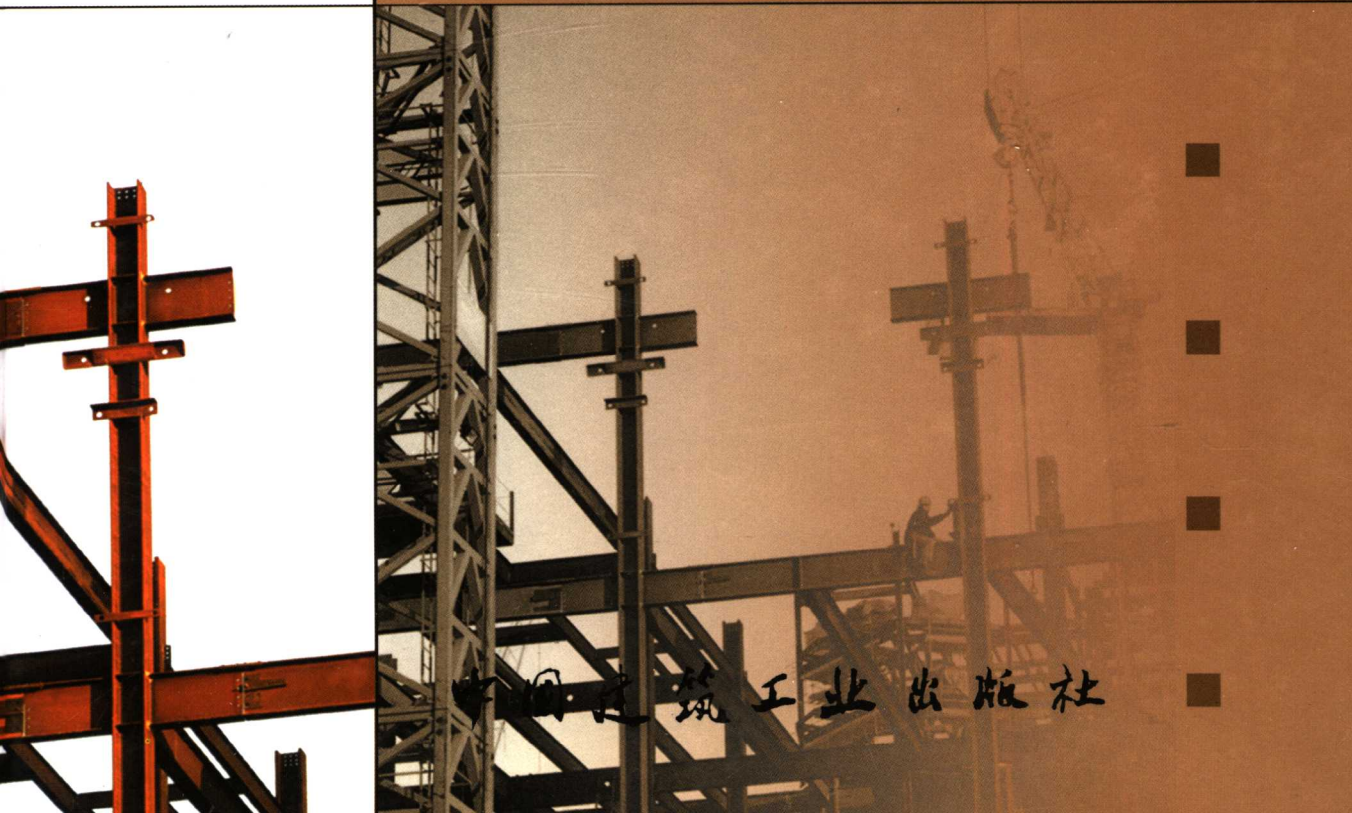


1

沈祖炎 等著

THEORY OF STEEL STRUCTURES

钢 结 构 学



中国建筑工业出版社

钢 结 构 学

沈祖炎 李国强 陈以一 著
张其林 罗永峰

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

钢结构学/沈祖炎等著. —北京: 中国建筑业出版社, 2004
ISBN 7-112-07020-1

I. 钢… II. 沈… III. 钢结构 IV. TU391

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 121423 号

本书内容是为适应我国建筑钢结构自 20 世纪 80 年代以来出现的新的结构体系、建筑结构分析方法向全过程发展的趋势以及有效提高建筑结构抗灾害荷载的能力而选择的。首先从我国建筑钢结构的结构体系、分析方法和结构抗灾新技术的发展入手, 根据作者多年的研究成果, 介绍了钢结构的一般分析理论, 主要包括钢结构构件极限承载力分析理论、钢框架结构非线性分析理论的统一矩阵方法等。随后针对各种钢结构中经常出现的一些重要理论问题分别进行了阐述, 涉及到高层及超高层钢结构、刚性大跨度钢结构、柔性大跨度钢结构、重型厂房钢结构、轻型钢结构、桅杆结构、钢板结构等诸多方面, 不少内容反映了作者 50 年来的研究成果。

本书可供结构工程专业的本科生、研究生阅读, 对从事各类钢结构工程设计的工程技术人员及从事建筑钢结构方面的教学、科研人员也具有很好的指导和参考作用。

责任编辑: 黎 钟

责任设计: 刘向阳

责任校对: 王雪竹 张 虹

钢结构学

沈祖炎 李国强 陈以一 著
张其林 罗永峰

中国建筑业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 27 1/4 字数: 690 千字

2005 年 4 月第一版 2005 年 4 月第一次印刷

印数: 1—3 000 册 定价: 50.00 元

ISBN 7-112-07020-1
TU·6256(12974)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

中国建筑业出版社约我写一本《钢结构学》，要求有别于已出版的有关钢结构的书籍。我早有意出这样一本书，欣然同意，以了此夙愿。

我 1955 年毕业于同济大学工业与民用建筑结构专业，在学期间先后聆听了王达时先生讲授的钢结构和李国豪先生讲授的钢桥设计，激起了对钢结构的浓厚兴趣，并开始钢结构方面的研究和教学工作，至今已有 50 年。50 年代末，我参加了我国钢结构设计规范和弯曲薄壁型钢结构技术规范的起草工作，从此开始了对钢结构构件稳定极限承载力、薄壁构件局部稳定和局部-整体相关稳定、重型厂房钢结构和冷弯薄壁型钢屋架的理论和试验研究工作。70 年代末，我去美国里海大学符立兹研究所(Fritz Lab, Lehigh University)作高级访问学者两年。符立兹研究所向以钢结构稳定和高层钢结构分析研究闻名于世。在符立兹研究所的两年，使我的研究工作得以适应国际步伐，溶入世界研究热点并大大拓宽了研究领域。回国后即对钢结构的几何非线性和材料非线性的分析理论、高层钢结构和大跨度钢结构的设计理论开展了系统的研究，并于 1992 年主编了我国第一本高层钢结构设计标准：上海市标准《高层建筑钢结构设计暂行规定》(DBJ 08—32—92)。80 年代末，我国各地开始兴建各种大跨度空间钢结构。我和我的课题组先后承担了上海八万人体育场、上海浦东国际机场、广州新体育馆、南京奥林匹克中心体育场、广州国际会展中心、哈尔滨会展中心、成都双流机场、上海火车南站等数十项大型工程的结构非线性分析、结构稳定、结构承载力以及节点设计方法等理论和试验研究科研任务。近年来，随着轻型钢结构的发展，对张拉集成结构、大跨度轻型门式刚架以及索膜结构等开展了一些研究工作。

鉴于我和我的课题组的这些背景，决定结合我们的科研情况编写这本《钢结构学》，反映我们的部分研究成果。

本书共分十章。第一章绪论，概要介绍我国建筑钢结构的发展概况、建筑钢结构体系、分析方法和结构抗灾新技术的发展以及编写本书的宗旨。第二章钢结构构件极限承载力分析理论，对按组成截面的板件宽厚比不同划分的四类截面，即特厚实截面、厚实截面、非厚实截面和薄柔截面的构件极限承载力的计算方法分别进行了论述。第三章钢框架结构非线性分析理论，阐述钢框架结构非线性分析的统一矩阵方法，可以用于静力和动力分析，包括弹塑性抗震分析。以上两章内容均为作者的研究成果。第四章到第十章是根据作者数十年来结合工程进行科研的体会，讨论各种不同类型结构设计中的某些理论问题。第四章讨论高层及超高层钢结构设计中的若干理论问题，主要有实用计算方法、抗震弹塑性时程分析法、风致振动、抗火非线性分析、厚板的层状撕裂、厚板柱的稳定系数、梁柱节点设计及防止地震脆性断裂破坏等。第五章讨论网架和网壳设计中的若干理论问题，主要有网架结构的分析原理及其极限承载力、网壳结构的静力非线性稳定、网壳结构的动力稳定等。第六章讨论柔性大跨度钢结构设计中的若干理论问题，主要有索杆体系、索梁体系、索网和膜结构的形状确定、膜结构裁剪和柔性大跨度结构的成形分析等。第七章讨论

重型厂房钢结构设计中的若干理论问题，主要有三阶柱的计算长度、格构阶形柱上下柱连接的刚度和强度要求、钢管桁架的节点和重型厂房中的疲劳断裂问题。第八章讨论轻型钢结构设计中的若干理论问题，主要有变截面门式刚架的非线性分析和整体稳定、等截面门式刚架的塑性设计、等截面多层刚架的塑性设计、楔形构件的强度和稳定以及应力蒙皮效应的计算理论等。第九章讨论桅杆结构设计中的若干理论问题，主要有桅杆结构的非线性分析及整体稳定、桅杆的动力稳定和风振响应等。第十章讨论钢板结构设计中的若干理论问题，主要有钢板结构的分析原理、球形钢板结构和筒形钢板结构的非线性稳定等。在第二章到第十章中不少内容反映了作者们的研究成果。

我们如此安排和选择内容，主要希望将本书写成名副其实的钢结构而不是钢构件，以区别于现有的有关钢结构书籍。

本书编写由我总负责，包括章节大纲的确定、各章节内容的取舍等。具体分工为：第一、第二及第三章由我撰写，第四章由李国强教授撰写，第五、第十章由罗永峰教授撰写，第六、第九章由张其林教授撰写，第七、第八章由陈以一教授撰写。全书由我负责修改和统稿。前后四改其稿，历时三年有余，终于完成此书。

由于本书的编排是一种尝试，不当之处在所难免，望读者不吝指正。

沈祖炎
2004年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 新中国建筑钢结构的发展概况	1
§ 1.2 当代建筑钢结构体系的变革	2
§ 1.3 建筑结构分析方法的发展趋势	2
§ 1.4 建筑结构抗灾新技术的发展	3
§ 1.5 本书编写的宗旨	4
参考文献	4
第 2 章 钢结构构件极限承载力分析理论	5
§ 2.1 概述	5
2.1.1 钢结构构件在外力作用下的工作性能	5
2.1.2 钢结构构件极限承载力的分类	5
§ 2.2 构件截面按力学性能的分类	6
2.2.1 构件截面按力学性能分类的原因	6
2.2.2 构件截面的分类	6
§ 2.3 特厚实截面构件塑性设计时应考虑的问题	7
§ 2.4 薄壁构件几何非线性分析理论	9
2.4.1 极限承载力分析时需要考虑的各种因素	9
2.4.2 薄壁构件几何非线性方程的统一表达式	9
2.4.3 构件几何非线性方程的数值积分解法	12
2.4.4 构件几何非线性问题的有限单元法	15
§ 2.5 薄壁构件极限承载力的数值积分分析法	20
2.5.1 薄壁构件截面弹塑性阶段的内力和变形协调关系	20
2.5.2 华格纳效应的数值积分表达	26
2.5.3 位移递推式	27
2.5.4 薄壁弯扭构件极限承载力的计算步骤	34
2.5.5 发散的判别条件	34
2.5.6 初值边界条件关联计算	35
§ 2.6 薄壁构件极限承载力的有限元分析法	37
2.6.1 单元弹塑性切线刚度矩阵	37
2.6.2 薄壁构件极限承载力的计算	45
§ 2.7 薄柔截面构件承载力的计算	48
2.7.1 薄柔截面构件的设计方法	48
2.7.2 薄柔截面构件考虑板件屈曲后强度的分析	48

2.7.3 薄柔截面构件采用有效截面简化假定的分析方法	49
参考文献	53
第3章 钢框架结构非线性分析理论	55
§ 3.1 概述	55
§ 3.2 扩大梁单元的弹塑性增量刚度方程	56
3.2.1 梁单元的弹性刚度方程	56
3.2.2 梁单元的弹塑性增量刚度方程	57
3.2.3 连带半刚性连接的梁单元增量刚度方程	59
3.2.4 扩大梁单元的增量刚度方程	62
§ 3.3 扩大柱单元的弹塑性增量刚度方程	66
3.3.1 柱单元的弹性刚度方程	66
3.3.2 柱单元的弹塑性增量刚度方程	68
3.3.3 扩大柱单元的增量刚度方程	69
§ 3.4 梁柱截面、半刚性连接及节点域的滞回模型	70
3.4.1 钢材的滞回模型	70
3.4.2 梁、柱截面的滞回模型	72
3.4.3 半刚性连接的滞回模型	75
3.4.4 节点域的滞回模型	76
§ 3.5 钢框架结构非线性分析的统一矩阵方法	77
3.5.1 局部坐标转化为整体坐标	77
3.5.2 钢框架结构的静力非线性增量刚度方程	79
3.5.3 钢框架结构的动力非线性增量刚度方程	80
参考文献	80
第4章 高层及超高层钢结构设计中的若干理论问题	82
§ 4.1 概述	82
4.1.1 发展历史	82
4.1.2 发展现状	84
§ 4.2 结构体系	84
4.2.1 框架体系	84
4.2.2 支撑-框架结构体系	85
4.2.3 筒体体系	86
4.2.4 巨型结构体系	86
§ 4.3 结构分析原理	87
4.3.1 基本分析方法	87
4.3.2 楼面无限刚性假定	88
4.3.3 平面子结构模型	89
4.3.4 $P-\Delta$ 效应	91
§ 4.4 厚钢板的层状撕裂	93
4.4.1 概述	93

4.4.2 层状撕裂的发生	93
4.4.3 层状撕裂的防止	94
4.4.4 钢材的 Z 向性能	97
4.4.5 层状撕裂的检测与补救措施	98
4.4.6 结语	98
§ 4.5 厚板柱的稳定系数	98
4.5.1 残余应力对柱稳定系数的影响	98
4.5.2 厚板柱残余应力的理论分析	100
4.5.3 厚板柱残余应力的实测	104
4.5.4 厚板柱稳定系数的计算	107
4.5.5 各国厚板柱稳定系数的对比	108
§ 4.6 抗震分析中的弹塑性时程分析	109
4.6.1 结构的弹塑性运动微分方程	109
4.6.2 结构的弹塑性地震反应时程分析	110
4.6.3 结构刚度矩阵的确定	110
4.6.4 结构弹塑性地震反应分析模型	111
§ 4.7 抗风分析中的风致振动	113
4.7.1 顺风向风脉动与风振系数	113
4.7.2 横风向风振	116
4.7.3 风振舒适度验算	120
§ 4.8 抗火分析中的非线性分析	121
4.8.1 火灾下钢结构分析的特点	121
4.8.2 高温下钢材的性质	122
4.8.3 高温下钢杆件的单元刚度矩阵	123
4.8.4 钢框架非线性反应分析	128
§ 4.9 梁柱节点设计	128
4.9.1 梁柱连接的类型	128
4.9.2 梁柱连接的性能	130
4.9.3 梁柱连接的设计要求	133
§ 4.10 梁柱节点在地震中的脆性断裂破坏及防止措施	137
4.10.1 梁柱节点在地震中的脆性断裂破坏形式与原因	137
4.10.2 梁柱节点防止地震脆性断裂破坏的措施	141
§ 4.11 振动控制	144
4.11.1 耗能减震技术	145
4.11.2 吸振制振技术	150
参考文献	153
第 5 章 刚性大跨空间钢结构设计中的若干理论问题	159
§ 5.1 概述	159
§ 5.2 空间网架结构的类型	163

5.2.1	平面桁架体系	163
5.2.2	四角锥体系	164
5.2.3	三角锥体系网架	166
5.2.4	三层网架	167
§ 5.3	网架结构的分析原理	167
5.3.1	网架结构计算的基本假定	167
5.3.2	网架结构的分析方法	167
5.3.3	空间杆系有限元法	168
§ 5.4	网架结构的极限承载力	172
5.4.1	概述	172
5.4.2	网架杆件受力全过程曲线	173
5.4.3	杆单元的非线性大位移单元刚度矩阵	175
5.4.4	网架结构极限承载力的非线性分析	176
§ 5.5	螺栓球节点的计算方法	180
5.5.1	概述	180
5.5.2	螺栓球节点的构造及受力特点	180
5.5.3	螺栓球节点的设计计算	180
§ 5.6	空间网壳结构的类型及其分析原理	185
5.6.1	网壳结构的类型	185
5.6.2	网壳结构的分析原理	187
5.6.3	网壳结构稳定性的特点	188
§ 5.7	网壳结构的静力非线性稳定	190
5.7.1	网壳结构失稳的类型及机理	190
5.7.2	网壳结构非线性稳定分析方法概述	190
5.7.3	非线性分析基本方程	190
5.7.4	非线性空间杆元	191
5.7.5	非线性梁-柱单元	192
5.7.6	网壳结构非线性稳定平衡路径跟踪	198
§ 5.8	网壳结构的动力稳定	201
5.8.1	网壳结构非线性动力增量平衡方程	202
5.8.2	结构非线性动力稳定平衡路径跟踪的迭代算法	202
5.8.3	网壳结构动力稳定判别准则	203
5.8.4	网壳结构在地震作用下的动力稳定性	205
§ 5.9	空心球节点的计算方法	206
5.9.1	空心球节点的构造特点	206
5.9.2	空心球节点的设计	207
5.9.3	钢管与空心球节点的连接	209
§ 5.10	其他形式的网格结构及其分析方法简介	209
5.10.1	常用混合形式网架的类型	209

5.10.2 组合网架结构的计算方法	210
5.10.3 预应力网架(壳)和斜拉网架(壳)的分析方法	210
参考文献	210
第6章 柔性大跨度钢结构设计中的若干理论问题	212
§ 6.1 概述	212
§ 6.2 柔性大跨度结构的设计特点	214
6.2.1 柔性大跨度结构的零状态、初始状态和工作状态	214
6.2.2 不同状态的分析方法	215
§ 6.3 索杆体系的形状确定问题	215
6.3.1 索杆体系的几何组成分析及其判定	216
6.3.2 形状确定的最小预拉力方差法	218
§ 6.4 索梁体系的形状确定问题	220
§ 6.5 柔性大跨度索网的形状确定问题	221
6.5.1 形状确定的等效有限元解法	221
6.5.2 给定索段放样长度下的形状确定	222
6.5.3 给定索段预张力下的形状确定	225
§ 6.6 膜结构的形状确定问题	227
6.6.1 动力松弛法	227
6.6.2 应力密度法	230
6.6.3 有限单元法	231
§ 6.7 膜结构裁剪的等效有限单元法	236
§ 6.8 柔性大跨度结构的成形过程分析	237
6.8.1 概述	237
6.8.2 弹性变形问题的有限单元基本公式	238
6.8.3 弹性变形和机构运动混合问题的有限单元基本公式	238
6.8.4 数值算例	240
参考文献	243
第7章 重型厂房钢结构设计中的若干理论问题	245
§ 7.1 概述	245
§ 7.2 重型厂房钢结构的体系及其分析原理	251
7.2.1 重型厂房结构体系布置要点	251
7.2.2 结构计算模型	253
7.2.3 荷载	257
§ 7.3 重型厂房三阶柱的计算长度	258
§ 7.4 上下柱连接的分析理论	260
7.4.1 上下柱连接构造	260
7.4.2 下柱为实腹式阶梯柱的上下柱连接分析	261
7.4.3 下柱为格构式阶梯柱的上下柱连接分析	262
7.4.4 对肩梁的刚度要求	264

§ 7.5 重型桁架节点板的应力分析	264
7.5.1 重型桁架节点板连接的一般原则和主要分析内容	264
7.5.2 节点板的应力分析	266
7.5.3 节点板的稳定性	267
§ 7.6 钢管桁架的节点计算	268
7.6.1 钢管桁架及节点构造	268
7.6.2 钢管相贯节点的强度	272
7.6.3 钢管相贯节点的刚度	278
§ 7.7 重型厂房中的疲劳、断裂问题	278
7.7.1 疲劳、断裂破坏现象	278
7.7.2 关于疲劳的试验研究成果	279
7.7.3 疲劳破坏机理和理论解释	281
7.7.4 提高吊车梁等钢结构构件抗疲劳能力的措施	283
参考文献	284
第 8 章 轻钢结构设计中的若干理论问题	287
§ 8.1 概述	287
§ 8.2 变截面门式刚架的非线性分析和整体稳定	288
8.2.1 轻钢结构变截面门式刚架的设计概念	288
8.2.2 楔形梁柱刚架结构分析的若干问题	289
8.2.3 刚架整体稳定	291
§ 8.3 等截面门式刚架的塑性设计	293
8.3.1 等截面梁柱截面的塑性展开和极限承载强度	293
8.3.2 塑性设计的概念与条件	296
8.3.3 单层刚架的塑性设计	297
§ 8.4 等截面多层刚架的塑性设计	298
8.4.1 多层刚架的机构模式	298
8.4.2 塑性设计中的节点问题	300
§ 8.5 变截面楔形构件的设计理论	302
8.5.1 应力分析	302
8.5.2 整体稳定	303
8.5.3 板件屈曲后强度的利用	306
§ 8.6 用于檩条和墙梁的冷弯薄壁型钢构件的设计	307
8.6.1 檩条	307
8.6.2 墙梁	308
§ 8.7 应力蒙皮效应的计算理论	309
8.7.1 应力蒙皮的基本概念	309
8.7.2 应力蒙皮的抗剪强度	310
8.7.3 应力蒙皮的刚度及其在结构整体分析中的应用	311
8.7.4 应力蒙皮对构件稳定的支承作用	313

参考文献	314
第 9 章 桅杆结构设计中的若干理论问题	316
§ 9.1 概述	316
§ 9.2 桅杆结构的单元刚度矩阵和非线性平衡方程	317
9.2.1 桅杆结构非线性平衡方程	317
9.2.2 桅杆杆身构件的单元刚度矩阵	317
9.2.3 桅杆纤绳的单元非线性方程及其对结构的作用力	318
9.2.4 桅杆杆身单元和纤绳单元的质量矩阵	318
§ 9.3 桅杆的稳定分析和影响桅杆稳定的因素	320
9.3.1 桅杆平衡路径的迭代求解	320
9.3.2 桅杆失稳前后的平衡路径	321
9.3.3 桅杆稳定性能的影响因素	322
§ 9.4 桅杆的动力性能和动力稳定	323
9.4.1 地面运动激励下桅杆的动力性能	323
9.4.2 桅杆的动力稳定定义及判断	324
§ 9.5 桅杆结构的随机风振动力响应	326
9.5.1 桅杆结构随机风振响应基本理论	326
9.5.2 桅杆结构风荷载值的确定	327
参考文献	330
第 10 章 钢板结构设计中的若干理论问题	331
§ 10.1 概述	331
10.1.1 板与壳的特征	331
10.1.2 板壳理论的发展简史	331
10.1.3 板壳结构的研究进展与趋势	333
§ 10.2 钢板结构的型式及其分析原理	334
10.2.1 钢板结构的型式	334
10.2.2 平板钢板结构的分析原理	335
10.2.3 曲板钢板结构的分析原理	340
§ 10.3 波纹钢板结构和折板钢板结构	356
10.3.1 波纹钢板结构	356
10.3.2 折板钢板结构	356
§ 10.4 球形钢板结构的分析理论	362
10.4.1 旋转壳的薄膜理论(无矩理论)	362
10.4.2 一般荷载作用下旋转薄壳的有矩理论	368
§ 10.5 球形钢板结构的非线性稳定	374
10.5.1 旋转薄壳稳定的基本方程	374
10.5.2 球壳的线性稳定	378
10.5.3 旋转薄壳非线性稳定的有限元解法	383
10.5.4 球壳屈曲理论数值比较及事例分析	397

§ 10.6 筒形钢板结构的线性分析理论	404
10.6.1 薄壁筒壳的薄膜特性	404
10.6.2 薄壁筒壳的有矩理论	408
§ 10.7 筒形钢板结构的稳定	413
10.7.1 筒形壳屈曲的基本理论	413
10.7.2 筒形钢板结构的非线性稳定	429
参考文献	432

第 1 章 绪 论

§ 1.1 新中国建筑钢结构的发展概况^[1.1,1.2]

20 世纪以来,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,对各类建筑提出了更新、更高的要求。建筑钢结构由于钢材的优异性能,制作安装的高度工业化以及结构体形的新颖和灵巧,已越来越广泛地得到应用。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工程力学理论的飞速发展,更为建筑钢结构的发展提供了前提和保证。

我国建筑钢结构走过的道路是曲折的。1949 年新中国成立以后,随着经济建设的发展,建筑钢结构得到一定程度的发展。由于受到钢产量的限制,建筑钢结构仅在重型厂房、大跨度公共建筑以及塔桅结构中采用。几个大型钢铁联合企业如鞍山、武汉、包头等钢厂的炼钢、轧钢、连铸车间等都采用钢结构。在公共建筑中以平板型网架用得较多,1975 年建成的上海体育馆采用三向平板型网架,跨度已达 110m。悬索结构也有应用,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,直径为 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。在塔桅结构方面,广州、上海等地都建造了高度超过 200m 的多边形空间桁架钢电视塔,1977 年北京建成的环境气象塔为一高达 325m 的 5 层纤绳三角形杆身的钢桅杆结构。

1978 年以后,我国实行改革开放政策,经济建设有了突飞猛进的发展,我国建筑钢结构也有了前所未有的发展,应用领域有了较大的扩展。高层和超高层房屋、多层房屋、单层轻型房屋、体育场馆、大跨度会展中心、机场候机楼、大型客机检修库、自动化高架仓库等都有采用钢结构的。目前已建和在建的高层和超高层建筑钢结构已有 30 余幢,其中地上 88 层、地下 3 层、高 365m 的上海金茂大厦的建成,标志着我国的超高层钢结构已进入世界前列。在大跨度建筑和单层工业厂房中,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形环形大悬挑空间钢结构屋盖,最大悬挑长度为 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。这些建筑都是当时同类建筑中跨度最大的。这些建筑的建成,说明我国的大跨度空间钢结构已迅速接近国际先进水平。

1996 年我国钢产量已是世界第一,年产量超过 1 亿吨。钢材质量及钢材规格也己能满足建筑钢结构的要求;1997 年由建设部颁发的《中国建筑技术政策》(1996~2010 年)也明确提出了发展钢结构的要求;市场经济的发展和不断成熟更为钢结构的发展创造了条件。因此,我国钢结构正处于迅速发展的前期。可以预期,我国建筑钢结构将进入到一个

飞速发展的时代。

§ 1.2 当代建筑钢结构体系的变革

大跨度空间结构体系是结构方面近 50 年来最活跃的研究领域,其结构形式经历了由传统的梁肋体系、拱结构体系、桁架体系、薄壳空间结构体系,到现代的网架、网壳、悬索、悬挂(斜拉)、充气结构、索膜结构、各种杂交结构、可伸展结构、可折叠结构以及张拉集成结构等。瑞士苏黎世某机场机库(125m×128m 网架)、美国新奥尔良的超级穹顶体育馆(213m 直径联方型双层球面网壳)、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)、日本福冈穹顶(220m 直径可开合网壳)等都是当今世界大跨结构的杰出代表作。已有的大跨度空间结构体系基本上可分为三大分支^[1,3],即刚性体系(折板、薄壳、网架、网壳、空间桁架等)、柔性体系(索结构、膜结构、索膜结构、张拉集成体系等)和杂交体系(拉索-网架、拉索-网壳、拱-索、索-桁架等)。由于大跨度结构的“柔”性化,使得结构表现出很强的非线性特征,甚至不同应力状态结构会有不同的几何位置,因而每一种新结构体系的出现,都可能引出全新的问题需要解决。

高层及超高层结构体系的发展虽不如大跨度空间结构体系的发展那么活跃,但也出现了不少新的体系,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)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塔楼(束筒体系,110 层,高 443m)、中国香港中国银行大楼(巨型框架体系,70 层,高 315m)、中国上海金茂大厦(巨型外伸桁架、巨型柱、核心筒体系,88 层,高 365m)等都是当今世界高层建筑的最近代表。这些新体系的出现,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能适应,需要寻求新的分析方法和技术。

塔桅结构体系可能是最少变化的,但高度却越来越高,波兰华沙的长波无线电桅杆的高度已达 642.5m。随着高度的增加,桅杆结构的风致振动和风振控制技术已成为目前广泛关注的问题,需要解决。

单层厂房结构体系也发生了一系列的变化。钢管结构在厂房中的应用,在管结构节点的承载力、刚度、疲劳强度和制作技术等方面,产生了新的问题需要解决。在轻型厂房中变截面门式刚架广泛应用后关于横梁和柱的局部稳定和屈曲后强度、刚架的整体稳定以及屋面、墙面蒙皮效应的利用等问题都需要解决。

§ 1.3 建筑结构分析方法的发展趋势

随着结构学科的进步和计算机技术的发展,建筑结构在外界荷载作用下的全过程反应已越来越受到关注。对于强度破坏,需要了解结构在从弹性进入弹塑性,出现塑性内力重

分配直到形成机构丧失承载能力这一整个过程中的内力、应力和变形的变化情况,以及结构在丧失承载能力后的性态等等。对于失稳破坏,需要了解结构在弹性失稳、弹塑性失稳过程中力与变形的变化情况,结构在失稳后的性态以及结构中各种初始缺陷对稳定承载力和结构性态的影响等等。对于断裂破坏,需要了解裂纹在结构受力过程中的出现、发展直到结构断裂破坏等等。

可以想象,要解决这些问题是非常复杂的,必须从最基本处着手。首先要建立符合实际的钢材的本构关系,包括常温、高温和反复受力时的本构关系以及材料的断裂准则和裂纹发展的机理。第二要建立符合实际的结构的初始缺陷,包括那些必须考虑的几何初始缺陷、由制作产生的残余应力以及截面尺寸和材料强度等缺陷。第三要建立合适的计算方法。这一计算方法应做到能将计算假定减至最少,能够考虑结构变形的影响即几何非线性,能够考虑钢材的实际本构关系即物理非线性。

近年来结构的耐久性又提到相当重要的程度。在设计时,除了需要考虑结构的承载能力和使用合适性外,通常还需要考虑结构在使用年限内的耐久性。对于已使用多年的结构,也常需要估计其耐久性。这样,结构在外荷载作用下的全过程反应又扩大到结构在其生命期内的全过程反应。对于这种情况,还必须建立钢材考虑损伤及损伤累积效应的本构关系,使结构经分析后,不但能得到内力、应力和变形的反应,而且能得到结构是否有损伤、损伤的大小以及损伤的累积。另外必要时还应对结构进行健康监测,建立健康档案。

由于结构钢材的各项力学损伤以及结构的各种初始缺陷都是随机变量,作用在结构上的外荷载因与时间有关,属于随机过程,因此在建立合适的计算方法时,更有将结构进行随机分析的。

对于这些很高的要求,随着计算机技术的发展和有限元方法的进展,正在逐步实现,而且已有可能实现对实际结构的计算机仿真。

综上所述,对建筑结构进行全过程分析已成为分析方法的发展趋势。

§ 1.4 建筑结构抗灾新技术的发展

随着社会经济、人类文明以及城市化进程的迅速发展,各类灾害包括地震、飓风和火灾等造成的生命财产的损失也迅猛增加。因此,怎样保证建筑结构能够安全抵抗各类灾害荷载的作用已成为结构设计的主要任务。

在结构抗震抗风设计中除了不断提高自身的抗震抗风性能外,减震、隔震措施包括振动的被动控制和主动控制技术等正在被广泛研究和积极推广中。采取这种措施的目的是要使建筑结构在抵抗地震或飓风时免受破坏,因此是十分诱人的。这类技术早在航天、航空、车辆和机械中得到广泛应用。由于建筑结构体量庞大,地震、飓风又有很强的随机性,要在建筑中使用这些技术还有不少问题需要进一步解决。可以预计,减震、隔震措施将成为提高建筑结构抗震抗风能力的主要方法。

在结构抗火设计中,除了继续采用传统的防火措施外,目前均着重于结构自身的抗火分析,以期使防火措施更为合理。这就需要研究火荷载的实际情况、火荷载的高温在结构构件中的传播以及受高温影响后的结构承载能力等。为了进一步提高结构的抗火能力,新

的防火涂料正在层出不穷地涌现。

§ 1.5 本书编写的宗旨

本书的内容就是为适应我国建筑钢结构自 20 世纪 80 年代以来出现的新的结构体系、建筑结构分析方法向全过程发展的趋势以及有效提高建筑结构抗灾害荷载的能力而选择的。

在新的结构体系方面,主要针对高层及超高层钢结构、大跨度空间钢结构、单层厂房钢结构、桅杆结构以及钢板结构等结构类型分别阐述,并将其分散在第 4 章到第 10 章的有关章节中。在建筑结构的非线性分析方法方面,其一般分析理论在第 2 章和第 3 章中阐述,随后结合第 4 章高层及超高层钢结构、第 5 章刚性大跨度空间钢结构、第 6 章柔性大跨度钢结构、第 8 章轻型钢结构以及第 10 章钢板结构重点阐述。在建筑结构的抗灾设计方面,有关抗震的内容主要结合第 4 章高层及超高层钢结构重点阐述;有关抗风的内容主要结合第 4 章高层及超高层钢结构和第 9 章桅杆结构重点阐述;有关振动控制的内容主要结合第 4 章高层及超高层钢结构重点阐述;有关结构非线性失稳的内容主要结合第 5 章中的单层网壳结构、第 8 章中的轻型门式钢刚架、第 9 章桅杆结构和第 10 章钢板结构重点阐述;有关抗火的内容主要结合第 4 章高层钢结构重点阐述。

此外,本书还选取了各种类型结构中经常出现的一些重要理论问题作专题介绍。希望能为工程设计人员起到一定的指导和参考作用。

参考文献

- 1.1 沈祖炎,陈扬骥,陈以一. 钢结构基本原理. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000
- 1.2 沈祖炎. 21 世纪建筑工程及技术对力学的挑战. 力学与工程—21 世纪工程技术的发展对力学的挑战. 上海: 上海交通大学出版社, 1999. 205~229
- 1.3 沈祖炎. 大跨空间结构的研究与发展. 结构工程学的研究现状和趋势. 上海: 同济大学出版社, 1995. 22~31