

Key Construction
Technology

“十三五”江苏省重点图书出版规划项目

大跨空间 钢结构施工关键技术

以南京青奥体育公园为例

鲁开明 陈勤斌 王 进 刘荣桂 编著

- 大跨空间钢结构施工阶段基础理论及有限元分析
- 大跨空间钢结构施工方案的选择
- 预应力拉索点支式玻璃幕墙施工关键技术
- 大跨空间钢结构工程的 BIM 技术应用
- 大跨空间钢结构工程中的绿色施工技术

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

“十三五”江苏省重点图书出版规划项目

**Key Construction
Technology**

of Large Span Spatial
Steel Structure

大跨空间 钢结构施工关键技术

以南京青奥体育公园为例

鲁开明 陈勤斌 王 进 刘荣桂 编著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

大跨空间钢结构施工关键技术：以南京青奥体育公园为例 / 鲁开明等编著. — 镇江：江苏大学出版社，2017.12

ISBN 978-7-5684-0709-0

I. ①大… II. ①鲁… III. ①大跨度结构—钢结构—建筑物—建筑施工 IV. ①TU745.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 318990 号

大跨空间钢结构施工关键技术：以南京青奥体育公园为例

Dakua Kongjian Gangjiegou Shigong Guanjian Jishu: Yi Nanjing Qing'ao Tiyu Gongyuan Wei Li

编 著 / 鲁开明 陈勤斌 王 进 刘荣桂

责任编辑 / 吴蒙蒙 汪再非

出版发行 / 江苏大学出版社

地 址 / 江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编：212003)

电 话 / 0511-84446464(传真)

网 址 / <http://press.ujs.edu.cn>

排 版 / 镇江文苑制版印刷有限责任公司

印 刷 / 镇江文苑制版印刷有限责任公司

开 本 / 718 mm × 1 000 mm 1/16

印 张 / 19.5 插页 16 面

字 数 / 394 千字

版 次 / 2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号 / ISBN 978-7-5684-0709-0

定 价 / 68.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话：0511-84440882)

序

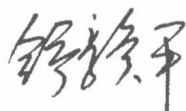
随着国家综合国力的不断增强,各类体育、会议、演艺等活动广泛开展,大跨度空间结构迎来了空前的发展时机,一大批结构形式新颖和施工技术先进的钢结构工程项目脱颖而出,这对大跨空间钢结构的设计理论和施工技术提出了巨大的挑战。因此,对大跨度空间钢结构的施工关键技术开展系统的研究很有必要。南京青奥体育公园项目是南京市的地标建筑之一,结构新颖,设计难度大,施工技术复杂,该工程形成了大量科技成果,已获“中国钢结构金奖”等奖项。南京建工集团有限公司以南京青奥体育公园项目为背景,对大跨空间钢结构的施工关键技术进行系统的研究。基于大量工程数据和实践成果,南京建工集团有限公司组织工程技术人员编写了《大跨空间钢结构施工关键技术》一书,对相关研究成果进行系统的介绍和论述。

该书详细分析了大跨空间钢结构的施工关键技术问题,在理论方面重点研究了大跨度钢结构施工的基本理论及有限元分析原理;在工程应用方面重点介绍了大跨钢结构施工方案的优化、拉索玻璃幕墙施工方案的研究与分析、BIM技术和绿色施工的应用及成效展示等施工关键技术,为大跨空间钢结构施工提供工程参考案例。

南京建工集团有限公司是全国建筑业竞争力百强企业,长期以来,公司把追求“以技术引领企业发展,努力成为拥有绿色建筑技术和具有承接工程总承包业务能力的大型控股集团”作为企业战略目标,在科技创新方面打造企业核心技术,为我国城市建设做出了突出贡献。

该书可为从事大跨空间钢结构施工企业及设计院所技术人员、管理人员提供参考,亦可供大专院校土木工程等相关学科学生学习参考。

东南大学教授 博士生导师
钢结构研究设计发展中心主任



前 言

大跨空间结构是大型体育场馆和公共建筑等采用的主要结构形式,一大批结构形式新颖和施工技术先进的钢结构工程项目脱颖而出,这对大跨空间钢结构的设计理论和施工技术提出了巨大的挑战,必须对大跨空间钢结构的施工关键技术开展系统地研究,为工程建设提供技术保证。南京青奥体育公园是南京市的地标建筑之一,结构新颖,设计技术难度大,施工复杂,该工程形成了大量科技成果,已获“中国钢结构金奖”。南京建工集团有限公司以南京青奥体育公园项目为背景工程,对大跨空间钢结构的施工关键技术进行系统的研究,组织工程技术人员根据研究成果,编写了《大跨空间钢结构施工关键技术》一书。该书的出版将填补目前市场上对大跨空间钢结构施工技术相关学术专著的不足,对提高我国大跨钢结构技术水平有重要意义,具有重要推广应用价值。

本书共7章。第1章论述了大跨空间钢结构国内外发展概况,重点介绍了大跨空间钢结构的特点和结构形式,并总结了大跨空间钢结构在体育场馆中的应用。第2章基于大跨空间结构施工阶段的受力特点及理论研究,对大跨空间钢结构的施工力学理论、施工过程模拟技术、动力分析基本方法以及拉索结构有限元分析理论进行了总结。第3章介绍了南京青奥体育公园的工程概况以及大跨空间钢结构施工过程中主要采用的关键技术。第4章介绍了临时支撑卸载的基本问题,并对青奥体育场馆大跨钢结构卸载过程进行有限元模拟,结合模拟结果,最终确定钢结构卸载控制施工方案与施工挠度监测方案,为项目有效施工控制提供理论依据。第5章基于南京青奥体育公园中体育馆的拉索点支式玻璃幕墙工程的施工,对拉索点支式玻璃幕墙结构的施工工艺进行了介绍。第6章阐述了BIM技术在大跨空间钢结构工程中的应用。第7章介绍了绿色施工的产生背景和内涵,进一步讨论了绿色施工的5个特点。

在本书的编写过程中,南京建工集团有限公司技术负责骨干及江苏大学刘荣桂教授课题组老师对本书做出了贡献。刘荣桂、胡白香撰写了第1章;刘荣桂、延永东撰写了第2章;陈勤斌、崔钊玮撰写了第3章;王进、崔钊玮撰写了第4章;王进、谢甫哲撰写了第5章;鲁开明、韩豫撰写了第6、7章。此外,樊淑清、

徐斌、范伟忠、刘志军、姚卫忠、池苏庆、王东海、姚昌慧等在书稿写作过程中提出了宝贵意见。

该书内容丰富,观点独特,写作严谨认真,该书的出版将填补目前市场上对大跨空间钢结构施工技术相关学术专著的不足,也可为从事大跨空间钢结构施工企业及设计人员、管理人员提供参考,更可供高校结构工程、工程力学等相关学科本科生、研究生学习参考。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编著者

2017 年 11 月

目 录

第一篇 大跨空间钢结构发展现状与基础理论

第 1 章 大跨空间钢结构特点、形式及应用 / 003

1.1 概述 / 003

1.2 大跨空间钢结构的特点 / 004

1.3 大跨空间钢结构主要形式及典型应用 / 006

1.3.1 网格结构 / 007

1.3.2 张力结构 / 029

1.3.3 混合结构 / 053

1.4 大跨空间钢结构在体育场馆中的应用 / 066

1.5 小结 / 069

第 2 章 大跨空间钢结构施工阶段基础理论 / 070

2.1 大跨空间钢结构施工阶段受力特点 / 070

2.2 大跨空间钢结构施工理论研究现状 / 071

2.3 大跨空间钢结构施工力学理论 / 072

2.3.1 时变力学分类 / 072

- 2.3.2 大跨空间钢结构施工时变理论 / 073
- 2.4 大跨空间钢结构施工过程模拟方法 / 076
 - 2.4.1 施工阶段内力与变位叠加法 / 076
 - 2.4.2 生死单元和分步建模技术 / 078
- 2.5 大跨空间钢结构动力分析基本方法 / 079
- 2.6 大跨空间拉索结构有限元分析理论 / 080
- 2.7 考虑施工过程的时变结构设计流程 / 083
- 2.8 小结 / 085

第二篇 大跨空间钢结构施工关键技术

第3章 南京青奥体育公园大跨空间钢结构工程总体介绍 / 089

- 3.1 工程概况 / 089
- 3.2 工程地质 / 093
 - 3.2.1 区域地质概述 / 093
 - 3.2.2 工程地质条件 / 094
- 3.3 气候及水文条件 / 095
 - 3.3.1 区域水文气象资料 / 095
 - 3.3.2 地下水类型 / 097
 - 3.3.3 地下水土腐蚀性评价 / 097
- 3.4 体育场馆及连接体 / 097
 - 3.4.1 体育馆 / 099
 - 3.4.2 体育场 / 100
 - 3.4.3 连接体 / 102
 - 3.4.4 拉索玻璃幕墙 / 103
- 3.5 施工关键技术 / 104

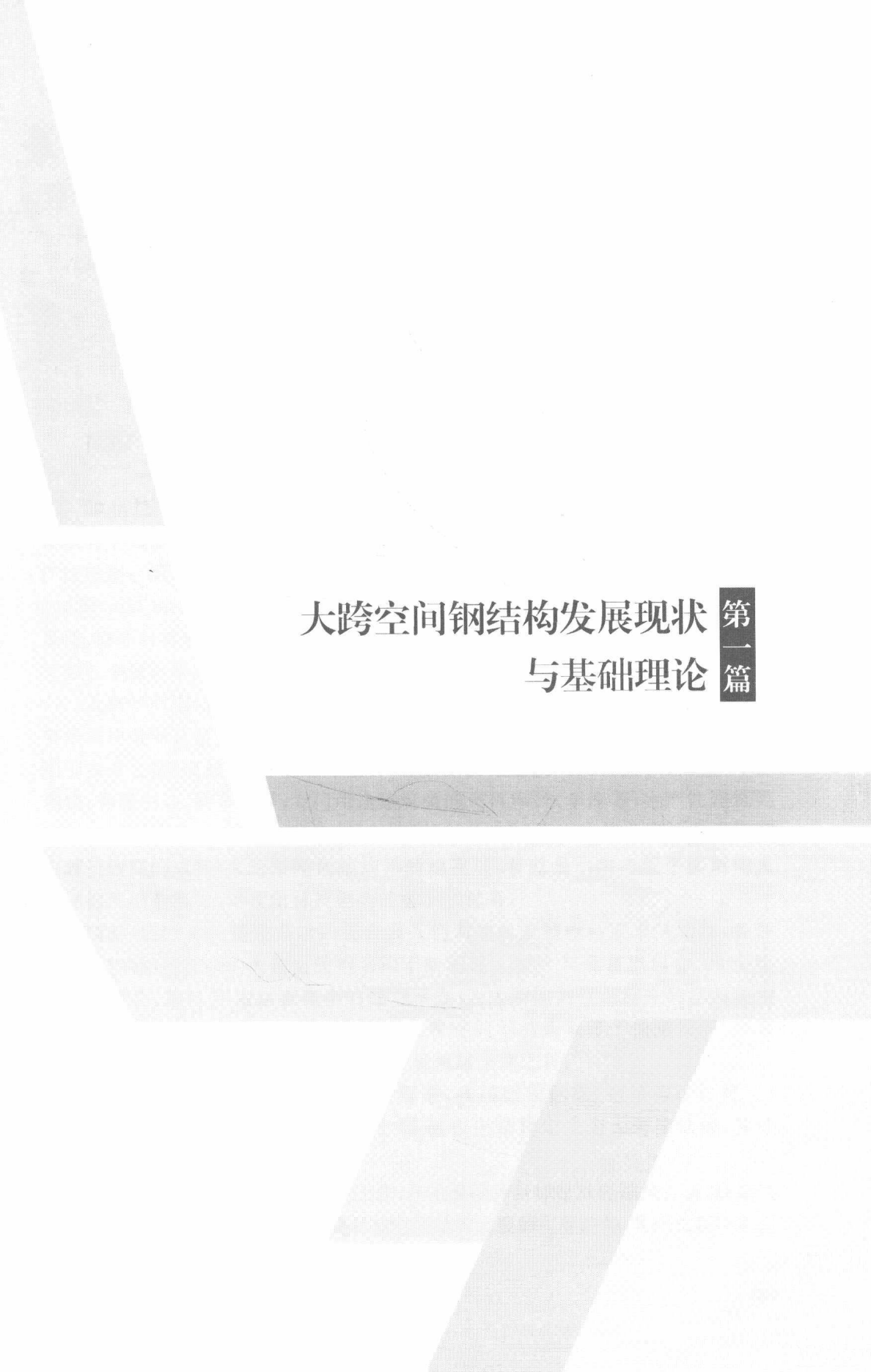
第 4 章 大跨空间钢结构施工方案 / 105

- 4.1 分块吊装技术在南京青奥体育公园体育场钢结构工程中的应用 / 105
 - 4.1.1 体育场现场吊装方案 / 105
 - 4.1.2 钢结构屋面分块方案 / 105
 - 4.1.3 分块桁架拼装方案 / 108
 - 4.1.4 分块吊装安装技术 / 111
- 4.2 南京青奥体育公园体育馆钢结构管桁架施工技术 / 116
 - 4.2.1 体育馆工程重点、难点分析 / 116
 - 4.2.2 体育馆施工方案 / 117
 - 4.2.3 施工仿真分析及计算 / 125
- 4.3 大跨度钢结构吊装技术在南京青奥体育公园连接体工程中的应用 / 131
 - 4.3.1 工程重难点主要对策 / 131
 - 4.3.2 现场吊装方案的选择与确定 / 133
 - 4.3.3 连接体钢结构拼装与吊装方案 / 133
 - 4.3.4 钢结构吊装工况计算 / 143
- 4.4 临时支撑卸载基本问题 / 148
 - 4.4.1 卸载基本原则 / 148
 - 4.4.2 临时支撑胎架形式 / 149
 - 4.4.3 卸载基本方式 / 149
- 4.5 体育场钢结构卸载过程模拟 / 150
 - 4.5.1 体育场钢结构临时支撑卸载模拟依据规范 / 150
 - 4.5.2 体育场钢结构临时支撑胎架卸载工况 / 150
 - 4.5.3 体育场钢结构有限元模拟计算分析 / 151
- 4.6 连接体钢结构卸载方案选择 / 157

- 4.6.1 连接体钢结构施工难点 / 157
- 4.6.2 连接体钢结构不同卸载方案 / 157
- 4.6.3 连接体钢结构卸载方案选择 / 160
- 4.7 大跨空间钢结构施工挠度监测方案 / 164
 - 4.7.1 测量控制方案 / 164
 - 4.7.2 施工测量 / 168
 - 4.7.3 保证钢结构施工测量精度的措施 / 169
 - 4.7.4 大跨空间钢结构施工挠度监测方案 / 170
 - 4.7.5 测量方法 / 175
- 4.8 小结 / 176
- 第5章 预应力拉索点支式玻璃幕墙施工关键技术 / 178**
 - 5.1 拉索玻璃幕墙概述 / 178
 - 5.1.1 拉索点支式玻璃幕墙的组成 / 178
 - 5.1.2 拉索点支式玻璃幕墙与其他幕墙的区别 / 179
 - 5.1.3 拉索玻璃幕墙的受力特点 / 180
 - 5.1.4 拉索玻璃幕墙的工艺原理 / 180
 - 5.2 工程概况 / 182
 - 5.3 施工过程分析 / 185
 - 5.3.1 预应力拉索的张拉 / 185
 - 5.3.2 玻璃幕墙施工过程分析 / 187
 - 5.4 拉索玻璃幕墙的施工 / 195
 - 5.4.1 施工总体步骤 / 195
 - 5.4.2 主要施工过程 / 195
 - 5.5 拉索点支式玻璃幕墙的力学性能 / 199
 - 5.5.1 拉索点支式玻璃幕墙的静力性能 / 199
 - 5.5.2 拉索点支式玻璃幕墙的基本动力特性 / 203

5.5.3	风荷载作用下拉索点支式玻璃幕墙的动力性能 / 209
5.6	小结 / 226
第6章 大跨空间钢结构工程的BIM技术应用 / 227	
6.1	南京青奥工程BIM技术的应用需求分析 / 227
6.2	南京青奥工程BIM技术的应用展示 / 228
6.2.1	组织协作优化 / 231
6.2.2	专项施工方案管理 / 232
6.2.3	深化设计管理 / 237
6.2.4	施工安全管理 / 237
6.2.5	工程投标 / 241
6.2.6	技术交底 / 244
6.2.7	管线深化 / 247
6.2.8	绿色施工 / 250
6.3	小结 / 251
第7章 大跨空间钢结构工程中的绿色施工技术 / 252	
7.1	绿色施工概述 / 252
7.1.1	绿色施工的内涵 / 252
7.1.2	绿色施工的特点 / 252
7.1.3	绿色施工的主要内容 / 253
7.2	青奥工程的绿色施工评价体系 / 256
7.2.1	设计阶段绿色施工评价分析 / 256
7.2.2	施工阶段绿色施工评价分析 / 259
7.2.3	竣工运营阶段绿色施工评价分析 / 261
7.3	青奥工程的绿色施工应用 / 263
7.3.1	节材与材料资源利用措施 / 263
7.3.2	节水与水资源利用措施 / 269

7.3.3	节能与能源利用措施 /	270
7.3.4	节地与施工用地保护措施 /	272
7.3.5	环境保护 /	273
7.4	青奥工程的绿色施工成效 /	279
7.4.1	绿色施工成效概况 /	279
7.4.2	经济效益 /	282
7.4.3	社会效益 /	283
7.5	小结 /	283
参考文献 /		285
成果附录 /		297



大跨空间钢结构发展现状 与基础理论

第一篇

第 1 章 大跨空间钢结构特点、形式及应用

1.1 概述

20 世纪 60 年代,《空间结构》杂志前主编马考夫斯基(Z. S. Makowski)还只是认为空间结构是一种有趣但仍属陌生的非传统结构,然而今天它已在全世界广泛应用。国际壳体与空间结构协会(The International Association for Shell and Spatial Structures, IASS)创始人托罗哈认为最佳结构有赖于其自身受力之形体,而非材料潜在之强度。“实现建筑工业技术最伟大的现代天才”、“全能设计师”、美国科学家巴克斯特·富勒认为自然总是建造最经济的结构。

大跨空间钢结构由于其受力合理、结构刚度大、跨度大、重量轻、用钢量低,突出结构美而且富有艺术表现力、造型丰富优美、生动活泼等优点,已被广泛应用于大众文化、交通、体育娱乐等重要设施,如公共建筑类的剧院、展览馆、体育场馆、会展中心、候车厅等;专门用途建筑类的飞机库、汽车库等;生产性建筑类的飞机制造厂的总装配车间、造船厂的船体结构车间等。随着经济的发展及相应理论研究的成熟,大跨空间钢结构不断地发展,日益显示出一般平面结构无法比拟的创造潜力,体现出科技创新的美丽和神奇。

随着经济、文化建设需求的提升及人们对建筑造型设计要求的增加,各种造型独特、结构复杂的大跨空间钢结构不断涌现。2008 年北京奥运会、2010 年上海世博会、2014 年南京青奥会的成功举办,为大跨空间钢结构在我国的应用发展提供了新的契机。近 20 年来我国大跨空间钢结构取得了快速发展,体育建筑、会展建筑、交通枢纽建筑等的建设规模居全球之首。

大跨结构的跨度没有统一的衡量标准,我国国家标准《钢结构设计规范》《网架结构设计与施工规程》等将跨度 60 m 以上结构定义为大跨度结构,其计算和构造均有特殊规定。

大跨度结构主要在自重荷载下工作,其主要设计目标是减轻结构自重,故最适宜采用钢结构。大跨空间钢结构是目前空间结构发展的主要趋势,其形式新颖丰富

且采用了大量的新材料、新技术,已得到广泛的工程应用,是现代设计技术、材料技术和建造技术的集中体现,并成为反映一个国家建筑科学技术水平的重要标志。

1.2 大跨空间钢结构的特点

空间钢结构是不宜分解为平面结构体系的三维空间形体,鉴于三维受力特性,在荷载作用下呈空间工作状态,由多个方向的构件同时参与工作,从而使内力分布得更加均匀。

空间钢结构可以通过合理的曲线形体来有效抵抗外荷载的影响,使结构以承受轴力为主,可充分利用钢材的高强度性能,具有传力途径简捷、结构刚度大、自重轻等特点,能适应不同跨度、不同支承条件的各种建筑要求;形状上也能适应正方形、矩形、多边形、圆形、扇形、三角形,以及由此组合而成的各种形状的建筑平面;同时,又具有建筑造型轻巧、结构形式丰富而生动活泼、便于建筑处理的特点,突出结构美而且富有艺术表现力。

大跨空间钢结构主要呈现出以下几个特点:

(1) 结构跨度大

经济文化的快速发展,要求越来越多的建筑能够覆盖更广阔的空间来体现特色。图 1.1 为 2008 年奥运会国家体育场,长轴 332.3 m,短轴 296.4 m,“鸟巢”外形结构主要由巨大的门式刚架组成,共有 24 根桁架柱,围护结构为覆盖膜、钢承重骨架,主刚架平面外的稳定性由与其相交的次结构保证。图 1.2 为英国伦敦于 1999 年建成的千禧穹顶,整个建筑为穹庐形,跨度 300 m,12 根 100 m 高的钢桅杆直刺苍穹张拉着直径 365 m、周长大于 1 000 m 的穹面钢索网。

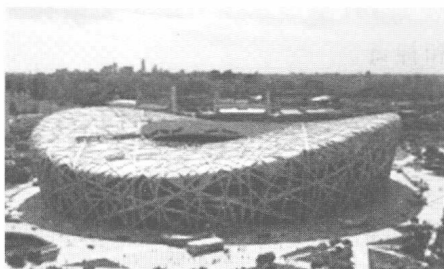


图 1.1 大跨空间钢结构示例——
北京国家体育场

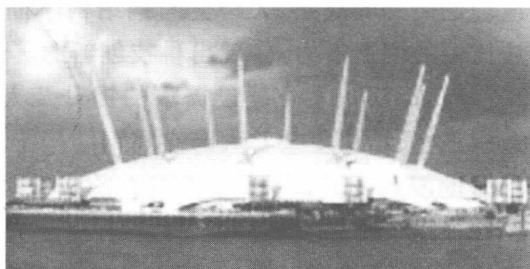


图 1.2 大跨空间钢结构示例——
伦敦千禧穹顶

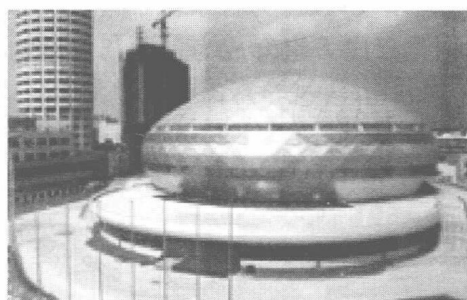
(2) 形式多样化

随着建筑科学技术水平的提高,大跨空间钢结构逐渐展现出复杂化和结构形式多样化的特点。大跨空间钢结构并不是大量建设项目,因此方案极具个性化。

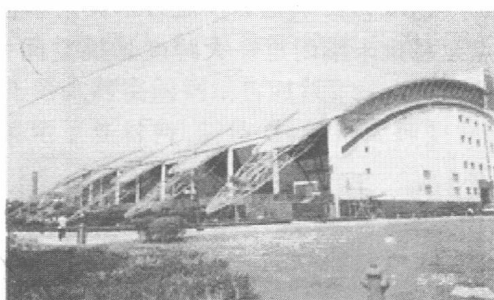
(3) 材料特殊化

传统钢材已经不能满足大跨空间钢结构的发展需求。高强钢材、厚钢板的应用为大跨复杂空间钢结构的发展提供了有力保障,不锈钢、铝合金、膜材等新材料的应用进一步推动大跨空间钢结构的发展。

图 1.3 为部分应用特殊材料的网壳结构建筑。



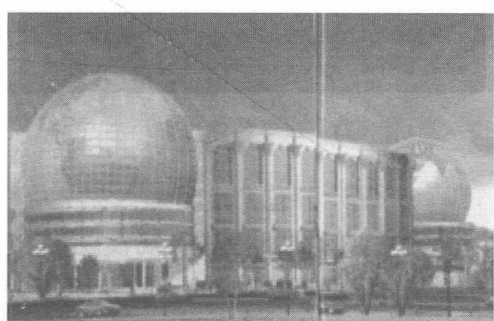
(a) 上海国际体操中心(铝合金网壳)



(b) 上海浦东游泳馆(铝合金网壳)



(c) 上海长宁体育馆(铝合金单层网壳)



(d) 上海会展中心(耐候钢网壳)

图 1.3 特殊材料网壳结构建筑

(4) 节点复杂化

多姿多彩的建筑造型使得结构的节点设计模式不断增多,也给构件加工和施工增添了一定的复杂性。

例如,位于北京朝阳公园的凤凰国际传媒中心钢结构属超大跨度空间结构(见图 1.4),钢结构屋盖由双向交叉叠合梁结构及竖向支撑系统组成,长约 130 m,宽约 124 m,由箱型截面构件(轮廓尺寸 700 mm×500 mm)形成的梯形网格构成,且构件具有不同程度的空间弯扭特征。凤凰国际传媒中心钢结构制作安装新技术的研究成功,对于今后各种不同曲面奇特造型的大跨空间钢结构设计施工具有重要的参考价值。

(5) 充分应用新技术

在大跨空间钢结构中引入现代预应力技术,不仅使结构造型更为丰富,而