

文章编号:1006-1630(2006)03-0049-07

某天线支承筒阻尼减振设计与分析

李应典^{1,2}, 王德禹¹, 张建刚², 陈昌亚²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要:为减小某卫星天线支承筒的振动,根据阻尼减振原理,采用约束阻尼层方法进行减振处理。以ZN-1丁基橡胶为粘性阻尼材料,T700S层合板为约束层,在约束层厚0.4 mm,铺层数为4的条件下,设计了三种不同铺层角的减振方案。有限元计算结果表明,在天线支承筒上附加约束阻尼层可明显降低支承筒指定点处的频率响应。在给定条件下,给出的三种方案均满足工程要求,其中以铺层角45°/-45°/0°/90°方案的效果最佳。

关键词:卫星; 天线支承筒; 阻尼减振; 约束阻尼层; 铺层角; 有限元法; 试验验证

中图分类号:O32; TH11; V41 文献标识码:A

Design and Analysis of Reducing Vibration Response by Damping to Some Antenna Support Shell

LI Ying-dian^{1,2}, WANG De-yu¹, ZHANG Jian-gang², CHEN Chang-ya²

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: To reduce the vibration response of antenna support shell for some satellite, the restricted damping layer was applied according to the theory of vibration dumping in this paper. The ZN-1 butyl rubber was used as viscous damping material and the T700S laminating plate was utilized as the restricted layer. The three schemes were given when the thickness of the restricted layer was 0.4 mm and the number of laminating layers was 4. The computation results of the finite element method showed that the restricted damping layer added on the antenna support shell could reduce its frequency response greatly. The three schemes met the requirement in engineering under the given conditions, and the layer angle was 45°/-45°/0°/90° was the best one.

Keywords:Satellite; Antenna supporting shell; Damping vibration reducing; Restricted damping layer; Layer angle; Finite element method; Test approval

0 引言

天线系统是卫星有效载荷的关键部件,其功能是实现数据的发送和接收。一般,天线通过桁架或承力筒与结构系统连接。某卫星的天线经承力筒与卫星连接。由于基础结构的动刚度、天线的构型,以及振动试验条件的综合影响,该天线顶部的横向振动响应较大。为减小天线顶部的振动响应,在不降低可靠性、不改变卫星原有设计、不明显改变整星动态特性、不显著增加结构质量的条件下,通过阻尼减

振以降低天线顶部的振动横向振动响应。

为此,本文根据理论确定了阻尼减振方案,用有限元分析比较了不同方案的频率响应,并通过试验验证阻尼减振方案的有效性。

1 阻尼减振原理

线性机械系统在简谐激励作用下的振动包括瞬态和稳态两种,相应的响应输出为瞬态响应与稳态响应。其中,瞬态振动仅在振动开始后极短的时间内才有意义。因此,振动中主要研究的是稳态振动^[1]。

在简谐力 $F \sin \omega t$ 的激励下,稳态振动的加速度响应 \ddot{x} 可表示为

收稿日期:2005-03-07;修回日期:2005-07-14

作者简介:李应典(1973—),男,硕士生,主要研究方向为空间运载器结构动力学分析与研究,工程结构的降响应设计的方法与工程应用。

$$x = \omega^2 X_0 \sin(\omega t - \phi + \pi), \quad (1)$$

式中: ω 为激振力的角频率; ϕ 为相位角; X_0 为振幅,且

$$X_0 = -\frac{X_{st}}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (2)$$

(此处, X_{st} 为在静力 F 作用下系统的静位移; λ 为频率比; ξ 为振动系统的阻尼比)。

在共振频率处,稳态振动的动力放大系数 A 可表示为

$$A(\lambda)_{\lambda=1} = X_0/X_{st} = 1/(2\xi). \quad (3)$$

阻尼减振的原理是增加振动系统的阻尼,其力学模型如图 1 所示。图中, c 为系统原有阻尼; c_1 为附加阻尼。则,增加阻尼 c_1 后的阻尼比 ξ' 为

$$\xi' = (1+v)\xi, \quad (4)$$

式中: v 为常数,且 $v = c_1/c$ 。

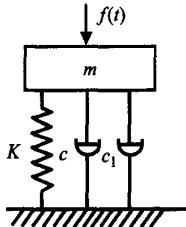


图 1 阻尼减振力学模型

Fig.1 The mechanics model of damp reducing vibration

若附加阻尼 c_1 远大于原阻尼 c ,则有 $v \gg 1$, $\xi' \gg \xi$ 。由式(3)可知,此时动力放大系数 A 将显著减小,从而可实现减振。

2 方案设计

某卫星天线支承筒采用碳纤维增强的复合材料,由缠绕法成型,其结构如图 2 所示。该筒的质量 1.78 kg, 平均厚度 1.3 mm, 上、下法兰分别厚 3,



图 2 某天线支承筒结构

Fig.2 Structure of some antenna supporting cylinder

4 mm,筒体上开有电缆走向孔,在开孔及上法兰处用高强度铝合金板进行加强。

2.1 阻尼方案

根据阻尼减振理论,附加的固体内阻尼可分为自由阻尼层和约束阻尼层两种。其中,自由阻尼层结构受弯曲振动后,将形成交变拉压应力及应变以耗散振动能;约束阻尼层结构受弯曲振动后,将产生剪切应变和剪切应力来耗散振动能。由于三层或多层布置的剪切阻尼较拉压阻尼更有效,根据该天线支承筒的结构形式和实际受力环境,故本文采用约束阻尼层方法进行减振设计^[2,3]。

2.1.1 阻尼材料

由天线支承筒的最大振动响应谐振频率 f_r ,以及确定的最佳设计参数 $(G'/f)_{opt}$,可计算粘弹性阻尼材料的剪切模量 G' 。再根据天线支承筒的环境条件确定阻尼材料的使用温度范围。同时,根据国内现有的成熟产品和阻尼材料的自身特点,约束阻尼层结构的夹心层选用 ZN-1 丁基橡胶型粘性阻尼材料。

2.1.2 约束层

根据约束阻尼结构的设计理论,为增大夹层结构的阻尼损耗因子,选择与结构层一致的 T700S 层合板作为约束层。单层厚度为 0.1 mm。

2.1.3 结构参数

二弹性层阻尼夹层结构的损耗因子 η 可表示为

$$\eta = \frac{\beta Y X}{1 + X(Y+2) + (1+\beta^2)X^2(Y+1)}, \quad (5)$$

式中: β 为粘弹性阻尼材料损耗因子; Y 为阻尼结构的几何或刚度参数; X 为阻尼结构的剪切参数。

由式(5)可知,阻尼结构的损耗因子 η 是粘弹性阻尼材料的损耗因子 β 、阻尼结构的几何参数 Y 和剪切参数 X 的函数。其中,剪切参数 X 与上下弹性层的材料性质 E 、密度 ρ 、厚度 H ,以及阻尼层的材料性能 β , G' 和厚度 H_y 有关;几何参数 Y 与上下弹性层的 E , H 有关;而粘弹性阻尼材料的损耗因子 β 又是温度和频率的函数。因此,结构损耗因子 η 是一以结构材料性能、几何参数,以及环境边界条件为参数的函数,其变参数较多。求该函数最大值的计算量大,实现不易,且损耗因子为最大时的阻尼效果并非一定最佳^[3]。

因此,实际应用中常用有限元实现有限动特性

分析。即根据结构的具体要求、边界条件、结构参数,以及夹层阻尼结构的设计方法与准则,选定数个设计方案进行有限元分析计算,可获得较好的实际效果^[4]。

2.2 减振方案

本文的天线支承筒约束阻尼减振方案是在天线支承筒外表面附加阻尼层,并在阻尼层外表面铺敷碳纤维约束层,如图3所示。其中,阻尼层材料为厚1 mm的ZN-1丁基阻尼橡胶;约束层材料为与天线支承筒本体相同的T700S层合板,单层厚0.1 mm。

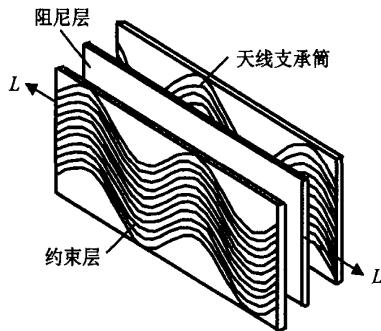


图3 约束阻尼层结构

Fig.3 Structure of the restrict damp lay

约束层的总厚度和碳纤维的铺层方向对减振效果均有不同程度的影响。根据承力筒质量的限制,取约束层的厚度为0.4 mm,铺层数为4。这样,在阻尼和约束层厚度确定的状态下,影响振动响应的因素为约束层的铺层角。

3 计算分析

根据该卫星天线支承筒的结构以及天线结构性能数据,用MSC/PATRAN和MSC/NASTRAN有限元计算程序建模并进行分析。

3.1 模型

根据阻尼减振控制原理,划分有限元单元时,以QUAD8单元模拟天线支承筒及约束层,HEX20单元模拟阻尼层,CBAR单元模拟支承筒开孔处加强边框,CONM2单元模拟天线及其消旋组件和消旋关节,RBE2单元连接模拟集中质量与结构本体的连接^[5,6]。有限元模型中QUAD8,HEX20,CBAR,CONM2,RBE2单元数相应为1 344,672,231,3,2,总节点数5 860。建立的有限元模型如图4所示。

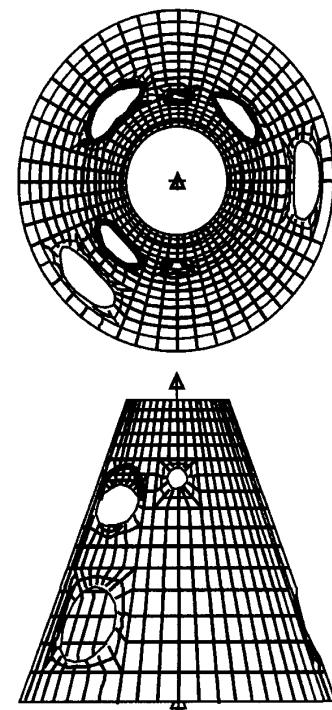


图4 天线支承筒有限元模型

Fig.4 The finite element model of the antenna supporting cylinder

3.2 材料特性

3.2.1 筒材料性能

天线支承筒的结构材料包括金属与非金属。其中,金属材料的力学性能符合有关国家标准,非金属材料T700S环氧单向板的力学特性由实验室测得,具体是:纵向拉伸弹性模量 $E_L=122.0\text{ GPa}$,横向拉伸弹性模量 $E_T=10.1\text{ GPa}$,纵横向泊松比 $\mu=0.32$,纵横向剪切弹性模量 $G_{LT}=4.30\text{ GPa}$,密度 $\rho=1.61\times10^3\text{ kg/m}^3$,纤维体积分数62%。

3.2.2 阻尼材料动力学特性

ZN-1丁基阻尼橡胶的阻尼特性由自由振动实验测得,其粘弹性阻尼损失因子与频率 f 的关系如图5所示。

3.2.3 约束层碳纤维单向板单层特性

约束层碳纤维单向板的力学性能与天线支承筒的复合材料相同。

3.3 边界条件

根据天线支承筒在卫星上的连接状态,对天线支承筒的下法兰进行固支。施力点为下法兰的几何

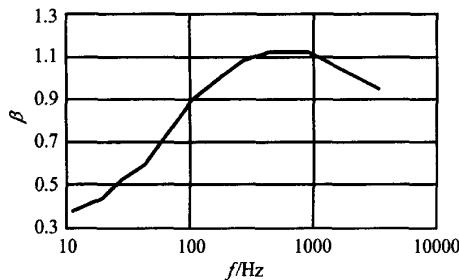


图 5 阻尼材料动力学特性

Fig.5 The dynamics attribute of damp material

中心,几何中心通过多点约束(MPC)与下法兰连接。

3.4 分析结果

为便于分析与比较,在激励点处输入为常值加速度 $1g$ (测点位置如图 6 所示)。计算结果见表 1。频率响应的比较如图 7~14 所示。

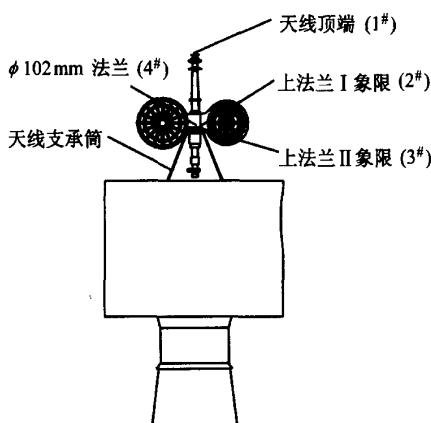


图 6 测点位置

Fig.6 The frequency response measurement point

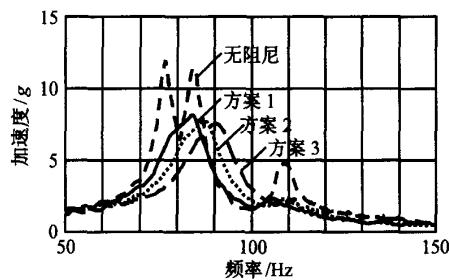


图 7 2# 点 X 向频率响应

Fig.7 Frequency response in X axis for 2# point

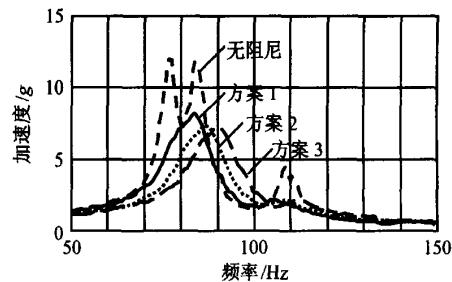


图 8 3# 点 X 向频率响应

Fig.8 Frequency response in X axis for 3# point

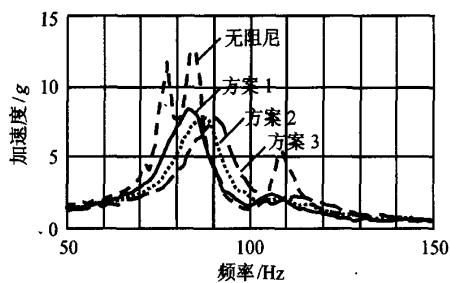


图 9 4# 点 X 向频率响应

Fig.9 Frequency response in X axis for 4# point

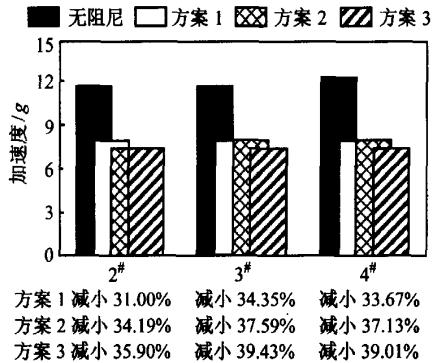


图 10 不同方案 2#, 3#, 4# 点 X 向频率响应减小的比较

Fig.10 The reducing comparison of the frequency response in X axis at different test points

由表 1 的计算结果可知,在天线支承筒上附加约束阻尼层可显著降低支承筒指定点的频率响应。三种方案均可满足工程要求,其中以方案 3 的效果最优。

4 试验验证

根据上面分析计算结果,选择约束层为 45° /

表 1 频率响应计算结果

Tab.1 Computation results of frequency response

测点位置	X 向 1g 输入			Y 向 1g 输入				
	方案实施前	方案实施后	变化	方案实施前	方案实施后	变化		
2 [#]	11.81g	方案 1	8.14g	-31.0%	12.99g	方案 1	8.07g	-37.8%
		方案 2	7.77g	-34.2%		方案 2	7.62g	-41.3%
		方案 3	7.55g	-36.0%		方案 3	7.44g	-42.7%
3 [#]	11.97g	方案 1	7.86g	-34.3%	13.25g	方案 1	8.51g	-35.8%
		方案 2	7.47g	-37.6%		方案 2	8.03g	-39.4%
		方案 3	7.25g	-39.4%		方案 3	7.84g	-40.8%
4 [#]	12.74g	方案 1	8.45g	-33.7%	14.44g	方案 1	8.32g	-42.4%
		方案 2	8.01g	-37.1%		方案 2	7.88g	-45.4%
		方案 3	7.77g	-39.0%		方案 3	7.73g	-46.4%

注:约束层厚 0.4 mm, 方案 1,2,3 的铺层角度分别为 0°/90°/0°/90°, 60°/-60°/0°/90°, 45°/-45°/0°/90°。

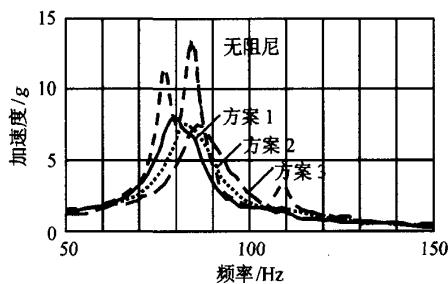
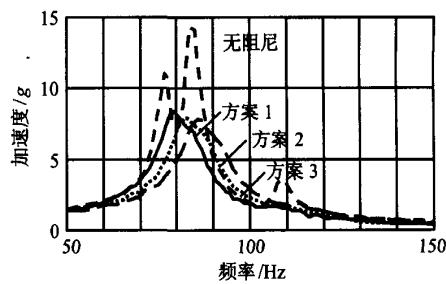
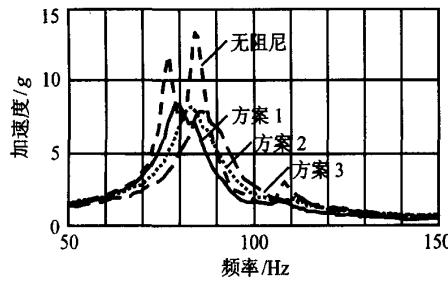
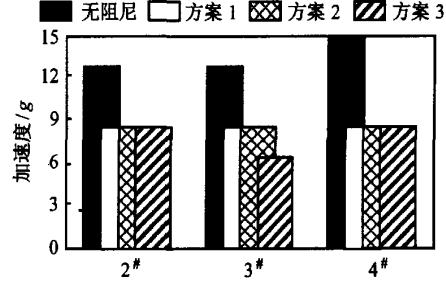
图 11 2[#]点 Y 向频率响应Fig.11 Frequency response in Y axis for 2[#] point图 13 4[#]点 Y 向频率响应Fig.13 Frequency response in Y axis for 4[#] point图 12 3[#]点 Y 向频率响应Fig.12 Frequency response in Y axis for 3[#] point图 14 不同方案 2[#], 3[#], 4[#]点 Y 向频率响应减小的比较

Fig.14 The reducing comparison of the frequency response in Y axis at different test points

-45°/0°/90°的方案进行整星验证试验, 比较约束阻尼层对天线顶端减振的效果。

采用整星验收级振动试验条件, 见表 2。振动试验在 20 t 振动台上进行, 采用四点平均控制, 振动试验结果见表 3, 并如图 15~18 所示。

振动试验结果表明, 在天线支承筒外表面附加

铺层角度为 45°/-45°/0°/90°的约束阻尼层方案, 降低天线顶端横向振动响应的效果明显, 达到了工程预期目的。

表 2 整星验收级振动试验条件

Tab.2 The checking level condition of the satellite vibration test

方向	频率范围 /Hz	幅值	扫描速率/(oct·min ⁻¹)
Z 向	5~8	1.94 mm(半幅)	2
	8~30	0.5g	
	30~50	0.14 mm(半幅)	
	50~100	1.4g	
	100~2 000	2.0g	
X, Y 向	5~8	1.67 mm(半幅)	2
	8~30	0.43g	
	30~50	0.12 mm(半幅)	
	50~100	1.2g	
	100~1 000	2.0g	

表 3 振动试验结果

Tab.3 The result of vibration test

测点	试验状态	振动试验方向		
		X 向	Y 向	Z 向
1 [#]	无约束阻尼层	47.48g/25.00 Hz	98.94g/37.50 Hz	7.57g/75.50 Hz
	有约束阻尼层	35.94g/25.15 Hz	69.15g/38.11 Hz	7.66g/75.51 Hz
	减振效果	24.30% ↓	30.01%	1.19% ↑

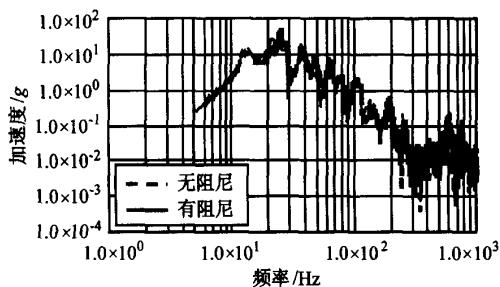
图 15 方案 3 1[#]点 X 向频率响应与无阻尼的比较

Fig.15 Frequency comparison in X axis of scheme 3 and no damping at point 1[#]

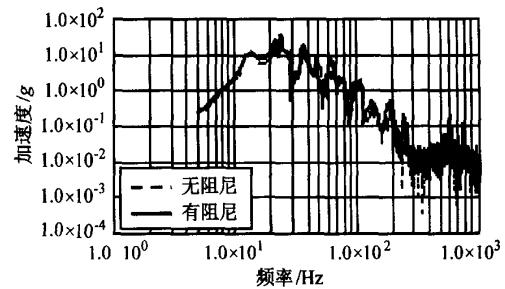
图 17 方案 3 1[#]点 Z 向频率响应与无阻尼的比较

Fig.17 Frequency comparison in Z axis of scheme 3 and no damping at point 1[#]

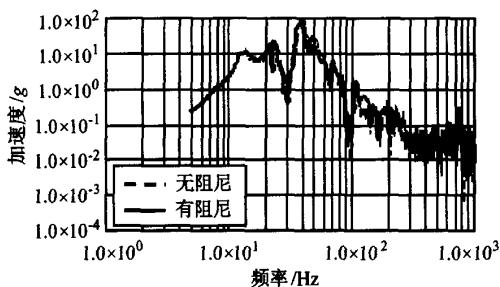
图 16 方案 3 1[#]点 Y 向频率响应与无阻尼的比较

Fig.16 Frequency comparison in Y axis of scheme 3 and no damping at point 1[#]

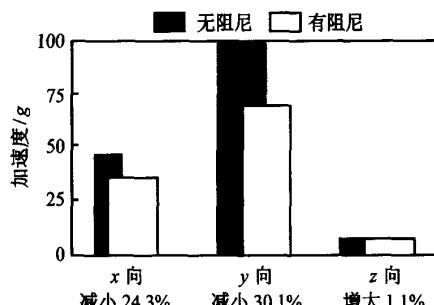
图 18 不同方案 1[#]点各向频率响应减小的比较

Fig.18 The reducing comparison of the frequency response in all directions at point 1[#]

5 结束语

在天线支承筒外附加约束阻尼层,可降低整星特定点的振动响应。本文的整星试验结果证明方案有效可行。对特定厚度的约束层,铺层方向对频率响应有一定的影响。本文的阻尼减振方案为后期的降响应设计提供了理论依据,对阻尼减振技术以及阻尼材料在卫星工程中的应用有一定的参考价值。

参考文献

[1] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社,

- 1990.
- [2] 丁文镜. 减振理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [3] 刘棣华. 粘弹性阻尼减振降噪技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [4] 桂洪斌, 赵德有, 郑云龙. 粘弹性阻尼层结构动力问题有限元分析综述[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 44~47.
- [5] 田晓耕, 沈亚鹏, 张元冲. 主动约束层阻尼结构的数值分析方法[J]. 计算力学学报, 1998, (4): 47~52.
- [6] 杜华军, 黄文虎, 邹振祝. 航天支架结构的被动振动控制[J]. 应用力学学报, 2002, 19(3): 10~13.

欧空局 Proba-2 小卫星将验证新型航天器技术

据报道,欧空局的第二颗低成本 Proba-2 技术验证小卫星将验证新型航天器技术,同时携带有科学仪器。目前该卫星正在研发中,预计将于 2007 年 9 月发射。

Proba 系列卫星是欧空局在轨技术验证项目的一部分。Proba 项目的目标是:在轨演示和验证航天器硬件和软件新技术;在轨演示和验证星上自主运行;在轨试验和演示地球观测和空间环境监测仪。Proba 项目的主要任务是试验星载和地面部分的高度自主运行,以大幅减少对地面运控的需求。星上自主功能包括:名义运行和资源管理;相机指向、扫描的计算与控制,由原始输入实现用户输出(目标纬度、经度和高度);有效载荷运行安排和执行;数据通信管理。而地面自主功能则有:航天器有效载荷自主恒星追踪器运行;数据分配;航天器性能评估;高级用户需求上传至航天器。

Proba 项目的首颗卫星(Proba-1)已于 2001 年 10 月发射,最初设计为 2 年期任务,目前已运行 4 年多。其主要载荷是利用卫星高性能姿态控制及定点能力的成像分光计。Proba-1 卫星演示了以下 13 种基础性技术:新型锂离子电池;组合有多种新元件技术的先进数据和能源管理系统;碳纤维和铝混合结构控制面板;新型反作用飞轮、恒星追踪器和全球卫星定位系统(GPS)接收机;遥控指令系统,配有软件实施的解码器;数字太阳敏感器;双频 GPS 接收机;用于监测航天器周围环境和压力的光纤传感器;新型恒星追踪器;高精度磁通门磁强计;有太阳能量聚集器的实验型太阳帆板;使用电阻引擎推力器和由固态氮气发生器对贮箱增压的氙气推进系统;配全景光学镜头的微型探测照相机。其中,锂离子电池是第一次用于低地球轨道,其容量为 9 A·h;自主恒星追踪器作为地球观测卫星姿态的唯一来源;姿态控制和导航中,采用完整的在轨飞行动力学、无陀螺的姿态确定、自主大角度机动、两个频率为 6 Hz 的 Kalman 滤波器和试验性 GPS 姿态确定。成像分光计的光谱波段 413~1 050 nm,光谱精度 5~12 nm,空间分辨率 20 m(天底点),扫描宽度 14 km,最多可有 19 个波段同时工作。高精度相机的孔径 115 nm,焦距 2 296 nm,视场 0.504°,CCD 敏感器 1 024 像素 × 1 024 像素,几何精度 5 m。宽角相机的 CMOS 敏感器 640 像素 × 480 像素,视场 40° × 31°。空间辐射环境监测器有三个探测头,可监测 0.3~6.0 MeV 的电子流、8~300 MeV 的质子流以及总辐射剂量。在轨碎片评估器可提供低轨道和太阳同步轨道关于亚毫米级碎片的速度和含量等信息。

Proba-2 的卫星将包括四个试验:两个用于太阳观测,两个用于太空环境测量。太阳观测将使用 Lyman-Alpha 星系辐射计(LYRA)和超紫外线望远镜,望远镜配有主动式像素传感器——使用主动式像素传感器及成像处理的太阳观察仪(SWAP)试验。LYRA 可在较宽的紫外光谱内监视四个谱段,SWAP 则在极窄的光谱范围内测量日冕。太空环境试验由双段朗缪尔探测仪(DSLP)与热等离子测量元件(TPMU)完成。DSLP 将在地球磁层的等离子背景中测量电子密度和温度,TPMU 测量离子密度和构成。

(肖 择)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>