

全国普通高等院校 **土木工程类**
实用创新型 系列规划教材

钢结构设计 基本原理

雷宏刚 主 编
姜丽云 副主编



科学出版社
www.sciencep.com

中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目
全国普通高等院校土木工程类**实用创新型**系列规划教材



钢结构设计基本原理

雷宏刚 主 编
姜丽云 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书作为高等院校土木工程专业的必修教材,是根据我国新修订的《钢结构设计规范》(GB50017-2003)、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB50018-2002)编写的,并力求贯彻实用、创新的指导思想。本书首先介绍了钢结构的特点、应用范围、设计方法和发展情况,然后介绍钢结构的材料、钢结构的连接、轴心受力构件、受弯构件、偏心受力构件,最后介绍了钢结构事故。

本书可作为普通高等院校土木工程专业教学用书,亦可供从事土木工程设计、施工、管理等相关技术人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构设计基本原理/雷宏刚主编. —北京:科学出版社,2005

(全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材)

ISBN 7-03-016606-X

I. 钢… II. 雷… III. 钢结构-结构设计-高等学校-教材 N. TU391.04

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第146072号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:耿 耘
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2006年1月第一次印刷 印张:16

印数:1—3 000 字数:370 000

定价:24.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(HA03)

全国普通高等院校土木工程类实用创新型 系列规划教材

编 委 会

主 任 霍 达

副主任 (按姓氏笔画排序)

周 云 阎兴华 童安齐

秘书长 张志清

委 员 (按姓氏笔画排序)

白晓红 石振武 刘继明 何浙浙 何舒民

张文福 张延庆 张志清 沈 建 周 云

周亦唐 宗 兰 徐向荣 阎兴华 翁维素

傅传国 程赫明 韩建平 童安齐 雷宏刚

霍 达

前 言

1998年8月国家教育部正式颁布了新修订的《普通高等学校本科专业目录》，新的土木工程专业覆盖了原目录中的8种专业。人才培养模式转变为“厚基础，宽口径，强能力，高素质”的土木工程复合型人才。

1996年，我国钢产量首次突破1亿吨大关，近年来钢结构得到了大发展且势头强劲，钢结构的各类专业人才则相对缺乏。高等院校土木工程专业作为培养人才的重要基地，如何搞好钢结构教材建设引起了各方的高度重视。国内相继出版了各具特色的钢结构教材。本书在消化吸收已有教材优点的基础上，博采众长，形成以下特色及创新点。

1) 内容上，突出“实用、创新及时代特点”，重基本概念和基本原理，轻繁琐公式推导；注重与钢结构相关规范的衔接；考虑到学时少，力求篇幅宜薄不宜厚，习题少而精，注重综合性；尤其是钢结构事故一章的引入，让学生从惨重事故中认识到扎实基础的必要性以及肩负的神圣责任，将德育教育寓于课堂教学之中。

2) 专业上，力求措辞准确，表达正确，引入成熟内容，回避争议观点。

3) 编排上，力求层次分明，重点突出，图文并茂。

4) 重要名词概念附英语注释。

参加本书编写的有太原理工大学的雷宏刚(第一、七章,附录),厦门大学的刘丽君(第二章,附录),内蒙古工业大学的姜丽云(第三章,附录),北京建筑工程学院的张艳霞(第四章,附录),东北林业大学的张秀华(第五章,附录),昆明理工大学的王海莹(第六章,附录)。全书由雷宏刚任主编并负责定稿,姜丽云任副主编。

对本书编写过程中引用和参考的文献的作者们,对所有给予本书支持、关心、默默奉献的同志们,在此一并致以衷心感谢!

由于时间紧,水平所限。本书会有一些不足或错误,恳请读者不吝赐教。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 钢结构的特点	1
1.2 钢结构的应用范围	2
1.3 钢结构的设计方法	3
1.4 钢结构的发展	5
第二章 钢结构的材料	10
2.1 钢材在单轴均匀受拉状态下的力学性能.....	10
2.2 钢材在多轴应力作用下的力学性能.....	14
2.3 钢材的动力性能.....	15
2.4 钢材的疲劳性能.....	16
2.5 影响钢材性能的因素.....	20
2.6 钢材的破坏形式.....	27
2.7 钢材的种类、规格及选用	28
思考题	34
第三章 钢结构的连接	35
3.1 钢结构的连接方法及其特点.....	35
3.2 焊接方法和焊缝连接形式.....	36
3.3 对接焊缝的构造和计算.....	41
3.4 角焊缝的构造和计算.....	45
3.5 焊接应力和焊接变形.....	58
3.6 普通螺栓连接的构造和计算.....	62
3.7 高强度螺栓连接的构造和计算.....	75
3.8 其他连接的构造和计算.....	81
思考题	84
习题	84
第四章 轴心受力构件	86
4.1 概述.....	86
4.2 轴心受力构件的强度及刚度.....	87
4.3 索的力学性能及分析.....	89
4.4 实腹式轴心受压构件的整体稳定.....	89
4.5 实腹式轴心受压构件的局部稳定	100
4.6 格构式轴心受压构件的整体稳定	103

4.7 格构式轴心受压构件的局部稳定	104
4.8 轴心受力构件的设计	107
思考题.....	115
习题.....	116
第五章 受弯构件	117
5.1 概述	117
5.2 受弯构件的强度	118
5.3 受弯构件的刚度	124
5.4 受弯构件(梁)的整体稳定	127
5.5 受弯构件的局部稳定	134
5.6 受弯构件的扭转	148
5.7 受弯构件的设计	152
思考题.....	160
习题.....	161
第六章 偏心受力构件	162
6.1 概述	162
6.2 拉弯、压弯构件的强度及刚度.....	163
6.3 压弯构件的整体稳定	166
6.4 实腹式压弯构件的局部稳定	172
6.5 偏心受力构件的设计	176
思考题.....	189
习题.....	190
第七章 钢结构事故	192
7.1 事故的定义及分类	192
7.2 事故的一般原因分析	193
7.3 钢结构的缺陷分析	194
7.4 钢结构的材料事故	196
7.5 钢结构的变形事故	197
7.6 钢结构的脆性断裂事故	198
7.7 钢结构的疲劳破坏事故	201
7.8 钢结构的失稳事故	204
7.9 钢结构锈蚀事故	209
7.10 钢结构火灾事故.....	213
附录	217
附录一 型钢规格表.....	217
附录二 螺栓和铆栓规格.....	229
附录三 钢材的化学成分和机械性能.....	230
附录四 钢材、焊缝和螺栓连接的强度设计值	232

附录五	各种截面回转半径的近似值·····	234
附录六	工字形截面简支梁等效弯矩系数和轧制工字钢梁的稳定系数·····	235
附录七	轴心受压构件的稳定系数·····	237
附录八	计算长度系数·····	239
参考文献	·····	243

第一章 绪 论

1.1 钢结构的特点

不同材料形成的结构有各自的特点。钢结构(steel structure)是由钢板或型钢制造而成的结构,其主要特点如下:

1. 强度高

与其他材料诸如木材、砖石、混凝土相比,钢材的容重虽然大,但强度(strength)却高很多。现举例说明,《钢结构设计规范》(GB50017-2003)中,强度最低的钢材为 Q235,其抗拉、抗压强度设计值分别为 215N/mm^2 、 215N/mm^2 ,《混凝土设计规范》(GB50010-2002)中标号最高的为 C80,其抗拉、抗压强度设计值分别为 2.22N/mm^2 、 35.9N/mm^2 。由此可见,前者抗拉强度设计值为后者的 97 倍,而抗压强度设计值为 6 倍。因此,在相同的荷载和条件下,钢结构的重量轻。

2. 塑性、韧性好

钢材的塑性(plasticity)好,一般情况下,钢结构不会因偶然或局部超载而发生突然断裂,而是以事先有较大变形为先兆。钢材的韧性(toughness)好,则使钢结构能很好地承受动力荷载。这些性能均对钢结构的安全提供了可靠保证。

3. 材质均匀

钢材的内部组织均匀,非常接近于各向同性体,在使用应力阶段,钢材为理想弹性工作,符合工程力学的基本假定。因此,钢结构实际受力情况与力学计算结果吻合得好,可以根据力学原理建立钢结构的计算方法。

4. 可焊性好

可焊性(weldability)是钢结构的独特优点。由于钢材的可焊性解决了钢结构的制作问题,致使钢结构连接大为简化,可以制造各种复杂形状的结构。当然焊接也将产生残余应力、残余变形以及热影响区脆性等问题。

5. 工业化程度高

钢结构采用的型钢和钢板,经专业厂家制作为钢构件,然后运至工地安装。型钢的大量采用再加上专业化的生产,故精度高、制作周期短。工地安装广泛采用螺栓连接,良好的装配性使工期大为缩短。此外,已建钢结构也易于拆卸。

6. 密闭性好

钢材本身组织致密,焊接的钢结构可以做到完全密闭,甚至铆接或螺栓连接都可以做

到。因此,可以用于建造气密性和水密性要求高的气罐、油罐和高压容器。

7. 耐腐蚀性差

钢材在湿度大和有腐蚀性介质的环境中容易锈蚀。因此,为确保钢结构的耐久性,必须采用油漆、镀锌等防护措施,故维护费用较高。

8. 耐热不耐火

钢材当辐射热温度低于 150℃时,钢材的主要性能变化很小。因此,其耐热性能较好。当温度超过 150℃时,材质性能有所变化,需要采取隔热措施,当温度达到 600℃左右,钢结构会瞬间崩溃,完全丧失承载力。因此,耐火性能差,必须采取一定的防火措施。美国世贸大楼的坍塌充分说明了钢结构耐火性能差是一致命缺憾。

1.2 钢结构的应用范围

站在现代建筑结构技术的发展前沿,可以说世界上没有不能实现的结构,只有不合理的结构。根据钢结构本身的特点,结合我国国民经济的发展,钢结构在土木工程领域合理的应用范围大致如下:

1. 工业厂房

工业厂房(industrial factory building)可分为轻型、中型和重型工业厂房,主要根据是否设置吊车以及吊车吨位的大小和运行频繁程度而定。例如,炼钢车间、锻压车间等。近年来,轻型门式刚架结构在工业厂房中的应用十分普遍。

2. 大跨结构

大跨结构(large span structure)可以充分发挥钢结构强度高、自重轻的优点。比如,体育馆、会展中心、飞机库、剧场等。尤其在悬索桥、斜拉桥等桥梁工程中的应用。

3. 高层结构

高层结构(high-rise structure),尤其是超高层结构能充分发挥钢结构强度高,塑性、韧性好,抗震性能优越等优点。例如,办公楼、宾馆、住宅等。近年来,随着我国钢产量的逐年增加,钢结构在多层、高层、超高层建筑中的应用将会更加广泛。

4. 高耸结构

高耸结构(towering structure)主要包括塔架和桅杆结构,如电视塔、输电线塔、钻井塔、环境大气监测塔、广播发射桅杆等。

5. 容器、储罐、管道

容器、储罐、管道如大型油库、油罐、气罐、煤气库、输油管等。

6. 可拆卸或移动的结构

可拆卸或移动的结构如建筑工地的活动房、临时的商业或旅游业建筑、塔式起重机、

龙门吊等。此类结构多为轻钢结构并采用螺栓或扣件连接。

7. 其他构筑物

其他构筑物如高炉、运输通廊、栈桥、管道支架等。

1.3 钢结构的设计方法

钢结构设计应遵循的一般原则是“技术先进、经济合理、安全适用、确保质量”。钢结构的设计方法可分为容许应力法和极限状态设计法两种。

1.3.1 容许应力法

容许应力法(allowable stress method)也称为安全系数法或定值法,即将影响结构设计的诸因素取为定值,采用一个凭经验选定的安全系数来考虑设计诸因素变异的影响,以衡量结构的安全度。其表达式为

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (1-1)$$

式中: σ ——由标准荷载与构件截面尺寸所计算的应力;

$[\sigma]$ ——容许应力,

$$[\sigma] = \frac{f_k}{k}$$

f_k ——材料的标准强度,对于钢材为屈服点 f_y ;

k ——安全系数。

容许应力法,作为一种传统的设计方法计算简便,目前许多国家在不同的规范中仍在采用。但此设计方法采用定值的安全系数考虑不确定诸因素的影响不科学,不能定量度量结构的可靠度,而且给人一种误导,只要有安全系数结构就百分之百可靠。目前,我国《钢结构设计规范》(GB50017-2003)中,只有结构构件或连接的疲劳强度计算采用此方法。

1.3.2 极限状态设计法

极限状态设计法(limit-state design method)问世于20世纪50年代。它将变异性的设计参数采用概率分析引入结构设计中。根据应用概率分析的程度分为三种水准:即半概率极限状态设计法、近似概率极限状态设计法和全概率极限状态设计法。目前,钢结构设计方法采用的是近似概率极限状态设计法,有时也称为概率极限状态设计法。

1. 可靠性定义

按照概率极限状态设计法,结构可靠性(reliability)定义为:结构在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率;是结构安全性、适用性和耐久性的总称。

2. 极限状态定义及分类

当结构或其组成部分超过某一特定状态就不能满足设计规定的某一功能要求时,此特定状态就称为该功能的极限状态(limit state)。结构的极限状态可分为两类。

(1) 承载能力极限状态

结构或构件达到最大承载能力或达到不适于继续承载的变形时的极限状态,它包括强度、稳定和疲劳等计算。

(2) 正常使用极限状态

结构或构件达到正常使用的某项规定极限值时的极限状态。包括静载下的过大变形、动载下的剧烈振动及耐久性问题。

3. 结构的功能函数

结构的工作性能可以用结构的功能函数来描述,若结构设计时需要考虑影响结构可靠性的随机变量有 n 个,即 x_1, x_2, \dots, x_n ,则在 n 个随机变量间通常可以建立函数关系,若仅考虑 R, S 两个参数,则结构的功能函数为

$$Z = (R, S) = R - S \quad (1-2)$$

式中: R ——结构的抗力;

S ——荷载效应。

实际工程中,随着条件的不同, Z 有三种可能性:

当 $Z > 0$ 结构处于可靠状态;

当 $Z = 0$ 结构达到临界状态,即极限状态;

当 $Z < 0$ 结构处于失效状态。

结构的可靠度及失效概率为

结构的可靠度

$$P_s = P(Z \geq 0) \quad (1-3)$$

结构的失效概率

$$P_f = P(Z < 0) \quad (1-4)$$

两者关系

$$P_s + P_f = 1 \quad (1-5)$$

4. 设计方法表达式

现行《钢结构设计规范》(GB50017-2003)中除疲劳计算外,都采用广大设计人员熟悉的分项系数设计表达式表示以概率理论为基础的极限状态设计方法。

1) 对于承载能力极限状态,应按荷载效应的基本组合或偶然组合进行荷载组合,基本组合按下列设计表达式中最不利值确定。

① 由可变荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 (\gamma_G S_{G_k} + \gamma_{Q_1} S_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Q_i} \psi_{ci} S_{Q_{ik}}) \leq f \quad (1-6)$$

② 由永久荷载效应控制的组合:

$$\gamma_0 (\gamma_G S_{G_k} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Q_i} \psi_{ci} S_{Q_{ik}}) \leq f \quad (1-7)$$

式中: γ_0 ——结构重要性系数;

γ_G ——永久荷载的分项系数；

γ_{Q_i} ——第 i 个可变荷载的分项系数(其中 γ_{Q_1} 为可变荷载 Q_1 的分项系数)；

S_{G_k} ——按永久荷载标准值 G_k 计算的荷载效应值；

$S_{Q_{ik}}$ ——按可变荷载标准值 Q_{ik} 计算的荷载效应值,其中 $S_{Q_{ik}}$ 为诸可变荷载效应中起控制作用者；

ψ_{ci} ——可变荷载 Q_i 的组合值系数；

n ——参与组合的可变荷载数；

f ——钢材的强度设计值($f = f_y/\gamma_R$,其中 f_y 为钢材屈服点, γ_R 为抗力分项系数。对于 Q235 钢: $\gamma_R = 1.087$;对于 Q345、Q390 和 Q420 钢: $\gamma_R = 1.111$ 。但对于端面承压和连接,则 $f = f_u/\gamma_{R_u}$,其中 f_u 为极限强度, $\gamma_{R_u} = 1.538$)。

2) 对于正常使用极限状态,应根据不同的设计要求,采用荷载的标准组合、频遇组合或准永久组合。钢结构通常只考虑荷载的标准组合,其设计式为

$$v_{G_k} + v_{Q_{1k}} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} v_{Q_{ik}} \leq [v] \quad (1-8)$$

式中: v_{G_k} ——永久荷载标准值在结构或结构构件中产生的变形值；

$v_{Q_{1k}}$ ——超控制作用的第一个可变荷载的标准值在结构或结构构件中产生的变形值；

$v_{Q_{ik}}$ ——其他第 i 个可变荷载标准值在结构或结构构件中产生的变形值；

$[v]$ ——结构或结构构件中的容许变形值。

1.4 钢结构的发展

钢结构的发展经历了一个漫长的历程。从古至今,炼铁、炼钢以及每一项新技术的问世都极大地推动了钢结构的发展。

我国的历史最为悠久,是最早用铁建造结构的国家。其中以铁链桥及铁塔为典型代表。建于公元 58~75 年的兰津桥(图 1.1)是最早的一座铁链桥,比欧洲最早的铁链桥早 70 余年;建于 1706 年的四川泸定大渡河桥(图 1.2),净跨 100m,宽 2.8m,由 13 根铁链组成,每根约 1.6t,铁链锚固于直径 20cm,长 4m 的铸铁锚桩上,该座桥比英国用铸铁建造的欧洲第一座跨度 31m 的拱桥早 83 年,比美洲第一座跨度为 21.3m 的铁链桥早 105 年。铁塔作为古代的一种宗教建筑,如建于 967 年的广州光孝寺东铁塔,共 7 层,塔身高 6.35m;建于 1061 年的湖北荆州玉泉寺铁塔(图 1.3),共 17 层,塔身高 17.9m;山东济宁铁塔寺铁塔;江苏镇江甘露寺铁塔等,均以独特的建筑造型和超凡的冶金技术,展示了我国劳动人民的聪明智慧和我国古



图 1.1 兰津桥

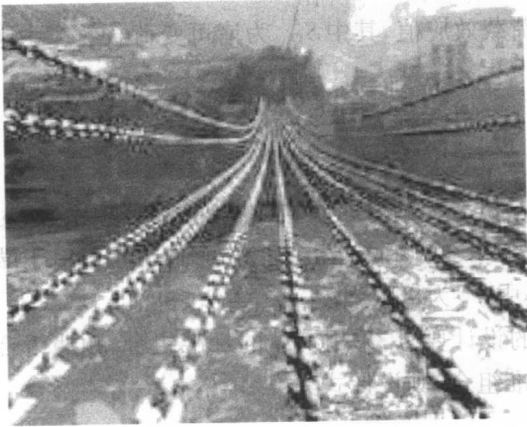


图 1.2 泸定大渡河桥



图 1.3 玉泉寺铁塔

代金属结构的辉煌成就。

18 世纪末,工业革命在欧洲兴起,冶金技术的发展使钢结构在欧美的应用快速增长。18 世纪 80 年代,熟铁型材问世;19 世纪 30 年代,采用轧制方法制造铁轨;19 世纪 20~30 年代,铆钉连接技术导致铆接熟铁结构的诞生。例如,1889 年采用熟铁建成高度 321m 的巴黎埃菲尔(Eiffel)铁塔(图 1.4)。1856 年和 1867 年相继发明转炉和平炉冶炼工艺,标志软钢时代到来。从 19 世纪 60 年代和 70 年代起才有了全钢制造的桥梁,如建于 1847 年的跨越美国密西西比河的圣路易斯拱桥,中间跨为 158.5m,两边跨各为 153m。19 世纪后半

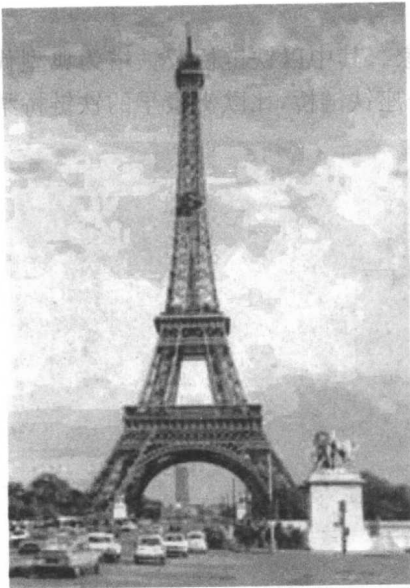


图 1.4 埃菲尔铁塔

叶焊缝连接出现,20 世纪 20 年代起在工程结构中广泛应用。20 世纪 30 年代末到 50 年代初,高强螺栓连接开始应用于钢结构工程,促进了钢结构的发展。

自 20 世纪 70 年代起国外钢结构发展的高峰期到来。代表性建筑有 1974 年建成的 110 层,高 443m 的美国芝加哥西尔斯(Sears)大厦(图 1.5);1974 年建成的 5 层纤绳,高 645m 的波兰华沙长波用桅杆;1973 年建成的高 392m 的前苏联基辅自立式电视塔;1975 年建成的直径 207m 的美国新奥尔良超级穹顶;20 世纪 80 年代初建成的跨度 218m 的新加坡章宜机场飞机库;1981 年建成的主跨 1410m 的英国亨伯(Humber)吊桥;1998 年 4 月建成通车的中央跨长 1991m 的日本明石海峡吊桥(图 1.6),实现了超大跨度的飞跃。1996 年建成的地上 88 层、450m 高的马来西亚吉隆坡石油大厦(图 1.7);于 1998 年动工、2004 年 12 月正式开放的地下 5 层、地上 101 层、508m 高

的台北 101 大厦(图 1.8),被视为世界新“地标”,在高度方面向极限冲刺。



图 1.5 西尔斯大厦

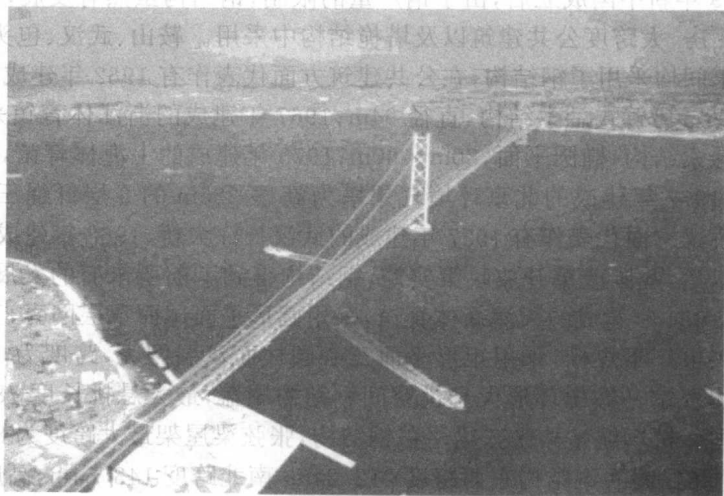


图 1.6 日本明石海峡吊桥



图 1.7 马来西亚吉隆坡石油大厦

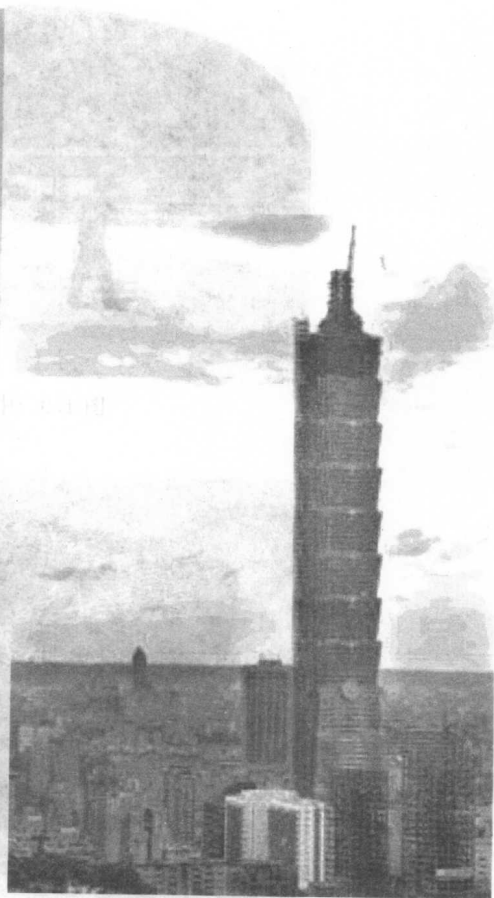


图 1.8 台北 101 大厦

中国钢结构的发展虽然有辉煌的历史,但在半封建半殖民地的百年历史中落后了。1949年新中国成立后,由于钢产量的限制,钢结构虽然有发展,但数量少、规模小,仅在重型厂房、大跨度公共建筑以及塔桅结构中采用。鞍山、武汉、包头等钢厂的炼钢、轧钢及连铸车间均采用了钢结构,在公共建筑方面代表作有1962年建成的北京工人体育馆采用圆形双层辐射式悬索结构,直径94m;1967年建成的浙江体育馆采用双曲抛物面正交索网的悬索结构,椭圆平面,80m×60m;1975年建成的上海体育馆,跨度110m的三向平板网架;1977年建成的北京环境气象塔为高达325m的5层纤绳三角形杆身的钢桅杆结构。在桥梁方面代表作有1957年建成的武汉长江大桥、1968年建成的南京长江大桥等。1978年以后,我国改革开放政策实施,钢结构得到了前所未有的发展,应用领域得以拓展。比如,1994年建成的天津新体育馆,采用圆形平面球面双层网壳,直径108m;1996年建成的嘉兴电厂干煤棚,采用矩形平面三心圆柱面双层网壳,跨度为103.5m;1997年建成的上海体育馆马鞍山环形大悬挑空间钢结构屋盖,最大悬挑长度78m;2000年建成的上海浦东国际机场航站楼张弦梁屋盖钢结构,张弦梁屋架最大跨度为80m。正建的中国国家大剧院(图1.9)的钢结构东西跨度212.24m,南北跨度143.64m,高度46.285m,蛋壳面积3.5万m²;正建的2008奥运会主场馆(鸟巢)(图1.10)等。这些建筑的建成标志着我国大跨度空间钢结构已迅速接近国际先进水平。



图 1.9 中国国家大剧院

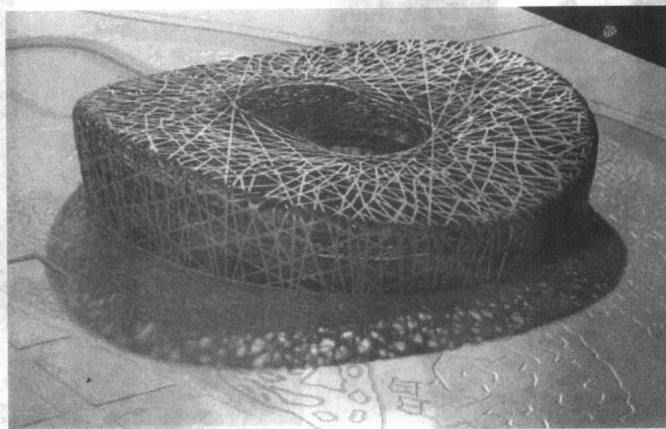


图 1.10 2008 奥运会主场馆(鸟巢)

另外,高层及超高层钢结构建筑在北京、上海、深圳等地拔地而起,以地下3层,地上88层,420.5m的上海金贸大厦(图1.11)为代表,标志着我国超高层钢结构已进入世界前列。

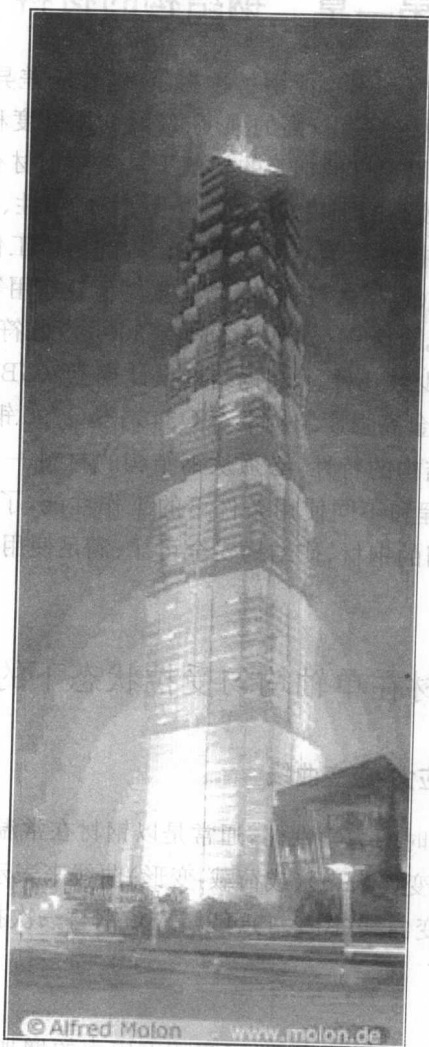


图 1.11 上海金贸大厦

综上所述,钢结构作为一种综合性能优良的结构,既有辉煌的历史,更有美好的未来。我国自1996年钢产量首次突破1亿t大关居世界第一至今,以1997年建设部颁发的《中国建筑技术政策》(1996~2010)为代表,国家推出一系列政策推动钢结构的应用。可以预言:21世纪是钢结构的世纪,中国钢结构飞速发展的时代已经到来。