- 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

航天器天线(上)

——理论与设计

叶云裳　编著

中国科学技术出版社

·北 京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目(CIP)数据

航天器天线/叶云裳编著. —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 978-7-5046-4500-5

Ⅰ.现… Ⅱ.叶… Ⅲ.航天器天线-高等学校-教材 Ⅳ.V443

中国版本图书馆 CIP **数据核字**(2006)**第** 081291 **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印刷
*
开本:787 **毫米**×960 **毫米** 1/16 **印张**:65 **字数**:1300 **千字**
2007 **年** 3 **月第** 1 **版** 2008 **年** 3 **月第** 2 **次印刷**
印数:1001—1500 **册** **(上、下册)总定价**:98.00 **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

本书分为上、下两册，以航天应用为背景，阐述了航天器天线的分析、设计和工程应用。

上册共 12 章，第 1～4 章和第 6 章从电磁场基本理论入手，阐述了航天器天线的现代分析设计理论和方法。第 5 章、第 7～11 章将航天器上常用天线按辐射形式分为四类，即基本电磁辐射单元、线性天线、口径面天线和阵列天线，分别阐述了天线的辐射机理、性能及设计方法。第 12 章介绍了射频连接、馈电及微波无源网络。

下册共 8 章，专门介绍航天器天线工程和新技术。第 13 章从系统和多学科集成设计的角度提出了航天器天线设计新概念。第 14 章介绍了卫星测控天线，第 15 章和第 16 章介绍了通信卫星天线和航天多波束天线，第 17 章介绍了航天微波遥感天线，第 18 章介绍了航天器数传天线，第 19 章介绍了航天智能型天线的基本理论，第 20 章介绍了航天天线及其系统的电测新技术。

全书以各种应用卫星和卫星应用为主线，在介绍航天天线及系统的同时，阐述了相关的新技术及其发展趋势。

作 者 简 介

叶云裳　1942 年出生，研究员，博士生导师，享受国家政府津贴。中国空间技术研究院首批学术带头人，历任总体部天线专业主任设计师、科技委、专家组成员。先后参加并负责了 10 余种空间飞行器型号天线分系统研制和国家重点科研课题的研究，多次获国家级和部级科技奖，多次立功。专业方向主要是航天器天线、卫星系统射频技术和电磁问题的研究。在国内外学术刊物和专业学术会议上发表论文 60 余篇。现为中国空间技术研究院专职教授。

责任编辑　崔　玲
封面设计　雅　钰
责任校对　刘红岩　凌红霞
责任印制　王　沛

总　　序

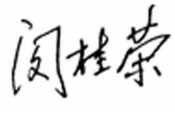
我国航天技术走过了40多年的光辉历程，正面临着21世纪更加蓬勃发展的形势，需要人才，需要知识。

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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

前　言

为适应空间技术发展和竞争的需求，迫切要求有一支高素质的空间技术人才队伍，人才问题就显得更为突出。近年来，中国空间技术研究院组织了一些从事航天工作多年的专家亲自给研究生和在职人员讲课，并编写相应的专业丛书。这是我院培养跨世纪航天高素质人才的一大举措。在航天器设计和实践过程中，航天器天线与我国航天事业同步发展，在航天器设计领域已形成了独立的分系统和重要的专业门类。本人有幸承担“电磁场理论和航天器天线工程”这门课程的教授任务。在准备课程教案时，很难找到一本合适的教科书作为教材使用，从而萌发编写教材的想法。

航天器天线与其他的一些专门应用的天线不同，它没有固定的天线形式。根据航天器任务和工作要求，天线的形式各不相同。航天器天线的设计往往是在确定的技术、战术要求和约束的条件下构建适用的天线，设计过程为多因素折中与综合过程。多个天线密集于卫星体上，相互之间、天线与星体及太阳翼间的电磁干扰及其抑制是航天器天线设计的另一问题。航天器天线要承受发射时的噪声、振动、冲击和加速度，在轨的失重、高真空、辐射、极端的冷热交变等外空环境。航天器天线设计和实现不仅是对单个天线射频电的设计，而且必须从系统的高度，进行电、机、热的一体化的并行集成设计。半个世纪以来人类的空间活动取得了巨大的发展，积累了丰富的知识和经验。我国从第一个卫星到载人

航天工程 40 余年的历程，我国的空间技术也取得了巨大的发展，我国的卫星天线经历了从无到有、从简单到复杂的过程。半个世纪的发展和经验需要总结，在总结的基础上提高才能应对新的技术挑战。这是着手编写本书的另一个动机。

随着空间应用的发展，航天器天线已成为任何一个航天无线系统不可或缺的重要组成部分。航天器天线影响并制约着整个无线通信系统乃至整个航天器性能和功能，天线技术已成为促进航天系统技术进步和空间应用发展的重要因素。特别是固态器件、大规模微波集成、数字信号处理技术及计算机应用的普及赋予航天器天线更多的内容和更大的潜能。新天线、新功能的设计和实现需要航天器天线研制者拓宽专业知识、在设计理念和设计方法等诸多方面不断提高和更新，因此再学习已成为工作不可缺少的内容。本书也就是应此要求而编写的。

本书特点概括有以下四点：

第一，重视基础和物理概念的阐述。天线设计的基本原理是以经典的电磁场理论为基础的。航天器天线设计要求广泛的知识和扎实的专业理论。没有扎实的理论就谈不上创新性设计，更谈不上具备处理复杂工程问题的能力。因此，本书在讲述过程中力求注意物理概念和机理的阐述，当然现代设计方法离不开数学模型和数值仿真与计算，讲述中不拘泥于冗长的数学推导，而是讲思路、突出其概念和基础理论。

第二，突出一个“新”。迄今为止尚未见到一本系统介绍航天器天线的技术专著。随着空间技术的发展，飞行器天线在航天领域越来越具重要性。本书力求系统全面地介绍航

天器天线理论与技术，内容不局限于教科书中讲述的内容，而是结合最近二三十年间空间技术和卫星应用的发展，重点介绍现代航天器天线领域中的新技术、新概念和新成果。本书的新还体现在重点介绍现代设计方法，不重复传统的设计理念。因为高性能的现代航天器天线仅靠传统方法是设计不出来的，必须加重解析模拟和计算机辅助方法。利用理论方法和数学模型研究天线，使天线设计更加精确、更加完美。

第三，突出工程及应用。理论方法建立起来的设计必须通过实验予以验证，特别是对耐受航天特殊环境的验证；另外航天产品的可靠性、寿命设计与验证也是航天工程实现不可少的。本书提出了卫星天线热、机、电一体化集成设计技术、卫星天线集合的电磁兼容设计技术、卫星天线最优布局的电磁 CAD 模装技术、天线卫星工程化内容和程序，这都是工程实践中新的设计理念和方法。

第四，本书适用对象面宽。在读的硕士生、博士生、从事航天天线设计和总体的系统工程技术人员，都可根据自己的情况对教材进行适合个人的取舍。同时本书也可作为航天总体工程的技术参考。

本书分为相对独立的上、下两册。上册讲述航天器天线理论与设计，下册主要讲述航天器天线工程与新技术。它力求在理论性、实用性、系统性和方向性紧密结合的基础上，重点突出工程技术的实用性和先进性。本教材谈及了国际和国内卫星天线的一些成果和经验，其中也包括了本人 40 多年从事航天器天线工作的经验和成果。

本书共有 20 章，第 1、2、3、4 章讲述应用电磁场基础理论和现代航天器天线分析与设计的基本理论与方法。第 1

章考虑到部分对象的实际情况，首先介绍场量与算子及电磁场基本原理，这是学习本书必须具备的数学和物理概念。第2章以分离变量法和格林函数法为重点介绍航天器天线及其电磁问题中常采用的基本数学物理方法。第3章以泛函与变分入手，介绍电磁场及天线问题的计算机数值方法基础，其中有限元法、差分法、矩量法都是现代天线设计常用方法。第4章讲述了天线的一般专业概念，天线的性能及辐射参数，场源之间的变换关系。其后的6章按其辐射的基本形式，按章分门别类地讲述卫星上应用较多的天线的辐射机理和设计。第5章讲述反射面天线性能与设计，其中包含了馈源的分析与设计。第6章以辐射积分为出发点阐述利用计算机的反射面天线的现代分析与设计技术。在此基础上讨论了零交叉极化的双偏反射面天线和高效赋形双反射面天线的设计。第7章是透镜天线，介绍透镜天线的辐射机理、性能和参数设计。第8章是宽带天线，介绍了几种UHF/S/C频段常用的宽带天线形式和宽频带馈电与匹配技术。第9章为新型螺旋天线，从周期结构的观点分析螺旋结构上的波、模特性，揭示螺旋天线新的应用。第10章为微带天线，分别从传输线法、腔模理论法和全波分析法阐述微带天线的辐射机理和设计，讨论宽带设计和微带阵列。第11章是阵列天线，介绍线阵、面阵和共形阵的基本辐射特性，讨论相控阵天线的馈电、扫描、多波束等问题以及阵列的优化设计。第12章是天馈无源微波器件，讨论在收发信机与天线间的微波（射频）传输，列出了常用的微波传输线、连接器、功率分配与合成器、各种射频终端等无源微波器件。第13章是航天器天线设计新概念，从航天器天线总体和系统角度讨论航天器天线问

题。首先阐明了航天器天线的设计特点和研制方法，航天器天线热、机、电计算机一体化并行集成设计，航天器天线集合的EMC 问题，星体上天线辐射方向图，天线集合的电磁CAD 模装技术和最优布局以及卫星工程化问题等。第 14 章航天测控天线，本章介绍了典型的卫星测控天线的设计与应用，其中包括近地轨道、地球同步静止轨道及再入轨道段的卫星测控天线。GPS 作为卫星测控的补充也列入讨论之中。针对目前陆基测控网面临的问题和困难，简要地讨论了天基测控网的航天器测控天线问题。第 15 章是地球同步轨道通信卫星天线，第 16 章是航天多波束天线，这两章重点是针对通信卫星与卫星通信技术阐述赋形区域波束、点波束、多点波束和扫描波束覆盖的天线设计 ;对波纹喇叭和反射面多波束天线给出了一些简便而不失工程应用精度的设计公式。并从发展角度讨论航天有源相控阵天线的相关问题。第 17 章是航天微波遥感天线，以中国“神舟”飞船多模态微波遥感天线为例，介绍微波遥感天线的设计及相关问题，包括航天高精度反射面天线的实现，天线热、机、电一体化并行设计，反射面的对齐与变形的光测技术，主波束效率的分析计算。本章还介绍微波成像雷达的 SAR 天线。第 18 章是航天器的数据传输天线。本章讲述近地轨道卫星上目前应用最多的几种固定覆盖的赋形波束数传天线的设计和性能，还介绍了适应高速数传需求及天基立体信息网的以定向多波束相控阵天线为代表的新型数传天线。面对航天器在通信抗干扰、波束在轨重构、多功能快捷变以及自主控制方面的需求，第 19 章专门从阵列天线与数字信号处理技术结合入手，阐述了航天智能天线的理论基础。第 20 章是航天器

天线的电测。结合整星无线系统的电测介绍以近场测量为主的航天器天线测量新技术、航天天线特有的一些测量。每章中都加入一些应用实例。

能完成这本书的写作，首先要感谢我的工作单位中国空间技术研究院给予我参加多项航天工程的机会，在 40 年的实践中参加和负责了 10 多个重点卫星型号的天线研制和国家重点预研课题，我从中得以进步和提高，并积累了一些知识和经验，为我写这本书奠定了基础。另外要感谢中国空间技术研究院人力资源部的领导和同志们，特别要感谢教育委员会主任谭维炽教授的帮助和鼓励，否则，这本书是不可能完成的。还要感谢北京大学龚中麟教授、北京航空航天大学吕善伟教授、23 所姜新发研究员、504 所高选正研究员和 514 所曾令儒研究员，他们对书稿进行了详细的审阅，为书稿修改提出了宝贵的意见。我的学生们为本书的录入和编排给予了很多的帮助，一并表示感谢。最后还应感谢我的丈夫何志勤研究员在各方面给予我的支持和关爱。

本人学识有限，时间仓促，教材的体系、选材以及教材本身定有不妥和错误之处，恳请专家、同行及广大读者批评指正，对此深表谢意。

叶云裳

2006 年 8 月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　　录

第 1 章　应用电磁场理论基础 …… (1)
1.1　**场量与算子** …… (1)
1.1.1　**矢量及其运算** …… (1)
1.1.2　**场量与算子** …… (3)
1.2　Maxwell **方程和电磁波的辐射** …… (6)
1.2.1　Maxwell **方程** …… (6)
1.2.2　**电磁场的波动性** …… (10)
1.3　**时谐电磁场** …… (14)
1.3.1　**正弦电磁场的复数表示** …… (14)
1.3.2　**复数形式的麦克斯韦方程组** …… (15)
1.3.3　**波动方程的复数表示** …… (15)
1.3.4　**无界空间中磁矢位和电标位的复数形式解** …… (16)
1.4　**电磁场的若干定理** …… (17)
1.4.1　**二重性原理** …… (17)
1.4.2　**唯一性原理** …… (19)
1.4.3　**场的相似变换原理** …… (19)
1.4.4　**镜像原理** …… (20)
1.4.5　**感应定理** …… (21)
1.4.6　**互易性原理** …… (21)
1.5　**电磁问题解的构成** …… (22)
1.5.1　**磁矢位** $\vec{A}$ **和电矢位** $\vec{F}$ …… (22)
1.5.2　Z **向横电场和** Z **向横磁场的空间场表示** …… (23)
第 2 章　天线与电磁问题的数学物理方法 …… (29)
2.1　**分离变量法** …… (29)
2.1.1　**直角坐标系亥姆霍兹方程的解** …… (29)
2.1.2　**圆柱坐标系亥姆霍兹方程的解** …… (34)
2.1.3　**球坐标系亥姆霍兹方程的解** …… (37)
2.1.4　**本征值与本征函数** …… (41)

2.2 自由空间波动方程解的讨论 …… (41)
2.2.1 直角坐标系波动方程解的构成 …… (42)
2.2.2 柱面坐标系波动方程解的构成 …… (42)
2.2.3 球坐标系波动方程解的构成 …… (44)
2.3 波的变换及散射问题 …… (47)
2.3.1 平面波变换成柱面波的表示 …… (47)
2.3.2 圆柱坐标原点的平移变换 …… (48)
2.3.3 平面波与球面波的变换 …… (49)
2.3.4 柱面波到球面波的变换 …… (50)
2.3.5 球面 *Hankel* 函数的相加定理 …… (50)
2.3.6 波的散射问题 …… (52)
2.4 格林函数法 …… (56)
2.4.1 标量源的格林函数 …… (56)
2.4.2 并矢格林函数法 …… (61)
2.4.3 辐射场区分析 …… (69)
第 3 章 天线及电磁问题的数值方法 …… (73)
3.1 概述 …… (73)
3.2 泛函与变分 …… (74)
3.3 尤拉方程 …… (77)
3.3.1 单变元函数的泛函变分 …… (77)
3.3.2 多元函数的泛函变分 …… (78)
3.4 变分问题的直接解法——里兹法 …… (80)
3.5 有限差分法 …… (85)
3.5.1 差分格式 …… (85)
3.5.2 差分方程组的解法 …… (86)
3.5.3 边界条件的近似处理 …… (88)
3.6 有限元法 …… (90)
3.6.1 有限元法的基本概念 …… (90)
3.6.2 一维问题的有限元法 …… (91)
3.6.3 有限元法小结 …… (94)
3.7 矩量法 …… (95)
3.7.1 矩量法的基本原理 …… (95)
3.7.2 基函数和权函数的选择 …… (97)

3.8 边界元法…… (99)
3.8.1 边界积分方程…… (100)
3.8.2 积分方程的离散化方法…… (101)
3.8.3 求解方程组…… (102)
3.9 最优化方法概论 …… (103)
3.9.1 概述…… (103)
3.9.2 最优化问题的数学模型与分类…… (104)
3.9.3 优化算法的基础知识…… (106)
3.9.4 计算机优化方法举例…… (108)
3.9.5 最优化方法在无线电工程设计中的应用…… (110)
第 4 章 天线的基本特性 …… (113)
4.1 天线辐射性能的特征量 …… (113)
4.1.1 辐射源的场区…… (113)
4.1.2 天线功率传输…… (114)
4.1.3 典型的天线辐射性能参数…… (114)
4.2 辐射源与场的基本关系 …… (124)
4.2.1 场的等效源原理…… (124)
4.2.2 电流元辐射…… (125)
4.2.3 磁流元辐射…… (128)
4.2.4 线源辐射…… (129)
4.2.5 口径辐射…… (133)
4.2.6 阵列辐射…… (135)
4.3 口径面天线辐射的基本公式 …… (137)
4.3.1 克希荷夫公式…… (137)
4.3.2 平面口径上辐射场计算…… (140)
第 5 章 反射面天线及馈源 …… (151)
5.1 主焦抛物反射面天线 …… (151)
5.1.1 基本几何特性…… (151)
5.1.2 基本辐射特性…… (152)
5.1.3 波束偏离因子…… (154)
5.1.4 口径遮挡…… (155)
5.1.5 随机表面误差的影响分析…… (157)
5.2 对称双反射面天线系统 …… (158)

5.2.1 对称双反射面天线的优缺点 …… (158)
5.2.2 卡氏天线的几何及设计 …… (159)
5.2.3 等效抛物面概念 …… (162)
5.3 反射面天线的效率分析 …… (163)
5.3.1 馈源效率因子 …… (163)
5.3.2 反射面效率因子 …… (165)
5.4 偏置抛物面天线 …… (166)
5.4.1 偏置抛物面的优缺点 …… (166)
5.4.2 偏置抛物面的几何 …… (167)
5.4.3 投影口径场 …… (170)
5.4.4 辐射场的积分 …… (173)
5.4.5 偏置馈源 …… (175)
5.5 一次馈源天线 …… (176)
5.5.1 馈源方向图和口径面场分布 …… (176)
5.5.2 极化定义 …… (177)
5.5.3 偶极子照射与抛物面口径场 …… (179)
5.5.4 简单的主焦喇叭馈源 …… (182)
5.5.5 多模喇叭馈源 …… (196)
5.5.6 宽带混合模喇叭 …… (200)
5.5.7 偏置抛物面的一次馈源 …… (206)
5.5.8 跟踪馈源 …… (210)
5.5.9 一次馈源的辐射方向图 …… (211)
第 6 章 反射面天线的现代分析与设计技术 …… (214)
6.1 反射面天线辐射的数学模型 …… (214)
6.2 辐射积分的 Rusch 法 …… (216)
6.3 辐射积分的 Jacobi－Bessel 法 …… (221)
6.4 辐射积分的 Fourier－Bessel 法 …… (227)
6.5 单反射面天线设计 …… (231)
6.5.1 口径照明与馈源泄漏 …… (231)
6.5.2 横向馈源偏焦与 Petzval 表面 …… (233)
6.5.3 对称单反射面天线远场幅度的综合 …… (235)
6.6 双反射面天线系统设计 …… (237)
6.6.1 卡氏(Cassegrain)反射面几何关系 …… (237)

6.6.2 偏置卡氏天线系统的设计 …… (239)
6.7 对称双赋形反射面天线系统的综合 …… (243)
6.8 具有零交叉极化的双偏反射面系统 …… (247)
第 7 章 透镜天线 …… (252)
7.1 概述 …… (252)
7.1.1 透镜天线的优缺点 …… (252)
7.1.2 透镜天线的基本工作原理 …… (252)
7.2 单折射面介质透镜的表面方程及其分区 …… (254)
7.2.1 内表面方程 …… (254)
7.2.2 外表面方程 …… (255)
7.2.3 透镜厚度和分区 …… (255)
7.3 波导透镜 …… (257)
7.3.1 外表面为平面,变换在内表面 …… (257)
7.3.2 内表面为球面,变换在外表面 …… (257)
7.3.3 金属平板透镜 …… (258)
7.3.4 透镜分区的带宽 …… (259)
7.4 镜面的反射与损耗 …… (260)
7.4.1 介质透镜界面反射 …… (260)
7.4.2 波导透镜界面反射 …… (262)
7.5 透镜的广角扫描 …… (263)
7.5.1 柱面金属透镜的扫描 …… (263)
7.5.2 龙伯(Luneburg)透镜 …… (267)
7.5.3 广角扫描——靴带透镜 …… (269)
7.6 透镜辐射场计算 …… (270)
7.6.1 透镜天线口径场计算 …… (270)
7.6.2 辐射场计算 …… (271)
第 8 章 宽频带天线 …… (273)
8.1 概述 …… (273)
8.1.1 相对带宽和倍频带宽 …… (273)
8.1.2 展宽天线带宽的主要方法 …… (273)
8.2 平面结构的宽带天线(或频率无关天线) …… (275)
8.2.1 频率无关天线的基本条件 …… (275)
8.2.2 平面等角螺旋天线 …… (276)

8.2.3 阿基米德平面螺旋天线 …… (278)
8.3 圆锥等角螺旋天线 …… (280)
8.3.1 圆锥等角螺旋天线的几何方程 …… (280)
8.3.2 圆锥螺旋辐射特性分析 …… (281)
8.3.3 圆锥等角螺旋天线设计 …… (286)
8.4 对数周期天线 …… (288)
8.4.1 对数周期偶极天线阵(LPDA)的几何 …… (288)
8.4.2 对数周期偶极阵的馈电 …… (289)
8.4.3 对数周期天线的三个区域 …… (290)
8.4.4 对数周期偶极天线阵设计 …… (291)
8.5 天馈匹配变换技术 …… (295)
8.5.1 开槽式平衡变换器 …… (295)
8.5.2 宽频带匹配原理 …… (297)
8.5.3 常用阶梯阻抗变换器 …… (300)
8.5.4 渐变线阻抗变换器 …… (304)
第9章 新型螺旋天线 …… (311)
9.1 螺旋天线的辐射数学模型 …… (311)
9.1.1 无限长螺旋线的电磁场解 …… (311)
9.1.2 螺旋 $k-\beta$ 图及波模分析 …… (315)
9.2 轴模螺旋天线 …… (317)
9.2.1 轴模螺旋天线的结构参数 …… (318)
9.2.2 螺旋线上电流分布及辐射模型 …… (318)
9.2.3 轴模螺旋行波电流辐射场的计算 …… (319)
9.2.4 理想圆极化条件和最大方向性系数 …… (321)
9.2.5 端射模螺旋天线的工程参数 …… (323)
9.3 快波模螺旋天线 …… (325)
9.3.1 从 $k-\beta$ 图看背射模辐射 …… (325)
9.3.2 快波辐射及赋形波束设计 …… (326)
9.3.3 螺旋天线快波辐射的数学模型——传播常数的特性方程 …… (327)
9.3.4 复传输模的辐射方向图 …… (329)
9.3.5 数值计算和天线的主要特性 …… (331)

需要全本请访问 www.ertongbook.com