



大型星载可展开天线设计 理论、方法与应用

段宝岩 张逸群 杜敬利 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

大型星载可展开天线设计 理论、方法与应用

段宝岩 张逸群 杜敬利 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要针对大型星载可展开天线,特别是广泛应用的网状可展开天线和薄膜天线进行研究,是作者近些年对可展开天线研究工作的总结。全书共10章,包括空间服役环境分析、索桁组合结构形态分析与网面设计、天线展开过程分析与控制、电性能分析与等效、形面精度测量与调整、展开可靠性分析、缩比模型研制与试验、星载大型可展开天线综合设计平台以及静电成形薄膜反射面天线等内容。

本书可作为高等院校电子机械工程、天线与微波技术、空间结构设计等专业教师、高年级本科生和研究生的教材或参考书,也可供从事可展开天线设计工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大型星载可展开天线设计理论、方法与应用/段宝岩,张逸群,杜敬利著.
—北京:科学出版社,2019.9

ISBN 978-7-03-061835-1

I. ①大… II. ①段…②张…③杜… III. ①卫星天线-天线设计-研究 IV.
①TN827

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 138998 号

责任编辑:刘宝莉 陈 婕 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:师艳茹 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年9月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年9月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:315 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



段宝岩,1955 年生于河北省。中国工程院院士,曾任西安电子科技大学校长(2002~2012 年)。1977 年考入西北电讯工程学院(原中国人民解放军西安军事电信工程学院(西军电),现西安电子科技大学),先后获工学学士、硕士和博士学位,1991~1994 年英国利物浦大学博士后,2000 年美国康奈尔大学高级访问学者。现为西安电子科技大学教授,973 计划首席科学家,全国天线产业联盟主席,国际工程技术学会会士(IET Fellow),教育部科技委国防科技学部和先进制造学部委员、机械学科教

学指导委员会副主任,工业和信息化部电子科技委委员,《电子机械工程》《电子学报》等 10 个国内外学术期刊主编、副主编和编委。

长期从事电子机械工程的教学与科研工作,开辟了我国电子装备机电耦合研究的新领域。系统地建立了电子装备电磁场、结构位移场、温度场之间的场耦合理论模型,揭示了机械结构因素对电性能的影响机理,提出了基于场耦合理论模型与影响机理的机电耦合设计理论和方法。上述成果成功应用于探月工程、神舟飞船、天通一号卫星及 FAST(500m 口径球面射电望远镜)等国家重大工程中。以第一完成人获国家科学技术进步奖二等奖 3 项,省部级一等奖 6 项。发表 SCI/EI 论文 200 余篇,国际会议邀请报告 10 余次,著书 6 部,授权发明专利 40 余项。

曾被授予全国五一劳动奖章(2003 年)、全国劳动模范(2005 年)、全国师德先进个人(2004 年)、全国留学回国人员成就奖(2003 年)、全国优秀科技工作者(2011 年)等称号。入选 2009 年度科学中国人,2012 年获何梁何利基金科学与技术进步奖,2017 年获中国科学院杰出科技成就奖与中国好设计金奖,2018 年获亚洲结构与多学科优化终身成就奖。



张逸群,1984 年生于甘肃省。分别于 2006 年、2013 年获西安电子科技大学工学学士、博士学位,现为西安电子科技大学机电工程学院教授。

长期从事大型空间可展开机构/结构的分析与设计研究工作,涉及大型空间可展开结构展开过程中多种非线性因素影响机理分析、柔性结构/机构控制、空间太阳能电站聚光系统结构设计等。

主持及参与国家自然科学基金、中国人民解放军总装备部预研项目、民用航天科研项目等国家重点项目 10 余项,研究成果获国家科技进步奖二等奖(2013 年)、中国电子学会科学技术奖一等奖(2012 年)各 1 项。



杜敬利,1977 年生于河北省。分别于 2000 年、2003 年、2006 年获西安电子科技大学工学学士、硕士和博士学位,2012~2013 年美国特拉华大学和哥伦比亚大学访问学者。现为西安电子科技大学机电工程学院教授。

长期从事空间柔性结构分析与设计的研究工作,涉及大型空间结构多柔体动力学分析与展开过程控制、展开锁定后的非线性结构静力学与动力学分析、大型空间结构的优化设计等。

主持及参与国家自然科学基金、中国人民解放军总装备部预研项目、民用航天科研项目等科研项目 10 余项,研究成果获国家科技进步奖二等奖(2013 年)、陕西省科学技术奖一等奖(2014 年)、中国电子学会科学技术奖二等奖(2016 年)各 1 项。

前 言

随着人造卫星的出现,各发达国家和地区从20世纪60年代开始,对星载可展开天线进行了50余年持续不断的探索,取得了长足发展。各种结构形式的星载可展开天线层出不穷,且仍在不断探索新的可展开天线形式。

以20世纪70年代东方红卫星的成功发射为标志,我国拉开了航天科学与技术发展的序幕,40多年来,取得了令世人瞩目的成就。尤其是进入21世纪以来,航天事业的发展更是一日千里,载人飞船成功返回、嫦娥工程成效显著、火星探测正式启动、长征五号重载火箭成功发射、天宫二号成功对接等重大事件,无不昭示着我国由航天大国向航天强国奋进的坚定步伐。

卫星在太空能否正常而可靠地工作,除卫星本身、能源等技术外,作为卫星“眼睛”和“耳朵”的大型星载可展开天线是至关重要的设备。随着深空探测活动的不断推进,对星载可展开天线提出了越来越高的要求,如高频段、高精度、大口径、轻质量、大收纳比等,这些与地面天线不同的要求,对星载天线的分析、设计、制造及测试等提出了前所未有的挑战。

值得指出的是,我国星载可展开天线的研究真正开始于20世纪80年代,作者也是从那时开始涉足星载天线研究的。因为要求天线口径尽可能大,同时质量尽可能轻,所以天线很柔,超出了纯弹性变形的范畴。对星载天线结构的柔性问题,以梁单元为例,早期研究是在梁单元刚体位移的基础上,叠加梁的弹性变形,这样处理显然存在较大误差。为此,进行多柔体动力学分析问题的研究就成为必然。

星载可展开天线的平稳可靠展开,是保证卫星系统正常工作的前提。历史上曾发生过天线展不开而导致卫星系统报废的惨痛教训,因此需要深入研究基于多柔体动力学分析的展开过程控制与展开可靠性问题。

对星载天线的另一要求是,进入轨道展开后具有所要求的形面精度,在发射过程中又须收拢并置于火箭整流罩内。为使天线具有足够的增益,一般要求天线口径尽可能大,这就带来一个矛盾,即大展开口径与小收纳体积。欲实现此目标,不仅需要机构/结构创新,还需要针对两态(展开与收拢)静、动力学分析与优化设计问题进行研究。

天线作为一类特殊结构,除对其机械结构性能有苛刻的要求外,更注重其电磁性能的实现与服役过程中电磁性能的保持与稳定。这就需从系统的高度和多学科交叉融合的角度来看待问题:一是机械结构位移场、电磁场及温度场之间场耦合合理

论模型的建立；二是机械结构因素对天线电磁性能的影响机理的挖掘；三是基于场耦合理论模型和影响机理的机电集成设计。

为满足上述要求，本书还涉及星载天线的非线性力学分析、动力优化设计、多柔体动力学分析与展开过程控制、形面精度测量与调整、电磁性能分析与机电集成设计，以及集结构、电磁、热、控于一体的星载天线综合设计软件平台的研发等。

本书以应用较多的星载网状可展开天线为主而展开论述，还涉及薄膜类天线、超大型空间组装类天线。同时，对星载可展开天线的未来发展趋势进行阐述。

本书第1、2、3、5、7、9章由段宝岩撰写，第4、8章由张逸群撰写，第6章由杜敬利和张逸群共同撰写，第10章由杜敬利撰写。

本书是作者长期从事星载可展开天线科研工作的系统总结，其中不少是在具体设计、模型制作及实际工程中的感悟和体会。在本书的准备及前期工作中，得到赵泽、陈光达、张树新、杨东武、李申、马亚静、郝佳、李军、丁波、谢靓等同志的帮助，在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

段宝岩

2018年11月10日
于西安电子科技大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 星载可展开反射面天线的研究现状	3
1.3 星载阵列天线的研究现状	9
1.4 星载微电子机械天线的研究现状	11
1.5 我国大型星载可展开天线的研究现状	13
1.6 可展开天线设计理论与方法	16
1.7 下一代大型星载可展开天线的发展趋势	20
参考文献	23
第 2 章 空间服役环境分析	31
2.1 概述	31
2.2 卫星运行轨道与天线设计要求	31
2.3 高低温环境	32
2.4 微重力	33
2.5 真空	33
参考文献	34
第 3 章 索桁组合结构形态分析与网面设计	35
3.1 概述	35
3.1.1 坐标系的确定	35
3.1.2 共性参数的描述	37
3.2 反射面网面及支撑结构设计	42
3.2.1 周边桁架式可展开天线	43
3.2.2 构架式可展开天线	67
3.2.3 径向肋式可展开天线	79
3.3 索桁组合结构形态分析及应用	86
3.3.1 索桁组合结构形态分析概述	86
3.3.2 索桁组合结构初始形态设计	86

3.3.3	优化模型的求解与收敛性	88
3.3.4	网状反射面天线的初始形态设计	91
3.3.5	求解流程	92
3.3.6	数值试验与工程案例	93
	参考文献	100
第4章	多柔体展开过程分析与控制	103
4.1	概述	103
4.2	桁架部分多柔体力学(运动学、动力学)模型建立	104
4.2.1	结构组成及简化模型	104
4.2.2	展开过程运动学分析	105
4.2.3	展开过程动力学分析	107
4.3	索网对展开过程的影响分析	109
4.3.1	基于悬链线单元的索网建模	109
4.3.2	松弛索网找形方法	111
4.3.3	展开过程索力影响分析	112
4.3.4	展开过程试验验证	114
4.4	展开过程驱动索速度规划	119
4.5	展开过程控制	121
	参考文献	123
第5章	网状反射面天线电性能分析与等效	125
5.1	概述	125
5.2	空间网状反射面天线反射矩阵与漏射矩阵	125
5.2.1	反射丝网的入射场、反射场及漏射场	125
5.2.2	平面丝网的表面感应电流	127
5.2.3	无源交调	128
5.3	几种典型丝网的等效准则	128
5.3.1	丝网等效准则	128
5.3.2	典型丝网反射面天线电性能计算	132
5.4	空间网状反射面天线机电综合设计	135
5.5	数值试验与结果分析	136
5.5.1	阵列馈源+周边桁架式网状反射面天线电性能分析	136
5.5.2	径向肋式可展开天线电性能分析	139
5.5.3	构架式可展开天线电性能分析	139

参考文献	142
第6章 索桁组合结构形面精度测量与调整	143
6.1 概述	143
6.2 形面精度的摄影测量	143
6.3 索张力测量	147
6.4 形面精度调整试验	148
参考文献	152
第7章 索桁组合天线展开可靠性分析	153
7.1 概述	153
7.2 星载网状反射面天线展开失效树与底事件概率	154
7.2.1 失效树模型的建立	155
7.2.2 底事件的分类	155
7.2.3 周边桁架式可展开天线展开可靠性分析的底事件获取	157
7.3 区间与概率混合可靠性模型	157
7.3.1 概率可靠性模型	157
7.3.2 区间与概率混合可靠性模型	158
7.4 关键底事件可靠性分析	161
7.4.1 关键底事件可靠性分析时所涉及的不确定量分类	161
7.4.2 “节点轴转动卡死”底事件可靠性分析	161
7.5 伸缩杆滑动试验装置及试验方法	163
7.6 星载网状反射面天线展开失效概率计算	164
7.7 星载网状反射面天线底事件重要度计算	167
参考文献	169
第8章 原理样机研制与试验	173
8.1 概述	173
8.2 原理样机研制	173
8.2.1 指标与误差分配	173
8.2.2 材料与加工	174
8.2.3 特殊设备研制	182
8.3 样机试验	186
8.3.1 静力学试验	186
8.3.2 固有频率试验	186
8.3.3 展开过程试验	187

8.3.4 展开可靠性试验	191
参考文献	194
第9章 星载大型可展开天线综合设计平台	195
9.1 概述	195
9.2 基本框架与流程	196
9.2.1 总体框架	196
9.2.2 流程与分析	197
9.2.3 数字化建模的实例组合	197
9.3 数字化建模及关键技术	199
9.3.1 数字化建模方法	199
9.3.2 CAD/CAE集成技术	202
9.4 星载大型可展开天线综合设计平台的主要功能与模块	205
9.4.1 数字化建模的组成	205
9.4.2 星载大型可展开天线综合设计平台 SDADS 的主要功能	206
9.5 案例验证	208
参考文献	210
第10章 静电成形薄膜反射面天线	211
10.1 概述	211
10.2 基本原理与场耦合理论模型	212
10.2.1 静电成形薄膜反射面天线的基本原理	213
10.2.2 两场耦合理论模型	213
10.3 电压数值与电极布局优化	217
10.3.1 静电成形薄膜反射面天线的基础电极分布形式	217
10.3.2 电极电压的优化	220
10.3.3 电极布局优化数学模型与求解	221
10.4 模型研制与试验	224
10.4.1 基础电极的制作	224
10.4.2 薄膜反射面的制作	226
10.4.3 薄膜反射面静电成形试验	232
10.5 薄膜反射面的热塑成形	233
参考文献	237
索引	239

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1972 年 8 月,美国的“轨道天文台”3 号(OAO-3)发射升空,后来为纪念哥白尼(见图 1.1)诞辰 500 周年,被命名为“哥白尼”卫星。哥白尼“日心说”的提出改变了人类对宇宙的认识,促进了人类对宇宙的探索。星载天线广泛应用于通信、侦察、导航、遥感、深空探测及射电天文等领域,是卫星系统的“眼睛”和“耳朵”,对卫星系统起着决定性作用。对星载天线的要求是高精度(高频段)、大口径(高增益)、轻质量、高收纳比。因为距离远(如天地之间),卫星接收的信号微弱,故要求星载天线具有高增益。而实现高增益的办法,最直接的办法就是增大天线口径、提高工作频段。提高工作频段则意味着提高对反射面的形面精度要求。

在通信领域,信息空间向空天地海多维拓展是发展趋势,空天地一体化信息网络的实现很大程度上依赖于空间通信能力。为实现更快速、更优质的通信连接及网络服务,未来的通信卫星需不断提高信号强度及通信质量,迫切需要大口径的星载天线。例如,美国宽带全球局域网络(broadband global area network, BGAN)为实现高达 492Kbit/s 的传输速率,天线口径应大于 9m;波音卫星系统公司的海事通信卫星搭载的天线口径也均在 12m 以上。对于军事用途的通信卫星,为增强其抗干扰能力,必须提高星载天线系统的增益和方向性;为增强天线的抗侦察性而使用的跳频通信技术和扩频通信技术则要求天线能适应较高的工作频率且具有较宽的频带,这些都对星载天线的口径和形面精度提出了新的挑战。

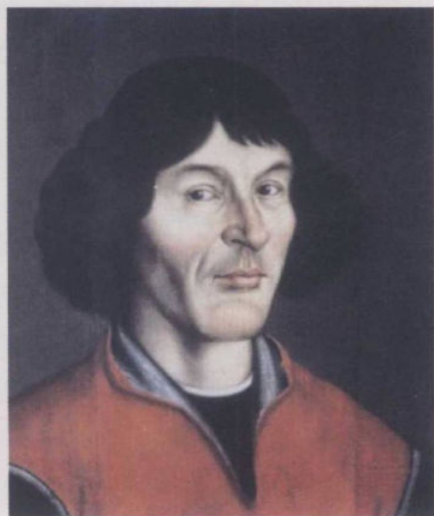


图 1.1 尼古拉·哥白尼(Nicolaus Copernicus), 1473 ~ 1543 年,天文学家、数学家。其《天体运行论》倡导“日心说”,是现代天文学的起点,标志着现代科学的开始

在遥感领域,为全天候和全天时对大气、海洋、陆地实施监测,需要用到高精度的星载微波辐射计。如美国 DMSP 气象卫星上装载的 SSMIS 微波辐射计(频率为 23.8~183GHz)^[1]和俄罗斯 METEOR-3M 卫星上装载的 MTVZA (频率为 17~183GHz)^[2],已在军事气象保障、天气预报及洪涝灾害探测等方面发挥了重要作用。然而,未来若需提高观测分辨率,就必须增大天线的口径,例如,美国下一代多普勒气象雷达 NEXRAD 的天线口径达到 35m,工作频率为 35GHz^[3]。

在导航卫星和资源卫星领域,大口径天线的需求也在不断提高。如美国的 GPS Block III 导航卫星和我国的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)都需要大口径的星载天线。此外,空间太阳能电站(space solar power station, SSPS)为了从地球同步轨道传输高功率连续微波至地面,需要口径上百米的超大型天线,例如,功率容量达 5GW 的卫星太阳能卫星微波发射天线的口径可能要达到 1km^[4]。

在军事领域,现代化战争的战场环境急剧变化,作战样式转换迅速,伪装、欺骗等能力不断提升,因而获取情报比以前更加困难,对情报的时效性、准确性及连续性要求越来越高。为能在密集复杂的电磁信号环境中快速截获和识别辐射源,通常要求电子侦察系统具有频带宽、灵敏度高、动态范围大、测频测向精度高、响应速度快、分辨力强及定位精度高等特性。这些需求对星载天线的口径和形面精度(频段)提出了很高的要求。随着电子侦察卫星从地球静止轨道向近极地大椭圆轨道以及具有变轨能力的多轨道综合侦察卫星方向的发展、侦测频带的不断拓宽以及对电子接收机灵敏度和信噪比要求的不断提高,对大口径星载天线的需求也在提高。

至于轻质量、高收纳比的要求,则源于发射火箭整流罩尺寸(以我国的长征五号火箭为例,其高轨的可用整流罩尺寸仅为直径 4.5m、高 4.5m;低轨时稍大些,直径 4.5m、高 12m)与发射费用的限制。因为火箭整流罩尺寸有限,加之应尽可能降低发射费用,故大口径星载天线必须做成可展开式的,即发射时收拢于火箭整流罩内,入轨后自动展开到位。在展开过程中,尤其是始末段,展开加速度不能过高,以免冲击过大导致天线破坏。为适应不同用途卫星的需要,各发达国家和地区已经或正在研究各式各样的可展开天线,其中有代表性的是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Agency, NASA)、俄罗斯联邦航天局(Russian Federal Space Agency, RFSA)、欧洲太空局(European Space Agency, ESA)、日本宇宙科学研究所(Institute of Space and Astronautical Science, ISAS)和日本宇宙事业开发集团(National Space Development Agency of Japan, NASDA)^[5~13]。根据可展开天线在航天领域的应用与研究现状,可展开天

线分为反射面天线、阵列天线和微电子机械天线^[14,15]。本章将针对这三类天线的研究和应用现状及未来发展加以阐述,为大型可展开天线的研究和应用提供一些有益的参考。

1.2 星载可展开反射面天线的研究现状

反射面天线是各种应用卫星上使用最多的一类天线形式,可作为超高频、微波乃至毫米波波段的通信卫星天线,形成赋形区域波束、点波束、多波束及扫描波束。根据反射面的结构形式可分为四大类:刚性反射面天线、充气反射面天线、网状反射面天线及薄膜反射面天线。

1. 刚性反射面天线

刚性反射面天线的典型特征是天线的反射面由中心毂和若干块刚性曲板组成^[16,17]。刚性反射面天线的反射面材料多选用金属板或镀有金属反射面的碳纤维增强材料。板块可加工成较为理想的抛物面,因此这种天线的最大优点是反射面精度高。一个10m口径的刚性反射面天线的表面精度可达0.13mm^[18]。刚性反射面天线的形面精度很高,因此可应用于微波遥感领域,如微波辐射计、散射计等^[19]。然而,它存在结构笨重、造价高、收拢体积大的缺陷,目前在大口径卫星天线上应用较少。

2. 充气反射面天线

充气反射面天线的优点是高收纳比、大口径^[3,20~26],但其形面精度不高,同时因为必须带有压缩机,所以面密度较高。这类天线主要由柔性材料(经过化学树脂处理的Kevlar膜材或Mylar膜材)制成,其展开原理与民用建筑中的充气膜结构类似,通过内部充气使结构膨胀至所需的位置和形状。与民用膜结构不同的是,天线膨胀到指定位置后,在太阳光的照射下,膜材将发生光照硬化,以使其保持所张开的形状,此时,即使内部气体出现泄漏,也不会造成天线反射面形面精度的损失。对充气反射面天线的研究开始于20世纪60年代,但由于材料、工艺等因素的制约,发展较慢。20世纪90年代出现的新材料、新工艺,促进了充气反射面天线的快速发展。NASA、ESA等针对充气反射面进行了有益的探索,但目前仍没有实现商业应用,材料和硬化工艺仍将是今后的研究热点。充气反射面天线研制的里程碑是1996年5月29日NASA在飞机上进行的直径为14m的充气反射面天线的展开试验(inflatable antenna experiment, IAE),如图1.2所示,它标志着这种天线结构在空间应用的开始。同时,美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)和L'Garde正在研制一个称为太空与地球间的先进无线电干涉测量(Ad-

vanced Radio Interferometry between Space and Earth, ARISE) 的 25m 口径的充气反射面天线。

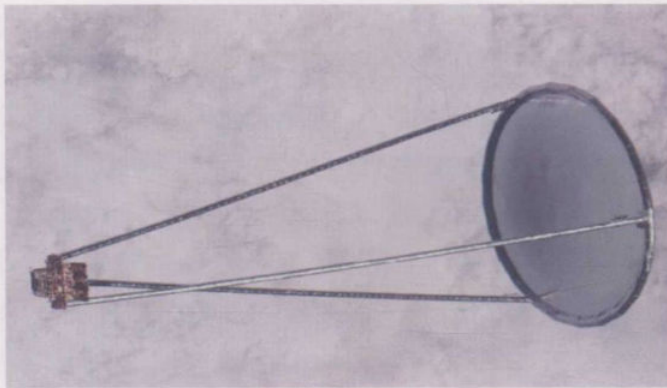


图 1.2 某充气反射面天线样机

3. 网状反射面天线

目前,在轨运行的星载大型可展开天线主要为网状反射面天线,它在理论方法、试验验证等方面都是国际宇航界的关注热点之一。这类天线的特点是反射面均由柔性金属丝网构成,为柔性受力系统,因而支撑网的张力点、张力水平对保形能力、形面精度、展开的平稳性与可靠性均具有显著影响。网状反射面质轻,易折叠,收纳比高,易于实现大口径,便于组合各种可展开的支撑结构,但构造较复杂,形面精度、可靠性及重复精度较低。根据当前的技术发展,这类天线的口径在理论上可做到 50m 甚至上百米,形面精度可达 $200 \sim 500 \mu\text{m}$,无线电射频可达 $1.6 \sim 40\text{GHz}$,可满足低频、高频段的需求^[27]。根据对柔性金属丝网的支撑形式和展开驱动方式的不同,网状反射面天线衍生出不同的结构形式^[28~33]。

1) 环形天线

如图 1.3 所示,环形天线指展开桁架结构位于周边、中心及径向全部由支撑网系统组成的天线,具体又可分为周边桁架式可展开天线、Harris 环形天线、EGS 环形天线等。周边桁架式可展开天线由多个平行四边形单元组成,形成封闭的环形结构,美国的 Thuraya、MBSat 及 SMAP 卫星等均采用这一结构形式;Harris 环形天线由一个正多边形的内环和外围的上、下两层网面斜支撑杆组成,美国的 SkyTerra 和 MSV 卫星的 22m 口径天线就采用了这种形式;EGS 环形天线的每个展开单元由 2 个相同剪刀式展开机构组成,RKA 和 ESA 联合研制了该类型 12m 口径的天线。

2) 径向肋式可展开天线

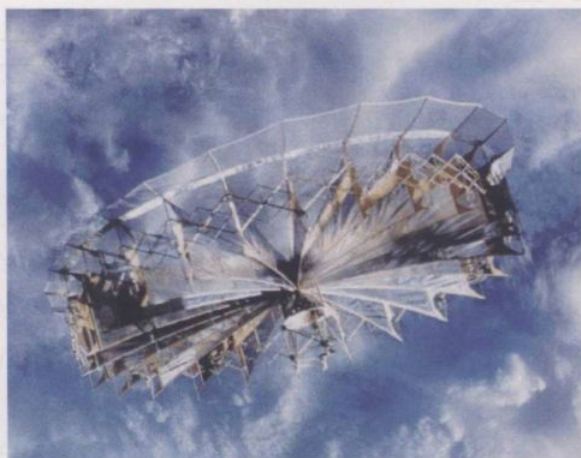
如图 1.4 所示,径向肋式可展开天线结构类似伞状,由若干固定在一个中心毂上的抛物线形管状碳纤维肋构成,反射网面连接在这些肋之间。美国 Harris 公司



(a) 周边桁架式可展开天线



(b) Harris 环形天线



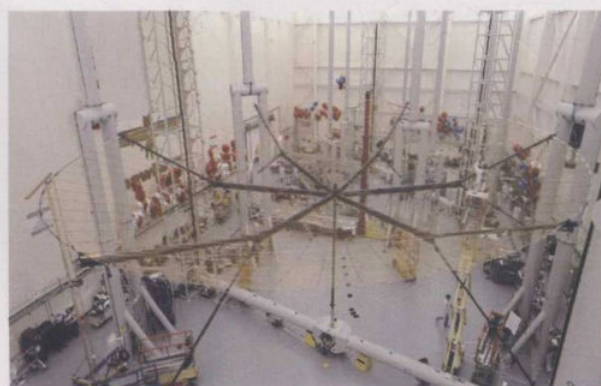
(c) EGS 环形天线

图 1.3 环形天线

研制的 12m 口径的天线将肋做成了折叠式。然后,该公司研制的 TerreStar 卫星的 18m 口径的天线将折叠肋分为上、下两节(Y 形),在保证天线收纳比的同时可提高天线的反射面精度。



(a) MUOS 卫星的折叠肋



(b) TerreStar Y 卫星的形肋

图 1.4 径向肋式可展开天线