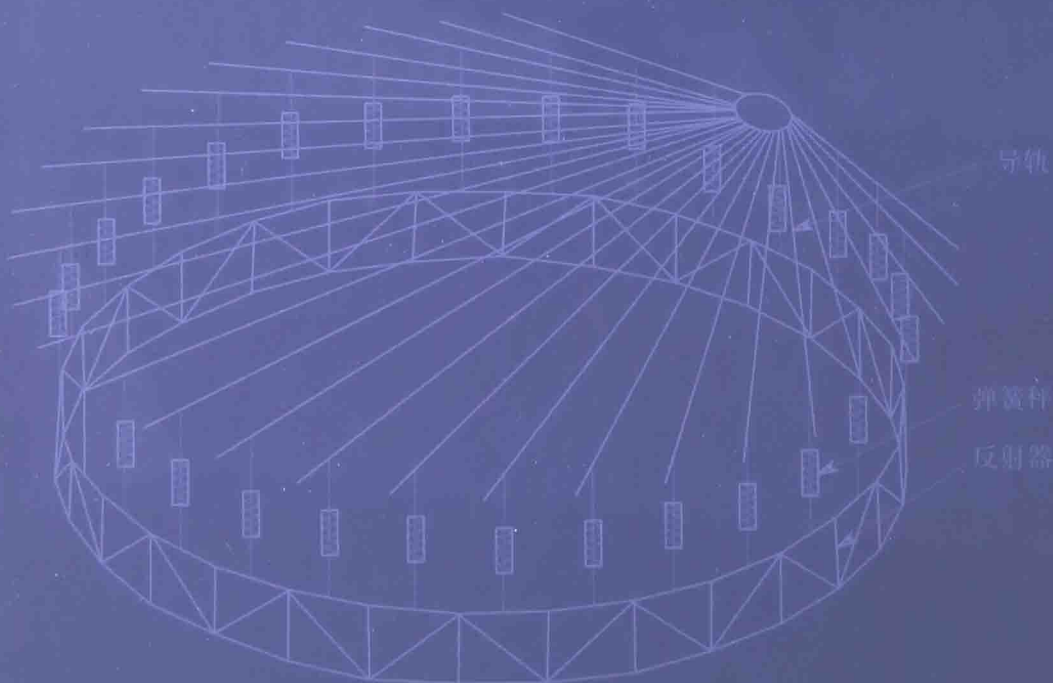




航天科技图书出版集团出版

空间大型天线 多体动力学分析

周志成 董富祥 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

空间大型天线多体动力学分析

周志成 董富祥 著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

空间大型天线多体动力学分析 / 周志成, 董富祥著

-- 北京: 中国宇航出版社, 2015.3

ISBN 978-7-5159-0847-2

I. ①空… II. ①周… ②董… III. ①航天器天线—
多体动力学—动力学分析 IV. ①V443

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 292126 号

责任编辑 舒承东 封面设计 文道思

出版发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国印刷有限公司

版次 2015 年 3 月第 1 版
2015 年 3 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 14.75

字数 352 千字

书号 ISBN 978-7-5159-0847-2

定价 118.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序 一

在航天发展的历程中，许多关键性技术的突破，有力推动了航天产品的创新发展与服务的广泛应用，星载大天线技术即是其中之一。传统上，受限于运载火箭整流罩尺寸和星载天线构型，一般星载天线口径在4米以内，严重制约了地面的应用。而星载可展开大型天线的出现，使以往认为不可能的事逐渐成为现实。现在，4米以上、几十米甚至上百米口径的反射器天线都已实现，并且逐步成为移动通信卫星、电子侦察卫星以及海洋盐度和土壤湿度等对地观测卫星研制的先决条件和重要标志。

大型空间可展开天线一般为柔性反射面，在轨展开过程中以及展开后对动力学控制、反射器型面精度控制等都有非常严格的要求。目前，仅有美国、欧洲和俄罗斯等少数航天大国具备一定的研制能力和基础条件，大型空间可展开天线技术已经成为衡量宇航制造企业乃至一国航天综合实力的重要技术特征。我国正处在由航天大国向航天强国迈进的关键历史时期，在技术上和工程上突破星载大天线瓶颈制约具有重要的现实意义和深远的影响。

我国在空间大型天线方面进行了多年的研究，在大型空间天线的设计、分析和验证中，天线展开过程的柔性多体动力学分析仿真技术、地面试验技术以及故障预防和排除策略等，都是必须突破的关键技术。《空间大型天线多体动力学分析》作为国内该领域的首部专著，以空间大型桁架式天线为研究对象，从天线的动力学建模、设计、仿真和试验验证，以及展开故障模式分析与对策研究等方面进行了详细地阐述，具有理论分析与工程实践相结合、国内情况与国外经验相结合的特点。对空间大型天线的动力学研究和工程设计研制等相关人员来说，具有很好的参考价值，是一本不可多得的好书。

《空间大型天线多体动力学分析》充分反映了我国在大型空间机构展开动力学分析、地面试验和故障模式分析与处理等领域理论研究和工程应用方面取得的新成果。相信该书的出版，必将有力地推动我国航天器多体动力学的进一步研究发展和广泛的工程应用，推动我国大型空间可展开结构设计、分析、验证及故障处理能力达到更高的水平。在此，对该书的出版表示衷心的祝贺！

王礼恒

中国工程院院士

中国航天科技集团公司高级技术顾问

2015年1月

序 二

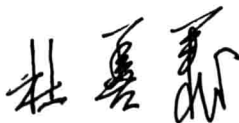
随着通信、空间科学的迅猛发展，卫星成为信息传播中继站的首选。随着信息量的不断增大，对卫星天线的大容量、多谱段、大功率、长寿命等功能的需求变得愈加迫切，必然要求增大天线的口径来提高其传输带宽、信号增益和简化地面接收装置，其设计、分析和试验验证技术已经成为航天科技发展迫切需要掌握的核心技术。

周志成研究员在从事多年航天器动力学与控制专业研究后，致力于通信卫星和导航卫星总体设计工作，是我国大型地球静止轨道卫星公用平台（东方红四号）总设计师。他在航天器研制、动力学与控制、总体优化设计和研制试验方面，具有扎实的理论基础、精湛的专业知识和丰富的工程经验。他和董富祥合作编著的《空间大型天线多体动力学分析》，是我国首部全面介绍大型空间天线展开多体动力学及故障处理对策方面的专著。因此，本书对于推广我国空间大型天线研制经验、培养空间大型天线工程专业人才将会产生非常重要的推动作用。

《空间大型天线多体动力学分析》以空间大型桁架式天线为研究对象，系统地介绍了大型桁架式天线在展开、收拢状态，以及状态变化过程中的复杂强耦合、时变高维非线性动力学问题。这些问题给航天器动力学建模与数值仿真带来了巨大的挑战，作者对此进行了卓有成效的研究，并在动力学理论建模、地面试验技术、展开过程故障模式机理分析和力学建模、故障处理对策和应用软件开发等领域形成了一系列研究成果，具有较高的技术深度和较强的实践性和指导性。

难能可贵的是，本书密切结合工程实践。作者结合多年的动力学研究经历和工程实践经验，将刚体、小变形弹性体和大变形柔性索网有机地整合在一个理论框架内，推动非线性动力学研究拓展至新领域。作者的研究分析方法和应用成果为大型空间天线的设计提供了有力的计算机辅助验证工具，具有重要应用价值。此外，本书将力学理论与软件工程密切结合，开发了准确高效、工程实用的大型复杂航天器动力学分析仿真平台，有力提升了我国专用仿真软件的自主能力。

我相信，《空间大型天线多体动力学分析》的出版，将会促进我国空间大型天线技术的进步，其研究方法和成果对于航空航天、动力学与控制的专业研究生也具有重要参考意义，并会受到航天器总体设计、空间可展结构与故障处理对策等前沿领域工程技术人员的欢迎。



中国工程院院士

中国航天科技集团公司高级技术顾问

2015年1月

序 三

当今时代，航天不再只是人类探索未知的手段，更成为提升国家实力、普惠民众生活、驱动科技创新和增进国际合作战略制高点。发展人造地球卫星技术，增强利用空间能力，是各国开展航天活动的重要诉求。特别是地球静止轨道通信卫星和对地观测卫星，具有位置高远、覆盖广阔天然优势，能极大地改善卫星应用水平，提供更佳的业务服务能力。

空间大型天线是满足静止轨道通信和对地观测需求的关键技术设备，其设计、分析及相关试验验证技术已经成为各国航天发展迫切需要掌握的核心技术。作为大型复杂空间可展开结构，空间大型天线的设计与制造是一项“复合”工程，不仅涉及天线机构展开、型面精度调整等工程技术问题，更涵盖多体系统动力学、空间机构摩擦学等科学理论问题，为发展该项技术带来了诸多挑战。并且，受试验条件限制和空间大型天线功能结构约束，难以通过地面试验完全再现空间大型天线在轨展开过程的所有关键力学参数和整星动态特性，为卫星后续设计改进带来诸多不便。因此，空间大型天线研制工程中遇到的技术难题向力学研究提出了新挑战。实践证明，航天工程与力学理论相结合、动力学建模与软件仿真相结合、故障预测与应对策略分析相结合，是解决空间大型天线工程研制难题的有效手段。

《空间大型天线多体动力学分析》是我国全面介绍空间大型天线展开多体动力学及故障处理对策的首部专著，总结了我国在空间大型天线理论研究和工程实践方面的经验，填补了领域空白。该著作从理论研究出发，结合工程研制经验，对空间大型天线的多体动力学问题、工程研究实践和试验仿真等进行了论述，集理论性、工程性和技术性于一体，可读性强、研究价值高。更重要的是，本书由国内长期从事空间大型天线研制的一线专家和技术人员共同编写，凝聚了众多研究人员的多年研究成果和工程经验，内容涵盖全、技术论述精、可实践性强，是一部不可多得的权威性工程专著。

欣闻《空间大型天线多体动力学分析》付梓发行，值得祝贺！相信这部航天工程与力学理论密切结合的工程专著能够推动我国空间大型天线技术发展，促进我国卫星研制技术创新，并将对航天领域相关专业人才的培养发挥重要作用。



中国工程院院士

2015年1月

序 四

在世界航天发展五十余年的时间里，出现了许多突破性技术，有力推动了航天产品与服务的广泛和深入应用，星载大天线技术即是其中之一。传统上，受限于运载火箭整流罩尺寸和星载天线构型，一般星载天线口径在4米以内，严重限制了地面的应用。而星载可展开大型天线的出现，使以往认为不可能的事逐渐成为现实。现在，4米以上、几十米甚至几百米口径的反射器天线都已实现，并且已经逐步成为移动通信卫星、电子侦察卫星以及海洋盐度和土壤湿度等对地观测卫星的先决条件和重要标志。

大型空间可展开天线一般为柔性反射面，在轨展开过程中以及在轨展开后对动力学控制、反射器面精度控制等方面都具有非常严格的要求。目前，全球仅有美国、欧洲和俄罗斯等少数几个航天大国具备一定的研制基础和实力，大型空间可展开天线技术已经成为衡量宇航制造企业乃至一国航天综合实力的重要技术特征。我国正处在由航天大国向航天强国迈进的关键历史时期，在技术上和工程上突破星载大天线瓶颈具有重要且深远的意义。

我国在空间大型天线方面开展了多年的研究，在大型空间天线的设计、分析和验证中，天线展开过程的柔性多体动力学分析仿真技术、地面试验技术、以及展开故障预防和排除策略，都是必须突破的关键技术。《空间大型天线多体动力学分析》作为国内该领域的首部专著，以空间大型桁架式天线为研究对象，从天线的动力学建模、设计、仿真和试验验证、以及展开故障模式分析与对策研究等角度进行了详细的阐述，具有理论分析与工程实践相结合、国内情况与国外经验相结合的特点。对空间大型天线的动力学研究和工程设计研制等相关人员来说，该书具有相当高的参考价值，是一本不可多得的好书。

在此，热烈祝贺《空间大型天线多体动力学分析》的出版，它充分反映了我国在大型空间机构展开动力学分析、地面试验和故障模式分析与处理等领域理论研究和工程应用方面取得的新成果。相信该书的出版，必将有力地推动我国航天器多体动力学的进一步研究和广泛的工程应用，促进我国大型空间可展开结构设计、分析、验证及故障处理能力达到更高水平。



中国工程院院士

2014年12月

前 言

随着卫星移动用户终端不断向轻质、便携化趋势发展，对时间敏感目标监视需求的不断增长，以及对海洋盐度及土壤湿度监测战略需求的提出，大型可展开空间天线已成为满足高轨移动通信和对地遥感等需求的关键技术设备，其设计、分析和试验验证技术已经成为航天科技发展迫切需要掌握的核心技术。

空间大型桁架式天线属于含有众多桁架铰链和索网拉索的典型空间非线性结构系统和柔性多体机构系统，具有尺寸大、刚度低等特点，地面测试难以完全准确揭示其在轨展开动力学特性，可靠稳定的空间大型天线展开过程多体系统动力学分析，对于优化天线结构机构设计、制定展开过程控制规律及预测天线在轨展开动力学性态均具有重要意义，是空间大型天线结构机构设计、分析验证及故障处理的不可或缺的。开展空间大型天线典型故障模式和故障处理对策仿真研究，分析影响天线展开可靠性的薄弱环节，建立相应故障处理预案，是提升空间大型天线在轨展开可靠性的重要途径。

本书以空间大型桁架式天线为研究对象，密切结合国内外卫星工程发展趋势，对著者多年来在空间大型桁架式天线展开动力学理论建模、地面试验技术、展开过程故障模式机理分析与力学建模、故障处理对策制定及应用仿真软件开发等方面取得的研究成果进行了较系统总结。在阐述大型桁架式网状天线系统组成及其展开原理的基础上，推导了大小臂展开过程刚柔耦合多体动力学方程，确定了大小伸展臂展开动力学正逆问题求解方案，建立了天线反射器驱动传动机构、调速控制机构、锁定机构及索网非线性力学模型，攻克了索网桁架非线性耦合动力学建模及仿真问题。为满足大型天线展开动力学分析仿真需求，相继解决了不同软件接口设计、动力学仿真各模块设计与测试、软件系统集成测试、软件系统动态演示等多项难题，开发了基于参数化的空间大型天线展开动力学与故障对策专用仿真软件包，并使之具备了开展大型天线展开动力学仿真的能力。在调研国内外航天器机构在轨展开故障的基础上，总结了引起航天器机构在轨展开故障的各类影响因素，并结合国内大型天线展开机构技术特点和故障模式分析结果，提出了铰链卡滞、反射器桁架展开不同步引起的故障及索网缠绕等三类故障模式，分析了三类典型故障模式的作用机理，建立了各类故障模式力学模型及动力学方程，开展了铰链卡滞在轨姿态机动和电动机拉索驱动处理对策、齿轮传动间隙引起的反射器展开不同步及索网桁架耦合动力学仿真，并根据仿真结果提出了天线展开可靠性设计改进建议。

本书共 8 章，各章内容安排如下：

第 1 章介绍了 GEO 大型空间天线技术发展概况及应用情况，周边桁架式天线系统组成与展开原理，简述了国内外大型空间天线展开多体动力学研究与软件开发现状，大型天线展开动力学试验和大型空间天线展开故障模式与处理对策现状，提出了工程实用的大型桁架式网面天线展开动力学与故障仿真软件七大设计原则。

第 2 章系统介绍了航天器多体动力学建模方法，阐述了多体系统动力学模化方法，讲述了基于相对坐标的航天器多刚体系统动力学方程、基于有限元离散和模态离散的小变形弹性体和大变形柔性索网动力学建模方法，提出了天线展开过程中索网三类动力学问题，并建立了索网、索网与桁架耦合以及索网接触碰撞动力学模型，介绍了多体系统常微分方程组和微分代数方程组数值算法，为空间大型网状反射面天线展开多体动力学及故障模式建模与仿真奠定了理论及算法基础。

第 3 章介绍了星载大型空间天线在轨展开原理，总结了其展开机构主要技术特点，提出了展开机构设计及装配应遵循的基本原则；定义了各部件的坐标系，并根据空间大型天线展开过程，依次推导了大小臂展开正逆问题动力学方程，并根据天线反射器展开机构系统组成和展开原理，建立了反射器驱动传动机构、调速控制机构力学模型，针对反射器桁架展开过程中构型奇异问题提出了基于替代约束的求解方案，成功避免了小角度情况下反射器雅可比矩阵接近奇异导致的数值性态差问题。

第 4 章针对星载大型空间天线实际工程算例，开展了大型天线伸展臂正逆问题数值仿真，并结合试验测试结果对反射器展开动力学进行了数值仿真，数值仿真结果证明了开发的空間大型天线展开动力学分析软件的正确性。

第 5 章对国内外航天器机构在轨展开故障进行统计，通过分析获得航天器机构展开的各类故障模式，归纳了导致航天器机构展开故障的主要几类影响因素，并结合大型空间天线展开机构工作原理和技术特点，总结出了空间大型天线三类典型故障模式，对各类故障模式机理进行了分析研究，建立了各自相应的力学模型，为故障模式处理对策仿真工作的开展奠定了基础。

第 6 章针对天线展开三类典型的故障模式，根据各自的故障作用机理，通过数值仿真分析了宜采用的故障处理对策。本章还对反射器擒纵机构振动周期设计进行了分析研究，提出了相应的设计改进方法。

第 7 章介绍了专门设计的空间大型天线展开多体动力学仿真软件框架、数据结构及各主要模块程序设计流程，通过算例对软件的正确性进行了考核，最后对软件的特色功能进行了说明。

第 8 章介绍了空间机构摩擦学试验、力学环境试验和热真空试验技术，综述了大型空

间机构地面重力补偿试验装置国内外研究现状，针对大型卫星天线技术特点，提出了伸展臂和大型桁架式网状天线地面展开试验装置设计原则，最后讨论了大型天线地面展开试验的局限性。

作为我国大型空间天线展开多体动力学及故障处理对策方面的首部专著，本书编写目标是使读者通过学习能了解和掌握携带大型空间天线航天器总体设计、分析及天线在轨展开故障处理方法，为大型空间天线展开机构设计、试验、故障预防和故障排除策略制定提供理论参考依据。曲广吉研究员在学术上一直关心、帮助和指导作者的研究工作，在此致以衷心的感谢。限于作者水平，书中错误和不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2014 年 12 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 概述	1
1.2 空间大型可展开天线	3
1.2.1 分类及应用情况	3
1.2.2 展开过程试验	9
1.3 空间大型天线展开故障模式与处理对策	12
1.3.1 在轨展开故障综述	12
1.3.2 展开可靠性保障措施	17
1.3.3 多体动力学与展开故障处理对策	19
1.4 大型空间可展开天线多体动力学	20
1.4.1 周边桁架式网状天线组成和展开原理	20
1.4.2 空间大型天线展开多体动力学研究与软件开发现状	21
1.5 空间大型天线展开多体动力学与故障仿真软件设计原则	28
参考文献	30
第 2 章 多体系统动力学基础	33
2.1 引言	33
2.2 模化方法	34
2.2.1 物理模型的基本定义	34
2.2.2 多体系统拓扑结构	35
2.2.3 多体系统理想铰链约束处理方法	37
2.2.4 多体系统中驱动机构力学模型和常用铰链摩擦模型	41
2.3 航天器多刚体系统动力学方程	43
2.3.1 多刚体系统运动学方程	43
2.3.2 单刚体动力学方程	45
2.3.3 树状多刚体系统	46
2.3.4 非树状多刚体系统动力学方程	47
2.4 基于有限元离散的柔性多体动力学方程	48
2.4.1 作大范围运动的单柔性体动力学方程	48
2.4.2 基于等参单元描述的平面柔性体动力学方程	52

2.4.3	基于结构单元离散的柔性多体动力学方程	57
2.5	基于模态离散的柔性多体系统动力学方程	60
2.5.1	柔性体模化方法	60
2.5.2	基于模态离散的单柔性体动力学方程	62
2.5.3	铰链的运动学递推关系	66
2.6	索网桁架耦合动力学方程	67
2.6.1	索网动力学建模方法	68
2.6.2	基于绝对坐标方法的索网动力学方程	71
2.7	多体动力学数值算法	75
2.7.1	常微分方程组 (ODEs) 初值问题数值解法	75
2.7.2	微分代数方程组 (DAEs) 初值问题数值解法	76
参考文献		78
第3章 空间大型天线展开多体动力学理论模型		80
3.1	空间大型周边桁架式网状天线展开过程及机构设计原则	80
3.1.1	空间大型周边桁架式网状天线展开过程	80
3.1.2	空间大型天线展开机构技术特点及设计原则	81
3.2	天线大小臂展开动力学	84
3.2.1	星载大型天线机构部件坐标系定义	84
3.2.2	大臂展开动力学	85
3.2.3	小臂展开动力学	91
3.2.4	大小臂展开动力学逆问题的求解	94
3.3	反射器展开机构动力学建模	96
3.3.1	反射器展开机构坐标系定义与基本假设	96
3.3.2	反射器传动机构力学模型	97
3.3.3	绳索驱动机构建模	99
3.3.4	调速控制机构力学模型	101
3.3.5	展开到位锁定机构	105
3.3.6	天线展开动力学方程	106
3.3.7	收拢状态构型奇异问题	106
参考文献		110
第4章 空间大型桁架式天线展开过程仿真		111
4.1	星载大型天线支撑臂展开动力学仿真	111
4.1.1	大臂展开过程动力学仿真	111
4.1.2	大臂回转过程动力学仿真	115
4.1.3	小臂展开过程动力学仿真	118
4.2	天线反射器展开动力学	121

4.2.1 输入参数	121
4.2.2 同步齿轮铰链展开动力学仿真	122
4.2.3 反射器在轨展开动力学仿真	123
参考文献	130
第5章 空间大型天线展开故障机理及力学模型	131
5.1 国内外空间机构展开故障情况	131
5.2 空间机构展开故障主要影响因素	133
5.3 天线展开故障模式分析	135
5.3.1 伸展臂展开过程故障模式分析	135
5.3.2 反射器展开过程故障模式分析	136
5.4 反射器展开过程典型故障模式作用机理及力学模型	140
5.4.1 铰链卡滞类型、作用机理及其力学模型	140
5.4.2 展开传动不同步故障模式作用机理和力学模型	143
5.4.3 反射器展开过程中索网缠绕故障机理和动力学建模	147
参考文献	151
第6章 空间大型天线展开故障模式处理对策仿真	152
6.1 桁架铰链卡滞故障处理对策仿真	152
6.1.1 同步齿轮铰链卡滞处理对策仿真	153
6.1.2 T型铰链卡滞处理对策仿真	158
6.1.3 斜杆滑移铰链防卡滞设计建议	160
6.2 桁架传动不同步现象仿真评价与设计建议	161
6.2.1 正常驱动和一侧动力装置损坏情况下反射器传动不同步仿真	161
6.2.2 桁架传动不同步对天线展开可靠性影响分析与设计建议	162
6.3 桁架展开过程中索网缠绕故障仿真分析及设计建议	163
6.3.1 索网与桁架缠绕故障仿真分析	163
6.3.2 反射器张力索网防缠绕设计建议	170
6.4 典型故障模式初步处理对策	171
参考文献	173
第7章 空间大型天线展开多体动力学软件	174
7.1 大型空间天线展开多体动力学与故障对策仿真软件框架结构	174
7.1.1 数据前处理模块	175
7.1.2 动力学仿真模块	177
7.1.3 后处理模块	180
7.2 大型天线展开多体动力学模型参数定义和数据结构	183
7.2.1 系统标志位	183

7.2.2	拓扑构型数组	183
7.2.3	物体类	183
7.2.4	铰类	184
7.2.5	切断铰类	184
7.2.6	约束类	185
7.2.7	外力类	185
7.2.8	力元类	185
7.2.9	绳索滑轮类	185
7.2.10	同步齿轮调速机构类	185
7.2.11	算法参数	185
7.3	软件正确性考核验证	186
7.3.1	前处理模块正确性考核验证	186
7.3.2	动力学仿真模块正确性验证	187
7.4	软件特色功能	190
参考文献		192
第 8 章 空间大型可展开天线地面试验		193
8.1	引言	193
8.1.1	大型空间机构试验验证	193
8.1.2	大型空间机构微重力试验技术	200
8.2	空间大型周边桁架式天线地面试验技术	208
8.2.1	伸展臂重力补偿条件下展开动力学试验	209
8.2.2	反射器重力补偿条件下展开动力学试验	211
8.3	天线地面展开试验的局限性	213
参考文献		215

第 1 章 绪 论

1.1 概述

根据国民经济的发展需求,各航天大国正研究和部署 GEO 移动通信卫星、高分辨率对地微波遥感卫星等各类航天器。随着卫星移动用户终端不断向轻质便携化趋势发展,对时间敏感目标监视需求的不断增长和对海洋盐度及土壤湿度监测战略需求的提出,大型可展开空间天线已成为满足高轨移动通信和高分辨率对地微波遥感等需求的关键技术设备,其设计、分析和试验验证技术已经成为航天科技发展迫切需要掌握的核心技术。由于运载火箭整流罩尺寸的限制及展开状态低刚度天线难以承受发射时受到的载荷,空间大型天线需要采用可展开结构。

空间大型天线具有活动部件数量多、在轨展开可靠性要求高、型面精度调整和保持困难、指向精度受复合因素影响大及地面试验验证困难等特点,这些给空间大型天线及带这类天线航天器设计、建造与试验验证带来了巨大挑战。由于空间大型天线技术复杂,地面试验难以完全验证天线设计有效性和展开可靠性,这些困难主要表现在:天线几何尺寸巨大且自身刚度弱,地面试验过程中往往需要依赖重力补偿装置,导致天线地面与在轨展开动态特性差别大,尤其柔性索膜管理装置设计有效性难以得到充分验证;空间真空高低温环境对天线可展开可靠性影响大,地面热真空试验成本高,且试验设施内部空间难以满足大型天线展开试验需求;由于天线尺寸巨大且受气浮台试验装置限制,天线在轨展开期间整星动态特性难以通过地面试验获取。鉴于地面试验困难、成本高且难以充分验证天线在轨展开动力学与结构动力学特性,为降低天线研制风险、成本和周期,各国在大型天线研制过程中纷纷采用物理试验与动力学仿真分析结合的方法,用于指导天线结构部件设计、展开机构参数设计与优化、索网防缠绕管理机构设计和地面展开试验方案制定,并为卫星控制分系统天线展开模式设计、天线在轨展开故障预案制定和型面精度保持提供动力学输入参数及设计建议。因此,空间大型天线展开多体动力学是带这类天线新型航天器研制必须攻克的核心技术。

图 1-1 为一类空间大型可展开天线在轨展开过程示意图。图中反射器抱箍已经解锁,星载大型天线处于展开初始状态,如同 1-1(a) 所示。大型天线展开过程可分为以下几个阶段:1)大小臂上火工品解锁,大臂在电机驱动下展至一定角度,如图 1-1(b) 所示;2)大臂带动小臂和反射器转动到位后,绕自身轴线回转至一定角度,如图 1-1(c) 所示;3)大臂带动小臂和反射器回转到位后,小臂在臂间主动关节驱动下,展开至指定位置,如图 1-1(d) 所示;4)小臂展开到位后,捆束在反射器上包带先后切断,反射器

先在被动卷簧作用下展开一定角度，避开反射器桁架奇异点位置，此时电动机主要起到收纳绳索的作用，当被动卷簧驱动力矩不足以驱动天线继续展开时，电动机起主要驱动作用，使反射器展开至最终位置。当反射器接近最终展开位置时，反射器索网和金属反射丝网在短时间内绷紧，形成反射抛物面，如图 1-1 (e) 所示。

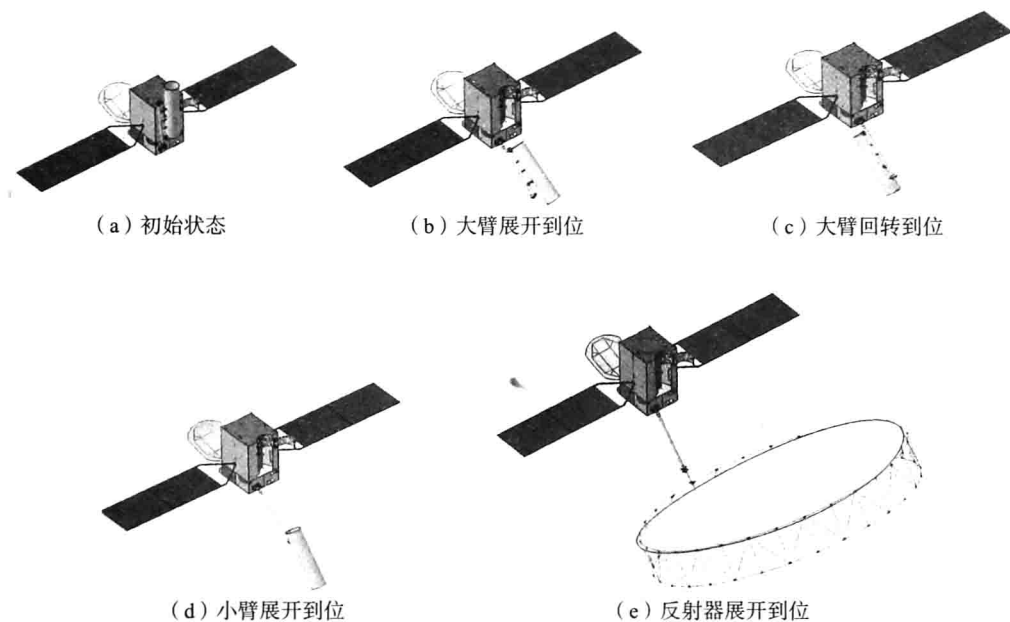


图 1-1 星载大型周边桁架式天线在轨展开过程示意图

空间大型天线技术复杂，地面试验难以完全验证天线设计有效性和展开可靠性，因此这类天线在轨展开过程极易发生故障。据不完全统计，迄今为止国际上发射带大型可展开天线（口径达 4.8 m 以上）的航天器共有 40 多颗，天线展开过程发生故障的为 5 颗，通过故障模式分析和正确的故障控制对策成功挽救 1 颗，4 颗天线展开失败导致航天任务失败。因此，国际上对大型可展开天线在设计研制阶段就非常重视多体展开可靠性设计，并创造条件从部件级到系统级开展试验验证，包括地面试验甚至飞行试验。尽管如此，这类航天器因受发射力学环境和空间高真空及高低温环境影响，大型天线在轨展开过程仍然有可能出现各种故障，因此国际上各大航天公司还非常重视天线在轨展开过程典型故障模式分析及其故障排除策略仿真研究工作。例如 2010 年 11 月美国发射的 SkyTerra-1 移动通信卫星，大型可展开天线口径高达 22 m，但卫星入轨后天线展开出现了故障，卫星主制造商波音公司和天线制造商 Harris 公司根据事先制定的故障模式应急处理对策，专家团队用了十多天时间才使天线完全展开。可见，天线在轨展开故障处理对策对于确保天线在轨可靠展开具有重要价值，其对策制定依赖于关键的多体动力学分析。

综上所述，大型天线展开过程多体动力学分析方法是这类复杂天线设计优化、地面试验验证及在轨展开故障预防与排除策略制定等必须突破的关键共性技术。本书以大型桁架式网面天线为主要对象，系统总结了著者近年在“空间大型天线展开多体动力学建模及故