个优异性能。

(1) 轻。钢结构具有轻质高强度。钢材与混凝土、木材相比，其重力密度与强度的比值最小，因此，就同类建筑结构形式而言，钢结构自重轻、构件截面小、能够承受更大的荷载、可以跨越更大的跨度、便于运输和安装。例如，在同等荷载条件下，钢屋架的重量只有同等混凝土屋架的 $1/4 \sim 1/3$ ，如果采用冷弯薄壁型钢屋架只有 $1/10$ 左右。钢结构住

宅的重量是钢筋混凝土住宅的 50% 左右, 使用面积却比钢筋混凝土住宅提高 4% 左右。

(2) 快。钢结构的工业化程度高, 工期短。钢结构是工厂制作, 具备成批大件生产和成品精度高等特点, 采用工厂制造、工地高强度螺栓安装的施工方法, 有效地缩短工期, 为降低造价、发挥投资的经济效益创造条件。在同等条件下, 钢结构与钢筋混凝土结构施工工期相比, 钢结构仅是钢筋混凝土结构的 $1/3 \sim 1/2$ 。

(3) 好。钢结构材性好, 可靠性高。钢材质地均匀、各向同性、弹性模量大、有很好的塑性和韧性, 是理想的弹性—塑性体。因此, 钢结构不会因为偶然的超载或局部超载而突然断裂破坏, 其能够适应振动荷载, 计算模型能很好地反映钢材的力学性能, 因而分析准确可靠。

钢结构抗震性能好。钢材具有较高的抗拉、抗压强度, 较好的塑性和韧性, 材质的均匀使设计易于符合实际受力情况, 加上连接构造的耗能、维护材料的蒙皮效应、耗能组件的使用, 使其结构体系能够抵御强烈地震作用并表现优异。因此, 在国内外的历次地震中, 钢结构建筑是受到损坏最轻的结构, 已被公认为是抗震设防地区特别是强震区的最合适结构。

钢结构密封性好。钢材组织非常密实, 通过焊接, 完全适用于对气密性或水密性要求高的特种建筑物。

钢结构耐热性好。温度在 250°C 以内, 钢材性质变化很小, 钢结构可用于温度不高于 250°C 的场合; 当温度达到 300°C 以上时, 强度逐渐下降, 这种情况下应对钢结构采取防护措施。

钢结构耐久性好。在正常的防腐维护下, 建筑钢结构不会因为日常温度的变化、日晒、雨淋及一般大气介质的作用而老化, 具有很好的材料耐久性。

钢结构易于拆卸。采用螺栓连接的钢结构易于拆卸、加固和改建。

(4) 省。单纯从材料价格看, 钢结构比混凝土结构的造价要高, 但钢结构比混凝土结构建设的速度要快 50% 左右, 这会节省很多时间成本; 钢结构比混凝土结构的房屋整体重量要轻 50% 以上, 基础处理、运输量的成本都会下降。建造房屋是一个系统工程, 包括设计、制造、运输、安装、维修和管理等诸多环节, 因此, 从整体上看, 钢结构更“省”。

1.4 钢结构是绿色建筑

住房和城乡建设部颁发的《绿色建筑评价标准》对绿色建筑作出了如下定义: 在建筑的全寿命周期内, 最大限度地节约资源(节能、节地、节水、节材)、保护环境和减少污染, 为人们提供健康、适用和高效的使用空间, 与自然和谐共生的建筑。

从概念上来讲, 绿色建筑主要包含了三点: 一是节能, 这个节能是广义上的, 包含了上面所提到的“四节”, 主要是强调减少各种资源的浪费; 二是保护环境, 强调的是减少环境污染, 减少二氧化碳排放; 三是满足人们使用上的要求, 为人们提供“健康”、“适用”和“高效”的使用空间。

钢结构建筑已经被誉为 21 世纪的“绿色建筑”, 从材料到结构都是绿色环保的, 符合可持续发展需要, 炼一吨钢比烧一吨水泥产生的废气、排放的污染小很多; 能够最大限度地减小现场的湿作业, 节省水资源。具体体现在以下几个方面:

(1) 低碳营造：建造钢结构住宅 CO_2 排放量约为 $480\text{kg}/\text{m}^2$ ，较传统混凝土碳排放量 $740.6\text{kg}/\text{m}^2$ 降低 35% 以上。

(2) 节材：钢结构住宅高层建筑自重约为 $900\sim 1000\text{kg}/\text{m}^2$ ，传统混凝土约为 $1500\sim 1800\text{kg}/\text{m}^2$ ，其自重减轻约 40%。可大幅减少水泥、砂石等资源消耗，从而大幅减少矿物开挖、冶炼及运输过程中的碳排放；钢结构住宅施工过程中无需木模板和脚手架，若其市场份额增长 5 个百分点，则可减少木材砍伐相当于 9000hm^2 森林；建筑自重减轻，还节省约 30% 的地下桩基。

(3) 节水（减少污水排放）：钢结构住宅以现场装配化施工为主，建造过程中可大幅减少用水及污水排放。若其市场份额增长 5 个百分点，每年将减少污水排放相当于 10 个西湖总水量。

(4) 节能（节省运行能耗）：压蒸无石棉纤维素纤维水泥平板（简称为 CCA 板）轻质灌浆墙体具有良好的自保温功能，为传统砖墙保温性能的 3 倍，大幅降低运行能耗。

(5) 省地（提高土地使用效率）：钢结构“高、大、轻、强”的特点，易于实现高层建筑，可提高单位面积土地的使用效率；户内得房率增加 5%~8%，地下车库停车位可增加 10%~20%，在寸土寸金和停车难问题凸显的今天，其社会经济价值尤为突出。

(6) 环保：装配化施工，降低施工现场噪声扰民、废水排放及粉尘污染；减少砂石开采和建筑垃圾排放，保护环境，开创新时代建筑文明。

(7) 主材回收与再生：建筑拆除时，钢结构住宅主体结构材料回收率在 90% 以上，较传统混凝土垃圾排放量减少约 60%。切实响应国家“推行循环型生产方式”号召，并且钢材回收与再生利用可为国家作战略资源储备；减少建筑垃圾填埋对土地资源占用和垃圾中有害物质对地表及地下水源污染等（建筑垃圾约占全社会垃圾总量的 40%）；变废为宝，工业废料资源化利用：复合墙体中以工业废料为主材，变废为宝——CCA 墙板以石英砂尾矿为主材；轻质灌浆填充材料中以粉煤灰等工业废料为主材，切实响应国家“推进工业废料资源化利用”号召。

世界发达国家都十分重视钢结构建筑的发展。英国 1998 年发布的建筑发展报告提出，必须大力推行钢结构建筑，相反，建造混凝土建筑必须通过特别审批。如今，钢结构建筑在我国整个建筑行业中所占的比重还不到 5%，而发达国家却已达到 50% 以上。

我国是世界产钢大国，但在我们的建筑材料中，钢材用量仅仅占到全国钢材总量的 20%~25%，而且大都用于钢筋混凝土结构和砖混结构中，钢结构建筑用量还不到 6%。而在美国、日本等发达国家，建筑用钢量占钢产量的比重已超过 50%。日本每年约用 2500 万 t，占钢材总量的 25%，其中用于钢结构住宅的约有 700 万~800 万 t。

钢结构建筑还有一个好处，房子拆除时只需较少的人力和动力，钢材还可循环利用。而混凝土建筑使用大量的水泥，拆除难，回收利用也难。日本和欧洲甚至提出，用建筑来储备钢铁资源。因此，大量的钢结构住宅也是社会储存钢铁这种战略资源的有效方式。

1.5 各类新建钢结构

根据不同的分类标准，钢结构分类多种多样，比如可按结构受力分、按结构功能分、按结构体系分等。按照结构体系分类，钢结构可以分为以下几类：

(1) 高层及超高层钢结构

由于人类文化生活水平不断提高,对高层、大跨度建筑的要求也越来越高。而钢结构本身具备自重轻、强度高、施工快等独特优点,因此对高层、大跨度,尤其是超高层、超大跨度建筑,采用钢结构更是非常理想。目前世界上最高、最大的结构采用的都是钢结构,而历届奥运会的场馆也多采用钢结构。目前已经建成的世界上最高的前十大超高层建筑,它们是:

2010年建成的160层、高828m的阿拉伯联合酋长国的哈利法塔(原名迪拜塔)(图1-6);
2012年建成的高634m的日本晴空塔(图1-7);



图 1-6 哈利法塔



图 1-7 日本晴空塔

2016年建成的118层、高632m的上海中心大厦(图1-8);

2012年建成的120层、高601m的沙特阿拉伯王国的麦加皇家钟塔饭店(图1-9);



图 1-8 上海中心大厦



图 1-9 麦加皇家钟塔饭店

2009年建成的主体高454m,加天线桅杆、高600m的新广州电视塔(图1-10);
2016年建成的118层、高592.5m的深圳平安国际金融中心(图1-11);
2013年建成的82层、高541.3m的纽约世贸中心1号楼(自由塔,图1-12);
2014年建成的116层、高530m的广州东塔(图1-13);



图 1-10 广州新电视塔

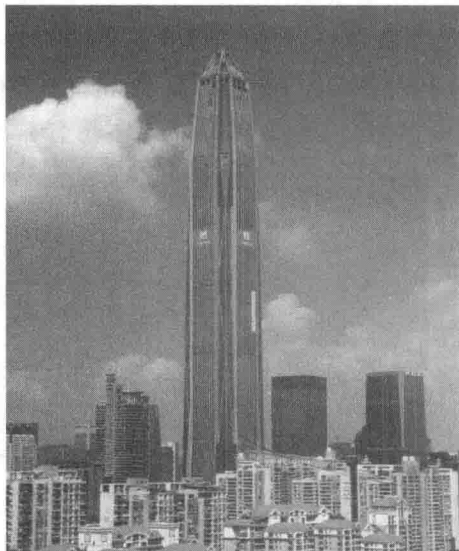


图 1-11 深圳平安国际金融中心

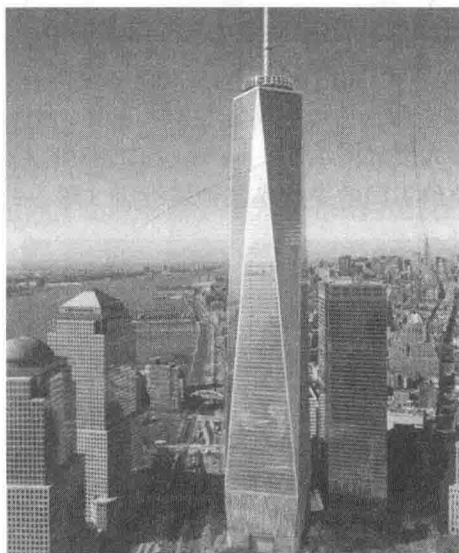


图 1-12 纽约世贸中心1号楼

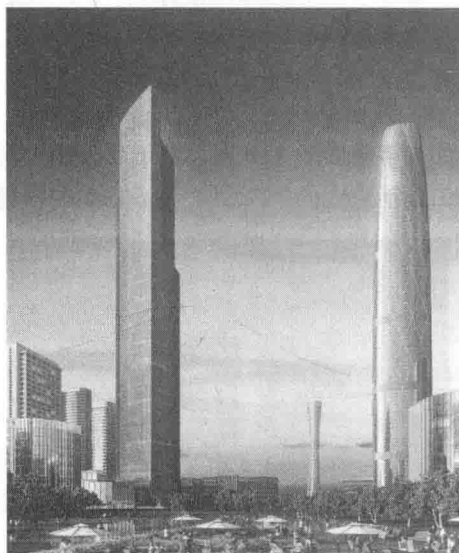


图 1-13 广州东塔(左图)

2003年建成的101层、加天线桅杆高508m的台北101大楼(图1-14);
2014年建成的93层、高509m的莫斯科联邦大厦(图1-15)。

我国于2016年建成的上海中心大厦为118层,建筑高度632m,结构高度580m,目前为世界第三高建筑。目前在建的长沙天空城市(图1-16),主体建筑总层数为208层,

总高度 838m，是远大集团规划建设中的世界第一高楼。深圳赛格广场大厦（图 1-17）72 层、建筑结构高 291.6m，含塔尖高 355.6m，为世界上最高的全部采用钢管混凝土的超高层建筑。在“2013 年度高层建筑奖”评选中，造型奇特、建造复杂的中央电视台总部大楼（图 1-18）获得最高奖——全球最佳高层建筑奖。

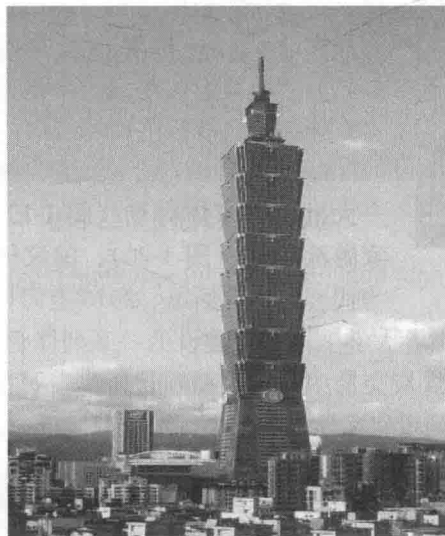


图 1-14 台北 101 大厦



图 1-15 莫斯科联邦大厦



图 1-16 天空城市

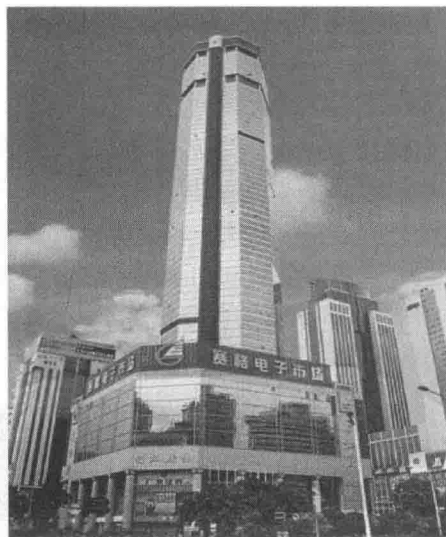


图 1-17 深圳赛格广场大厦

（2）大跨度、空间钢结构

近年来，以网架和网壳为代表的空间结构继续大量发展。不仅用于民用建筑，而且用于工业厂房、机库、候机楼、体育馆、展览中心、大剧院、博物馆等。在使用范围、结构形式、安装施工工法等方面均具有中国建筑结构特色。如杭州、成都、西安、长春、上

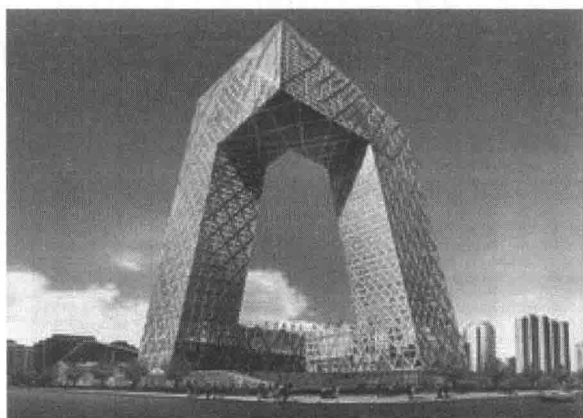


图 1-18 央视新大楼

海、北京、南京、广州、深圳、南宁、哈尔滨、大连、长沙、重庆、武汉、济南、郑州等一批飞机航站楼、机库、会展中心、体育场馆、大剧院、音乐厅。采用圆钢管、矩形钢管制作空间桁架、拱架及斜拉网架结构，加上波浪形屋面成为各地新颖和富有现代特色的标志性建筑物。

2008 北京奥运会，新建和改造的一大批以国家体育场（图 1-19）、国家游泳中心（图 1-20）、国家体育馆为代表的体育场馆，2010 上海世博会

建设的世博会会场，2010 年广州亚运会和深圳世界大学生运动会建设的一系列体育场馆，以及 2011 年第六届中国（太原）煤炭交易中心等大型项目，都表明我国钢结构数量有较大增加。如图 1-21~图 1-27 为我国近年来建成的大型钢结构建筑。

最近悬索和膜的张拉结构研究开发和工程应用取得了新的进展，同时预应力空间结构开始应用到工程实践中。一大批新型钢结构建筑和构筑物在祖国大地涌现，主要代表有杭州雷峰塔、海南千年塔、广州新电视塔（高度 600m、用钢量 40 万 t）、昆明世博园艺术广场膜结构等。

《空间网格结构技术规程》JGJ 7—2010 和《膜结构技术规程》CECS 158：2015 的出版，为空间结构的发展提供了设计依据。目前，国内已有多家膜结构工程公司，主要承担体育场馆、机场、公园和街道景观的设计和施工，但是，高中档膜材仍需进口（如 PTFE、ETFE）。空间结构在建筑美学、大空间和结构自重方面的优异性能，吸引了一大批专家学者的研究，其学术交流、论坛网站、期刊等方面呈现一片兴旺景象。



图 1-19 国家体育场（鸟巢）

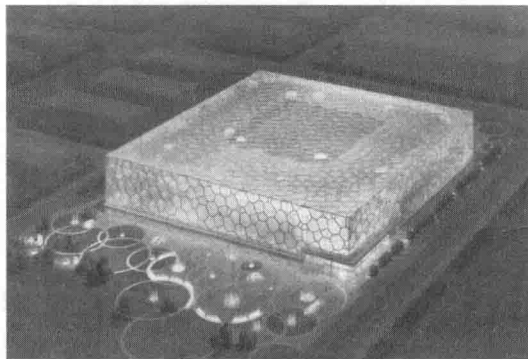


图 1-20 国家游泳中心（水立方）

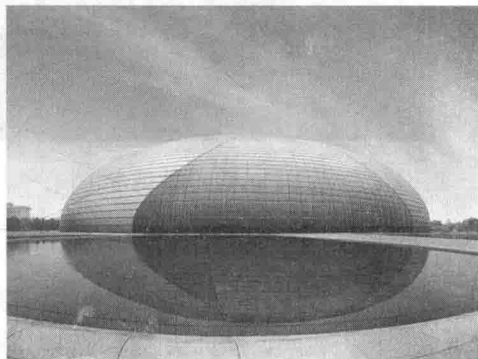


图 1-21 国家大剧院



图 1-22 上海八万人体育场



图 1-23 南通体育场——开合式屋盖

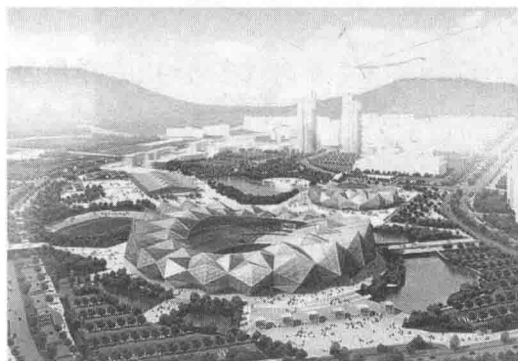


图 1-24 大运会主体育场——水晶石

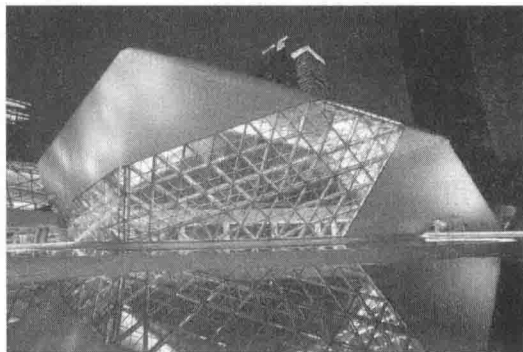


图 1-25 广州歌剧院

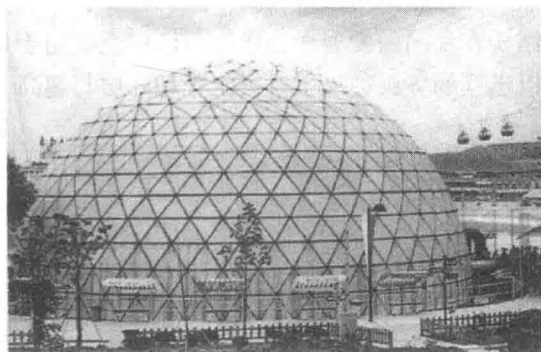


图 1-26 苏州乐园宇宙大战馆球体屋面(穹顶)



图 1-27 中国(太原)煤炭交易中心主体工程

(3) 轻钢结构

我国轻钢结构建筑发展较快,主要用于轻型工业厂房、棉花和粮食仓库、码头和保税区仓库、农产品、建材、家具等各类交易市场、体育场馆、展览厅及活动房屋、加层建筑等,如图 1-28、图 1-29 所示。

轻钢结构是相对于重钢结构而言,其类型有门式刚架、拱形波纹钢屋盖结构等。用钢量一般 $30\text{kg}/\text{m}^2$ 左右(不含钢筋用量),在我国发展很快、应用广泛。全国每年新建轻钢房屋 800万 m^2 、用钢约 20万 t 。