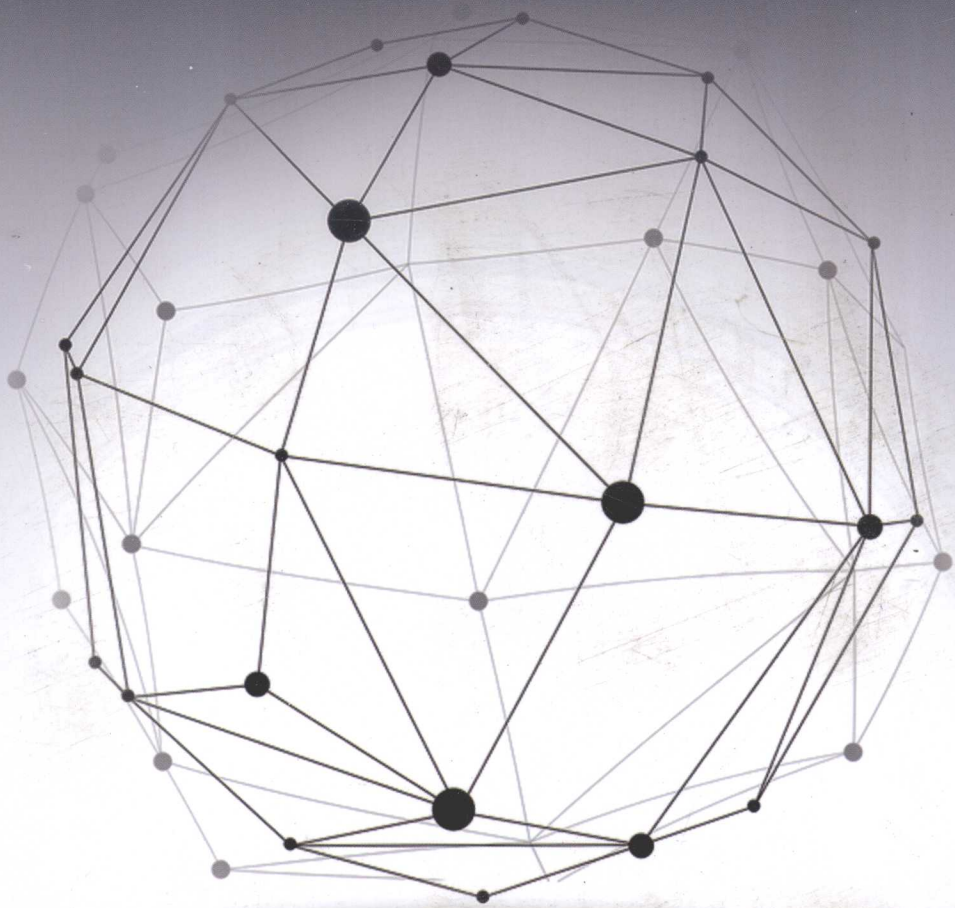




Symmetric Deployable Structures

对称可展结构

形态、展开过程与应用研究

东耀 冯健 · 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

本书获国家自然科学基金(51278116)和(51508089),东南大学优秀(YBJJ1025),东南大学优秀博士学位论文培育对象项目(YBPY1201),江办高校优势学科建设工程资助项目等资助。

对称可展结构

——形态、展开过程与应用研究

陈 耀 冯 健 著

东南大学出版社

· 南京 ·

内容提要

本书系统论述了对称可展结构的形态、展开过程与应用。具体内容包括:基于能量原理和群集理论,得到了对称动不定体系稳定的必要条件;提出了对称体系可动的充分条件,建立了结构可动性的判别准则;研究了多因素对结构形态的影响,归纳了机构位移、自应力模态在多因素影响下的对称性及其规律;建立了求解整体自应力模态的对称法,并引入蚁群算法,分别提出了静不定结构初始预应力优化方法、新型静不定动不定结构的找形与优化方法;建立了对称群数据库,开发了群集理论工具箱;完善了非线性预测—修正算法,跟踪分析了复杂过约束体系的展开过程;分别给出了用于求解运动奇异点的自适应步长法和对称平衡荷载法;给出了规避运动奇异的有效方法,提出并制作了多杆同步连接节点;设计并制作了多种新型对称可展机构单元,并探讨了新机构单元的潜在应用前景及实现方式。

本书可供土木工程、航空航天工程、力学等专业的教师和在读学生(高年级本科生、硕士研究生、博士研究生)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

对称可展结构:形态、展开过程与应用研究/陈耀,
冯健著. —南京:东南大学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5641-6039-5

I. ①对… II. ①陈…②冯… III. ①结构力学—
研究 IV. ①O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 229746 号

对称可展结构——形态、展开过程与应用研究

著 者: 陈 耀 冯 健

出版发行: 东南大学出版社

社 址: 南京市四牌楼 2 号 邮编: 210096

网 址: <http://www.seupress.com>

出 版 人: 江建中

印 刷: 江苏凤凰数码印务有限公司

排 版: 南京新翰博图文制作有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 17.75 字数: 432 千字

版 印 次: 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5641-6039-5

定 价: 61.00 元

经 销: 全国各地新华书店

发行热线: 025-83790519

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

前言

21 世纪以来,随着国民经济和社会的发展,科学技术的进步,航空航天领域和现代空间结构领域不断取得新的突破,带动了可展结构的快速发展,促进了可展结构整体研究水平的提升。可展结构具有机构运动特性,可满足所处环境的时间、空间等的苛刻条件,能适应特殊任务的实际需求,有效改变结构构形,具有构形新颖、生命力强、便于运输和储藏等优点,在航空航天、先进机构与机器人、生物医学、工程结构等领域应用广泛。尽管各类型可展结构的具体构成及运动特点存在多样性,但结构的构成机理、展开过程、设计与开发等方面的核心具有较多的共性。另外,由于现有可展结构多具有一定的对称性,考虑结构固有对称属性的研究方法将更具系统性、合理性和高效性。作为数学和向量代数的一个重要分支,群集理论是系统分析对称体系的一种强有力工具,不但可以简化计算过程,还可以直接对体系的许多内在性质作定性的判断,已成熟应用于计算物理学、计算化学、电磁学等领域。

在前人的研究基础上,紧密围绕可展结构领域的前沿研究和关键课题,综合运用群集理论、能量法、机构学、非线性预测-修正算法、广义逆、蚁群优化算法等理论与计算方法,并结合计算模拟、有限元分析、物理模型验证等研究手段,针对对称可展结构的形态稳定性、展开过程、运动奇异性及应用开展了研究和探讨。主要研究内容包括:

(1) 运用能量原理,推导得出了乘积力准则仅是结构稳定的必要非充分条件,结合数学推导和算例分析阐明了乘积力准则的三种适用条件。引入群集理论方法,基于对称群不可约表示及舒尔正交定理,建立了判定动不定体系平衡态稳定性的方法,并根据分块矩阵关联的物理意义,得到了对称型动不定体系维持稳定平衡态的必要条件。

(2) 从对称学角度解析了结构可动的本质,提出了判别对称体系可动性的充分条件。根据几何约束性质,运用矩阵理论和变分原理,推导了可展结构中典型构成单元的位移协调矩阵。利用对称子空间,推导了机构位移模态、自应力模态的对称表示,并建立了结构可动性统一判别准则,编制了相应的判别程序。

(3) 研究了节点坐标、几何拓扑方式、外荷载作用、边界约束等因素对结构形态的影响,分析了多种因素作用下结构静动特性、稳定性等的变化,讨论了机构位移模态、自应力模态在不同因素影响下的演变规律。分析表明,节点几何偏差使结构对称阶次很低时,结构静动特性及稳定性将产生变化;外荷载向量的对称阶次高于机构位移模态时,结构不可动;根据原结构及所撤除构件的对称性,可准确判别若干构件撤除后体系的静动特性与稳定性,避免了重复求解相关矩阵。

(4) 根据整体平衡矩阵第一分块子矩阵关联的物理意义,建立了有效求解结构整体自应力模态的对称法,编制了相应程序;结合整体自应力模态和能量法,将静不定动不定体系的找力问题与找形问题均转化为约束优化模型,并引入蚁群优化算法,分别提出了静不定结构稳定性判别及初始预应力优化方法、新型静不定动不定结构的找形与优化方法,较好地解

决了静不定动不定体系的结构找形和找力问题。优化结果与解析解、已有文献结果、物理模型的一致性充分证明了所提出的两种方法适用于二维和三维结构,成功为新颖可展结构的初步设计和形态优化提供了一种新的思路。

(5) 为了推广应用基于群集理论的对称学方法,建立了涵盖 71 种常用对称群的数据库,开发了群集理论工具箱。将待求广义逆问题分解为一系列独立的子问题,提出了高效求解对称体系相关矩阵广义逆的新技术,结构对称属性越高,该方法的求解效率越高。其中,为使得高效求解矩阵广义逆过程完全程序化,避免人为识别、指定结构的对称性,提出了结构对称属性的自动识别算法,并编制了相应的识别程序。群集理论工具箱和自动识别算法在文中多次得以应用,为对称可展结构的形态分析、展开过程研究等提供了技术支撑。

(6) 基于机构学理论、牛顿迭代法和矩阵广义逆方法,完善了非线性预测-修正算法,使其能够全过程分析由连杆、转动副、广义连接节点等构成的复杂过约束体系,并解决了展开过程中节点及其局部坐标系更新、非相邻构件间的干涉等难题。全过程跟踪分析了多种类型的对称可展结构,包括折纸型对称可展结构、基于剪式单元的对称可展结构、多面体对称型过约束体系,研究了这些结构在展开过程中的构形变化、静动特性、是否发生运动奇异或构件干涉行为等。计算分析表明,众多剪式结构在展开、折叠等临界状态下会发生运动奇异,新增零奇异值个数与剪式单元个数成线性关系;多面体对称体系各连接节点作直线运动,同节点各连接单元共面时会引起运动奇异;沿理想路径运动时,对称可展结构的构形变换连续且显著,运动过程中结构对称性不变,且机构位移模态保持全对称性。

(7) 为准确分析结构在展开过程中的运动分岔行为,分别给出了用于求解运动奇异点的自适应步长法和对称平衡荷载法,其中自适应步长法能沿着运动路径的正反方向寻得不同的奇异点,具有很强的适用性。并不是机构位移模态的任意组合均能构成可行的运动分岔路径,利用对称群的降阶理论及其机构位移模态的对称表示,定性分析了高阶对称过约束机构的不同分岔类型,揭示了对称可展结构发生运动奇异后的降阶行为。对称杆系和过约束机构发生运动奇异时呈现出相似的分岔性态;新产生了低阶对称的机构位移模态,结构运动构形不再唯一,若结构由奇异点进入分岔路径,除非经历新的奇异点,否则无法回归至全对称运动路径。

(8) 从多杆连接节点的设计角度考虑,给出了规避运动奇异的两种有效方法,即合理规划路径法和额外添加约束法,并相应设计了增设限位盖板的多杆连接节点、提出并制作了确保多杆同步转动的同步连接节点。采用同步节点及等长连杆单元,组装了五类对称规整的新型对称可展结构,这些结构均具有大覆盖面积、高收纳率、无运动奇异点、单自由度可动等优点,能应用于可展天线、可开合屋盖结构等实际工程中。

(9) 在对称可展结构可动性判别方法和展开过程分析理论基础上,结合 Bennett 单元、棱柱体几何以及多面体几何,设计并制作了多种新型对称可展机构单元,如闭合环形对称机构单元、 C_{∞} 对称可展机构单元、高阶对称可展机构单元等,并探讨了新机构单元的潜在应用前景及实现方式,阐述了新机构单元的可动性及运动特性。

研究工作有助于新型对称可展结构的开发与设计,为可展结构及其衍生结构的进一步研究提供理论基础,为可展结构在航空航天、先进机构与机器人、医疗器械、建筑结构等领域中的应用发挥积极作用。

本书的研究是在我的导师冯健教授的悉心指导下完成的。冯老师渊博的学识、严谨的

治学态度、踏实认真的工作作风以及谦和的待人处事风范等,都给我留下了深刻的印象,引领我进入了研究的殿堂,使我领会了基本的科研思维方式,掌握了多种研究方法。在本书选题、课题安排等方面,冯老师都给予了我精心的指导和亲切的关怀。借此机会向我的导师冯健教授表示诚挚的敬意和最由衷的感谢!

在这里,也要特别感谢英国剑桥大学 Simon D. Guest 教授。在访学剑桥大学期间, Guest 教授在学业和生活上都给予了我无微不至的关心和帮助,在他的悉心指导和启发下,我的研究课题得以顺利完成并取得较好的研究成果。还要感谢谢菲尔德大学 Patrick W. Fowler 教授和伦敦大学国王学院的戴建生教授对我的研究课题提供的耐心指导和帮助。

国家预应力工程技术研究中心在吕志涛院士的领导下蒸蒸日上,也为我们提供了良好的学习环境和科研平台,向吕院士表示诚挚的谢意! 同时还要感谢孟少平教授、吴京教授、张晋副教授等中心老师的无私帮助和指导。感谢日本东京大学川口健一教授、英国思特莱斯科莱德大学徐奕翔博士、伦敦大学国王学院魏国武博士、日本早稻田大学王博博士和名古屋市立大学张景耀博士等的关心和帮助。特别感谢师兄蔡建国博士对我的学习和研究工作的指导和帮助,多年来在许多问题上给予的建议让我受益匪浅。

特别要感谢我的家人对我无微不至的关心和无私的奉献。他们对我的亲情、鼓励和期盼是我的精神支柱和坚强后盾,也鞭策着我在今后的科研道路上不断前行。同时感谢所有关心、支持和帮助过我的老师、同学和朋友们。

感谢国家自然科学基金、国家留学基金委出国留学基金、江苏省六大人才高峰项目、江苏高校优势学科建设工程资助项目、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目、东南大学优秀博士学位论文基金和培育对象基金等对本研究课题的资助,使本文成果得到提炼和升华,特此致谢!

由于作者水平有限,书中难免有疏漏或不完善之处,敬请读者不吝指正。

陈 耀

2015 年 8 月于东南大学

目 录

1 绪论	/ 1
1.1 可展结构的发展简史	/ 1
1.2 对称可展结构的特征和分类	/ 5
1.2.1 剪式铰结构	/ 5
1.2.2 可开合屋盖结构	/ 6
1.2.3 刚性折纸结构	/ 8
1.2.4 闭合环形过约束体系	/ 8
1.2.5 可展索杆体系	/ 9
1.2.6 攀达穹顶	/ 11
1.2.7 其他对称可展结构	/ 11
1.3 基于群集理论的对称学方法	/ 11
1.4 可展结构的国内外研究现状	/ 13
1.4.1 可展结构形态研究现状	/ 13
1.4.2 可展结构展开过程研究现状	/ 14
1.4.3 可展结构应用研究现状	/ 15
1.5 需要进一步研究完善的问题	/ 17
1.6 本书主要研究工作	/ 18
1.6.1 研究动机与出发点	/ 18
1.6.2 主要研究内容	/ 18
2 动不定体系平衡态的稳定性研究	/ 21
2.1 结构稳定性的基本描述	/ 23
2.2 乘积力准则的适用性	/ 24
2.2.1 乘积力准则	/ 24
2.2.2 稳定的必要非充分条件	/ 25
2.2.3 适用范围	/ 26
2.3 切线刚度矩阵正定性分析	/ 28
2.3.1 矩阵的特征值分解	/ 28
2.3.2 群集理论及其矩阵表示	/ 28
2.3.3 对称型刚度矩阵	/ 30
2.4 动不定体系稳定性分析算例	/ 31

2.4.1	C_{2v} 对称索杆体系	/ 31
2.4.2	C_{2v} 对称自平衡杆系	/ 33
2.4.3	C_{6v} 对称索网结构	/ 34
2.4.4	C_{12v} 对称 Levy 索穹顶	/ 36
2.4.5	I_h 对称杆系	/ 38
2.5	对称型动不定体系稳定的必要条件	/ 40
2.5.1	必要性证明	/ 40
2.5.2	算例验证	/ 43
2.6	本章小结	/ 45
3	对称体系可动性的统一判别准则	/ 47
3.1	对称体系可动性条件	/ 48
3.2	相对自由度的对称属性约简	/ 48
3.2.1	杆系结构	/ 48
3.2.2	过约束体系	/ 50
3.3	机构位移模态与自应力模态的对称性	/ 51
3.3.1	不含有相同阶对称性	/ 51
3.3.2	含有相同阶对称性	/ 52
3.4	位移协调矩阵	/ 54
3.4.1	杆单元	/ 54
3.4.2	滑移副单元	/ 54
3.4.3	角度约束单元	/ 55
3.4.4	常规连杆单元	/ 56
3.4.5	广义的两端销接单元	/ 58
3.5	对称体系可动性判定分析	/ 59
3.5.1	基本判别流程	/ 59
3.5.2	自平衡杆系	/ 60
3.5.3	C_{2m} 对称杆系结构	/ 62
3.5.4	斜放四角锥对称杆系	/ 64
3.5.5	O_h 对称过约束体系	/ 65
3.5.6	闭合过约束体系	/ 69
3.6	本章小结	/ 75
4	多种因素对结构形态的影响	/ 76
4.1	节点坐标的影响	/ 76
4.1.1	相同对称属性下的节点坐标变化	/ 77
4.1.2	节点几何位置偏差	/ 81
4.2	荷载作用的影响	/ 83
4.2.1	基本思路	/ 83

4.2.2	荷载作用下三维对称杆系可动性分析	/ 84
4.2.3	荷载作用下二维高对称开合结构可动性分析	/ 87
4.3	几何拓扑方式的影响	/ 90
4.3.1	基本思路	/ 90
4.3.2	二维对称杆系撤除杆件后的可动性分析	/ 91
4.3.3	凯威特型对称杆系撤除杆件后的可动性分析	/ 93
4.4	边界约束情况的影响	/ 96
4.4.1	对称杆系释放自由度分析	/ 97
4.4.2	高对称杆系约束自由度分析	/ 99
4.5	本章小结	/ 100
5	结构形态问题的优化研究	/ 102
5.1	前言	/ 102
5.2	结构整体自应力模态的求解	/ 102
5.2.1	基本概念	/ 103
5.2.2	由全对称子空间求解整体自应力模态	/ 105
5.2.3	算例分析	/ 106
5.2.4	可行性与计算效率	/ 112
5.3	基于蚁群算法的结构稳定性判别及初始预应力优化	/ 113
5.3.1	数学模型	/ 113
5.3.2	蚁群算法简介	/ 116
5.3.3	优化方法的关键与执行流程	/ 118
5.3.4	算例分析	/ 120
5.3.5	算例小结	/ 124
5.4	基于蚁群算法的结构找形分析与优化	/ 125
5.4.1	数学模型	/ 125
5.4.2	算法的关键技术	/ 126
5.4.3	算例分析	/ 128
5.4.4	算例小结	/ 133
5.5	本章小结	/ 134
6	广义逆的高效求解与对称属性的自动识别	/ 136
6.1	Moore-Penrose 广义逆	/ 137
6.1.1	广义逆的定义	/ 137
6.1.2	广义逆的基本性质	/ 137
6.1.3	广义逆在可展结构中的应用	/ 138
6.2	广义逆求解方法	/ 141
6.2.1	高斯消去法	/ 141
6.2.2	Cholesky 分解法	/ 141

6.2.3	奇异值分解法	/ 142
6.2.4	列主元 QR 分解法	/ 143
6.2.5	计算精度与效率比较	/ 143
6.3	对称法求解矩阵的广义逆	/ 146
6.3.1	对称坐标系的建立	/ 146
6.3.2	分块矩阵的独立求解	/ 147
6.3.3	执行步骤与流程	/ 148
6.4	结构对称属性的自动识别	/ 149
6.4.1	现有对称识别技术	/ 150
6.4.2	对称操作与对称群	/ 151
6.4.3	自动识别算法流程	/ 154
6.4.4	算例分析	/ 156
6.5	对称体系相关矩阵的广义逆求解	/ 158
6.5.1	D_3 对称张拉整体结构	/ 158
6.5.2	C_m 对称弦支穹顶	/ 160
6.5.3	C_m 对称杆系结构	/ 162
6.6	本章小结	/ 164
7	对称可展结构展开过程分析	/ 166
7.1	非线性预测-修正算法	/ 167
7.2	位移协调路径跟踪分析中的关键技术	/ 168
7.2.1	控制步长	/ 168
7.2.2	运动方向	/ 168
7.2.3	修正的 Newton-Raphson 迭代法	/ 169
7.2.4	节点坐标及其局部坐标系的更新	/ 169
7.2.5	展开过程中非相邻构件间的最小距离	/ 169
7.3	刚性折纸型可展结构的折叠行为研究	/ 172
7.3.1	四折型基本单元	/ 173
7.3.2	二维折叠体系	/ 175
7.3.3	三维柱状结构	/ 177
7.3.4	径向可展屋面	/ 178
7.4	基于剪式单元的对称过约束体系展开过程分析	/ 183
7.4.1	剪式单元基本类型	/ 183
7.4.2	C_{2v} 对称平动剪式铰结构	/ 184
7.4.3	基于极线剪式单元的 C_v 对称可展圆弧拱结构	/ 186
7.4.4	对称可开合屋盖结构	/ 188
7.5	多面体对称型过约束体系展开过程分析	/ 193
7.5.1	Hoberman 可变球结构	/ 194
7.5.2	半球面屋盖结构	/ 196

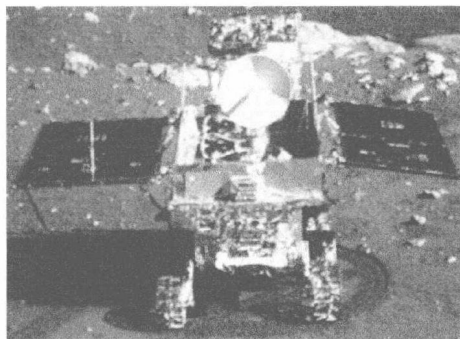
7.6 本章小结	/ 199
8 可展结构奇异性与运动分岔	/ 200
8.1 运动奇异点的判别与精确求解	/ 200
8.1.1 自适应步长法	/ 201
8.1.2 对称平衡荷载法	/ 202
8.1.3 两种方法的分析与比较	/ 203
8.2 分岔路径的跟踪	/ 206
8.2.1 奇异构形的机构位移模态及其对称性	/ 206
8.2.2 对称群及其子对称群	/ 207
8.2.3 正十二面体对称过约束体系的分岔构形	/ 208
8.3 对称杆系机构的运动分岔研究	/ 210
8.3.1 四连杆机构	/ 210
8.3.2 C_{3v} 对称杆系	/ 211
8.3.3 C_{6v} 对称杆系	/ 213
8.4 高对称过约束体系的运动分岔研究	/ 217
8.4.1 C_{8v} 对称可开合屋盖	/ 217
8.4.2 正四面体对称可展体系	/ 221
8.5 本章小结	/ 223
9 运动奇异的规避与同步节点设计	/ 224
9.1 共节点单元的运动奇异	/ 224
9.2 规避奇异的方法	/ 226
9.2.1 合理规划路径	/ 226
9.2.2 额外添加约束	/ 228
9.3 多杆同步连接节点的应用	/ 231
9.3.1 可行解的分布	/ 231
9.3.2 C_{4v} 对称可展结构的验证	/ 232
9.3.3 大型对称可展结构的组装	/ 233
9.4 本章小结	/ 235
10 高对称可展机构单元设计	/ 237
10.1 闭合环形对称可展机构单元	/ 237
10.1.1 几何构形	/ 237
10.1.2 机构运动特性	/ 238
10.2 棱柱型对称可展机构单元	/ 242
10.2.1 几何构形	/ 242
10.2.2 机构运动特性	/ 243
10.3 高阶对称可展机构单元	/ 245

10.3.1	几何构成特点	/ 245
10.3.2	正四面体对称可展机构单元	/ 245
10.3.3	正六面体对称可展机构单元	/ 247
10.3.4	正十二面体对称可展机构单元	/ 249
10.4	本章小结	/ 251
11	结论与展望	/ 252
11.1	主要结论	/ 252
11.2	研究展望	/ 257
	参考文献	/ 258

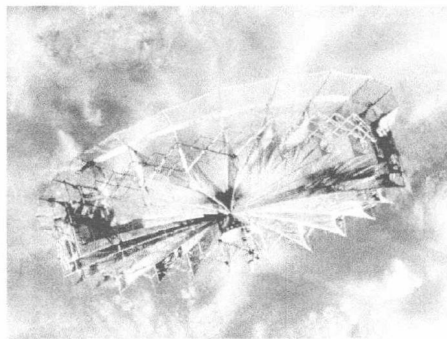
1 绪 论

1.1 可展结构的发展简史

21 世纪以来,我国航天科技不断攀上新的高峰。尤其是成功发射载人飞船、实现太空中交会对接、软着陆月球(图 1-1a)等,带动了空间可展结构的快速发展,促进了可展结构整体研究水平的提升。如今,可展结构在航空航天领域的应用日趋成熟(图 1-1),并延伸到了先进机构与机器人、生物医学、工程结构等领域。该类结构具有机构运动特性,可满足所处环境时间、空间等的苛刻条件,能适应特殊任务的实际需求,有效改变结构构形,具有很强的生命力和良好的应用前景。在建筑结构领域,较大跨度的可展结构已在国内外实际工程中得以成功应用,例如可开合屋盖结构为满足“晴天室外、雨天室内”的需要,能主动调整为展开、闭合状态(图 1-2)。

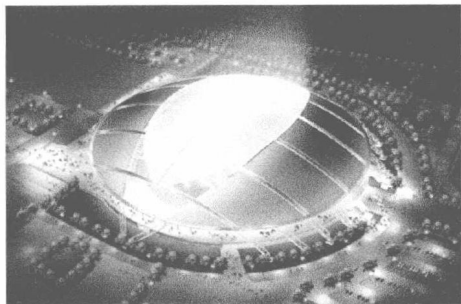


(a) 中国“玉兔号”月球车

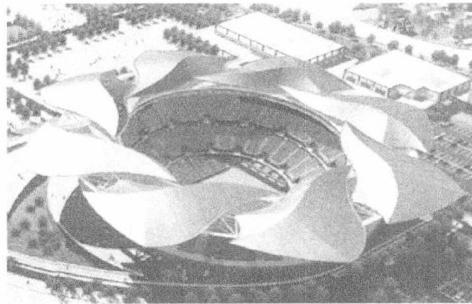


(b) 俄罗斯EGS可展天线

图 1-1 空间可展结构



(a) 南通体育场



(b) 上海旗忠网球中心

图 1-2 可开合屋盖

其实,可展结构并不神秘,在日常生活中我们会经常接触到具有可展结构元素的事物,例如图 1-3 所示的雨伞、折扇和折叠椅。可展结构设计和研究起源于 20 世纪 60 年代,西班牙年轻建筑师 Piñero^[1, 2] 在世界建筑作品大赛中展出其设计作品——“可移动剧院”(图 1-4),该作品充分体现了可展结构的概念和优势^[3-5]:结构能够由紧凑的收拢状态展开为大体积状态,经锁定成为稳定状态;在收拢状态下体积较小,便于运输和储藏,可反复使用。该设计作品激发了针对可展结构的探索,西班牙学者 Escrig 等^[6-8] 在 Piñero 的作品启发下,致力于可展剪式铰结构的研究,并取得了一些成果。20 世纪 70 年代,Zeigler^[9, 10] 提出了一种自锁式可展结构并获得美国专利,希腊学者 Gantes^[11-13] 结合几何设计方法和物理模型,深入研究了可展网架结构。

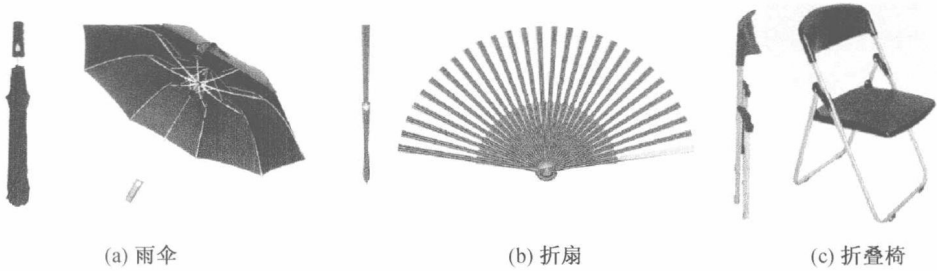


图 1-3 身边的可展结构

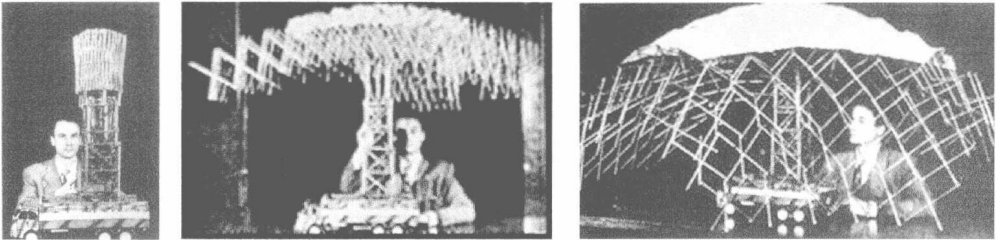


图 1-4 可移动剧院^[1, 2]

但由于早期可展结构的研究多采用几何设计和模型制作,未能及时建立有效的理论分析方法和计算模型,因而可展结构在此后的一段时间内发展较慢。直到 20 世纪 80 年代末,该新型结构体系引起了工程界更多学者和设计师的关注,可展结构的研究水平得到了快速提升,其中 Hoberman^[14-16], Calladine^[17, 18], Pellegrino^[5, 19, 20], Motro^[21, 22], Guest^[23-26], You^[27, 28], Tarnai^[29-31], Miura^[32], Kawaguchi^[33] 等对可展结构的发展作出了重要贡献。同期,美国国家航空航天局 NASA(National Aeronautics and Space Administration)、欧洲航天局 ESA(European Space Agency)根据航天科技发展规划,相继提出了多种可展结构体系概念^[34, 35]。日本宇宙科学研究所 ISAS(Institute of Space and Aeronautical Science)和国家航空航天开发局 NASDA(National Aerospace and Space Development Administration)起步稍晚于欧美,但在可展结构技术研究应用上也已取得了较大进步^[35]。剑桥大学和加州理工学院在 Calladine、Pellegrino 等教授领导下,建立了可展结构实验室,与 ESA 及 NASA 一起进行可展结构的研究,开展了很多细致深入的工作^[23, 36-40],对可展结构的理论

研究及应用都产生了深远的影响。目前,国外对可展结构的主要研究单位还包括美国麻省理工学院、英国牛津大学^[27, 28]和伦敦大学国王学院^[41-44]、日本东京大学^[33]、西班牙塞维利亚大学^[6-8]、希腊雅典国际科技大学等。

与国外相比,我国在可展结构领域的研究起步较晚。1970 年东方红一号的成功发射标志着我国步入了航天飞行器应用的新时代,但由于在这一阶段经济较为落后,对空间可展结构认识相应滞后,直至 20 世纪 90 年代初才开始逐步进行可展结构的理论和应用技术研究^[35]。早期,浙江大学空间结构研究中心^[34, 45-48]对空间可展天线、折叠式伸展臂及空间可展桁架的设计原理、几何分析、静力分析、动力分析和展开过程等进行了研究,并进行了试验研究。天津大学曾基于缩尺的小模型试验^[23],对可展结构的结构构形、工作机理等方面进行了研究^[49]。同济大学总结了可展结构的主要特点,从展开机理方面对可展结构进行了分类,并采用多体动力学理论分析了结构的机构运动及力学特性^[4];对索杆体系的机构运动及其与弹性变形的混合问题进行了研究^[50]。目前,国内的研究单位主要包括浙江大学^[51-57]、哈尔滨工业大学^[58, 59]、清华大学^[60, 61]、天津大学^[44, 62, 63]、同济大学^[4, 64]、上海交通大学^[35]、北京交通大学^[65]、西安电子科技大学^[66, 67]、长安大学^[68]、东南大学^[69-75]等。其中众多学者相继开展了大量前瞻性研究,取得了一系列重要成果和经验,为可展结构的发展和应用贡献了力量。

可展结构在发展初期主要应用于航空航天领域,可用作空间伸展臂、可展天线、太阳能帆板、反射器等。图 1-5(a—c)为三种典型伸展臂结构^[76],这些结构在展开过程中保持直线状、外接圆半径不变,且结构收纳率、刚度和精度较高,便于运动控制,已成功应用于航天飞行器。图 1-5(d)为美国 NASA 曾研制出的环柱状天线^[77],由电机驱动外圆环展开并拉紧索网,构成反射面。

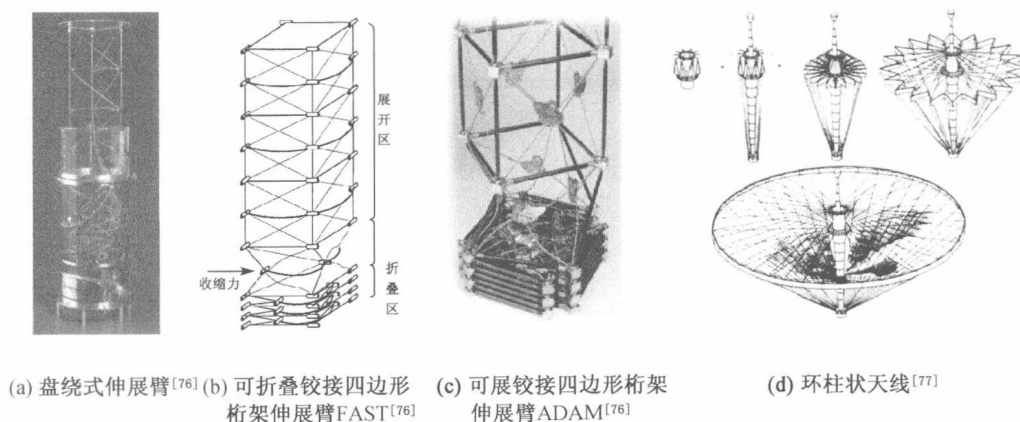


图 1-5 空间可展结构

在传统的土木结构理论中,瞬变、可变的结构体系是非常受排斥的,这也阻碍了机构学理论在结构领域中的应用发展。但近年来,可展结构引起结构工程师的更多关注,并在现代结构体系中得到成功应用。不管是在结构工作状态还是在施工成形过程中,可动的结构形态赋予结构以灵性和生命力,并带来了很大的便捷性。目前,大跨度开合屋盖已经在国内外的工程中得以成功应用^[63, 78],如 Pittsburgh Civil Arena, Montreal Olympic Stadium,

Torno-to Sky Dome, Fukuoka Dome, 以及我国的南通体育场和上海旗忠网球中心(图 1-2)等。大跨钢结构的快速提升施工技术中也引入了可展结构的概念,例如日本川口卫的攀达穹顶体系^[79],以及国内河南鸭河口电厂储煤库的折叠式展开施工法^[80]等。可展结构还能在船厂、有特殊用途的仓库建筑中得到应用^[55]。

可展结构主要由连续杆件、拉索、膜面等构成,自重轻且施工便利,符合我国的科技发展和现实需要,以及人们对智能、节能建筑的期待和诉求。此外,可展结构可移动性强、施工周期短,在临时性或半永久性结构中亦可发挥重要作用。受 2008 年 5·12 汶川大地震的触动,台湾著名竹雕工艺师陈铭堂先生根据折纸激发的灵感设计了折叠竹屋作为震后的临时住所,见图 1-6,该设计作品入选为未来建筑及绿色节能建筑^[81]。在台风、洪水、地震等自然灾害发生后,可展结构能够适应不同环境,在紧凑的折叠状态下通过汽车、飞机等运往突发状况灾区,在地面快速组装或展开成形,在提供多种避难空间的同时不丧失结构的稳定性,使灾民得到安置。类似的可展结构概念可用于快速组装或展开的桥梁、通讯塔等结构中,如图 1-7 所示为英国伦敦 Heatherwick 工作室^[82]设计完成的可折叠滚桥结构,全长 12 m,不使用时可折叠成正八边形,便于搬运移动。

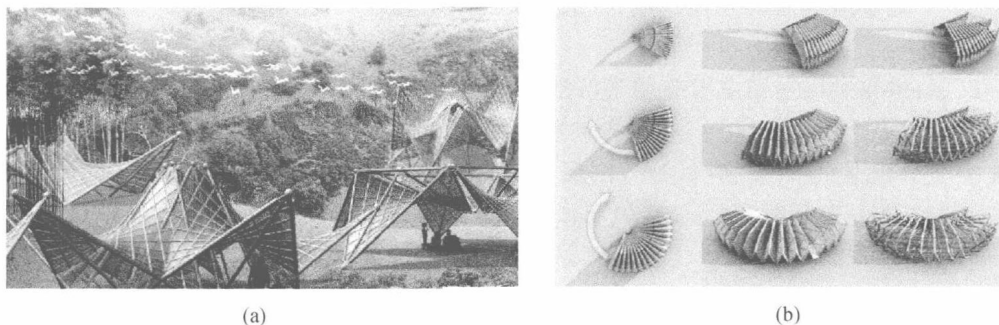


图 1-6 可折叠帐篷

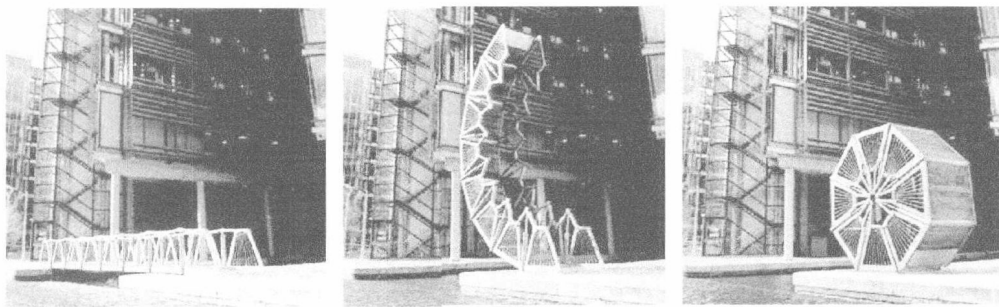


图 1-7 可折叠桥梁^[82]

由于结构的可展性质较为引人注目,人们还将此概念应用于艺术的表现上。例如,2012 年伦敦奥运会开幕仪式上,奥运会主火炬的点火方式便借鉴了可展结构的概念^[82],至今令人印象深刻:如图 1-8 所示,象征 204 个参赛国家和地区的铜花瓣被引燃后,借助机构装置逐渐同步升起,最终聚拢成巨大的主火炬。神奇点火方式令人叹服,将英国人奇妙的创意和想象力发挥到了极致。由静到动的转化过程绽放出了勃勃生机,而这正是可展结构的魅力所在。

图 1-8 2012 伦敦奥运会主火炬点火方式^[82]

综上所述,完善和推进新型可展结构的研究,不但能适应国家的战略需求和科技发展要求,顺应现代结构体系的发展趋势,而且可以满足人们对新颖、智能结构的期待。

1.2 对称可展结构的特征和分类

近二十年来,涌现了许多不同形式的可展结构,各类型可展结构的几何构形及受力特点存在多样性^[4, 14, 35],但结构的构成机理、形态与机构运动等方面的核心内容则具有极大的共性,而且现有可展结构多具有一定的对称性,如图 1-2~图 1-8 中的可展结构均具有镜像或旋转对称轴。为此,将对称可展结构的主要特征归纳如下:

对称可展结构:至少具有两种独立构形(折叠态和展开态),折叠态更为紧凑可靠,展开态占有更大的面积或体积;折叠态与展开态之间存在连续、平滑的运动路径,且展开过程可行、可控制;始终呈现出一定的对称性。

以上可作为新型对称可展结构设计的基本要求。此外,可补充单自由度可动、零应变等限制条件,力求可展结构展开机理简单、便于实施。需要指出,严格意义上“可展结构”与“折叠结构”概念不完全一致,即结构可展开不一定意味着其可折叠,反之亦然^[35]。但本书中“可展结构”泛指可展结构、折叠结构、可展开折叠结构。展开过程可逆时,则结构可重复地展开或折叠,能够被多次使用。

对称可展结构按照其基本组成单元或结构元素可划分为以下几类:

1.2.1 剪式铰结构

剪式铰在可展结构中最常见,其应用也最为广泛。如图 1-9 所示,剪式铰单元可绕其枢轴转动,两两连接后则能实现伸缩运动。受“可移动剧院”^[1, 2]的启发,Escrig 等^[8]曾设计出一系列可展剪式铰结构,并将双向有曲率剪式铰结构成功应用于西班牙塞维利亚游泳池的屋盖结构中,见图 1-10,该结构在早期已建成的可展网架结构中影响很大^[4]。

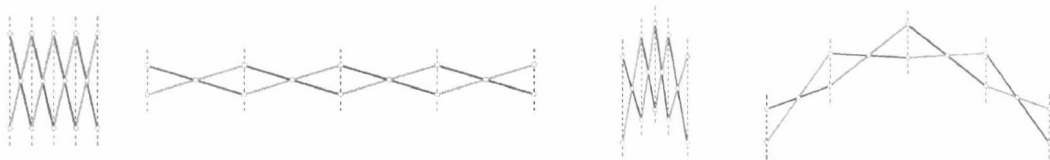


图 1-9 常见剪式铰单元