

现代屋盖钢结构 分析与设计

主编 王仕统

编著 薛素铎 关富玲 陈务军

姜正荣 石开荣



中国建筑工程工业出版社

现代屋盖钢结构 分析与设计

主编 王仕统
编著 薛素铎 关富玲 陈务军
姜正荣 石开荣

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代屋盖钢结构分析与设计/王仕统主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2014.3
ISBN 978-7-112-16230-7

I. ①现… II. ①王… III. ①大跨度结构-钢结构-屋
盖结构-结构分析②大跨度结构-钢结构-屋盖结构-结构设
计 IV. ①TU231

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 306746 号

本书论述的现代屋盖钢结构包括: 屋盖弯矩结构与屋盖形效结构。全书共七章, 分别是绪论、网壳结构、膜结构、索穹顶结构、张弦梁结构、弦支穹顶结构和开合屋盖结构。其中, 张弦梁结构属于屋盖弯矩结构, 其他五种结构都是空间屋盖形效结构。本书内容详实, 可供土木工程设计、施工、监理、科技人员阅读, 并可作为大专院校土木工程高年级本科生、结构工程研究生教材。

* * *

责任编辑: 万 李 郇锁林

责任设计: 董建平

责任校对: 张 颖 赵 颖

现代屋盖钢结构分析与设计

主编 王仕统

编著 薛素铎 关富玲 陈务军

姜正荣 石开荣

*

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

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25 $\frac{3}{4}$ 插页 2 字数: 648 千字

2014 年 4 月第一版 2014 年 4 月第一次印刷

定价: 72.00 元

ISBN 978-7-112-16230-7

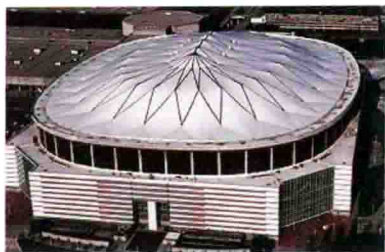
(24982)

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)





外景



膜片安装

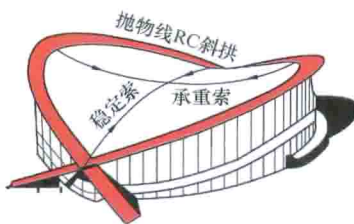


内景

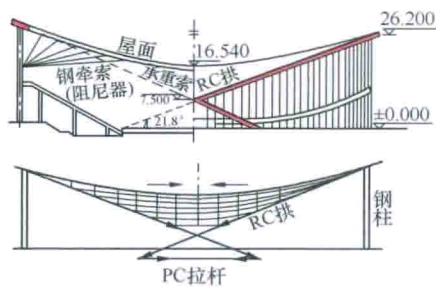
美国佐治亚索穹顶 (P. 4)



实景



马鞍形正交索网体系
美国雷里(Raleigh)竞技场(P.2)



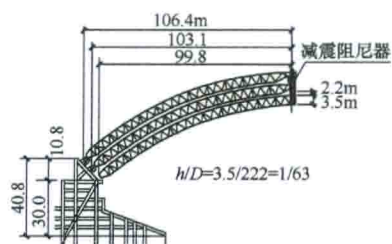
传力线闭合



关闭



开启

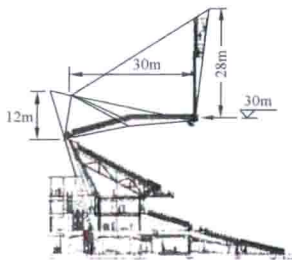


剖面

日本福冈(Fukuoka)开网壳穹顶 (P. 4)



实景



剖面

英国伦敦碗 (P. 4)



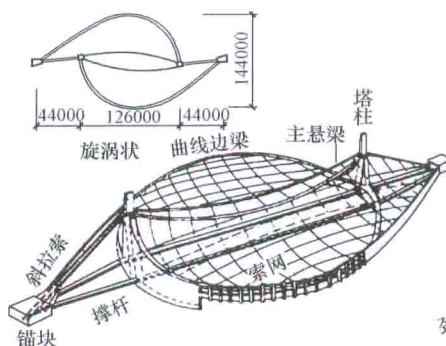
夜景



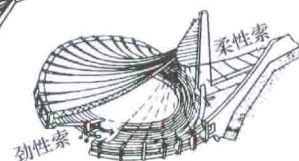
美国丹佛国际机场(张拉膜结构)



实景

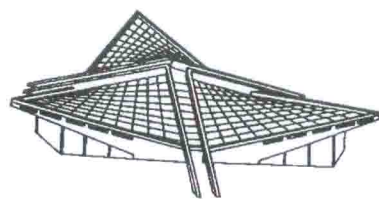
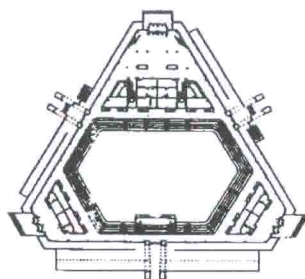


游泳馆



篮球馆

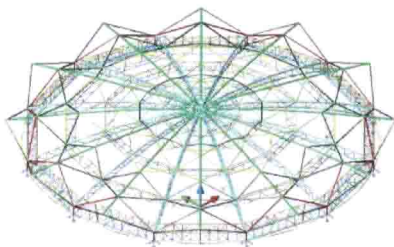
日本东京代代木大、小体育馆(P. 2, 柔性索、刚性索结构)



北京石景山体育馆(扭网壳结构)



外景



网壳

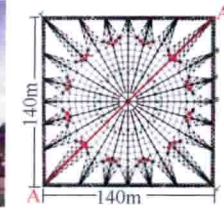


内景

深圳盐田综合体育馆(P. 19, 肋环网壳)



外景



采用方案

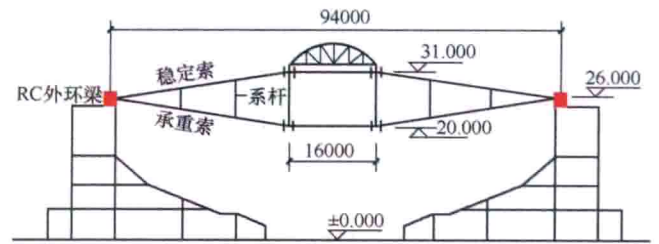


内景

深圳宝安体育馆 (P.36, 节点小型化)



实景

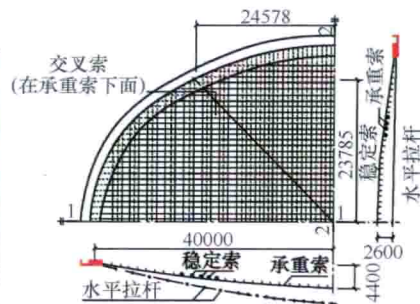


剖面

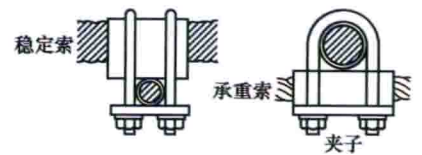
北京工人体育馆 (P. 13, 车辐式双层索结构)



外景



平面

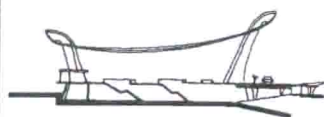


承重索与稳定索的连接

浙江省人民体育馆 (P.13, 鞍形悬索结构)



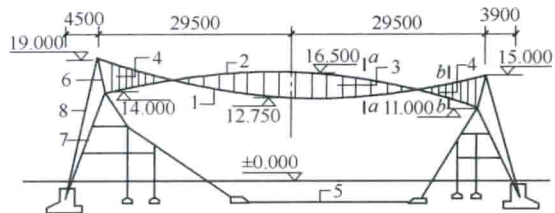
华盛顿杜勒斯机场候机楼 (一维索系)



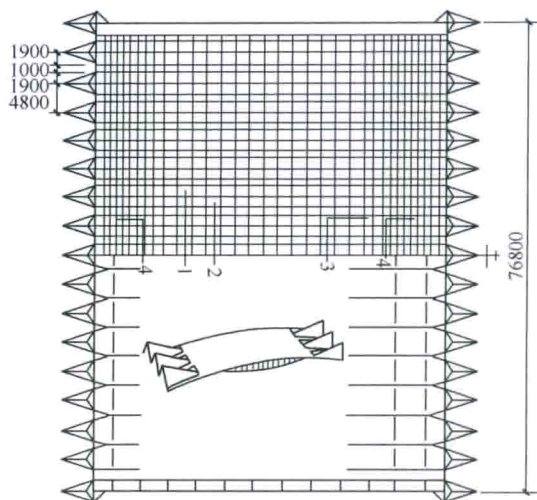
北京工业大学羽毛球馆 (弦支穹顶)



侧面实景



剖面



平面

吉林滑冰馆 (P. 14)



外景 —— 展翅欲飞的海鸥 (自然地显示结构)

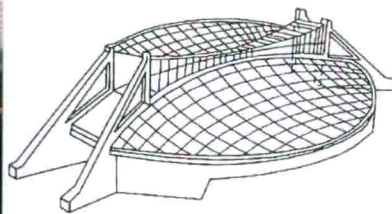


内景：腾空的魔棒 —— 凝固的音乐

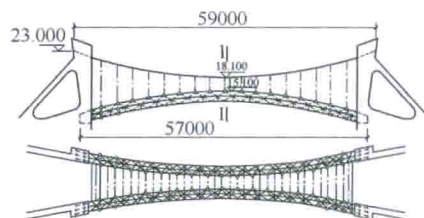
上海浦东国际机场第一期 (P. 17, 一维张弦梁结构)



效果图



结构全貌



结构平面

北京朝阳体育馆 (P. 16)

序一

《现代屋盖钢结构分析与设计》一书由王仕统教授主编，全书内容在王教授的精心编排下几乎涵盖了现代屋盖钢结构的各类结构形式，包括：网壳结构、膜结构、索穹顶结构、张弦梁结构、弦支穹顶结构和开合屋盖结构等。在6位作者的共同努力下，对各类屋盖结构的分析与设计，作了详实的阐述。该书对于结构工程专业的研究生而言，是一本很好的教学用书；对于结构工程领域的设计师而言，是一本很好的参考用书。

该书第一章绪论由王仕统教授执笔，这是一篇富有特色的绪论。王教授在绪论中阐述我国大跨度屋盖结构的现状时，既介绍了我国许多优秀屋盖结构，对采用的结构体系和结构布置作详细的介绍并列出每平方米的用钢指标以示其经济合理性外，也列举若干笨重和怪异屋盖钢结构的实例，描述了这些建筑凸显的重、怪、费等极不合理现象，以及这些现象与建筑设计理念和所采用的不合理结构体系之间的内在关联。我十分赞同并支持王教授采用这种对比的方式撰写绪论，能够让读者领会到由于设计师的素质差异，建筑结构可以设计得既美观又适用，达到节省资源、节省资金、符合可持续发展的精神，也可以设计成既怪又笨重，导致浪费资源、挥霍资金、相悖于应有的社会责任。这种对比能够给读者以启迪和警示。

王教授通过实例的对比，并根据自己的研究成果，提出了设计钢结构应遵循的“二、三、四”观点。他提出的按钢结构整体受力不同，将钢结构分成两大类的结构分类方法，对于设计者选用合理的结构方案和结构体系有很好的指导作用。他提出的结构设计应能体现钢结构固有的三大核心价值，应该重视精心设计的四大步骤等观点，对于设计者能够设计出既美观又适用、既经济又安全、既技术先进又施工方便的建筑将起到十分有用的指引作用。

纵观全书，它不但阐述了各类现代屋盖钢结构有关设计和构造的技术问题，而且还阐述了设计者在设计钢结构时应遵循的设计理念和方法，因此《现代屋盖钢结构分析与设计》是一本内容全面且具有特色的优秀的结构工程专业技术用书。我希望也深信该书的出版必将受到国内结构工程界广大人士的关注，对现代屋盖钢结构的设计和进展将起到良好的推动作用。

同济大学 教授
中国工程院院士

沈祖炎

2013年12月20日

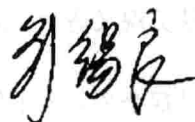
序二

该书由王仕统教授主编，全书不论在内容上或在编排上，都有很多创新及独创之处。全书主要体现了“现代”两字的含义，还特别提出一些创新观点。

全书包括绪论、网壳结构、膜结构、索穹顶结构、张弦梁结构、弦支穹顶结构及开合屋盖结构。各章都是根据各专家专业特长而编著，内容丰富新颖，如开合屋盖结构的编写者关富玲教授，她是我国开合结构的先驱和最早的开创者，具有丰富的理论及实践基础。其他如薛素铎教授、陈务军教授也都是业内该领域的知名专家。特别是主编王仕统教授由于具有深厚的力学功底、结构理论和工程设计实践，更是一名创新性极高的资深教授。从他写的绪论中“我国屋盖结构工程进展”一节可以看出他平时博览群书，掌握了大量材料，否则写不出这样丰富的内容。更突出的是王仕统教授提出的“钢结构设计的二、三、四观点”，具有很高的创新性，打破过去的旧观念，提出崭新的观点，十分可贵，这些观点引起了国内专家学者很高的关注与共识，特别是中年教授学者，反响更为强烈，如：李国强教授（同济大学）、葛家琦教授级高工（中国航空工业规划设计研究院）、王新堂教授（宁波大学）、徐伟良教授（浙江大学）、施刚教授（清华大学）、王玉银教授（哈尔滨工业大学）、李天教授（郑州大学）、赵秋红教授（天津大学）、杜文风教授（河南大学）、吴波教授（华南理工大学）等都给“二、三、四观点”很高的评价。

希望该书很快出版，能引起国内工程结构界广大人士更多的关切和听到更多的呼声。

天津大学 教授



2013年10月1日

前言

现代钢结构的特点是：(1) 采用轻质高强材料；(2) 采用现代结构分析方法——结构优化理论、结构减震控制理论和预应力理论。20 世纪 60 年代世界著名的美国结构师、建筑师富勒 (R. B. Fuller) 主要从形态学 (Morphology) 出发，利用拓扑原理 (Topology Principle)、非线性特性和自平衡准则，提出结构哲理：少费多用 (More with Less)，即用最少的结构提供最大的结构承载力。工程案例有：1988 年盖格 (D. H. Geiger) 在第 24 届韩国汉城奥运会——汉城体操馆中首次采用索穹顶 (Cable Dome)，直径 $D=120\text{m}$ ，屋顶用钢量： $15\text{kg}/\text{m}^2$ ；1996 年列维 (M. Levy) 设计的美国亚特兰大第 26 届奥运会主体育馆——佐治亚 (Georgia) 索穹顶，椭圆平面： $240.79\text{m}\times 192.02\text{m}$ ，屋顶用钢量： $30\text{kg}/\text{m}^2$ ；2012 年英国伦敦第 30 届奥运会主会场——伦敦碗，是一座真正的绿色建筑，8 万个座位，用钢量仅 $90\text{kg}/\text{m}^2$ ，等等。

钢结构行业包括设计与施工 (制造、安装)，轻盈的钢结构必须从设计开始——设计是龙头。因此，在进行现代钢结构设计时，不是简单地使用设计软件，而必须正确选择结构方案和正确估计结构截面高度，否则，所谓的优化设计是徒劳的。编者认为，钢结构的用钢量是衡量结构设计优劣的最重要指标之一。不谈用钢量，狂热追求钢结构建筑亚洲第一高、世界第一跨是不科学的。

为了实现最简洁结构 (非复杂结构) 就是最好结构的理念，提高我国钢结构的结构效率，实现钢结构固有的三大核心价值——最轻的结构、最短的工期和最好的延性，书中提出的关于钢结构设计的二、三、四观点，希望引起同仁们的关注。

现代钢结构包括屋盖钢结构和高层全钢结构等。本书论述现代屋盖钢结构的分析与设计等。本书由王仕统教授主编，参加编著的有：

- | | |
|--------------|-----------------|
| 第 1 章 绪论 | 王仕统教授 (华南理工大学) |
| 第 2 章 网壳结构 | 王仕统教授 (华南理工大学) |
| 第 3 章 膜结构 | 陈务军教授 (上海交通大学) |
| 第 4 章 索穹顶结构 | 薛素铎教授 (北京工业大学) |
| 第 5 章 张弦梁结构 | 姜正荣副教授 (华南理工大学) |
| 第 6 章 弦支穹顶结构 | 石开荣副教授 (华南理工大学) |
| 第 7 章 开合屋盖结构 | 关富玲教授 (浙江大学) |

限于编著者理论与设计水平，不妥之处，敬请批评指正，以便作进一步修改和完善。



2014 年 1 月 5 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 结构哲理	8
1.2 我国屋盖钢结构的进展	12
1.2.1 优秀屋盖钢结构	12
1.2.2 笨重、怪异屋盖钢结构	21
1.3 钢结构设计的二、三、四观点	25
1.3.1 结构分为两大类——弯矩结构和轴力结构	25
1.3.2 钢结构固有的三大核心价值	31
1.3.3 钢结构精心设计的四大步骤	34
1.4 结语	36
参考文献	37
第 2 章 网壳结构	39
2.1 薄壳的概念	41
2.1.1 定义与分类	41
2.1.2 切割与组合	44
2.1.3 薄壳的内力	48
2.2 网壳类型	60
2.2.1 单层网壳	60
2.2.2 双层网壳	63
2.3 网壳分析方法	71
2.3.1 空间刚架位移法	72
2.3.2 空间桁架位移法	76
2.4 网壳设计	76
2.4.1 单层网壳的常用形式	76
2.4.2 一般规定	78
2.4.3 节点设计	79
2.5 网壳结构的稳定性	89
2.5.1 失稳	89
2.5.2 稳定承载力计算公式	92
2.6 地震作用下网壳的内力计算	94
2.6.1 网壳结构的抗震分析	94
2.6.2 地震作用下网壳结构的内力计算	96
2.7 网壳的温度应力和装配应力	97

参考文献	98
第3章 膜结构	100
3.1 国内外膜结构发展概况	100
3.1.1 国外膜结构发展概况	100
3.1.2 国内膜结构发展概况	103
3.2 膜材及特性	106
3.2.1 膜材构成与分类	106
3.2.2 膜材特性	110
3.2.3 膜材弹性常数测试与计算方法	113
3.3 膜建筑设计	125
3.3.1 膜建筑设计年限	125
3.3.2 膜建筑造型	126
3.3.3 膜建筑光环境	130
3.3.4 膜建筑热环境	132
3.3.5 膜建筑声学环境	134
3.3.6 膜建筑设计要素	135
3.4 膜结构设计分析	137
3.5 膜结构设计分析理论与方法	152
3.5.1 找形分析力密度法	152
3.5.2 找形分析动力松弛法	155
3.5.3 找形分析几何非线性有限元法	159
3.5.4 荷载分析理论与方法	161
3.5.5 膜裁剪分析理论与方法	163
3.6 钢索的特性与设计	166
3.6.1 钢索术语	166
3.6.2 钢索形式与特点	167
3.6.3 钢索防腐	172
3.6.4 钢索锚具、锚固与连接	173
3.6.5 钢索强度设计	177
3.7 节点细部设计	178
3.7.1 一般设计原则	178
3.7.2 膜节点	179
3.7.3 膜柔性边界节点	182
3.7.4 膜刚性边界节点	185
3.7.5 膜角隅节点	186
3.7.6 膜脊谷节点	188
3.7.7 膜顶节点	191
3.7.8 膜面张力导入机制	192

参考文献	194
第4章 索穹顶结构	199
4.1 张拉整体结构概述	199
4.1.1 张拉整体结构的发展简史	199
4.1.2 张拉整体结构的特点	202
4.2 索穹顶结构的概念、分类、特点及研究概况	203
4.2.1 概念	203
4.2.2 分类	204
4.2.3 特点	207
4.2.4 研究概况	207
4.3 索穹顶结构的形态分析	209
4.3.1 概述	209
4.3.2 体系的几何稳定性判定	210
4.3.3 体系的形态分析	214
4.4 索穹顶结构的受力性能	219
4.4.1 两节点曲线索单元	219
4.4.2 静力性能	222
4.4.3 动力特性	223
4.4.4 风振分析	225
4.5 索穹顶结构的施工及节点构造	226
4.5.1 实际工程的施工步骤	227
4.5.2 施工分析方法	227
4.5.3 节点构造	231
4.6 索穹顶结构的工程实践	232
4.6.1 主要工程简介	232
4.6.2 伊金霍洛旗体育中心索穹顶结构工程	237
4.7 劲性支撑穹顶结构	244
4.7.1 劲性支撑穹顶结构的提出	244
4.7.2 拓扑形式的确定	246
4.7.3 结构的分类和特点	248
4.7.4 静力性能	249
4.7.5 施工方法	252
参考文献	253
第5章 张弦梁结构	256
5.1 概述	256
5.1.1 概念	256
5.1.2 分类	256
5.1.3 应用	257

5.2 竖向荷载作用下的静力性能	261
5.2.1 力学特性和受力特点	261
5.2.2 形态定义	264
5.2.3 单槓张弦梁结构的受力性能	264
5.2.4 正交式布置二维张弦梁结构的受力性能	266
5.3 预应力设计方法	270
5.3.1 预应力的作用和引入方法	270
5.3.2 预应力合理取值的原则和方法	270
5.3.3 预应力损失的分析与补偿方法	272
5.4 稳定性分析	274
5.4.1 局部稳定性	274
5.4.2 整体稳定性	276
5.5 风振响应分析	281
5.5.1 风振响应计算方法	281
5.5.2 一维张弦梁结构的风振响应分析	284
5.5.3 正交式布置二维张弦梁结构的风振响应分析	288
5.6 节点构造	290
5.6.1 支座节点	290
5.6.2 撑杆与拱节点	290
5.6.3 撑杆与拉索节点	291
参考文献	292
第6章 弦支穹顶结构	295
6.1 概述	295
6.1.1 概念及特点	295
6.1.2 分类	296
6.1.3 工程应用	302
6.2 结构的预应力设计方法	305
6.2.1 预应力设计的两个层次	305
6.2.2 自平衡逐圈确定法	306
6.3 静力性能及稳定性	310
6.3.1 基本静力特性	310
6.3.2 静力性能的参数影响分析	311
6.3.3 基本稳定性能	321
6.3.4 稳定性的参数影响分析	323
6.4 动力性能	328
6.4.1 自振特性	328
6.4.2 基本地震反应分析	330
6.4.3 地震反应的参数影响分析	337

6.5 施工技术	345
6.5.1 上部刚性层结构施工	345
6.5.2 下部索杆体系施工	347
6.6 节点构造	351
6.6.1 节点设计总体原则	352
6.6.2 撑杆上节点	352
6.6.3 撑杆下节点	352
参考文献	353
第7章 开合屋盖结构	355
7.1 开合屋盖结构综述	355
7.1.1 开合屋盖结构的概念与名称定义	355
7.1.2 开合屋盖结构的分类	356
7.1.3 开合屋盖结构的发展历史、现状和趋势	363
7.2 开合屋盖结构的设计要点	366
7.2.1 建筑方案设计中的考虑要素	367
7.2.2 开合方式及使用条件的确定	369
7.3 结构设计中的考虑要素	370
7.3.1 荷载及外力	370
7.3.2 开合屋盖的结构体系	380
7.4 开合屋盖结构工程实例介绍	388
7.4.1 工程概况	388
7.4.2 开合屋盖设计准则	388
7.4.3 开合方式的选取	389
7.4.4 屋面部分结构方式选取	389
7.4.5 轨道部分及支座设计	390
7.4.6 荷载与状态分析	391
7.4.7 开合屋盖静力计算分析	391
7.4.8 节点细部设计和分析	396
7.4.9 驱动方式	397
7.4.10 控制系统	398
7.4.11 计算结构分析及工程设计总结	399
参考文献	401

第 1 章 绪 论

关于现代结构，美国著名结构大师、康奈尔大学厄卡尔特（L. C. Urquhart）教授有如下一段精彩论述：

Modern structural engineering tends to progress toward more economic structures through gradually improved methods of design and the use of higher strength materials. This results in a reduction of cross-sectional dimensions and consequent weight savings. 通过逐步改进设计方法和采用高强材料，将会使现代结构工程向着更经济的结构形式发展，这也会使构件的截面尺寸减小，自重减轻。

由于钢材具有较高的强度，因此，由型钢、钢板、钢棒和高强钢丝（钢绞线）等连接（焊缝、高强度螺栓）而成的钢结构骨架（不开裂结构），就具有绿色建筑的特点。表 1-1 所示的是钢结构与绿色建筑的特质比较。

特 质 比 较

表 1-1

现代钢结构	绿色建筑
结构哲理：少费多用 钢结构的三大核心价值： 最轻的结构 最短的工期 最好的延性	绿色建筑 在建筑全寿命周期内，最大限度地节约资源（节能、节地、节水、节材），保护环境和减少污染，为人们提供健康、适应和高效的使用空间，与自然和谐共生的建筑

注：建筑全寿命周期（Building Life Cycle）——从建筑物的选址、设计、建造、使用、维护、拆除到处理废弃建材（垃圾回收或二次能源再利用）的整个过程。

1991 年兰达·维尔和罗伯特·维尔合著《绿色建筑——为可持续发展而设计》，即开启了发达国家探索可持续建筑之路，名为“绿色建筑挑战”，即，①采用轻质高强材料；②采用现代结构分析方法——结构理论、结构减震控制理论和预应力理论，实行综合化设计，使建筑在满足功能时所耗资源、能源最少。最伟大的美国发明家富勒（R. B. Fuller）提出的结构哲理：少费多用（More with Less）^[1,3]——用最少的结构提供最大的结构承载力（Doing the Most with the Least），是富勒科学发展观新思维的设计准则，也是现代结构与形态学、拓扑学研究的目标。优良的钢结构必须是结构骨架节材，墙体节能，最大限度地满足功能，最低限度地影响环境，为人们提供健康、舒适的活动空间，并能在建筑全寿命周期内，满足可持续发展理念。在大跨度屋盖钢结构和高层全钢结构中，100 多年来，世界先进国家大量采用钢结构，并能基本上实现钢结构固有的三大核心价值（表 1-1）。世界先进国家的钢结构建筑和构筑物已达 50%、日本高达 70% 以上，而我国不到 3%，97% 以上仍为混凝土、砌体结构等，可见，我国钢结构行业（设计与施工）仍有十分巨大的发展空间。关键是提高设计水平。

在大跨度屋盖钢结构和多高层钢结构设计中，千方百计减少结构自重（用钢量），将成为钢结构设计工程师力学功底、设计理论和材料选用的试金石。

世界屋盖跨度最大、造型最美、最绿色的空间屋盖形效钢结构，如图 1-1～图 1-8 所示。

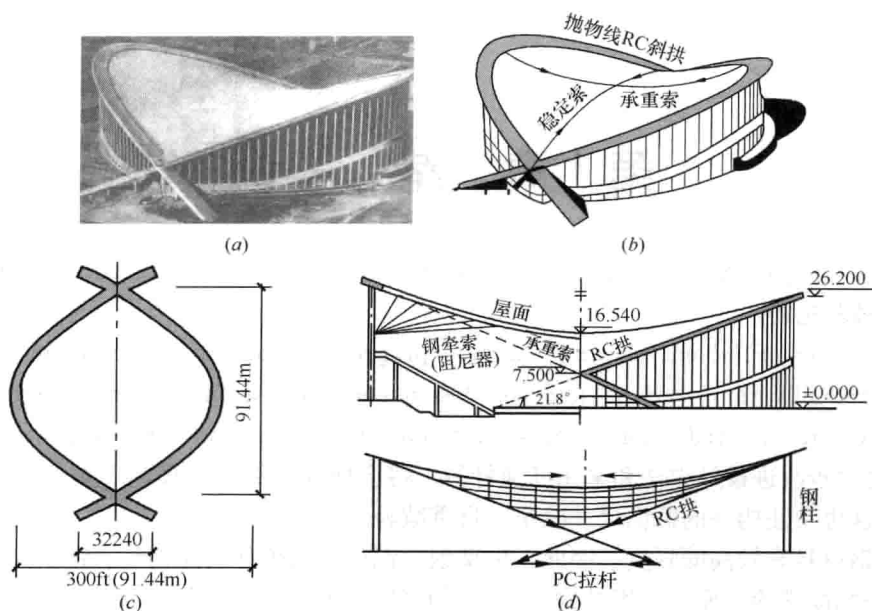


图 1-1 美国雷里竞技场 (Raleigh Arena)^[4]
(a) 实景; (b) 马鞍形正交索网体系; (c) 平面; (d) 传力线闭合 (斜拱与地面线 21.8°)
注: 为世界第 1 个现代化索结构屋盖, 屋顶用钢量 $30\text{kg}/\text{m}^2$, 1953 年。

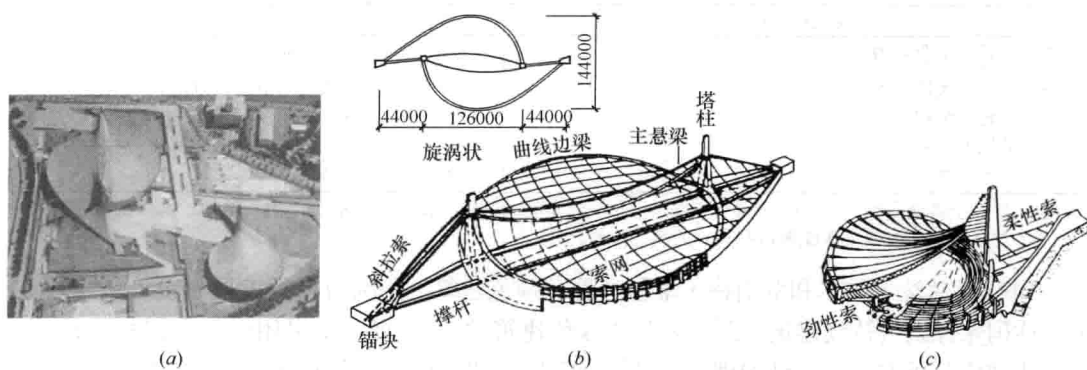


图 1-2 日本东京代代木大、小体育馆^[5]
(a) 实景; (b) 游泳馆 ($D=130\text{m}$); (c) 篮球馆 ($D=65\text{m}$)
注: 第 18 届奥运会主场馆, 1964 年。

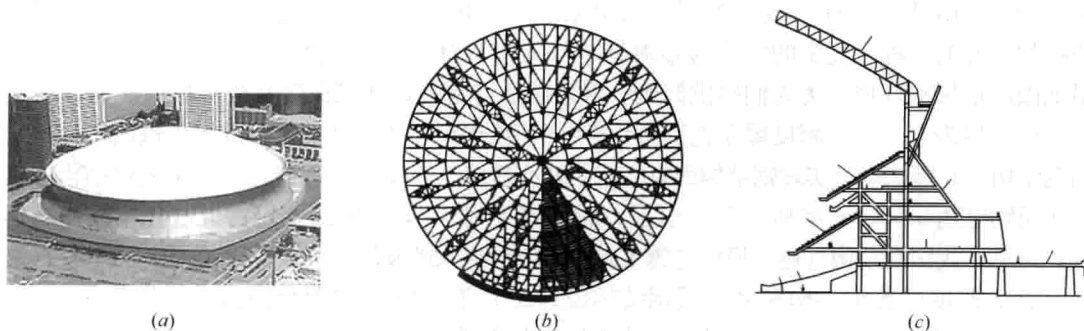


图 1-3 美国新奥尔良体育馆^[6,7]
(a) 实景; (b) 平行联方型网格 (K12); (c) 剖面和边缘构件
注: 凯威特 (Kiewitt) 型双层网壳, 厚跨比 $h/D=2.24/213=1/95$, 用钢量 $126\text{kg}/\text{m}^2$, 1973 年。