

大型建筑钢结构建设丛书



建筑钢结构 稳定理论与应用

Stability of Steel Structures-The
Theory and Implement

罗永峰 韩庆华 李海旺 编著



人民交通出版社
China Communications Press

大型建筑钢结构建设丛书



建筑钢结构 稳定理论与应用

Stability of Steel Structures-The
Theory and Implement

罗永峰 韩庆华 李海旺 编著
陈绍蕃 陈志华 主审

人民交通出版社

1374138

内 容 提 要

本书是为满足建筑钢结构整体稳定性分析的工程应用需要而编写的。全书共分8章,首先介绍大型建筑钢结构的整体稳定性特征、整体稳定性分析方法及发展现状;之后引入钢结构整体稳定性分析理论;再次分别就目前应用最为广泛的几种钢结构体系的整体稳定性进行论述,并给出其各自稳定性的实用设计方法及提高其稳定性的措施,包括:钢拱结构、多高层钢框架结构、钢网壳结构、弦支穹顶结构、塔桅钢结构;最后以案例形式进行钢结构稳定事故分析。

本书系统地介绍了不同钢结构体系的整体稳定性特点和分析方法,可供钢结构工程技术人员参考使用,同时亦可作为结构工程专业的本科生、研究生参考阅读资料选用。

图书在版编目(CIP)数据

建筑钢结构稳定理论与应用/罗永峰等编著. —北京:
人民交通出版社, 2010.8
(大型建筑钢结构建设丛书)
ISBN 978-7-114-08566-6

I. ①建… II. ①罗… III. ①建筑结构: 钢结构-结
构稳定性 IV. ①TU391.01

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第143723号

书 名: 建筑钢结构稳定理论与应用
著 作 者: 罗永峰 等
责任编辑: 陈志敏 杜 琛
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>
销售电话: (010)59757969、59757973
总 经 销: 人民交通出版社发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 15
字 数: 344 千
版 次: 2010年8月 第1版
印 次: 2010年8月 第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-08566-6
印 数: 0001—3000 册
定 价: 39.00 元
(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

注: ①“北京交实文化发展有限公司”总经销适用部分水运类图书, “北京金飞图书发行中心”总经销适用汽车类专销图书, “人民交通出版社发行部”总经销适用于其余图书。

②编辑发稿时根据适用的情况选择销售信息, 将不用的两种销售信息情况删去。



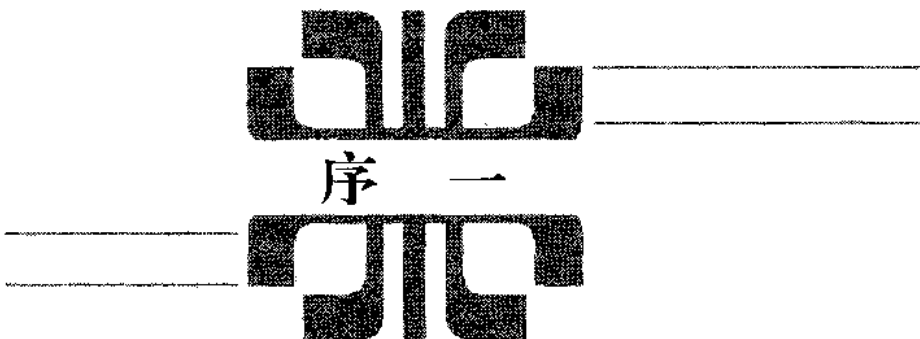
本书编委会

主 编：罗永峰

副主编：韩庆华 李海旺

编 委：李元齐 汤荣伟 沈之容

乐俊旺 孟祥武



序 一

丧失稳定是钢结构承载能力极限状态的重要项目,由于其复杂性,它也是钢结构失效事故的重要原因。

钢结构失稳可以分为三个层次:结构整体失稳、杆件失稳和组成构件的部件(实腹构件的板件、格构式构件的肢件和缀材)失稳。构件局部失稳和构件稳定之间的关系,已经研究得比较充分,表现在屈曲后强度的利用和局部与整体之间的相关关系。构件作为一个局部,它的失稳和结构整体承载力之间的关系要复杂一些。最典型的结构,即人们时常分析的三铰框架,一根柱子失稳就是整体失稳。多跨单层框架有侧移失稳时,过去对每根柱分别确定其计算长度,现在认识到失稳时各柱柱顶同时侧移,应该从层刚度来分析,也就是说应以整体稳定为设计依据。多层框架的稳定计算也同样从单柱稳定逐渐向整体稳定靠近。单个柱在意外作用(如冲击)下失效,并不立即造成整个框架失稳。局部和整体承载力之间存在较大差距。挖掘框架的承载力储备,是学术界多年来的追求,并且取得了不小的成果。

1961年布加勒斯特跨长93.5m的球形穹顶网壳坍塌,震动了工程界,它表明网壳结构的整体稳定亟待研究。虽然事故起源于局部积雪造成局部性破坏,但经过传播后很快导致整体失稳。

综合以上情况,整体失稳是众多类型钢结构承载能力的极限,应该成为设计工作的关注点。以往论述结构稳定的书,都以构件为分析对象,罗永峰教授主编的这本《建筑钢结构稳定理论与应用》(以下简称“本书”)着重论述各类钢结构的整体稳定性能和计算方法,是一本适应当前需要的独具特色的书。

从充分利用材料强度着眼,均匀受压比受弯有利,然而,压力是造成结构失稳的祸首,受压越纯,越容易失稳。在构件中,压杆比梁容易失稳。在结构中,穹顶网壳比平板网架容易整体失稳。正高斯曲率和零高斯曲率的网壳除了受压较纯外,还有以下特点:一是壳体跨厚比很大,在力学分析中需要考虑几何非线性;二是对缺陷很敏感,稳定性分析中需要引进初始几何缺陷。由于需要的迫切性,

网壳的整体稳定问题目前研究得已比较深入,又因涉及因素很多,网壳的计算方法提供了一个整体稳定计算的范例。

本书第2章提出的大位移弹塑性整体稳定分析方法,同时考虑结构的初始几何缺陷、结构大位移几何非线性和构件的弹塑性变形效应,虽然主要结合网壳结构进行分析,得出的结论同样适用于其他结构。多层框架的高等分析设计方法,同样考虑上述三种因素。只不过几何缺陷的施加方式有所不同。这种方法已接近实际应用阶段,但还未纳入设计规范。

桅杆是高柔性结构,保证其整体稳定十分重要,它的计算方法正处在从分枝屈曲计算向极限承载力计算过渡的阶段。《高耸结构设计规范》GB 50135-2006规定:“桅杆按杆身分枝屈曲临界压力计算的整体稳定安全系数不应低于2.0”,还停留在分枝屈曲计算阶段。本书论述的全过程位移跟踪法是一个良好的开端,但在计算中没有引进几何缺陷,需要通过适当的安全系数来弥补。欧盟的塔桅结构设计规范 EN 1993—3—1:2006 未对桅杆整体稳定计算给出具体规定,只是在风荷载部分要求:“为了对称桅杆整体屈曲的原因,应在横风向施加顺风向荷载的2%的侧力”,这项侧力是否能恰如其分地代替初始几何缺陷用于极限承载力计算,还有待考察。桅杆结构对缺陷的敏感性如何,尚未见分析资料。因此,桅杆的整体稳定问题还有进一步研究的空间。

本书既指出了钢结构整体稳定承载力计算的方向和方法,又介绍结合现行设计规范的作法,是一本能使设计工作者开阔眼界、增长知识的好书,值得一读。

陈绍蕃

2010年5月

序 二

钢结构稳定是一个古老且具有高难度的科学问题,是结构设计的控制因素,也常常是结构失效或倒塌的主要原因。迄今为止,人们对钢结构稳定性的研究成果主要集中于基本构件范畴,有关的稳定性分析理论和数值计算方法已成为现行国家设计规范的基础。然而,由于钢结构整体失稳的机理、产生整体失稳的诱因及整体失稳变形的发展过程在理论上较为抽象,目前,人们对此尚缺乏深入透彻的理解或了解,因而,关于钢结构系统整体稳定性分析方法与判定准则的研究还不够深入,虽然已有很多研究成果,但远不够完善,尚缺乏可指导实际工程设计的成熟的理论和方法。

现行钢结构设计规范主要规定了钢构件及节点的设计方法,在结构稳定性方面,仅规定了钢框架结构的稳定性验算。在验算钢框架结构稳定性时,采用计算长度系数法,即以单根杆件的稳定性验算代替整个钢框架结构的稳定性验算,并不进行钢框架结构的非线性整体稳定性分析。而在确定单根杆件的稳定系数时,杆件的长细比按计算长度系数计算,计算长度系数则由钢框架受到竖向节点荷载失稳时的杆件计算长度确定,与验算杆件内力的工况无关。计算长度系数法简单实用,但理论不完备且缺乏充分的试验验证,计算误差往往较大,有时会给出不安全的结果。因而,采用计算长度系数法验算单根杆件的稳定,不能保证结构的整体稳定性,目前采用这种设计方法只是权宜之计。对于大型复杂的建筑钢结构,进行准确的非线性整体稳定性验算是十分重要且必要的。然而,目前,除网壳结构以外,还没有关于钢结构特别是大型复杂钢结构整体稳定性验算的具体规范规定。

近年来,国内外钢结构发展迅速,特别在我国,各种钢结构建筑迅速涌现,建筑物的高度、跨度和规模越来越大、体系越来越复杂。正是由于现代钢结构的这一特点,使得人们更加难以准确了解这类大型复杂钢结构的整体稳定性态,也就无法通过参照现行规范的简单的构件设计保证结构的安全性。这样,在实际工



程中,往往可能导致设计者或使用者过高地估计钢结构系统的整体稳定性,造成对钢结构整体稳定性的不当设计或不当使用,在后期正常使用中埋下可能导致整体失稳的隐患。因而,如何准确预测现代大型复杂钢结构的整体稳定性态、可能的失稳模式及其稳定承载能力,变得十分必要且非常迫切。特别是随着高强优质钢材在建筑钢结构中的广泛应用,使得钢结构构件变得更加薄而细,结构整体刚度相对变柔而非线性效应显著,其整体稳定性问题变得尤为突出。

目前,在实际钢结构工程的整体稳定性分析或设计中,除了我国《网壳结构设计规程》(JGJ 61—2003)这本唯一对结构整体稳定性设计进行具体规定的行业标准外,国内外均缺乏可供应用或参考的系统文献资料、专著或手册。而在实际钢结构工程应用中,鉴于已发生钢结构整体失稳的事故较多且后果严重,使用者或设计者通常均要求设计或鉴定时,对钢结构进行整体稳定性验算,以作为对《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)规定内容的补充和结构安全性的深层次校核,确保钢结构的安全使用。根据目前国内建筑钢结构工程领域的现状,为满足实际工程中关于建筑钢结构整体稳定性分析的需要,以罗永峰教授任主编、韩庆华教授和李海旺教授任副主编的本书编写组在我们编委会的组织下编写本书,期望能为广泛应用且快速发展的建筑钢结构工程分析与设计,提供计算方法和理论资料。

本书主要针对大型建筑钢结构的整体稳定性分析方法及其应用进行论述,全书共八章。

第1章从高层、高耸、大跨度及空间结构的角度,介绍大型建筑钢结构的体系特点、形态特点以及失稳破坏的现象及原因,同时,介绍钢结构整体稳定性的特征与类型、整体稳定性分析方法及发展现状,并说明了尚需要进行深入研究的问题。

第2章介绍钢结构整体稳定性的分析理论和计算方法。本书根据工程应用的特点,说明钢结构整体稳定性的概念、分类与特点以及钢结构整体稳定性分析应涉及的内容;分类介绍钢结构整体稳定性分析的模型,包括单元模型与结构整体模型,说明了不同模型的特点与应用范围;分别从经典解析理论和数值分析的角度,详细阐述了钢结构整体稳定性的分析方法,其中包括结构整体稳定临界点的跟踪与计算方法、结构非线性屈曲平衡路径全过程跟踪的数值计算方法;针对钢结构体系可能出现的初始缺陷,介绍了初始缺陷的成因和类型、初始几何缺陷对钢结构整体稳定性态的影响以及钢结构整体稳定分析中初始缺陷的引入方法;针对结构局部失稳和整体失稳的相关关系,从动力学角度,阐述了钢结构失稳传播的现象和分析方法;根据实际工程应用的需要,介绍了钢结构系统整体稳定性验算与评定的方法,并给出可供参考的整体稳定性计算步骤;关于钢结构的动力稳定性分析,尚处于理论研究阶段,本章介绍了现阶段可供参考的结构非线性动力稳定平衡路径的迭代计算方法及动力稳定判定准则。本章给出了钢结构整体稳定分析的理论基础及基本计算方法。



第3章内容为钢拱结构的整体稳定性,主要介绍钢拱结构的体系特点及稳定形态类型,给出了钢拱结构整体稳定性分析的理论方法以及简化的实用设计方法,同时提出了提高大型钢拱结构稳定性的措施。

第4章内容为多高层钢框架结构的整体稳定性,主要介绍多高层钢框架结构系统的构成和特点,说明了钢框架结构稳定性计算原则,给出了钢框架结构整体稳定性计算方法,其中包括计算长度系数法和高等分析法,同时,也提出了保证钢框架结构整体稳定性的措施。

第5章内容为钢网壳结构的整体稳定性,主要介绍钢网壳结构的稳定性特点、结构形状、体系与整体稳定性的关系,给出了钢网壳结构整体稳定性分析与评定方法,同时,也提出了提高网壳结构整体稳定性的措施。

第6章内容为弦支结构的整体稳定性,主要介绍弦支钢结构的体系及特点,分别针对平面弦支结构和空间弦支结构,给出了整体稳定性分析与评定方法,同时,也提出了提高弦支结构整体稳定性的措施。

第7章内容为塔桅钢结构的整体稳定性,主要介绍塔桅钢结构的体系特点,阐述了塔桅钢结构稳定性计算原理、钢塔的稳定性与混沌现象,给出了桅杆结构静力与动力整体稳定性分析方法,同时,也提出了提高塔桅钢结构整体稳定性的措施。

第8章内容为钢结构稳定事故分析。对于设计人员而言,分析研究过去已发生的钢结构失效或倒塌事故并深入剖析其原因,比研究某些已成功建造的钢结构的体系、构造和设计方法,能更多、更深入地了解 and 掌握钢结构及其构件的力学性态、稳定特征和失效机理,更深刻地理解钢结构的计算理论、设计方法和各种限定准则,特别是大型钢结构的整体失稳破坏现象,通常在实验室是无法模拟的,通过实际整体失稳事故的深入分析,能够获得具体、详细的结构参数特征、破坏数据资料和破坏机理信息,深入理解抽象的整体失稳概念,可为设计提供有益的借鉴或建议。这一点对于缺乏工程经验的设计人员尤为重要。鉴于此,本章介绍了钢结构事故的类型及特点、分析钢结构事故的必要性,说明了不同生命阶段钢结构事故发生的原因及其失效模式,同时,也提出了防止钢结构失稳事故的措施。

同济大学罗永峰、李元齐、沈之容,天津大学韩庆华,太原理工大学李海旺,航空工业规划设计院孟祥武,中国建筑科学研究院汤荣伟,中广电设计院乐俊旺等对稳定有专项研究的编写组各位专家,根据近年来的研究成果和实际工程经验资料,首次详细阐述了钢结构整体稳定性的计算方法,并列举了相关实际工程的算例,填补了在这一方面缺少参考资料的空白,可以给读者提供实用的理论方法和设计思路,能使人开阔眼界、增长知识。特别地,本书又承蒙陈绍蕃教授认真细致的审阅,编写组又进一步修改完善后,系统性得以增强,水平更加得到提升,值得结构工程师、大专院校师生及研究人员阅读。

陈志华

2010年7月20日

前言

近三十多年来,随着国民经济和基础设施建设的飞速发展,钢结构在我国发展迅速,大量应用于工业和民用建筑之中,很多地方建造了宏伟而富有特色的大型钢结构建筑,并成为当地城市或地方的象征性或标志性建筑。现代钢结构建筑物的跨度和规模越来越大、形态越来越新异、体系越来越复杂,且采用了许多新材料和新技术,为钢结构分析与设计理论的发展提供了机遇,但同时提出了挑战。

然而,在钢结构广泛应用的同时,钢结构工程事故时有发生,有些并造成了巨大的生命财产损失,且产生了严重的社会影响。建筑钢结构破坏事故调查研究表明,导致钢结构失效破坏事故的原因多数不是钢材材料质量问题,而是由于设计、施工或使用不当造成的,且多数破坏现象为钢结构局部构件失稳破坏或者钢结构整体失稳破坏。特别是随着高强优质钢材的广泛应用,结构构件变得更加薄而细,结构整体上相对变柔,使得大型钢结构的稳定性问题变得尤为突出,成为这类钢结构破坏的主要原因。

对于设计人员而言,钢结构构件和节点的设计理论,相对较为容易理解和掌握,而关于钢结构系统整体稳定性的概念、分析理论和评定方法,特别是非线性分析理论,却较难理解和掌握,这可能导致其设计过程中对钢结构整体失稳考虑不足。如果在设计过程中不能正确分析和评定钢结构系统的整体稳定性,则很可能在设计中因考虑不周而埋下结构整体失稳的隐患。另外,关于钢结构系统整体稳定性的分析验算与评定,不同于传统的钢构件设计,必须考虑结构的非线性效应,且为常规结构设计之外必要进行的分析工作。因此,深入理解和掌握钢结构系统整体稳定性的分析方法、评定标准,帮助设计人员尽快理解和掌握钢结构整体稳定性的概论、分析理论与评定方法正是本书的出发点和落脚点。

本编写小组受人民交通出版社约稿,自2007年开始准备资料并着手编写工作,经过两年多的努力,完成了书稿编写。

本书共分8章。首先介绍大型建筑钢结构的整体稳定性特征、整体稳定性



分析方法发展现状及本书的编写宗旨;随之引入钢结构整体稳定性特征、分析理论、评定方法;然后分别就目前应用最为广泛的几种钢结构体系进行整体稳定性问题的讲解,并给出其各自的实用稳定性设计方法及提高稳定性方法的措施建议,包括:钢拱结构、多高层钢框架结构、钢网壳结构、弦支结构和塔桅钢结构;最后以案例形式进行钢结构稳定事故分析并提出防治措施。

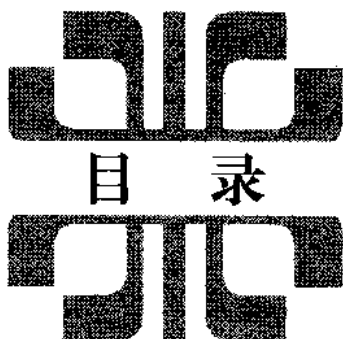
同济大学罗永峰教授为本书编写的总负责,包括制订章节大纲、各章节内容取舍、修改与统稿等。本书编写的具体分工如下:第1章、第2章、第5章由罗永峰教授撰写,第3章由李元齐教授、汤荣伟博士撰写,第4章由李海旺教授撰写,第6章由韩庆华教授撰写,第7章由沈之容副教授、乐俊旺教授级高工撰写,第8章由孟祥武教授级高工撰写。

本书由陈绍蕃教授审阅,提出了许多修改意见,在此表示感谢。在本书的编写过程中,天津大学陈志华教授、人民交通出版社陈志敏编辑等相关同仁均为本书的编写提供了很多帮助,在此一并表示感谢。

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@tongji.edu.cn。

作 者

2009年11月26日



第 1 章 绪论	1
1.1 大型建筑钢结构的特点	1
1.2 大型钢结构整体失稳特征	8
1.3 大型钢结构工程稳定性分析及应用现状.....	11
1.4 本书编写的宗旨和概要.....	13
参考文献	13
第 2 章 钢结构整体稳定分析理论	15
2.1 钢结构整体稳定性的特点和类型.....	15
2.2 钢结构整体稳定分析模型.....	17
2.3 钢结构整体稳定性分析方法.....	32
2.4 钢结构的缺陷敏感性.....	48
2.5 钢结构的失稳传播.....	54
2.6 钢结构系统整体稳定性验算与评定方法.....	57
2.7 钢结构的动力稳定性分析.....	62
参考文献	65
第 3 章 钢拱结构的整体稳定性	67
3.1 钢拱结构的特点及应用.....	67
3.2 钢拱结构整体稳定性分析与评定方法.....	73
3.3 钢拱结构稳定性设计的实用方法.....	75
3.4 提高大型钢拱结构稳定性的措施.....	82
参考文献	85
第 4 章 多高层钢框架结构系统的整体稳定性	88
4.1 钢框架结构系统的特点和构成.....	88
4.2 钢框架结构系统整体稳定计算方法.....	92
4.3 保证钢框架结构稳定性的措施	115
参考文献.....	122

第 5 章 钢网壳结构的整体稳定性	123
5.1 钢网壳结构的稳定性特点及应用	123
5.2 钢网壳结构形体与整体稳定性的关系	127
5.3 钢网壳结构整体稳定性分析与评定方法	131
5.4 实际工程网壳结构整体稳定性分析	140
5.5 提高网壳结构稳定性的措施	151
参考文献	154
第 6 章 弦支结构的整体稳定性	155
6.1 弦支结构体系的分类及工程应用	155
6.2 弦支结构整体稳定性分析与评定方法	168
6.3 提高弦支结构稳定性的措施	172
参考文献	177
第 7 章 塔桅钢结构的整体稳定性	178
7.1 塔桅钢结构的特点及应用	178
7.2 塔桅钢结构整体稳定性分析与评定方法	182
7.3 提高塔桅钢结构稳定性的措施	200
参考文献	202
第 8 章 钢结构稳定事故分析	203
8.1 钢结构事故的类型及特点	203
8.2 现代钢结构事故发生的原因及失效模式	205
8.3 钢结构事故实例概况与调查分析	209
8.4 防止钢结构失效和失稳事故的措施	224
参考文献	226



第1章 绪 论

1.1 大型建筑钢结构的特点

近三十多年来,随着大型体育场馆、机场、车站以及会展馆的大量兴建,各种大跨度空间钢结构在我国以及美、日、欧、澳等发达国家和地区得到迅速发展。钢结构建筑物的跨度和规模越来越大、体系越来越复杂,国内外工程专家采用了许多新材料和新技术,建造出丰富多样的钢结构建筑。许多宏伟而富有特色的大型钢结构建筑,已经成为一些城市的象征性或标志性建筑。大跨度和大型建筑的设计建造技术已经成为一个国家建筑科技发展水平的重要标志之一。

自 20 世纪以来,随着钢铁工业的发展,我国建筑钢结构的应用经历了几个不同的发展阶段。新中国成立之初,由于钢产量低及国家总体发展的需要,钢结构仅在重型厂房、大跨度公共建筑以及塔桅等特殊或重要结构中应用。主要包括:大型或重型工业厂房、铁路桥梁、大型体育馆、飞机库、钻井塔、输电塔、火箭发射塔、通讯(塔)桅杆、大型装卸机械结构、压力容器等。改革开放以后,随着国民经济的飞速发展和我国钢产量的增加,建筑钢结构的应用范围迅速扩展且数量迅速增加。普通厂房、高层和超高层建筑、体育场馆、会展馆、机场大楼、车站大楼等均大量采用钢结构建造。特别是自 1996 年以来,我国钢产量大幅增加,钢材质量提高,钢材规格增多,极大地满足了建筑钢结构应用的需要。1997 年原建设部颁发的《1996 年~2010 年建筑技术政策》(建建[1997]330 号文)中,明确提出了发展建筑钢结构的战略方针^[1]。繁荣的建设市场和国家的政策支持均为建筑钢结构的发展创造了条件,促使我国建筑钢结构迅速发展。因此,现代的体育场馆、影剧院、会展馆、航站楼、候车大厅、高层及超高层建筑、厂房、仓库、收费站、各种桥梁、电视塔、输电塔、通讯塔、化工塔架、大型城市雕塑、干煤棚以及众多建筑结构中大量采用钢结构。

近二十多年来,随着材料科学、计算技术、设计方法、制作工艺、连接技术、施工安装技术的飞速发展,钢结构在我国建筑工程中应用越来越广,钢结构应用已成为建筑结构的热点和亮点。现代建筑钢结构造型新颖、体系复杂、形式多样,重要建筑通常规模庞大,我国的建筑钢结构已进入一个飞速发展的时代。

1.1.1 现代建筑钢结构的体系特点

现代建筑钢结构的特点是“高、大、复”，即高耸、庞大、复杂。目前在世界范围内已建成的高层建筑已达 800m 以上（阿联酋迪拜哈利法塔已达到 828m），在建的高耸结构将超过 600m（中国广州新电视塔 610m），大跨度空间结构覆盖的范围已达 200m 以上（中国上海南站直径 275m；中国国家体育中心长 330m，宽 220m；英国伦敦千年穹顶直径 320m；中国北京首都机场 T3 航站楼屋盖钢结构 T3A 东西宽 773m，南北长 955m，入口处有 45m 室外悬挑，覆盖面积约 17 万 m^2 ，T3B 东西宽 775m，南北长 958m，覆盖面积约 13 万 m^2 ），城市雕塑高达百米以上（中国南海立佛 108m）。随着建筑造型的奇异化和复杂化，传统简单的单一结构体系无法满足现代建筑的要求，因此，与之相适应的结构体系及构造就越来越复杂，如刚性与柔性构件组合的钢结构、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等不断出现^[2]。

(1) 高层及超高层钢结构

高层及超高层结构体系，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），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。芝加哥西尔斯大厦（美国，束筒体系，110 层，高 443m）、香港中国银行大楼（中国，巨型框架体系，70 层，高 315m）、上海金茂大厦（中国，巨型外伸桁架、巨型柱、核心筒体系，88 层，高 365m）、台北 101 大厦（中国，巨型框架结构，高 508m）、迪拜哈利法塔（阿联酋，828m）、在建的上海中心大厦（中国，122 层，632m）等都是当今世界高层建筑的代表。新结构体系的出现，使得传统的计算理论与设计规范不再适用，因此，需要新的结构分析与设计方法，同时需要新的施工与控制技术。

国内外已建及在建的部分超高层建筑如图 1.1 所示，其中上海环球金融中心 101 层 492m，中央电视台 234m，深圳地王大厦 383.95m。

(2) 高耸钢结构

高耸钢结构主要应用于塔架和桅杆结构。近年来塔桅结构高度越来越高，造型越来越新奇复杂，结构体系形态发展变化较大。如波兰华沙的长波无线电桅杆的高度达 642.5m；我国广州新电视塔主体高度 454m，桅杆高度 156m，总高 610m。随着结构高度的增加，高耸钢结构的风致振动、动力稳定及其控制技术已成为目前广泛关注的焦点问题。

目前，国内已建及在建的部分大型高耸结构如图 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）。

(3) 大跨度及空间钢结构

近年来，随着世界杯和奥运会等体育运动盛会及世博会等大型活动的需要，大跨度空间结构体系在国内外得到迅速发展。大跨度空间结构的形式由传统的梁、拱、桁架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、索网、索穹顶、张弦梁、弦支穹顶、悬挂（斜拉）结构、可开合结构、可伸展结构、可折叠结构等结构体系。空间钢结构的覆盖空间不断增大。如瑞士苏黎世机场机库（125m×128m 网架）、中国上海虹桥机场东方航空公司维修机库（150m×90m 钢板节点网架）、中国北京首都机场 A380 机库（(176.3m+176.3m)×110m 焊接球节点网架+相贯节点桁架）、美国新奥尔良的超级穹顶体育馆（213m 直径联方型双层球

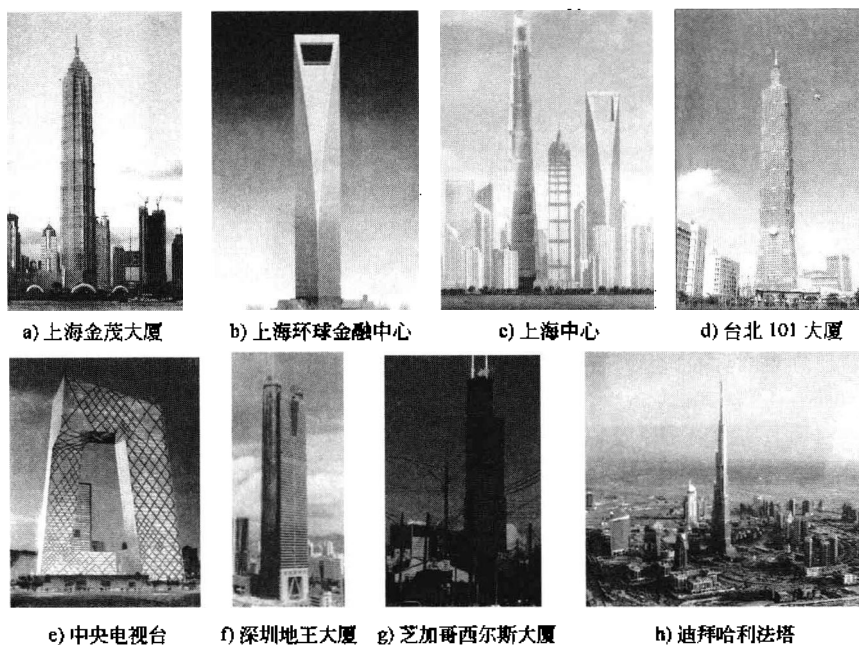


图 1.1 高层建筑实例

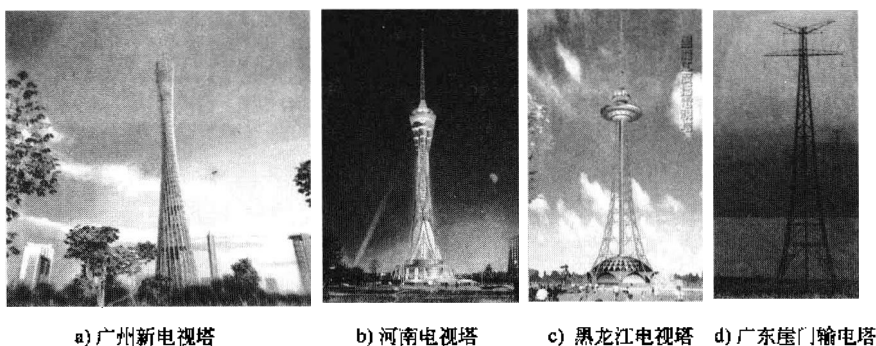
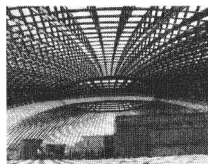


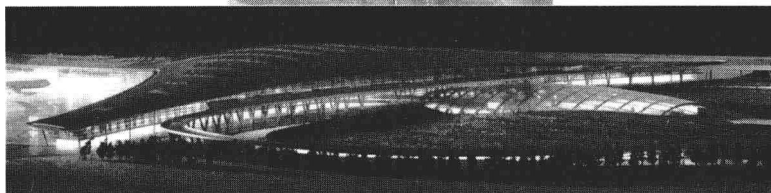
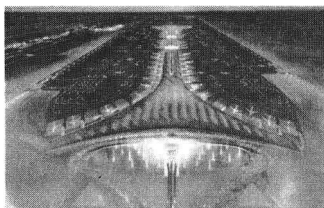
图 1.2 高耸结构实例

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 索穹顶)、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(201×201m 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)、中国国家大剧院(212.24m×143.64m×45.35m)、中国长春五环体育馆(192m×146m×50m 巨型方钢管拱桁架体系)、中国上海南站(直径 275m 的预应力钢屋盖)、中国南通体育中心可开合屋盖(直径 280m)、中国国家体育中心(330m×220m×69.2m)等都是当今世界大跨度空间结构的经典之作。

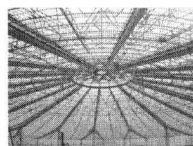
现代大跨度空间结构体系可分为三大类^[1],即刚性结构体系(如折板、薄壳、网架、网壳、空间桁架等)、柔性结构体系(如索结构、膜结构、索穹顶等)和杂交结构体系(如拉索—网架、拉索—网壳、张弦梁、弦支穹顶等)。国内外已建的部分大跨度空间结构如图 1.3 所示。



a) 中国国家大剧院

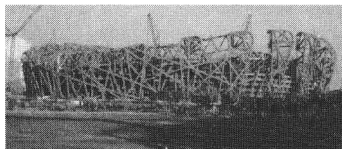


b) 中国北京首都机场 T3 航站楼



c) 中国上海浦东国际机场航站楼

d) 中国上海南站

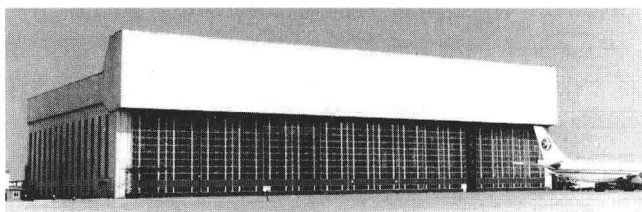


e) 中国国家体育中心

f) 中国南通体育中心



g) 中国长春五环体育馆



h) 中国上海虹桥机场东方航空公司 1 号维修机库

图 1.3