

土木工程研究生系列教材

大跨空间结构

张毅刚 薛素铎 杨庆山 范 峰 编著
沈世钊 主审

第2版

土木工程研究生系列教材

大跨空间结构

第2版

张毅刚 薛素铎 杨庆山 范 峰 编著
沈世钊 主审



机械工业出版社

本书系根据土木工程研究生系列教材编委会的要求编写的。书中详细地介绍了大跨空间结构的发展历程,主要大跨空间结构体系的分类、分析理论、设计基础和研究发展趋势,以及正在发展中的大跨空间结构新体系。全书内容包括绪论、网架结构、网壳结构、悬索结构、薄膜结构和大跨空间结构新体系。

本书除作为土木工程研究生教材外,还可以作为土建设计与工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大跨空间结构/张毅刚等编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2013. 11

土木工程研究生系列教材

ISBN 978-7-111-44316-2

I. ①大… II. ②张… III. ①大跨空间结构-空间结构-研究生-教材 IV. ①TU35

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第240402号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘涛 责任编辑:刘涛 臧程程

版式设计:霍永明 责任校对:潘蕊

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2014年1月第2版第1次印刷

184mm×260mm · 24.75印张 · 615千字

标准书号:ISBN 978-7-111-44316-2

定价:58.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

土木工程研究生系列教材编审委员会

顾问: (以姓氏笔画为序)

刘宝琛	刘祖德	刘怀恒	王正宏	林 皋
任爱珠	朱博鸿	沈世钊	沈祖炎	欧进萍
陈英俊	周 氏	周锡元	钟善桐	赵国藩
殷宗泽	顾晓鲁	蔡美峰		

主任委员: 江见鲸

副主任委员: (以姓氏笔画为序)

朱合华	李宏男	李 奇	李爱群	陈云敏
张永兴	杜修力	张素梅	尚守平	姜忻良
夏 禾	徐志胜	廖红建		

委员: (以姓氏笔画为序)

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩	朱召泉
李正良	李英民	李洪泉	李鸿晶	刘晶波
吴知丰	陈国兴	杨果林	张家生	张毅刚
张耀春	郑 刚	易伟建	单 建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清良	盛宏玉

序

在实际的三维世界里,任何结构本质上都是空间性质的,只不过出于简化设计和建造的目的,人们在许多场合有条件地把它们分解成一片片平面结构来进行构造和计算。这样就形成了桁架、拱、框架等大家熟悉的各种平面结构形式。与此同时,无法进行简单分解的真正意义上的空间体系始终没有停止其自身的发展,而且日益显示出一般平面结构无法比拟的丰富多彩和创造潜力,体现出大自然的美丽和神奇。空间结构的卓越工作性能不仅仅表现在三维受力,而且还在于它们通过合理的曲面形体来有效抵抗外荷载的作用。当跨度增大时,空间结构就越能显示出它们优异的技术经济性能。事实上,当跨度达到一定限度后,一般平面结构就往往难以成为合理的选择。从国内外工程实践来看,现代的大跨度建筑多数采用各种形式的空间结构体系。

我国虽然是一个发展中国家,但由于国大人多,随着国力的不断增强,要建造更多更大的体育、休闲、展览、航空港、机库等大空间或超大空间建筑物,以满足经济发展和社会进步的需求,而且这种需求在一定程度上可能超过许多发达国家。这是我国空间结构领域面临的巨大机遇。事实也是如此,20世纪90年代以来,我国各种类型的大跨空间结构进入协调发展阶段,工程项目逐年增大,结构形式趋向多样化,出现了越来越多的创新设计,理论研究也逐渐配套,形势相当喜人。在这一过程中,锻炼培养了一支精炼能干的技术队伍和研究队伍。一批优秀的空间结构企业也已经或正在茁壮成长。可以预期,随着我国经济和社会的发展,空间结构将会继续以较快的速度向前迈进。

在此背景下,许多高等学校的土木工程学科设立了大跨空间结构研究方向,并为研究生系统开设这门课程。十余年来也陆续出版了一些关于网架结构、网壳结构、索结构和膜结构的专门著作,为空间结构的研究、设计和教学工作提供了有价值的参考资料。但与此同时,我也经常感到,多年来一直缺乏一本内容全面深入、篇幅恰当、概念清晰而文字表达又简明易懂、适合研究生学习的教学用书,使我们在教学中深感不便。根据我的体会,这本书应当覆盖空间结构的各主要类型;内容要适当综合一些,不仅限于各种空间结构的计算分析,还应当较充分地介绍这些结构的构造设计和有关材料及施工工艺方面的内容,讨论与建筑构思密切相关的结构方案与概念设计方面的内容;并应当收集较多的国内外优秀空间结构作品,进行案例介绍和分析;关于各类空间结构的受力性能和计算分析,则要避免连篇累牍的力学推导,而应当把重点放在理论思路的提炼和概念的阐述上。此外,由于空间结构是一门正在迅速发展的新兴学科,这本书应当尽可能把最新的研究成果消化总结,融入有关章节,并适当介绍各类空间结构的研究动态和发展趋势。我认为,出版这样一本著作对促进我国空间结构学科的人才培养有重要意义。

因此,当听说北京工业大学张毅刚教授和薛素铎教授发起,并邀约北京交通大学杨庆山

教授和哈尔滨工业大学范峰教授，拟共同编写出版这样一本教科书时，我就感到十分高兴。后来看到了书稿，觉得他们写这本书的指导思想同我上面说的那些想法相当接近。这几位学者长期从事空间结构方面的研究、教学和工程咨询工作，积累了丰富的经验；写作态度也十分严谨。可以看出，为了使这本书既能反映空间结构学科的实际发展状况，又符合研究生教学及广大设计技术人员学习的需要，作者们是付出了巨大努力的。我相信，这本书的出版将会对我国空间结构学科研究生的培养发挥重要作用。同时，也会对广大设计技术人员系统学习空间结构提供重要帮助。不能说这本书已尽善尽美；任何一本优秀教材均需要通过教学实践千锤百炼，并不断从学科发展中吸取新的养料，及时修订再版，使其日益臻于完善；我也以此寄望于作者。爰为之序。

沈世钊

于哈尔滨工业大学

第2版前言

本书第1版出版以来,得到读者的厚爱,笔者收到许多宝贵意见和建议。原本主要是面对研究生的教材,也受到了工程设计人员的欢迎,成为他们全面了解空间结构的参考资料。第1版的书稿写成于2004年,算上收集资料、整理、写作的时间,距今已有10年多了。10年来大跨度空间结构的各种形式发展迅速,工程实践日趋广泛,研究工作也取得了许多新成果。相关的JGJ 7—2010《空间网格结构技术规程》和JGJ 257—2012《索结构技术规程》已经颁布,CECS 158:2004《膜结构技术规程》也在修订中。因此,本书需要进行必要的修订和补充,以跟上大跨度空间结构的发展形势,为读者提供及时有用的参考资料。

本书此次再版时在保持研究生教材特点的基础上,适当地考虑了工程技术人员的需求。第1章替换了一些更为清晰的图片,补充了一些新的信息。第2章和第3章主要结合JGJ 7—2010《空间网格结构技术规程》进行了相关的修订。近10年来索结构发展最快,读者也最为关心,因此第4章变动较大,增加了悬挂薄壳与悬挂钢膜、悬索结构的方案设计的内容,并在附录中给出了常用索的截面规格便于读者参考。第5章增加了薄膜结构的动力特性与反应分析一节,主要介绍膜结构的风振问题;增加了充气式薄膜结构一节,结合近年的发展补充了ETFE膜材性能和充气式薄膜结构的分析以及膜结构施工要点。近年来索结构中应用较多的属张弦结构,因此第6章增加了一节,对其作了系统的梳理和介绍;第6章还补充了一些新的工程实例。

借再版之机,对全书进行了部分文字上的修改,并纠正了一些错误。

正如沈世钊院士在序中所写“任何一本优秀教材均需要通过教学实践千锤百炼,并不断从学科发展中吸取新的养料,及时修订再版,使其日益臻于完善”,作者衷心感谢读者的厚爱,同时也热忱欢迎同行专家学者和广大读者提出宝贵意见。

作者

第1版前言

大跨空间结构的发展状况已经成为衡量一个国家建筑科学技术水平的重要标志之一,越来越多高等院校的土木工程学科设立了大跨空间结构这一研究方向,为研究生开设了这门课程。许多著名专家领衔,已经培养出一大批博士、硕士,活跃在我国大跨空间结构的研究与工程领域,进一步推动了大跨空间结构的发展。已经陆续可以见到有关大跨空间结构主要结构形式如网架、网壳、悬索、膜结构等的专门著述。然而,多年来一直缺少一本系统的、适合于研究生授课用的教学用书。几位志同道合的教授在整理自己多年教案的基础上,携手编写了这本教材,希望能够为大跨空间结构领域的人才培养作一点贡献。

本书第1章为绪论,介绍了大跨空间结构的基本类型,尽量详细地回顾了大跨空间结构的发展历程,特别是在我国的发展,由北京工业大学张毅刚教授执笔。第2、3章分别讨论了网架结构的主要形式:网架与网壳结构的分类、分析理论与设计基础,由哈尔滨工业大学范峰教授执笔。第4、5章分别讨论了张力结构的主要形式:悬索与膜结构的分类、分析理论、设计和施工要点,由北京交通大学杨庆山教授执笔。第6章讨论大跨度空间结构的新体系,介绍当前正在发展中的新型空间结构的理论与设计要点,由北京工业大学薛素铎教授执笔。全书由张毅刚教授统稿。

作为研究生教材的特点,本书对各类结构专门安排了研究发展趋势一节,尽量介绍国内外最新研究进展,希望能够引起更多的研究兴趣。同时,尽量搜集了资料图片,随书整理了资料光盘,便于教师们制作电子教案。本书编写过程中引用了许多著名专家的著述和研究成果,均用参考文献的方式附在每一章的后面,便于读者进一步参考,在此也一并向专家们表示衷心的感谢。

大跨空间结构是极富生命力的发展领域,对于从事该领域研究的学者也极富挑战性。日新月异的高新技术难以完全包揽在本书内,且由于作者水平有限,谬误之处难免,敬请读者批评指正。

作者

目 录

序

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 大跨空间结构的发展历程	7
1.3 我国大跨空间结构研究的工作历程	48
参考文献	53
第2章 网架结构	55
2.1 网架结构的类型和选型	55
2.1.1 网架结构的类型	55
2.1.2 网架结构的支承	61
2.1.3 网架结构的选型	63
2.2 网架结构的一般问题	64
2.2.1 网架结构主要几何尺寸的确定	64
2.2.2 网架的整体构造	65
2.3 网架结构分析	66
2.3.1 网架计算原则	66
2.3.2 空间桁架位移法	67
2.3.3 网架温度应力计算	75
2.3.4 网架抗震计算	78
2.3.5 网架结构的荷载、作用与效应组合	86
2.4 网架结构的杆件和节点	89
2.4.1 杆件的设计与构造	89
2.4.2 节点的设计与构造	91
2.5 网架结构研究的发展趋势	98
参考文献	100

第3章 网壳结构	102
3.1 网壳结构的类型和选型	102
3.1.1 网壳结构的类型	102
3.1.2 球面网壳的网格划分	106
3.1.3 柱面网壳的网格划分	109
3.1.4 双曲抛物面网壳的网格划分	113
3.1.5 网壳结构的选型	113
3.2 网壳结构分析	115
3.2.1 空间刚架位移法	115
3.2.2 温度应力和装配应力计算	122
3.2.3 网壳结构抗震分析	123
3.2.4 网壳结构的荷载、作用与效应组合	127
3.3 网壳结构的稳定性	130
3.3.1 网壳结构全过程分析方法	131
3.3.2 网壳结构全过程分析实例	140
3.3.3 单层球面网壳的稳定性	143
3.3.4 单层柱面网壳的稳定性	145
3.3.5 单层椭圆抛物面网壳的稳定性	148
3.3.6 单层双曲抛物面网壳的稳定性	150
3.3.7 网壳等效刚度的计算公式	151
3.3.8 规程关于稳定性验算的规定及说明	152
3.4 网壳结构的杆件与节点	155
3.4.1 杆件的设计与构造	155
3.4.2 节点的设计与构造	156
3.5 网架与网壳的防腐和防火	158
3.5.1 网架与网壳的防腐	158
3.5.2 网架与网壳的防火	161
3.6 网壳结构研究的发展趋势	161
参考文献	163

第4章 悬索结构	165	5.1.2 柔性壳体的基本力学性能	242
4.1 悬索结构的类型	165	5.1.3 薄膜结构的支承体系	245
4.1.1 单层悬索体系	165	5.1.4 膜材的裁剪与连接	246
4.1.2 预应力双层悬索体系	168	5.2 薄膜结构的有限元分析	249
4.1.3 预应力鞍形索网	170	5.2.1 形函数矩阵	249
4.1.4 含劲性构件的悬索结构	173	5.2.2 几何方程	251
4.1.5 悬挂薄壳与悬挂钢膜	179	5.2.3 局部坐标系下的单元 平衡方程	253
4.1.6 组合悬索结构	180	5.3 薄膜结构的形态分析	255
4.2 钢索及其基本力学性能	181	5.4 膜曲面的裁剪分析	257
4.2.1 钢索的种类	181	5.4.1 裁剪线的确定	258
4.2.2 钢索的制作	183	5.4.2 膜片的展开	259
4.3 钢索的锚固及连接节点	184	5.5 薄膜结构的受力分析与设计	262
4.3.1 钢索的锚固	184	5.5.1 受力分析	262
4.3.2 悬索结构的连接节点	188	5.5.2 工程结构荷载验算	266
4.4 悬索结构分析的有限单元法	193	5.6 薄膜结构的动力特性与反应分析	271
4.4.1 柔性索的基本受力特性	193	5.6.1 薄膜结构的动力特性	271
4.4.2 大位移理论知识	196	5.6.2 风振反应分析	276
4.4.3 有限元列式	199	5.6.3 风与结构的耦合作用	281
4.4.4 基本方程的迭代解法	203	5.7 薄膜结构的连接与节点	287
4.5 悬索结构的形态分析	203	5.7.1 膜材与膜材的连接	288
4.6 悬索结构的受力分析	207	5.7.2 索与膜的连接	291
4.7 悬索结构的动力特性及抗风 抗震分析	209	5.7.3 膜材与刚性边界的连接	295
4.7.1 自振特性与阻尼	209	5.7.4 索节点	297
4.7.2 悬索结构的地震反应分析	211	5.7.5 柱节点	298
4.7.3 悬索结构的风振反应分析	213	5.7.6 索膜节点	300
4.8 悬索结构的设计要点	215	5.8 充气式薄膜结构	302
4.8.1 悬索结构的方案设计	215	5.8.1 非织物膜材	302
4.8.2 悬索结构的设计计算	219	5.8.2 充气式薄膜结构形态分析	303
4.9 悬索结构的施工要点	226	5.8.3 充气式薄膜结构受力分析	306
4.10 悬索结构研究的发展趋势	230	5.9 薄膜结构施工要点	309
附录 A 常用钢丝绳截面规格	231	5.10 薄膜结构研究的发展趋势	311
附录 B 塑料护套半平行钢丝绳截 面规格	233	参考文献	312
附录 C 建筑用钢拉杆截面规格	234		
附录 D 点式玻璃幕墙用不锈钢拉杆与 不锈钢索截面规格	235		
参考文献	237		
第5章 薄膜结构	238	第6章 大跨空间结构新体系	314
5.1 建筑膜材与薄膜结构选型	238	6.1 可展开折叠式结构	314
5.1.1 建筑膜材及其本构模型	238	6.1.1 概述	314
		6.1.2 可展开折叠结构的几何构成	315
		6.1.3 可展开折叠结构的力学分析	323
		6.1.4 可展开折叠结构的节点构造	325
		6.2 开合屋盖	326
		6.2.1 概述	326
		6.2.2 屋盖的开合方式	331

6.2.3 开合屋盖结构的设计要素	340	6.4.3 空间张弦结构	357
6.3 张拉整体结构	343	6.5 预应力拱架结构	360
6.3.1 张拉整体结构的概念及 发展过程	343	6.6 新型围护体系	365
6.3.2 索穹顶结构	348	6.6.1 点支玻璃幕墙	365
6.4 张弦结构	352	6.6.2 新型金属屋面板——彩涂 压型钢板	371
6.4.1 单向张弦结构	353	参考文献	380
6.4.2 多向张弦结构	356		

第 1 章 绪 论

1.1 引言

远古的人类挖洞穴居或筑木为巢，满足了生存空间的需要。随着社会的进步，人们需要较大的空间进行公共活动。中国古代工匠用木材构筑梁柱结构的宫殿或寺庙，跨度达到 20 ~ 30m。古罗马人用砖石建造拱顶或穹顶，跨度达到 40 多米，然而结构自重为 6400kg/m^2 ，又厚又重。

20 世纪的工业革命推动了建筑科学技术的发展。在出现了水泥和钢铁等新型材料之后，人们学会了建造桁架、拱、钢架之类的平面结构，跨越 50 ~ 70m 的跨度。随着生活水平的提高，人类从事生产和社会活动对更大跨度的空间提出了需要。如载客 300 ~ 400 人的波音 747 飞机，机翼宽 60m、尾翼高 20m，这就需要更大更高的飞机库。又如体育馆，要求有能够容纳几万人进行体育比赛、文娱表演、集会、展览的多功能大厅，跨度需做到 100 ~ 200m，甚至更大。图 1.1.1 所示为中国国家体育场，其长轴为 332.3m，短轴为 296.4m。图 1.1.2 所示为中国国家游泳中心，跨度为 177m。图 1.1.3 所示为英国伦敦的“千年穹顶”，其直径已经达到 320m。日本巴组铁工所认为：21 世纪是为人类创造舒适、清洁、节能的新型城市的时代，具有现代设备与人工智能功能的封闭式城市环境，将为人类提供与自然相协调的理想生活环境。图 1.1.4 所示为巴组铁工所提出的跨度为 500 ~ 1000m 的穹顶空间，体现工作、居住、娱乐一体化的理想的未来城市。

对大跨度空间的需求，促使专家学者们深入研究什么样的结构体系既能够满足建筑平面、空间和造型的要求，跨越足够大的跨度，又具有更好的技术经济指标。国际壳体与空间结构学会（The International Association for Shell and Spatial Structures）的创始人，已故著名薄壳结构专家托罗哈（Torroja, E.）有一句名言：“最佳结构有赖于其自身受力之形体，而非材料之潜在强度”。就是说：采用高强度材料只解决了问题的一个方面，还必须寻找形体

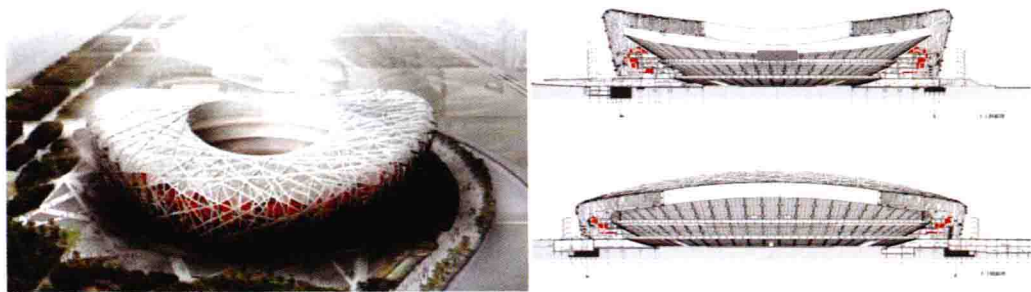


图 1.1.1 中国国家体育场

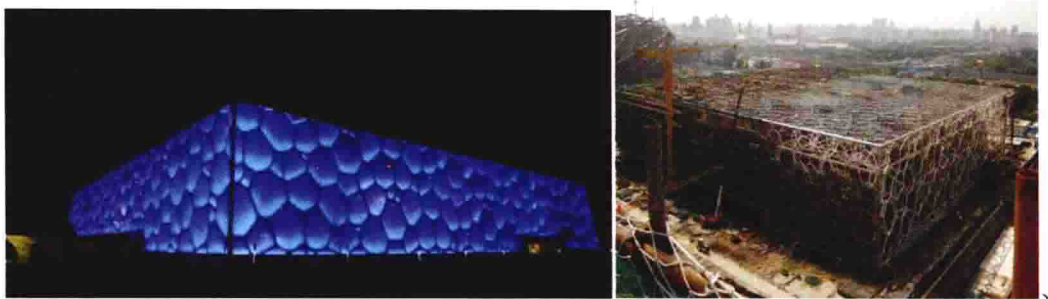


图 1.1.2 中国国家游泳中心



图 1.1.3 英国伦敦“千年穹顶”

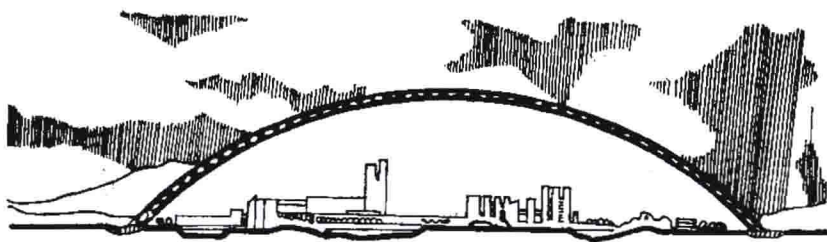


图 1.1.4 日本巴组铁工所提出的超大跨度穹顶空间

合理的结构，使其能够充分发挥材料的潜力。空间结构正是如此的一类结构。它的合理形体，使得它具有良好的受力性能。从而不仅形体优美、经济合理，还可以跨越超大的空间，成为近年来最具生命力的结构形式之一。

所谓空间结构是指：具有不宜分解为平面结构体系的三维形体，具有三维受力特性，在荷载作用下呈空间工作的结构。图 1.1.5 所示单层工业厂房是典型的由平面结构组成的结构体系。图 1.1.6 所示的框架虽然具有三维形体，但通常它的纵横框架有主次之分，可取主要受力的横向框架按平面结构计算。图 1.1.7 所示的桁架结构和图 1.1.8 所示的拱结构都是平面结构。而图 1.1.9 所示的壳体显然不能被分解为平面结构，明显具有三维受力特性，在荷载作用下呈空间工作，是典型的空间结构。图 1.1.10 展示了网架结构的几种基本单元，可以看出它的组成本身就是空间形体，每个节点的受力也是三维的。

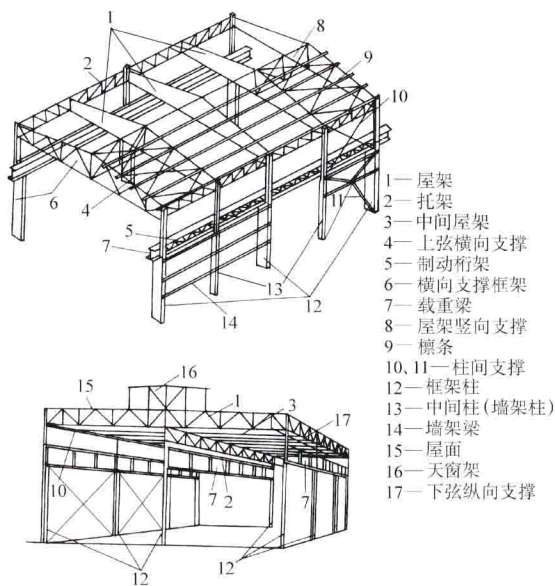


图 1.1.5 由平面结构组成的单层工业厂房

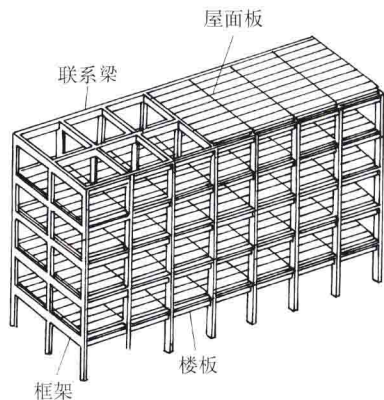


图 1.1.6 钢筋混凝土框架

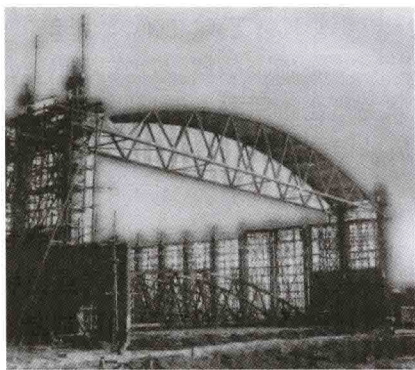


图 1.1.7 平面桁架结构

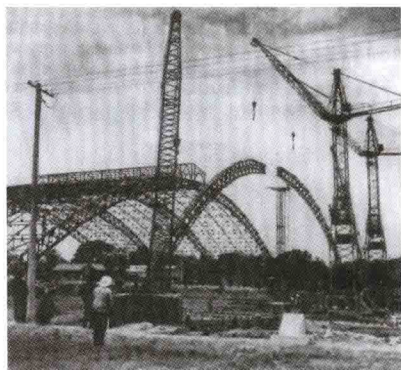


图 1.1.8 拱结构



图 1.1.9 蒙特利尔短程线型双层网壳 ($D=76\text{m}$)

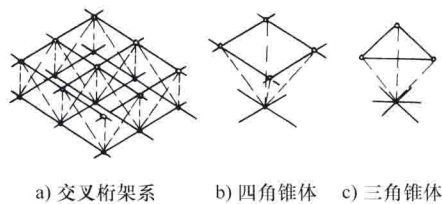


图 1.1.10 网架结构的几种基本单元
a) 交叉桁架系 b) 四角锥体 c) 三角锥体

空间结构可以分为以下三种基本类型：

实体结构类——薄壳结构、折板结构。它们一般是钢筋混凝土实体结构，如图 1.1.11、图 1.1.12 所示。近年来应用不是很多，本书不拟作详细讨论。

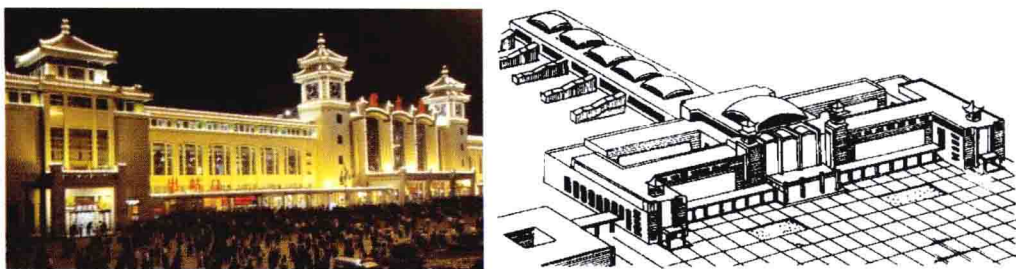


图 1.1.11 北京火车站屋面双曲抛物面薄壳



图 1.1.12 郑州第二砂轮厂食堂折板结构

网格结构类——网架结构、网壳结构。它们一般是由杆件按一定规律组成的网格状高次超静定空间杆系结构，如图 1.1.13、图 1.1.14 所示，将在本书第 2、3 章详细讨论。



图 1.1.13 首都机场四机位机库网架



图 1.1.14 中国国家大剧院网壳

张力结构类——悬索结构、薄膜结构。它们一般通过对索或膜施加预张力以后形成结构体系，如图 1.1.15、图 1.1.16 所示，将在本书第 4、5 章详细讨论。

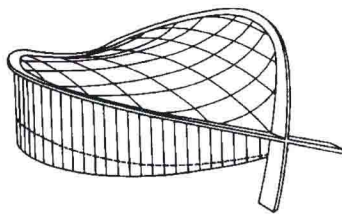


图 1.1.15 北卡罗莱那州 Releigh 体育馆



图 1.1.16 上海八万人体育场

集中以上某两种或几种结构的优点组合而成的结构通常称为**混合结构**或**杂交结构**，如：张弦立体桁架（图 1.1.17），斜拉网架（网壳）（图 1.1.18），索承（弦支）网壳（图 1.1.19）等，已经成为近年来的研究热点，推动着空间结构的发展。本书第 6 章将讨论一些新体系的研究与应用。应该指出，张弦立体桁架体系是将平面桁架的截面改造成空间形体，明显地增大了横向刚度，从而得以广泛应用。



图 1.1.17 广州国际会展中心张弦立体桁架体系

相对于平面结构，空间结构形式丰富、生动活泼，突出结构美而且富有艺术表现力。世界各国已经建造了大量的、不同跨度、不同类型的空间结构。其受力合理、结构刚度大、重量轻、用钢量低的特点已经成为共识。1963 年美国著名建筑师司密斯（Smith, M. G.）对 166 个已建成的大跨度钢结构工程进行了统计分析，对刚架、桁架、拱、网架和网壳（穹顶）每平方米用钢量的分析如图 1.1.20 所示。从图中可以看出：当跨度不大时，各种结构用钢量大体相当；随着跨度的增加，网架和不同形式的网壳（穹顶）均比平面结构节省钢材。特别是近年来采用较多的膜结构，使屋盖重量更加减轻，巨大的英国伦敦“千年穹顶”，仅为 $20\text{kg}/\text{m}^2$ 。

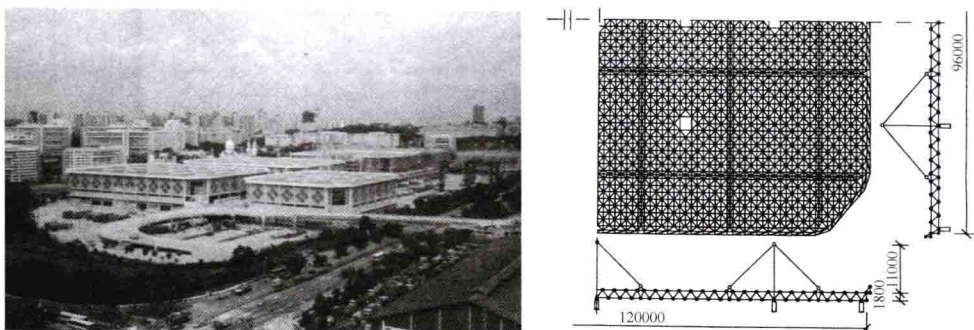


图 1.1.18 新加坡港务局（PSA）仓库斜拉网架

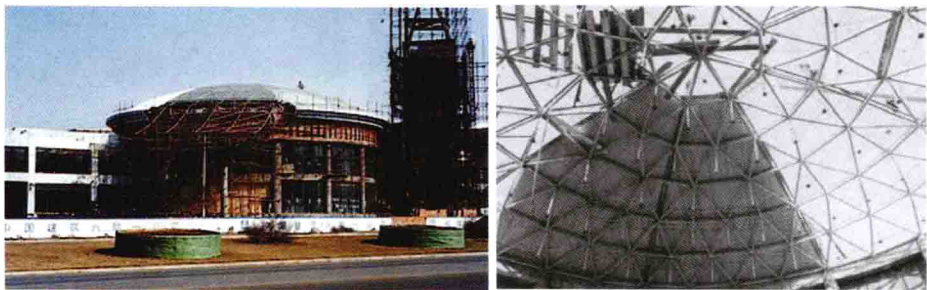


图 1.1.19 天津港保税区商务中心大堂索承网壳

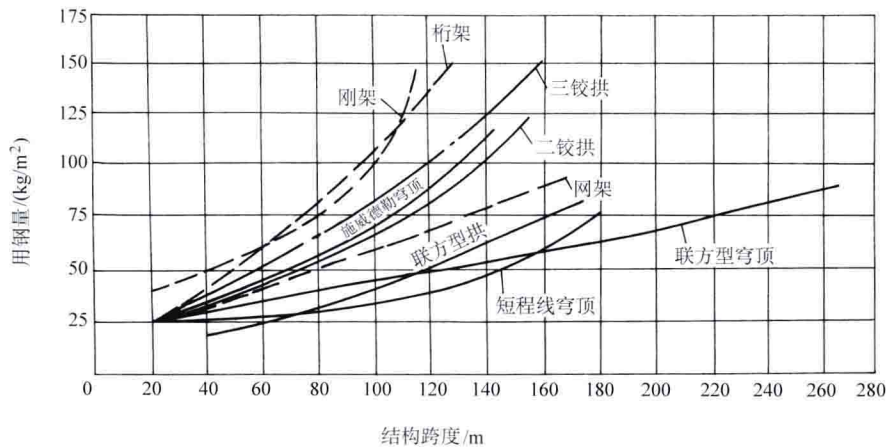


图 1.1.20 各种钢结构用钢量比较

空间结构之所以有上述优点，得益于它的合理形体。更进一步，可以认为得益于自然界。被称为“实现建筑工业技术最大的现代天才”的富勒（Fuller, R. B.）曾说：“自然——总是建造最经济的结构”。自然界早就大量存在各种结构的典型。仔细观察自然界中的许多动物或植物，都是通过它们合理的形体来抵抗外荷载作用，以维系自己的生存。鸡蛋壳极薄，却能够保护体内的生命就是一个极好的例子。鸡蛋壳以及贝蚌、果核等都是薄而又高强的薄壳结构形式。人们已经形象地把中国国家大剧院的建筑称为“水煮蛋”。蜂窝可以看做是空间网格结构。蜘蛛丝虽细，织成的网却大有用途，蛛网可以说是悬索结构的缩影（图