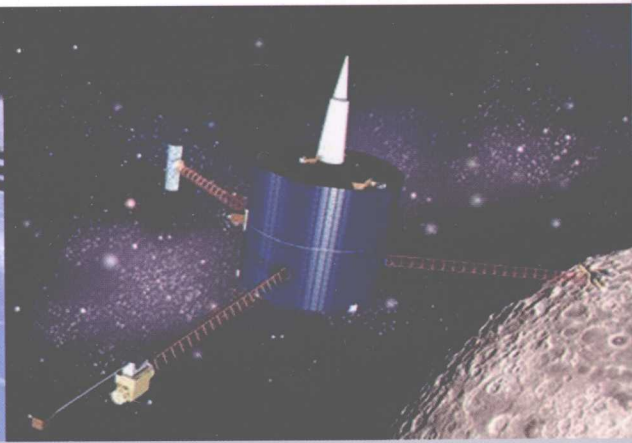
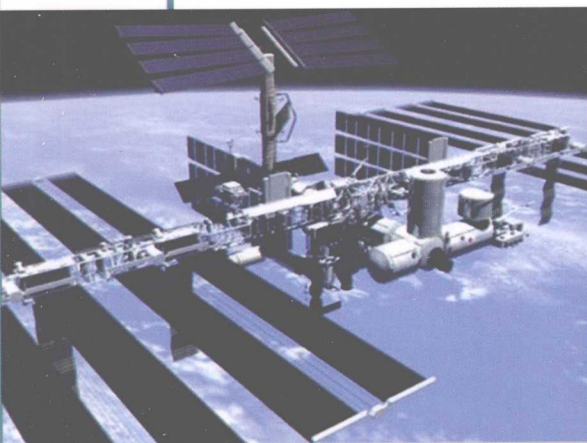


Large Flexible Space Truss Structures:  
Dynamic Analyses and Vibration Fuzzy Control

# 大型挠性空间桁架结构 动力学分析与模糊振动控制

李东旭 © 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

V423  
269  
10

# 大型挠性空间桁架结构 动力学分析与模糊振动控制

Large Flexible Space Truss Structures:  
Dynamic Analyses and Vibration Fuzzy Control

李东旭 著

本书由国家自然科学基金项目 [No. 10472006] 资助

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书论述了航天器大型空间桁架结构动力学与模糊振动控制。以航天器大型空间桁架结构为研究对象,建立了一字形、T字形和工字形等几种典型的结构模型以及单元和整体结构的有限元力学模型。针对所建立的各种桁架模型研究了它们的静力学和动力学问题。在此基础上研究了大型空间桁架结构的被动控制及主动控制的理论、技术和方法;用遗传算法的基本思想实现了被动阻尼杆和主动智能杆的构型设计和优化配置;引入模糊逻辑和模糊控制的理论;设计了桁架结构振动控制的模糊控制器和振动控制系统。

本书适合高等院校航空航天、固体力学、机械工程和计算力学等专业的研究生以及航天、机械、材料工程等领域的科研人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大型挠性空间桁架结构动力学分析与模糊振动控制/李东旭著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-021462-1

I. 大… II. 李… III. ① 航天器-挠性-桁架-结构动力学-动力学分析  
② 航天器-挠性-桁架-模糊控制: 振动控制 IV. V423

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 039280 号

责任编辑: 王飞龙 胡 凯 / 责任校对: 赵桂芬  
责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2008年6月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008年6月第一次印刷 印张: 14

印数: 1—2000 字数: 254 000

定价: 56.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

越来越多的大型空间桁架在航天器中,特别是在月球探测和深空探测中作为探测器、相机、SAR 天线等有效载荷的支撑结构被广泛地应用,并以拉开有效载荷与航天器中心体的距离来尽量减小探测器与中心体的相互干扰。由于桁架结构本身的多样性、构型的灵活性,以及可在轨组装和在轨重构等特点,桁架结构已经直接作为航天器的平台发展起来,如国际空间站。

随着空间桁架结构在航天领域的应用,桁架结构的力学问题逐渐呈现出来。由于受航天器发射重量和容积等条件的限制,在太空中应用的桁架都比较“轻”、“柔”,不如在地面上看到的那么“刚”。其主要特点为:质量轻、跨度大、结构横截面尺寸相对较小,连接铰链有间隙,不同材料不同构型单元组合等。这些特点使结构表现出低频、非线性、大幅度振动等动力学特性。同时,又由于太空中没有大气阻尼的作用,因此结构系统的振动一旦发生就很难衰减。桁架的振动对于其所支撑的有效载荷的正常工作显然是很不利的。

为了提出航天器空间桁架结构的振动控制策略,本书尝试性地对空间桁架结构的模糊振动控制问题开展了研究。本书首先列举了航天器中空间桁架应用的例子,指出了空间桁架结构在未来航天领域的发展趋势,分析了空间桁架的特殊力学问题以及对空间桁架实施振动控制的特殊困难。以航天器大型空间桁架结构为研究对象,建立了几种典型的结构模型:一字形、T 字形和工字形桁架模型。在一字形桁架模型中分别建立了三角截面、正方截面、附加集中质量、含被动阻尼杆、含主动智能杆等不同情况的力学模型。讨论了结构的几何构型和组成单元的特征,在此基础上建立了单元的有限元力学模型和整体结构的有限元力学模型。既研究了单元的一般性力学基本问题,如几何关系、本构关系、材料特性等,也针对所建立的各种桁架模型研究了它们的静力学问题,如给出了位移和内力在桁架中的分布,以及动力学问题,如模态特征及动力响应。特别是对含被动阻尼材料的桁架结构和含主动智能杆的桁架结构的数学建模问题和动力学特性问题进行了分析,在此基础上研究了大型空间桁架结构的被动控制及主动控制的理论、技术和方法,用遗传算法的基本思想实现了被动阻尼杆和主动智能杆的构型设计和优化配置,引入模糊逻辑和模糊控制的理论设计了桁架结构振动控制的模糊控制器和振动控制系统。

全书分为三篇共 12 章。

第一篇,由第 2~5 章组成。研究桁架结构的静力学和动力学问题。包括模型简化、各种不同桁架的数学建模、静力学基本理论、动力学基本方程、力学分析等。

第二篇, 由第 6~10 章组成. 研究桁架结构的主动控制问题. 包括模糊控制的基本理论、遗传算法、智能杆设计和优化配置、模糊控制器设计等.

第三篇, 由第 11~12 章组成. 研究桁架结构的被动控制技术. 包括阻尼材料的力学特性分析和被动阻尼杆的设计与配置问题.

第 1 章, 绪论. 主要分类介绍了目前航天器中空间桁架应用的情况, 并指出了空间桁架结构在未来航天领域发展的趋势. 作为后续研究的引子, 分析了空间桁架的特殊力学问题以及对空间桁架实施振动控制的特殊困难, 概述了振动控制技术的发展情况. 给出了本书主要内容的梗概框图.

第 2 章, 空间桁架结构的构型及简化模型. 对航天器空间桁架的构型特点进行了分析, 包括桁架的组装形式、整体构型、截面形状, 构件与铰链特点, 结构材料等. 并根据构型特点给出几种简化模型作为后续章节研究的对象.

第 3 章, 空间桁架的数学模型及基本力学方程. 数学模型是后续分析桁架结构力学问题及力学特性的基础. 本章数学模型主要包括: 桁架结构的单元分解及单元模型, 静力学分析相关的几何方程、物理方程、平衡方程, 动力学分析涉及的单元刚度矩阵、质量矩阵和整体桁架动力学方程. 既考虑了线性的情况也考虑了非线性的情况; 既有不含智能杆的桁架模型, 也有含智能杆的桁架模型.

第 4 章, 空间桁架静力学分析. 静力学分析主要包括位移(场)分析、应力(场)分析, 以及应变分析. 参考美国空间桁架的材料参数, 为比较同一构型不同材料、同一材料不同构型之间的力学性能, 本章建立了五类桁架结构模型并进行了静力学计算和比较分析.

第 5 章, 空间桁架结构动力学特性分析. 本章首先参考实际应用的桁架结构, 建立了两个具有代表性的桁架模型结构: 架设式桁架和可展桁架. 在第 3 章所建立的有限元动力学方程的基础上, 分别进行了模态分析和结构对脉冲激励和周期激励的响应. 并对第 4 章中的五类桁架模型(统称为结构桁架)进行了动力学特性的对比分析.

第 6 章, 模糊控制相关基本概念和基本理论. 作为后续设计和推理的基础, 本章介绍在桁架模糊振动控制中将涉及的相关模糊控制理论的基本概念和基本理论.

第 7 章, 遗传算法的基本理论. 为了后续用遗传算法求解空间智能桁架作动器/传感器位置优化问题, 本章介绍遗传算法的基本概念、基本理论、基本算法.

第 8 章, 基于遗传算法的空间智能桁架设计. 基于压电本构方程, 通过推导拉格朗日方程建立了压电作动器动力学模型, 通过静刚度缩聚方法得到了压电主动杆动力学模型. 设计了两种传感器布置方案: 一种是采用力传感器, 与压电作动器布置于同一杆件; 另一种是在杆件表面粘贴压电膜 PVDF, 与作动器布置于不同杆件. 针对两种传感器及布置方案, 分别进行了建模. 在对压电主动杆及传感器建模的基础上建立起了整体空间智能桁架的作动方程和传感方程. 基于作动效率提出了压

电作动器位置优化准则; 基于模态位移提取精度提出了传感器位置优化准则. 基于提出的优化准则, 优化了作动器/传感器位置.

第 9 章, 压电智能桁架结构的模糊控制. 作动器采用压电陶瓷堆, 传感器采用力传感器, 布置于压电陶瓷堆的一侧, 即一个主动杆含有一组作动器/传感器, 整个智能桁架是一个多输入、多输出的复杂多自由度系统. 针对多输入多输出的杆结构振动控制系统, 首先设计了一标准的模糊控制器, 通过改变量化因子和比例因子将其分别应用到 6 对传感器和作动器上, 实质上是实现了结构的局部振动控制.

第 10 章, 智能桁架结构的自适应模糊振动控制. 首先分析了独立模态控制方法中剩余模态的作用机理, 建立了考虑剩余模态作用的控制方程, 然后基于滑模控制思想对自适应模糊控制器进行了改进, 并证明了改进后控制器的稳定性. 最后将改进的自适应模糊控制器应用到空间智能桁架的独立模态空间振动控制中, 并针对两种激励进行了振动控制仿真.

第 11 章, 桁架结构被动控制阻尼器原理. 本章介绍了黏弹性材料的古典阻尼模型和现代阻尼模型, 同时对一种较为常见的双夹层圆柱式 VED 进行了相关设计的探讨, 为空间桁架结构的被动控制奠定了理论基础.

第 12 章, 空间桁架结构被动控制设计. 本章将推导阻尼桁架结构的动力学方程, 并结合第 11 章的阻尼特性分析的结构, 以一桁架结构为例, 给出被动控制系统的设计和分析方法.

本书的研究工作是在国家自然科学基金项目“基于模糊逻辑的大型挠性航天结构振动控制研究”的资助下开展的, 特此表示感谢.

博士生蒋建平, 硕士生曾光、李洪发对本书作出了主要贡献. 研究室的其他老师和研究生也对本书中的研究工作提供了很多帮助和支持. 没有他们的辛勤劳动和无私奉献, 本书是无法完成的. 在此特向他们表示衷心的感谢.

本书是国内第一本研究航天器大型空间桁架结构动力学与振动控制的专著. 本书中的数学模型、数值分析、理论推导等成果, 显示了本书所提供的理论、方法与技术的合理性、有效性和可行性, 为航天器大型桁架结构的应用与发展提供了理论基础和技术参考.

由于时间和水平所限, 书中错误和不当之处在所难免, 欢迎读者批评指正, 以便我们在今后的研究道路上走得更好, 也为我国的航天事业作出更实际的贡献.

著 者

2007 年于北京

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 空间桁架结构简介 .....	1
1.1.1 有效载荷的桁架式结构 .....	1
1.1.2 支撑式桁架 .....	5
1.1.3 平台式桁架 .....	10
1.2 航天器空间桁架基本问题 .....	12
1.2.1 空间桁架的结构力学问题 .....	12
1.2.2 航天器空间桁架面临的特殊问题 .....	13
1.2.3 建模问题 .....	14
1.2.4 桁架结构的振动控制问题 .....	15
1.3 空间桁架结构的振动控制理论、方法与技术 .....	15
1.3.1 模糊控制理论研究 .....	16
1.3.2 挠性结构主动模糊振动控制研究 .....	17
1.3.3 智能杆原理 .....	18
1.3.4 空间桁架的振动控制技术 .....	19
1.4 本书梗概 .....	21

## 第一篇 航天器空间桁架力学性能分析

<b>第 2 章 空间桁架结构的构型及简化模型</b> .....	27
2.1 引言 .....	27
2.2 桁架的组装形式 .....	27
2.2.1 架设式桁架 .....	28
2.2.2 展开式桁架 .....	28
2.3 桁架结构特征分析 .....	29
2.3.1 结构组成 .....	29
2.3.2 截面构型 .....	31
2.3.3 空间桁架基本结构单元 .....	33
2.3.4 材料特点 .....	35

2.4	简化模型	35
2.4.1	一字形桁架	35
2.4.2	T 字形桁架	38
2.4.3	工字形桁架	39
<b>第 3 章</b>	<b>空间桁架的数学模型及基本力学方程</b>	<b>40</b>
3.1	引言	40
3.2	基本单元有限元模型	40
3.2.1	建模基础	40
3.2.2	杆单元模型	42
3.2.3	梁单元模型	44
3.2.4	弦单元模型	48
3.2.5	集中质量单元	48
3.3	大变形非线性有限元模型	49
3.3.1	非线性基本理论	49
3.3.2	空间杆系的非线性有限元模型	53
3.3.3	非线性问题示例	54
3.4	含作动器/传感器智能桁架结构模型	54
3.4.1	作动器建模	55
3.4.2	压电作动器机电耦合动力学建模	56
3.5	空间桁架整体力学模型	58
3.5.1	静力学方程	58
3.5.2	动力学基本方程	59
3.5.3	阻尼矩阵	60
3.5.4	特征方程与特征问题	60
3.5.5	结构系统的动力响应	61
<b>第 4 章</b>	<b>空间桁架静力学分析</b>	<b>64</b>
4.1	引言	64
4.2	材料参数	64
4.2.1	参考物理参数	64
4.2.2	空间桁架结构模型参数	65
4.3	一字形石墨环氧树脂三角形截面桁架静力学分析	66
4.3.1	三角桁架有限元模型	66
4.3.2	三角桁架物理参数	66
4.3.3	三角桁架仿真结果	68
4.3.4	三角桁架结果分析	70



4.4	一字形石墨环氧树脂正方形截面桁架静力学分析	70
4.4.1	方形桁架有限元模型	70
4.4.2	方形桁架物理参数	71
4.4.3	方形桁架仿真结果	71
4.4.4	方形桁架结果分析	73
4.5	一字形铝合金方形截面桁架静力学分析	73
4.6	T 字形铝合金方形截面桁架静力学分析	74
4.6.1	T 字形桁架有限元模型	74
4.6.2	T 字形桁架物理参数	74
4.6.3	T 字形桁架仿真结果	74
4.6.4	T 字形桁架结果分析	77
4.7	工字形铝合金方形截面桁架静力学分析	78
4.7.1	载荷设计	78
4.7.2	工字形桁架计算结果	78
4.7.3	工字形桁架结果分析	79
4.8	小结	80
<b>第 5 章</b>	<b>空间桁架结构动力学特性分析</b>	<b>81</b>
5.1	引言	81
5.2	直梁架设式桁架动力学分析	81
5.2.1	架设式桁架分析模型	81
5.2.2	架设式桁架参数设计	81
5.2.3	架设式桁架单元划分	82
5.2.4	架设式桁架模态计算	82
5.2.5	架设式桁架动态响应	83
5.2.6	架设式桁架动力学特性分析	83
5.3	直梁式可展桁架动力学仿真	84
5.3.1	展开桁架分析模型	84
5.3.2	展开桁架参数设计	85
5.3.3	展开桁架单元划分	85
5.3.4	展开桁架模态分析	85
5.4	结构桁架的模态分析	86
5.4.1	结构桁架的频率	86
5.4.2	结构桁架的振型	87
5.4.3	结构桁架模态特性分析	90
5.5	结构桁架的谐激励响应	91

5.5.1	谐响应结果	91
5.5.2	谐响应分析	91
5.6	结构桁架的瞬态响应	93
5.6.1	瞬态响应结果	93
5.6.2	瞬态响应分析	93
5.7	小结	95

## 第二篇 空间桁架结构的主动模糊控制

第 6 章	模糊控制相关基本概念和基本理论	99
6.1	引言	99
6.2	模糊集合的基本理论	99
6.2.1	经典集合的定义和性质	99
6.2.2	模糊集合的概念	100
6.3	隶属度函数的确定	102
6.4	模糊集合的基本定理	103
6.4.1	模糊集合的分解定理	103
6.4.2	模糊集合的扩展定理	103
6.5	模糊关系及模糊变换	104
6.5.1	模糊关系及运算	104
6.5.2	模糊矩阵	104
6.5.3	模糊关系的合成运算	105
6.5.4	模糊线性变换	106
6.6	模糊控制系统的基本结构及控制原理	106
6.6.1	一般模糊控制系统的基本结构	106
6.6.2	一般模糊控制系统的工作原理	107
6.6.3	一般模糊控制器的基本结构	108
6.7	自适应模糊控制	108
6.7.1	自适应模糊控制系统	108
6.7.2	自适应模糊控制器	109
第 7 章	遗传算法的基本理论	111
7.1	引言	111
7.2	遗传算法的特点	111
7.3	遗传算法的基本操作	112
7.4	遗传算法的实现	113

7.4.1	遗传算法实现的过程	113
7.4.2	遗传算法实现的方法	114
7.5	遗传算法的模式定理	118
7.5.1	模式的概念	118
7.5.2	模式定理	118
7.6	遗传算法的收敛性	118
7.6.1	Markov 链	118
7.6.2	收敛性定理	119
<b>第 8 章</b>	<b>基于遗传算法的空间智能桁架设计</b>	<b>120</b>
8.1	引言	120
8.2	作动器机电模型	121
8.2.1	压电陶瓷堆作动原理与压电作动器设计	121
8.2.2	压电作动器机电耦合动力学建模	123
8.2.3	压电主动杆机电耦合动力学模型	126
8.3	传感器机电模型	128
8.3.1	压电陶瓷堆力传感器建模	128
8.3.2	压电薄膜 PVDF 传感器建模	129
8.3.3	空间智能桁架作动/传感方程	129
8.4	作动器/传感器位置优化	130
8.4.1	空间智能桁架独立模态空间模型	130
8.4.2	作动器位置优化准则	132
8.4.3	传感器位置优化准则	132
8.5	用遗传算法优化作动器/传感器位置	133
8.5.1	遗传算法的基本操作	133
8.5.2	作动器/传感器位置优化设计	135
8.6	小结	139
<b>第 9 章</b>	<b>压电智能桁架结构的模糊控制</b>	<b>141</b>
9.1	引言	141
9.2	模糊控制器设计	141
9.2.1	控制策略	141
9.2.2	模糊控制器输入变量选择	141
9.2.3	标准二维模糊控制器设计	142
9.3	智能桁架主动模糊振动控制系统设计	145
9.3.1	控制系统组成	145
9.3.2	控制子系统工作流程	146

9.3.3	误差、误差变化量化因子及比例因子的选择	147
9.4	智能桁架模糊控制仿真分析	147
9.4.1	数学模型	147
9.4.2	仿真任务设计	148
9.4.3	瞬态激励响应	150
9.4.4	周期激励响应	154
9.5	小结	155
<b>第 10 章</b>	<b>智能桁架结构的自适应模糊振动控制</b>	<b>156</b>
10.1	引言	156
10.2	自适应模糊控制器的设计	156
10.2.1	论域归一化	156
10.2.2	控制规则改进	157
10.2.3	控制量的确定	159
10.2.4	自适应模糊控制器	159
10.3	自适应模糊控制器的改进	161
10.3.1	传统自适应模糊控制器不足及改进措施	161
10.3.2	自适应律设计及系统稳定性证明	162
10.3.3	修改控制规则上下限设定	164
10.4	空间智能桁架独立模态空间振动控制	164
10.4.1	独立模态空间控制系统	164
10.4.2	基于自适应模糊控制的振动控制系统设计	167
10.5	普通模糊控制器、传统自适应模糊控制器、改进的自适应模糊控制器性能对比	167
10.5.1	理想输出条件下 Duffing 强迫振荡	167
10.5.2	周期性方波输出条件下 Duffing 强迫振荡	169
10.5.3	普通二阶系统控制器性能对比	171
10.6	基于自适应模糊控制器的空间智能桁架振动控制仿真	173
10.6.1	研究对象	173
10.6.2	智能桁架结构模态分析	174
10.6.3	振动控制仿真任务设计	175
10.6.4	瞬态激励响应	175
10.6.5	周期激励响应	176

10.7 小结 .....	178
---------------	-----

### 第三篇 空间桁架结构的被动控制

<b>第 11 章 桁架结构被动控制阻尼器原理</b> .....	183
11.1 引言 .....	183
11.2 黏弹性材料阻尼模型 .....	183
11.2.1 黏弹性材料特性 .....	183
11.2.2 古典阻尼模型 .....	184
11.2.3 现代阻尼模型 .....	186
11.3 圆柱式 VED .....	187
11.3.1 简化力学模型 .....	187
11.3.2 绝对值模态应变能法 (AVMSE) .....	189
11.3.3 VED 最佳位置选择 .....	191
11.4 小结 .....	191
<b>第 12 章 空间桁架结构被动控制设计</b> .....	193
12.1 引言 .....	193
12.2 约束阻尼结构模型 .....	193
12.2.1 黏弹性结构动力学方程 .....	193
12.2.2 分层单元 .....	194
12.2.3 整体单元 .....	194
12.3 空心圆形截面杆附加约束阻尼层振动分析 .....	196
12.3.1 空心圆形截面杆附加约束阻尼层概述 .....	196
12.3.2 黏弹材料的能量变分 .....	196
12.3.3 附加约束阻尼层的空心圆形截面杆运动微分方程 .....	198
12.4 阻尼被动控制仿真 .....	200
12.4.1 VED 阻尼杆设计 .....	200
12.4.2 仿真系统设计 .....	201
12.4.3 被动阻尼桁架的模态分析 .....	201
12.4.4 被动阻尼桁架共振区减振效果分析 .....	202
12.4.5 被动阻尼桁架脉冲响应分析 .....	203
12.5 小结 .....	204
<b>参考文献</b> .....	205

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 空间桁架结构简介

这里所说的空间桁架结构是指在各类航天器中采用的桁架结构。

目前,国内外卫星、深空探测器、空间站等大型航天器都向轻型化方向发展,轻型化的首攻目标是航天器的结构。中国航天器的主承力结构主要采用中心承力筒,而国外航天器的主承力结构已有很多采用了桁架结构。桁架结构具有以下优点:质量轻、工艺性好、灵活、易拆装,且可根据需要进行结构调节。因此,桁架结构将具有更广阔的发展空间。

实际航天结构中的桁架结构,主要应用目的有两个:一是用于电子设备的分离来减少相互间的干扰;二是用来支撑其他结构。前者一般在桁架顶端连接电子设备,如 SRTM(space radar topography mission) 采用了一个 60 m 长的可展开桁架<sup>[1]</sup>,和平号空间站同样也采用了可展开桁架来分离其天线结构以及舱外展开天线。后者桁架主要起支撑作用,主要支撑对象包括柔性太阳帆板、大型天线结构等。其典型代表是国际空间站,它采用巨大主桁架结构作为骨架,各种舱段、设备等都挂接在桁架上。除了主桁架,国际空间站也采用了可展开桁架来展开和支撑巨大的太阳帆板。

空间桁架结构按其组装方式可分两种:架设式结构和展开式结构。架设式桁架上天前是被分解开的,上天后通过航天员在太空进行舱外作业架设而成。展开式结构的典型代表是可展铰接桁架,与以往的伸展结构相比,它具有更高的刚度、结构效率、形状精度等。SRTM 上应用的和国际空间站支撑太阳帆板的桁架均为可展铰接桁架。

随着航天事业的发展,越来越多的桁架结构得到应用。有的桁架本身就是有效载荷的一种结构形式,如天线;有的是有效载荷的承载结构或支撑结构,如 SAR 天线、磁探测器;有的用于航天器的平台,如国际空间站<sup>[2]</sup>。下面将分类介绍空间桁架的主要应用情况。

### 1.1.1 有效载荷的桁架式结构

#### 1) 构架式抛物面天线

构架式天线是可折叠的桁架,桁架的杆件中间设有铰链,桁架能折叠起来,并利用弹簧机构将天线展开。天线的骨架是由一些基本的结构单元——四面体组成,每个单元包含六个杆件,其中三根是可折叠的,杆的中间有铰链和弹簧,折叠后的

尺寸和展开后的尺寸比为 1:10, 收纳率高, 同时具有较高的展开刚度和结构稳定性, 但是成本高、质量大是其应用中遇到的主要困难. 这种桁架式天线的里程碑是日本的工程实验卫星 ETS-VIII 的 13 m 口径反射器 (图 1.1).

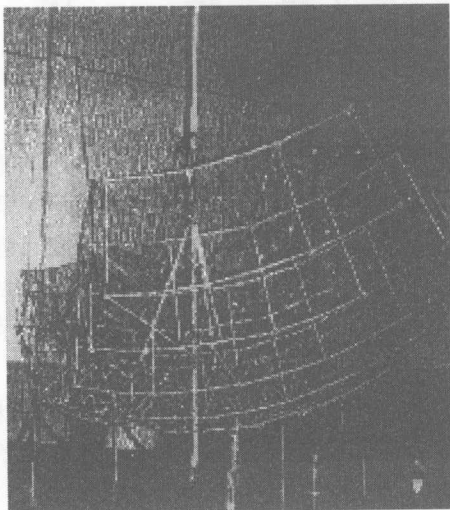


图 1.1 日本的工程实验卫星 ETS-VIII 的 13 m 口径反射器

## 2) 环形桁架可展开天线

环形桁架可展开天线的结构由四个部分组成: 可展开环形桁架、金属反射面和柔性张力索网、张力弹簧阵以及动力展开机构. 其中可展开环形桁架是由  $n$  个结构完全相同的平行四边形单元组成, 这些单元通过固定夹角  $360^\circ/n$  的铰链相连接成为一个封闭的多边形环, 其完成收放运动的原理利用了平行四边形对角可伸缩的结构特点. 环形桁架可展开结构与其他结构形式相比, 具有应用空间大、结构形式简明的特点. 其天线口径可用于 6~150 m 的范围, 在一定范围内口径增大不改变结构形式, 质量不成比例增加, 是目前大型卫星天线较为理想的结构形式. 环形桁架可展开天线最早出现于 ASTRO 公司为北美移动通信卫星 MSAT 研制的口径 6 m 的天线. 另外, 休斯公司为中东建立的移动通信系统中的两颗通信卫星 (Thuraya-1、Thuraya-2) 所采用的 12.25 m 口径的天线以及美国信号情报卫星上 150 m 口径的天线都采用了环形桁架可展开的结构形式 (图 1.2).

## 3) T 形桁架式天线

2005 年 8 月 12 日 19 时 43 分美国宇航局新型探测器“火星勘测轨道飞行器”从肯尼迪航天中心发射升空.

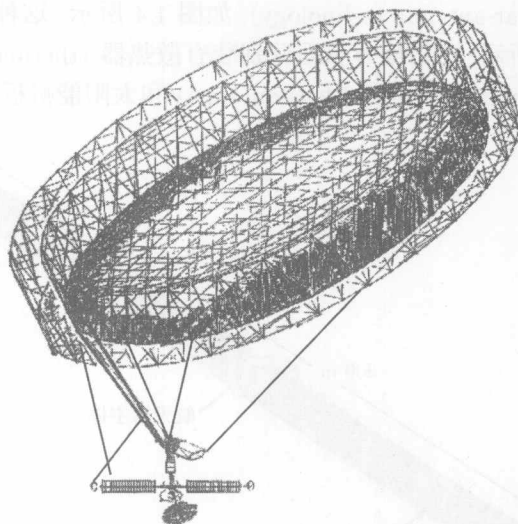


图 1.2 美国信息情报卫星结构示意图

在经过了 7 个月的太空飞行后,“火星勘测轨道飞行器”(MRO)于 2006 年 3 月 10 日进入火星轨道.从图 1.3 中可见该飞行器带有一 T 字形桁架式天线结构.

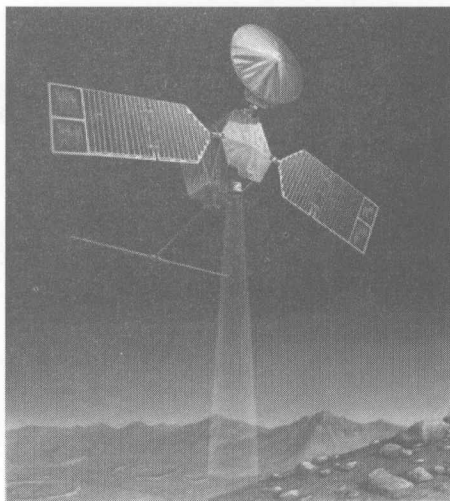


图 1.3 火星勘测轨道飞行器

#### 4) 膨胀式相控阵雷达天线

LRC 公司和喷气推进实验室 (JPL) 正在研究一种膨胀刚化桁架结构,用于美国国防先进研究计划局发起的具有创新性意义的天基雷达天线技术——ISAT(innova-



tive space-based radar antenna technology), 如图 1.4 所示. 这种充气膨胀桁架结构的横截面如图 1.5 所示, 在桁架外表面分别装有散热器 (thermal radiator)、电子扫描镜头天线 (electronically scanned lens antenna) 和太阳能帆板 (solar array)<sup>[3]</sup>.

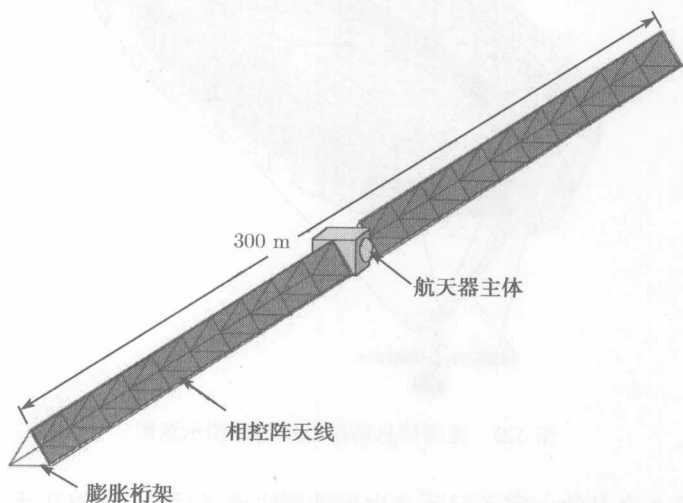


图 1.4 膨胀式展开桁架构成的相控阵雷达天线

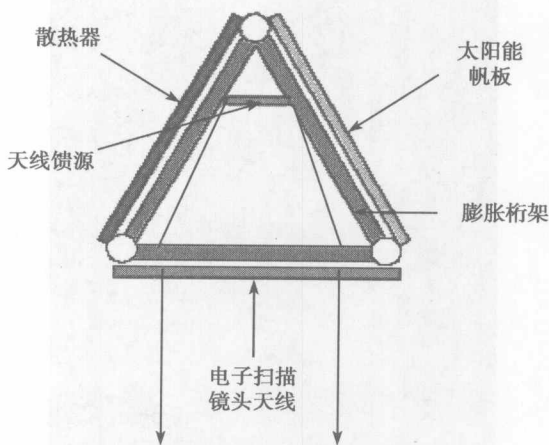


图 1.5 充气膨胀式桁架的横截面

### 5) 低频天线

美国空军研究实验室发起了一项名为可展开结构实验 (deployable structures experiment, DSX) 的计划<sup>[4]</sup>. 该计划主要有五个方面的研究内容: 大型可展开空间