

导弹与航天丛书

卫星工程系列

卫星热控制技术

宇航出版社

31096803

V4
03
V5-2

卫星热控制技术

111.315

主 编 闵桂荣

副 主 编 张正纲 何知朱

主编助理 郭 舜 田文华

作 者	田文华	过九镛	江经善	华诚生
	李万林	李希伦	何知朱	沈 琮
	陈天忠	孟庆生	张正纲	侯增祺
	胡金刚	郭 舜	徐济万	彭芝生
	潘增富			

责任编辑 邱光纯

宇航出版社

内 容 简 介

本书是密切结合卫星研制工程的一本技术专著,对卫星的热控制技术作了较全面的论述。

全书共分十章,包括:概论、热控系统研制、热分析、热控材料、热控装置、热性能测量、热管及其应用、热控系统地面试验、中国卫星热控系统以及载人航天器热控系统。

本书适用于从事人造卫星研究、设计、生产、试验和应用的工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

卫星工程系列

卫星热控制技术

主 编: 闵桂荣

副 主 编: 张正纲 何知朱

责任编辑: 邱光纯

宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号 (邮政编码 100013)

宇航出版社激光照排室排版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

x

开本: 850×1168 1/32 印张: 18.875 字数: 505 千字

1991年9月第1版第1次印刷 印数: 1—1300册

ISBN 7-80034-439-8/V·074 定价: 26.30元

《导弹与航天丛书》
编辑工作委员会

名誉主任 宋 健 鲍克明

主 任 刘纪原

副 主 任 任新民 孙家栋

委 员 屠守锷 黄纬禄 梁守槃 陈怀瑾
王 卫 权振世 谢昌年 赵厚君
曹中俄 张新侠 高本辉

办 公 室 宋兆武 史宗田 任长卿 孙淑艳

《卫星工程》
系列编辑委员会

主 任	孙家栋			
副 主 任	戚发轫	杨嘉墀	屠善澄	
	侯深渊	(常务副主任)		
委 员	林华宝	朱毅麟	潘维孝	范本尧
	邹广瑞	曾邑铎	王金堂	魏钟铨
	李旺奎	黄本诚	陆道中	杨廷相
	林鸿英	付继昌		
办 公 室	陆道中	宋惠兰	杨树仁	王凤台

总 序

导弹与航天技术,是现代科学技术中发展最快的高新技术之一。导弹武器的出现,使军事思想和作战方式发生了重大变革;航天技术,把人类活动的领域扩展到太空,使人类认识自然和利用外层空间的能力发生了质的飞跃。

导弹与航天技术是一项复杂的系统工程,它应用了现代科学技术众多领域的最新成就,是科学技术与国家基础工业紧密结合的产物,是一个国家科学技术水平和工业水平的重要标志。

中国人民经过 30 年的努力,依靠自己的力量,勇于开拓,坚韧不拔,在经济和科学技术比较落后的条件下,走出了自己发展导弹和航天技术的道路,造就了一支能打硬仗的技术队伍,建立了具有相当规模和水平的导弹和航天工业体系,形成了遍布全国的科研、生产协作网。这是党中央独立自主、自力更生方针的伟大胜利,是全国各地区、各部门大力协同,组织社会主义大协作的丰硕成果。

30 年来,我国已有多种型号经历了研究、设计、生产、试验、装备、使用的全过程,装备了各种射程的战略和战术弹道导弹、各种类型的防空导弹和飞航导弹,用多种运载火箭发射了不同轨道和用途的人造卫星,这些都是我国导弹和航天工业的物质成果。这些重大成果对增强我国的国防实力,促进经济发展,带动科学进步,发挥了重要的作用。

我们不仅取得了丰硕的物质成果,而且积累了宝贵的实践经验。为了发展中国的导弹和航天事业,多少人投入毕生的精力,贡献了宝贵的智慧,付出了辛勤的劳动,备尝了失败的苦痛和成功的

欢欣。这些付出高昂代价取得的实际经验，难以只从书本上学来，也不能从外国买来，只能靠自己在实践中总结。为了加速我国导弹和航天事业的发展，需要全面、系统地归纳以往研制过程中建立和应用的设计理论，总结其工程经验，用以指导今后的研制实践，并传授给导弹和航天事业一代又一代新生力量，使他们能在较高的起点上开始工作。为此，我们组织多年来从事导弹、人造卫星和运载火箭研制工作的专家和工程技术人员，编著了这套《导弹与航天丛书》。它以工程应用为主，力求体现工程的系统性、完整性和实用性，是我国导弹和航天技术队伍 30 年心血凝聚的精神成果，是多种专业技术工作者通力合作的产物。

作为一项系统工程，要求参加导弹和航天工程研制工作的各类技术人员，不仅精通自己的专业，而且充分理解相关专业的要求和特点，在统一的总体目标下，相互协调、密切配合地进行工作。因此，本《丛书》也是导弹和航天技术队伍各专业间以及和其他有关人员间进行技术交流的读物。

本《丛书》按液体弹道导弹与运载火箭（Ⅰ）、固体弹道导弹（Ⅱ）、防空导弹（Ⅲ）、飞航导弹（Ⅳ）、卫星工程（Ⅴ）等 5 个系列编排。各系列共用的固体推进技术（Ⅵ）和空气动力学（Ⅶ）两种专业编为专著，其他共用专业则纳入一个系列，并供其他系列选用。

本《丛书》的各级编委会、各卷册的主编、副主编及各章节的作者是一个庞大的科学技术人员群体，为了编写好这部大型丛书，编著人员在组织和技术上都付出了巨大劳动。期望这套《丛书》能帮助人们加深对于导弹和航天技术的了解，能促进中国的导弹和航天事业向更高的目标迈进。

《导弹与航天丛书》

编辑工作委员会

1987 年 8 月

《导弹与航天丛书》

卫星工程系列

序 言

卫星工程系列丛书是《导弹与航天丛书》的一个系列。

我国坚持自力更生、艰苦奋斗的方针,在人造卫星的研制工作中取得了举世瞩目的成就.1970年4月24日,中国第一颗人造地球卫星——“东方红一号”发射成功,卫星运行正常,跨入了空间大国的行列.至今,我国成功地研制和发射了30颗不同类型的人造卫星,其中包括当代最重要的三类应用卫星:高轨道的静止通信卫星、低轨道的返回式卫星和中轨道的遥感卫星.这些卫星应用于国民经济、国防建设、文化教育和科学研究的很多部门,取得了显著的社会和经济效益.

我国在研制人造卫星的工作中,开展了创造性的科研活动,积累了丰富的实践经验,形成了学科门类齐全的卫星工程知识体系.我们组织众多的工程技术专家编写本系列丛书的目的,在于将这些实践经验和理论知识进一步系统化和理论化,并适当地吸收国外先进的科学技术成果,使其形成一套航天技术专著,用于指导今后的卫星研制工作.本系列丛书共有19种技术专著,包括卫星工程概论、卫星分系统技术和专业技术、以及探空火箭设计,共计29分册.

本系列丛书的内容以人造卫星的研制技术为主,着重论述卫星工程技术方面的问题,并简要论及了许多相关学科的问题,使其

具有完整性、系统性。某些分册涉及到载人飞船、空间站等其他类航天器的工程技术问题,其中论述内容较多的两册,书名冠以航天器。本系列各种分册在内容上具有相对的独立性和系统性。

编纂卫星工程系列丛书尚无经验可循,我们的工作首次尝试,由于编著人员的知识水平和实践经验有限,书中不当之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

本系列丛书的编纂工作,得到很多单位领导、广大科技人员和宇航出版社很多同志的大力支持,在此致以衷心的感谢。

《导弹与航天丛书》

卫星工程系列编辑委员会

1991年6月

前 言

《卫星热控制技术》是《导弹与航天丛书》卫星工程系列中的一本技术专著。本书是由中国空间技术研究院十多名专家共同编写的。书中论述了人造地球卫星的热控制原理、方法,工程设计和技术应用。全书以人造地球卫星热控制技术问题为主,也涉及到载人航天器的热控制问题。全书注重热控制原理的工程应用,略去已有专著论述的理论证明和公式推导,突出设计与应用的结合,增强工程实用性,并力求做到概念准确、阐述清晰、结论正确。书中给出了必要公式、数据、图表,供工程设计人员使用。

本书共有十章,按设计、计算、技术、测量、试验、实例、发展等几个方面论述。

本书适用于从事人造卫星研究、设计、生产、试验和应用的工程技术人员阅读,亦可作为高等院校有关专业的教学参考书。

编 者

1991年5月

主要符号表

A ——面积 m^2	r ——半径 m
B ——吸收因子	S ——太阳常数 W/m^2
C ——热容 J/K	T ——热力学温度 K
c ——比热容 $J/(kg \cdot K)$	t ——摄氏温度 $^{\circ}C$
c_p ——定压比热容 $J/(kg \cdot K)$	u ——速度 m/s
E_r ——地球表面对太阳辐射的反射密度 (W/m^2)	V ——体积 m^3
E_s ——地球表面的红外辐射密度 W/m^2	V_s ——比体积 m^3/kg
F ——角系数	V^* ——体积流率 m^3/s
$F_{i,j}$ ——表面 i 对表面 j 的角系数	α ——吸收率
f ——摩擦系数	β ——体积膨胀系数 $1/K$
g ——重力加速度 m/s^2	δ ——厚度 m
h ——对流换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	ϵ ——发射率
H ——接触热导率 $W/(m^2 \cdot K)$	η ——效率
I ——电流 A	λ ——热导率 $W/(m \cdot K)$
K ——传热系数 $W/(m^2 \cdot K)$	μ ——动力粘度 $Pa \cdot s$
L ——长度 m	ν ——运动粘度 m^2/s
M_r ——分子量	ρ ——反射率
m ——质量 kg	σ ——斯忒藩-玻尔兹曼常数 $=5.668 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
\dot{m} ——质量流率 kg/s	τ ——时间 s
p ——压力 Pa	ϕ_1 ——对太阳直接辐射的角系数
P ——功率 W	ϕ_2 ——对太阳辐射的地球反照的角系数
Q ——热量 J	数
q ——热流率(热流量, 热流, 热率) W	ϕ_3 ——对地球红外辐射的角系数
q' ——热流密度 W/m^2	下标
R_s ——热阻 K/W	eff——有效
	eq——当量; 等效

f ——关于流体
 g ——关于气体
 H ——关于半球
 l ——关于液体
 n ——关于法向
 S ——关于太阳
 s ——关于固体
 T ——关于总的
 w ——关于壁面
 λ ——关于单色
 \max ——最大值
 \min ——最小值

上标
 $*$ ——模型和原型的参数比
 ——平均值

无量纲数

Re ——雷诺数 $Re = \frac{uL}{\nu}$

Pe ——贝克来数 $Pe = \frac{\rho c_p u L}{\lambda}$

Nu ——努塞尔数 $Nu = \frac{hL}{\lambda}$

Pr ——盖郎特数 $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$

Gr ——格拉晓夫数 $Gr = \frac{gL^3 \beta \Delta T}{\nu^2}$

书中遇到上述规定以外的物理量,所采用的符号的定义均在有关章节第一次出现时加以说明.

目 录

第一章 概论	张正纲
1.1 热控制过程与热控制技术分类	(1)
1.2 卫星热控制技术的特点	(4)
1.3 热控制技术与空间环境	(8)
1.4 卫星热控制系统的故障	(13)
1.5 发展趋势	(16)
第二章 热控系统的研制	过九铭
2.1 卫星在宇宙空间的热平衡分析	(19)
2.2 热设计的主要原则	(23)
2.3 热设计的基本依据	(24)
2.4 温度要求	(25)
2.5 热工况分析	(27)
2.6 研制流程	(28)
2.7 CAD 技术在热设计中的应用	(44)
第三章 卫星热分析计算	李万林 潘增富 田文华
3.1 概述	(48)
3.2 轨道参数计算	(49)
3.3 轨道空间辐射外热流计算	(60)
3.4 上升段空间辐射外热流计算	(72)
3.5 辐射换热角系数	(75)
3.6 包壳辐射换热	(82)
3.7 热网络分析方法	(86)

3.8 有限元法在卫星热分析中的应用	(114)
--------------------------	-------

第四章 热控材料 **江经善**

4.1 热控涂层	(138)
4.2 隔热材料	(174)
4.3 导热填充材料	(197)
4.4 相变材料	(205)
4.5 热控材料胶粘剂	(216)

第五章 热控装置 **何知朱 江经善**

5.1 天源主动热控机构	(226)
5.2 电热调温装置	(249)
5.3 放射性同位素加热器	(265)
5.4 空间热辐射器	(269)
5.5 低温制冷装置	(291)
5.6 对流式热交换装置	(313)

第六章 热性能测试 **华诚生**

6.1 表面发射率的测量方法	(347)
6.2 太阳吸收率的测量方法及装置	(366)
6.3 化学电池的热性能测量	(379)
6.4 接触热导率的测量	(387)

第七章 热管及其应用 **侯增祺 郭 舜**

7.1 热管的基本理论及特性	(395)
7.2 可控热管	(412)
7.3 热管设计基础	(425)
7.4 热管在航天器上的应用	(444)

第八章 热控系统地面试验

胡金刚 李希伦 孟庆生等

8.1 轨道段热平衡试验	(465)
8.2 上升段热试验	(494)
8.3 地面调温试验	(498)
8.4 热缩比模型试验	(500)

第九章 中国卫星热控系统 **徐济万 陈大忠 沈 琼**

9.1 概述	(535)
--------------	-------

9.2	科学实验卫星热设计	(536)
9.3	科学试验卫星部件热设计举例	(539)
9.4	返回式遥感卫星热设计	(541)
9.5	返回式遥感卫星部件热设计举例	(543)
9.6	静止通信卫星热设计	(552)
9.7	静止通信卫星部件热设计举例	(554)
9.8	太阳同步气象卫星热设计	(560)
9.9	太阳同步气象卫星部件热设计举例	(561)
第十章 载人航天器热控制技术		彭芝生
10.1	载人飞船的热设计原则及主要热控方法	(565)
10.2	载人飞船热控系统实例	(570)
10.3	空间站的热控制特点	(573)
10.4	空间站热控系统实例	(575)
10.5	热控技术发展的若干问题	(579)

第 一 章

概 论

张正纲

人造卫星热控制技术是控制卫星内部及外部环境热交换过程,使其热平衡温度处于要求范围内的技术.它是航天技术的重要组成部分.由用于卫星热控制的各种材料、部件和设备组成的卫星热控系统,是卫星各系统中十分重要的保障系统之一.此系统性能之优劣,可靠性之高低直接影响到其他系统的工作状态及卫星的工作寿命.

随着航天技术进一步发展,人类将在空间进行工业化生产,热能收集、利用以及开展深空探测等活动,这必然会遇到大热量的输送与排放、有效的隔热、深冷环境中低温的维持等问题.热控制技术在解决这些新问题的过程中,将得到迅速发展.

1.1 热控制过程与热控制技术分类

温度作为一种重要的环境条件,影响到地球上每一件事情的发生与发展.人类本身及其设计制造出的每一项产品都是在一定的温度条件下生存和保持它的性能.为了适应地球的温度条件,各种产品或是利用其自身的特性或是采取一些手段来调节温度.人类也不例外,是依靠身体的机能及附加手段(衣服、空调)来适应温

度环境。

卫星主要工作环境是地球大气层以外的宇宙空间,而且还要经历从地球到运行轨道的过渡环境,所处的热环境完全不同于地球。有的卫星回收舱还要返回地面,再入大气层时与空气高速摩擦引起舱体表面温度急剧升高。为了使卫星能在预定的温度条件下工作,热控技术需要对卫星上产生的热量大小、传递方向、各仪器设备之间及星内外的热交换过程、各点温度变化速率进行预先妥善安排及适时控制。

热控制包括下列过程:

(1) 卫星承受外部的热量,随着卫星不同的运行轨道,不同姿态而变化。而卫星吸收外部热量主要是依靠热设计选定的具有一定辐射(吸收)性能的表面材料及专门的吸热装置来控制。另外,卫星表面在与高速气体分子摩擦时也会吸收热量。

(2) 根据卫星热控制面的温度变化或预先的设计安排对卫星吸收的外部热量及仪器、设备产生的热量的大小、传递方向及变化速率进行控制。

(3) 根据卫星的温度指标要求,将星上多余的热量通过表面辐射材料、热辐射装置或蒸发装置散发到空间中去。

上述这些过程往往同时发生在一个地方,例如热量的吸收和排出就在某表面材料上同时进行。

图 1-1 是实现这些基本过程的热控制系统组成示意图。卫星壳体结构材料,覆盖在上面的涂层、吸热装置及暴露在空间的某些仪器表面在空间接受外部热量。根据卫星热设计的安排,吸收的外部热量受到隔热部件的阻挡,限制了输入量,或者经过导热部件不断传递到星上仪器、设备上去,或者按照温度传感器的指示,不断控制热量的输入。温度传感器反馈的信号可直接完成控制,也可以通过地面设备进行遥控。

上述吸收、控制、隔断、导通及排散热量的装置与部件可以安装在卫星壳体上,也可以安装在卫星内部某个仪器、设备上。