



载人航天出版工程

总主编：周建平
总策划：邓宁丰



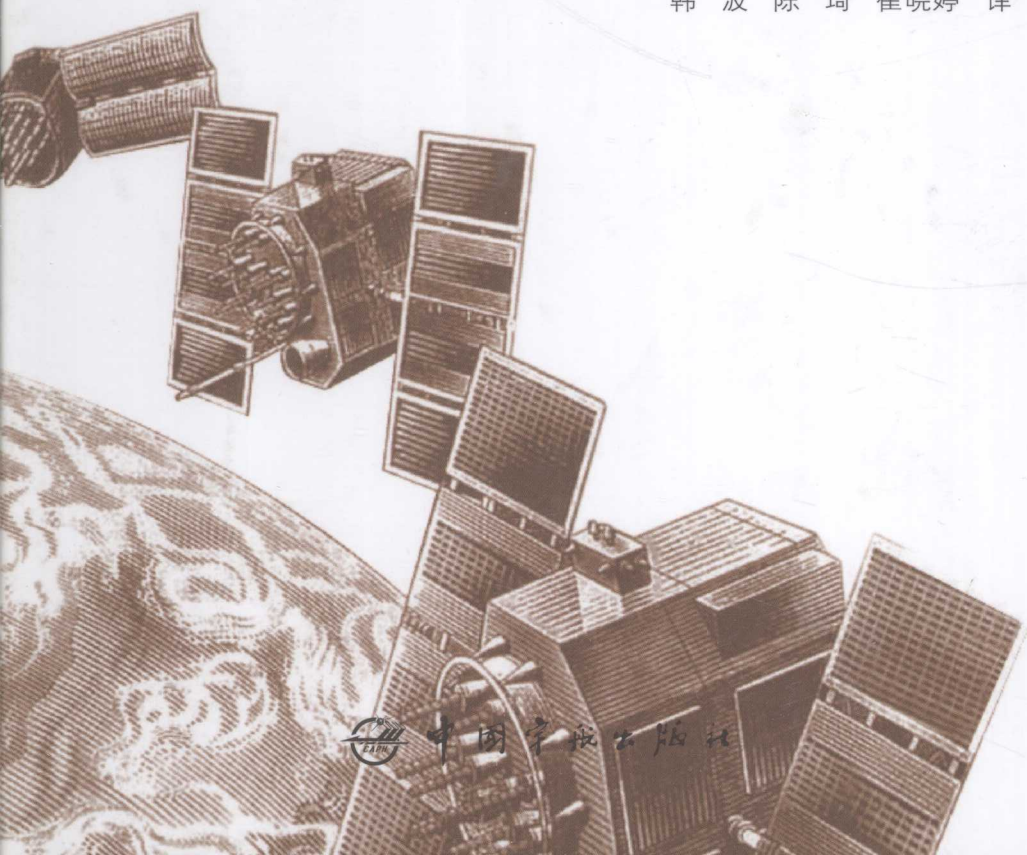
CRC Press

航天器电源系统

Spacecraft Power Systems

[美] 穆肯德·R·帕特尔 著

韩波 陈琦 崔晓婷 译



中国水利水电出版社

014056668



载人航天出版工程

总主编：周建平

总策划：邓宁丰

V442

04

航天器电源系统

SPACECRAFT POWER SYSTEMS

[美] 穆肯德·R·帕特尔 著

韩波 陈琦 崔晓婷 译



中国宇航出版社



北航

C1741694

V442

04

888820110

Authorized translation from English language edition published by CRC, part of Taylor & Francis Group LLC.

Spacecraft Power Systems. Edited by Mukund R. Patel

Copyright © 2005 by CRC Press

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号: 图字: 01-2007-3253 号

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

航天器电源系统/ (美) 帕特尔 (Patel, M. R.) 著; 韩波, 陈琦, 崔晓婷译. --北京: 中国宇航出版社, 2013

书名原文: Spacecraft power systems

国家出版基金项目

ISBN 978-7-5159-0583-9

I. ①航… II. ①帕… ②韩… ③陈… ④崔… III. ①航天器—电源
IV. ①V442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 296173 号

责任编辑 刘亚静

封面设计 姜 旭

出 版
发 行

中国宇航出版社

社 址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

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 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2013 年 12 月第 1 版

2013 年 12 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 23.125

字 数 637 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0583-9

定 价 128.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

《载人航天出版工程》总序

中国载人航天工程自1992年立项以来，已经走过了20多年的发展历程。经过载人航天工程全体研制人员的锐意创新、刻苦攻关、顽强拼搏，共发射了10艘神舟飞船和1个目标飞行器，完成了从无人飞行到载人飞行、从一人一天到多人多天、从舱内实验到出舱活动、从自动交会对接到人控交会对接、从单船飞行到组合体飞行等一系列技术跨越，拥有了可靠的载人天地往返运输的能力，实现了中华民族的千年飞天梦想，使中国成为世界上第三个独立掌握载人航天技术的国家。我国载人航天工程作为高科技领域最具代表性的科技实践活动之一，承载了中国人民期盼国家富强、民族复兴的伟大梦想，彰显了中华民族探索未知世界、发现科学真理的不懈追求，体现了不畏艰辛、大力协同的精神风貌。航天梦是中国梦的重要组成部分，载人航天事业的成就，充分展示了伟大的中国道路、中国精神、中国力量，坚定了全国各族人民实现中华民族伟大复兴中国梦的决心和信心。

载人航天工程是十分复杂的大系统工程，既有赖于国家的整体科学技术发展水平，也起到了影响、促进和推动着科学技术进步的重要作用。载人航天技术的发展，涉及系统工程管理，自动控制技术，计算机技术，动力技术，材料和结构技术，环控生保技术，通信、遥感及测控技术，以及天文学、物理学、化学、生命科学、力学、地球科学和空间科学等诸多科学技术领域。在我国综合国力不断增强的今天，载人航天工程对促进中国科学技术的发展起到了积极的推动作用，是中国建设创新型国家的标志性工程之一。

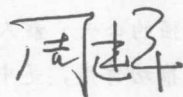
我国航天事业已经进入了承前启后、继往开来、加速发展的关键时期。我国载人航天工程已经完成了三步走战略的第一步和第二

步第一阶段的研制和飞行任务，突破了载人天地往返、空间出舱和空间交会对接技术，建立了比较完善的载人航天研发技术体系，形成了完整配套的研制、生产、试验能力。现在，我们正在进行空间站工程的研制工作。2020年前后，我国将建造由20吨级舱段为基本模块构成的空间站，这将使我国载人航天工程进入一个新的发展阶段。建造具有中国特色和时代特征的中国空间站，和平开发和利用太空，为人类文明发展和进步做出新的贡献，是我们航天人肩负的责任和历史使命。要实现这一宏伟目标，无论是在科学技术方面，还是在工程组织方面，都对我们提出了新的挑战。

以图书为代表的文献资料既是载人航天工程的经验总结，也是后续任务研发的重要支撑。为了顺利实施这项国家重大科技工程，实现我国载人航天三步走的战略目标，我们必须充分总结实践成果，并充分借鉴国际同行的经验，形成具有系统性、前瞻性和实用性的，具有中国特色的理论与实践相结合的载人航天工程知识文献体系。

《载人航天出版工程》的编辑和出版就是要致力于建设这样的知识文献体系。书目的选择是在广泛听取参与我国载人航天工程的专业领域的专家意见和建议的基础上确定的，其中专著内容涉及我国载人航天科研生产的最新技术成果，译著源于世界著名的出版机构，力图反映载人航天工程相关技术领域的当前水平和发展方向。

《载人航天出版工程》凝结了国内外载人航天专家学者的智慧和成果，具有较强的工程实用性和技术前瞻性，既可作为从事载人航天工程科研、生产、试验工作的参考用书，亦可供相关专业领域人员学习借鉴。期望这套丛书有助于载人航天工程的顺利实施，有利于中国航天事业的进一步发展，有益于航天科技领域的人才培养，为促进航天科技发展、建设创新型国家做出贡献。



2013年10月

作者及出版者在本书的出版过程中进行了谨慎细致的准备，对本书引用信息的后果不承担任何责任。书中图表可能受到版权保护，但在此仅作图解例证使用。

谨以此书献给我的姐姐 Bhanumati Amin，她的爱将是我永远珍藏的美好回忆；同时将此书献给我的父母，尽管他们已 90 高龄，却仍不断给予我鼓励。

序

1957年,苏联发射了第一颗人造卫星并成功进入低地球轨道。随后的几十年中,美国发射了大量的地球轨道卫星用于空间探索计划。第一枚商用地球同步轨道卫星——国际通信卫星1号(Sputnik I)于1965年成功入轨。之后的1969年,NASA的阿波罗11号(Apollo 11)成为第一艘登上月球的载人航天器。此后,许多国家都相继成功地开展了大大小小的空间计划。2003年,太空迎来了第一位游客,同年,中国首次实现了载人航天飞行,成为继俄罗斯和美国之后的第三个将人送上太空的国家。2004年,美国总统布什宣布了新的太空行动计划,拟于2015年重返月球,随后奔向火星。同年,中国和印度分别宣布将计划于2010年发射无人航天器登陆月球。在商用方面,目前的全球通信技术的发展已经使得卫星成为国家基础设施建设中不可缺少的重要部分。当今世界,已经有很多国家都拥有发射卫星和操控卫星的能力。

过去,美国政府为空间产业的发展提供了大量经费,而通信卫星却受控于非政府的市场化运作方式。20世纪90年代,个人通信系统的发展、遥感范围的扩充以及允许出售遥感数据都可视为空间产业发展的里程碑。在2000年的国际通信卫星市场中,28颗卫星的成本是120亿美元,其中约有50%份额流向一些美国公司,此外还有发射保险费用以及约占发射和卫星成本7%~15%的一年内轨道修正费用。据美国航天部门称,2003年的发射次数为90次,2012年预计为150次。这些计划象征着商用市场的进一步扩大。产业的发展推动着技术的发展。随之而来新的商业机会也会迅速出现,未来航天工业也会依托这些商业得到发展。

预计在 2012~2015 年期间发射的美国空军第三代 GPS 很可能是今后 20 年内最大的防御卫星计划之一。它将拥有 30 颗卫星,估计耗资 50 亿美元。新的大规模商用卫星,如欧洲的伽利略 (Galileo) 导航计划将有多个国家参与,其中极有可能会包括中国。一些科学任务也继续为我们提供新的宇宙知识。仅在 2001 年的春天,夏威夷的凯克 (Keck) 望远镜、法国的普罗旺斯天文台 (Haute-Provence Observatory) 和智利的欧洲南方天文台 (European Southern Observatory) 共发现了 11 颗新行星,从而使人类发现的其他恒星系中的行星总数达 100 颗之多。最近,科学家们发现了一个同我们的太阳系非常相似的恒星系。仅在我们所处的太阳系,就发现了 39 颗木星卫星、30 颗土星卫星,同时还发现了火星表面以下储藏大量的冰。

商用和科学卫星在当今世界都占据着重要的地位,因而优化它们的技术性能并最终提高投资者的回报便显得尤为重要。卫星上都有着特定的资源——科学卫星上的仪器设备和通信卫星上的带宽,它们都需要电源。由此,本书重点针对科学、商用、国防等各应用领域的地球轨道、太阳系、深空探测等各类航天器电源系统的设计、性能和应用进行讨论。

航天器电源系统的设计随着系统元器件的发展和进步得到了快速发展。本书提供了渐进而深入的电源系统的数据和设计过程,以满足低成本、轻质量的航天器任务要求。2002 年卫星的平均发射费用低地球轨道为 10 000 美元/kg,地球同步轨道为 50 000 美元/kg。因此,电源系统的质量大小是设计时需要考虑的一个重要因素,电源设计时卫星任一部件细微的改变,都会对卫星整体造成某种不利影响,因此设计必须做到整体优化,以减小这些不利因素的影响。同时,工程技术人员应尽可能地应用最新的技术。卫星系统犹如一张蜘蛛网,牵一发而动全身,电源系统中的一个元器件的很小变化也可能对卫星总体性能产生影响。所以,即使是针对传统的卫星最优设计,电源系统工程师所要考虑的问题也不仅仅是太阳电池阵和蓄电池。考虑到 1998~2002 年期间所发射的商用地球同步轨道卫星

中，有 1/4 都存在电源问题，这些在轨运行问题产生的保险索赔额占据了 60% 的产业保险索赔额，卫星的电源设计就显得更加重要。

本书作者是航天器电源系统行业的一位公认专家。本书能为航天工程技术人员和管理人员提供包括航天器电源设计、研发、测试以及使用的可信赖的信息，所提供的详细资料还有助于工程技术人员在这一快速发展的行业范畴内保持领先地位。

亚得里(Yardley)

于宾夕法尼亚州

致 谢

若没有多方面的资料来源，仅凭一人之力而将航天器电源系统的各项技术融合起来编撰成书是不可能完成的任务。幸运的是，我得到了业内各组织机构和个人的全力支持。本书的形成直接得益于我针对 NASA 和一些重要承建机构的工程技术人员开设的继续教育课程。在此，非常感谢空间发射有限公司总裁马绍尔（Marshall）从 1995 年以来便邀请我讲授该课程，同时感谢美国空间基金会对该课程的资助。

感谢 NASA、欧洲空间局、美国能源部和各国航天器制造商提供的最新空间电源技术数据和研究报告，感谢这些组织中各位专家学者们对我的大力帮助。特别感谢欧洲空间局电源系统部门主管杰姆（Jim）和 NASA 戈达德空间飞行中心（Goddard Space Flight Center）的高级工程师鲍勃（Bob）对本书的审阅以及所提出的宝贵意见和建议。

参加我课程的工程技术人员在他们各自的专业中具有更深的专业知识，他们极富创造性的讨论使我不断对空间电源知识进行补充。他们其中的一些人不但鼓励我及时编写该书，而且在编写过程中提供了大量的意见和建议。

同时感谢地处纽约的美国商船学院（U. S. Merchant Marine Academy）工程部主管约瑟（Jose）教授、院长沃伦（Warren）博士、监管人约瑟夫（Joseph）中将对我和出版的大力支持，并感谢其为我编写该书提供的休假。

最后，由衷感谢所有对我提供宝贵支持的人。

穆肯德·R·帕特尔（Mukund R. Patel）

关于本书

在过去的十年中,本书作者开设了一门为期3天的关于航天器电源系统的继续教育课程,在此基础上形成本书。书中的素材主要是基于作者在通用电器公司(General Electric)空间设计部门和洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin)的空间系统部门所做的项目设计和深入研究。

航天器电源系统在最近十年中经历了巨大的发展,并将持续快速发展下去。适合工程技术人员使用的设计和分析方法已逐渐成为各个公司的需要。除了各种有限的会议出版物和一些零星书籍的部分章节涉及到这个庞大的学科之外,目前没有任何一本书可以覆盖整个航天器电源系统的内容。

电源系统的设计、分析和使用的各个方面都详尽地囊括在本书当中,这是其他书所不具备的。书中涵盖了能量转换、能量储存、功率调节、能量管理和运行操作的基础知识,这些都将帮助工程技术人员在进行各种航天器电源系统的设计和使用时占尽先机。

本书对航天器电源系统的设计和开发人员、机械和航空学工程师、总工程师和项目管理者都有重要的帮助,可以直接作为参考书进行查阅,也可以作为本科或研究生的教材。本书读者应具备大学以上水平的物理学和数学知识。尽管航天器电源设计往往和具体任务相关而具有特殊性,书中还是针对某一类卫星列举出了一些数据和曲线的代表值或平均值。

本书涵盖了航天器电源系统的各个方面,共27章,分为4篇。

第1篇:卫星概述、空间环境及其影响、电源系统的选择、光伏电池系统、电源系统要求以及迭代设计。

第2篇：太阳电池阵、化学电池、电源电磁学、配电电缆、过载保护以及辅助设备。

第3篇：电源管理、动态性能和稳定性、电磁匹配、电子静态放电、可靠性、降额、总装和测试。

第4篇：诸如用于星际、深空探测的放射性同位素温差电源等特种电源、具有交流发电机的高电压/大功率热动力系统、电推进、储能飞轮和超导、燃料电池及微波束能量卫星。

由于书中提供的数据有多种来源，所以同时使用了国际单位和英制单位。本书给出了详细的单位转换表以及空间领域常用的专业术语缩写对照表。

缩略语

ACS	姿态控制系统
ADE	太阳电池阵电子驱动装置
AE	秋分
AIAA	美国航空航天学院
AMTEC	碱金属热电转换器
ANSI	美国国家标准研究院
AO	原子氧
APL	应用物理实验室 (Johns Hopkins University)
APS	辅助电源
a-Si	非晶硅 (光伏电池)
AU	天文单位
AWG	美国导线规格
BCC	蓄电池充电控制器
BDCU	蓄电池双向充电放电装置
BCN	蓄电池充电网络
BCU	蓄电池充电装置
BCR	蓄电池充电调节器
BCVM	单体蓄电池电压监测器
BDN	蓄电池放电网络
BDR	蓄电池放电调节器
BDU	母线数据单元
BIU	蓄电池接口单元
BJT	双极结型半导体
BLU	蓄电池下泻装置
BOL	寿命初期

BPC	蓄电池功率转换器
BPM	蓄电池压力监测器
BSR	背反射面
BU	备份装置
BVR	母线电压调节器
CASI	加拿大航空航天局
CD	指令表
CDR	关键设计评审
C/D	充电/放电
CDU	指令译码器
CIGS	铜钢硫化镓
CMD	指令
C&DH	指令和数据处理
CNES	法国国家航天中心
COTS	商用成品(设备)
CPV	通用压力容器(装两个单体蓄电池)
c-Si	晶体硅(光伏电池)
DAR	双层减反射(涂层)
DARPA	国防先进研究项目机构
DCA	国防通信机构
DDCU	直流一直流变换器
DET	直接能量传递
DEU	展开电子装置
DIPS	同位素电源系统
DMS	国防气象卫星
DOD	放电深度
DoD	美国国防部
DoE	美国能源部
DPV	压力容器(蓄电池)

DPU	展开释放装置
DRL	德国 Deuche 航天中心
DSCS	国防系统通信卫星 (负载小于 1 kW, (28 ± 0.28) V, GEO 母线)
EED	电子爆炸装置
EHD	电液动力
EHT	电热肼推进器
ELF	超低频率
EMC	电磁兼容性
EMF	电动势
EMP	电磁脉冲
EMW	能量—动量轮
EOL	寿命末期
EOS—AM	地球观测系统 (负载功率 3 kW, (120 ± 5) V, LEO 母线)
EPS	电源系统
EQX	二分点
ESA	欧洲空间局
ESD	电子静态放电
ESR	等效串联电阻
FBA	保险熔丝板组件
FESS	飞轮能量储存系统
FIT	失效率 (10^6 h)
FMECA	故障模式影响及危害性分析
FPGA	现场可编程逻辑门阵列
GN&C	制导、导航和控制
GEO	地球同步轨道
GPS	全球定位系统
GRC	格伦研究中心 (隶属 NASA)

GSE	地面支持系统
GSFC	Goddard 空间飞行中心 (隶属 NASA)
HAI	肼燃料电弧推进器
HEO	大椭圆轨道
HTSC	高温超导体
HV	高电压
IECEC	能量转换工程会议
IEEE	美国电器和电子工程师协会
IEMS	集成能量动量飞轮系统
IGBT	绝缘门双极半导体
INM	Inmarsat 卫星 (负载功率 3 500 W, 28 V 半调节母线, GEO 母线)
IMC	模块连接器
I/O	输入/输出
IPS	离子推进系统
IPV	隔离压力容器 (用于 1 个单体蓄电池)
IR	红外光
I_{sp}	比冲
ISRO	印度空间研究机构
ISS	国际空间站
ISO	国际标准化组织
ITO	锡酸钨
JPL	喷气推进实验室
KOH	氢氧化钾 (电解质)
LCP	聚光板
LEO	低地球轨道
LN	液氮
LISN	线性阻抗稳定网络
LV	低电压