

东南土木
青年教师
科研论丛

网格式可展结构 体系与分析

蔡建国 著

System and Analysis of
Deployable Lattice Structures

东南大学出版社

东南土木·青年教师·科研论丛

网格式可展结构体系与分析

蔡建国 著

项目基金资助:

国家自然科学基金(51278116 和 51308106)

江苏省自然科学基金(BK20130614)

教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20130092120018)

东南大学出版社
· 南京 ·

内 容 提 要

本书系统论述了网格式可展结构的体系设计、运动过程和受力性能。具体内容包括:结合螺旋互易定理,证明了多种成角度剪式单元的可动性,其组成连杆机构的自由度为体系约束方程 Jacobian 矩阵的零向量空间数量;讨论了四连杆机构运动过程数值模拟中的运动奇异点问题,采用坐标转换矩阵法对连杆机构的连续运动进行模拟计算,在结构的分歧点引入高阶方程来求解结构体系下一步可能的运动路径;从能量的角度出发,利用 Lagrange 乘子法将约束条件添加到目标函数中,并应用梯度法进行优化,从而得到考虑约束条件索杆张力结构的形状;提出多种可开启式屋盖结构、索杆式折叠网格结构和折叠索穹顶结构方案,并对其受力性能进行了深入的研究。

本书可作为结构工程专业的教师、研究生和高年级本科生使用,也可供相关领域的工程技术人员提高创新设计能力之用。

图书在版编目(CIP)数据

网格式可展结构体系与分析/蔡建国著. —南京:
东南大学出版社, 2013. 12

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978 - 7 - 5641 - 4655 - 9

I. ①网… II. ①蔡… III. ①土木结构—结构
力学—研究 IV. ①TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 278793 号

网格式可展结构体系与分析

著 者 蔡建国
责任编辑 丁 丁
编辑邮箱 d. d. 00@163. com
出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号(邮编:210096)
网 址 <http://www.seupress.com>
经 销 全国各地新华书店
发行热线 025—83790519 83791830
印 刷 兴化印刷有限责任公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 15
字 数 366 千
版 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 5641 - 4655 - 9
定 价 58.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系,电话:025-83791830)

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就,特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、珠港澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有许多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”、“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍以上甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝楨、徐百川、梁治明、刘树勋、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、丁大钧、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入

选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国家级教学名师；科研成果获国家技术发明奖 4 项，国家科技进步奖 20 余项，在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中，土木工程位列全国第三。

近年来，东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展，吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入，8 人入选教育部新世纪优秀人才，8 人在 35 岁前晋升教授或博导，有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来，这些青年学者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

时逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年，东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》，将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版，得益于东南大学出版社的大力支持，尤其是丁丁编辑的帮助，我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后，我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用，同时，希望丛书的编写者们继续努力，并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序，我在《东南土木青年教师科研论丛》中写了上面这些话，算作序。

中国工程院院士：吴志清

2013.12.23.

前 言

可展结构是一类可以自由地大尺度改变几何构形的结构。它们可以从体积较小的闭合或者收缩状态变换到开启或者展开状态。相对于传统结构而言,可展结构具有建造速度快、施工方便等优点,而且便于运输和存储,可反复使用,因而在民用、军事、航天等领域被广泛应用。可展结构的概念在日常生活中也得到广泛应用,例如折扇、雨伞等。在土木工程中,可展结构的思想可运用于折叠帐篷、可开启式屋盖、可开启式桥梁等方面。Buckminster Fuller 是早期最有影响的可展结构倡导者和建议者。1960 年,Buckminster Fuller 首先提出了可展结构的概念。1961 年,西班牙年轻建筑师 Pinero 在 Fuller 的启发下,成功地将可展结构的概念应用于“可移动剧院”的设计,在世界建筑作品大奖赛中展示出其设计的跨度为 300 ft(约为 91.44 m)的穹顶折叠式可移动歌剧院。

可展结构按照构件的形式可以分为网格式可展结构、板壳式可展结构和折叠膜结构等,本书主要针对网格式可展结构的共性问题及关键技术。目前,基于剪式单元的折叠网格结构的研究最为系统,但其在大跨结构中使用较少,主要原因有:① 折叠网格结构的节点设计一般比较复杂,目前尚缺乏构造简单且实用、造价低廉的适合工程应用的节点设计;② 折叠网格结构的构件除受轴力外,还受一定弯矩,受力性能不佳,造价较高;③ 折叠网格结构的刚度很差,位移较难满足使用要求。为此,对新型折叠网格结构进行系统研究,使之能够应用于大跨度开启屋盖等体系显得十分必要。

索杆结构体系由高强度索和压杆组成,其质量较小,收纳率较大,且索杆连接的节点相对简单。体系的基本特点是其一部分刚度由预应力提供,可以节省大量的材料;另外由于其应力态恒定,它也是一种结构效率很高的体系。所以索杆结构体系可以应用于大尺寸可展空间结构。而现阶段研究的索杆式可展结构大多基于刚性杆折叠体系,拉索仅作为被动索和用于驱动的主动索,不能称之为真正意义上的索杆结构体系。对于由索杆单元组成的可展索杆体系的几何构形、受力性能等的研究较少,阻碍了可展索杆体系的发展与应用。

从目前国内外对可展结构的研究现状来看,对其展开过程的研究是不够的,

绝大部分研究都局限于对单个或几个构件组成的可动结构进行仿真分析或试验研究。而对于复杂的大型可展空间结构则较少涉及,尤其是运动过程中的受力性能。对于逐步展开的可展结构,其运动过程持续时间较长,运用多刚体动力学分析时,长时间域微分方程积分工作量巨大,且较难获得理想的解。而为了保证可展空间结构的可靠运行,在展开过程分析时需同时考虑机构运动与弹性变形;大多数柔性多体系统动力学的研究中,需要对构件的弹性变形建立模态坐标,当求解大型结构时坐标转换复杂,建模困难。本书运用非线性有限元方法对多种可展结构的运动过程进行深入研究,其研究成果对可展结构的设计分析具有重要的参考价值。

本书对多种新型可展结构的几何构成、运动过程以及受力性能进行了深入的研究,具体研究内容及成果包括:① 结合螺旋互易定理,利用两个连杆公共节点处约束螺旋相等,证明了 Hoberman 连杆机构、交叉及非交叉成角度剪式单元的可动性。随后,利用剪式单元组成连杆机构体系,其自由度为体系约束方程 Jacobian 矩阵的零向量空间数量。在对由 Hoberman 剪式单元组成的径向可开启平面结构进行运动特性分析的基础上,深入研究了体系闭合后的受力性能以及开启闭合过程中的受力性能。② 依据平面四连杆机构的运动规律,提出了一类可应用于开启式屋盖的折叠网架体系,分析了屋盖体系在完全闭合状态的受力性能,并对体系的运动过程进行了深入的研究。同时研究了四连杆机构运动过程数值模拟中的运动奇异点问题,采用坐标转换矩阵法对连杆机构的连续运动进行模拟计算,对于体系在一般位形时采用一阶分析,即传统的算法,并利用预测——修正方法进行计算;在结构的分歧点引入了高阶方程来求解结构体系下一步可能的运动路径。③ 从能量的角度出发,建立了基于梯度优化的索杆体系找形方法。利用 Lagrange 乘子法将约束条件添加到目标函数中,并应用梯度法进行优化,从而得到考虑约束条件索杆张力结构的形状。在给定初始条件下,该方法可以找到同时满足能量最小和一定形态要求的索杆张力体系。提出了两种折叠索穹顶方案,并以体系刚度最大、预应力分布均匀及拉索受拉、压杆受拉为目标函数,利用优化方法寻找自应力模态组合系数。④ 分别基于 CP 和 DP 索杆单元,提出了新型索杆式折叠网格体系,给出了关键节点的设计方案,利用模型试验验证了理论分析的正确性。利用有限元软件分析了两种体系在完全展开状态下的受力性能,针对两种常见的荷载工况:满跨均布荷载和非对称荷载,分析了结构的构件内力和节点位移随荷载变化的规律。另外,为了深入理解预

应力水平、温度变化以及拉索破断等参数变化对结构的影响,本书还对新型索杆式折叠结构进行了参数分析,得出了一些有益的结论。

本书也汇集了众多专家学者的研究成果,有的文献出处无法在参考文献中一一列出,作者在此表示感谢和歉意。

本文的部分工作是作者攻读博士学位期间在导师冯健教授的悉心指导下完成的。从本科学习优秀生至博士研究生的八年多来,恩师对我学习上的严格要求和生活上无微不至的关怀让我终生难忘。他严谨的治学态度,踏实认真的工作作风给我留下了深刻的印象。借此机会向导师表示诚挚的敬意和最衷心的感谢!

东南大学土木工程学院的孟少平教授、郭正兴教授、吴京教授、张晋副教授等,都就本书的内容和相关研究工作与作者进行过深入的讨论。在本书付梓之际,作者对他们表示衷心的感谢。

感谢美国加州理工学院 Pellegrino Sergio 教授对作者在美国学习期间的指导和帮助。感谢英国牛津大学 You Zhong 博士、Strathclyde 大学 Xu Yixiang 博士,日本名古屋市立大学 Zhang Jingyao 博士对作者有关可展结构科研上的帮助。

感谢作者所在单位东南大学土木工程学院和国家预应力工程技术研究中心的领导和同事,他们在本书的写作和修改过程中给予了作者很大的帮助,他们的支持是作者完成本书的坚强后盾。

本书的工作是在国家自然科学基金项目“索杆式多稳态结构的形态、运动过程与预应力优化研究”、“索支撑径向开合屋盖结构体系及其运动过程研究”,江苏省自然科学基金项目“大跨度几何可变屋盖结构的形体设计、运动过程与受力性能研究”,教育部高等学校博士学科点专项科研基金“径向可开启屋盖结构的形体分析与运动过程研究”,江苏省江苏高校优势学科建设工程资助项目,东南大学优秀博士学位论文基金和东南大学优秀博士学位论文培育项目等课题的资助下完成的,特此致谢!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。电子邮件联系方式:j. cai@seu. edu. cn。

蔡建国

2013 年 10 月于东南大学

目 录

1 绪论	1
1.1 可展结构的概念	1
1.2 国内外研究现状与分析	4
1.2.1 可展结构的历史	4
1.2.2 可展结构理论研究	4
1.2.3 单元构架式可展结构	7
1.2.4 折叠网格结构	9
1.2.5 索杆式可展结构	12
1.2.6 可展张拉整体结构	13
1.3 本书的结构安排	15
2 成角度剪式单元及其连杆机构的可动性分析	17
2.1 几何学方法	18
2.1.1 径向可动的几何条件	18
2.1.2 剪式单元的运动轨迹分析	20
2.2 螺旋互易定理简介	21
2.2.1 运动和约束的螺旋描述	21
2.2.2 螺旋互易定理	21
2.3 剪式单元的可动性判断	22
2.3.1 Hoberman 单元	24
2.3.2 GAE1 单元以及非交叉剪式单元	26
2.3.3 GAE2 单元	27
2.4 基于体系约束 Jacobian 矩阵的自由度分析方法	28
2.4.1 刚性约束条件	28
2.4.2 铰接节点约束条件	29
2.4.3 成角度剪式单元约束条件	29
2.4.4 边界约束条件	29
2.4.5 系统约束方程	29
2.4.6 计算流程	30
2.5 基于成角度剪式单元平面连杆机构的自由度分析	30
2.5.1 Hoberman 连杆机构	30
2.5.2 You 和 Pellegrino 等腰三角形连杆机构	32

2.5.3	You 和 Pellegrino 相似三角形连杆机构	33
2.5.4	非交叉单元连杆机构	34
2.6	基于平行四边形法则的平面连杆机构	36
2.7	本章小结	37
3	连杆机构运动过程中运动奇异点分析	39
3.1	基于螺旋互易定理的运动奇异点判断	39
3.1.1	平面四连杆机构的可动性	39
3.1.2	运动奇异点判断	41
3.2	矩阵分析法	41
3.2.1	运动学描述	41
3.2.2	闭环连杆机构	43
3.3	一阶分析	44
3.3.1	预测步	44
3.3.2	修正步	46
3.3.3	计算结果	47
3.4	二阶分析	47
3.4.1	理论推导	47
3.4.2	计算结果	49
3.5	本章小结	50
4	径向可开启屋盖结构的运动过程研究	51
4.1	二维体系的运动特性	51
4.1.1	几何分析	51
4.1.2	运动界线	54
4.2	三维体系的几何分析	55
4.3	受力性能分析	56
4.3.1	基本模型	56
4.3.2	计算结果	57
4.4	运动过程分析	58
4.4.1	基本模型的运动过程分析	58
4.4.2	初始缺陷的影响	61
4.4.3	矢跨比的影响	62
4.5	具有固定支座体系的几何设计	64
4.6	本章小结	65
5	径向展开式索撑网壳结构受力性能研究	66
5.1	基本模型	66

5.1.1 几何构形	66
5.1.2 索撑网壳单元的基本力学特性	67
5.1.3 有限元模型	68
5.2 静力特性分析	69
5.2.1 索撑网壳与普通网壳的静力特性分析	70
5.2.2 矢跨比对结构静力特性的影响	71
5.2.3 钢杆件截面对结构静力特性的影响	72
5.2.4 索截面对结构静力特性的影响	73
5.2.5 索初始预应力对结构静力特性的影响	74
5.3 结构参数对弹塑性极限承载能力的影响	74
5.3.1 矢跨比对弹塑性极限承载能力的影响	76
5.3.2 钢杆件截面对弹塑性极限承载能力的影响	77
5.3.3 索截面对弹塑性极限承载能力的影响	78
5.3.4 索初始预应力对弹塑性极限承载能力的影响	78
5.4 索撑网壳的缺陷稳定性分析	80
5.4.1 缺陷模式对弹塑性极限承载能力的影响	80
5.4.2 缺陷大小对弹塑性极限承载能力的影响	82
5.5 本章小结	83
6 折叠网架结构的受力性能及其运动过程研究	85
6.1 几何设计	85
6.1.1 平面四连杆机构	85
6.1.2 折叠网架结构	86
6.2 折叠网架结构受力性能分析	87
6.2.1 计算模型	87
6.2.2 折叠网架结构的极限承载力分析	88
6.3 初始缺陷对结构极限承载力的影响	89
6.4 折叠网架结构的运动过程分析	90
6.4.1 理想结构的运动过程分析	90
6.4.2 有初始缺陷结构的运动过程分析	91
6.4.3 初始缺陷大小对折叠网架折叠完成时最大应力的影响	91
6.5 本章小结	92
7 基于剪式单元网壳结构的运动过程及其承载能力分析	93
7.1 体系介绍	93
7.2 基本模型	94
7.3 柱面索拉网壳施工过程分析	95
7.4 结构参数对柱面索拉网壳施工过程影响	97

7.4.1	矢跨比对柱面索拉网壳施工过程影响	98
7.4.2	钢杆件截面对柱面索拉网壳施工过程影响	99
7.4.3	单元网格长宽比对柱面索拉网壳施工过程影响	100
7.4.4	外扩跨度对柱面索拉网壳施工过程影响	101
7.5	柱面索拉网壳弹塑性极限承载能力分析	102
7.6	结构参数对结构极限承载能力的影响	104
7.6.1	矢跨比对结构极限承载能力的影响	104
7.6.2	钢杆构件截面对结构极限承载能力的影响	105
7.6.3	索截面对结构极限承载能力的影响	105
7.6.4	索初始预应力对结构极限承载能力的影响	106
7.6.5	单元网格长宽比对结构极限承载力的影响	107
7.6.6	外扩跨度对结构极限承载力的影响	108
7.7	其他材料对结构施工过程的影响	108
7.8	本章小结	109
8	索杆张力结构的初始预应力水平设计	110
8.1	基本理论	110
8.1.1	平衡矩阵	110
8.1.2	结构稳定性分析	111
8.1.3	初始预应力的确定	112
8.2	算例分析	114
8.2.1	平面索杆结构	114
8.2.2	张拉整体结构	116
8.2.3	空间索杆结构	118
8.3	本章小结	122
9	考虑约束条件的索杆张力结构找形研究	123
9.1	能量法	123
9.1.1	理论基础	123
9.1.2	力密度法的缺点	124
9.1.3	能量法	125
9.2	计算流程	126
9.3	算例	127
9.3.1	平面索杆结构	127
9.3.2	索穹顶结构	129
9.3.3	空间索桁结构	132
9.4	本章小结	136

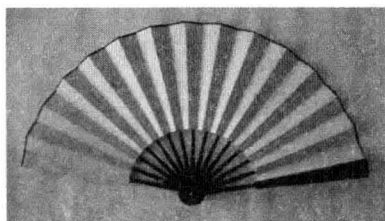
10 索杆式折叠帐篷结构的受力性能研究	137
10.1 基本力学特性	137
10.1.1 几何分析	137
10.1.2 初始预应力水平	138
10.1.3 最短压杆长度	139
10.1.4 最大承载能力	142
10.2 有限元分析	142
10.2.1 基本模型	142
10.2.2 静力性能分析	143
10.2.3 特征值屈曲分析	144
10.2.4 非线性屈曲分析	145
10.2.5 初始缺陷的影响	145
10.3 参数分析	147
10.3.1 矢跨比的影响	147
10.3.2 竖向压杆长度的影响	148
10.3.3 初始预应力水平的影响	149
10.4 本章小结	149
11 索杆式折叠网架结构的理论分析与试验研究	151
11.1 基于 CP 单元折叠网架的几何分析	151
11.1.1 基本单元及其初始预应力水平	151
11.1.2 折叠体系	151
11.1.3 折叠展开方式	152
11.2 基于 CP 单元折叠网架的节点设计和模型制作	153
11.2.1 节点设计	154
11.2.2 模型制作	155
11.3 基于 CP 单元折叠网架的受力性能分析	156
11.3.1 静力性能分析	156
11.3.2 自应力水平对结构静力性能的影响	160
11.3.3 温度变化对结构静力性能的影响	162
11.3.4 拉索破断对结构静力性能的影响	163
11.4 基于 DP 单元折叠网架的几何分析	164
11.4.1 基本单元	164
11.4.2 折叠体系	165
11.4.3 折叠展开方式	166
11.5 基于 DP 单元折叠网架的节点设计和模型制作	166
11.5.1 节点设计	168
11.5.2 模型制作	169

11.6 基于 DP 单元折叠网架受力性能分析	170
11.6.1 静力性能分析	170
11.6.2 自应力水平对结构静力性能的影响	175
11.6.3 温度变化对结构静力性能的影响	177
11.6.4 拉索破断对结构静力性能的影响	178
11.7 本章小结	180
12 折叠索穹顶的几何及其预应力水平分布研究	182
12.1 几何分析	182
12.1.1 折叠索穹顶	182
12.1.2 径向可开启式索穹顶	183
12.2 预应力分布的确定	184
12.2.1 数学模型	184
12.2.2 算例	186
12.3 考虑压杆初弯曲的张拉整体结构受力性能分析	189
12.3.1 基本模型	189
12.3.2 解析法	189
12.3.3 分析结果	191
12.3.4 有限元验证	193
12.4 本章小结	194
13 基于 2V 型索杆单元折叠结构的受力性能研究	195
13.1 几何分析	195
13.1.1 基于拉索方式的折叠模型	195
13.1.2 基于压杆方式的折叠模型	197
13.1.3 改进后的折叠模型	198
13.2 受力性能分析	198
13.2.1 基本模型	198
13.2.2 拉索滑移的考虑	198
13.2.3 计算结果	203
13.3 温度变化对结构静力性能的影响	207
13.4 拉索断裂对结构静力性能的影响	207
13.5 本章小结	208
参考文献	210

1 绪 论

1.1 可展结构的概念

可展结构是近半个多世纪以来发展起来的一种新型结构,在宇航、建筑结构和军事工程等领域起着重要作用。可展结构的主要特征是具有两种稳定的构形:完全折叠状态和完全展开工作状态。在折叠状态时,结构收拢在某一特定形状,在外界驱动力的作用下,结构逐步展开,达到完全展开的工作状态,然后锁定为稳定状态。在展开过程中可展结构为一个不稳定的体系,需要分析展开过程中体系的运动轨迹、运动时间、速度、加速度、约束反力等^[1]。可展结构的概念在日常生活中得到广泛应用,例如图 1.1 所示的折扇、雨伞等^[2]。在土木工程中,可展结构的思想可运用于折叠帐篷(图 1.2)、可开启式屋盖^[3](图 1.3)、可开启式桥梁(图 1.4)等方面。



(a) 折扇

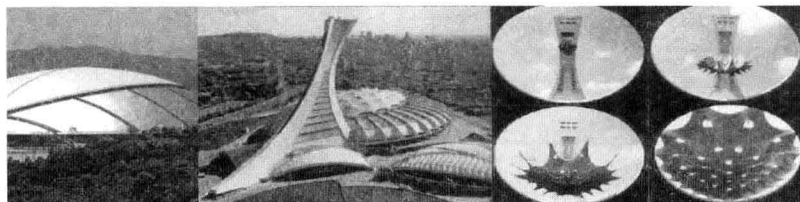


(b) 雨伞

图 1.1 可展结构在生活中的应用示例



图 1.2 折叠帐篷



(a) 刚性开启方式

(b) 柔性开启方式

图 1.3 可开启式屋盖

可展结构的另一个广泛应用的领域就是航天工程中的空间结构,例如伸展臂(图 1.5)、太阳能帆板和天线(图 1.6)。可展结构的概念还被用于其他领域,如汽车的折叠顶篷(图 1.7)。

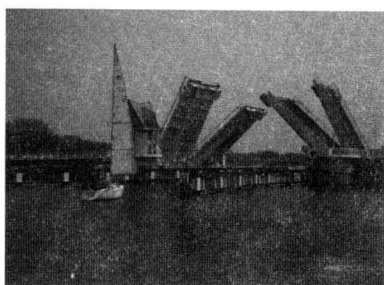


图 1.4 可开启式桥梁

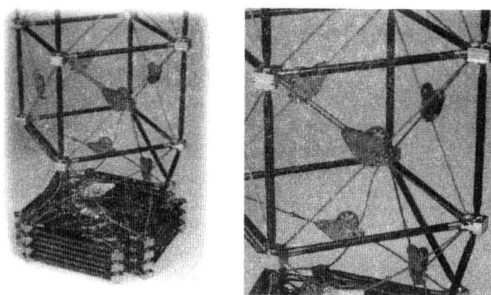
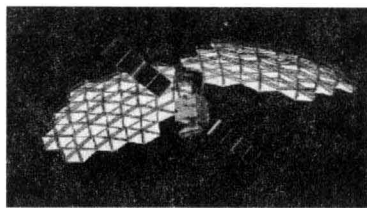


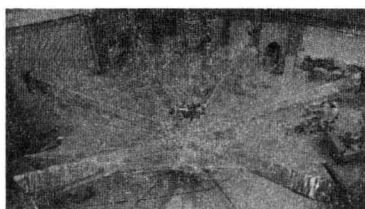
图 1.5 伸展臂示意图



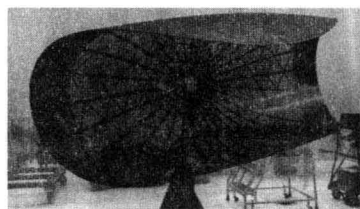
(a) AstroMesh可展天线



(b) 日本Engineering Test SatelliteVIII号卫星



(c) 伸展臂式可展天线



(d) Spring-Back可展天线

图 1.6 太阳能帆板和可展天线示意图



图 1.7 汽车顶篷的折叠和展开状态

对于许多临时和半永久的建筑,可展结构具有可重复利用的显著优点,且经济指标较好。临时建筑主要可以用于遭遇地震和洪水等自然灾害时的紧急救助,有助于解决灾民的生活问题。折叠网架施工方便,如图 1.8 所示,和传统的帐篷相比,具有更大的容积和更好的生活环境。半永久建筑可以作为建筑工地或其他活动的场所,可展结构可以随着任务的变化而方便地转移,并可以设计成各种美观的造型,具备良好的安全性。随着人们生活水平的不断提高,人们希望享受更舒适的生活,传统的住房已难以满足一些较高的要求。一些使用者希

望根据气象条件和心情自主地选择是否接受阳光和星星。可展结构的出现能满足人们的这些愿望。展开时,能挡风遮雨和保暖;折叠时,能让人们在夏日的夜晚享受露天酒会的浪漫。西班牙的可展游泳池网架就是一个典型的例子。不久的将来,会有越来越多的高级游泳池、网球场等体育设施采用折叠结构。

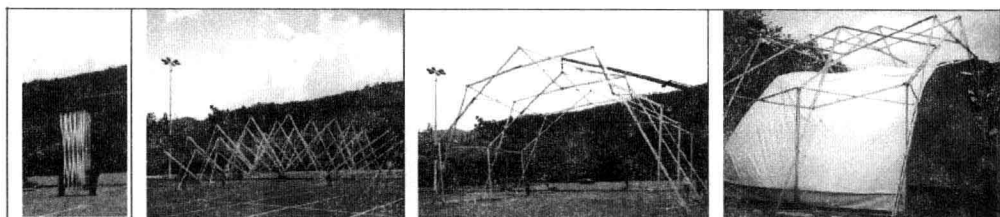


图 1.8 折叠网架展开折叠示意图

在航天领域,可展结构的概念由初始阶段杆件的折叠展开,发展到现在的充气硬化展开、材料变形展开等。后来,甚至在太空空间站上还出现了靠记忆性材料的特性来实现天线的展开折叠,例如图 1.9 所示基于形状记忆材料铰链的展开过程^[4]。可展结构的概念在建筑领域也得到了很大的发展,并且逐渐与新型结构体系如张力集成体系等的应用结合在一起,不断出现更新颖、更稳定可靠的可展结构。与其他空间结构形式相比,可展空间结构要求建筑、结构、机械与控制等学科之间的联系更为紧密,因此针对可展空间结构的研究更为综合、复杂,也更具有挑战性。

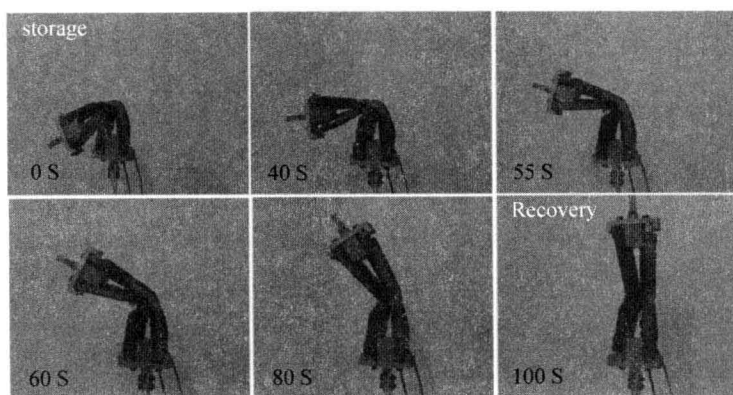


图 1.9 基于形状记忆材料铰链的展开过程

尽管迄今为止,世界上已有超过一百栋采用可展空间结构体系的大型建筑,积累了相当多的工程经验,但与之相称的关于大型可展空间结构的系统研究却很少,与之相关的文献大多是针对具体工程的讨论分析。我国对这一领域的研究取得了一定的进展,而对于可展空间结构体系的形态构成与优化、不同情况下的荷载取用、可展驱动和移动的方式与控制、结构可能出现的故障原因与分析、灾害荷载下的结构可靠度等很多与其设计、安全密切相关的问题尚未得到系统的解答。