- 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1章　绪　论

在过去的近50年中，人类探索和利用宇宙空间的活动突飞猛进，取得了举世瞩目的成就。自前苏联1957年发射第一颗人造地球卫星以来，已有数百个航天器在地球轨道上运行，另外，探测月球和行星的飞行器也取得了巨大的成功。随着科学技术的发展，无论从科学、军事和商业的需要来看，今后，航天技术将愈来愈成为世界各国发展的重点。

航天器是集合了各学科的先进技术成果而发展起来的，是一个综合了各类科学技术的系统工程，热控制系统就是其中的一个分系统。这是一个利用热物理科学发展起来的为保证航天器正常工作的重要系统。

为了清晰地了解航天器热控制系统的任务，本章将对各种航天器作简要的介绍，从较为宽广的角度了解各类航天器对热控制系统的需求。

1.1　航天器概述

1.1.1　航天器分类

航天器按大类分，可分为三轴稳定、自旋稳定和平台三类。在这几大类中，又可按轨道和任务的不同分成很多种不同的航天器系列。

除了平台外，航天器基本由如下系统组成：最主要的是为了完成任务所需的有效载荷；而支持有效载荷的公用分系统有结构分系统、能源/配电分系统(EPS或EPDS)、遥测跟踪和指令分系统(TT&C)、姿态/速度控制分系统(ACS或AVCS)、推进分系统和热控制分系统(TCS)等。

(1)当今最常用的航天器是三轴稳定型，这类航天器的特点是：其结构形式大致为盒形，外加可展开的太阳电池阵列，这些航天器通常采用惯性稳定，而有一个轴缓慢旋转以使有效载荷天线或敏感器指向地球，太阳电池阵的面也相对于航天器连续旋转以保持其始终面向太阳。典型的三轴稳定卫星如东方红三号(DFH－3)通信卫星(图1－1，图1－2)和美国的海事通信卫星(FLTSATCOM)(图1－3)。它们都有一个有效载荷舱和一个公用舱(或公用平台)。

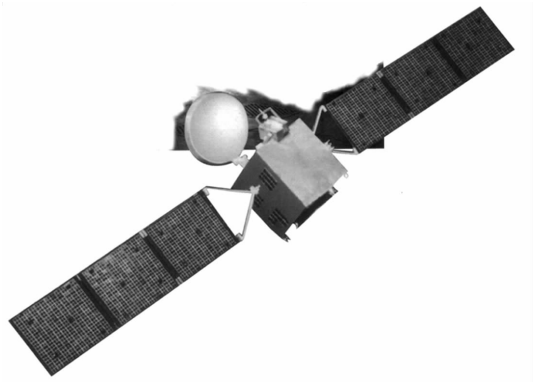


图 1－1　DFH－3 外观

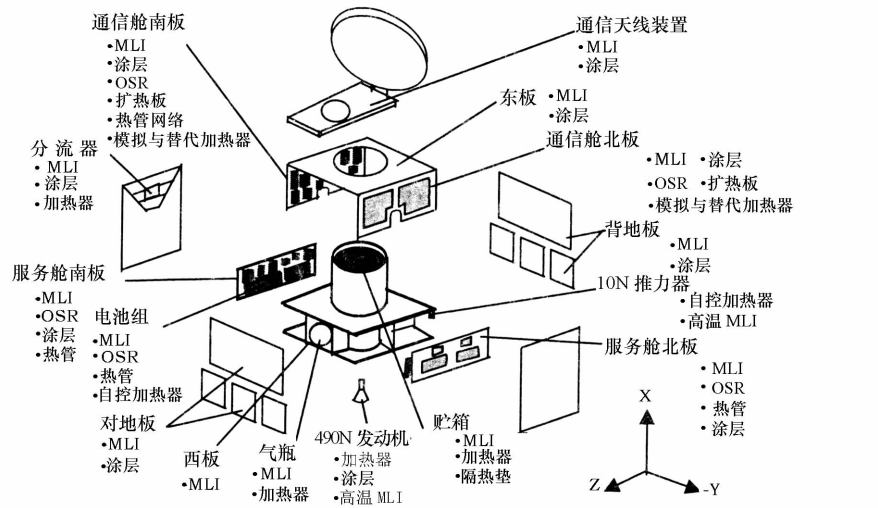
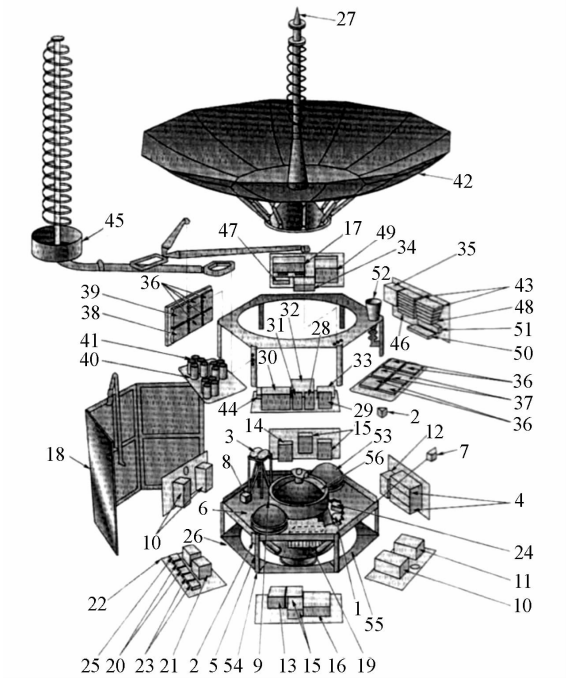


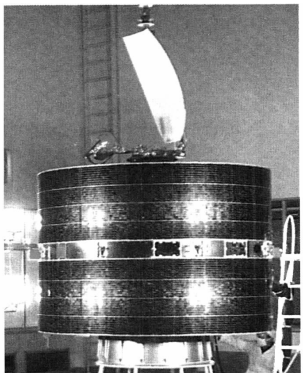
图 1－2　DFH－3 分解简图

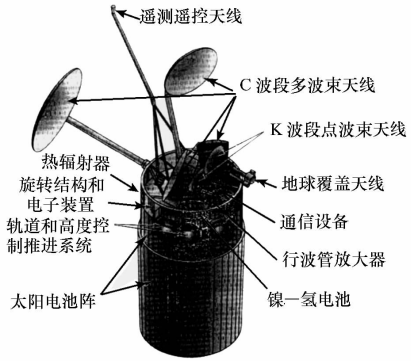
(2)自旋稳定型航天器用得不如三轴稳定的广泛，较多地用于高轨道任务，如地球同步和大椭圆轨道，在低轨道任务中也有使用。通常有效载荷或天线为保持对地定向，就需要有消旋段，但是，有的探测器需要利用卫星的自旋提供扫描运动。自旋稳定卫星，如我国早期的试验通信卫星 DFH－2、风云二号气象卫星、美国的通信卫星 VI 号和国防支持计划卫星(DSP)等，如图 1－4 所示。



1—9 **姿态和速度控制系统**；10—19 **能源/配电系统**；20—27 **遥测、跟踪和指令系统**；28—48 **通信系统** UHF **转发器**；49—52 SHF **转发器**；53—56 **推进系统**

图 1—3 FLTSATCOM **的分解简图**





中国 DFH—2 **试验通信卫星** **美国国际** VI **号通信卫星**

图 1—4 **自旋稳定卫星的示例**

(3)平台技术由一个或几个有效载荷加一些有限的支持系统组成,它和航天器的不同点是没有自主功能,而是依赖主飞行器的姿控系统、能源系统和遥测遥控系统的支持。如图 1－5 所示的实验支持系统是一个典型的平台系统,它装在航天飞机的载荷舱内,这是一个相当大的结构,支撑着 6 个实验,其设备舱内有配电、指令处理和数据记录设备,由航天飞机提供姿控系统、能源系统和遥测遥控系统的功能,在驾驶舱内有一个平台的指令监控板,由航天员控制和操作实验。

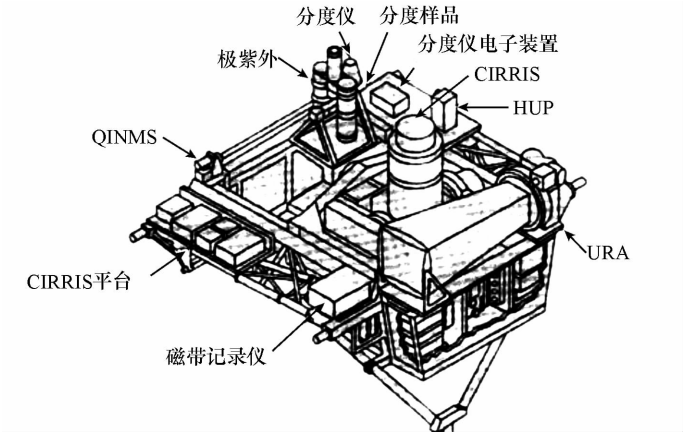


图 1－5　美国装在航天飞机上的实验平台

1.1.2　航天器轨道

上述每类航天器的轨道可以有很多种,在不同轨道上,航天器所处的空间热环境相差很大。所以,再简单回顾一下轨道的基本特点是必要的。

1.1.2.1　地球轨道

根据任务的不同,地球轨道分低轨道(LEO)、大椭圆轨道和地球同步轨道(GEO)。

一般最大高度小于 2000km 的轨道为低轨道,有圆轨道也有椭圆轨道,最短的运行周期约为 90 分。轨道倾角自 0°～90°,大于 90°的极轨道可覆盖整个地球表面,这对于气象和监视卫星是很重要的,其中典型的为太阳同步轨道,如图 1－6。其轨道倾角为 90 多度,使得轨道面转动与太阳运动的速度相同,即保持轨道平面与太阳的角度始终不变。在每个轨道上,卫星经过地球这些点的时间不变,由于地球在轨道下旋转,卫星在每一圈可见到不同的地球表面,因此,在一天里就可覆盖整个地球表面。太阳同步轨道可设置于规定的时刻见到地球上的点,从太阳升起/太阳落下或中午,这就是常说的晨—昏轨道或中午/子夜轨道,或上午几点钟轨道等。