

“十一五”科技支撑计划：
建筑结构高效施工关键技术研究（2006BAJ01B04）

建筑结构施工 预变形控制技术与应用

JIANZHU JIEGOU SHIGONG
YUBIANXING KONGZHI JISHU YU YINGYONG

毛志兵等 编著

中国建筑工业出版社

“十一五”科技支撑计划：建筑结构高效施工关键技术研究
(2006BAJ01B04)

建筑结构施工预变形 控制技术与应用

毛志兵等 编著



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构施工预变形控制技术与应用/毛志兵等编著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-112-13006-1

I. ①建… II. ①毛… III. ①建筑工程-工程施工-变形-控制 IV. ①TU74

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 041344 号

作者针对具体结构的各种预变形问题编写本书, 希望能为广大工程技术人员和研究人员提供一本结构施工预变形控制方面的参考书。

本书第 1 章对大悬臂、大跨度桁架结构、预应力钢结构、超高层结构的结构特点、发展简况、研究现状进行了系统的介绍。第 2 章给出了结构预变形的定义及相关预变形分析方法和理论, 针对各种结构的预变形特点, 给出了相关结构的预变形规律及具体的预变形分析控制方法。第 3 章以实际工程为背景, 详细地介绍了大连体育馆弦支穹顶结构、黄河口物理模型试验厅工程、CCTV 主楼钢结构、巨人科技产业园、广州珠江新城西塔、深圳京基金融中心等各种不同结构预变形分析方法的应用及相关控制措施。

本书适合于结构专业的设计和施工人员使用。

* * *

责任编辑: 岳建光 张 磊

责任设计: 赵明霞

责任校对: 刘 钰 马 赛

建筑结构施工预变形控制技术与应用

毛志兵等 编著

*

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

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{2}$ 字数: 221 千字

2011 年 5 月第一版 2011 年 5 月第一次印刷

定价: 30.00 元

ISBN 978-7-112-13006-1

(20444)

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)

主要编著人员

毛志兵 宋中南 张 琨 范 峰 黄 刚

于震平 王冬雁 余 流 支旭东 戴立先

刘军进 杜彭泉 张云富

前言

近年来,象征国民实力的大型复杂结构在我国得到了迅速发展,人们对建筑形式的要求越来越高,涌现出大批超高、超大跨度、外形复杂的结构形式。这些结构往往对变形较为敏感,尤其在施工过程中,其变形问题更加复杂,如超高层结构施工中的变形累积问题、预应力结构施工中的找形问题等等。针对这些问题,尽管工程人员在施工过程中采取了一些措施加以控制,但是这些措施多停留在经验层面,未形成系统的理论体系,延续性较差。迄今为止,还没有一本专门的、较为系统的介绍结构施工预变形控制技术的书籍。为此,作者结合近年来所做的一些代表性工程,针对具体结构的各种预变形问题编写了本书,希望能为广大工程技术人员和研究人员提供一本结构施工预变形控制方面的参考书。

本书第1章对大悬臂、大跨度结构、预应力钢结构、超高层混凝土筒体等结构预变形分析的研究背景、结构特点、发展简况、研究现状进行了系统的介绍,让大家对这些变形敏感结构有了一个深入而系统的认识。在此基础上,第2章给出了结构预变形的定义及相关预变形分析方法和理论,针对各种结构的预变形特点,给出了相关结构的预变形规律及具体的预变形分析控制方法,包括结构施工全过程模拟技术、预应力结构找形技术、预调值分析方法等,该部分内容注重突出概念,明确逻辑,力求深入浅出,以期读者能够方便快速地掌握各种结构的预变形控制理论及分析技术。最后,第3章以实际工程为背景,详细地介绍了大连体育馆弦支穹顶结构、黄河口物理模型试验厅工程、CCTV主楼钢结构、巨人科技产业园、广州珠江新城西塔、深圳京金融中心等各种不同结构预变形分析方法的应用及相关控制措施,并在每个工程最后给出了一些针对该类结构预变形方面的有意义的结论,希望能为工程技术人员制定合适的预变形控制方案提供工程依据。

感谢国家十一五科技支撑重点支持项目:现代建筑结构高效施工关键技术研究(2006BAJ01B00)之课题四:建筑结构高效施工关键技术研究(2006BAJ01B04),本书的研究工作是在该课题的资助下完成的。

本书是由中国建筑工程总公司组织编写,哈尔滨工业大学、中国建筑第三工程局、中国建筑第六工程局等单位参与完成。书稿的完成得到了共同参与单位的大力支持,在此感谢为本书做出贡献的广大科研人员与工程技术人员,感谢他们的辛勤努力。

由于水平有限,书中定有不足和欠妥之处,欢迎广大读者提出宝贵意见,以便进一步修改和提高。

目录

1 绪论 1

1.1 研究背景 1

1.2 研究现状 11

1.3 建筑结构施工预变形技术的必要性 34

2 建筑结构施工预变形控制技术 36

2.1 预变形基本概念 36

2.2 预变形分析方法及计算原理 37

2.3 施工预变形分析技术 41

2.4 大悬臂、悬挑结构预变形分析技术 48

2.5 预应力钢结构预变形分析技术 64

2.6 超高层混凝土筒体结构预变形分析 89

3 建筑结构施工预变形控制技术工程应用 94

3.1 预应力钢结构——大连体育馆主体弦支穹顶结构、
黄河口物理模型试验厅张弦网架结构 95

3.2 双向倾斜超大悬臂结构——CCTV 主楼钢结构 120

3.3 大跨度悬挑结构——巨人科技产业园 133

3.4 超高层混凝土筒体结构——广州珠江新城西塔、
深圳京基金融中心等 149

4 结束语 157

参考文献 159

1 绪 论

近年来随着时代的发展,象征国民经济实力的建筑业发展迅速,建筑师对建筑形式的要求越来越复杂。在当代复杂高层建筑及大跨结构施工过程中,对施工过程的控制越来越重视,技术人员纷纷加大了施工过程中结构的性能分析。

随着国民经济快速健康发展,计算分析手段的完善,结构材料性能的提高,加工工艺的进步和结构施工技术水平的提升,国内大量的大型公共建筑、造型新颖的高层及超高层建筑、特种建筑等纷纷出现。由于建筑效果上追求新、奇、特,高强高性能混凝土、型钢混凝土、钢、预应力技术等被大量采用,致使现代建筑物的造型突破传统、千变万化、千姿百态。本书根据工程应用,重点介绍了大悬臂结构、预应力钢结构、超高层混凝土筒体结构等施工预变形技术,并在此基础上提出工程建议。

1.1 研 究 背 景

1.1.1 结构规模大

随着建筑造型的新奇和复杂化,结构体系也更加复杂多样,刚性与柔性构件相组合的钢结构、空间预应力结构、悬挂与斜拉结构、多种体系组合形成的复杂结构已得到广泛应用。结构的复杂性表现在结构规模日益庞大,结构功能多,结构体系复杂,整个结构充分体现了高、大、复杂的特点。

(1) 大型复杂公共建筑

2008 奥运、2010 世博会、2010 广州亚运会等的相继召开,使大型公共建筑在我国得到了更进一步的发展和应用,典型的建筑见图 1.1.1-1~图 1.1.1-6。

(2) 复杂高层建筑

复杂高层建筑主要体现在三个方面:高度超限、结构平面布置不规则、结构竖向布置不规则。复杂高层建筑结构包括:带转换层高层建筑结构设计、巨型结构、连体结构、悬挂结构、带加强层的超高层建筑结构、超大悬挑结构、新型结构体系等。国内一些复杂高层结构见图 1.1.1-7~图 1.1.1-10。

超高层结构一直是建筑结构发展的热点方向,近年来更是发展迅速,国内外涌现出一大批富有影响力的超高层结构(如图 1.1.1-11~图 1.1.1-14),据不完全统计,世界上已建、在建及拟建的 400m 以上超高层建筑已达到 40 多座左右,结构极限高度不

断被刷新，如在建的哈利法塔，结构高度已经达到 828m。

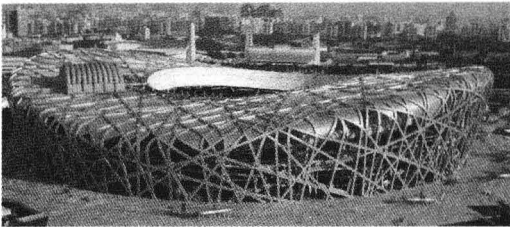


图 1.1.1-1 2008 奥运会国家体育场

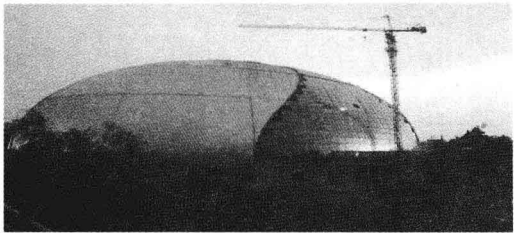


图 1.1.1-2 国家大剧院

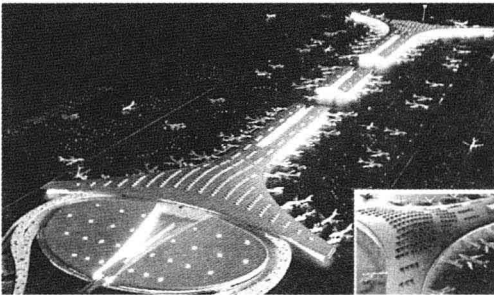


图 1.1.1-3 首都机场航站楼



图 1.1.1-4 水立方

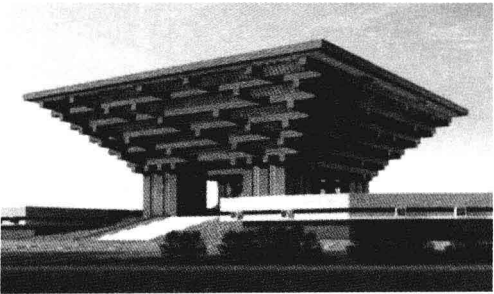


图 1.1.1-5 世博会中国馆



图 1.1.1-6 黄龙体育场

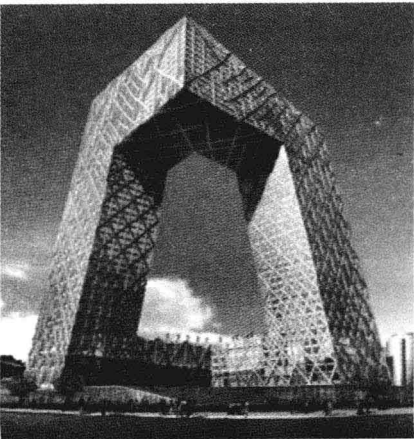


图 1.1.1-7 CCTV 主楼

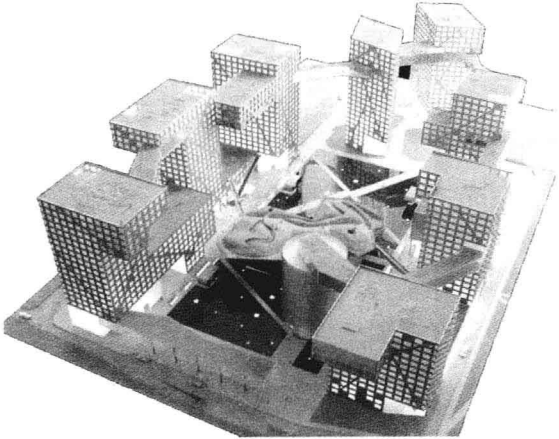


图 1.1.1-8 北京当代万国城



图 1.1.1-9 成都来福士广场

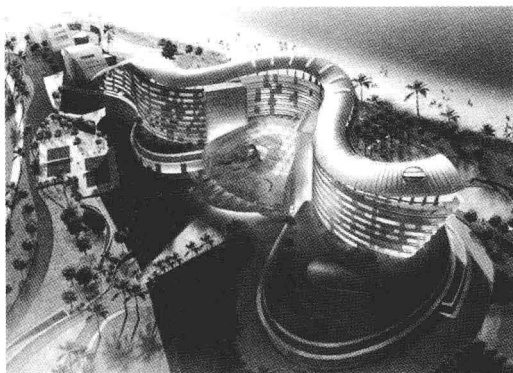


图 1.1.1-10 京基大梅沙

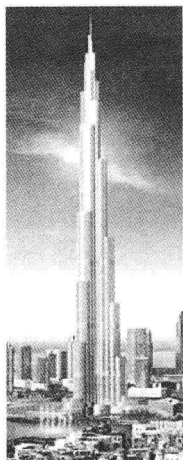
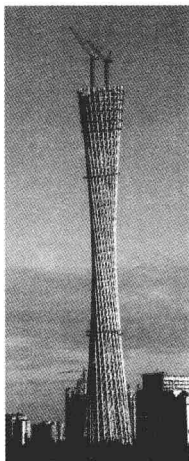
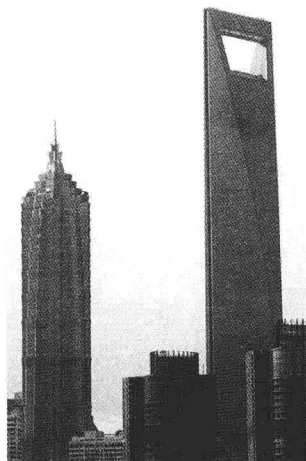
图 1.1.1-11 台湾
101 大厦

图 1.1.1-12 迪拜塔

图 1.1.1-13 广州新
电视塔图 1.1.1-14 上海金茂和
环球金融中心

(3) 复杂特种结构

建筑结构中除了常规的民用建筑和公共建筑外,还存在着大量的特种结构,如索膜结构、大型筒仓、卵形消化池、储油罐、水塔、冷却塔、高耸塔架、广告设施、摩天轮、游乐设施、过街天桥、皮带通廊等。很多特种结构的受力和施工过程也具有较大的特殊性,一些特种结构参见图 1.1.1-15~图 1.1.1-20。

1.1.2 结构体系复杂

在我国的现代化建设中,建筑业越来越成为对国民经济发展起重大作用的支柱产业。随着我国经济实力的增强,在基础设施建设方面的投入不断加大,且随着时代的发展,建筑师对结构形式的要求越来越复杂,一些代表现代建筑艺术的建筑形式纷纷涌现,若要满足建筑需要,与之对应的结构形式也必将随之复杂,因此大量复杂结构

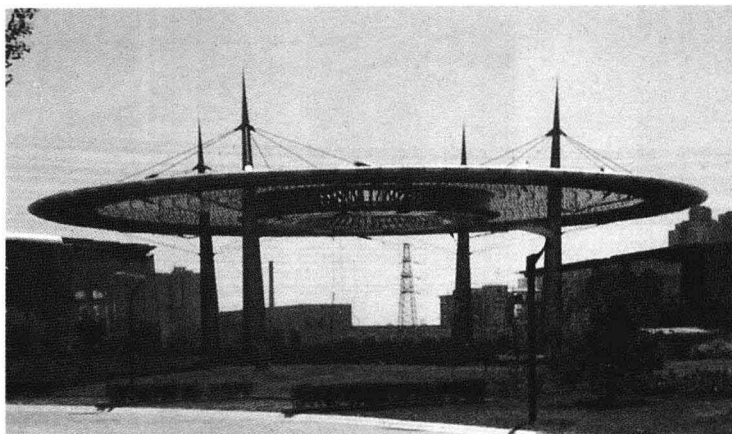


图 1.1.1-15 北京中关村
软件园



图 1.1.1-16 杭州湾大桥
海中观光塔

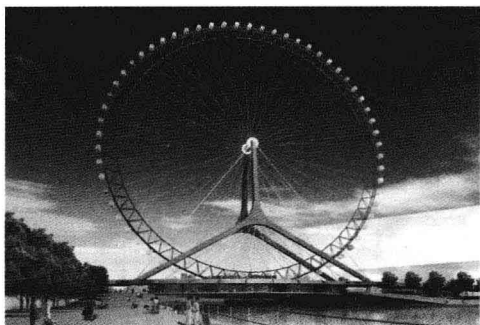


图 1.1.1-17 天津慈海桥摩天轮

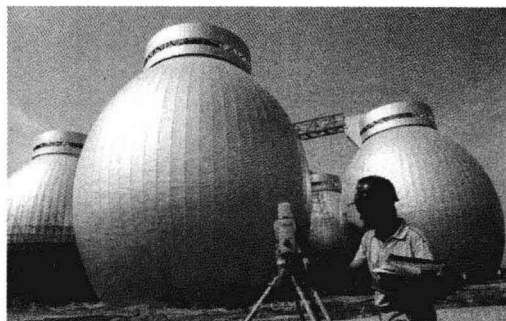


图 1.1.1-18 预应力卵形消化池

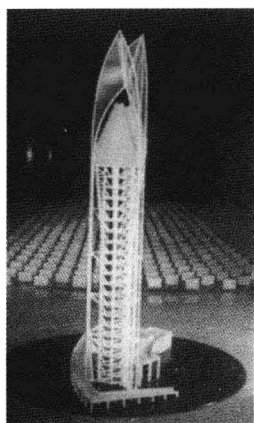


图 1.1.1-19 深圳愿望塔

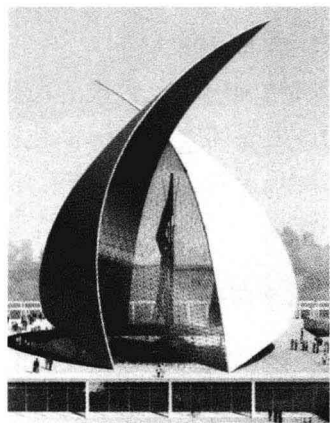


图 1.1.1-20 中国国家航海博物馆
帆体索网结构

形式纷纷被采用,以实现其建筑目标。其中不乏出现大跨度、大悬挑结构、预应力钢结构、弦支穹顶结构、超高层框架-筒体和筒中筒等结构。随着不断出现的新奇建筑造型,必然导致结构体系及节点构造的跟随演化,复杂奇异的建筑造型往往同时带来结构体系及节点连接的复杂化。

(1) 构造部位复杂的结构

连体结构、转换结构、收进和悬挑结构、悬挂结构(图 1.1.2-1)。

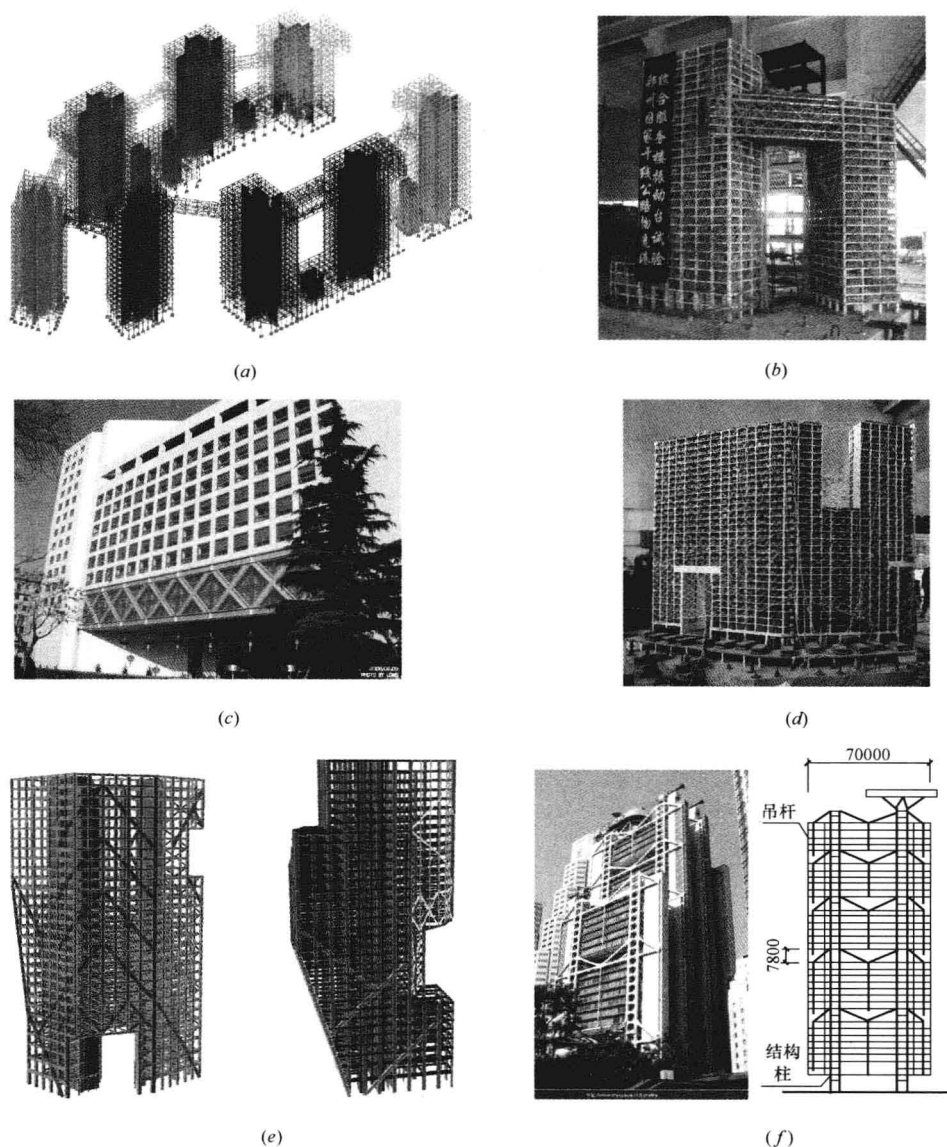


图 1.1.2-1 存在复杂部位的复杂高层建筑

(a) 万国城 Moma 弱连体结构; (b) 强连体结构; (c) 中国银行钢桁架转换结构;
(d) 深圳红树西岸梁式转换结构; (e) 成都来福士广场收进和悬挑结构; (f) 香港汇丰银行悬吊结构

(2) 受力体系复杂的结构

带伸臂桁架和带状加强桁架的超高层建筑、外部交叉网格结构、巨型结构、钢板剪力墙+外伸刚臂抗侧力体系、空间多面体延性钢架结构、多重结构体系 (图 1.1.2-2)。

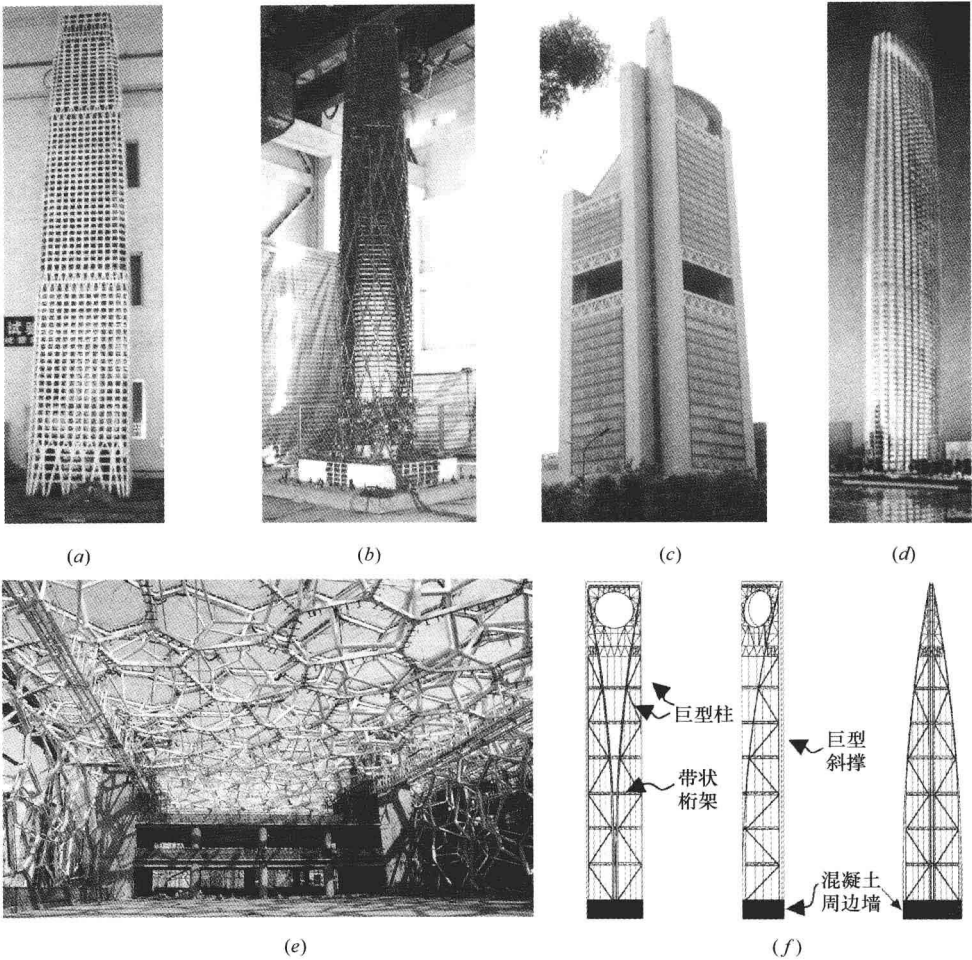


图 1.1.2-2 不同受力体系的复杂高层建筑

(a) 国贸三期带伸臂桁架和带状加强桁架; (b) 广州西塔交叉网格结构;

(c) 北京电视中心巨型框架; (d) 天津津塔钢板剪力墙;

(e) 2008 奥运会水立方空间多面体延性钢架结构; (f) 上海环球金融中心多重结构体系

(3) 大跨度及大悬挑结构

近年来,世界建筑师设计出了许多奇特的大型复杂钢结构建筑,例如西班牙马德里“欧洲之门”双斜塔 (图 1.1.2-3)、CCTV 新台址主楼 (图 1.1.2-4)、大连体育馆 (图 1.1.2-5)、国家体育场“鸟巢” (图 1.1.2-6) 等项目。

大悬挑钢结构结构如中央电视台新台址项目,建筑高度 234m,是国内最大的单体钢结构工程,钢结构用钢量达 12 万多吨。钢结构主要分布在塔楼 1、塔楼 2、悬臂、

裙楼四个部分,塔楼 1 悬臂外伸 67.165m,塔楼 2 悬臂外伸 75.165m,悬臂底标高 162.200m,共有 14 层,悬臂宽 39.1m。悬臂部分总重量为 13949t,其中 37~39 层部分为 4395t。深圳证券交易所营运中心工程裙楼为超长悬挑结构,距一层楼面约 36m,设有 3 层主楼层、1 层夹层和可上人的屋顶花园。平面尺寸东西长 162m,南北宽 98m,由桁架筒支撑,部分与塔楼钢结构结合为一体;南北向悬挑 22m,东西向悬挑 36m;采用巨型钢桁架结构。

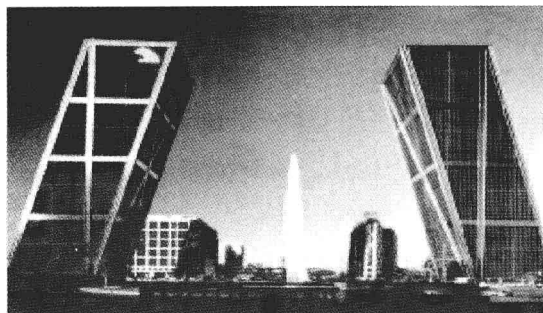


图 1.1.2-3 马德里“欧洲之门”双斜塔

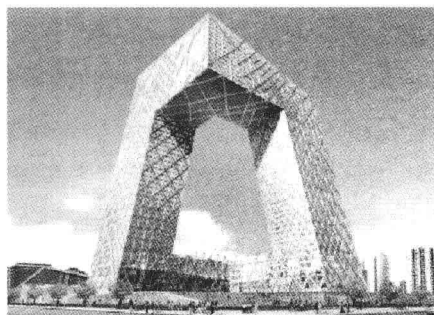


图 1.1.2-4 CCTV 新台址主楼

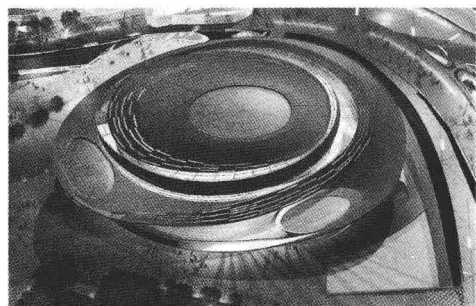


图 1.1.2-5 大连体育馆



图 1.1.2-6 国家体育场“鸟巢”

大跨度钢结构如国家大剧院钢结构壳体,该壳体东西长约 212m,南北约 144m,高约 46m,为一超大空间的壳体,整个钢壳体由顶环梁、梁架构成骨架;梁架之间由连杆、斜撑连接,总重约 6750t。国家体育场港机构主结构由 24 榀门式桁架组成,其中 22 榀是直线贯通或近似直线贯通。屋盖开口长轴方向(南北向)长度约为 185m,开口边缘接近跑道的外侧;短轴方向(东西向)约为 125m,边缘接近一层看台内侧。武汉火车站钢结构包括主拱结构、主拱屋面桁架结构、中间网壳结构、次拱及次拱屋面桁架结构、夹层结构、电梯井架结构以及票厅、步道、站台板、高架旅客平台、东西基本站台箱梁、扶梯、楼梯等其他附属钢结构。其中主拱结构最大跨度为 116m,次拱跨度为 36m,截面为锥状椭圆形。

(4) 预应力钢结构

预应力钢结构是近 30 年来发展最快的结构之一,涉及各种复杂的结构形式并与各种新型建材的发展密不可分;而与之相关的预应力钢结构施工技术,是集材料科学、结构力学分析理论与方法、高效安装技术与工艺于一体的综合性技术,全面反映了一个国家的综合技术实力。

预应力钢结构的特点之一是结构形式丰富多彩,而且其受力性能与结构形体之间存在着紧密的内在联系,因而其结构形式的不断创新是预应力钢结构发展过程的一个主要特点。而这一领域也为富有创新精神的工程师们提供了充分发挥其智慧和才能的广阔舞台。迄今为止,在预应力钢结构领域出现了许多令人称道的标志性工程。美国亚特兰大奥运会乔治亚体育馆(索膜结构,见图 1.1.2-7)、加拿大蒙特利尔体育场(图 1.1.2-8)、美国耶鲁大学冰球馆(索拱结构,见图 1.1.2-9)和我国南京奥体中心体育馆(图 1.1.2-10)等,这些建筑,造型优美、气势磅礴,给人留下了深刻的印象。随着经济的发展,成本造价已经不再作为结构形式取舍的唯一标准,融建筑技术与艺术于一体的结构形式越来越受到人们的青睐。

预应力钢结构是将现代预应力技术应用到网架、网壳、立体桁架等空间网格结构以及索、杆组成的张力结构中而形成的一类新型杂交结构体系。这类结构造型新颖、构思巧妙、受力合理、刚度大、重量轻、造价经济,二十多年来在大跨度公共与工业建筑中得到了广泛的应用,受到国内外工程界的关注和重视,其推广应用前景十分广阔。

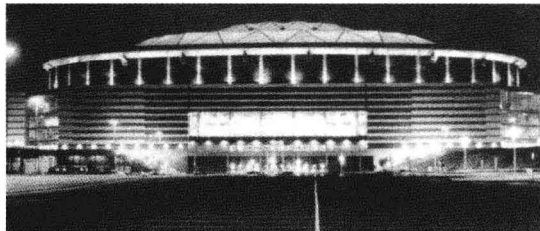


图 1.1.2-7 美国亚特兰大乔治亚体育馆

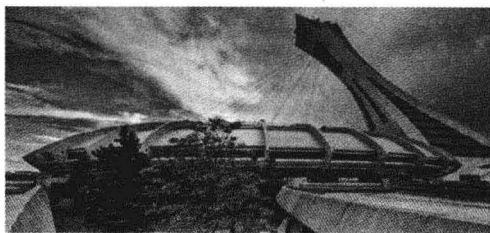


图 1.1.2-8 加拿大蒙特利尔体育场

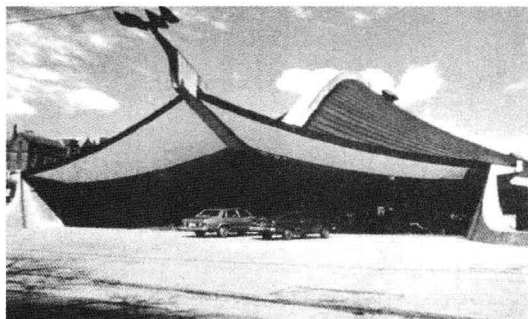


图 1.1.2-9 美国耶鲁大学冰球馆



图 1.1.2-10 南京奥体中心体育馆

1.1.3 施工技术复杂

针对项目的特殊要求,各种专门的施工技术和综合施工方法日益复杂,并不断

发展。

(1) 滑移施工技术

南京南站屋盖网架结构平面投影为矩形，中间局部略高，最高点高度为 58.164m，最低点高度为 41.200m，倾斜角度约 6° 。四周悬挑于柱外，其中南北端悬挑达 30m。网架南北方向长度 451.200m，东西方向最大宽度为 210.650m。整个网架结构面积约为 94032.8m²，投影面积约为 90337.1m²，钢结构重量约为 0.8 万 t，钢构件总数量约 3 万余件。采用高空累积滑移的施工方法。搭设高约 40.5m 的高空拼装滑移平台，在 4 条高空轨道上分 9 次滑移就位。

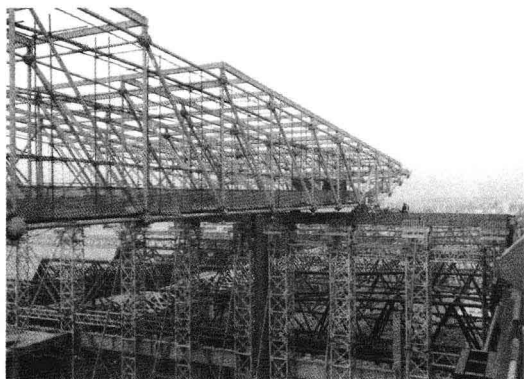


图 1.1.3-1 南京南站滑移施工

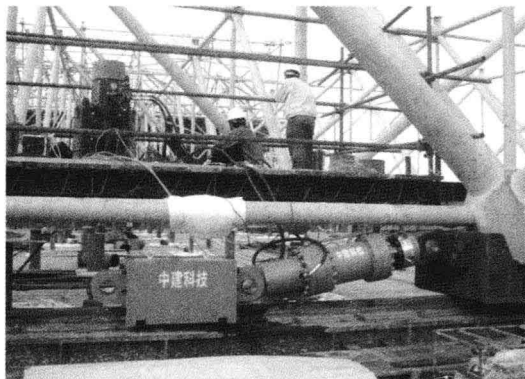


图 1.1.3-2 南京南站滑移施工节点

(2) 空中合龙技术

针对各种高空悬挑结构，为提高施工效率，节约工程成本，类似桥梁合龙施工的结构连接技术在建筑结构中得以应用。如 CCTV “两塔悬臂分离安装、逐步阶梯延伸、空中阶段合龙” 技术（图 1.1.3-3）。

(3) 整体成型后卸载

国家体育场钢结构屋盖呈双曲面马鞍形，东西轴长 298m、南北轴长 333m，最高点 69m、最低点 40m。钢结构由 24 榀门式桁架柱围绕着体育场碗状看台区旋转而成。

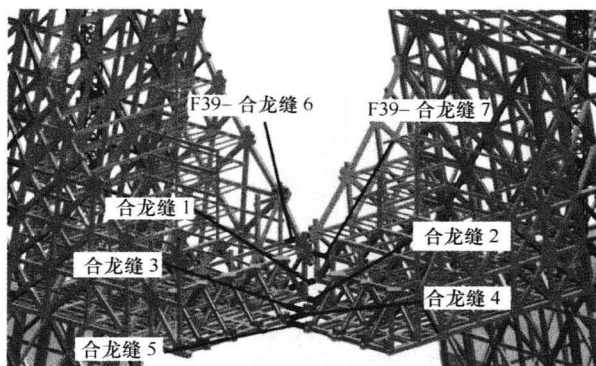
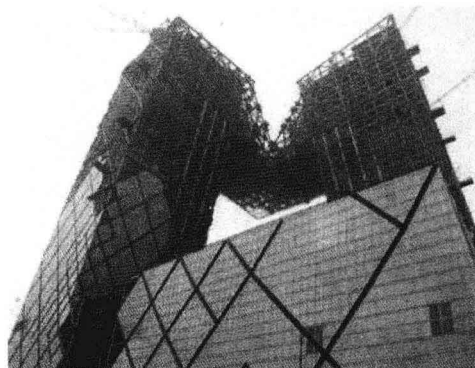


图 1.1.3-3 央视新址主楼大悬臂阶梯延伸、空中合龙

整体外观酷似“鸟巢”造型。国家体育场钢结构卸载分七步，每步又分五次进行，从14日上午8点开始，到17日中午11点10分结束。这次卸载的钢结构总重量达到14000t，卸载共设78个点，安装了156个千斤顶，采取分级同步卸载，分外圈、中圈、内圈三级统一布控，采用中央处理器控制，电脑统一发出指令，实施自动同步卸载的方法进行（图1.1.3-4）。

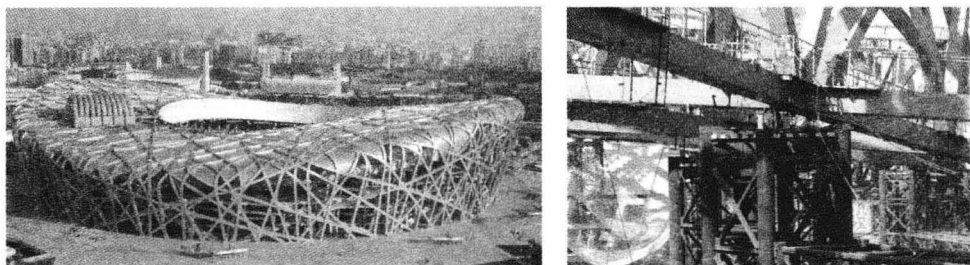


图 1.1.3-4 国家体育场卸载支撑点与顶升点

(4) 整体提升（图1.1.3-5～图1.1.3-6）

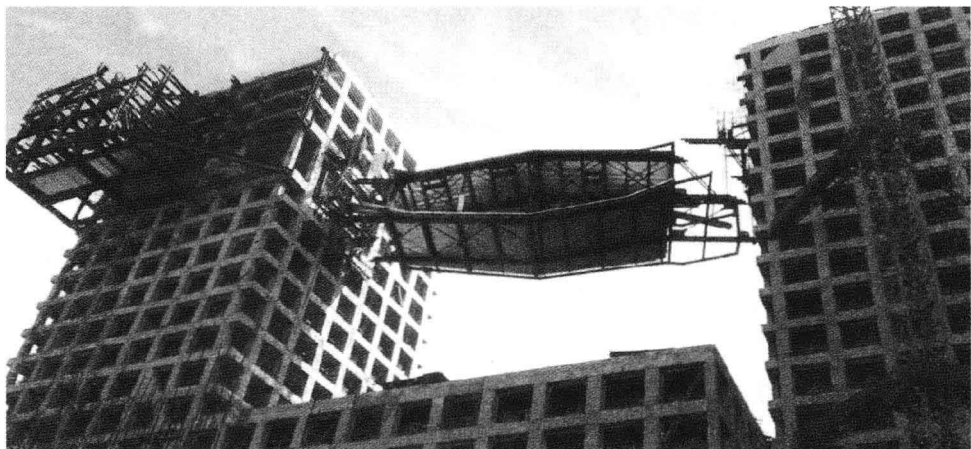


图 1.1.3-5 北京万国城连桥提升

(5) 关键构件后延迟施工技术（图1.1.3-7）

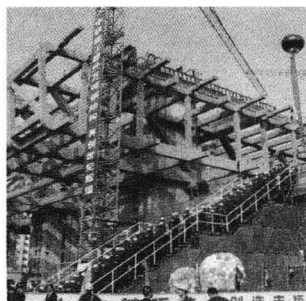


图 1.1.3-6 国家图书馆钢结构提升

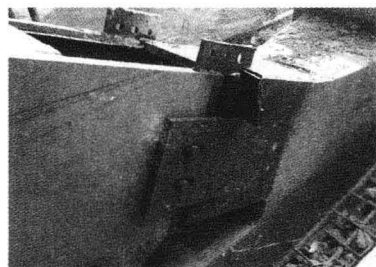


图 1.1.3-7 超高层建筑伸臂桁架后延迟连接

(6) 分节段施工旋转移位 (图 1.1.3-8)

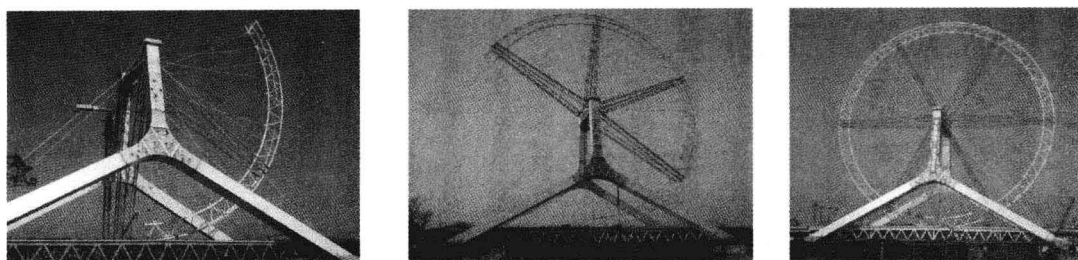


图 1.1.3-8 天津慈海桥摩天轮桥面拼装、转动移位

(7) 张拉弦钢拱架结构张拉滑移成型 (图 1.1.3-9~图 1.1.3-10)

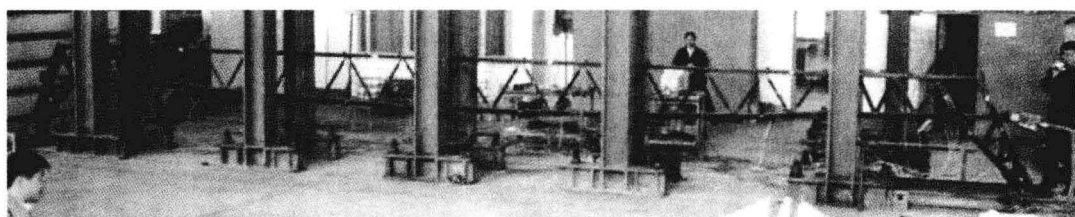


图 1.1.3-9 张弦拱架成型前

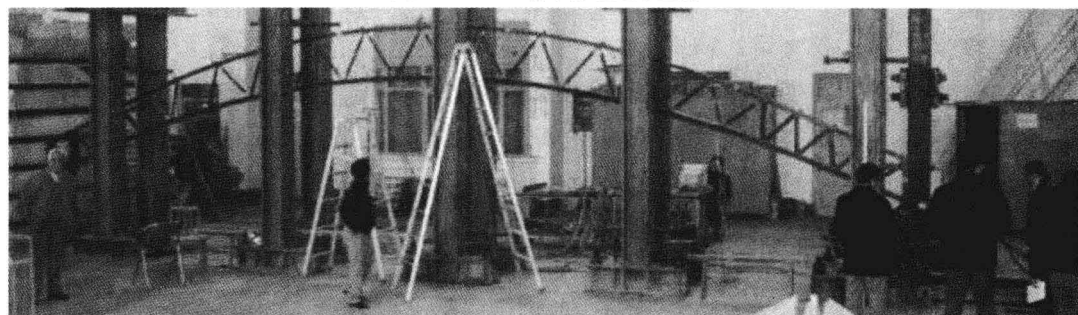


图 1.1.3-10 随着预应力的张拉, 张弦拱架成型

(8) 折叠结构整体提升形成结构 (图 1.1.3-11)

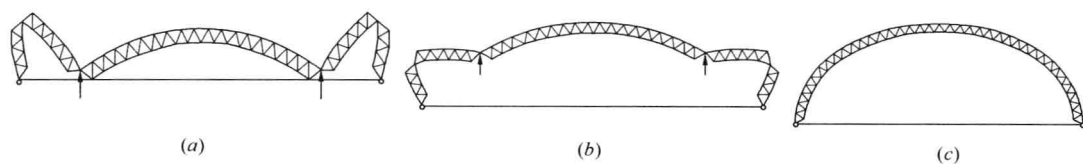


图 1.1.3-11 折叠网壳提升展开成型

(a) 地面安装, 准备提升; (b) 提升过程中; (c) 提升就位

1.2 研 究 现 状

本章针对具体的结构体系重点介绍在预变形分析技术研究中, 国内外的进展情况