

变截面、高刚度的三星分配器结构优化设计

王淑范, 李 操, 王桂娇, 徐卫秀, 陈友伟, 章 凌

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 基于有限元仿真优化设计, 提出了一种变截面、高刚度、并联式、带倾角的三星分配器结构, 满足了某运载火箭并联式三星发射任务需求, 经多发飞行试验验证效果良好, 为后续一箭多星发射任务提供参考。

关键词: 并联式; 三星分配器; 有限元; 优化设计

中图分类号: V421.3

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 01-0008-05

Optimal Design of a Three Payload Adapter with High Stiffness and Variable Cross Section

WANG Shufan, LI Cao, WANG Guijiao, XU Weixiu, CHEN Youwei, ZHANG Ling

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Based on finite element simulation and optimal design method, this paper proposes a variable cross section, high stiffness, parallel type, with dipping-angle three-payload adapter, which meets the requirements of three-payload deployment. Multiple flight tests verify that the adapter works well. This provides design reference for the subsequent more payloads mission.

Key words: Parallel type; A three payload adapter; Finite element; Optimal design

0 引言

一箭多星发射技术是指用一枚火箭一次将多颗卫星送入预定轨道的技术。在运载能力和包络允许的条件下, 采用一箭多星的发射方式便于多颗卫星入轨后迅速组网, 适应星座快速部署的要求。同时, 在一枚火箭发射周期内发射多颗卫星可缩短单颗卫星的发射周期并减少发射费用, 是降低运载火箭发射成本的一个重要途径^[1-3]。基于这些优点, 一箭多星发射已成为国内外运载火箭发展的一种趋势。多星发射可采用串联方式或者并联方式, 与串联构型相比, 并联构型能减少分离面数量和过渡舱数量, 提高有效运载能力。国外能够采用并联构型发射的火箭主要是德尔它 II 火箭, 其典型的并联构型如图 1 所示^[4]。国内 CZ-

4B/4C 火箭和 CZ-2C、CZ-3A 系列火箭携带远征上面级状态也具备并联式多星发射能力, 典型的并联构型如图 2 所示^[5]。

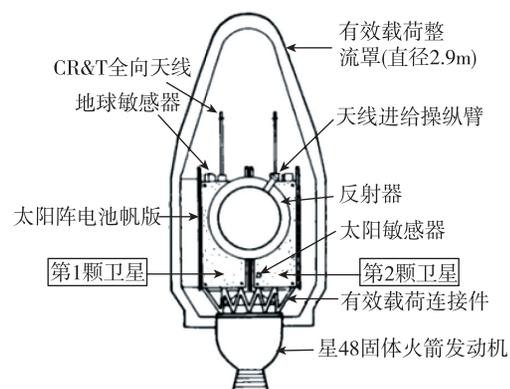


图 1 德尔它 II 并联式多星发射构型

Fig. 1 Parallel multi-star deployment configuration of Delta II Launch Vehicle

收稿日期: 2018-04-12; 修订日期: 2018-07-24

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (11602031)

作者简介: 王淑范 (1972-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为壳段结构设计及结构强度分析。

E-mail: wsf1972@sina.com

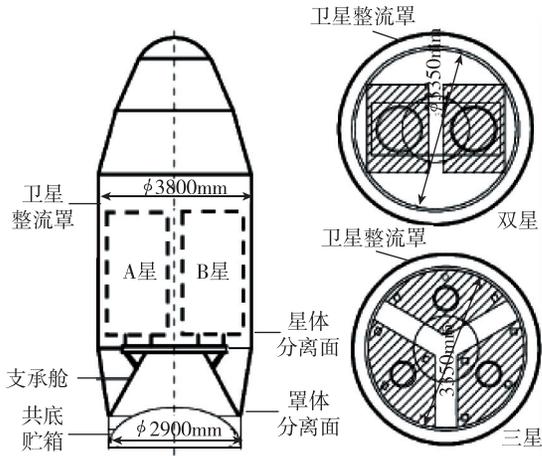


图 2 CZ-4B/4C 火箭并联式多星发射构型

Fig. 2 Parallel multi-star deployment configuration of CZ-4B/4C Launch Vehicle

目前,多星并联发射用的分配器的多星分离面均在一个平面上,没有分离倾角,因此,无法提供卫星分离时所需的近场间隙,需火箭额外配置姿控发动机或者分离能源。商显扬等^[6]根据火箭整流罩的实际情况,采用优化方法构造出了一种带有倾角的分配器总体方案。本文针对这种总体方案对分配器结构进行了详细的优化设计,主要是基于有限元仿真分析通过拓扑构型优化和连接刚度优化设计,提出了一种构型简单,具有循环对称特性的六爪梁式变截面、高刚度、带倾角的三星分配器结构,实现了一箭三星的分离面在不同的斜平面上,通过结构产品有效保证了卫星在近场的分离间隙,降低了分离系统设计的复杂性。本文提出的并联式多星分配器结构设计为后续多星发射任务开拓了新的设计思路。

1 三星分配器的优化设计

1.1 设计要求

本文研制的三星分配器主要作为火箭与卫星之间连接的过渡段,其前端面通过螺栓与 3 个卫星适配器进行连接,后端面直接连接在过渡支架上。其主要功能是保证 3 个卫星适配器安装所需的斜平面,确保释放卫星所需的最初倾角,保证 3 颗卫星在近场的可靠分离;同时,为 3 颗卫星适配器提供良好的刚度支撑。三星分配器设计的最终目标为一阶横向频率、质量、强度及刚度满足一定的指标要求。

1.2 设计思路

由于三星分配器安装在一个均匀受力的半硬

壳结构上,同时火箭要部署 3 颗中等大小的卫星,3 颗卫星分离时没有其他动力能源,需要靠结构自带分离倾角,质量指标相对苛刻。因此,如何实现三星的高刚度带倾角的安装平面及如何将三星的集中载荷及弯矩顺利传递到均匀的半硬壳结构上是本文研究的重点。

航天系统对火箭的结构设计越来越趋于精细化和系统化^[7-8],拓扑优化及有限元分析在航天结构设计中被广泛应用。本文首先采用拓扑优化方法获得了结构的初始外形,通过有限元分析软件对该结构进行初步分析,针对分析结果对结构进行多次迭代获得满足要求的实际结构,最后通过试验验证了设计的合理性和正确性。

1.3 拓扑构型优化设计

考虑到 3 颗卫星需在一个安装结构上,因此,首先采用拓扑优化方法获得三星分配器的设计外形。优化目标为柔度最小,约束条件为质量最小,边界条件为在卫星连接点处加载不考虑卫星自身刚度的载荷,详见式 (1)

$$\begin{aligned} \text{find: } & \rho = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N\} \\ \text{min: } & \text{Obj} = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} \\ \text{s. t. : } & C_1 = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i \leq \bar{V} \\ & 0 \leq \rho_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, V 为材料用量, ρ_i 为单元密度,是拓扑优化的设计变量。目标函数 $\mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U}$ 表示整个系统的柔度。

根据上述优化条件,获得了初步的拓扑优化结果,确定了如图 3 所示的三足鼎立六爪梁式并联三星分配器基本构型。该结构整体呈循环对称分布,中间通过一个等边三角形布局的工字梁连为一体,在三角形的各个顶点位置伸出两个夹角为 120° 的工字梁,伸向连接壳体,具有传力直接、应力分布均匀、变形协调等特点。

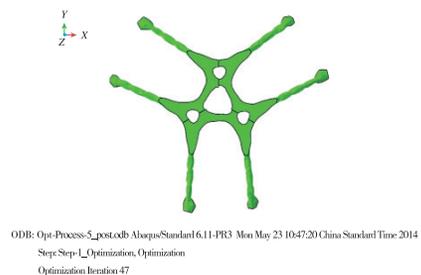


图 3 拓扑优化后的初始外形

Fig. 3 Initial shape after topology optimization

基于这个拓扑优化的初步构型进行了简单的静力分析，分析模型见图4，所得应力云图见图5，一阶模态见图6。

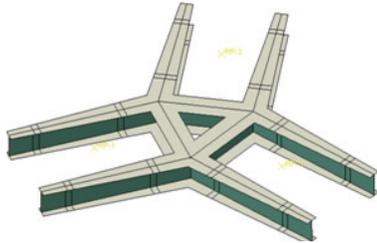


图4 初步构型有限元模型

Fig. 4 The finite element model of preliminary scheme

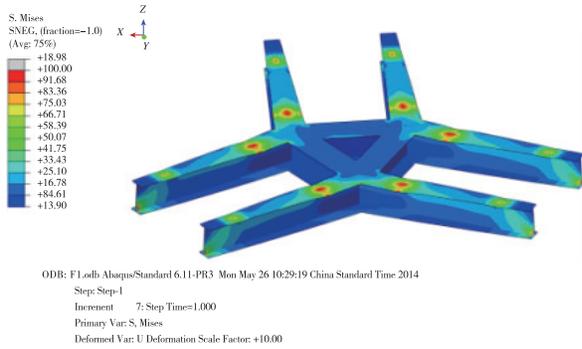


图5 初步方案应力分布云图

Fig. 5 The contours of stress distribution of preliminary scheme

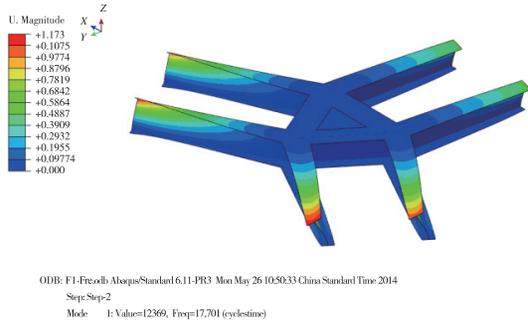


图6 初步方案一阶模态

Fig. 6 First-order mode of preliminary scheme

由图5可见，与卫星连接部位出现应力集中，需要加强，确保应力均匀；由图6可见，在自由端需要降低工字梁高度，抑制其局部扭转失稳。基于上述分析结果，局部调整该结构外形，在卫星连接点之间增加了连杆，使该结构中心呈六边形分布，其中的3边用于支撑卫星，另外3边加强了中心的连接刚度，结构模型如图7所示，应力分布如图8所示。针对新设计的结构外形，重新进行强度及频率分析，获得结构的一阶频率为17.69Hz，振型为三星分配器的轴向振动，如图9所示。

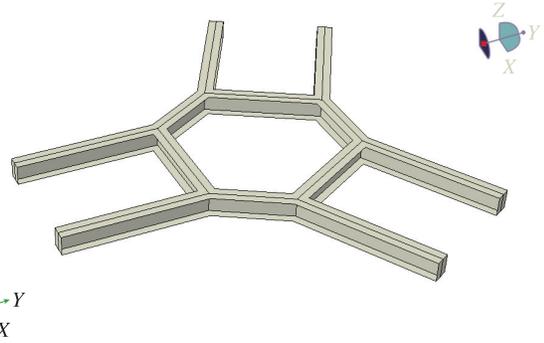


图7 局部加强后结构外形图

Fig. 7 Structural shape after local reinforcement

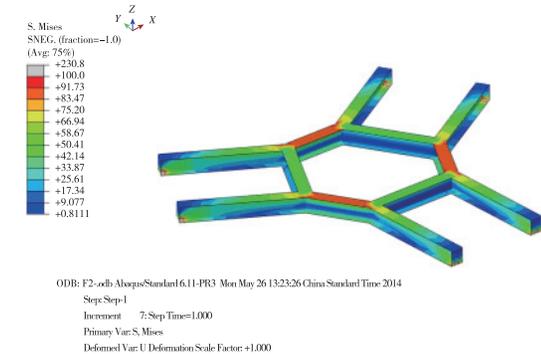


图8 局部加强后应力分布图

Fig. 8 Stress distribution after local reinforcement

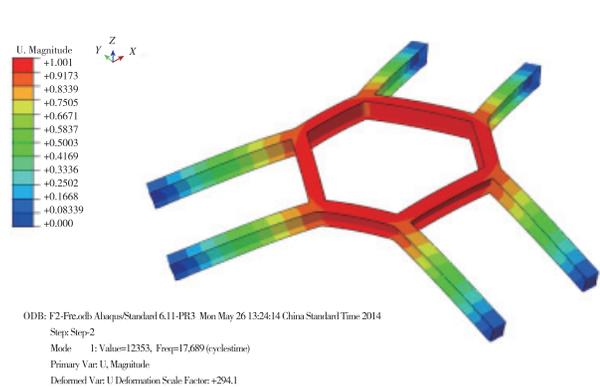


图9 局部加强后一阶模态图

Fig. 9 First-order mode after local reinforcement

1.4 最终方案的确定及连接部位刚度优化设计

局部加强后应力分布如图8所示，卫星连接处的应力显著降低，但是星与星之间的连接部位应力升高，同时为提高自由端的整体性及整体刚度，将两个腿进行了封闭设计，最终的设计方案如图10所示，此时该结构为变截面，材料厚度根据实际受力情况进行重新分布呈“品”字外形，具有很好的整体刚度和优异的传力性能。考虑到三星

分配器与其支撑部段的传力关系，增大连接部位的面积，确保三星分配器与支撑段的可靠连接，面积加大处局部如图 11 所示。此三星分配器设计既保证了自身的刚度要求，又保证了与下部支撑部段的连接节点，确保了连接刚度，结构传力及受力更加均匀。

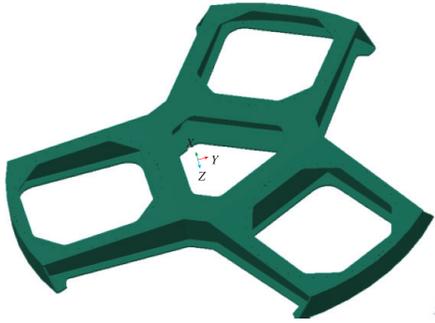


图 10 最终设计方案结构外形

Fig. 10 Structural shape of the final design

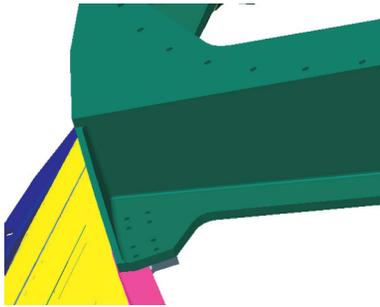


图 11 最终设计方案局部加强翻边

Fig. 11 Local reinforcement flanging of the final design

2 仿真和试验验证

2.1 仿真验证^[9-10]

针对最终确定的结构设计方案进行了详细的有限元建模分析。有限元模型包括三星分配器、下边界过渡支架和上边界卫星适配器。3 颗卫星以集中质量点的形式加载在卫星适配器上，并与对应的卫星适配器上端框端面建立结构耦合，有限元模型如图 12 所示，应力分布如图 13 所示。由图 13 可见，所有部位应力比较均匀，均不超过 100MPa。频率分析结果如图 14 所示，一阶频率为 18.57Hz，振型为 3 颗星位置的各自横向振动。由图 13 可见，改进后的三星分配器应力分布非常均匀，证明了此结构设计的合理性。

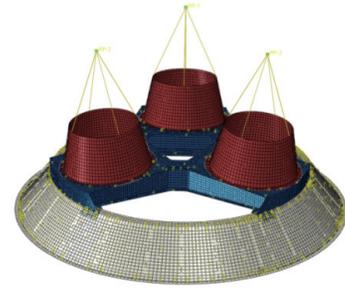


图 12 最终方案有限元模型

Fig. 12 The finite element model of the final design

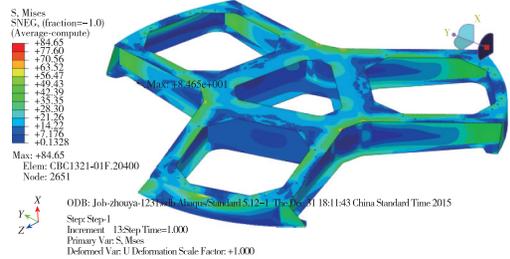


图 13 最终方案应力分布云图

Fig. 13 Stress distribution of the final design

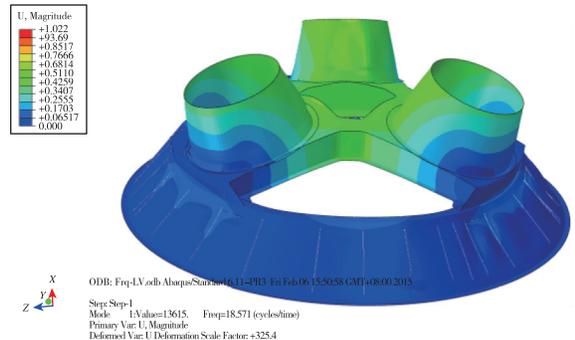


图 14 最终方案一阶模态

Fig. 14 First-order mode of the final design

2.2 验证结果对比与评估

对该结构进行了静态试验，有限元与试验结果吻合较好，鉴于三星分配器主要是刚度设计，因此，本文主要对三星分配器的模态进行详细对比并进行模型修正。试验所得结构星一阶横向频率为 14.2Hz，低于有限元所得的 18.57Hz，差别主要是三星分配器与过渡支架采用螺栓连接，卫星适配器与三星分配器也采用螺栓连接，而有限元分析中这些部位均采用了黏接，增加了部段之间的连接刚度。

根据试验结果，对有限元模型进行进一步修订，主要是在有限元模型中体现了三星分配器与

过渡支架以及三星分配器与卫星适配器的螺栓连接,模型中建立了连接螺栓的实体模型,螺栓与各连接部位进行实体粘接,使有限元模型更接近真实情况。有限元局部如图15所示,此时分析所得一阶模态为15.54Hz;有限元模型修正后的一阶模态如图16所示,与试验偏差在9%以内,在工程允许范围内。

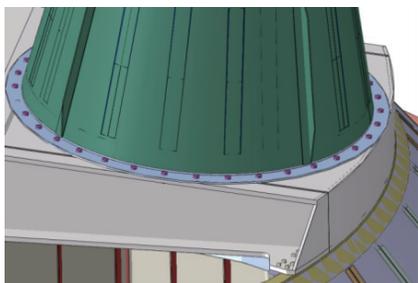
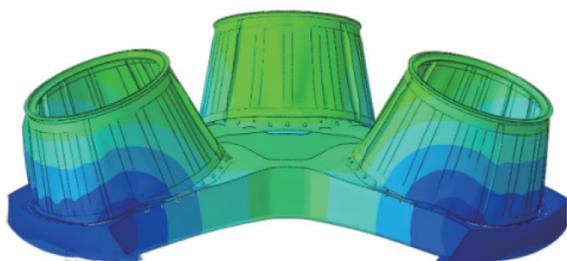


图15 修正后有限元模型

Fig. 15 Modified finite element model



Step: Step: 1
Mode 1: Value=9536.4 Freq=15.542(cycles/time)
Primary Var: U1 Magnitude
Deformed Var: U1 Deformation Scale Factor: +334.6

图16 有限元模型修正后一阶模态

Fig. 16 First-order mode after finite element model updating

3 结论

本文首先采用优化设计手段获得了分配器的初始外形,进一步通过详细的有限元分析对局部结构进行精细化设计,获得了一类整体性能好、刚度大的三星分配器结构形式,为后续类似结构设计提供参考。

参考文献

- [1] 刘进军. 多星发射纪录 [J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2013 (16): 26-32.
- [2] 刘进军. 卫星与多星发射 [J]. 卫星与网络, 2009 (11): 58-63.
- [3] 刘颖. “一箭”如何发射“多星” [J]. 现代军事, 2002 (3): 59.
- [4] 王向阳. 美国运载火箭多星发射和搭载发射技术 [J]. 导弹与航天运载技术, 1994, 3: 1-11.
- [5] 陈振知, 吴佳林, 古艳峰, 等. 长征四号乙/丙运载火箭多星发射技术现状与展望 [J]. 上海航天, 2013, 30 (5): 43-47.
- [6] 商显扬, 杜朋, 王桂娇, 等. 一箭三星发射结构布局及斜推分离技术研究 [J]. 强度与环境, 2018, 45 (1): 7-11.
- [7] 郭永辉, 路志峰, 范新中. 火箭支架的有限元分析与优化设计 [J]. 强度与环境, 2011, 38 (1): 9-14.
- [8] 李雄魁, 徐珊珊, 闫路, 等. 运载火箭惯组基座设计与优化 [J]. 强度与环境, 2015, 42 (1): 46-53.
- [9] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] 庄茁. ABAQUS非线性有限元分析与实例 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

引用格式: 王淑范, 李操, 王桂娇, 等. 变截面、高刚度的三星分配器结构优化设计 [J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (1): 8-12.

Citation: Wang S F, Li C, Wang G J, et al. Optimal design of a three payload adapter with high stiffness and variable cross section [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (1): 8-12.