

“十二五”国家重点图书出版规划项目

空间折展机构设计

Design of Space Deployable and Foldable Mechanisms

邓宗全 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

013061517

V423
18

“十二五”国家重点图书出版规划项目

本书由国家自然科学基金重点项目(批准号:50935002)资助

空间折展机构设计

邓宗全 著



哈尔滨工业大学出版社

V423
18

内 容 提 要

本书在对空间折展机构多年理论研究和工程经验积累的基础上,密切结合航天事业发展对空间折展机构的需求,主要以空间折展机构为对象,对国内外航天工程应用的空间折展机构分类、技术发展与应用进行全面概括;基于图论和李群理论对折展机构的基本折展单元进行构型综合与设计,并提出大尺度空间折展机构组网方法及空间折展机构性能评价与优化设计方法;对两种典型的空间折展机构进行实例设计;结合工程应用介绍空间折展机构主要功能装置及地面模拟试验与测试方法。

本书可供科研院所、高等学校从事空间机构研究的工程设计人员、教师、研究生等阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

空间折展机构设计/邓宗全著.——哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.6

ISBN 978-7-5603-4006-7

I. ①空… II. ①邓… III. ①航空航天器—空间机构—设计 IV. ①V27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 025868 号

责任编辑 王桂芝 任莹莹 张 荣

封面设计 范继五

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 20.25 字数 520 千字

版 次 2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-4006-7

定 价 80.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

随着航天事业的发展,航天器结构越来越趋向于大型化。为减小航天器在发射阶段的包络体积,大型航天结构如雷达天线、桁架式伸展臂、太阳翼等,都需要折叠起来,待航天器入轨后再展开。空间折展机构的应用极大地拓展了航天器的功能,在空间通信、载人航天、对地观测、深空探测等方面均有重要的应用前景,已成为航天领域的研究热点之一。

本书是作者结合多年空间折展机构的理论研究和工程实践撰写而成的,主要包括空间折展机构设计方法、设计实例、主要功能部件及地面模拟试验与测试等内容。全书共分9章:第1章介绍空间折展机构的概念、主要结构形式与分类、技术发展与应用,以及本书的主要研究内容;第2章介绍图论、李群理论、螺旋理论等机构构型综合与分析的数学基础;第3章介绍基于图论、李群理论、螺旋理论对基本折展单元进行构型综合设计与自由度分析;第4章阐述多闭环机构的自由度分析方法,提出大尺度模块化空间折展机构的组网方法;第5章系统阐述折展机构的各种性能指标分析计算与评价方法,提出空间折展机构多目标优化设计方法;第6章对空间伸展臂进行实例设计,包括结构与机构设计、静力学与动力学建模分析、样机研制等;第7章对抛物面天线折展支撑桁架机构进行实例设计,包括方案设计与评价、空间几何建模方法、运动学与动力学分析、样机研制等;第8章介绍空间折展机构所应用的功能装置,包括驱动与传动装置、压紧释放装置、铰链组件等;第9章介绍空间折展机构地面模拟微重力环境方法、动力学试验方法与精度测试方法,结合伸展臂、抛物面天线支撑桁架机构进行地面模拟试验与测试。

本书作者均为从事空间折展机构研究的科研人员,第1、3、8、9章由邓宗全撰写,第2、7章由刘荣强撰写,第4、5章由李兵撰写,第6章由郭宏伟撰写。全书由邓宗全统稿,郭宏伟对全书进行了文字编辑和校对。作者指导的博士生和硕士生为本书的撰写做了大量工作,博士生黄海林提供了折展机构构型综合与连接组网的相关内容(第3、4章),博士生田大可提供了折展天线支撑桁架机构的相关内容(第7章),另外刘兆晶、王岩、赵浩江、张静、杨慧、王斌、王劲、江晋民、齐晓志等也为本书提供了相关资料,王丹丹、单明贺、武倩倩、夏艳等协助完成了本书的文字图表编辑工作,在此一并表示感谢。

本书所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金重点项目“空间新型大尺度可折展式机构创新设计理论与方法研究”(50935002)的资助,同时得到了中国空间技术研究院总体部的项目资助。在此对项目资助单位表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏或不当之处,恳请读者批评指正。

作 者

2013年1月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.2 空间折展机构主要结构形式	1
1.3 空间折展机构技术发展与应用	3
1.3.1 空间伸展臂.....	3
1.3.2 平面型折展天线	12
1.3.3 抛物面型折展天线	14
1.4 空间折展机构研究内容.....	21
1.5 本章小结.....	22
参考文献	23
第 2 章 机构构型综合与分析的数学基础	26
2.1 概 述.....	26
2.2 图 论.....	26
2.2.1 图论在机构学中的常用定义	26
2.2.2 机构拓扑图的数学描述	28
2.3 螺旋理论.....	29
2.4 位移李群理论.....	31
2.4.1 群、交换群和子群.....	31
2.4.2 李群、李子群和李代数.....	31
2.4.3 特殊欧氏群 $SE(3)$ 及刚体运动描述	32
2.5 本章小结.....	36
参考文献	36
第 3 章 折展机构单元的构型综合与几何设计	37
3.1 概 述.....	37
3.2 基于图论的平面折展机构单元拓扑综合.....	38
3.2.1 拓扑图模型的建立	38
3.2.2 拓扑对称性判别	39
3.2.3 构型的演化	45
3.3 基于图论的空间折展单元拓扑综合.....	46
3.3.1 空间静定桁架图谱建立	46
3.3.2 空间折展单元图谱的建立	50

3.4	空间折展机构单元的同构判别	55
3.4.1	空间折展单元的关联度码表示	55
3.4.2	空间折展单元同构判别方法	57
3.4.3	平面折叠态的四棱锥单元的综合	61
3.5	基于位移李群的机构单元构型综合	63
3.5.1	开环运动链的自由度分析与综合	63
3.5.2	对称运动度闭环机构的分析与综合	67
3.6	折展机构单元的几何设计	75
3.6.1	连杆构件的几何设计	75
3.6.2	基本展开形貌的综合	76
3.6.3	折展单闭环机构的几何设计	78
3.7	本章小结	89
	参考文献	90
第4章	大尺度折展机构的组网方法	93
4.1	概述	93
4.2	多闭环机构运动度分析	93
4.3	机构模块单元的可动连接方法	96
4.3.1	共用支链连接	96
4.3.2	共用连杆连接	96
4.3.3	共用附加机构连接	98
4.4	典型机构的大尺度组网	103
4.4.1	4R Bennett 机构的组网	103
4.4.2	5R Myard 机构的组网	106
4.4.3	6R Bricard 机构的组网	113
4.5	本章小结	117
	参考文献	117
第5章	折展机构的性能分析与优化设计	118
5.1	概述	118
5.2	折展机构的性能分析与评价	118
5.2.1	性能评价指标	118
5.2.2	折展机构运动学分析	121
5.2.3	折展机构动力学分析	124
5.3	折展机构多目标优化设计	144
5.4	本章小结	152
	参考文献	152
第6章	空间伸展臂设计实例	153
6.1	概述	153
6.2	伸展臂及其驱动机构设计	153
6.2.1	伸展臂展收与驱动原理	154

6.2.2	伸展臂展开过程受力分析	157
6.2.3	伸展臂机构设计	160
6.2.4	伸展臂及驱动机构实物	165
6.3	伸展臂静力学特性分析	166
6.3.1	伸展臂性能参数分析	166
6.3.2	伸展臂静力学参数计算	168
6.3.3	伸展臂结构参数对性能参数的影响	176
6.3.4	伸展臂结构参数确定	177
6.4	伸展臂动力学特性分析	180
6.4.1	连续梁等效模型	180
6.4.2	伸展臂动力学分析	189
6.4.3	伸展臂动力学有限元分析	194
6.4.4	动力学模型对比分析	200
6.5	本章小结	202
	参考文献	202
第7章	抛物面天线折展支撑桁架机构设计实例	204
7.1	概 述	204
7.2	折展支撑桁架机构方案设计与评价	204
7.2.1	基本折展单元的设计与评价	204
7.2.2	折展支撑桁架机构方案设计	211
7.3	折展支撑桁架机构的空间几何建模	212
7.3.1	天线工作表面拟合方法	212
7.3.2	等尺寸模块的几何建模	215
7.3.3	不等尺寸模块的几何建模	218
7.3.4	模型的验证	221
7.4	折展支撑桁架机构运动学分析	223
7.4.1	折展支撑桁架机构尺寸关系	223
7.4.2	折展肋单元展开运动学分析	225
7.5	折展支撑桁架机构动力学分析	231
7.5.1	有限元建模及模态分析	232
7.5.2	支撑桁架机构的模态分析	232
7.5.3	支撑桁架机构的谐响应分析	234
7.5.4	固有频率影响因素分析	235
7.6	折展支撑桁架机构参数设计	238
7.6.1	结构参数的优化模型	238
7.6.2	结构优化参数预测模型	239
7.6.3	优化设计结果分析	244
7.7	折展支撑桁架机构设计	245
7.8	本章小结	252

参考文献	252
第 8 章 折展机构主要功能装置	253
8.1 概 述	253
8.2 驱动与传动装置	253
8.2.1 驱动装置	253
8.2.2 传动装置	256
8.2.3 驱动与传动一体化装置	260
8.2.4 冗余驱动装置	261
8.3 压紧释放装置	264
8.3.1 火工压紧释放装置	264
8.3.2 记忆合金压紧释放装置	268
8.4 关节铰链	270
8.4.1 弹簧铰链	270
8.4.2 高精度铰链	271
8.4.3 高刚度铰链	272
8.4.4 柔性铰链	275
8.5 本章小结	284
参考文献	284
第 9 章 折展机构地面模拟试验	286
9.1 概 述	286
9.2 微重力模拟试验	286
9.2.1 试验方法	286
9.2.2 伸展臂微重力模拟测试	288
9.2.3 天线支撑桁架机构微重力模拟测试	289
9.3 精度测量试验	291
9.3.1 测量方法	291
9.3.2 天线支撑桁架机构展开精度测量	294
9.4 动力学试验	298
9.4.1 测试方法	298
9.4.2 伸展臂动力学试验	300
9.5 模态试验	305
9.5.1 伸展臂模态试验	305
9.5.2 模态试验结果分析	308
9.5.3 天线支撑桁架机构动力学试验	309
9.6 本章小结	312
参考文献	312
名词索引	313

第1章 绪论

1.1 概述

折展机构是指能够从收拢状态展开到预定的或期望的结构形式,并且能够承受特定载荷的一类机构。折展机构一般采用模块化设计,即由若干个相同折展模块连接组成,每一个折展模块称为基本折展模块单元。折展机构具有质量小、占用体积小、便于储藏和运输等优点,因此在某些对结构形式、质量、体积、储存或运输具有特殊要求的工程领域中得到广泛的关注和应用。折展机构主要应用于航天工程、土木工程、医疗、军事等领域,例如以下具有特殊要求的场合:

(1)临时搭建并便于移动到其他地方再次搭建的封闭空间,如移动展厅、临时帐篷、移动医院等;

(2)需要快速集成的特殊用途设备,如便携雷达与天线、便携飞机棚、便携桥梁、军事设备的掩护装置等;

(3)作为新型的建筑方式使用,如体育场可展收穹顶;

(4)卫星通信、深空探测及空间站建设等航天工程需要的大型空间机构,如大口径折展天线、大型伸展臂、太阳能帆板等。

航天工程中需要的空间机构尺寸越来越大,但由于受到航天运载工具的空间限制,这就要求宇航空间机构在发射阶段必须折叠起来并收拢于整流罩内,待航天器进入轨道后,再依靠自带的动力源将其展开至工作状态。用于航天工程中的空间折展机构由于受到质量、能耗的严格制约,以及工作所处的微重力、真空等特殊空间环境的限制,其设计方法和设计要求与地面工程中的折展机构具有较大的差别。

1.2 空间折展机构主要结构形式

空间折展机构在航天工程领域主要作为雷达天线等有效载荷的伸出机构、大口径空间天线支撑机构、柔性太阳翼的支撑机构及折展式空间站骨架等。空间折展机构的结构形式众多,折展原理多种多样,下面分别按工作状态下空间几何形状、展开与收拢方式、驱动源类型等进行分类。

1. 按工作状态下空间几何形状分类

根据在工作状态下的空间几何形状可将空间折展机构分为一维折展机构、二维折展机构和三维折展机构。

(1)一维折展机构:是指展开之后形成杆状的一类折展机构,一般称为空间伸展臂。

空间伸展臂结构形式丰富,应用最早,是最为常见的一种空间折展机构形式,如国际空间站的大型太阳翼、美国 NASA 的对地观测任务 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)中都应用了大型空间伸展臂。

(2)二维折展机构:是指在空间两个正交方向上能够实现折叠与展开运动的机构,如板式太阳翼机构、加拿大 Radarsat 卫星的平面天线支撑机构都属于二维折展机构。

(3)三维折展机构:是指在空间 3 个正交方向上能够实现折叠与展开运动的机构,如折展抛物面天线、折展空间聚光镜等。

2. 按展开与收拢方式分类

根据展开与收拢方式,可将空间折展机构分为 4 种方式:依靠材料弹性变形展开方式、铰接构架式展开方式、固面展开方式、充气展开方式。

(1)依靠材料弹性变形展开方式:实现展开与收拢的原理是采用具有大弹性变形的材料作为折展机构的主体材料,在折叠状态下材料发生变形而储存弹性变形能,释放后所储存的弹性变形能驱动机构转化为展开状态,如薄壁管状伸展臂、盘压杆式伸展臂等。

(2)铰接构架式展开方式:是应用最广泛的一类展开方式,它由杆件、运动副、锁定装置等组成,展开后形成桁架结构,具有结构刚度大、定位精度高等特点,如铰接杆式伸展臂、平面天线的支撑机构、柔性抛物面天线折展支撑机构等。

(3)固面展开方式:是指由多个曲面单元拼接构成一个完整空间曲面的一类展开方式,如类似花瓣的展开方式,一般用于固体反射面天线,具有较高的形面精度,但是折叠比小,难以构成大口径天线。

(4)充气展开方式:是指使用柔性材料制成密闭结构,入轨后靠充填的气体将密闭结构展开的一类展开方式,具有质量小、折叠比大的特点。

3. 按驱动源类型分类

空间折展机构按驱动源类型分为有源驱动、无源驱动、混合驱动 3 种形式。

(1)有源驱动:一般指电机驱动,或采用形状记忆合金驱动,需要提供电源,可对展开速度进行控制。

(2)无源驱动:是指依靠弹簧或弹性结构中储存的弹性变形能驱动,无需提供电源,但展开速度一般不可控。

(3)混合驱动:是指有源驱动和无源驱动混合使用的一种驱动方式,既可以控制展开速度,又可以减少有源驱动数量或功耗。近年来空间折展机构越来越多地使用混合驱动方式。

综上,空间折展机构的分类、结构形式和应用实例见表 1.1。

表 1.1 空间折展机构的分类、结构形式和应用实例

分类方式	主要结构形式	应用实例
工作状态下 空间几何形状	一维折展机构	薄壁管状伸展臂、构架式伸展臂
	二维折展机构	太阳翼机构、平面折展天线
	三维折展机构	固体反射面式天线、构架式折展天线

续表 1.1

分类方式	主要结构形式	应用实例
展开与收拢方式	依靠材料弹性变形展开	薄壁管状伸展臂、盘压杆式伸展臂
	铰接构架式展开	构架式伸展臂、构架式折展天线
	固面展开	固体反射面式天线
	充气展开	充气式伸展臂、充气式天线
驱动源类型	有源驱动	套筒管式伸展臂、构架式伸展臂
	无源驱动	自由展开式盘压杆
	混合驱动	加拿大 Radarset 天线、日本工程实验卫星天线

1.3 空间折展机构技术发展与应用

随着航天事业的发展,越来越多的航天工程中会应用一些大型在轨结构,以满足不同航天任务的需求。然而,由于运载火箭容积的限制,能够发射到太空的非折展结构体的尺寸无法满足任务的需求,因此各种类型的宇航空间折展机构得到了快速发展和应用。在空间站、通信卫星平台、太空望远镜、对地观测、星球探测等航天任务中,随处可见折展机构的身影。空间折展机构已经在航天工程中扮演了不可替代的角色,如折展太阳能电池板、空间站基础骨架、空间机械臂、空间伸展臂、大口径折展天线、大型柔性太阳帆板支撑背架等。目前已使用的折展机构的最大尺寸为:伸展臂长 60 m,天线的口径达上百米。近年来,随着太空探索、对地观测、海洋勘探和军事侦察等空间活动的迅猛发展及未来复杂太空任务的需求,对大尺度、高精度、高刚度、高稳定性、轻量化的空间折展机构的需求越来越迫切。

在运载器发射过程中,折展机构收拢在运载器内,此时机构收拢体积小,具有较高的刚度和强度,能够承受发射过程中的振动载荷;折展机构进入空间轨道后,能够展开成预定的结构形式。下面分别介绍空间伸展臂、平面型折展天线和抛物面型折展天线的技术发展及应用现状。

1.3.1 空间伸展臂

空间伸展臂是空间折展机构中形式最为丰富、研究最早、应用最为广泛的一维空间折展机构。空间伸展臂的主要作用是展开柔性太阳帆板,支撑网状天线、合成孔径雷达、太空望远镜,作为重力梯度杆、磁强针等展开装置,以及分离电子设备以减少相互之间的干扰等^[1,2]。从 20 世纪 60 年代开始,各国学者就开始对空间伸展臂的构型、展收机理、材料、力学性能等方面进行广泛而细致的研究,在空间伸展臂的设计方法、分析理论与建模仿真、试验研究、空间应用等方面都取得了惊人的成就。空间伸展臂应用于空间环境中,因此要求其具有质量小、收拢体积小、可靠性高、刚度与强度大、热稳定性好、定位精度高等特点。

纵观国内外相关领域的发展,目前应用于航天领域的空间伸展臂主要有以下 4 种形式:薄壁管状伸展臂、套筒管式伸展臂、构架式伸展臂和膨胀硬化式伸展臂。

1. 薄壁管状伸展臂

薄壁管状伸展臂是空间伸展臂最早、最基本的形式,已有 40 多年的航天应用历史^[3]。这类伸展臂通常由一个或多个圆柱状金属薄壳组成,利用薄壳弹性变形及弹性恢复实现折叠与展开^[4],常采用高比强度、高韧性、高弹性、高导热系数、低热膨胀系数的铜铍合金、钼、钨和碳纤维复合 CFRP 等材料^[5,6]。但由于温度梯度大常引起薄壳弯曲、扭转及振动,因此常采用高反射涂层降低受热面温度,或穿孔透射阳光减少温度梯度。薄壁管状伸展臂主要利用弹性变形、弹性恢复和电机卷绕实现伸展臂展收,基本运动为转动和伸展。

薄壁管状伸展臂的典型形式有以下 4 种:单层形式、双层形式、双层互锁式和闭合截面形式。

(1)单层形式。单层形式如图 1.1 所示,收拢时薄壳卷曲在转轴上,通过转轴的转动可以实现该伸展臂的展开和收拢。这种结构形式的主要特点是其截面由单层薄壳构成,并在搭接处有一定角度的表面重叠,重叠部分通过相互挤压来增加摩擦力,以提高剪切和抗弯刚度,但由于是开环截面,抗扭刚度很低。

(2)双层形式。双层形式如图 1.2 所示,两个圆柱薄壳分别卷曲在两个单独的转轴上。这种薄壁管状伸展臂结构形式的主要特点是由两个圆柱薄壳重叠搭接嵌套在一起构成。双层结构的薄壁管状伸展臂弯曲刚度和扭转刚度较单层有较大的提高^[7,8]。

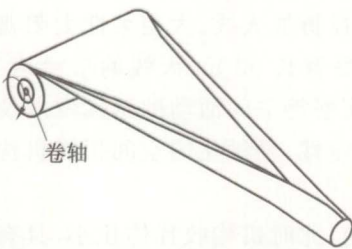


图 1.1 单层形式

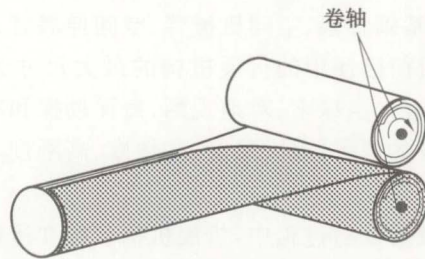


图 1.2 双层形式

(3)双层互锁式。单层形式和双层形式都属于开环截面形式,依靠搭接处的摩擦力得到一定程度的弯曲、扭转及剪切刚度,因此这两种伸展臂的刚度都不高。图 1.3 为互锁式的双层薄壁管状伸展臂,一个薄壳带有锁槽,另一个薄壳带有锁扣,随着伸展臂展开,两个薄壳搭接处锁槽与锁扣位置对应并实现互锁,提高了伸展臂弯曲刚度和扭转刚度^[9]。

(4)闭合截面形式。闭合截面形式如图 1.4 所示,两个薄壳沿展开方向焊接在一起形成两端凸出状闭合截面,伸展臂卷曲到转轴上时,内、外侧薄壳一个向内卷曲,一个向外卷曲。这类形式的伸展臂强度、刚度较高,且抗扭刚度比上述两种形式显著提高,其截面可为圆形、透镜形等。德国空间中心已研制出用于太阳帆板展开的长 14 m 的薄壁管状伸展臂,采用 CFRP 材料制成,每米质量仅 0.1 kg。

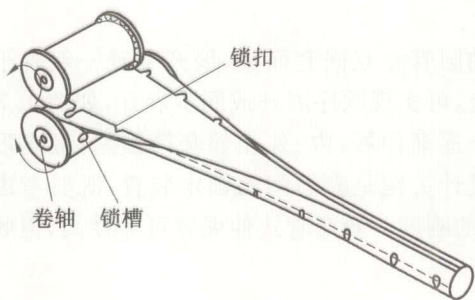


图 1.3 双层互锁式



图 1.4 闭合截面形式

R. F. Crawford^[10]给出了适用于上述各种形式薄壁管状伸展臂的质量、弯曲刚度和屈服应力的半经验公式：

质量

$$m = 2\pi f \rho R t L \quad (1.1)$$

弯曲刚度

$$EI = \pi C E R^3 t \quad (1.2)$$

屈服应力

$$\sigma_{CR} = k_{CR} E \frac{t}{R} \quad (1.3)$$

式中 L ——伸展臂长度；
 R ——薄壁管直径；
 t ——薄壳厚度；
 E ——材料弹性模量；
 ρ ——材料密度；
 f, C, k_{CR} ——不同形式薄壁伸展臂的试验修正系数。

薄壁管状伸展臂结构简单、收拢体积小、质量小，可重复展开和收拢，且展开可靠性高，因此在航天领域得到了广泛应用。但其展开刚度较低，热稳定性较差，不能实现精确定位。薄壁管式伸展臂是美国 Astro Aerospace 公司的代表产品，主要应用在 Voyager 卫星、GPSIIR 卫星、Hubble 空间望远镜和 Mars Pathfinder 探测器等项目中^[11,12]。图 1.5 所示薄壁管式伸展臂曾于 1962 年在加拿大 Alouette 卫星中用作四根展开天线。图 1.6 所示薄壁管式伸展臂用作旅行者号探测器天线。我国神舟一号飞船上的信标天线也采用了薄壁管式伸展臂。

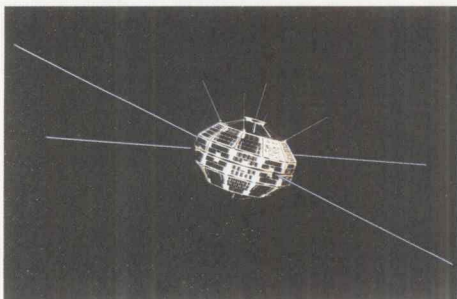


图 1.5 Alouette 卫星天线



图 1.6 旅行者探测器天线

2. 套筒管式伸展臂

套筒管式伸展臂由一系列不同直径的同轴圆管相互嵌套而成,展开装置一般置于对称轴上。套筒杆中的展开装置通常为丝杠系统,可实现顺序展开或同步展开,如图 1.7 所示。其展开过程为:核心套筒先伸展,由内向外逐渐伸展;内、外相邻套筒锁紧;最终形成一个完全展开的套筒管式伸展臂。套筒杆的设计关键是套筒间的锁定装置,既要考虑到热应力极限,又要保证展开后的杆件具有一定的刚度。套筒管式伸展臂可靠性高,但收拢状态长度仍较长。

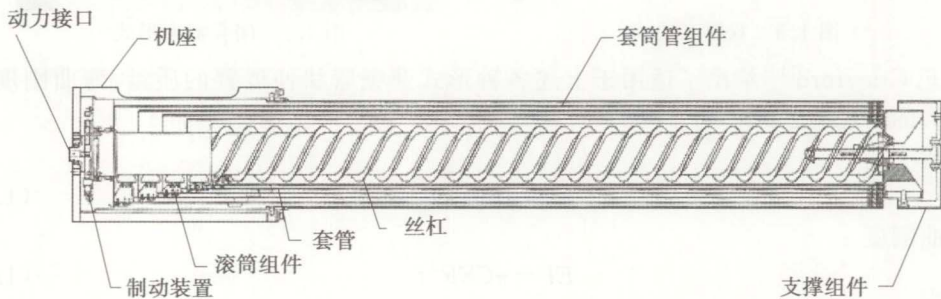


图 1.7 套筒管式伸展臂

为了使套筒管式伸展臂展开后具有足够的刚度,相邻管单元之间必须具有足够的重叠长度,因此不能达到理论的最大展开长度。随着伸展臂展开,刚度逐渐降低。套筒管式伸展臂可作为支撑杆或推杆,用于各种天线、太阳电池阵展开和设备传输。套筒管式伸展臂的典型应用如维修空间站与航天器,或作为小型卫星上的可伸缩传输系统传输仪器和设备等。如图 1.8 所示,套筒管式伸展臂成功应用于在轨可更换单元上作为传输装置;如图 1.9 所示,套筒管式伸展臂永久安装在国际空间站上作为可展吊杆^[13]。

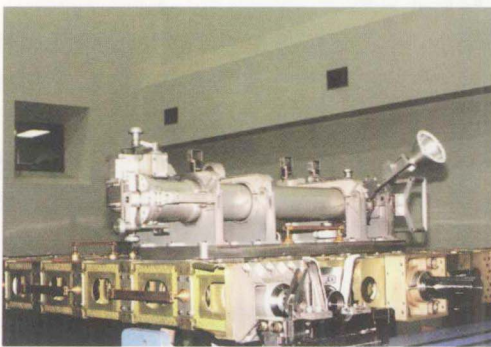


图 1.8 可伸缩传输系统

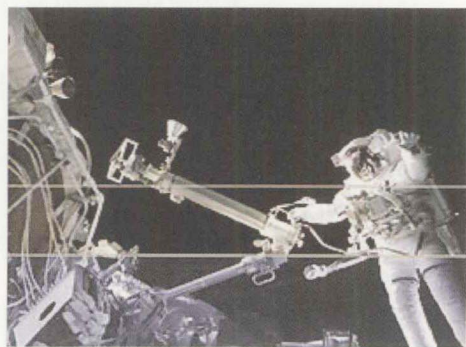


图 1.9 国际空间站上的可展吊杆

3. 构架式伸展臂

构架式伸展臂的种类有盘压杆式伸展臂和铰接杆式伸展臂。

(1) 盘压杆式伸展臂。

1967年,美国 Astrospace 公司工程师 H. R. Mauch 发明了盘压杆式伸展臂(Coilable Mast)^[14,15]。如图 1.10 所示,盘压杆式伸展臂由 3 根连续的纵杆、横杆和斜拉索构成,纵杆和横杆之间铰接。纵杆和横杆一般由玻璃纤维环氧树脂复合材料制成,具有较高的弹

性,通过纵杆的弹性变形来实现伸展臂的展开和收拢。该伸展臂展开后为桁架结构,其主要承力部件为连续弹性纵杆;收拢时,连续纵杆受弯盘紧,从而得到较小的收拢体积。盘压杆伸展臂直径为 150~750 mm,长度可达 100 m。

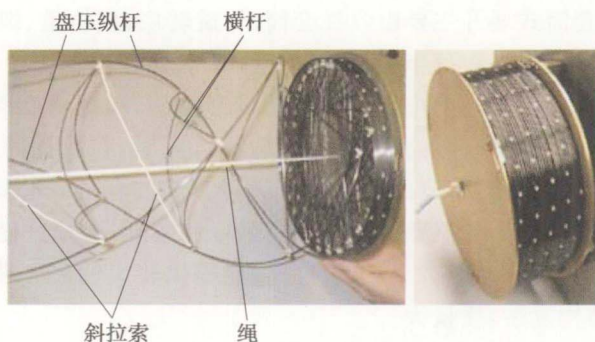


图 1.10 盘压杆式伸展臂

所有的盘压杆式伸展臂虽然工作原理基本一致,但具体构造形式不同,例如 NASA 研制的 Astro-mast 伸展臂^[16]、日本 Utline 公司研制的 Simplex-mast 伸展臂和 Hingeless-mast 伸展臂^[17],在横杆组成形式和有无线上差异较大。盘压杆式伸展臂展开方式可概括为三种,即自由式展开、拉索式展开和套筒式展开,如图 1.11 所示。

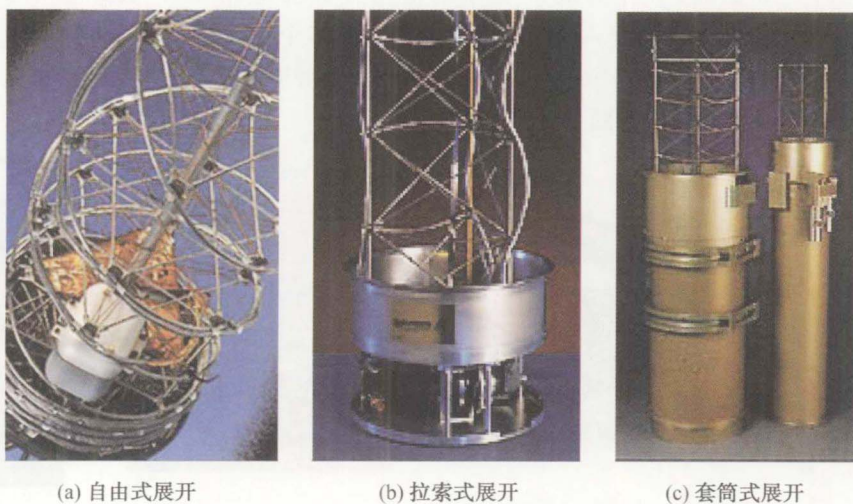


图 1.11 盘压杆式伸展臂的三种展开方式

①自由式展开。自由式展开指利用释放纵杆盘压折叠应变能使伸展臂以逆盘绕旋转方向自由伸展。自由式展开构造简单,收拢高度可达展开长度的 2%,展开过渡段无约束控制,刚度很低,运动冲击较大,难以控制。

②拉索式展开。拉索式展开利用高强柔性绳索控制伸展运动,绳索一端固连在伸展臂顶盘,另一端连接底盘的减速电机或者阻尼器,在电机或阻尼器限制下绳索逐步放出,伸展臂在自身变形能作用下逐步展开。因展开过程过渡段不稳定,刚度较小,适用于长度较短的盘压杆伸展臂展开。拉索式展开伸展臂的主要优点是:结构简单,质量较小,收拢

时包络尺寸也很小,展开后强度和刚度较高。其主要缺点是:展开过程中伸展臂刚度比较差,伸展臂顶端绕伸展臂的中心轴线旋转,这种旋转在某些航天器上是不允许的,伸展臂在空间只能实现一次伸展,不能自动收拢。

③套筒式展开。套筒式展开主要由收拢套筒、可旋转底盘、轨道、螺母套筒驱动装置、电机及传动装置等部分构成。在每个三角框架 3 个顶点处各增加 1 个滚柱,滚柱依次与驱动螺母的螺纹槽啮合在一起。电机带动驱动螺母套筒旋转,螺母套筒又带动三角框架顶点的滚柱上下运动,从而实现伸展臂的展开和收拢。同时,在收拢筒底部装一个转盘,转动与驱动螺母的转动方向相反,有助于伸展臂纵杆盘绕和释放。套筒式展开的主要特点有:在展开过程中和展开后,伸展臂都具有较高强度和刚度;展开过程中,伸展臂顶端无旋转运动;伸展臂在空间可实现多次展开和收拢;能提供较大的展开驱动力。不足之处是:套筒式展开机构结构复杂,质量大。

盘压杆式伸展臂展开可靠性高,质量小,折叠比可达 30~50,但在折叠时发生大位移、大应变,受力分析困难,刚度较低,折叠驱动机构复杂,实现大尺度的展开比较困难。一般盘压杆式伸展臂用于对定位精度无要求或要求较低、前端负载与自身质量相差较小的情况,常作为空间探测器(如磁强计)、较大型的太阳能电池阵与帆板及重力梯度杆的展开支撑机构。美国 AEC-Able 公司、Astro Aerospace 公司、日本 ISAS 都对盘压杆式伸展臂进行了深入研究和试验,并作为展开支撑结构已经成功应用在 Voyager、MILSTAR、DMSP、Olympus、Mars Odyssey、GOES 及 INSAT 等多个卫星中。图 1.12 所示为盘压杆式伸展臂在 MILSTAR 卫星中支撑柔性太阳能帆板展开,图 1.13 所示为盘压杆式伸展臂安装在“探路者”号火星着陆器上支撑照相机。

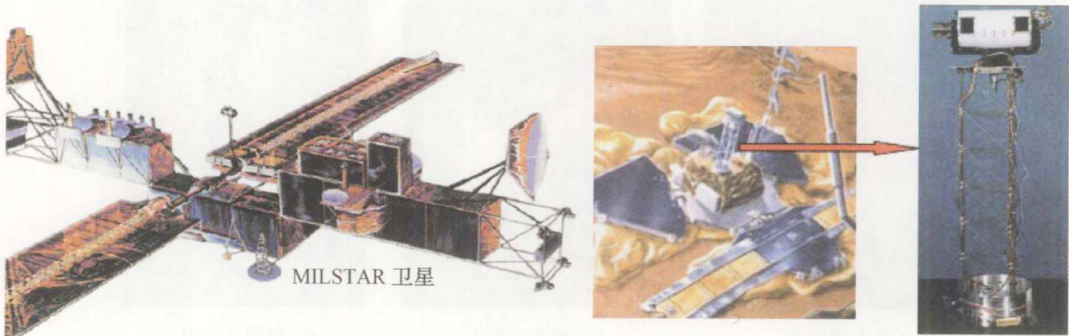


图 1.12 支撑 MILSTAR 太阳能帆板

图 1.13 “探路者”号火星着陆器上支撑照相机

同济大学的张淑杰等人研制了盘压杆式伸展臂的原理样机,对盘压杆式伸展臂的关键几何参数,如盘绕半径 R 、纵杆极限弯曲应变 ϵ 、节距 t 、收拢高度 H 及盘压杆式伸展臂的拉压刚度、弯曲刚度、扭转刚度进行了分析。并依据弹性稳定理论对盘压杆式伸展臂进行了局部和整体稳定性分析,通过理论计算和试验得出的结果是盘压杆式伸展臂首先出现局部失稳,端部的受压载荷不能超过其局部失稳的临界载荷。北京航空航天大学刘义良等人基于有限元软件 ANSYS 对盘压杆式伸展臂压缩收拢过程进行了非线性大变形的仿真模拟,并分析了在压缩过程中杆单元的应力应变情况^[18,19]。

(2) 铰接杆式伸展臂。

铰接杆式伸展臂结构形式多样,在太空中有着广泛的应用。美国 AEC - Able 公司对铰接杆式伸展臂的研究及其产业化处于领先地位。铰接杆式伸展臂刚度、强度大,并且展开精度高,能够实现精确定位。典型的机构形式有可折叠铰接式伸展臂和索杆铰接式伸展臂。

①可折叠铰接式伸展臂。如图 1.14 所示,可折叠铰接式伸展臂通常由纵杆、横杆、斜拉索和铰组成,纵杆中点连接转动的铰,可以实现纵杆的折叠;横杆分为刚性杆和弹性可弯曲杆,单元每个侧面有两对斜拉索。斜拉索通过储存弹性应变能的横杆预张紧保证伸展臂的剪切和扭转刚度。在收拢过程中,弹性横杆变弯,一个方向拉索松弛,而另一个方向拉索张紧。在弹性横杆中储存的弹性应变能可使伸展臂展开,而完全展开的伸展臂桁架单元为稳定体系。另外,可折叠铰接伸展臂截面形式还可以为三角形,且横杆均为刚性杆,如图 1.14(b)所示。可折叠铰接式伸展臂的展开收拢驱动方式主要有套筒驱动、带驱动、系索驱动和丝杠驱动等。

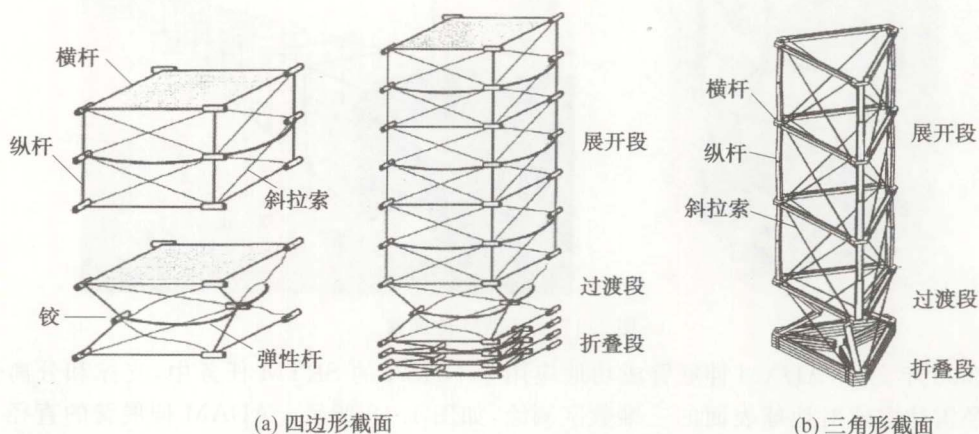


图 1.14 可折叠铰接式伸展臂

由 AEC-Able 工程公司研制的可折叠铰接式伸展臂 FAST (Folding Articulated Square Truss) 如图 1.15 所示,该伸展臂已经成功应用在国际空间站 (ISS) 上。如图 1.16 所示,8 个 FAST 伸展臂支撑着国际空间站的太阳能电池阵,其直径为 1.09 m,展开长度为 34.75 m,驱动套筒长度为 2.3 m,收拢长度为展开长度的 6.6%^[20]。

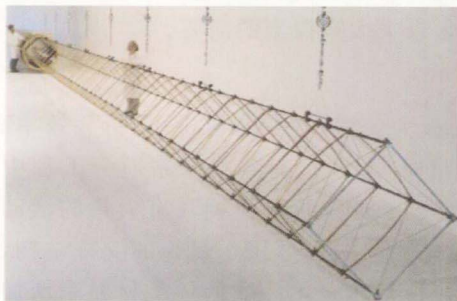


图 1.15 可折叠铰接式伸展臂 FAST

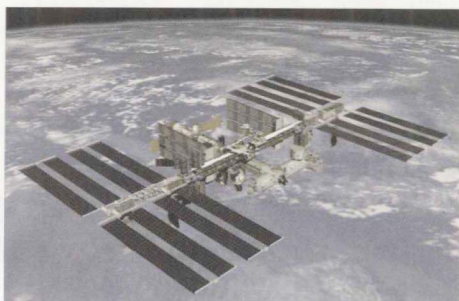


图 1.16 FAST 伸展臂支撑 ISS 太阳能电池