- 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(下)

——工程与新技术

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。

目　录

第 13 章　现代航天器天线设计新概念 …… (495)

13.1　**航天器天线概述** …… (495)

13.1.1　**航天器天线的分类** …… (496)

13.1.2　**航天器天线的技术特点和主要技术要求** …… (497)

13.1.3　**航天器天线的设计内容** …… (498)

13.1.4　**航天器天线的研制方法** …… (500)

13.2　**航天器天线的 EMC 问题** …… (503)

13.2.1　**航天器天线集合的电磁干扰现象描述** …… (503)

13.2.2　**EMC 分析预测** …… (506)

13.2.3　**EMC 设计与工程实施** …… (511)

13.3　**星载天线辐射方向图的分析与计算** …… (512)

13.3.1　**GTD 的基本理论和公式** …… (513)

13.3.2　**多棱柱卫星体上天线辐射方向图计算** …… (529)

13.3.3　**圆柱星体上天线滚动面辐射场计算** …… (536)

13.3.4　**散焦区场的计算——等效电磁流法** …… (541)

13.4　**天线的卫星工程化问题** …… (544)

13.4.1　**卫星工程化的基本内容** …… (544)

13.4.2　**航天器天线的结构** …… (545)

13.4.3　**航天器天线的电、机、热一体化集成设计** …… (547)

13.4.4　**星载天线的电磁 CAD 模装技术** …… (555)

13.4.5　**航天器天线的电性测试和 AIT 测试** …… (559)

13.4.6　**航天器天线的环境试验** …… (560)

13.4.7　**可靠性工作** …… (565)

第 14 章　卫星测控天线 …… (567)

14.1　**卫星测控系统概述** …… (567)

14.2　**卫星测控天线的主要技术要求** …… (568)

14.3　**UHF/VHF 频段的星载测控天线** …… (570)

14.3.1　**UHF/VHF 卫星测控天线系统设计** …… (570)

14.3.2 单元天线设计 …… (571)
14.3.3 二单元天线系统及组阵的星体方向图 …… (574)
14.4 S 频段统一载波系统(USB)的星载测控天线 …… (575)
14.4.1 USB 天线系统考虑 …… (575)
14.4.2 USB 单元天线设计 …… (576)
14.4.3 USB 天线网络设计 …… (582)
14.4.4 USB 测控天线的星体方向图 …… (582)
14.5 C 频段统一体制的星载测控天线 …… (583)
14.5.1 地球同步轨道自旋稳定卫星测控天线 …… (584)
14.5.2 同步静止轨道对地三轴稳定卫星的测控天线 …… (585)
14.6 再入返回段卫星测控天线 …… (586)
14.6.1 再入环境及卫星测控天线设计 …… (586)
14.6.2 低仰角电磁波的传输和抗衰落 …… (589)
14.7 天基(GPS)测控资源 …… (590)
14.7.1 星载 GPS 接收天线 …… (590)
14.7.2 抑制多径效应的星载 GPS 天线 …… (592)
14.8 跟踪与数据中继卫星(TDRSS)天线系统 …… (594)
14.8.1 陆基测控网面临的挑战 …… (594)
14.8.2 TDRSS 的空间段布局及其天线 …… (596)
14.8.3 TDRSS 天线关键技术 …… (600)
第 15 章 地球同步静止轨道通信卫星天线 …… (603)
15.1 通信卫星天线概述 …… (603)
15.1.1 分类 …… (603)
15.1.2 星载通信天线的一般要求 …… (604)
15.2 自旋稳定卫星通信消旋天线 …… (606)
15.2.1 机械消旋定向波束天线 …… (606)
15.2.2 电子消旋定向波束天线 …… (608)
15.3 同步静止轨道卫星覆球波束和波纹喇叭 …… (613)
15.3.1 概述 …… (613)
15.3.2 波纹喇叭的工程设计 …… (614)
15.3.3 设计应用举例 …… (619)
15.3.4 双频段共用馈源技术 …… (621)
15.4 赋形波束反射面通信天线 …… (622)

15.4.1 概述……（622）
15.4.2 反射面多馈源赋形波束天线设计……（624）
15.4.3 反射面多馈源赋形波束通信天线应用实例……（629）
15.4.4 覆盖中国版图的赋形等化波束天线设计……（638）
15.4.5 赋形双反射面设计……（649）
15.5 航天器反射面天线的材料和结构……（652）
15.5.1 航天器反射面天线在结构和材料上的特殊要求……（652）
15.5.2 航天器反射面结构材料……（652）
15.5.3 航天器反射面天线结构……（654）
15.5.4 大型可展开天线的需求和结构……（661）
15.6 卫星通信的微波网络……（662）
15.6.1 波导型阻抗变换器……（663）
15.6.2 微波滤波器……（665）
15.6.3 微波正交模变换器……（666）
15.6.4 微波多工器……（669）
15.6.5 微波极化器……（674）
第 16 章 航天多波束天线 ……（678）
16.1 概述……（678）
16.1.1 航天多波束天线的应用前景……（678）
16.1.2 航天多波束天线(MBA)的形式和组成 ……（679）
16.2 反射面多波束天线……（681）
16.2.1 反射面多波束天线的设计……（681）
16.2.2 时分多址(TDMA)工作模式和多点波束 ……（684）
16.2.3 卫星上交换的时分多址(SS－TDMA)系统 ……（688）
16.2.4 共焦双偏抛物面加阵列馈电的有限电扫描天线……（690）
16.2.5 Ka 频段跳变多波束天线 ……（693）
16.3 卫星多波束天线的实际应用……（694）
16.3.1 反射面多波束卫星通信天线……（695）
16.3.2 透镜多波束卫星通信天线……（695）
16.3.3 阵列多波束卫星通信天线……（698）
16.4 卫星多波束天线设计新技术……（699）
16.4.1 多波束天线的类型……（699）
16.4.2 单反射面馈源组的多波束天线……（700）

需要全本请访问 www.ertongbook.com

16.4.3 广角扫描赋形介质透镜天线…… (709)
16.5 多波束天线辐射特性…… (716)
16.5.1 方向图形状…… (716)
16.5.2 波束扫描…… (718)
16.5.3 设计自由度 …… (719)
16.5.4 干扰抑制性能(即零值问题)…… (721)
16.5.5 自适应抗干扰的性能估计…… (724)
16.6 多反射面的多波束通信天线…… (726)
16.6.1 多波束与多反射面的几何…… (728)
16.6.2 多波束性能分析…… (730)
16.6.3 应用举例…… (732)
16.7 航天有源相控阵多波束天线…… (738)
16.7.1 概述…… (738)
16.7.2 可展开、模块化的有源相控阵多波束卫星天线 …… (740)
第 17 章 航天微波遥感天线 …… (750)
17.1 概述…… (750)
17.2 多模态微波遥感器天线电性设计…… (752)
17.2.1 系统概述和天线主要技术规范…… (752)
17.2.2 高度计天线和散射计天线反射面设计…… (755)
17.2.3 散射计天线的主要部件设计…… (756)
17.2.4 辐射计天线电性设计…… (760)
17.3 高精度星载毫米波反射面天线设计与实现…… (764)
17.3.1 反射面形面偏差和天线结构系统的均方根偏差…… (764)
17.3.2 航天天线系统的增益损失及形面公差分配…… (766)
17.3.3 结构设计与工艺实现…… (767)
17.4 高精度毫米波反射面天线在轨热变形分析与验证…… (768)
17.4.1 反射面机、热、电的一体化设计…… (768)
17.4.2 反射面天线变形的光测技术…… (770)
17.5 微波辐射计天线的主波束效率…… (772)
17.5.1 主波束效率的近似模型和计算…… (773)
17.5.2 主波束效率计算流程…… (777)
17.6 星载合成孔径雷达天线(SAR 天线) …… (778)
17.6.1 合成口径雷达(SAR)天线概念 …… (779)

17.6.2 与 SAR 天线相关的特点 …… (782)
17.6.3 星载 SAR 系统及 SAR 天线 …… (784)
17.6.4 SAR 天线的现状和未来发展趋势 …… (792)
17.6.5 SAR 的数据传输 …… (797)
第 18 章 星载数传天线 …… (802)
18.1 覆盖地球的理想波束 …… (802)
18.1.1 地球匹配波束 …… (802)
18.1.2 覆盖增益的工程近似模型 …… (803)
18.2 地球匹配波束赋形反射面天线 …… (804)
18.2.1 地球匹配波束赋形反射面的数学模型 …… (804)
18.2.2 赋形反射面天线辐射特性 …… (806)
18.2.3 赋形反射面天线的设计举例 …… (809)
18.3 地球匹配赋形波束的线性行波天线 …… (810)
18.3.1 背射双线螺旋天线的地球匹配赋形波束设计 …… (811)
18.3.2 设计举例 …… (813)
18.3.3 赋形波束的阵列综合方法 …… (816)
18.3.4 波导快波组合天线的赋形波束 …… (818)
18.4 圆阵天线 …… (828)
18.4.1 星载数传天线的现状和发展趋势 …… (828)
18.4.2 传统圆环阵方向图函数的分析 …… (830)
18.4.3 圆环阵相位模和幅度模分析 …… (833)
18.4.4 圆阵的激励 …… (844)
18.5 高增益、多波束、广域电扫描数传天线 …… (847)
18.5.1 对地传输模式 …… (847)
18.5.2 圆阵的周向扫描实现 …… (848)
18.5.3 圆环阵多波束扫描天线 …… (854)
18.6 航天数传天线的技术展望 …… (857)
第 19 章 航天器智能天线理论基础 …… (863)
19.1 基本术语和定义 …… (864)
19.2 智能天线(Smart Antennas)基础 …… (866)
19.2.1 天线阵的系统性能—信噪比 …… (866)
19.2.2 平面波导引矢量(Steering Vector)与阵输出 …… (868)
19.2.3 信号模型及阵相关矩阵 …… (871)

19.2.4 特征值的分解…… (874)
19.3 信源、干扰、噪声与信噪比…… (875)
19.3.1 观察方向的源…… (876)
19.3.2 定向干扰…… (877)
19.3.3 随机噪声环境…… (877)
19.3.4 信噪比…… (878)
19.4 零控波束形成器…… (879)
19.5 最佳波束形成器…… (880)
19.5.1 无约束的最佳波束形成器…… (880)
19.5.2 带约束的最佳波束形成器…… (881)
19.5.3 最佳波束形成器的输出信噪比(SNR)和阵增益 … (882)
19.6 最小均方误差(LMS)的波束形成器 …… (885)
19.7 波束空间处理(Beam Space Processing)…… (886)
19.7.1 最佳波束空间处理器…… (889)
19.7.2 广义的边瓣对消器…… (890)
19.7.3 后波束形成的干扰对消器…… (892)
19.7.4 后波束干扰对消器(PIC)与单元空间处理器(ESP)之比较…… (904)
19.8 自适应阵列天线…… (904)
19.8.1 概述…… (904)
19.8.2 干扰零对消方法及其对辐射方向图的影响…… (907)
19.8.3 数字波束形成天线…… (914)
第 20 章 航天器天线的电测 …… (929)
20.1 概述…… (929)
20.1.1 天线电测的定义和内容…… (929)
20.1.2 航天器天线的电测…… (931)
20.2 紧缩场测量技术…… (932)
20.2.1 紧缩场…… (932)
20.2.2 紧缩场测试需要考虑的问题…… (934)
20.2.3 紧缩场的实验鉴定…… (936)
20.3 平面近场测量技术…… (938)
20.3.1 平面近场测量的基本原理 …… (939)
20.3.2 平面近场测量的发展过程…… (940)

20.3.3 探针补偿的数学分析及近—远场变换的数学模型 …… (941)
20.3.4 近场测量设备及过程 …… (948)
20.3.5 平面近场测量的误差分析 …… (950)
20.4 球形近场测量技术 …… (960)
20.4.1 电磁场的球面波模展开 …… (960)
20.4.2 传输公式 …… (964)
20.4.3 探针校正 …… (969)
20.4.4 测试天线发射系数 T_{smn} …… (973)
20.4.5 测试天线辐射参数 …… (977)
20.4.6 球形近—远场变换的数值分析 …… (979)
20.5 航天器天线及微波器件的真空微放电效应及检测 …… (984)
20.5.1 电子二次倍增产生的基本条件和特点 …… (985)
20.5.2 空间大功率微波系统电子二次倍增效应的控制 … (987)
20.5.3 航天天线及微波器件的二次电子倍增效应的测试 …… (990)
20.5.4 多载波情况试验峰值电压和微放电试验 …… (992)
20.6 航天天线几个特殊参量的测量 …… (995)
20.6.1 双极化天线的测量 …… (995)
20.6.2 电轴和指向测定 …… (1001)
20.6.3 圆极化增益测量 …… (1003)
20.6.4 辐射相位中心的测定 …… (1005)

第 13 章　现代航天器天线设计新概念

用电的方法进行通信开始于 1844 年电报的发明和 1878 年电话的开始使用。在这些通信系统中电信号是沿着连接发送器和接收器的双线传输线传送的。与此同时 Maxwell 和其他学者建立了电磁波辐射的理论基础。1897 年马可尼首次获得一个完整的无线电报系统专利，这奠定了无线通信的基础。在一个无线通信系统中要将通信信号（信息）从发信端向空间发射出去或从空间接收进来，这都要靠一种专门设备，人们把这种装置通称为天线。广义而言，天线是电磁能量的转换器。它是把电磁导波能量（比如传输线中、发射机内……）按其要求转换成空间电磁波或将空间电磁波按其要求转换成电磁导波能的转换设备。另外，天线可当成是一个无线电系统的终端（常称为射频终端）。天线的设计归根到底就是要按要求最有效地进行电磁能量的转换。

本章以现代航天器天线工程为背景阐述航天器天线设计新概念。从航天器天线的基本技术特点出发，以航天器天线电、机、热一体化的并行集成设计原则为指导，多层面阐述了航天器天线集合的电磁兼容性（EMC）设计；在利用电磁高频近似预估天线星体方向图基础上，提出了电磁 CAD 模装技术，以实现天线集合的星体最优化布局；从航天工程要求出发，提出了天线的卫星工程化内容和程序。这些新概念是指导现代航天器天线最优设计的新方法，这对提高航天器天线研制水平和产品质量，缩短研制周期，降低研制成本将会发挥更大的作用。

13.1　航天器天线概述

航天器天线就是装载在航天器上的天线。航天器诸如人造卫星、宇宙飞船、空间站、航天飞机、深空探测器、各种导弹和火箭等，凡是按要求完成预定任务的在外层空间运动的物体都可称为航天器。航天器的空间活动中要进行空间与地面、航天器之间（空间与空间，星座间）乃至深空或星际间的通信及各种信息的无线传输。航天器天线是为这些信息的空间无线传输构筑相应的无线传输通道。信息无线传输过程中承担这种空间波与导波场间的电磁能量转换的设备就是航天器天线。航天器天线不仅参与无线信道的建立，还参与了信号的传递和信号的处理，特别在现代空间信息系统中后者的作用日渐增强。航天器天线的性能

好坏直接关系到整个系统工作性能乃至航天器任务的完成。

13.1.1　航天器天线的分类

由于航天器任务及其用途多种多样,航天器平台和有效载荷的形式各异,因此航天器天线也是多种多样的,一般可按以下几种方式进行分类。

(1) 按航天器舱段及用途分类有:完成航天器遥测、遥控、跟踪及应答与信标等功能的服务舱或平台天线;完成航天器预定任务如通信、TV 转发、数据及图像信息发送、遥感信息接收与发送等功能的为有效载荷天线;航天器返回时完成测控、跟踪、通信等任务的为返回舱天线。

(2) 按工作频段分类有:短波、超短波、L 波段、S 波段、C 波段、X 波段、Ku、Ka 乃至毫米波、亚毫米波等天线。

(3) 按安装方式分类有:附着于航天器主体结构上的体装天线,又可分为一般体装天线、低剖面天线和平装天线;利用机构将天线伸展于航天器主体结构之外的可伸展天线和相对载体可转动的扫描天线。

(4) 按工作模式分类有:发射天线、接收天线或收/发共用天线,连续工作模式和间断工作模式天线;连续波工作天线和脉冲波工作天线;无源和有源天线;直接接收天线和信号处理天线等。

(5) 按波束分类有:全向性天线,比如一般的测控跟踪天线;半球波束天线,比如一般低轨三轴稳定卫星对地覆盖天线;定向性天线,比如扇形波束天线、铅笔波束天线及点波束天线;赋形波束天线,比如对地匹配波束天线,覆盖指定服务区的天线;固定波束天线与可动波束天线,可动波束天线又可分为电扫描与机械扫描天线,自跟踪天线;可变波束天线,比如按其需要改变对地面覆盖波束;单波束和多波束天线,等等。

(6) 按天线形式分类:有天线尺度仅几公分的,也有展开起来几十米的大天线。有由一个单元构成的天线,也有由上千个甚至更多单元构成的阵列天线。从天线种类分,有线性天线、阵列天线和面天线等。其中每一类天线又可分为若干种,比如面天线有反射面天线(主焦、双反、正馈、偏置、双栅反射面、馈源阵列反射面、赋形反射面……),喇叭天线(角锥、圆锥、扇形喇叭、多模喇叭和波纹喇叭等),透镜天线(介质透镜、波导透镜、球透镜,还有分区与不分区之分)。由于航天器载体构形及尺寸不同,各种航天器功能各不相同,航天器天线更是种类繁多,形式各异。近年来阵列天线与阵列信号处理技术结合,出现的航天智能天线,在通信抗干扰、抗截获以及空间谱方法的高精度的目标定位,多目标、多功能、快捷变以及在轨再构等诸多方面为航天天线展现了崭新的应用前景。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

13.1.2　航天器天线的技术特点和主要技术要求

13.1.2.1　航天器天线的技术特点

（1）航天器天线没有一个固定的形式。不同载荷、不同载体以及不同的任务要求，航天器天线形式各异，差别很大。而且不断更新和变化是它的一大特点。

（2）航天器天线要经历严酷的力学和空间环境，环境因素直接影响其设计和性能。对航天器天线除电性能要求外，必须考虑环境因素带来对电性能、机械结构、材料特性、热特性和寿命的特殊影响及防护。

（3）执行各种任务的天线同时安装在一个航天器上构成天线集合，形成高密集、宽谱段、强信号发射和微弱信号接收同在，再加上航天器天线周围物体的散射、反射和绕射影响使其电磁环境复杂，电磁兼容性问题变得困难和不易。

（4）航天器天线的在轨不可维修性和长寿命要求，特殊的环境条件以及单点失效的工作模式均对航天天线可靠性提出挑战。高可靠要求使它从材料、元器件选择、设计、验证和研制流程都具有特殊性。

（5）从航天器具备自主控制和应变能力来看，航天器天线智能化程度要求日益提高。航天器天线的性能与系统的性能乃至整个飞行任务完成密切相关。

因此航天器天线设计越发要从系统的高度考虑，进行电、机、热的一体化并行设计。

13.1.2.2　航天器天线主要技术要求

（1）电性能要求。根据任务分析，把覆盖性能转化成天线形式及波束性能要求，涉及天线的工作频带、辐射方向图、增益、极化、阻抗匹配、功率耐受等电性技术指标上。

（2）结构（和机构）性能要求。能适应载体、能经受住各种力学环境载荷和相关的设计建造约束，结构轻量化等是航天器天线结构的普遍要求；如果天线相对载体有运动（机械扫描与跟踪），还必须保证在空间高真空环境下活动部件的正常工作。既不出现高真空冷焊现象，又不因运动造成对飞行器姿态、轨道不可接受的影响；如果天线需展开，应有相应的展开机构保障并满足相应的要求。必须保证天线空间结构尺寸的稳定和对齐。

（3）热设计要求。根据外热流及整星温度场计算，确定天线的工作环境温度范围，按其范围进行天线的各种热防护设计，使之在飞行的各种工况下保证天线的性能与功能。

(4) 空间环境防护要求。航天器天线在轨环境中会遇到真空、空间电磁辐射、离子辐射、原子氧轰击、二次电子倍增微放电击穿效应、静电电荷积累、稠密等离子体包围及失重等各种空间环境因素,航天器天线设计应能与之适应,保证其正常工作性能。

(5) 电磁兼容性要求。航天器天线装载于航天器上,不再是孤立的单个天线。航天器天线必须考虑天线之间、天线与载体(包括航天器本体和太阳翼等)间相互作用以及天线与射频设备和射频传输线、航天器内部设备与线缆间的电磁干扰问题以保证各自天线的性能、功能;保证不对航天器其他系统乃至整个航天器产生不可接受的影响。

(6) 高可靠性要求。根据航天器整体寿命和天线工作模式,把航天器天线在轨不可维修性和难于实现天线结构的冗余备份等各种限制考虑在内提出天线的寿命及可靠度要求。

(7) 特定要求。按任务需求的特殊要求,比如:抗干扰、提高信干比、改善通信质量、提高通信容量和频谱利用率,快捷变、在轨重构、自主控制等智能化要求,以适应特定任务需要。

13.1.3 航天器天线的设计内容

航天器天线应具备完成其任务使命的特殊要求,即特定的电性指标,合适的结构形式,满意的结构强度和刚度以及在空间环境下能正常工作。因此航天器天线设计仅考虑其电性能是远远不够的,它还应包括空间物理、元器件材料选择、结构刚强度甚至机构设计、气动防热设计、冷热交变及空间环境防护设计、系统电磁兼容性设计和可靠性设计等方面内容。可以说航天器天线设计是涉及多门学科的电、机、热一体化设计过程。具体地说应包括以下几个方面:

(1)电性设计。在航天器规定的姿态、轨道、空间环境和各种工作模式下,保证无线通信链路可靠畅通,对天线辐射性能的要求,归结为天线的形式和波束选择、对一些具体的电性特征参数,比如覆盖方向图、增益、极化、阻抗匹配、功率耐受和相应的射频接口等设计。

装在航天器表面的天线本身就是航天器结构的一部分,航天器表面有时又成为天线辐射的一部分,航天器外面的各种构件及设备如桁架、太阳翼等都会影响天线辐射性能。因此在天线电性设计时必须考虑天线与天线之间、天线与星体以及与大型构架和太阳翼等诸多因素的影响。航天器天线电性设计同时又包括其电磁兼容性设计。

针对天线的工作模式与工作环境进行天线功率容量设计。这包括:主动段

工作的天线要防止 20～90km 高度范围内的低气压击穿的设计；在轨飞行中对大功率发射一定要防止微波器件、组件及天线的二次电子倍增引起的微放电击穿的设计；防止静电电荷积累造成不良影响的设计；再入时要充分估计高速返回造成的高温和等离子包围对天线的影响，再入天线的防护设计及对造成通信无线电信号中断问题的对策。

（2）结构设计。天线本身要能经受住航天器各种载荷环境，保证有足够的刚度强度和机构结构的稳定性。固有基频应远离航天器载体的基频，避免耦合造成结构损坏。在天线结构设计中除进行必要的力学结构计算，初步确定其模态与应力并按其结果修改结构设计外，还必须对初样产品（新研制产品）按航天器环境试验规范完成必要的鉴定级试验以验证其性能。对于大型天线采用可展开结构，其结构设计还带有伸展机构或驱动机构，机构的可靠性和安全性是设计和验证的重点。

（3）热防护设计。这个工作一般与航天器热控分系统共同完成。对预示的工作环境温度，提出天线的热控措施，一般可分为被动式和主动式两种。目前被动式温控多采用涂层，控制其发射率与吸收率（ε 和 α）；或采用多层隔热材料包扎以隔离外界的热交换。需要时也可用热管、加热器等有源主动温控。特别是未来大型有源相控阵天线热控设计更是复杂和艰巨的，必须引入新的概念和方式。

（4）天线材料元器件选择。航天器天线恶劣的环境和高可靠性要求使对天线材料、元器件选择成为设计的一项重要内容。航天器天线需用的金属与非金属材料，其选择都必须考虑应用环境因素，几十年空间飞行积累的资料能提供较丰富的数据可供参考。包括一些特殊材料，比如，航天器反射面天线选用的具有近零膨胀系数的高强度的轻质碳纤维增强型复合材料，以及支架等结构选用具有类似性能的高强度的轻质的 Kevlar 纤维复合材料。另外为了提高天线的微放电的阈值对其材料和表面处理都有特殊的要求。天线中使用的一些介质材料，它们中有无机复合材料（如石英纤维），也有高分子聚合物（如聚酰亚胺、聚四氟乙烯），这些材料必须保证在轨寿命期内的性能稳定性（电性能、机械性能和热性能），特别是耐辐射性不能忽视。对于返回式天线烧蚀层介质材料的选择和设计应保证在再入过程中天线正常工作，尽量减少无线电黑障的影响。

（5）航天器天线在载体上的布局设计。首先是要满足结构安装及布局的各种约束条件以实现其结构兼容性，与此同时还必须考虑其最优化布局。最优化的意义是指计入航天器载体环境各种影响之后（比如天线之间、天线与星体、天线与太阳翼等其他构架），还能在满足各种约束条件下达到最优的性能。为实现

这一目的逐步形成了一种以电磁场理论为基础,计算机数值仿真为手段的天线电磁 CAD 模装技术,以达到卫星体上天线的最优化布局设计。

由上可见,航天器天线设计不仅是天线的电性设计,还要涉及其载体,要考虑轨道、姿态、力学和空间环境及相关收、发信机的特性。因此航天器天线研制首先是从机、电、热一体化设计入手,要从系统高度着眼。航天器天线设计是一个十分复杂的过程,必须采用先进的设计手段,目前计算机数值分析与仿真技术是航天器天线设计采用的主要手段。除此之外,设计过程还必须对一些重要而关键的参数与性能进行验证试验。各种验证试验是航天器天线研制必要的和有效的方法,也是最可靠最直观的一种手段。

(6) 高可靠性设计。产品的质量主要是设计出来的,因此天线的高可靠性首先是抓设计,包括可靠性指标分配、可靠性设计、失效性影响分析(FMEA)、可靠性试验与验证等内容。

(7) 硬件和软件设计。现代空间技术要求提高航天器自主控制和智能化功能,要求天线能自动跟踪目标,最大限度提高信噪比和零对消各种干扰,具有覆盖性能快捷变和在轨重构功能,并具有抗截获、保证在轨的安全性。所有这些功能的实现很大程度依靠天线的智能化。智能型天线除传统意义上的天线硬件外,天线软件就是在数字信号基础上的信号处理器。航天天线的高性能和多功能取决于天线软件。因此航天天线设计应根据要求完成相应的硬件和软件设计。

13.1.4 航天器天线的研制方法

航天器任务及载体的多样性使完成这些任务的天线形式多种多样,没有定式;航天器天线经历的各种严酷环境和对它的高性能要求,又使天线设计变得十分复杂和困难。提高设计质量是航天天线永恒的工作主题。采用先进的设计手段、充分的设计验证是航天器天线产品研制的两大环节。实现航天产业化进程,适应多任务要求,不断改进研制程序,提高研制水平和研制效率是航天工作的目标。在这样的目标下航天器天线研制形成了一套研制程序和研制方法。在研制过程中形成了以下两大特点。

13.1.4.1 计算机的数值仿真、分析与优化设计

采用计算机数值分析、综合与仿真已成为当今航天器天线设计的基本手段。从专业来看,天线的辐射问题可归结为求解电磁场边值问题。对电磁场边值问题求解不外乎以下三种方法。

(1) 解析法。建立和求解偏微分方程或积分方程,前者可用分离变数法,后

者可用变换数学法求解，但这种方法能处理的实际问题是很少的。

（2）近似解析法。当前常用的两种近似方法是以 GTD(Geometrical Theory of Diffraction)、PTD(Physical Theory of Diffraction)为代表的高频近似法和电磁场低频近似方法(常以矩量法求解)。它们在航天器天线的分析中应用较多，特别是高频近似法。除此，常用的还有微扰法和变分法等。这些方法的巧妙应用对解决某些特定问题是有帮助的。

（3）数值法。随着计算机发展和应用的普及，天线辐射问题大多可采用数值方法求解。特别是近年来出现的一些商业电磁软件，比如 Anoft－HFSS、Essemble；CST 微波工作室等已在天线及微波工程设计中发挥了作用，对航天器天线工程提供了很大的帮助和便利。除此之外，计算机的仿真分析也成为设计人员的主要工具。在进行数值解前有两个步骤：第一步是将原始方程转换成计算机能处理的形式，无非是用差分代替微分，求解差分方程；或是用有限求和代替积分变成代数方程组求解。第二步是用适当方法对新形式的方程进行数值计算。计算机和应用软件为设计者提供了比过去任何时候都更好的设计环境，但是航天器天线的设计充满挑战，航天器天线工程始终是在创新中发展，不可以完全依靠模仿，设计工作中专业人员的创造性思维才是最重要的。在航天系统性能不断提高、系统裕量日渐紧缩的情况下，最优化设计已成为航天天线不可缺少的设计内容。

13.1.4.2　充分的地面验证试验

航天器天线要达到那些高要求，确保万无一失的高可靠性，充分的地面验证试验是必不可少的。验证试验是航天器天线研制不可缺少的一个重要环节。在研制过程中已形成了严格的规范流程。在完成天线各自的设计后首先要进行电性测试以验证是否满足电性能指标和 EMC 设计。必要的验证试验有：

（1）模型实验。根据电磁场的相似变换原理，在方案设计中的天线必要时可进行扩比和缩比测试，以验证电性能与规范的符合度。这是天线研制初期常用的一种方法。

（2）辐射模型星测试(Radiating Mokup Test)。在单个天线性能达到要求，航天器构形尺寸和各天线在航天器上安装初步确定的前提下，可以进行该项试验。全尺寸辐射模型(Full scale Radiating Mockup)是卫星研制过程中与结构星(SM)、电性星(EM)和热控星(TM)并列的一种整星技术状态。它是考核星上天线系统辐射及覆盖性能的一个电性试验星。全尺寸辐射模型是高频电磁性能等效于真实卫星的一种工程模型，具体说该模型外尺寸和表面的电磁特性与真实卫星在电磁特性上完全等效。本试验是将星上天线按要求全部安装在 RM

上后,分别测试各天线在航天器(卫星)安装环境下的电性能,检验是否仍满足各自的预定要求;测试天线之间的隔离度及一些敏感点的干扰场,检验是否满足整星 EMC 要求。如果有条件也可通过试验观察与判断太阳翼对天线辐射性能的影响。测试中太阳翼应模拟轨道运行状态,观察其影响,判断是否都达到预定的要求。由于太阳翼板尺寸较大,受测试场寂静区条件所限,无法用实验来确定其影响时,可利用电磁场高频近似的方法,采用 GTD/UTD 方法进行数值分析与仿真代替该项试验验证。RM 测试目的是从系统高度检验航天器天线是否达到设计要求(含 EMC 设计),最后确定航天器在载体上的安装方式及最优布局。

(3) 环境鉴定试验。航天器天线将经历发射升空、入轨、在轨飞行或返回等全工作过程。天线安装在航天器表面或伸展至太空中。这些天线承受力学载荷和空间载荷的能力,对设计裕量、安全性和可靠性评价都必须通过试验验证。这些试验包括:力学环境鉴定试验,一般包括正弦、随机、冲击、加速度(离心)和噪声等项目;空间环境鉴定试验,一般包括热循环、热真空、热冲击等内容。对天线所使用的材料、元器件还必须事先进行抗辐照、老化等寿命试验。进行这些试验时,由于每个航天器的情况各异,运载也各不相同,试验规范不尽一样,试验内容也各有不同剪裁。试验内容和条件应遵循各航天器的环境试验规范。

(4) 特殊功能和性能实验。根据各种不同天线的任务、使命及特定的工作状态还必须增加一些特殊的验证试验项目。比如可伸展天线,地面应该验证驱动与展开机构的性能、功能及可靠性。毫米波反射面天线,应充分验证反射面在高低温交变状况下的形面精度和尺寸稳定性。对扫描天线的驱动机构应重点考核在高真空、失重环境中的摩擦力矩、真空润滑性能,同时也要认真处理冷热交变引起的变形对机构的影响等。对大功率发射的无源微波器件和天线应进行真空二次电子倍增的微放电试验。对多载波大功率收发共用天线系统应进行有源和无源交调试验验证。对控制的电子箱应充分考虑到空间环境影响的验证。

总之,地面验证试验越充分,在轨运行故障率就越低。研制者的目标是要保证天线在各个工作环境和模式下无故障地正常工作。当然受地面现有条件限制,有些试验无法进行。一方面要不断地创造良好的试验条件,因为优良的试验条件是高质量与高水平航天产品的保证。有时因任务周期所限,在没有试验条件的情况下,还是应该设法进行一些数值分析与数值仿真的工作,并不断地修改其数值仿真的精度,提高置信度。

需要全本请访问 www.ertongbook.com