

国家“十五”规划重点图书

现代空间结构

MODERN SPATIAL STRUCTURES

刘锡良 编著



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

国家“十五”规划重点图书

现代空间结构

MODERN SPATIAL STRUCTURES

刘锡良 编著



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书介绍了当代建筑工程领域中最新、最前沿的5种空间结构体系,即张拉整体结构、膜结构、开合屋盖结构、折叠结构及玻璃结构。书中对每种结构的构造特点、设计理念、计算方法及施工技术等进行精练的阐述,并详细介绍了国内外最新研究成果和具有代表性的工程实例。为了增强读者对内容的理解,书中展示了大量彩色图片及工程图,达到了图文并茂的效果。

该书是国家“十五”重点图书,为我国第一部全面论述现代空间结构理论与实践的专著,兼具先进性与实用性。

本书可供结构工程专业的本科生、研究生阅读,对从事空间结构设计及施工的工程技术人员更是一本不可多得的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代空间结构 / 刘锡良编著. —天津: 天津大学出版社, 2003.6

ISBN 7-5618-1764-9

I. 现... II. 刘... III. 空间结构 IV. TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 029616 号

组稿编辑	徐桂英	责任编辑	徐桂英
封面设计	郭 泉	技术设计	油俊伟

出版发行 天津大学出版社

出 版 人 杨风和

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编: 300072)

电 话 发行部: 022-27403647 邮购部: 022-27402742

制 版 北京精制轩彩色制版有限公司

印 刷 深圳市佳信达印务有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 210mm × 285mm

印 张 22

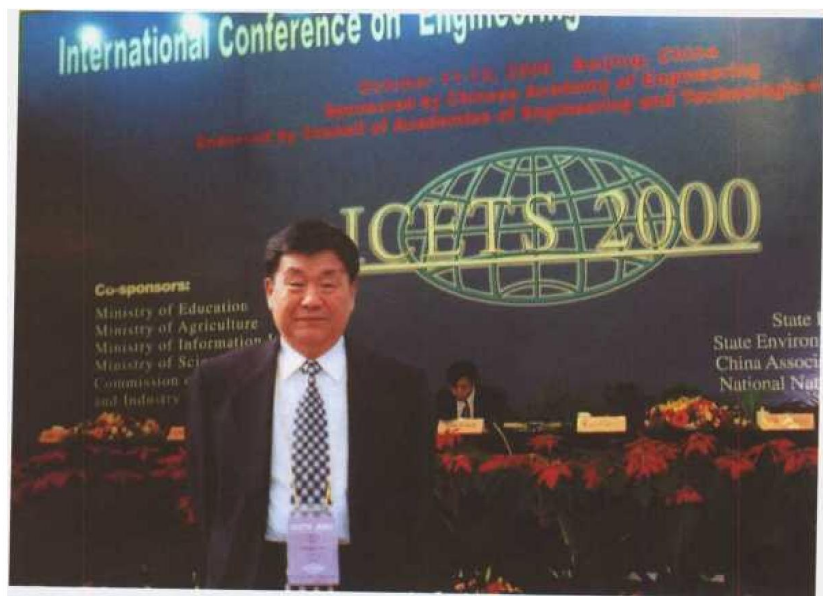
字 数 845 千

版 次 2003 年 6 月第 1 版

印 次 2003 年 6 月第 1 次

印 数 1-3 000

定 价 230.00 元



作者简介

刘锡良，1928年6月生，1955年清华大学土木系钢结构研究生毕业。1982年赴德国不伦瑞克工业大学钢结构研究所做访问学者，近20年来经常出国参加学术活动和讲学。从教50年来长期从事钢结构及空间结构的教学、科研及生产设计工作。

现任天津大学建工学院土木工程系教授、博士生导师。著书10余部，发表论文200余篇，培养博士生、硕士生近百名。获国家级科技奖2项。指导和设计施工上千座网架工程，如天津体育馆、天津科技馆等。1958年参加了南京大桥设计工作；1962年首先发明创造了焊接空心球节点网架，后来推广到全国；1979年写出国内第一本网架结构专著《平板网架设计》，该书对推广网架起了重大作用。近年来还参编和主编3种规范及规程，并指导开发了3个空间结构设计软件。本次出版的《现代空间结构》一书，反映了国际上建筑结构工程领域最前沿的先进技术，为2008年设计奥运会场馆提供了宝贵资料。

1-1A7-80/11

为了即时掌握目前国际上前沿建筑工程领域中高新技术成果，更好地开展我们的科研和教学工作，在我国八五~九五期间内本人尽量力争多参加该领域的国际会议，并于会后进行必要的考察参观活动。由于十几年来一直坚持这样做，所以手头积累了大量最先进的资料，为进行我们的科研工作提供了条件，打下了基础。如1994年去美国亚特兰大国际会议，会后参观了许多奥运会场馆，特别是亚特兰大乔治体育馆，它是世界上跨度最大(193 m × 240 m)索穹顶，代表着世界上前沿高新技术，回国后我马上组织了博士生们(陈志华、王斌兵、曹喜、夏定武等)攻克这个难关；后来又去日本开会，会后又参观了世界跨度最大(D=222 m)的日本开合结构福冈穹顶，回国我又指导了博士生开展开合结构方面的研究；去英国开会又参观了伦敦的千年穹顶，它是当今跨度最大(D=320 m)的索膜结构，回国后我又组织研究生们总结这方面的科技成果。后来本人相继还去澳大利亚参观了2000年的奥运会场馆，去葡萄牙参观了世博会建筑，特别近年来去日本和韩国开会期间参观了世界杯足球赛使用的20个场馆，真是受益匪浅。

目前这些结构在我国还都是空白或刚处于起步阶段。而索穹顶、开合结构、大型膜结构及世博会场馆都代表着主办国的一流的建筑技术水平，为此我们应该利用这个大好时机努力拼搏，开拓进取，以赶上或超过世界高新技术水平。为达此目的，我主编了这本反映高新技术的专著《现代空间结构》，该书已列入国家“十五”规划重点图书。该书主要内容包括张拉整体结构、膜结构、开合屋盖结构、折叠结构及玻璃结构等。为了实现这些新型结构，近年来我们曾研制了一些小规模实验性建筑，以期总结施工经验，为建造今后大型工程积累经验，如在天津保税区的天津国际商务交流中心大堂屋盖上，本人指导设计和施工了类似索穹顶的弦支穹顶结构，这也是我国第一座试验性工程。

本书编写分工如下：绪论(刘锡良)；第一篇(陈志华博士编，曹喜博士、刘锡良参编)；第二篇(李中立博士编)；第三篇(张凤文博士编，刘锡良参编)；第四篇(远方博士、朱海涛博士编，刘锡良参编)；第五篇(刘向阳硕士编，刘锡良参编)。全书由刘锡良编著。

限于水平，有不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2002年12月

目 录

1	
7	
9	●第一章 张拉整体的结构体系
9	第一节 概述
14	第二节 张拉整体结构的力学特性
16	第三节 张拉整体索穹顶
22	第四节 弦支穹顶
28	第五节 张拉整体的模型制作
35	第六节 张拉整体的结构实验和节点
39	第七节 张拉整体索穹顶的工程实例
53	●第二章 张拉整体结构的初始平衡问题
53	第一节 张拉整体结构的形态学
61	第二节 张拉整体结构的找形方法
63	第三节 几何分析法
64	第四节 静力平衡法
67	第五节 力密度法
72	第六节 初始平衡形状的试验
77	●第三章 张拉整体结构的几何构造分析方法
77	第一节 铰接杆系的分类
78	第二节 静不定且动不定体系的机构位移模式矩阵
78	第三节 体系的自应力模态
79	第四节 几何力及其模式矩阵
80	第五节 体系几何稳定性的判别准则
85	第六节 张拉整体体系几何稳定性的简便判别方法
88	第七节 两种形式索穹顶结构的几何稳定性分析
89	●第四章 张拉整体结构的预应力设计
89	第一节 理想预应力状态的设计方法
90	第二节 结构预应力的损失及其补偿方法
92	第三节 钢索的松弛与徐变损失的计算
95	第四节 温度改变引起的预应力损失的计算
95	第五节 预应力设计小结
97	●第五章 张拉整体结构的静力分析方法
97	第一节 张拉整体结构的线性分析方法
100	第二节 张拉整体结构的大变形非线性分析方法
102	第三节 静力分析方法的算例及要点
104	●参考文献

结 论

第一篇 张拉整体结构

第二篇 膜结构

- 107 ●第六章 膜结构的发展及其应用
 - 108 第一节 充气式膜结构
 - 110 第二节 张拉式膜结构
 - 112 第三节 骨架式膜结构
 - 114 第四节 膜结构在我国的应用
- 115 ●第七章 膜结构的特点及膜材料的特性
 - 115 第一节 膜结构的特点及应用
 - 116 第二节 膜材料的性能与类别
- 119 ●第八章 膜结构的设计步骤与分析方法
 - 119 第一节 膜结构设计步骤
 - 120 第二节 膜结构分析的几种常用方法
- 123 ●第九章 我国膜结构工程项目选例
- 139 ●参考文献

第三篇 开合屋盖结构

- 145 ●第十章 开合屋盖建筑结构的发展
 - 145 第一节 开合结构的发展历史及发展趋势
 - 151 第二节 典型开合屋盖结构实例及评述
- 161 ●第十一章 开合屋盖结构体系的开合机理
 - 161 第一节 屋盖体系的开合方式及分类
 - 180 第二节 确定屋盖结构开合方式的原则和依据
- 189 ●第十二章 开合屋盖结构事故分析与开合评价原则
 - 189 第一节 开合屋盖结构的事故分析
 - 191 第二节 开合屋盖体系的安全性研究
 - 193 第三节 开合屋盖的评价原则
- 195 ●第十三章 开合屋盖的结构体系
 - 195 第一节 移动屋盖单元结构
 - 203 第二节 固定屋盖和支承结构体系
 - 203 第三节 钝化屋盖结构中变形影响的几种措施
 - 205 第四节 开合屋盖的结构材料和屋面防水构造
 - 208 第五节 开合屋盖结构体系特点分析
- 209 ●第十四章 开合屋盖结构的驱动与行走机构
 - 209 第一节 驱动方式
 - 211 第二节 行走机构
 - 220 第三节 驱动行走机构的设计原则
 - 221 第四节 开合移动系统设计实例
- 227 ●第十五章 开合屋盖结构的荷载
 - 227 第一节 风荷载和结构的抗风设计
 - 228 第二节 雪荷载和结构的抗雪荷设计
 - 229 第三节 地震荷载和结构的抗震设计
 - 231 第四节 特有荷载工况设计
 - 235 第五节 典型工程荷载设计实例

237	●第十六章 典型开合方式建筑模型实现
237	第一节 水平移动型的模型实现
239	第二节 水平旋转型的模型实现
242	第三节 空间移动型的模型实现
243	●附表 世界上已建成的典型开合屋盖建筑一览
251	●参考文献
253	第四篇 折叠结构
255	●第十七章 折叠结构概述
255	第一节 引言
257	第二节 附加支撑折叠网架的基本构成和原理
259	第三节 自稳定折叠网架的基本构成和原理
263	●第十八章 折叠结构几何设计
267	●第十九章 折叠结构构型及节点构造
267	第一节 折叠结构构型
268	第二节 折叠结构节点构造
269	●第二十章 折叠结构力学性能研究
269	第一节 剪铰单元刚度矩阵
271	第二节 自稳定折叠筒壳力学性能设计
275	第三节 折叠网架受力特点及计算模型分析
277	第四节 折叠网架节点的设计与构造
283	●参考文献
285	第五篇 玻璃结构
287	●第二十一章 玻璃材料
287	第一节 玻璃材料的性能
289	第二节 常用建筑玻璃的种类
293	●第二十二章 玻璃材料的连接
293	第一节 玻璃的结构硅酮密封胶连接
294	第二节 玻璃的机械金属件连接
301	●第二十三章 玻璃结构类型
303	第一节 全玻璃房屋
304	第二节 幕墙
312	第三节 屋顶
316	第四节 其他玻璃结构
321	●第二十四章 玻璃结构的设计计算
321	第一节 全玻璃结构
323	第二节 玻璃—金属组合结构
339	●参考文献
340	后 记
341	参编人员简介

绪论

空间结构是指结构的形态呈三维状态、在荷载作用下具有三维受力特性并呈空间工作的结构。空间结构与平面结构相比具有很多独特的优点,平板网架、网壳以及悬索结构等空间结构在国内外得到了广泛的应用,已为人们所熟悉。特别是近年来,随着人们生活水平的不断提高,以及工业生产,文化、体育等事业不断进步,大大增强了社会对空间结构尤其是大跨度高性能空间结构的需求。而计算理论的日益完善以及计算机技术的迅猛发展使得对任何极其复杂的三维结构的分析与设计成为可能,这正是空间结构能够扩大应用范围并得以蓬勃发展的主要因素。近几十年来,世界上建造了成千上万采用各类空间结构建筑的大型体育馆、飞机库、会议中心和展厅等,这些建筑的恢弘气势、优美造型,成为一道道亮丽的风景。更有无数的厂房、仓库等也采用了空间结构,实现了经济、合理的完美统一。

目前空间结构向着轻量、大跨方向发展,这种发展趋势要求必须千方百计降低结构的自重。降低结构自重的途径一方面是在研制出轻质高强的新型建筑材料,另一方面是研究开发合理的结构形式。如果结构受拉部位采用膜材或钢索,受压部分采用钢或铝合金构件,这样膜、索、杆结合使用,形成杂交结构,可望实现理想的轻量跨结构。

张拉整体结构和膜结构是降低结构自重的较理想的结构体系,可跨越很大的跨度,目前已做到200m左右。这两种结构在美国和日本发展最快,建造了很多大型工程。

另外适应全天候气候条件的开合结构、施工便捷的折叠结构,以及外观华丽的玻璃结构等都是属于现代空间结构发展的新课题,国外已有很多的工程应用。下面对前面提到的几种空间结构分别予以论述。

一、张拉整体结构

“张拉整体”(Tensegrity)概念是由美国著名建筑师富勒(R.B.Fuller)提出的,它是“张拉”(Tensile)和“整体”(Integrity)的缩合。这一概念的产生受到大自然的启发。富勒认为宇宙的运行是按照张拉整体的原理进行,即万有引力是一平衡的张力网,而各个星球是这个网中的一个孤立点。按照这个思想,张拉整体结构可定义为一组不连续的受压构件与一套连续的受拉单元组成的自支承、自应力的空间网格结构。这种结构的刚度由受拉和受压单元之间的平衡预应力提供,在施加预应力之前,结构几乎没有刚度,并且初始预应力的大小对结构的外形和结构的刚度起着决定性作用。由于张拉整体结构固有的符合自然规律的特点,最大限度地利用了材料和截面的特性,因此可以用尽量少的钢材建造超大跨度建筑。

对于张拉整体结构的研究开始于40多年前,从最初的设想到工程实践大约经历了以下几个阶段:想像和几何学、拓扑和图形分析、力学分析及试验研究。其中力学分析包括找形(Form-finding)、自应力准则、工作机理和外力作用下的性能等。张拉整体结构的几何形状同时依赖于构件的初始几何形状、关联结构(拓扑)及形成一定刚度的应力存在。另外这种结构在外力作用下的变形(与自应力的效果不同)也提出了其他结构问题,首先它属于临界类体系,结构在外荷载过程中刚度不断发生变化,传力途径也就随之改变;其次这种结构只能在考虑了几何非线性甚至材料非线性时才能分析。

从20世纪50年代起,许多研究工作者都采用了靠想像的实用方法,如斯耐尔森(K.Snelson)的雕塑及莫瑞挪(Moreno)的设想等。最重要的几何学上的工作是由富勒和埃墨瑞池(D.G.Emmerich)完成的。加拿大的结构拓扑研究小组在形态学方面做了最重要的工作,他们出版的杂志包括了许多张拉整体拓扑方面的文章,但这些研究都是数学上的,在三维空间工程上应用的研究也只为警告设计者们容易出现的不稳定方案。在大多数情况下,张拉整体多面体几何的构成特性使得图形理论可以用来模型化他们的拓扑。

张拉整体的找形分析为的是使体系的几何形式满足自应力准则。对于一个基本单元,可以用一种简单的静力方法来获得自应力几何,其原则包括寻找一个或一套元素的最大最小长度,同时得到其他元素的尺寸条件。佩里哥瑞挪(S.Pellegrino)建议用一种标准非线性程序解决这一问题的方法。而一个基于虚阻尼的动力松弛方法也得到了同样的结果。

张拉整体结构的力学分析类似于预应力铰节点索杆网格结构,除了一些特殊的图形外,都含有内部机构,呈现几何柔性。为了研究的目的,除了一般的找形和静动力分析过程外,有时还用到一个中间过程:稳定性、机构及预应力状态的研究。张拉整体体系的分析模型必须考虑非线性特性和平衡自应力的存在。莫赫瑞(Mohri)说明了如何保证适当的自应力及单元的刚度,还给出了识别与索提供的刚度相一致的自应力状态的算法。张拉整体结构的静力性能的非线性分析已经完成,其模型基于松弛原理或牛顿—拉夫逊型过程的矩阵追赶法原理,有人也做了动力松弛的模型。

斯耐尔森的极具艺术的雕塑是体现富勒张拉整体思想的最早尝试。后来富勒、埃莫瑞池、维尔耐(O.Vilnay)、莫特罗(R.Motro)、汉纳(A.Hanaor)等学者创造了多种张拉整体结构体系。我的学生王斌兵博士近年来在国外杂志中发表张拉整体的论文十数篇,创造了一些独特形

式。目前在世界很多地方都建造了艺术品性质的张拉整体结构,如法国的公园雕塑、华沙国际建筑联合会前的自张拉空间填充体、荷兰国家博物馆前覆盖的四棱柱张拉整体单体,以及1958年富勒为布鲁塞尔博览会设计的一根有表现力的张拉整体桅杆等。

美国已故著名工程师盖格尔(D.H.Geiger)为张拉整体思想的发展做出了极大贡献。他在富勒创造的富勒张拉整体穹顶的基础上,发明了支承于周边受压环梁上的一种索杆预应力张拉整体穹顶体系,即索穹顶,从而使得张拉整体的概念首次应用到大跨度建筑工程中。1986年以他的名字命名的盖格尔公司将索穹顶结构成功应用于汉城奥运会的体操馆($D=119.8\text{m}$)和击剑馆($D=89.9\text{m}$)。之后又相继建成了美国伊利诺斯州大学的红鸟体育馆(椭圆 $91.4\text{m}\times 76.8\text{m}$)及佛罗里达州的太阳海岸穹顶($D=210\text{m}$)。1992年在美国建造了世界上最大的索穹顶体育馆——乔治亚穹顶(Georgia Dome),见图0-1。它是1996年亚特兰大奥运会的主体育馆,平面为椭圆形($193\text{m}\times 240\text{m}$),这种双曲抛物面型张拉整体索穹顶的耗钢量少得令人难以置信,还不到 30kg/m^2 。

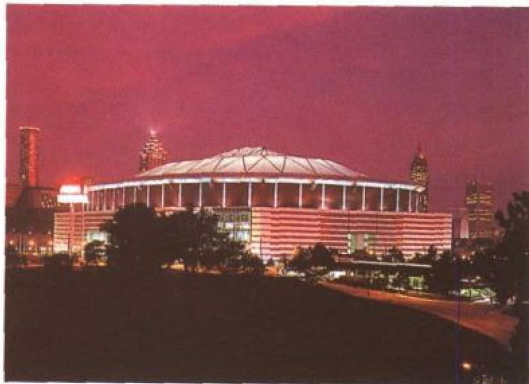


图0-1 美国亚特兰大乔治亚穹顶

应该看到盖格尔发明的张拉整体索穹顶结构源于富勒的张拉整体思想,属于张拉整体体系的范畴,但由于它还没有完全实现结构自支承、自应力的原则,离开下部受压环梁则不能成立,故而可以说彻底的大跨度张拉整体结构还没有建成。因此对于张拉整体结构无论在理论分析方面还是施工技术及建筑材料方面都还有很多工作要做,特别是在我国尚属空白。

二、膜结构

膜结构(Membrane Structures)是20世纪中期发展起来的一种新型建筑结构形式,是由多种高强薄膜材料及加强构件(钢架、钢柱或钢索)通过一定方式使其内部产生一定的预张应力以形成一种作为覆盖结构的形状,并能承受一定的外荷载作用的一种空间结构形式。膜结构可分为充气膜结构和张拉膜结构两大类。充气膜结构是靠室

内不断充气,使室内外产生一定压力差(一般在 $10\sim 30\text{Pa}$ 水柱之间),室内外的压力差使屋盖膜布受到一定的向上的浮力,从而实现较大的跨度。张拉膜结构则通过柱及钢架支承或钢索张拉成形,其造型非常优美灵活。

膜结构所用膜材料由基布和涂层两部分组成。基布主要采用聚酯纤维和玻璃纤维材料,涂层材料主要为聚氯乙烯(PVC)和聚四氟乙烯(Teflon)。常用膜材为聚酯纤维覆聚氯乙烯和玻璃纤维覆聚四氟乙烯。PVC材料的主要缺点是强度低、弹性大、易老化、徐变大、自洁性差,但价格便宜,容易加工制作,色彩丰富,抗折叠性能好。为改善其性能,可在其表面涂一层聚四氟乙烯涂层,提高其抗老化和自洁能力,其寿命可达到15年左右。Teflon材料强度高、弹性模量大、自洁、耐久、耐火性能好,但价格较贵,不易折叠,对裁剪制作精度要求较高,寿命一般在30年以上,适用于永久建筑。

世界上第一座充气膜结构建成于1946年,设计者为美国的沃尔特·勃德(W.Bird),这是一座直径为 15m 的充气穹顶。1967年在德国斯图加特召开的第一届国际充气结构会议,无疑给充气膜结构的发展注入了兴奋剂。随后各式各样的充气膜结构建筑出现在1970年大阪世界博览会上。其中具有代表性的有盖格尔设计的美国馆($137\text{m}\times 78\text{m}$,卵形),以及川口卫设计的香肠形充气构件膜结构。后来人们认为1970年大阪博览会是把膜结构系统地、商业性地向外界介绍的开始。大阪博览会展示了人们可以用膜结构建造永久性建筑。而20世纪70年代初美国盖格尔—勃格公司(Geiger-Berger Associates)开发出的符合美国永久建筑规范的特氟隆(Teflon)膜材料为膜结构广泛应用于永久、半永久性建筑奠定了物质基础。之后,用特氟隆材料做成的室内充气式膜结构相继出现在大中型体育馆中,如1975年建成的密歇根州庞蒂亚克“银色穹顶”(椭圆形 $220\text{m}\times 159\text{m}$),1988年建成的日本东京穹顶(室内净面积 $46\,767\text{m}^2$),见图0-2。

张拉式膜结构的先行者是德国奥托(F.Otto),他在1955年设计的张拉膜结构跨度在 25m 左右,用于联合公园多功能展厅。由于张拉膜结构是通过边界条件给膜材施加一定的预张应力,以抵抗外部荷载的作用,因此在一定初始条件(边界条件和应力条件)下,其初始形状的确定、在外荷载作用下膜中应力与变形,以及怎样用二维的膜材料来模拟三维的空间曲面等一系列复杂的问题,都需要由计算来确定,所以张拉膜结构的发展离不开计算机技术的进步和新算法的提出。目前国外一些先进的膜结构设计制作软件已非常完善,人们可能通过图形显示看到各种初始条件和外荷载作用下的形状与变形,并能计算任一点的应力状态,使找形(初始形状分析)、裁剪和受力分析集成一体化,使得膜结构的设计大为简便,它不但能分析整个施工过程中各个不同结构的稳定性和膜中应力,而且能精确计



图 0-2 日本东京穹顶

算由于调节索或柱而产生的次生应力，完全可以避免各种不利荷载工况产生的不测后果。因此计算机技术的迅猛发展为张拉膜结构的应用开辟了广阔的前景。而特氟隆材料的研制成功也极大地推动了张拉膜结构的应用。比较著名的张拉膜结构建筑有沙特阿拉伯吉达国际航空港、沙特阿拉伯利雅得体育馆、加拿大林德塞公园水族馆、英国温布尔登室内网球馆、美国丹佛新国际机场以及2000年建成的英国伦敦的千年穹顶 ($D = 320\text{ m}$)，见图 0-3。

膜结构的设计主要包括体形设计、初始平衡形状分析、荷载分析、裁剪分析等四大问题。通过体形设计确定建筑平面形状尺寸、三维造型、净空体量、各控制点的坐标、结构形式，选用膜材和施工方案。初始平衡形状分析就是所谓的找形分析。由于膜材料本身没有抗压和抗弯刚度，抗剪强度也很差，因此其刚度和稳定性要靠膜曲面的曲率变化和其中预张应力来提高。对膜结构而言，任何时候不存在无应力状态，因此膜曲面形状最终必须满足在一定边界条件、一定预应力条件下的力学平衡，并以此为基准进行荷载分析和裁剪分析。目前膜结构找形分析的方法主要有动力松弛法、力密度法以及有限单元法等。膜结构考虑的荷载一般是风载和雪载。在荷载作用下膜材料的变形较大，且随着形状的改变，荷载分布也在改变，因此要精确



图 0-3 英国伦敦的千年穹顶

计算结构的变形和应力需用几何非线性的方法进行。荷载分析的另一个目的是确定索、膜中初始预张力。在外荷载作用下膜中一个方向应力增加而另一个方向应力不致减少到零，即不出现皱褶。因为膜材料比较轻柔，自振频率很低，在风荷载作用下极易产生风振，导致膜材料破坏，如果初始预应力施加过高，膜材徐变加大，易老化且强度储备少，对受力构件强度要求也高，增加施工安装难度。因此初始预应力的确定要通过荷载计算来确定。经过找形分析而形成的膜结构通常为三维不可展空间曲面，因此如何通过二维材料的裁剪、张拉形成所需要的三维空间曲面，是整个膜结构工程中最关键的一个问题，这正是裁剪分析的主要内容。

膜结构在我国也不乏工程实例，其中规模最大、最具影响力的膜结构要数 1997 年竣工的上海 8 万人体育场看台罩篷张拉膜结构工程。该膜结构为美国 Weidlinger 公司设计制作，由此也可以看出我国在该领域与国外先进国家的差距很大。目前影响我国膜结构广泛应用的主要因素有：国产膜材料性能差，而进口膜材料价格高；尚无商业性的膜结构计算机辅助设计系统；人们对膜结构缺乏足够的认识等。

三、开合结构

开合结构 (Retractable Structures) 的出现与人类体育事业的发展密切相关，是当代人类物质文化生活水平发展到相当程度、人们对体育比赛场馆功能要求日益完美的结果。体育场空间本来是个开放的空间，古代的奥运会就是在有天然草皮的大地上，在阳光的照射与微风的吹拂中召开的。然而，热衷于体育运动的现代人却发展成了室内体育馆，通过装备一些设备，将室外体育设施室内化，把体育赛事作为一种观赏项目开展起来。这样做不仅能在比较恶劣的环境条件下保护观众和运动员，而且实现了能在预定的时间内进行预定的体育比赛，这是体育现代化的必然要求。这种建造大型运动场馆的技术早已具备，而且无数的体育场馆已投入使用。但是这些带有屋顶的运动场并非剧场，人们还是憧憬着大自然的天空，大自然的阳光，大自然的和风，如果条件允许，敞开式运动场是受观众和运动员欢迎的，因此开合式屋盖结构应运而生。

据统计，国际上从 20 世纪 60 年代至今已建成 200 余座开合屋盖结构，但绝大多数属于中小型建筑，主要用于游泳馆、网球场等体育建筑。从这些工程应用中人们已充分领略到这种结构的优越性：当遇雷雨风雪天气时将屋盖关闭，观众照样享受体育馆内温馨与热烈的氛围；当天高气爽时将屋盖打开，室内外融为一体，观众顿获得自然之美与舒畅之感，尤其在夜晚，夜色与灯光融合，更有一种美妙的感受。目前开合屋盖结构不仅用于体育场馆，而且广泛用于飞机库、商场、厂房及需要晾晒的仓储建筑。

与固定式屋盖相比，开合屋盖结构在技术上有很多特殊的问题必须慎重对待，如在结构形状不断改变的条件下，设计荷载尤其是风荷载以及结构运动产生的冲击效应的评

估与选择、屋盖走行部分及轨道设计、屋盖运行故障检测及排除措施、屋盖的监控与安全保障系统设置等。为了经济安全,移动结构构造应简单并尽量轻型化;屋盖开启或关闭过程一般控制在20~25分钟,为尽量减少冲击力,应控制开始或停止时间在1~2分钟;应装置地震传感器和风速仪,当超过特大风速和地震强度时,开关系统应能判别,以调整整个系统不会超载;屋盖应安装电视摄像及超声波传感系统,以便及时发现故障原因;控制装置设计应有富余,当装置的任何部分失灵时不至于整个系统失灵,为此应用一种双控制系统,既能自动也能手动;在开合功能失灵时,应能保障整个屋盖结构的安全。在已建成的开合结构中不乏打不开、合不上、合上开不了的例子,更有一些开合结构因开合功能故障最终不得不改为固定屋盖。这说明开合结构确实是一种技术性很强的结构形式,对设计和施工都有很高的要求。

开合结构的开合方式有以下几种类型。

(1) 水平移动

单纯通过屋盖水平移动形成开合。

(2) 重叠方式

可分为:①水平重叠,即通过数段屋盖水平重叠搭接形成开合;②上下重叠,即将屋盖上下分成数段,底段固定,上面几段可上下滑动形成开合;③回转重叠,即通过数块屋盖回转重叠形成开合和水平回转动重叠,既有水平移动又有回转动,最后重叠搭接形成开合。

(3) 折叠方式

可分为:①水平折叠,即构件水平方向折叠搭接形成开合;②回转动折叠,即构件水平回转动折叠形成开合;③上下折叠,即一般采用膜屋面,类似于折叠伞,通过吊起或放下屋面形成开合。

(4) 混合方式

为上述这些开合方式的组合。

对一个开合结构工程的评价是多方面的,应依据具体结构的功能及规模等进行,如屋盖开启状态下的开启率、天空形状、屋盖形状、屋盖阴影、亮度对比,屋盖关闭后的屋盖形状、屋盖性能、屋盖的耐久性,屋盖的开合方式,屋盖走行部分的运转,工程费用高低,施工难度,建筑面积及工程占地面积等都应是开合结构评价的主要内容。

由于开合结构造价较高、施工难度大,维护管理费用要求也很高,所以在大跨度建筑中这种结构用得很少。但目前仅有的几座大型开合结构都产生了广泛的影响,造成过轰动效应,有的已经成为其所在城市的标志。1961年建成的美国匹兹堡会堂是世界上第一座大型开合结构,平面设计呈圆形,直径127 m,建筑高度33 m,采用回转式开合屋盖,屋盖分8块,开启率为75%,观众席朝向街区,随着屋盖的慢慢开启,街区的楼群轮廓可浮现在观众面前。加拿大蒙特利尔奥林匹克体育场1976年就完成了看台部分

的施工,但因为经济问题开合屋盖结构直到1987年才竣工,屋盖采用上下折叠开合方式,开口部位长径180 m,短径120 m,面积18 000 m²,呈椭圆形。

1989年建成的加拿大多伦多天空穹顶(Sky Dome),如图0-4所示,一度是世界上跨度最大的开合结构。其屋顶直径205 m,覆盖面积32 374 m²,为平行移动和回转重叠式的空间开合钢网壳结构。整个屋盖由4块单独钢网壳组成,其中3块可以移动,中间部分为两块筒状网壳,可水平移动,两端为两块四分之一球壳,其中1块固定,1块可旋转移动180°。屋盖开启后91%的座位可露在外面,赛场面积开启率可达100%,开闭时间约20分钟。天空穹顶与著名的多伦多电视塔相临,屋盖开启后呈现在观众面前的是安大略湖和以高553 m的电视塔为背景的多彩空间。

当今世界规模及跨度最大的开合结构是跨度(直径)222 m的日本福冈穹顶,见图0-5。该馆于1993年3月建成,建筑面积72 740 m²,是1995年在福冈举行的世界大

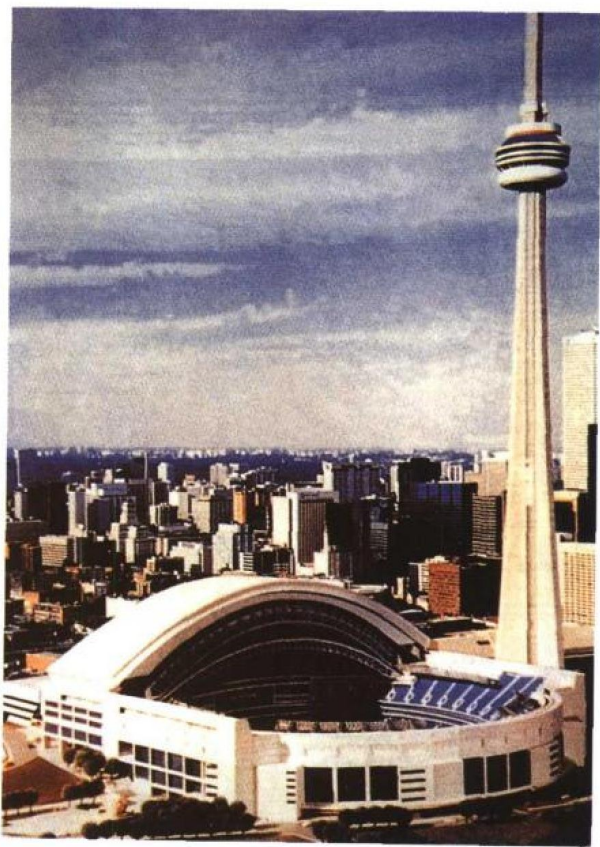


图0-4 加拿大多伦多天空穹顶

学生运动会的主会场。屋盖由3片网壳组成,最下一片固定,中间及上面两片可沿着圆的导轨移动,因此开合方式为回转重叠式,全部开启可呈125°的扇形开口。各片网壳均为自支承,为避免在开合过程中振幅过大在顶部引起装饰材料互相碰撞,在屋顶中心设置液压阻尼器减震。屋盖移动的轨道上装有地震仪,当地震仪接收到超过50 gal (0.5 m/s²)的加速度时,能自动停止移动。值得一

提的是这么大工程仅仅用了两年多的时间建成，由此可看出施工队伍的综合施工水平是非常高的。



图 0-5 日本福冈穹顶开合结构

四、折叠结构

折叠结构 (Deployable Structures) 是一种用时展开、不用时可折叠收起的结构。从这个意义上说，有着悠久历史广为人们所熟悉的雨伞的或遮阳伞就是一种折叠结构，这表明折叠结构的思想古已有之，但折叠结构用于建筑领域并形成相应的设计计算理论却是近几十年的事。1961年西班牙建筑师皮奈诺 (P.Pinero) 展出了他的作品——一个可折叠移动的小剧院。人们从中发现了这种结构的诸多优点：一般可重复使用，且折叠后体积小，便于运输及储存，与永久性建筑物相比不仅在施工上省时省力，而且可避免不必要的资金再投入而造成的浪费。随着人们对“折叠”概念逐渐理解，折叠结构在计算理论上及结构形式上都得以很大发展，目前这种结构已走出实验室，得到了广泛的工程应用。在生活领域，可用于施工棚、集市大棚、临时货仓等临时性结构；在军事上可用于战地指挥、战场救护、装配抢修及野外帐篷等，对提高部队的后勤保障能力、增加部队战斗力有重要意义；在航空航天领域，折叠结构有着不可替代的地位，已用作太阳帆、可展式天线等。

依据不同的标准折叠结构有着不同的类型划分。按照折叠结构组成单元的类型可分为杆系单元和板系单元，而杆系单元又可再分为剪式单元及伸缩式单元；根据结构展开成型后的稳定平衡方式可分为结构几何自锁式、结构构件自锁式及结构外加锁式；根据结构组成是否采用索单元可分为刚性结构及柔性结构；根据结构展开过程的驱动方式又可分为液压（气压）传动方式、电动方式、节点预压弹簧驱动方式等。

结构几何自锁式又称自稳定折叠结构，是工程界普遍

重视的一种结构。其自锁原理主要是由结构的几何条件及材料的力学特性决定。在这种结构中，一些剪式单元（简称剪铰）以一定方式相连而组成锁铰。锁铰中每根杆件只有在折叠状态与完全展开时，才与结构的几何状态相适应，杆件应力为零，而在展开过程中杆弯曲变形，储存外荷能量，最后反方向释放这些能量。自稳定折叠结构展开方便、迅速，但其杆件抗弯刚度比较小，因而承受外荷载能力低，只适合小跨度情况。结构构件自锁式的自锁机理主要是靠铰接处的销钉在结构展开时自动滑入杆件端部预留的槽孔处而锁定结构。结构外加锁式亦称附加稳定结构，在结构展开过程中，杆件内无应力，整个结构是一个机构体系，在展开到预定跨度时，在结构的端部附加杆件或其他约束消除机构而形成结构。这种结构的杆件刚度比较大，可满足较大跨度的要求。

没有索单元的折叠结构称为刚性结构，而柔性折叠结构的受拉单元为索单元。柔性结构在收纳状态时，索呈松弛状态，刚性杆件可形成捆状，便于运输储存。在展开时可拉紧驱动索使结构展开，亦可增加压杆长度来张拉索，在完全展开时可形成张拉整体体系。这种结构自重轻，展开成型后刚度较大，可用于跨度较大的结构。

折叠结构根据其在展开过程中的运动特性可分为两大类。一类是各部分运动为刚体运动，称其为多刚体体系，它的运动描述及内力分析比较容易解决；另一类则是部件在空间中经历着大的刚性运动的同时，还存在自身的变形运动，再现出刚性运动与变形运动互相影响、强烈耦合的特征。自稳定杆系结构就属于后一种类型，其中锁铰的设计是整个自稳定折叠结构设计的基础，直接影响结构的合理性及使用方便性。理想的自锁条件是在叠展的过程中，组成锁铰的杆件内产生内力，内力变化呈缓升陡降的趋势，变化率表现出大范围变化的慢变量与小幅度的快变量的特征。这种运动性必须采用非线性理论来描述，这正是这种结构计算的难点所在。

对于任何空间结构，节点设计都占有很重要的位置，折叠结构也不例外，而且还有一些特殊要求：折叠结构的节点必须能够保证杆件在展开过程中运动自如，杆件与节点连接处没有较大摩擦或易于弯曲的变形；在结构收纳状态时能够保证杆件成紧密捆状，以便储存，它有足够的强度来承受杆件的拉压及局部的弯、剪、摩擦等各种作用。目前应用比较普遍的是铰节点，节点材料可用金属或高分子材料。

五、玻璃结构

玻璃被作为建筑材料用于建筑物已有很长的历史，但多用于门、窗、采光带等。近年来随着玻璃性能的不断改善，以及人们对玻璃特性认识的不断深入，玻璃已被越来越多地作为承重材料用于建筑结构。

在一般人眼里玻璃是一种薄而易碎的东西，很难与硕大的承重结构联系起来。事实上虽然玻璃在力学性能上有

一定的局限性,但如果对其设计合理,扬长避短,用于建筑结构却会取得意想不到的效果。透明或半透明是玻璃的主要也是最显著的特征,因此玻璃结构一般明亮华丽,从采光这个角度说,也是一种节能结构。玻璃在力学性能上有点像混凝土,是一种脆性材料,抗压性能好、抗拉性能差,应力—应变关系表现为线性,弹性模量在70~73 GPa之间,约为钢材弹性模量的1/3。一般浮法玻璃的抗弯强度为50 MPa,经过热处理后玻璃的性能可显著改善,钢化玻璃的抗弯强度高于70 MPa;淬火玻璃的抗弯强度则可超过120 MPa,甚至可达到200 MPa。而玻璃的自重为2500 kg/m³,所以玻璃的强重比要优于钢材,玻璃结构能给人一种轻巧的感觉。玻璃的热膨胀系数为 9×10^{-6} ,与钢材相近,这使得钢材和玻璃能够用于同一结构,发挥各自特长。玻璃的耐腐蚀性能强,可抵抗强酸的侵蚀,因此玻璃结构的防腐费用较低。因此越来越多的建筑师和结构工程师在设计中利用玻璃来实现建筑物更亮、更轻、更美的高科技效果,增强城市的现代化气息。见图0-6、图0-7。

结构用玻璃主要类型有:退火玻璃、夹丝玻璃、钢化玻璃以及淬火玻璃等。通过对这几种玻璃的再次加工得到一些特殊用途的玻璃,如夹层玻璃及隔热、隔声玻璃等。

由于力学上的局限性,玻璃在结构中一般与钢、铝等抗拉材料共同工作,因此玻璃结构设计的关键是通过一定的结构及构造形式来发挥不同材料各自的受力特长,以求得合理的设计结果。最简单也是最常用的方案是采用钢或铝合金框架镶嵌玻璃幕,这样做可通过金属框架分割整个玻璃幕,使得每块玻璃面积不致太大,从而保证玻璃的面外刚度。显然整个幕墙因为不透明的金属框分割而变得不连续,影响了建筑效果。玻璃结构发展的最新技术就是去掉这些金属框架,保持玻璃幕的连续性,但是玻璃的力学特性没有变:耐压不宜折,对平面外的变形非常敏感,因此尽管取消了金属框架,仍要保证结构中的玻璃处于受压状态。这使人想到了张拉整体体系,张拉整体中的杆件就是纯受压的。这样在张拉整体思想的基础上,产生了张拉整体无框架玻璃幕结构(Tensegrity Frameless Glazing)。这种结构用玻璃板代替了张拉整体体系中的压杆,为增强整个结构的刚度,减小结构的变形,用有一定刚度的杆件(Rod)代替拉索(Cable)。整个玻璃幕仍然是由若干块玻璃拼成,只是玻璃之间不再通过金属框架连接,而是由位于平面处的专用连接件直接对接,连接件与玻璃幕之间可以栓接也可以粘接。

玻璃板本身的强度、刚度计算是在整体结构分析的基础上进行的,在这方面国际上还没有相应的规范作为依据,但德国等一些国家的学者已经将以概率统计为基础的可靠度理论引入玻璃结构的计算,并用极限状态法给出了相应的强度、位移验算公式。因此玻璃结构的计算目前已不困难,研究的重点则应放在结构形式及细部构造上。



图0-6 青岛国际会展览中心

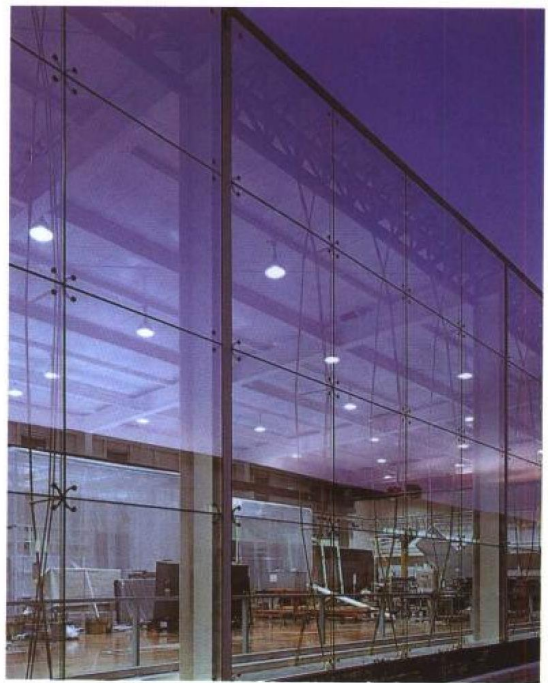


图0-7 日本埼玉工厂

本书介绍的这五种空间结构,代表了当前世界空间结构的发展方向,可以说今后哪个国家占有这几方面的优势,它就必然在世界空间结构发展中占有领先地位。应当看到,我国在空间结构的前沿领域与世界发达国家差距还很大,在张拉整体结构、开合结构以及折叠结构的工程实践方面几乎属于空白。因此我国相关的工作人员都应认清形势,急起直追,加强科研开发,以便在短时间内赶上世界先进水平,为国家争荣誉,为人类做贡献。特别是我国成功申办2008年奥运和2010世博会,届时,一定要建设出一批国际一流的体育场馆和展览场所。

张拉整体的结构体系
张拉整体结构的初始平衡问题
张拉整体结构的几何构造分析方法
张拉整体结构的预应力设计
张拉整体结构的静力分析方法

第一篇

张拉整体结构

TENSEGRITY SYSTEM

张拉整体结构

膜结构

开合屋盖结构

折叠结构

玻璃结构

张拉整体结构

膜结构

开合屋盖结构

折叠结构

玻璃结构

张拉整体结构

膜结构

开合屋盖结构

折叠结构

玻璃结构

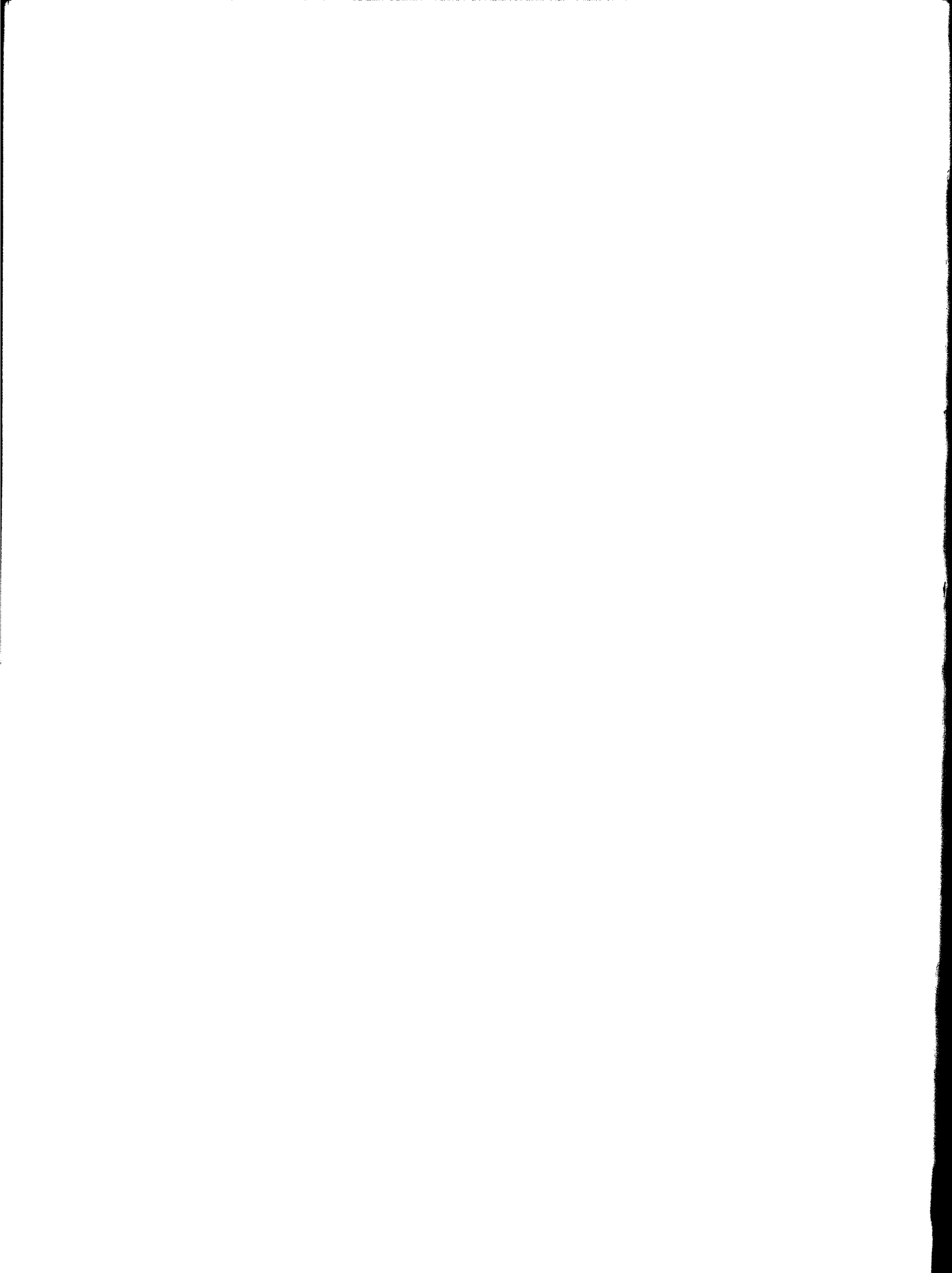
张拉整体结构

膜结构

开合屋盖结构

折叠结构

玻璃结构



张拉整体的结构体系

第一节 概 述

20世纪40年代,美国的发明家、结构工程师、建筑大师巴克明斯特·富勒(Richard Buckminster Fuller)从一些自然现象中得到启发,推断出宇宙中存在着一种叫做张拉整体(Tensegrity)的自然规律。这些自然现象包括:织物气球在气体分子不停运动下自行撑开;渔网在鱼的前后跳动或在内部压杆支撑作用下张开;浩瀚的海洋中独立存在着诸多孤岛等等。富勒把这些现象归结为:在连续张拉(Tensile)作用下形成的统一整体(Integrity),即连续张拉+统一整体=张拉整体(Tensile+Integrity = Tensegrity),因此他将这类结构定义为张拉整体结构。

张拉整体的实物最早出现于1921年,当时莫斯科展览会上展示了一个自平衡结构,这个奇妙的结构主要由3根杆和7根索组成,并由第八根非应力索控制,使整个结构成为可动体。这个自平衡结构呈唇状,与早期的三杆九索张拉整体结构模型很相近。

张拉整体作为一种客观的存在,在其结构体系的发展历史上曾出现过许多名称,如自应力网格、浮动受压体系、临界或超临界体系等。这些名称的不同主要由于研究者的出发点不同,有的从几何学角度考虑,有的着重于拓扑原理,有的则强调了力学特性。

1947年和1948年的夏天,富勒在黑山学院(Black Mountain College)教学期间不断重复张拉整体这个词,并经常自言自语道:自然界以连续张拉来固定互相独立的受压体,我们必须制造出这个原理的结构模型。令富勒高兴的是,他的学生、著名的雕塑家斯耐尔森(K. Snelson)做出了答案,并把其发明交给了富勒。斯耐尔森的发明是由一些弦把3根独立杆件张紧在一起形成的稳定体。其后不久,斯耐尔森就把他的张拉整体结构模型用于雕塑中,如图1-1所示。斯耐尔森的雕塑代表了现代张拉整体结构发展的开始。

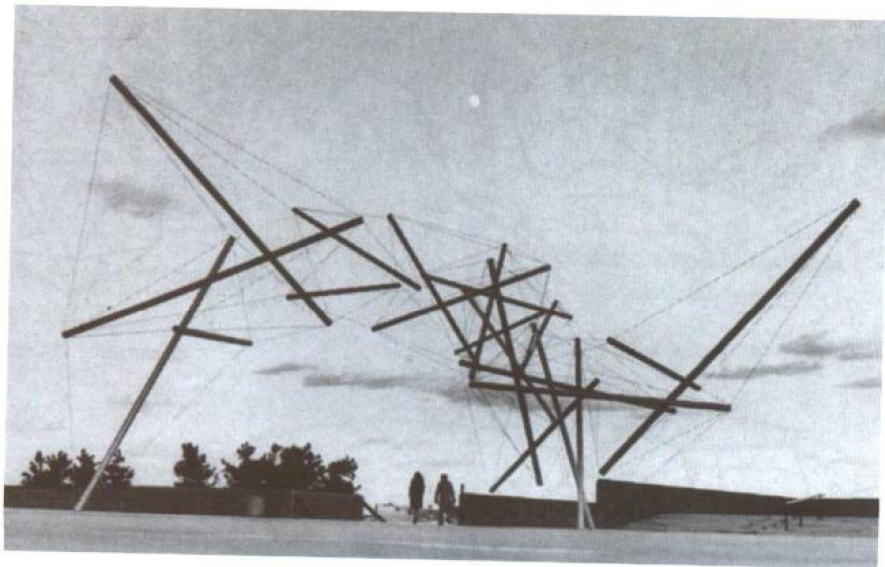


图 1-1 斯耐尔森的雕塑