- 国家“十一五”出版规划重点图书
- 空间飞行器设计专业系列教材
- 航天一线专家学术专著

航天器热控制技术

——原理及其应用

侯增祺　胡金刚　编著

中国科学技术出版社
·北　京·

图书在版编目(CIP)数据

航天器热控制技术——原理及其应用/侯增祺,胡金刚编著.
—北京:中国科学技术出版社,2007.1
(空间飞行器设计专业系列教材)
ISBN 978-7-5046-4501-2

Ⅰ.航… Ⅱ.①侯…②胡 Ⅲ.航天器-热控制-高等学校—教材 Ⅳ.V448.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 128792 号

自 2006 年 4 月起本社图书封面均贴有防伪标志,未贴防伪标志的为盗版图书。

中国科学技术出版社出版
北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081
电话:010—62103208 传真:010—62183872
http://www.kjpbooks.com.cn
科学普及出版社发行部发行
北京长宁印刷有限公司

*

开本:787 毫米×960 毫米 1/16 印张:31.25 字数:550 千字
2007 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 2 次印刷
印数:1501—3000 册 定价:48.00 元

(凡购买本社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

内 容 提 要

本书较全面地讲述了航天器热控制技术的基本原理、设计、分析和试验方法以及工程应用，也涉及载人航天器热控制的有关问题。

全书分为 10 章，第 1 章为概论，简要介绍航天器的类型、热控需求及任务。第 2 章和第 3 章重点讲述了与航天器热控制技术相关的传热学的基础知识及空间环境。第 4 章到第 6 章较详细地讲述了航天器热控技术，包括被动、主动热控制及其典型热控硬件产品。第 7 章主要涉及航天器的空间外热流计算、热数学模型及其修正方法。第 8 章为热控系统设计方法和典型设计案例。第 9 章专门讲述了航天器地面热模拟试验技术。第 10 章介绍了航天器热控制的新技术和发展方向。

作 者 简 介

侯增祺　1936 年生，研究员，博导，1959 年毕业于上海交通大学船舶动力系，之后从事过力学研究工作。自 1964 年起至今，致力于航天器热控制技术的研究和设计工作，还对热管技术进行了专门研究。

胡金刚　1941 年生，研究员，1964 年毕业于中国科学技术大学力学系工程热物理专业。1965 年起至今从事航天器热分析、热设计和热模拟试验技术的研究和开发等工作。

责任编辑　崔　玲
封面设计　莱　瑞
责任校对　林　华
责任印制　王　沛

总　　序

我国航天技术走过了40多年的光荣历程，正面临着21世纪更加蓬勃发展的形势，需要人才，需要知识。

空间飞行器即航天器，包括卫星、飞船、空间站、深空探测器等等。空间飞行器设计专业是航天技术领域的一门主要学科，它所涵盖的知识面很宽，涉及光、机、电、热和系统工程等，是一门多学科交叉综合和工程性很强的新型学科。

本丛书是根据空间飞行器设计专业培养研究生的课程教学需求，同时考虑到空间技术领域的在职中、高级技术人员研究生水平进修的需要而编写的。因此，本丛书全面讲授空间飞行器设计专业领域的基础理论和系统的专门知识，在内容上具有足够的纵深度和宽广度、前沿性和前瞻性。

本丛书的作者都是从事了几十年航天工程的高级设计师和研究员，他们把自己丰富的知识和经验很好地融入这套丛书中，理论与实践密切结合，使本丛书具有很高的学术水平和工程实用价值。

本丛书将陆续出版，它的出版是非常值得祝贺的。相信它不仅是一套不错的研究生教材，能够为培养高级航天技术人才服务；同时又是一套优秀的学术专著，将对我国航天科学与技术的发展作出贡献。



2001年9月

前　言

航天器热控制是随着航天技术发展起来的一门多学科综合的新技术，是航天器必不可少的技术保障系统之一。它涉及热学、材料学、计算数学、流体力学、电子学、计算机科学以及试验测量技术等诸多学科领域。近二十多年来，航天器热控制技术取得了长足的进步，适应了航天事业的发展需求。

本书内容着重讲述航天器热控制技术的基本原理、设计、分析和试验方法，同时也吸纳了热控技术的最新技术进展和应用成果。本书内容的安排力求系统、完整和实用，阐述的原理和概念清晰，方法准确。本书在编写过程中，除广泛吸收专业书籍和参考资料的相关内容外，还得到了多位航天热控专家的支持，他们提供的技术资料极大地充实和丰富了本书的内容。本书的出版还得到中国空间技术研究院的有关领导和同事们的支持和帮助，在此一并致以衷心的感谢。

本书为中国空间技术研究院航天器热控制专业研究生教材，亦可作为从事航天器热控制技术研究、设计、生产、试验和应用的工程技术人员参考书。

由于编者的专业技术水平有限，书中难免存在错误和不足，欢迎读者批评指正。

作　者

2006 年 9 月

目　　录

第 1 章　绪　论 …… 1

1.1　**航天器概述** …… 1

1.1.1　**航天器分类** …… 1

1.1.2　**航天器轨道** …… 4

1.2　**航天器热控制系统的需求分析** …… 7

1.2.1　**常温(室温)要求** …… 7

1.2.2　**低温要求** …… 8

1.2.3　**恒温要求** …… 8

1.2.4　**温度均匀性要求** …… 8

1.3　**航天器热控制系统的任务** …… 9

1.3.1　**热控制任务各个阶段** …… 9

1.3.2　**热控设计师的任务** …… 10

第 2 章　航天器传热学理论基础 …… 12

2.1　**热传导** …… 13

2.1.1　**温度场和温度梯度** …… 13

2.1.2　**导热微分方程式** …… 14

2.1.3　**导热过程的单值性条件** …… 16

2.1.4　**具有内热源的一维稳态导热** …… 18

2.1.5　**非稳态导热** …… 20

2.1.6　**导热问题的数值解法** …… 27

2.2　**热辐射** …… 33

2.2.1　**热辐射相关概念** …… 33

2.2.2　**热辐射能量表示方法** …… 35

2.2.3　**黑体辐射基本规律** …… 37

2.3.4　**非黑体辐射与基尔霍夫定律** …… 42

2.2.5　**角系数** …… 49

2.2.6　**表面间的辐射换热计算** …… 55

2.2.7　**包壳内具有镜射表面的辐射换热** …… 64

2.3　**对流换热** …… 72

2.3.1 对流换热及影响因素 …… 72
2.3.2 对流换热微分方程组 …… 74
2.3.3 相似原理及其在对流换热问题中的应用 …… 80
2.3.4 单相强迫对流换热 …… 84
2.3.5 自然对流换热 …… 92
第 3 章 空间环境 …… 100
3.1 地球轨道的空间热环境 …… 100
3.1.1 大气层 …… 100
3.1.2 自由分子加热和大气阻力 …… 101
3.1.3 真空和低温 …… 102
3.1.4 太阳辐射 …… 103
3.1.5 地球反照 …… 108
3.1.6 地球红外辐射 …… 110
3.1.7 近地空间的粒子辐射 …… 111
3.1.8 原子氧 …… 113
3.2 地球轨道上的空间外热流 …… 113
3.2.1 太阳直接辐射 …… 114
3.2.2 地球反照外热流 …… 114
3.2.3 地球红外辐射热流 …… 115
3.3 月球和行星的空间热环境 …… 115
3.3.1 热环境 …… 115
3.3.2 水星的热环境 …… 117
3.3.3 金星的热环境 …… 118
3.3.4 月球的热环境 …… 119
3.3.5 火星的热环境 …… 120
3.3.6 外行星的热环境 …… 122
3.4 发射和上升段的热环境 …… 123
3.5 航天器热平衡基本原理 …… 125
第 4 章 航天器被动热控技术 …… 129
4.1 热控涂层 …… 129
4.1.1 热控涂层的作用 …… 129
4.1.2 热控涂层的分类 …… 131

4.1.3 热控涂层的使用原则 …… 138
4.1.4 热控涂层研发的几个问题 …… 140
4.2 多层隔热组件 …… 145
4.2.1 概述 …… 145
4.2.2 多层隔热的基本原理 …… 146
4.2.3 多层隔热组件构成及影响分析 …… 151
4.3 热管 …… 158
4.3.1 热管基本工作原理 …… 158
4.3.2 工质的流动和最大传热能力 …… 161
4.3.3 热管设计和选用中主要考虑的因素 …… 171
4.3.4 热管在航天器上的应用举例 …… 173
4.4 相变材料热控 …… 177
4.4.1 相变材料热控工作原理 …… 177
4.4.2 相变材料热控系统的热分析 …… 178
4.4.3 相变材料的性质 …… 182
4.4.4 相变材料热控装置在航天器上的应用举例 …… 185
4.4.5 相变材料热控装置设计 …… 188
4.5 安装界面热阻 …… 188
4.5.1 接触热阻的定义 …… 189
4.5.2 固体接触界面的热阻 …… 190
4.5.3 影响接触热阻的因素 …… 197
4.5.4 扩热板 …… 199
第 5 章 航天器主动热控制技术 …… 202
5.1 辐射式主动热控方法 …… 203
5.1.1 热控百叶窗 …… 203
5.1.2 热控旋转盘 …… 213
5.2 导热式主动热控制方法 …… 215
5.2.1 接触式热开关 …… 215
5.2.2 低温热开关 …… 221
5.2.3 可变热导热管 …… 223
5.2.4 热二极管 …… 234
5.3 对流式主动热控制方法 …… 236
5.3.1 气体循环对流热控系统 …… 236

5.3.2 液体循环热控制系统 …… 242
5.3.3 两相流体回路热控制系统 …… 253
5.4 电加热主动热控方法 …… 273
5.4.1 电加热控制技术 …… 273
5.4.2 电加热主动热控制的应用 …… 276
5.5 航天器低温制冷方法 …… 277
5.5.1 辐射式制冷器 …… 279
5.5.2 热电制冷器 …… 281
5.5.3 储存式(液体或固体)深冷系统 …… 285
5.5.4 机械式制冷机 …… 290
5.5.5 深冷传输系统 …… 291
第 6 章 空间热辐射器 …… 294
6.1 被动结构辐射器 …… 294
6.2 热管辐射器 …… 296
6.2.1 热管辐射器的热分析计算 …… 296
6.2.2 热管辐射器的优化设计 …… 298
6.2.3 正交热管网络辐射器 …… 299
6.3 体装式辐射器 …… 301
6.3.1 扁平导管流体循环辐射器的热分析 …… 301
6.3.2 管道—肋片式流体循环辐射器的热分析 …… 306
6.4 可展开式辐射器 …… 307
6.4.1 泵驱动单相流体回路的展开辐射器 …… 307
6.4.2 回路热管(LHP)展开辐射器 …… 309
6.5 新型辐射器及热泵 …… 314
6.5.1 柔性辐射器 …… 314
6.5.2 液滴式辐射器 …… 315
6.5.3 热泵—辐射器热排散系统 …… 316
6.6 辐射器排热系统的设计考虑 …… 318
6.6.1 辐射器排热系统的选择 …… 318
6.6.2 辐射器热排散系统中的热耦合问题 …… 319
第 7 章 航天器热分析计算 …… 325
7.1 概 述 …… 325

7.2 航天器在宇宙空间的热平衡 …… 326
7.3 轨道参数计算 …… 329
7.3.1 坐标系 …… 329
7.3.2 轨道六根数 …… 330
7.3.3 轨道参数计算 …… 332
7.3.4 几种典型轨道简介 …… 338
7.4 轨道空间辐射外热流计算 …… 340
7.4.1 太阳直接辐射 …… 340
7.4.2 地球反照热流 …… 343
7.4.3 地球红外辐射热流 …… 344
7.4.4 地球反照角系数的近似计算 …… 346
7.4.5 外热流角系数的周期平均值 …… 346
7.5 航天器温度计算 …… 347
7.5.1 热网络模型的数学描述 …… 347
7.5.2 热分析模型的建模依据、简化条件和节点划分 …… 351
7.5.3 常用热分析软件简介 …… 354
7.6 热网络的修正 …… 358
7.6.1 引起热网络模型计算结果误差的原因 …… 358
7.6.2 热网络模型和系数修正 …… 359
7.6.3 热网络综合辐射系数修正方法 …… 360
7.7 航天器内部温度简化计算 …… 362
7.7.1 轨道周期积分平均热流法 …… 362
7.7.2 计算举例 …… 364
第 8 章 航天器热控制系统设计 …… 368
8.1 热控制系统设计 …… 368
8.1.1 热控制系统的设计要求 …… 368
8.1.2 热控制系统设计的基本原则 …… 370
8.1.3 热控系统设计的主要阶段 …… 372
8.2 典型部件热设计 …… 378
8.2.1 卫星推进系统热设计 …… 378
8.2.2 蓄电池热控制 …… 381
8.2.3 天线热设计 …… 383
8.2.4 太阳电池阵热设计 …… 384

8.3 电子设备的热设计 …… 385
8.3.1 电子设备热设计的目的 …… 385
8.3.2 电子设备热设计与热控系统的关系 …… 385
8.3.3 电子设备热设计的特点 …… 386
8.3.4 电子设备的热设计 …… 386
8.3.5 电子设备热分析技术简介 …… 392
8.4 光、机、热一体化设计方法 …… 402
8.4.1 光、机、热一体化设计的基本框图 …… 402
8.4.2 空间太阳望远镜主镜的光、机、热集成设计实例 …… 404
8.5 航天器热控制系统设计实例 …… 411
8.5.1 主要设计输入参数 …… 411
8.5.2 热设计简介 …… 412
8.5.3 热设计方案简介 …… 413
第 9 章 航天器地面热模拟试验 …… 419
9.1 空间热环境模拟设备及其影响分析 …… 419
9.1.1 真空模拟 …… 420
9.1.2 低温和黑背景模拟 …… 421
9.1.3 空间外热流模拟 …… 423
9.2 外热流模拟方法及其装置 …… 424
9.2.1 太阳灯热流模拟技术 …… 425
9.2.2 非太阳灯热流模拟技术 …… 430
9.3 模拟外热流测量 …… 439
9.4 航天器热平衡试验方法 …… 443
9.4.1 试验模型 …… 443
9.4.2 试验工况的确定 …… 444
9.4.3 试验过程和方法 …… 445
9.5 航天器不稳定试验方法 …… 449
9.5.1 比差法 …… 449
9.5.2 近似推算法 …… 451
9.6 航天器热平衡试验与数学模型修正关联问题 …… 453
9.7 充气密封舱热平衡试验 …… 455
9.8 其他热试验简介 …… 457
9.8.1 上升段热试验 …… 457

9.8.2 地面调温试验 …… 459
第 10 章 航天器热控制技术的新发展 …… 461
10.1 推动热控技术发展的需求 …… 461
10.2 航天器热控新材料 …… 462
10.2.1 变色涂层 …… 462
10.2.2 高导热率材料 …… 463
10.3 高热流密度散热技术 …… 464
10.3.1 喷射冷却 …… 464
10.3.2 微槽道循环流体冷却 …… 465
10.4 深冷系统传输技术 …… 466
10.5 微小卫星通用化热控系统新概念 …… 468
10.6 大型航天器的热管理概述 …… 469
10.6.1 热管理基本概念 …… 469
10.6.2 国际空间站热管理和热控系统简介 …… 470
10.7 精密温度控制技术 …… 473

第 5 章　航天器主动热控制技术

航天器在轨道上运行时，受到的空间热流变化很大，再考虑到寿命初期和寿命末期航天器表面的涂层性能的退化，其接受的空间热流变化更大；加之航天器的仪器设备因工作模式不同，如果发热量的变化也大，这时，仅采用被动热控制的方法，无法将仪器设备的温度控制在所要求的范围内。另外，随着航天技术的发展，有些精密设备要求将工作温度控制在较小的范围内，甚至近于恒温。因此，在有些情况下，必须采用控制能力更高的主动热控制方法。所谓主动热控制方法，是在变化的内、外热环境下，利用某种自动控制系统，自动地调节各种相关传热参数，使航天器的仪器设备工作温度保持在规定的范围内。

航天器热控系统经常采用以被动热控为主和主动热控为辅的设计方案。实际上，这是被动热控加上主动电加热的方法，设计中，使在极端高温条件下，各温度不超过允许的最高值（考虑不确定余量），在低温条件下，采用电加热补偿的方法，保持温度高于最低限。因此，主动电加热控制技术在航天器热控制系统中被普遍应用，本章也将做介绍。由于电加热需要消耗航天器上的宝贵资源（电能），因此，研究各种不同的主动热控技术，适应不同航天器热控制系统的需要，是航天器热控工程师的重要任务之一。

一般而言，航天器外表面与空间是辐射换热，而航天器内部的换热形式可以有三种方式：辐射、导热和对流。主动热控技术与被动热控相比，其特点就是能根据温度的要求主动改变这些换热的特性参数，如被动热控的某种涂层其热特性 α_s 和 ε 是不能改变的，但主动热控技术，可以采用某种方法，根据温度变化可在一定范围内调节这些参数。本章将对辐射、导热和对流三种类型的主动热控技术进行详细介绍。

随着航天器对地和空间探测发展的需要，为提高探测器的精度需要降低背景的热噪声，航天器上的深低温制冷技术愈来愈重要。这是一项十分专门的技术，本章将简要介绍各种低温制冷的原理和方法。

5.1　辐射式主动热控方法

对于某个灰表面 i 的净辐射热损失，可用第 2 章的净热量法表示为：

$$Q_i=\frac{\sigma T_i^4-J_i}{(1-\varepsilon_i)/\varepsilon_i F_i} \tag{5-1}$$

式中

$$J_i=\varepsilon_i E_{bi}+\rho_i H_i$$

$$H_i=\sum_j \phi_{ij} J_j$$

J_j 表示离开其他各种辐射面 j 的总辐射，H_i 代表各种辐射面发出并到达 i 表面的总辐射热流，而 Φ_{ij} 为 i 对 j 的角系数。因此，除了灰表面 i 和 j 的温度外，灰表面 i 的净辐射热损失与其表面的面积 F_i、发射率 ε_i 和角系数 ϕ_{ij} 等参数有关。辐射式主动热控方法就是采用某些技术使之自动的调节这些辐射参数，以控制辐射散热量来达到控制温度的目的。下面将介绍热控百叶窗和热控旋转盘这两种调节当量发射率的主动热控制机构。

5.1.1　热控百叶窗

在无阳光区，热控百叶窗是一种利用低发射率的可转动叶片不同程度地遮挡高发射率的散热底板的方法，用调节散热面的组合发射率来控制温度的装置。其原理如图 5－1 所示，工作原理为：当仪器及其底板温度降低到某个设计温度，叶片自动转到关闭状态，即低发射率的叶片把散热面全部遮挡，此时散热面的组合发射率很低，使散热量降到最小，从而保持散热面及其仪器设备的温

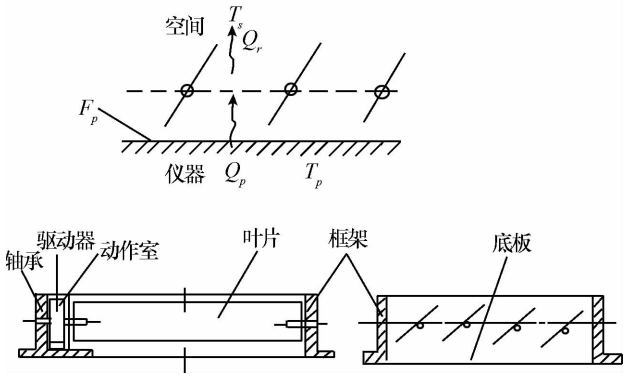


图 5－1　百叶窗原理及结构简图

度在设计值。相反，温度高到某个值时，叶片自动打开到最大的垂直位置，此时散热面的组合发射率达到最大，可有效地排散热量，从而保证仪器设备的温度。

如百叶窗处于有阳光的区域，百叶窗的结构和工作原理基本相同，但其热性能参数较为复杂，因为还要涉及组合的太阳吸收率问题，这与太阳方位角、涂层等因素有关，将在下面讨论。

注意，上面介绍中用组合发射率和组合的太阳吸收率来说明百叶窗系统组合后的热辐射特性，在以下的讨论中将改用当量发射率 ε_{eq} 和当量吸收率 α_{eq} 进行说明。其意思是：假设百叶窗系统的组合热辐射性能用在一个去掉百叶窗机构的散热面（底板）上的当量热辐射性能代替。即在进行换热计算中，百叶窗被假想成辐射特性随温度可变的一个散热面。

5.1.1.1　百叶窗系统的构成

百叶窗系统一般由叶片、驱动器、轴和轴承、动作室、底板和框架组成，典型的百叶窗如图 5－2 所示。现将各部件分别介绍如下。

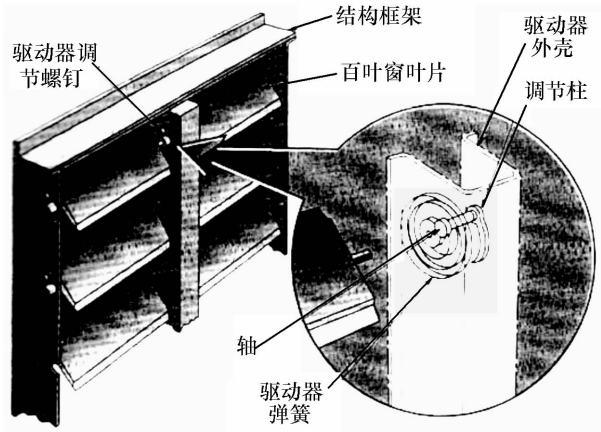


图 5－2　典型的热控百叶窗

(1)叶片。叶片是百叶窗系统中调节当量发射率的主要元件。为使系统的调节能力达到最高，在非阳光区，在全关时的当量发射率尽量低，所以，叶片的发射率要尽可能低，如采用表面镀金抛光其发射率可到 0.02～0.03。为使动作灵敏，叶片应轻而薄，但又要有较好的强度和刚度，以满足力学环境条件的要求，常用高强度的铝合金薄片或铍合金制成。叶片的长宽比还应考虑其振动频率问题。

(2)驱动器。驱动器是使叶片按设定温度—角度而转动的装置，是百叶窗

系统的重要部件。基本上有两类：一类为无源主动的驱动器，它不需消耗能源，在温度变化时可产生旋转或位移，通过相应的机构来驱动叶片转动；另一类为有源的反馈控制系统，这是用温度敏感器传递温度信号，通过电子控制线路控制驱动机构将叶片转动到一定的角度。它需要消耗一定的电能，系统较复杂，但能较精确地控制温度。以下分别介绍这两类部件。

(*a*)无源主动驱动

双金属螺旋弹簧　如图 5－2 所示的弹簧是用双金属片绕制而成的，双金属片是由两种线膨胀系数差别很大的金属片压合而成的，当温度变化时，由于两层金属的膨胀不同而产生弯曲，如将带状的双金属片绕成螺旋弹簧，一端固定在底板上，另一端与叶片轴相连，则在温度变化时，双金属螺旋弹簧产生转动，带动叶片旋转。由上述原理可知，产生一定量的变形需要一定的温度变化量，对于一端固定的双金属螺旋弹簧，另一端自由转动的角度可用如下公式计算

$$\theta = \frac{360 k_t L}{\pi \delta} \Delta T \tag{5-2}$$

式中，δ 为双金属片厚度(mm)，k_t 为双金属片比弯曲率($1/^{\circ}C$)，L 为双金属片长度(mm)。

热推力矩 M 可由下式计算：

$$M = \frac{k_t E_0 b \delta^2}{6} \Delta T \tag{5-3}$$

式中，E_0 为弹性模量(N/mm^2)，b 为双金属片宽度(mm)。

一般情况下，此种驱动器转动叶片从全关到全开 90°角大约需要 10～15°C 左右的温度变化，也就是说，双金属螺旋弹簧为驱动器的百叶窗系统在辐射散热能力变化若干倍的情况下，可将仪器散热底板温度的变化控制在10～15°C左右的范围内。如何使驱动器直接感受散热底板温度，并使两者温度尽量一致，是设计中应注意的问题。需要进行精细的热设计和热分析，驱动器与底板之间的换热是以导热和辐射进行的，如尽量加强与底板的导热连接，同时，应合理设计与动作室的辐射换热。双金属螺旋弹簧驱动器具有较高的可靠性，结构简单，使用方便，应用较为广泛。在实际应用中，一个驱动器常带动一个叶片或如图 5－2 那样将其放在中间带动两侧的两个叶片。

金属波纹管型驱动机构　这是一种在弹性元件－金属波纹管内充装一定量的液态介质，使其内部处于气液两相的饱和状态，当温度变化时，波纹管内的饱和压力相应改变，使弹性波纹管轴向发生位移，推动与波纹管组装在一起的齿条－齿轮机构，驱动叶片旋转。这样，一个波纹管驱动机构就可推动一组叶