

结构工程前沿丛书

钢结构高等分析理论与实用计算

郑廷银 著



科学出版社

www.sciencep.com

结构工程前沿丛书

钢结构高等分析理论 与实用计算

郑廷银 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对建筑钢结构的特点,全面、系统地阐述了近几年新兴的结构高等分析理论及其实用计算方法。本书既注重学科前沿知识和方法的介绍,又注重理论的系统性和应用的可操作性。全书共分8章,内容包括:钢结构的概论、三维梁柱单元二阶弹性刚度方程、三维梁柱单元二阶非弹性刚度方程、三维支撑单元的二阶弹性及弹塑性刚度方程、三维结构非线性平衡方程的建立与求解、半刚性连接的三维结构高等分析、考虑节点域变形效应的三维结构高等分析、结构的二阶实用分析。

本书可供高等院校的相关专业师生以及科研院所的科技人员参考,也可供土建类工程设计、制作与安装以及其他相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢结构高等分析理论与实用计算/郑廷银著. —北京:科学出版社,2007
(结构工程前沿丛书)

ISBN 978-7-03-019563-0

I. 钢… II. 郑… III. ①钢结构-结构分析②钢结构-结构计算
IV. TU931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 121704 号

责任编辑:耿建业 田士勇/责任校对:李奕萱

责任印制:刘士平/封面设计:耕者工作室

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年8月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年8月第一次印刷 印张:17

印数:1—2 500 字数:326 000

定价:40.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

前 言

钢结构具有自重轻、抗震性能好、绿色环保、工业化程度高、综合经济效益显著等优点,深受国内外建筑师和结构工程师的青睐。在我国,由于近年来的国家政策、钢材生产、设计研发等诸多方面的有利因素,建筑钢结构得到了高速发展及广泛应用。但是,由于现行的建筑钢结构安全性设计方法的一般步骤为:先按一阶或二阶弹性方法计算各种荷载及其组合作用下结构的位移和各构件的内力,即整体结构的弹性分析;然后将结构分析所得内力用于构件的各种极限状态方程进行构件设计,即单个构件的非弹性设计。只要构件满足各种规定的极限状态方程,则认为结构设计符合规范要求。这种设计方法实质上是基于构件承载力极限状态的结构设计,它主要存在着结构内力计算模式与构件承载力计算模式不一致、结构整体失稳的计算模式与实际失稳状态不一致、不能准确预测结构体系的破坏模式和极限承载力、不同结构整体承载力极限状态的可靠度水平不一致这四大缺陷。要彻底克服上述现行建筑钢结构设计方法中的缺陷,必须建立以结构整体承载极限状态和结构整体极限承载力为目标的结构分析设计方法,即高等分析设计方法。

高等分析方法主张,在结构分析中充分考虑影响结构性能的各种因素,特别是非线性因素,直接计算和验算结构的整体极限承载力,以彻底免除构件计算长度和构件相关方程的概念,即免除构件验算的步骤。高等分析方法能够准确跟踪结构中各构件塑性渐变的全过程,能够准确预测结构体系及其各组件的破坏模式与极限荷载,而不需要按规范公式逐一对各构件进行验算。因此,高等分析方法可使结构的可靠度更为统一,而且将大大简化设计过程,提高结构设计效率。

目前,欧洲规范(EC3,1992)、澳大利亚极限状态标准(AS4100,1990)以及香港钢结构设计规范(HKSC2005)等规范已包含了针对钢框架结构的此类设计方法的条文,特别是最近十余年国内外学者对其进行了大量的研究,提出了一系列适用于高等分析的分析模型。对于构件截面无局部屈曲,且平面外有足够约束的刚性和半刚性连接的二维框架的高等非弹性分析理论已有长足的发展,并已被实验验证。这些分析方法可以预测构件强度和稳定,同时能够有条件地满足传统的柱和梁柱设计极限状态方程。换句话说,二维结构的高等分析理论已发展成熟,现在基本可以用于一般框架结构的设计之中。然而,分析三维框架结构的相关理论和数学表达式以及求解精度与适用性等问题还未能得到很好解决,而这些又是三维结构分析方法向高等分析发展不可避免的问题。对此,为了探讨严格意义上的三维

结构高等分析理论与方法,作者结合自身十余年在结构稳定与高等分析方面的科研成果编著了本书。

本书主要针对建筑钢结构的特点,全面、系统地阐述三维结构高等分析理论及其实用计算方法。全书共分8章。第1章主要介绍钢结构的特点与应用、现行钢结构设计方法的缺陷和研究现状、结构高等分析的特点及现状、结构二阶分析的概念与方法。第2~5章采用非线性连续介质力学中三维连续体的有限变形理论的基本原理,并运用更新的拉格朗日列式法建立严格的三维梁柱单元虚功方程,再根据梁柱理论推导出的计及轴力和剪切变形影响的梁柱单元真实的横向位移和转角位移,用作稳定插值函数(对位移的高阶项没有任何省略,可以认为是精确的,因而在结构分析中,位移和转角都可以任意大),即将传统的梁柱理论与有限元法技巧相结合,建立包括各种耦合项在内的严格三维梁柱单元二阶弹性(几何非线性)增量刚度方程;再通过引入单元截面弹塑性影响因子 p_s 和轴向弹塑性影响因子 P_s 的简化塑性区单元模型,根据 Prandtl-Reuss 理论,建立三维梁柱单元在局部坐标系下的二阶非弹性(双重非线性)增量刚度方程,利用欧拉角概念将其转化为在结构整体坐标系下的增量刚度方程,从而建立结构的非线性平衡方程,并选择有效的迭代方法、灵活的迭代策略以及合适的计算控制参数对其进行迭代求解,以获取三维结构精确的作用效应。这种方法可用于三维结构的二阶非弹性大位移分析。该方法理论严谨、计算精度高,能够满足三维结构高等分析的要求。第6章主要结合半刚性梁-柱连接特性,较详细地介绍了半刚性连接模型,并选择合适的模型建立半刚性连接空间支撑钢框架结构的高等分析方法。第7章主要是在介绍节点域模型基础上,选择恰当的节点域分析模型,以较简捷的方法来建立空间支撑钢框架结构考虑节点域变形影响的刚度方程,并结合半刚性梁-柱连接特性,建立半刚性连接的空间支撑钢框架结构考虑节点域变形影响的高等分析方法。第8章主要介绍巨型钢框架结构和双重抗侧力结构体系这两类大型复杂的高层钢结构体系的简化计算方法。在进行结构的二阶实用分析时,首先从建立结构的二阶等效模型入手,并对此确定各等效构件的等效刚度,以此来实现对该类结构的二阶简化分析,从而获得该类结构的二阶实用分析方法,为工程设计提供参考。本书各章均通过大量算例或试验结果来检验本书方法的实用性与可靠性。

本书由郑廷银教授制定编写大纲,第8.4、8.5节由朱慧高级工程师执笔,其余章节均由郑廷银教授执笔并负责全书的统稿定稿工作。蔡万军、林沂祥等研究生帮助整理了部分插图,对此致谢。

在本书编著过程中,引用了部分同行专家最新的相关文献资料,对此谨向所引用文献资料的所有作者表示衷心感谢。由于时间所限,书中难免有引用同行专家论著或资料中的某些内容而未能详细说明出处,敬请谅解!

本书的一些论点和方法仅代表作者当前对这些问题的认识。由于科学的不断发展及所探讨问题的复杂性,某些论点和方法定会随着研究工作的深化与扩大而进一步发展。由于作者学识有限,书中不当之处在所难免,敬请同行专家和广大读者不吝指正。

郑廷银

2007年3月于南京

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 钢结构的特点与应用	1
1.1.1 钢结构的特点	1
1.1.2 钢结构的应用	3
1.2 现行钢结构设计方法的缺陷和研究现状	13
1.2.1 钢结构设计方法的演进	14
1.2.2 现行建筑钢结构设计方法的缺陷	15
1.2.3 建筑钢结构分析设计方法的研究现状	17
1.3 结构高等分析的特点及现状	18
1.3.1 结构高等分析的概念与特点	18
1.3.2 结构高等分析的分类与特征	19
1.3.3 结构高等分析的研究现状	21
1.4 结构二阶分析的概念与方法	22
1.4.1 结构分析方法的分类	22
1.4.2 结构二阶分析的概念	22
1.4.3 结构不需进行二阶分析的条件	24
1.4.4 结构二阶分析的方法	24
1.5 结论	28
参考文献	29
第 2 章 三维梁柱单元二阶弹性刚度方程	33
2.1 概述	33
2.2 基本假定	34
2.3 三维连续体有限变形理论的基本描述	35
2.3.1 物体变形和运动的描述	35
2.3.2 应变张量	37
2.3.3 应力张量	39
2.4 三维梁柱单元的虚功增量方程	41
2.5 考虑轴力和剪切变形影响的梁柱单元位移函数	47
2.5.1 梁柱单元的横向位移函数	47

2.5.2 梁柱单元的转角位移函数·····	51
2.6 位移插值函数·····	52
2.7 三维梁柱单元的几何非线性刚度方程·····	56
2.8 结论·····	58
参考文献·····	58
第3章 三维梁柱单元二阶非弹性刚度方程 ·····	60
3.1 概述·····	60
3.2 基本假定·····	61
3.3 三维梁柱单元的简化塑性区模型·····	62
3.4 三维单元的屈服函数·····	63
3.5 三维梁柱单元的截面弹塑性影响因子·····	65
3.6 三维梁柱单元的轴向弹塑性影响因子·····	67
3.7 三维梁柱单元的二阶非弹性增量刚度方程·····	69
3.8 三维梁柱单元的坐标变换·····	75
3.9 结论·····	79
参考文献·····	79
第4章 三维支撑单元的二阶弹性及弹塑性刚度方程 ·····	81
4.1 概述·····	81
4.2 支撑杆件的计算模型·····	81
4.3 三维支撑单元的二阶弹性刚度方程·····	82
4.3.1 支撑单元弹性分析的基本假定·····	82
4.3.2 三维支撑单元的弹性刚度方程的建立·····	82
4.4 三维支撑单元的二阶弹塑性刚度方程·····	84
4.4.1 支撑单元弹塑性分析的基本假定·····	84
4.4.2 三维支撑单元的弹塑性刚度方程的建立·····	85
4.5 结论·····	85
参考文献·····	86
第5章 三维结构非线性平衡方程的建立与求解 ·····	87
5.1 概述·····	87
5.2 结构非线性平衡方程的建立·····	87
5.3 结构非线性方程的求解方法与迭代策略·····	88
5.4 迭代收敛准则·····	91
5.5 极值(临界)点的判别准则·····	92
5.6 极限荷载的确定方法·····	94
5.7 结构分析的破坏准则·····	95

5.8 典型算例及分析比较	96
5.9 结论	102
参考文献	102
第6章 半刚性连接的三维结构高等分析	104
6.1 概述	104
6.2 半刚性连接非线性性能的研究方法	104
6.3 钢框架梁柱连接的性能与特点	107
6.4 半刚性连接的弯矩-转角特性曲线模型	113
6.4.1 线性模型	113
6.4.2 多项式模型	115
6.4.3 B样条模型	116
6.4.4 幂函数模型	117
6.4.5 指数函数模型	151
6.4.6 有限元法的模拟模型	152
6.5 半刚性连接的恢复力模型	154
6.6 半刚性连接结构的结构分析方法	158
6.7 半刚性连接的三维结构刚度方程	160
6.7.1 半刚性连接的三维单元刚度矩阵	160
6.7.2 半刚性连接的三维结构刚度方程的建立	164
6.8 半刚性连接结构的结构分析	165
6.9 结论	168
参考文献	168
第7章 考虑节点域变形效应的三维结构高等分析	173
7.1 概述	173
7.2 节点域分析模型	175
7.2.1 Krawinkler 模型	175
7.2.2 Nakao 模型	177
7.2.3 Kato-Chen-Nakao 模型	179
7.2.4 Lui-Chen 模型	180
7.3 考虑节点域变形效应的三维结构二阶分析	182
7.3.1 结构分析的单元划分	182
7.3.2 基本假定	183
7.3.3 节点单元的刚度方程	183
7.3.4 三维梁单元的刚度方程	189
7.3.5 三维柱单元的刚度方程	192

7.3.6 三维支撑单元的刚度方程	195
7.3.7 考虑节点域变形效应的三维结构刚度方程的建立	198
7.4 考虑节点域变形效应的结构对比分析	199
7.5 结论	203
参考文献	203
第8章 结构的二阶实用分析	205
8.1 概述	205
8.2 巨型平面钢框架结构的二阶实用分析	205
8.2.1 巨型平面钢框架结构二阶等效模型的建立	205
8.2.2 基本假定	206
8.2.3 巨型构件的等效刚度	207
8.2.4 结构二阶分析刚度方程的建立与求解	210
8.2.5 例证分析	212
8.3 巨型空间钢框架结构的二阶实用分析	213
8.3.1 巨型空间钢框架结构三维等效模型的建立	213
8.3.2 基本假定	215
8.3.3 巨型构件的等效刚度	215
8.3.4 等效节点域的等效刚度	220
8.3.5 结构二阶分析刚度方程的建立与求解	221
8.3.6 算例分析	222
8.4 钢框架-支撑结构体系二阶实用分析的有限元方法	227
8.4.1 等效模型的建立	227
8.4.2 等效刚度的确定	228
8.4.3 结构刚度方程及其求解	233
8.4.4 等效模型的验证	234
8.5 双重抗侧力结构体系二阶实用分析的解析方法	235
8.5.1 分析模型的建立	236
8.5.2 等效刚度的确定	237
8.5.3 基本微分方程的建立	238
8.5.4 结构的位移分析	238
8.5.5 结构的内力分析	242
8.5.6 算例分析	244
8.6 结论	245
参考文献	246

附录一	空间钢框架结构二阶弹性分析的三维梁柱单元切线刚度矩阵 $[k_{\text{tst}}]$ 的上三角部分非零元素显式表达·····	248
附录二	空间钢框架结构二阶弹性分析的第 i 增量步开始时的已平衡节点力向量 $\{^1f\}$ 的各元素显式表达·····	254
附录三	双重抗侧力结构体系二阶实用分析的解析方法中各水平受荷状态的内力与位移计算系数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 ·····	255

第 1 章 概 论

1.1 钢结构的特点与应用

所谓钢结构,是指由钢板、型钢(热轧型钢、冷弯薄壁型钢)等通过焊接或螺栓连接所组成的承重结构的统称。

1.1.1 钢结构的特点

与其他材料的结构相比,钢结构具有多方面的特点。

1. 钢结构自重轻

钢材虽然质量密度大,但其强度高。其质量密度与其强度之比 a 相对较小,比值 a 为

钢材: $a = (1.7 \sim 3.7) \times 10^{-4} / \text{m}$

木材: $a = 5.4 \times 10^{-4} / \text{m}$

混凝土: $a = 18 \times 10^{-4} / \text{m}$

其比值越小,代表结构相对越轻。因此,用钢材做成的结构构件面积小,钢结构自重轻。如:在同样跨度承受同样荷载下,钢屋架的自重最多不过为钢筋混凝土屋架的 $1/3 \sim 1/4$,冷弯薄壁型钢屋架甚至接近钢筋混凝土屋架的 $1/10$,而高层钢结构自重则约为高层钢筋混凝土结构的 $1/2 \sim 3/5$ 。由此带来的优点是:方便运输和吊装;减小地震作用;减轻基础负荷,降低地基、基础部分的造价;增加建筑有效使用面积。

2. 钢结构可靠性高

由于钢材性能非常接近于力学计算的弹性、匀质、各向同性的基本假定,因此,钢结构的实际受力情况与工程力学计算结果比较符合,计算中采用的经验公式不多,从而计算上的不定性因素较少,计算结果可靠性高。

3. 钢结构抗震性能好

钢材具有良好的塑性(承受静力荷载时,材料吸收变形能的能力)和韧性(承受动力荷载时,材料吸收能量的多少)。钢材的塑性好,会使结构一般情况下不会由

于偶然超载或局部超载而突然断裂破坏;钢材的韧性好,说明材料具有良好的动力工作性能,可吸收较多的地震能量。因此,钢结构具有良好的延性和耗能能力,其抗震性能好。

4. 钢结构工业化程度高

由于钢结构由各种型材组成,而且采用工厂制造、工地拼装的施工方法,施工质量好、工期短、制作简便、安装方便、从而工业化程度高。

5. 钢结构密闭性较好

由于钢材组织非常致密,且具有可焊性。因此,通过焊接连接的结构具有较好的气密性和水密性(不易渗漏),可用于大型油库、高压容器、管道等板壳结构。

6. 钢结构加固、改造、拆迁方便

由于钢结构由各种型材组成,而且采用工厂制造、工地拼装的施工方法,特别是采用螺栓连接的现场拼装方法,使结构易于加固、改造、拆迁。

7. 钢结构符合环保与可持续发展的要求

钢材是节约土地、能源和资源的持久性建筑材料。钢结构施工现场湿作业少,尘埃少,施工噪声低,对周围环境污染小。而且拆除建筑物时,大部分材料可回收利用、再生或降解,不会造成很多垃圾。因此,钢结构符合环保与可持续发展的战略要求。

8. 钢结构耐热但不耐火

钢材的熔点虽在 $1400\sim 1500^{\circ}\text{C}$ 之间,但当其温度达 600°C 左右时,钢材已进入不能继续承载状态,只有当温度在 200°C 以内时,钢材性能无太大变化。因此,《钢结构设计规范》规定,当钢材表面温度超过 150°C 或在短期内可能受到火焰作用时,应采取有效的防护措施。其可用措施有:使用耐候钢、防火涂料、防火漆、外包混凝土等。

9. 钢结构耐腐蚀性差

钢结构在湿度大、有侵蚀介质的环境中易于锈蚀,使结构受到损坏。因此必须对结构采取防腐措施。其可用措施有:使用耐候钢、防锈漆、外包混凝土等。

10. 钢结构稳定问题突出

由于钢材强度高,所设计的结构构件壁薄、面积小,因此结构相对较柔,结构的

二阶效应比较明显,在压力作用下,构件甚至结构易于失稳。这是钢结构的一个重要特点,结构分析与设计时应特别重视该特点,这也是钢结构高等分析中应考虑的主要因素之一。

1.1.2 钢结构的应用

钢结构按其特点,应该在绝大多数建筑领域应用,但实际则不然,因为钢结构的应用还要受到国民经济发展的制约。多年来,我国的钢产量一直不高,因此钢结构的应用受到一定的限制。不过,近年来,随着我国钢产量的增加(1996年就已超亿吨,2005年已超过3亿吨)和国家鼓励用钢政策的出台,钢结构的应用得到了很大的发展,其范围越来越广泛,目前主要的应用范围如下。

1. 工业厂房结构

主要是用于内有大吨位、重级工作制吊车的冶金工业、重型机械制造工业以及大型动力设备制造工业等重型工业厂房。例如我国鞍钢、包钢、攀钢、首钢、武钢、宝钢等著名冶金企业以及上海重型机械厂、上海江南造船厂等重型机械制造工业的许多车间都采用了各种规格的钢结构厂房,如图1.1、图1.2所示。

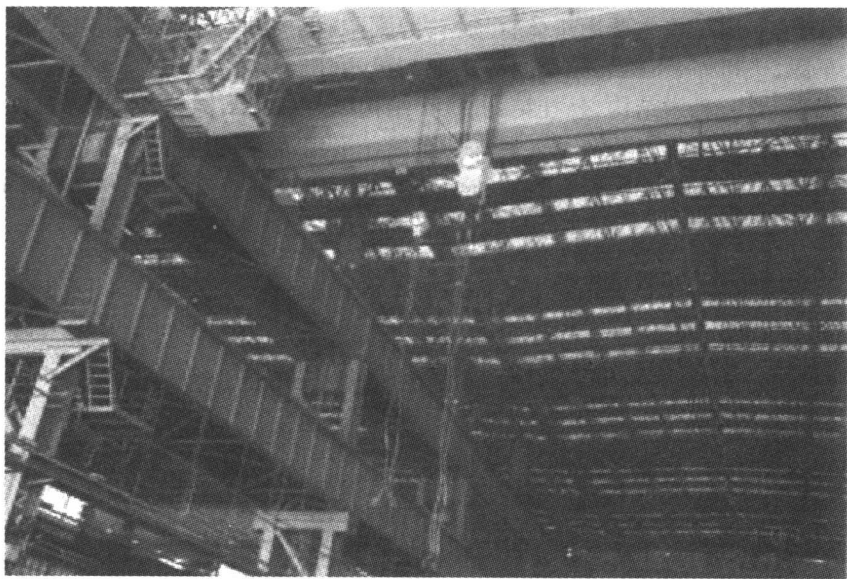


图 1.1 某实腹斜梁屋盖全钢结构厂房

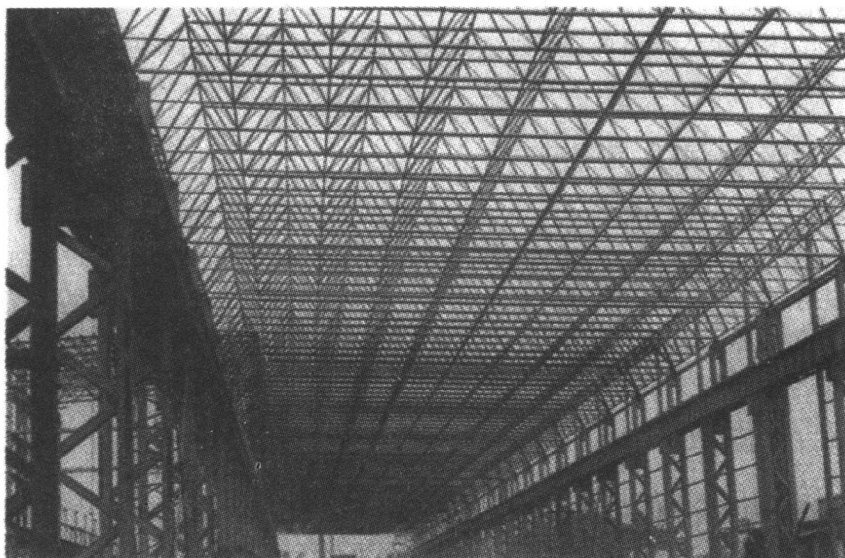


图 1.2 某网架屋盖全钢结构厂房

2. 大跨度房屋结构

大跨度房屋结构主要用于体育场馆、影剧院、会展中心、火车站、汽车站、汽车库、火车库、飞机库、飞机装配车间等工业与民用建筑。其结构体系主要采用网架结构、网壳结构、悬索结构、悬挂结构、拱架结构以及框架结构等,如图 1.3、图 1.4、图 1.5 所示。规模宏大的北京人民大会堂屋盖采用钢屋架,上海体育馆、首都体育

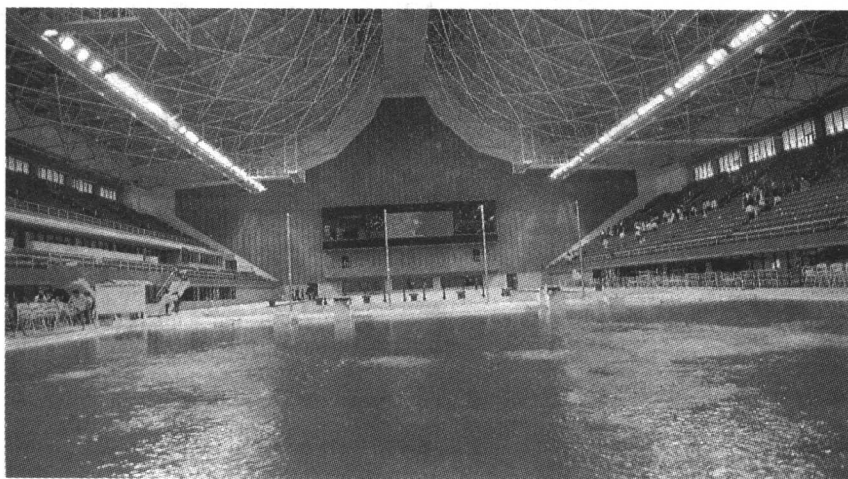


图 1.3 国家奥林匹克游泳馆

馆、上海文化广场等采用了大跨度网架结构,西安秦始皇陵兵马俑陈列馆展厅采用了跨度为 72m 的三铰拱钢结构,北京工人体育馆、浙江杭州体育馆等采用了圆形和马鞍形的悬索结构,1990 年在北京召开的第十一届亚洲运动会的运动场馆,80% 以上采用钢网架结构,也建成了几座悬挂式结构体育馆。

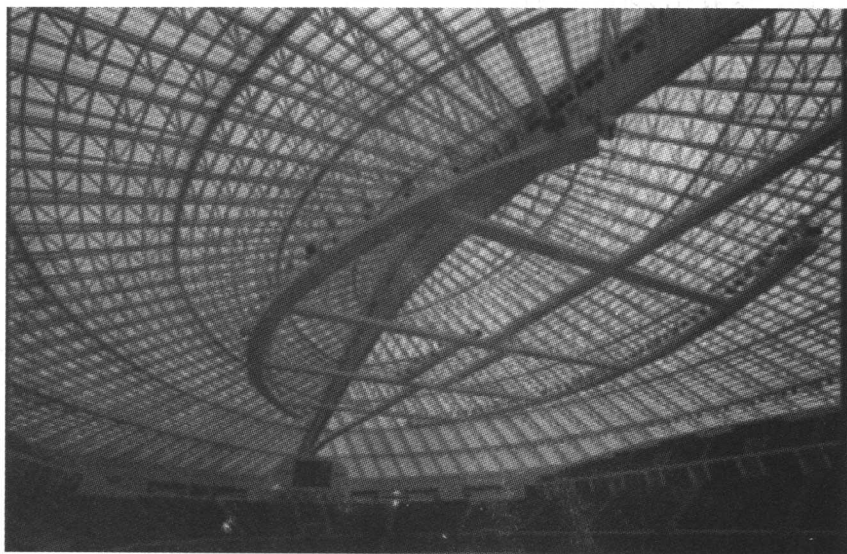


图 1.4 广州新体育馆



图 1.5 某体育场钢屋盖

3. 高层、超高层建筑结构

据文献统计,在全世界 100 幢最高建筑物中,全钢结构占 58 幢,钢与混凝土混合结构占 26 幢,两项合计占总数的 84%,钢筋混凝土结构仅占 16%;目前的统计资料显示,高层钢结构所占比例有所增加。在世界十大高楼中,以全钢结构和以钢结构为主的混合结构已占总数的 90%(见表 1.1)。可见高层建筑,特别是超高层建筑最适合的结构类型应是钢结构或以钢为主的混合或组合结构。这充分体现了该结构类型具有广阔的发展前景^[1]。

表 1.1 目前世界 10 幢最高的高层建筑

序号	建 筑 物	城市	建成年份	层数	高度/m	材料	用途
1	101 大厦	台北	2004	101	508	钢/砼	多功能
2	双塔大厦	吉隆坡	1997	88	452	钢/砼	多功能
3	西尔斯大厦	芝加哥	1974	110	443	钢	办公楼
4	金茂大厦	上海	1998	88	421	钢/砼	多功能
5	国际金融中心大厦(二期)	香港	2003	88	420	钢/砼	办公楼
6	中信广场大厦	广州	1997	80	391	砼	多功能
7	地王大厦	深圳	1995	81	384	钢/砼	多功能
8	瑞凯特广场	吉隆坡	1998	77	382	钢/砼	多功能
9	帝国大厦	纽约	1931	102	381	钢	办公楼
10	万豪国际金融中心	重庆	2007	77	377	钢	办公楼

在我国,高层钢结构建筑虽然起步较晚,但发展较快。自 20 世纪 80 年代中期,大陆始建第一栋高层钢结构至今,在这短短的二十余年中,据不完全统计,我国大陆已建和在建的高层钢结构建筑(含钢-混凝土混合结构和组合结构)已有 80 余幢,总建筑面积约 600 万 m²。它们主要分布于上海、北京和深圳,其中上海最多。1998 年竣工的上海金茂大厦(见图 1.6),地上 88 层,高 421m,目前高度为中国大陆之最,亚洲第三,世界第四(见表 1.1);上海环球金融中心,地下 3 层、地上 101 层,高 492m,已于 1997 年动工,由于多种原因停工后,现已开始复建。在深圳,继 1985 年建成深圳发展中心大厦(地上 48 层,高 165m)之后,又相继建成地王大厦(地上 68 层,结构高 325m,塔尖高 384m,见图 1.7)、赛格广场(地上 70 层,高 278.6m)等一批高层钢结构建筑。北京于 20 世纪 80 年代末建成京广中心(57 层,高 208m)、京城大厦(52 层,高 182m)等高层钢结构建筑之后,又动工兴建北京电视中心大楼(见图 1.8)等钢结构高楼。重庆万豪国际金融中心大厦,77 层,层高 4.3m,楼高 377m,为中国目前最高的“全钢结构”建筑。在香港,相继建成中国银行大厦(地面以上 72 层,高 368m)和香港汇丰银行大厦(地面以上 48 层,高 178.8m)和国际金融中心大厦二期(地面以上 88 层,高 420m)等钢结构高层建筑。中国银行大厦(见图 1.9)和香港汇丰银行大厦(见图 1.10)两栋建筑最具特色,他