

直接转移方式的木星探测器构型设计及轻量化

耿志卿^{1,2},陈昌亚^{1,2},陆希^{1,2},李彦之^{1,2}

(1. 上海卫星工程研究所,上海 201109; 2. 上海深空探测技术重点实验室,上海 201109)

摘要:基于木星探测器直接转移方案设计了3种木星探测器构型并进行有限元仿真,比较发现三翼承力筒构型在满足质量包络的同时,具有最高的模态基频。以该构型为基础,对整体复合材料板铺层厚度进行尺寸优化,使得整器结构的质量从112.5 kg下降到81.5 kg,降低了27.6%。以服务舱隔板为设计区域开展局部的拓扑优化,使隔板质量从12.3 kg下降为11.2 kg,下降了8.9%。根据运载要求,对优化后整器模型进行基频验证:最小横向和纵向基频分别为9.967 Hz和23.567 Hz,满足运载基频要求,具有工程可行性。

关键词:木星探测器;构型设计;尺寸优化;拓扑优化

中图分类号:V421.1 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2020)01-0150-04

Lightweight Structure Design of Jupiter Detector Based on Direct Transfer

GENG Zhiqing^{1,2}, CHEN Changya^{1,2}, LU Xi^{1,2}, Li Yanzhi^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Deep Space Exploration, Shanghai 201109, China)

Abstract: Three Jupiter detector structures are designed based on the Jupiter detector direct transfer scheme and the finite element simulations are carried out. It is found that the three-wing bearing cylinder structure is of the highest modality on the premise of satisfying the mass envelope. Based on this structure, the thickness of the composite sheet layup in the overall structure is optimized, thus reducing the weight of the detector structure from 112.5 kg to 81.5 kg, which is reduced by 27.6%. Then, the local topology optimization is carried out for the service compartment partition. The results show that the mass of the partition decreases from 12.3 kg to 11.2 kg, by 8.9%. According to the carrying requirements, the optimized overall model of the detector is verified by the fundamental frequency: the minimum horizontal and vertical fundamental frequency is 9.967 Hz and 23.567 Hz, it satisfies the horizontal and vertical fundamental frequency requirements of the carrier.

Keywords: jupiter explorer; structural design; size optimization; topology optimization

0 引言

木星探测是国际深空探测的重点,国际上从1972年开始已开展了9次涉及到木星的探测^[1],其中除伽利略号和朱诺号探测器外,其余皆为对木星的飞掠探测任务^[2]。在未来的木星探测规划中,NASA和ESA分别预计在2022年发射木卫二快帆号^[3]和木星冰月探测器^[4]。我国深空探测的步伐也在不断向前迈进,在未来30年的深空探测专项中提出了木星系探测任务。

根据转移轨道的不同,木星探测可分为直接转移与天体借力转移两种方式。采用直接转移能够极大地缩短地木巡航段的飞行时间,较大限度提高从业者的期望度以及环绕探测段的时间占比,从而获得更多的科学产出。但是,由于直接转移方式的轨道特点及木星环境的特殊性,探测器构型设计与传统火星及月球探测器相比,主要存在以下难点:1) 奔木轨道的速度增量(主要为GTO转移段),导致探测器燃料占比高,可承载质量小。2) 木星轨

道上太阳辐照弱,导致帆板面积大。3) 在轨环境的高能辐射强,危害到器内单机。4) 地木深空通信距离远,需具备大口径高增益天线。因此,基于多约束下探测器的构型设计,可为后期的木星探测方案提供一定的参考依据。

在探测器质量确定的前提下,采用结构优化可有效提高承重比,实现整器的轻量化。目前,卫星的结构优化设计主要关注于拓扑优化和尺寸优化两方面。袁家军^[5]等基于Patran/Nastran采用铺层尺寸优化对两个卫星结构进行优化,有效地降低卫星整体质量。徐皓^[6]等通过最小柔度的拓扑优化和多目标优化并结合采用分步优化方法,实现卫星结构各工况下的有效减重。谭陆洋^[7]等对蜂窝夹层进行铺层尺寸优化设计,通过对铺层的角度和厚度进行两次优化从而降低光学小卫星相机次镜上的随机响应。陈靖^[8]等通过对卫星主承力结构进行尺寸和材料优化实现小卫星的轻量化。

本文基于木星探测器直接转移方案设计了3种木星探测器构型。采用Patran/Nastran软件进行有限元仿真,分析3种构型的质量及基频模态特性并选择较优构型。

基金项目:科工局十三五民用航天预研项目(D030106);上海市科委科研计划项目(16DZ1120300)

第一作者简介:耿志卿(1993—),男,福建福鼎人,硕士研究生,研究方向为卫星结构与深空探测技术。

采用 OptiStruct 优化软件对整器进行以铺层及中芯层厚度为设计变量的尺寸优化。以最小柔度为目标函数对探测器隔板进行局部拓扑优化。针对优化后结果,考虑运载条件进行整器的基频验证。

1 探测器构型设计及优选

1.1 探测器构型设计

由于直接地木转移轨道所需的 C3 能量较大及 GTO 转移段速度增量,考虑现有运载能力,拟采用 CZ-5 作为运载(图 1),搭载大型推进舱。整器质量分配如表 1 所示,探测器质量包络为 1350 kg,采用 3.5 m 大口径高增益天线,其帆板面积为 43.5 m²。同时,探测器采用钛合金辐射罩将重要的电子单机进行集中防护。根据文献[9],探测器需要满足运载发射条件:横向基频>6 Hz,纵向基频>20 Hz。

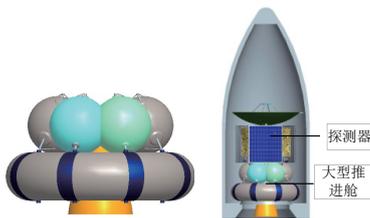


图 1 探测器大型推进舱及运载

表 1 整器质量分配表

组件	质量/t
探测器	1.350
大型推进舱干重	1.350
大型推进舱推进剂	11.235
组合体总体质量	13.935

表 2 3 种构型对比表

探测器构型	整星质量/kg	结构质量/kg	质心高度/mm	一阶横向 x/Hz	一阶横向 y/Hz	一阶纵向 z/Hz	一阶扭转/Hz
两翼式一体化构型	1 340.0	103.5	558.7	12.943	11.292	15.480	29.530
三翼式一体化构型	1 347.2	110.7	610.0	10.074	15.956	26.188	26.098
三翼式承力筒构型	1 349.0	112.5	650.0	17.065	15.389	40.793	31.942

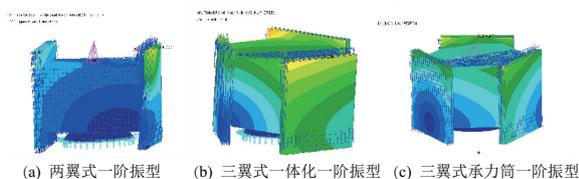


图 3 3 种木星探测器构型的基频振型

由表 2 给出的 3 种构型的基频及质量特性可知,3 种构型皆满足质量包络,其中两翼式构型的质量为三者中最小,质心高度较低,具有一定的质量优势。但是,其基频较低,特别是一阶纵向基频低于 20 Hz,刚度性能较差。将 3

参考风云系列卫星及火星探测器,提出了两翼式方型及三翼六边型构型,如图 2 所示,并根据探测器主承力方式的不同,基于三翼六边型外形又提出一体化及承力筒式构型,其一体化构型体现在将辐射屏蔽箱板与各板结合作为探测器的主承力方式。

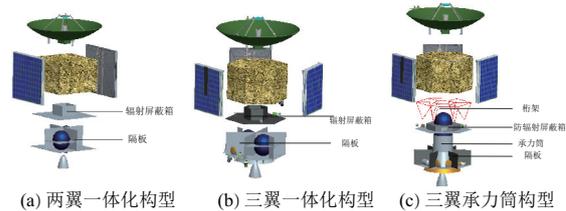


图 2 木星探测器构型设计

1.2 质量模态分析及构型选择

采用 Patran/Nastran 进行有限元建模。其中根据卫星结构特点进行了以下简化:

1) 探测器除屏蔽舱外皆为铝蜂窝夹层板。其中:卫星底板、贮箱安装板、隔板及承力筒厚度为 30 mm,面板采用碳纤维 M55J/AG80,铺层角度为 [0, 90],各铺层的单层厚度皆为 0.4 mm,镜面对称方式铺设。太阳翼基板、顶板,载荷板及四周侧板厚度为 20 mm,铺层材料及角度与上面相同,各铺层的单层厚度为 0.1 mm。防辐射屏蔽箱侧板为 6 mm 厚的钛合金板。

2) 铝制太阳翼连接架、压紧装置、桁架及贮箱端框采用梁模型。

3) 高增益天线等质量较大的设备采用中心质量点来模拟,并通过 MPC 连接到相应的板安装区域,其余质量较小的单机作为无结构质量分布于相应的结构板上。

通过建立有限元模型得到 3 种构型探测器的质量特性,并进行模态分析得到基频如表 2 所示,相应的基频振型见图 3。

翼承力筒构型与一体化构型相比可知,两者的结构质量及质心高度相当。但是,承力筒构型的固有频率相对较高,刚性性能较优,具有较大的可优化空间,且由于探测器放置于大型推进舱上部,其组合体的整体固有频率将会下降。所以,为保证工程的安全性选取固有频率较大、刚性较好的三翼式承力筒构型作为初步设计的探测器构型。

2 探测器结构优化设计

三翼承力筒式探测器的整体质量接近最大总量包络,且结构的横向基频较大。因此,针对探测器的整体结构进行基于铺层及中心层厚度的尺寸优化以及对图 2(c)中的

隔板开展探测器的局部结构拓扑优化,得到更为轻质的探测器结构。

2.1 尺寸优化

如表3所示,将各结构复合材料板的铺层及中芯层的厚度作为设计变量,目标函数为探测器整体质量的最小值。将探测器的整体基频、结构的安全域度及相应设计变量的变化范围作为约束,采用数学形式可以将优化模型表示如下:

$$\begin{cases} \text{find} & T_i \\ \text{min} & M \\ \text{s.t.} & MR \geq 3; \\ & f_1 \geq 10 \text{ Hz} \\ & T_i^l \leq T_i \leq T_i^u \quad i=1, 2, \dots, 15 \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_i 为设计变量,为各板不同方向铺层厚度; M 为整星质量; MR 为面板的最小安全裕度; f_1 为一阶基频;上标 l 和 u 分别代表变量的取值下限和上限。

基于OptiStruct软件进行铺层优化分析得到图4-图6的迭代曲线以及表3各结构板的设计变量的优化,并根据工程圆整后的最终值结果如下:

由图4和图5可知探测器总质量经过7次的迭代从1349 kg下降到1314.4 kg,探测器结构质量从112.5 kg下降到77.9 kg,结构占比从8.34%减少为5.93%,优化效果较为理想。从图6可知随着各板厚度的减小,探测器刚度有所下降,基频从11.2 Hz下降到10.01 Hz。如表3中考虑铺层工艺技术,取0.1 mm的精度进行圆整。圆整后探测器最终质量为1318 kg,结构质量从112.5 kg下降到81.5 kg,降低了31 kg(27.6%)。

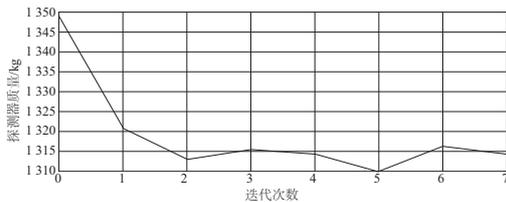


图4 探测器质量迭代曲线

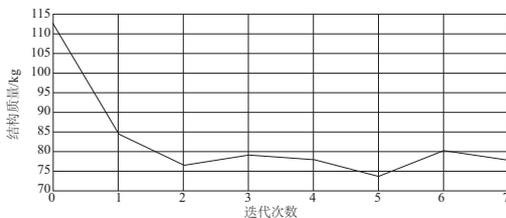


图5 结构质量迭代曲线

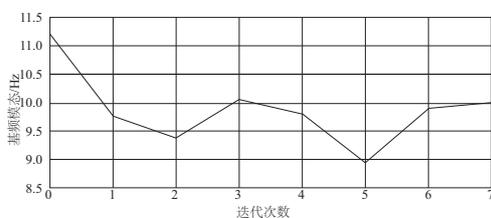


图6 整星基频迭代曲线

表3 设计变量定义 单位:mm

变量序号	变量名称	初始值	最小值	最大值	优化值	最终值
T1	底板0°铺层厚度	0.4	0	0.6	0.075	0.1
T2	底板90°铺层厚度	0.4	0	0.6	0.087	0.1
T3	底板中心层厚度	28.4	20	35.0	30.130	30.1
T4	载荷板0°铺层厚度	0.1	0	0.6	0.031	0.1
T5	载荷板90°铺层厚度	0.1	0	0.6	0.054	0.1
T6	载荷板中心层厚度	19.6	10	25.0	10.000	10.0
T7	侧板0°铺层厚度	0.1	0	0.6	0.025	0.1
T8	侧板90°铺层厚度	0.1	0	0.6	0.035	0.1
T9	侧板中心层厚度	19.6	10	25.0	10.000	10.0
T10	承力筒0°铺层厚度	0.4	0	0.6	0.140	0.1
T11	承力筒90°铺层厚度	0.4	0	0.6	0.176	0.2
T12	承力筒中心层厚度	28.4	20	35.0	20.000	20.0
T13	隔板0°铺层厚度	0.4	0	0.6	0.140	0.1
T14	隔板90°铺层厚度	0.4	0	0.6	0.176	0.2
T15	隔板中心层厚度	28.4	20	35.0	20.000	20.0
T16	顶板0°铺层厚度	0.1	0	0.6	0.050	0.1
T17	顶板90°铺层厚度	0.1	0	0.6	0.053	0.1
T18	顶板中心层厚度	19.6	10	25.0	13.010	13.0

2.2 局部拓扑优化

如图7所示,考虑对服务舱隔板进行拓扑优化。其中,灰色部分代表设计区域,黑色部分为非设计区域。

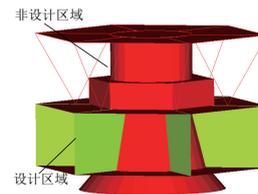


图7 拓扑优化设计区域

为降低拓扑优化后对整体固有频率的影响,采用设计区域的最小柔顺度为优化目标。优化模型可表示如下:

1) 优化模型

目标:设计区域柔度最小化。

约束:体积分数(设计区域优化后体积与原体积之比) <0.3 。

设计变量:设计空间里每个单元的密度。

数学表示为:

$$\begin{cases} \text{find} & \mathbf{X} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n); \\ \text{min} & C = \mathbf{F}^T \mathbf{U}(\rho); \\ \text{s.t.} & \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F}, \\ & \int_{\Omega} \rho(x) d\Omega = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \leq 0.3V_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{X} 为设计变量,是设计区域中每个单元密度 ρ 组成的向量; C 为结构柔顺度; \mathbf{F} 为节点载荷向量; \mathbf{U} 为节点位移向量; \mathbf{K} 为刚度矩阵; V_i 为单元 i 的体积; V_0 为给定材料用量的总体积; ρ_i 为单元 i 的密度值, $0 \leq \rho_i \leq 1, i=1, 2, \dots, n$ 。

2) 优化结果

对建立的拓扑优化模型进行计算,结果如图8(a)所

示,其中剩余部分为结构主要的传力路径。根据拓扑优化结果对探测器进行再设计得到结构如图 8(b)所示。

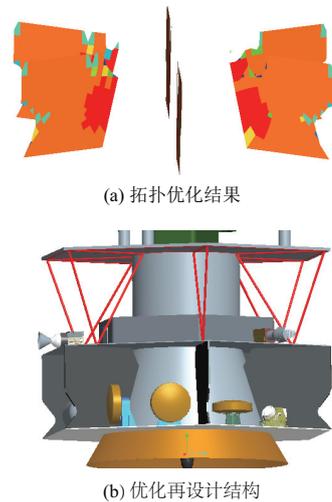


图 8 拓扑优化结果及再设计结构

图 9 为探测器质量迭代曲线,可知通过对内部隔板的拓扑优化,探测器整体质量从 1318 kg 下降为 1316.9 kg,下降了 1.1 kg;隔板质量从 12.3 kg 下降为 11.2 kg,下降了 8.9%。

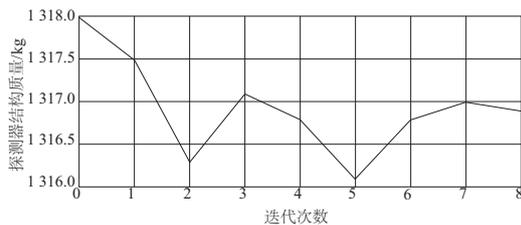


图 9 结构质量迭代曲线

3 整器模态频率验证

为保证优化后的结构仍能够满足运载要求,将优化后的模型组合推进舱在 Patran 中进行重新建模并分析相应的基频模态,基频结果如表 4 所示,图 10 为各基频的模态振型。

表 4 三翼承力筒构型整体模态频率

振型	频率/Hz	模态有效质量占比/%
一阶横向 x	10.456	36.21
一阶横向 y	9.967	35.25
一阶纵向 z	27.835	47.56
一阶扭转	23.567	77.68

由振型图 10 可知,由于大型推进舱的质量远大于探测器,基频振动主要出现于上部的探测器。由表 4 可知:优化后的带大型推进舱的探测器整体频率的最小横向基频为 9.967 Hz,最小的纵向基频为 27.835 Hz,满足运载要求,具有较好的刚性性能。

4 结语

通过以上对探测器进行构型设计及优化可得结果如下:

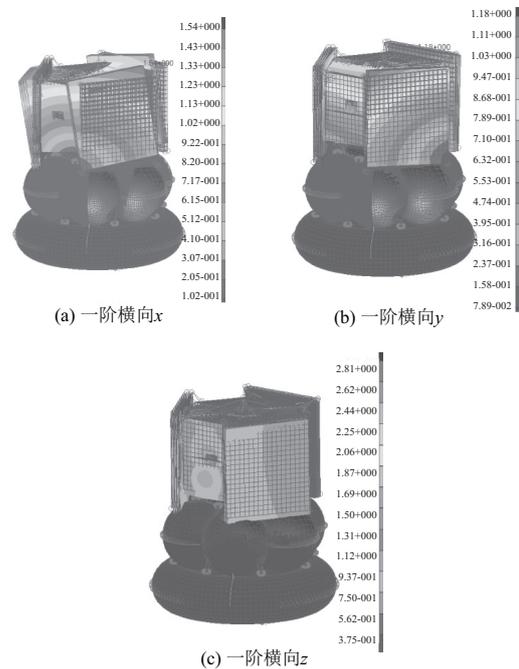


图 10 优化后组合体一阶模态振型图

1) 针对直奔奔木的木星探测器设计了 3 种探测器构型,通过质量特性比较及模态分析发现,三翼承力筒构型满足质量包络且刚度性能最优。

2) 通过对整器的铺层尺寸优化得到:探测器结构质量从 112.5 kg 下降到 81.5 kg,降低了 31 kg (27.6%)。

3) 针对探测器隔板进行局部拓扑优化,使得隔板质量从 12.3 kg 下降为 11.2 kg,下降了 8.9%。

4) 对整器进行模态验证:优化后带大型推进舱的探测器整体频率的最小横向基频为 9.967 Hz,大于运载给出的 6 Hz;最小的纵向基频为 27.835 Hz,大于运载给出的 20 Hz,满足运载的发射基频约束。

参考文献:

- [1] STEPHEN D. Creech. Benefits to the europa clipper mission [R]. Beijing: 64th International Astronautically Congress, 2013.
- [2] RICHARD Grammier. A look inside the juno mission to jupiter [R]. [S.I.]: IEEE Aerospace Conference, 2008.
- [3] 张梦然. 深空,听到 AI 来临的脚步声了吗? [N]. 科技日报, 2017-8-30.
- [4] LI Mission. Reformulation JUICE-jupiter icy moon explorer technical & programmatic review report [R]. [S.I.]: European Space Research and Technology Centre, 2016.
- [5] 袁家军,陈坤艳. 基于 Patran/Nastran 的结构优化系统的工程应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 125-128.
- [6] 徐皓,姚雯. 一种卫星分步结构优化方法[J]. 航天器工程, 2017, 26(4): 22-28.
- [7] 谭陆洋,王栋. 光学小卫星主载荷承力结构的多工况优化设计[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1-7.
- [8] 陈靖,张翔. 某微小卫星结构轻量化设计研究[J]. 上海航天, 2014, 31(6): 30-35.
- [9] 李彦之,陈昌亚,黄帆. 用于深空探测的大承载高燃重比薄壁贮箱一体化结构设计[J]. 上海航天, 2017, 34(5): 1-8.

收稿日期:2018-12-04