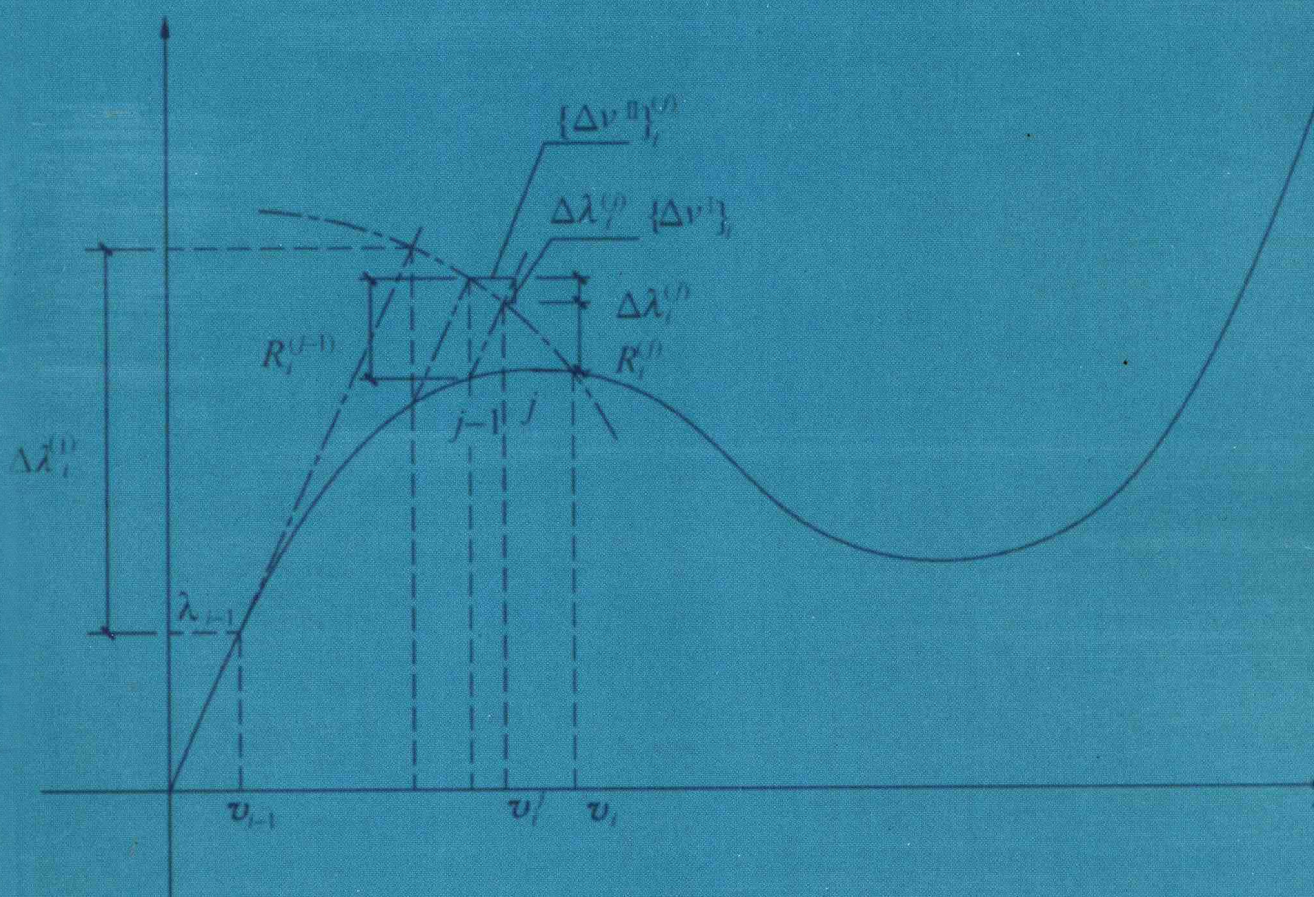


JIANZHU GANGJIEGOU
SHIGONG LIXUE YUANLI

建筑钢结构施工 力学原理

罗永峰 王春江 陈晓明 等著



中国建筑工业出版社

建筑钢结构施工力学原理

罗永峰 王春江 陈晓明 等著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑钢结构施工力学原理/罗永峰等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2008

ISBN 978-7-112-10439-0

I. 建… II. 罗… III. 钢结构-工程施工-结构力学
IV. TU758.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 162732 号

建筑钢结构施工力学原理

罗永峰 王春江 陈晓明 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12¼ 字数: 306 千字

2009 年 1 月第一版 2009 年 1 月第一次印刷

定价: 26.00 元

ISBN 978-7-112-10439-0

(17363)

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)

本书是为满足钢结构施工力学原理与施工过程分析的教材需要而编写的，全书共分九章，第一章为绪论，介绍钢结构施工技术的发展现状及其力学特点，第二章介绍结构分析的大位移非线性有限元理论，第三章介绍钢结构施工过程的时变特点和基本分析方法，第四章介绍高层钢结构施工计算模型与分析方法，第五章介绍刚性大跨度空间钢结构施工计算模型与分析方法，第六章介绍高耸钢结构施工的计算模型与分析方法，第七章介绍预应力钢结构施工中的计算模型与分析方法，第八章介绍张拉结构施工中的计算模型与分析方法，第九章介绍钢结构施工过程的仿真方法。

本书系统地介绍了不同钢结构体系在施工过程中可能遇到的力学问题及其分析方法，可供结构工程和土木工程施工专业的本科生、研究生阅读，也可作为各类钢结构工程技术人员的参考书。

* * *

本书编者：罗永峰 王春江 陈晓明 王人鹏 李元齐 遇 瑞

责任编辑：黄珏倩

责任设计：董建平

责任校对：刘 钰 关 健

序

近年来,随着科学技术的发展,钢结构在大型工程中得到广泛应用,传统的施工技术不再适用。目前,虽然有许多关于钢结构施工或制作安装方面的书籍或手册,但多数仅介绍钢构件的加工制作方法或安装方法,没有对钢结构施工过程中的力学原理及其计算方法进行详细论述。关于大型钢结构工程,需要深入了解其在施工过程中的力学特征,通过模拟计算,预测钢结构在施工过程中的受力和变形,以优化施工方法和施工控制技术。

钢结构施工技术及其力学原理,是近年来随着大型复杂钢结构的应用而出现的一门新技术及学科分支。不同于传统的混凝土结构或地下工程,钢结构的施工技术和施工过程计算方法具有自身的特点,施工技术人员需要了解现代钢结构体系在施工过程中的受力及其分析方法。

罗永峰教授近 20 年来一直从事钢结构的研究,特别是近 6 年来主要从事钢结构在施工过程中的受力及其分析方法的研究,参加了多个大型重要钢结构的施工过程模拟计算,带领博士硕士研究生进行了建筑钢结构施工力学模型及其分析方法的研究,获得了一定的研究成果,积累了很多有价值的工程数据资料。他和他的青年学者团队,历时 2 年,完成了这一本关于建筑钢结构施工过程力学分析方法的专著。这本书的主要特点在于,介绍了现代钢结构施工技术的发展现状及钢结构在施工过程中的力学特点,从理论上介绍了钢结构施工过程的时变特点和基本分析方法;根据实际工程应用中钢结构的几大类型,分别阐述了高层钢结构的施工计算模型与分析方法,说明了高层钢结构在荷载和温度作用下的变形效应特点、计算模型特点;介绍了刚性大跨度空间钢结构的施工计算模型与分析方法,并阐述了施工过程中结构稳定性以及临时支承拆除的计算方法;介绍了高耸钢结构施工中的力学特点及分析方法,说明了施工过程中杆件变形效应、温度效应以及施工过程控制方法;介绍了预应力钢结构施工中的力学特点和分析方法,说明了张弦结构、斜拉结构以及弦支穹顶结构的施工过程计算模型;介绍了柔性大跨度张拉结构施工中的力学特点,阐述了柔性钢结构的施工过程计算模型和计算方法;最后一章简要介绍了多体力学理论,并介绍如何应用于钢结构施工过程的仿真模拟中。

本书为钢结构施工过程跟踪计算提供了理论基础,是国内钢结构施工过程力学原理及计算方法方面的第一本专著,是一本较好的教材,且具有工程参考价值。

沈祖炎

2008 年 11 月 18 日

前 言

20 世纪 80 年代以来,我国钢结构发展迅速,大量的高层、高耸、大跨度、大型复杂钢结构应用于工业和民用建筑之中,为钢结构施工技术的发展提供了机遇,并同时提出了挑战。因而,掌握和了解现代高层和超高层钢结构、大型复杂空间钢结构、新型钢结构体系的施工技术及其分析方法,就变得愈来愈迫切、愈来愈重要。

目前,在钢结构工程领域,关于高层、高耸及大跨度空间钢结构的施工方法、施工状态结构的力学性态、施工过程分析方法、施工过程控制的研究以及施工过程模拟软件开发等,均是国内外研究的焦点问题,本书根据已有的研究成果和工程实践资料,针对现有施工技术,对钢结构在施工过程中的力学原理和施工过程分析方法进行论述,期望为在校学生(包括本科生和研究生)提供学习教材,为施工技术人员提供参考资料。

本人自 1988 年师从沈祖炎教授开始进行钢结构研究,自 1998 年起至今参加过多项大型钢结构工程的施工分析和验算工作,同时,带领本研究室的硕士和博士进行有关钢结构施工力学分析方面的研究。目前,本人在筹备钢结构施工技术与计算方法方面的教学工作,由于现阶段缺乏这一方面的系统教材,为了让学生能够系统地了解这方面的知识,根据计划,本人联合几位年轻学者,编写本书。本书自 2005 年开始准备资料,2007 年立项编写,经过两年多的努力工作,完成了书稿编写。

本书共分九章。第一章为绪论,介绍钢结构及其施工技术的发展现状,施工过程中的力学特点及本书的编写宗旨。第二章介绍结构分析的大位移非线性有限元理论,主要包括杆单元、梁单元和索单元,并介绍了非线性迭代分析方法。第三章介绍钢结构施工过程的时变特点和基本分析方法。第四章介绍高层钢结构施工计算模型与分析方法,说明高层钢结构的荷载效应特点、温度效应特点、计算模型特点和分析方法。第五章介绍刚性大跨度空间钢结构施工计算模型与分析方法,并给出了施工过程中结构稳定性以及临时支承拆除的计算方法。第六章介绍高耸钢结构施工中的力学问题,说明了施工过程中杆件变形效应、温度效应、施工过程分析方法以及施工过程控制方法。第七章介绍预应力钢结构施工中的力学问题,说明了张弦结构、斜拉结构以及弦支穹顶结构的施工过程的计算模型与分析方法。第八章张拉结构施工中的力学问题,主要针对柔性大跨度钢结构的施工方法模拟计算进行论述。第九章介绍钢结构施工过程的仿真方法,简要介绍多体力学理论,并介绍如何应用于钢结构施工过程模拟之中。

本人为本书编写的总负责,包括制定章节大纲、各章节内容取舍、修改与统稿等。本书的具体分工为:第一、第三、第七章由本人撰写,第二、第八章由王春江副教授撰写,第四、第六章由陈晓明高工撰写,第五章由我和李元齐教授、博士遇瑞撰写、第九章由王人鹏副教授撰写。

在本书的编写过程中，孙飞飞副教授、博士生遇瑞、王朝波、刘慧娟、王晔华为本书的编写提供了很多资料，在此表示感谢。

本书的编写受到同济大学建筑工程系文远科技基金的资助，在此编写组谨表示诚挚的感谢。

由于知识水平有限、时间紧迫，书中难免有失误和不妥之处，恳请读者提出宝贵意见和批评指正，来函联系电子邮件地址：yfluo93@mail.tongji.edu.cn。

罗永峰

2008年5月1日

目 录

1	绪论	1
1.1	建筑钢结构的类型和特点	1
1.1.1	建筑钢结构的类型	1
1.1.2	钢结构的特点	1
1.2	钢结构的应用发展趋势	1
1.2.1	我国钢结构的应用发展	1
1.2.2	现代钢结构的体系和规模	2
1.2.3	钢结构建筑物(构筑物)造型形态的发展	7
1.3	建筑钢结构施工技术的发展	7
1.4	钢结构施工中存在的力学问题	9
1.4.1	大型复杂钢结构施工过程的力学特点及其模拟方法	9
1.4.2	大型复杂钢结构施工过程中的力学问题	9
1.5	本书编写的宗旨和概要	10
	参考文献	10
2	结构大位移非线性有限元理论	11
2.1	结构大位移非线性分析的基本假定	11
2.2	空间杆系结构线性有限元法	11
2.2.1	空间杆单元线性刚度矩阵	11
2.2.2	空间梁单元线性刚度矩阵	12
2.2.3	结构总刚度矩阵	13
2.2.4	边界条件及其处理方法	14
2.3	空间杆系结构非线性有限元法	16
2.3.1	非线性分析的基本方程	16
2.3.2	空间杆单元非线性刚度矩阵	16
2.3.3	梁-柱单元非线性刚度矩阵	18
2.3.4	空间直线索单元	20
2.3.5	半解析悬链线索单元	23
2.3.6	索单元的改进	28
2.4	结构大位移非线性分析方法	31
2.4.1	结构非线性平衡方程	31
2.4.2	结构大位移全过程非线性分析的全量等弧长法	31

2.4.3 结构大位移极限承载力的增量迭代计算方法	34
2.4.4 弧长法非线性平衡路径的跟踪技术	35
2.4.5 求解结构非线性屈曲平衡路径上预定荷载水平点的弧长法	37
参考文献	38

3 施工时变钢结构系统的分析方法 40

3.1 施工过程中钢结构系统的演变	40
3.1.1 施工过程中结构构型及体系的变化	40
3.1.2 施工过程中预应力的施加与调整	41
3.1.3 施工过程中结构上荷载或作用的变化	42
3.2 施工过程中时变钢结构的模拟计算方法	42
3.2.1 施工过程中结构单元或构件的吊装验算方法	43
3.2.2 施工过程中刚性结构系统的计算方法	43
3.2.3 施工过程中预应力钢结构的分析方法	44
3.2.4 施工过程中柔性钢结构系统的分析方法	46
3.2.5 施工过程中变边界约束结构的分析方法	49
参考文献	51

4 超高层钢结构施工中的力学问题 52

4.1 超高层建筑的发展趋势	52
4.1.1 现代超高层建筑的发展概况	52
4.1.2 超高层建筑施工建造技术的发展	53
4.2 超高层建筑结构特点	55
4.2.1 不同材料的超高层建筑结构	55
4.2.2 不同结构体系的超高层建筑	56
4.3 超高层建筑钢结构的施工特点	57
4.3.1 超高层建筑结构施工特点	57
4.3.2 超高层建筑结构施工主要技术策略	58
4.3.3 超高层建筑结构施工的主要技术	59
4.4 超高层建筑施工中结构的荷载及其效应	59
4.4.1 恒荷载作用下的结构变形效应	59
4.4.2 风荷载作用下的结构变形效应	60
4.4.3 施工活荷载和施工设备荷载作用下的结构变形效应	61
4.4.4 温度作用下的结构变形效应	61
4.5 超高层钢结构施工计算模型与分析方法	63
4.5.1 超高层钢结构施工过程的力学特点	63
4.5.2 施工过程中计算模型与分析方法	64
4.6 超高层钢结构施工控制	66

参考文献 67

5 刚性大跨度空间钢结构施工计算模型与分析方法 68

5.1 刚性大跨度空间结构施工方法概述 68

5.1.1 高空散装法 68

5.1.2 分条或分块吊装法 70

5.1.3 整体安装施工法 71

5.1.4 高空滑移法 72

5.1.5 攀达穹顶体系的施工方法 74

5.1.6 折叠展开法 74

5.1.7 提升悬挑安装法 76

5.2 刚性大跨度钢结构施工过程计算方法 77

5.2.1 施工过程中结构的分析步骤 77

5.2.2 施工过程中结构的计算模型 77

5.2.3 施工过程中结构的分析方法 78

5.3 刚性大跨度钢结构施工过程中的稳定性 79

5.4 结构体系转换的计算方法 80

5.4.1 结构体系转换过程的控制原则 81

5.4.2 结构体系转换过程的计算模型 81

5.4.3 结构体系转换过程的计算方法 82

参考文献 83

6 高耸钢结构施工中的力学问题 84

6.1 高耸钢结构的施工方法 84

6.1.1 高空散件流水安装法 84

6.1.2 高空分块流水安装法 84

6.1.3 整体起扳法 85

6.1.4 整体提升（顶升）法 86

6.2 构件变形的效应 86

6.2.1 高空散件流水安装法和高空分块流水安装法 86

6.2.2 整体起扳法 87

6.2.3 整体提升（顶升）法 87

6.3 温度效应 88

6.3.1 结构在施工过程中温度效应的类型及特点 88

6.3.2 结构在施工过程中温度效应的分析方法 88

6.3.3 施工过程中温度效应分析的实例 88

6.4 高耸钢结构施工中的分析方法 94

6.4.1 高空散件流水安装法和高空分块流水安装法 94

6.4.2	整体起扳法	95
6.4.3	整体提升(顶升)法	96
6.5	高耸结构施工控制方法	96
6.5.1	结构在恒荷载作用下的变形控制	96
6.5.2	结构在温度效应下的变形控制	96
	参考文献	97
7	预应力结构施工中力学问题	98
7.1	预应力结构施工方法概述	98
7.1.1	预应力网架(壳)结构的施工技术	98
7.1.2	斜拉网架(壳)的施工技术	98
7.1.3	张弦梁结构的施工技术	99
7.1.4	弦支穹顶结构的施工技术	99
7.2	斜拉网架(壳)结构施工张拉分析与控制	100
7.2.1	单索体系结构张拉控制的一般准则	101
7.2.2	单索体系结构张拉模拟分析的简化方法	101
7.2.3	单索体系结构张拉优化的准则	103
7.3	平面张弦梁(桁架)结构施工张拉分析与控制	104
7.3.1	张弦梁(桁架)结构的施工方法	104
7.3.2	张弦梁(桁架)结构施工模拟跟踪的分析方法	105
7.3.3	张弦梁(桁架)结构施工控制方法	106
7.4	弦支穹顶结构的张拉施工与控制	112
7.4.1	弦支穹顶结构的施工方法	114
7.4.2	弦支穹顶结构施工控制分析方法	114
7.4.3	弦支穹顶结构施工控制	116
7.4.4	弦支穹顶结构施工过程中拉索张力的监测方法	117
	参考文献	118
8	张拉结构施工中的力学问题	119
8.1	张拉结构的力学性态	119
8.1.1	张拉结构的零应力状态、初始状态和工作状态	119
8.1.2	不同状态的分析方法	120
8.1.3	张拉结构的形状确定问题	120
8.2	预张力结构成形过程分析	121
8.2.1	概述	121
8.2.2	弹性变形问题的有限元基本公式	121
8.2.3	弹性变形和机构运动混合问题的有限单元基本公式	122
8.2.4	索膜结构成形的计算方法	123

8.3	施工过程模拟计算与控制	130
8.3.1	张拉过程的模拟计算方法	130
8.3.2	张拉过程的主要控制参数和控制原则	133
8.4	预张力的检测	134
8.4.1	概述	134
8.4.2	油压表读数法	135
8.4.3	压应力法	135
8.4.4	弦振法（频率法）	135
8.4.5	波动法	136
8.4.6	磁弹性法（或磁通量法）	137
	参考文献	137
9	计算多体动力学初步及其在施工过程模拟中的应用	139
9.1	多体动力学基本概念	139
9.1.1	多体系统与铰接点	139
9.1.2	多体系统的描述方法	141
9.1.3	多体系统动力学的求解	141
9.2	非独立坐标描述方法及相关约束方程	142
9.2.1	单元的刚体约束方程	143
9.2.2	铰点约束方程	144
9.3	运动分析	146
9.3.1	初始位置问题	146
9.3.2	速度和加速度分析	147
9.3.3	有限位移分析	147
9.3.4	可能运动子空间	148
9.3.5	具有非完整约束的多体系统	152
9.4	多体系统的质量矩阵和外力	154
9.4.1	多体系统的质量矩阵	155
9.4.2	单元外力表达式	159
9.5	运动方程及动力分析	163
9.5.1	非独立坐标的运动方程	163
9.5.2	运动方程的求解方法	164
9.6	典型钢结构施工过程的动力学模拟	168
9.6.1	施工系统的三维实体模型的建立	168
9.6.2	施工系统的空间多体系统模型的建立	170
9.6.3	实际钢结构施工过程的动力学模拟	174
	参考文献	183

1 绪 论

1.1 建筑钢结构的类型和特点

1.1.1 建筑钢结构的类型

现代钢结构按其造型和用途可分为以下几类：

高（多）层及超高层钢结构——房屋类结构；

高耸钢结构——塔架、桅杆类结构；

桥梁钢结构——各种桥梁结构；

空间钢结构——各种屋盖、公共建筑、城市雕塑、工业建筑结构；

特种钢结构——各种适用于特殊用途的结构，如管线、工作平台、容器等。

1.1.2 钢结构的特点

1.1.2.1 优点

钢材强度高、重量轻；

材质均匀，可靠性高；

材料塑性韧性好，抗震性能好；

施工机械化程度高，施工周期短；

密闭性能好（管道、容器、油库等）；

耐热性较好；

钢材为可持续发展的环保型材料。

1.1.2.2 缺点

耐腐蚀性能差，易锈蚀；

耐热不耐火；

低温条件下钢材韧性降低，钢结构容易脆性断裂；

钢材单价相对（混凝土）较贵。

另外，由于钢构件壁厚较薄，且钢结构中有大量螺栓和焊接作业，钢结构对制作安装的工艺技术要求也较高，构件的受力性态受施工过程和施工误差的影响也较大。

1.2 钢结构的应用发展趋势

1.2.1 我国钢结构的应用发展

伴随着钢铁工业的发展，我国钢结构的发展应用也经历了一个漫长曲折的发展过程，

自新中国成立到现在大致可以分为三个阶段。新中国成立之初,由于受到钢产量的限制,钢结构仅在重型厂房、大跨度公共建筑以及塔桅等结构中应用,其中包括冶金工业厂房、电力工业厂房、体育馆、飞机库屋盖、铁路桥梁、钻井塔、排气塔、照明塔、输电塔、瞭望塔、跳伞塔、导航塔、化工塔、钻井塔、火箭发射塔、通信(塔)桅杆、龙门吊、装卸桥、压力容器、锅炉等;1978年改革开放以后,随着经济建设的飞速发展,钢结构的应用领域也有了较大的扩展,除已有的领域外,普通大跨度厂房、高层和超高层建筑、轻钢建筑、体育场馆、大型会展中心、机场候机楼、大型客机检修库、城市人行天桥、海洋平台、管线、自动化高架仓库等均采用钢结构;1996年以后,我国钢产量一直居世界第一,年产量超过1亿t,到2006年已达4.2亿t,钢材质量提高,钢材规格增加,极大地满足了钢结构应用的需要。1997年建设部颁发的《中国建筑技术政策》(1996~2010年)明确提出了发展钢结构的要求,繁荣的市场和国家的政策均为钢结构的发展创造了条件,促使我国钢结构迅速发展,因此,现代的体育(场)馆、影剧院、会展馆、航站楼、候车大厅、高层超高层建筑、多层大空间建筑(如商场、停车场)、厂房、仓库、加油站、收费站、公路桥梁、铁路桥梁、管线桥、人行桥、栈桥、输送桥、电视塔、观光塔、风力发电塔、高灯杆、城市雕塑、景观雕塑、建筑装饰、楼顶(外)造型、雨篷等大量采用钢结构。

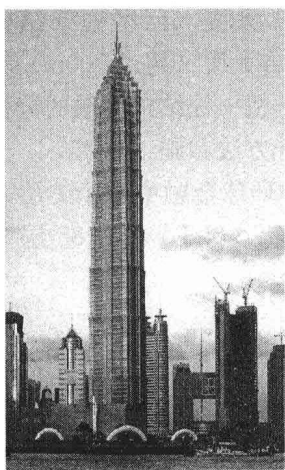
随着科学技术的飞速发展及人们对物质和文化生活要求的不断提高,人们对生活环境的要求也越来越高,对生活中的各类建筑也提出了更新、更高的要求。现代钢结构由于优异的钢材性能,高度工业化的加工制作工艺以及先进的安装设备及施工技术,钢结构体系越来越新颖、复杂、多样,在各类工程中得到广泛应用。新的结构形式、新的设计计算理论以及新的制作安装工艺层出不穷,特别是计算机技术和计算理论的飞速发展,为钢结构的发展提供了理论基础和技术保障。同时,市场经济的飞速发展和不断成熟也为钢结构的应用发展创造了条件。因此,我国的钢结构将进入一个飞速发展的时代。

1.2.2 现代钢结构的体系和规模

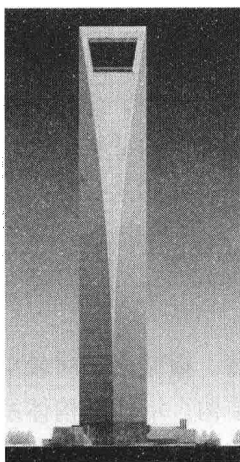
现代钢结构的特点是“高、大、复”,已建成的高层建筑已达500m以上(台北101大厦508m),在建的高层建筑将超过700m(迪拜布吉大楼超过700m,具体高度目前尚未公布),高耸结构将超过600m(广州新电视塔610m),大跨度空间结构覆盖的范围已达200m以上(上海南站直径276m,英国伦敦千年穹顶直径320m)。随着建筑造型的新奇和复杂化,相应的结构体系也越来越复杂多样,刚性与柔性构件组合的钢结构、空间预应力钢结构、悬挂与斜拉钢结构、多种结构体系组合形成的复杂钢结构已广泛应用于现代建筑之中。

1.2.2.1 高层及超高层钢结构

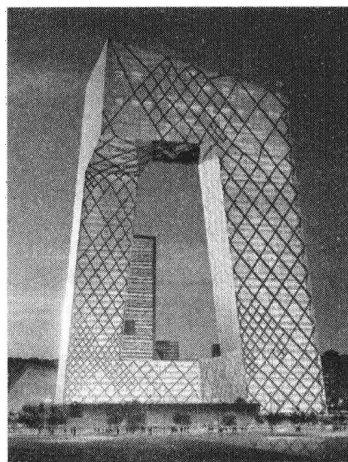
随着材料技术和计算技术的进步,高层及超高层结构体系有了较大的发展,从传统的框架结构体系、框架支撑体系(框架—抗剪桁架、框架—剪力墙、框架—核心筒等),已发展到框筒结构体系(内框筒、外框筒、筒中筒、束筒等)、巨型结构体系(巨型桁架、巨型框架等)以及蒙皮结构体系等。美国芝加哥的西尔斯大厦(束筒体系,110层,高443m)、香港中国银行大楼(巨型框架体系,70层,高315m)、上海金茂大厦(巨型外



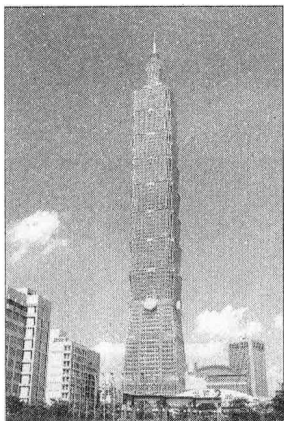
(a)



(b)



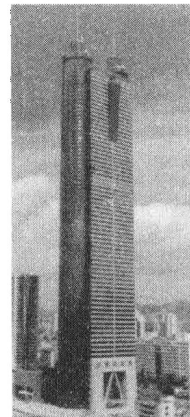
(c)



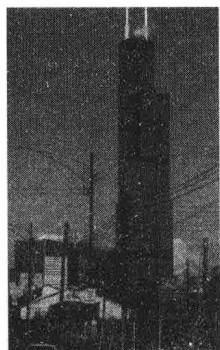
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

图 1-1 高层建筑实例

(a) 金茂大厦；(b) 环球金融中心；(c) 中央电视台；
(d) 台北 101 大厦；(e) 高雄东帝士国际广场；(f) 深圳地王大厦；
(g) 西尔斯大厦；(h) 迪拜布吉大厦

伸桁架、巨型柱、核心筒体系, 88 层, 高 365m)、台北 101 大厦 (巨型框架结构, 高 508m, 用钢 9.67 万 t, 钢筋 2.45 万 t) 和即将建成的迪拜布吉大厦 (超过 700m) 等都是当今世界高层建筑的代表。新结构体系的出现, 使传统的梁—板—柱结构体系的分析方法和制作安装技术已经不再适应, 需要研究新的分析方法、设计方法和施工技术。

国内外已建及在建的部分超高层建筑如图 1-1 所示, 其中环球金融中心 101 层 492m, 中央电视台 234m (用钢 12.2 万 t), 高雄东帝士国际广场 (T&C Tower) 85 层 378m, 深圳地王大厦 383.95m (用钢 24.5 万 t)。

1.2.2.2 高耸钢结构

高耸钢结构属于结构高度相对较高、横截面相对较小、横向荷载起控制作用的细长构筑物, 其主要应用范围为塔架和桅杆结构。塔桅结构体系发展变化较小, 但塔桅的形态发展变化较大, 造型越来越新奇复杂, 结构高度也越来越高。波兰华沙的长波无线电桅杆的高度达 642. m, 我国广州新电视塔主体高度 454m, 桅杆高度 156m, 总高 610m, 钢结构总量 5 万 t。随着结构高度的增加, 高耸钢结构的风致振动及其控制技术已成为目前广泛关注的焦点问题。

国内外已建及在建的部分高耸结构如图 1-2 所示, 其中河南电视塔 338m。黑龙江电视塔 336m, 广东崖门输电塔 211.5m (重 1600t)。

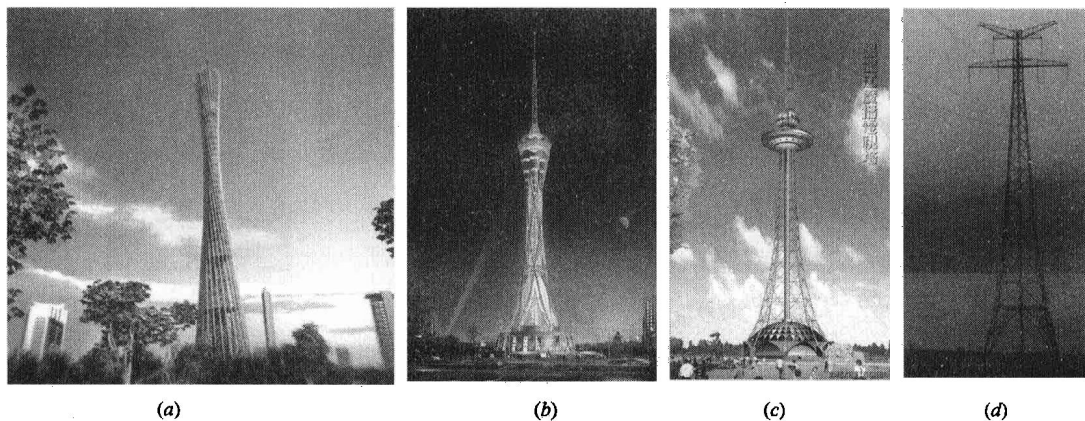


图 1-2 高耸结构实例

(a) 广州新电视塔; (b) 河南电视塔; (c) 黑龙江电视塔; (d) 崖门输电塔

1.2.2.3 大跨度及空间钢结构

随着体育事业、会展业的发展和人类大型集体活动的日益增多, 同样由于材料技术、计算技术及施工技术的进步, 近年来大跨度空间结构体系得到迅速发展, 结构形式由传统的梁肋体系、拱结构体系、桁架体系等平面结构体系及薄壳空间结构体系, 发展到现代的网架、网壳、悬索、悬挂 (斜拉)、索膜结构、各种杂交结构、可开合结构、可伸展结构、可折叠结构以及张拉集成结构等体系。同时空间钢结构的无柱覆盖空间也在不断增大。如瑞士苏黎世机场机库 (125m×128m 网架)、美国新奥尔良的超级穹顶体育馆 (213m 直径联邦型双层球面网壳)、前苏联列宁格勒体育馆 (160m 悬索结构)、美国亚特兰大奥运会主体育场 (240m×193m 张拉集成结构)、美国旧金山体育馆 (235m 索穹顶)、美国庞蒂

亚克银色穹顶 (235m×183m 充气膜)、日本东京都室内棒球场 (201m×201m 索-充气膜)、日本福岡穹顶 (220m 直径可开合网壳)、英国伦敦千年穹顶 (320m)、我国国家大剧院 (212m×146m×45m)、上海南站 (直径 276m 的预应力钢屋盖)、南通体育中心可开合屋盖 (直径 280m)、国家体育中心 (330m×220m×69.2m) 等都是当今世界大跨度空间结构的经典之作。

现代大跨度空间结构体系可分为三大类^[1-3], 即刚性结构体系 (折板、薄壳、网架、网壳、空间桁架等)、柔性结构体系 (索结构、膜结构、索膜结构、张拉集成体系等) 和杂交结构体系 (拉索-网架、拉索-网壳、拱-索、索-桁架等)。国内外已建的部分大跨度空间结构如图 1-3 所示。

现代大型城市雕塑造型新异复杂且规模庞大, 常采用钢结构实现其艺术构想。这种钢

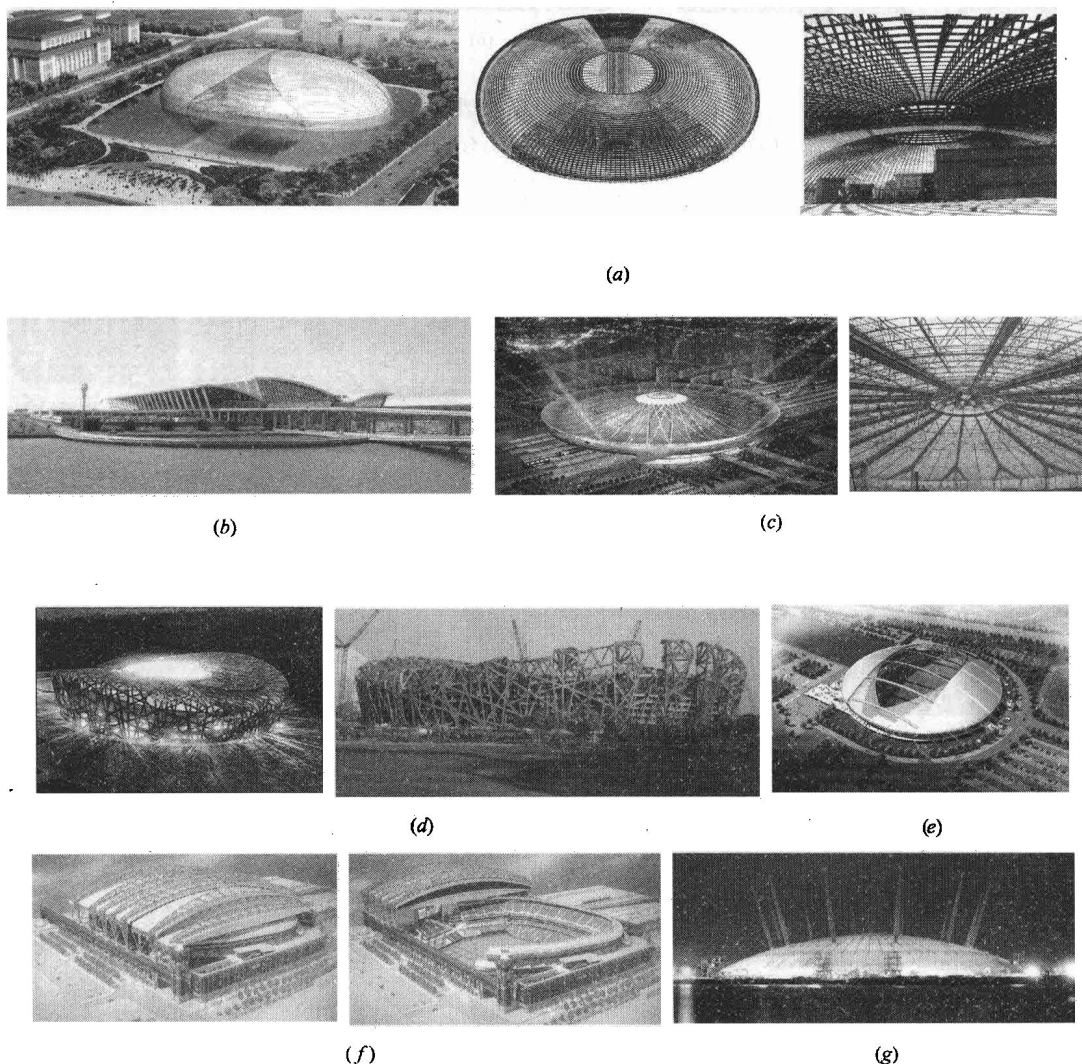


图 1-3 大跨度空间结构建筑实例

(a) 中国国家大剧院; (b) 浦东国际机场航站楼; (c) 上海南站; (d) 国家体育中心;
(e) 南通体育中心; (f) 美国西雅图棒球场; (g) 英国伦敦千年穹顶