

液体推进剂消耗对大型卫星结构动特性的影响分析*

武新峰, 雷勇军, 李道奎

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为了研究液体推进剂消耗对某大型卫星结构动特性的影响,采用简化的“弹簧-质量”模型分析了推进剂消耗对结构动特性的影响趋势;基于 MSC. PATRAN/NASTRAN 给出了动力学分析过程中液体推进剂的等效建模和分析方法,包括梁单元法、附加质量法、“RBE3-质量点”单元法和虚拟质量法等;建立了该卫星结构的有限元模型,进行了结构动力学特性和动响应分析,讨论了液体推进剂消耗对其动特性的影响规律。研究表明:随着推进剂的消耗,卫星整体振型的固有频率逐渐增大,而部分局部振型的固有频率保持不变;随着推进剂的消耗,卫星仪器安装板动力学响应峰值逐渐增大,所对应的频率也逐渐增大。

关键词:液体推进剂;卫星结构;有限元建模;结构动特性分析

中图分类号:V415 **文献标志码:**A **文章编号:**1011-2486(2012)04-0038-05

Dynamic analysis of a large scale satellite structure with the liquid propellant consuming

WU Xinfeng, LEI Yongjun, LI Daokui

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A simplified ‘Spring-Mass’ dynamic model and dynamic analysis were performed to obtain the influence of propellant consuming on the dynamic properties of a large scale satellite structure. Then the finite element modeling and analysis methods, including the beam modeling method, added with the mass method, the ‘RBE3-Mass’ modeling method and the virtual mass method, were given based on MSC. PATRAN/NASTRAN. In the end, the satellite finite element model was established and the dynamic analysis was executed. The analysis results indicate that: (1) the frequencies of main mode shapes will raise with the propellant consuming, while those of local shapes will not change; (2) The frequency and magnitude of response will raise with the propellant consuming.

Key words: liquid propellant; satellite structure; finite element modeling; structural dynamic analysis

液体推进剂是航天器的重要组成部分,用以完成航天器的轨道转移、机动、保持、姿态调整等动作。目前,航天器呈现大规模、长寿命、高精度等发展趋势,这就决定了液体推进剂在航天器质量中的比重越来越大,甚至占全部质量的一半以上^[1-2]。随着推进剂的消耗,航天器的质心位置、质量和转动惯量都会发生较大变化,进而导致结构的动特性随之改变,从而形成一个变质量、变动特性系统。

变质量系统常用的动力学建模方法主要有约束松弛法^[3]、等价力法^[4]、Kane法^[5]等。为了准确模拟复杂结构的动特性,一般采用有限元方法进行数值求解,那么这些方法就不能直接应用,需要进一步研究液体推进剂的建模及其消耗过程的模拟方法。目前,常用的推进剂建模方法包括梁

单元法^[6-7]、附加质量法^[8-10]、“RBE3-质量点”单元法、固体单元法^[11]等,同时 MSC. NASTRAN 软件还提供了流固耦合算法,如虚拟质量法^[12-14]、一般流固耦合法和水弹性流体单元法^[15]等。对于液体推进剂消耗过程的模拟,工程中通常将连续过程简化为多个离散的时刻状态(即秒状态),然后分别由建立在不同时刻的有限元模型进行计算。

为了研究液体推进剂消耗对某大型卫星结构动特性的影响规律,本文首先基于简化“弹簧-质量”模型分析了推进剂消耗对固有频率的影响趋势,然后给出了结构动力学仿真过程中液体推进剂的建模和分析方法,最后建立了卫星结构的有限元模型,计算并总结了推进剂消耗对动力学特性和动响应的的影响规律。

* 收稿日期:2011-09-15

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0148)

作者简介:武新峰(1983-),男,河北怀来人,博士研究生,E-mail:wuxinfeng@nudt.edu.cn;

雷勇军(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:leiyj108@nudt.edu.cn

1 简化动力学模型

在对复杂航天器进行动力学分析之前,首先将结构视为刚体,简化为理想的“弹簧-质量”模型进行初步分析。如图1所示,将卫星平台简化为三自由度系统, M_1 、 M_2 、 M_3 表示卫星结构的分块质量, M_f 表示液体推进剂质量, K_1 、 K_2 、 K_3 表示结构刚度,取 $M_f = 3000\text{kg}$, $M_1 = M_3 = 600\text{kg}$, $M_2 = 800\text{kg}$, $K_1 = K_2 = K_3 = 300\ 000\text{N/m}$,设推进剂总消耗量为 2700kg ,计算得到一阶固有频率值变化曲线如图2所示。图2中,横轴表示整星剩余质量百分比,纵轴表示不同时刻的固有频率与满载时刻一阶固有频率的比值。可以看出,随着推进剂的消耗,固有频率值呈非线性的上升趋势。对于单自由度的固有频率,从 $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 分析可知,当质量减小50%时,固有频率变为原来的 $\sqrt{2}$ 倍,这和图中曲线规律相符。但是,在实际工程中,固有频率增大幅度与振型相关。不同的振型对应着不同的模态有效质量,即推进剂质量对不同振型的贡献不同,因此推进剂消耗对固有频率所产生的影响也不同。

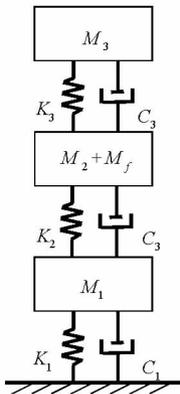


图1 “弹簧-质量”模型
Fig.1 “Spring-Mass” model

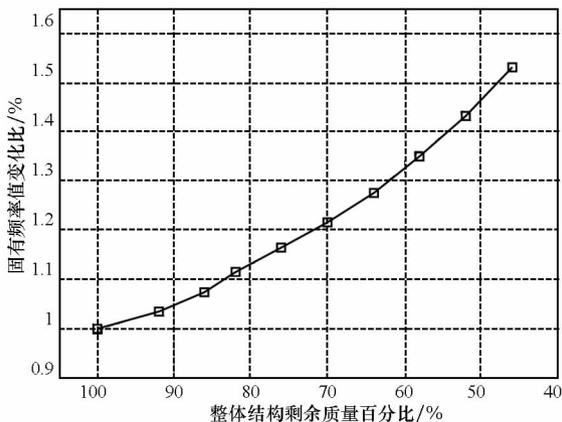


图2 固有频率随质量消耗的变化曲线
Fig.2 Natural frequency varying with the consuming of mass

2 液体推进剂处理方法

液体对结构的影响主要体现在质量、阻尼、刚度等方面。实践表明,在低频、小幅振动情况下,液体推进剂对结构刚度的贡献较小,因此在许多工程问题中,往往不考虑液体的刚度效应,只考虑质量对结构动力学特性的影响。在有限元分析中,推进剂的等效建模方法较多,主要有梁单元法、非结构质量法、“RBE3-质量点”单元法、固体单元法等。这些方法主要模拟液体的质量特性,适用于所有的静力分析和动力分析,在航天器的力学分析中得到了较好的应用。MSC. NASTRAN 软件在解决流固耦合方面问题时开发了一些流固耦合算法,包括虚拟质量法、一般流固耦合法和水弹性流体单元法。

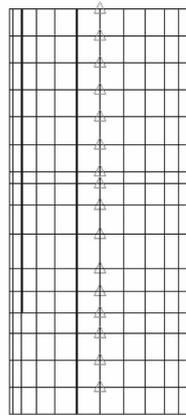


图3 梁单元法
Fig.3 Beam element modeling method

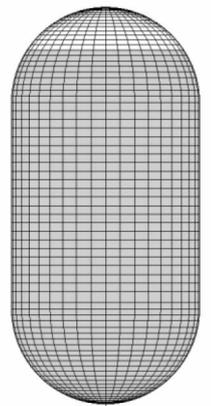


图4 附加质量法
Fig.4 Added mass modeling method

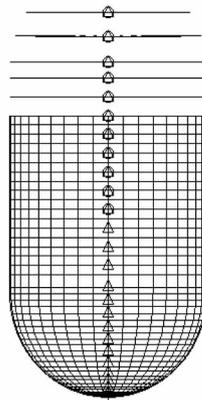


图5 “RBE3-质量点”法
Fig.5 “RBE3-Mass point” modeling method

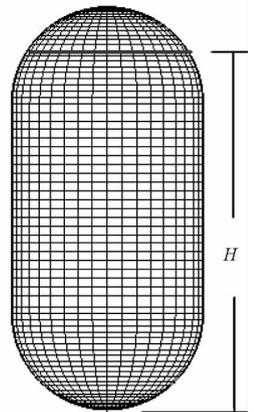


图6 虚拟质量法
Fig.6 Virtual mass modeling method

图3给出了梁单元法的示意图,该方法将贮箱等效为梁单元,推进剂质量分布到梁的各站点上,经常用于火箭模型中对贮箱的处理。图4给出了非结构质量法的示意图,即在定义板单元特

性时将推进剂的质量均匀(也可以用空间场控制质量分布)分布到贮箱壁上,从而模拟推进剂的质量特性。图 5 给出了“RBE3 - 质量点”单元法的示意图,将推进剂质量等效为沿贮箱轴向分布的质量点,然后用 RBE3 单元连接到贮箱壁上。虚拟质量法主要解决液体在容器内部或外部的流固耦合问题,不考虑液面晃动影响。对于贮箱内推进剂的流固耦合问题,通过边界元法计算单元所包含的质量,如图 6 所示,只需给出液面高度。在计算过程中会以虚拟质量的形式直接加到质量矩阵当中,主要命令包括 MFLUID、ELIST 等。一般流固耦合法需要建立并定义流体单元,然后通过定义耦合节点,实现流固耦合分析,主要用到的命令包括 MAT10、PFLUID、ACMODL 等。在具体应用过程中,需要根据整体模型的规模、计算类型、分析重点、计算精度等要求选择推进剂的建模方法。

3 推进剂消耗对固有频率和振型的影响

为了分析推进剂消耗对某大型卫星动特性的影响,本文建立了卫星的有限元模型。该卫星平

台结构采用基于贮箱平铺的平台结构方案,采用承力筒结构、板式结构与框架结构有机结合的构型形式,卫星平台截面呈正六边形。承力筒、侧板、底板和顶板等板式结构采用基于铝蜂窝的板式结构,框架和支撑杆件采用 M55J 杆件,板内预埋框和热管则采用铝合金材料。有限元建模过程中,铝蜂窝夹层结构采用 MSC. PATRAN 软件中的层合板铺层法进行处理,铝蜂窝结构等效弹性参数由文献[16]的计算公式求得。

卫星在发射、变轨和在轨的过程中,结构动力学特性(固有频率、阻尼比、振型)都随着刚度、质量和边界条件的变化而变化。本文计算卫星变轨过程中推进剂消耗对动特性的影响,因此设置边界条件为自由-自由。由于在本文卫星结构动特性分析过程中,重点关注贮箱及安装固定结构的动态特性,并且需要根据推进剂消耗多次进行计算,因此在计算过程中,选用虚拟质量法进行模态分析,通过液面高度来控制推进剂的消耗量。图 7 给出了卫星的前 4 阶振型图,由于卫星主体一阶固有频率较高,而太阳帆板刚度弱、质量小,因此低阶振型多为太阳帆板的局部振型。

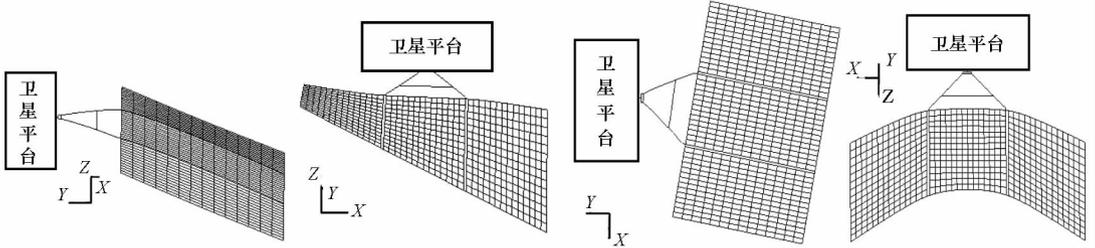


图 7 自由状态下卫星整体的前 4 阶振型

Fig. 7 The first four mode shapes of the satellite structure

表 1 固有频率随推进剂消耗的变化

Tab. 1 Natural frequency varying with the consuming of liquid propellant

阶次	振型	项目	整星剩余质量百分比					
			100%	90%	80%	70%	60%	50%
第 1 阶	沿 Z 向一阶弯曲	固有频率(Hz)	0.3457	0.3474	0.3489	0.3507	0.3535	0.3575
		变化量(%)	0.0000	0.4666	0.9154	1.4396	2.2514	3.3873
第 2 阶	绕 Y 轴扭转	固有频率(Hz)	0.4301	0.4305	0.4309	0.4315	0.4323	0.4335
		变化量(%)	0.0000	0.0893	0.1958	0.3269	0.5180	0.8007
第 3 阶	绕 Z 轴扭转	固有频率(Hz)	0.9714	0.9837	0.9972	1.0143	1.0349	1.0531
		变化量(%)	0.0000	1.2681	2.6556	4.4219	6.5421	8.4144
第 4 阶	帆板局部一阶弯曲	固有频率(Hz)	1.5706	1.5706	1.5706	1.5706	1.5706	1.5706
		变化量(%)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 1 给出了固有频率随推进剂消耗的变化,从中不难看出,推进剂消耗对不同振型的影响程

度不同。第 1 阶振型是太阳帆板沿 Z 向的一阶弯曲,当推进剂消耗整星质量的 50% 时,固有频

率仅增加了 3.3873%,影响很小。第2阶振型时太阳帆板绕 Z 向扭转,当推进剂消耗整星质量的 50% 时,固有频率仅增加了 0.8007%。第3阶振型是太阳帆板绕卫星平台的扭转,该振型受推进剂消耗的影响较大,最大值达到了 8.4144%。第4阶振型为太阳帆板的局部一阶弯曲,完全不受推进剂消耗的影响。图8和图9以曲线的形式对表1数据进行了描述,从中可以直观地看出推进剂对固有频率和固有频率变化量的影响。

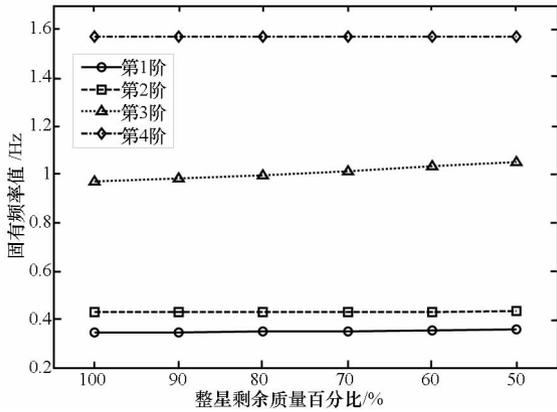


图8 前4阶固有频率随推进剂消耗的变化
Fig.8 The first four frequency varying with the consuming of liquid propellant

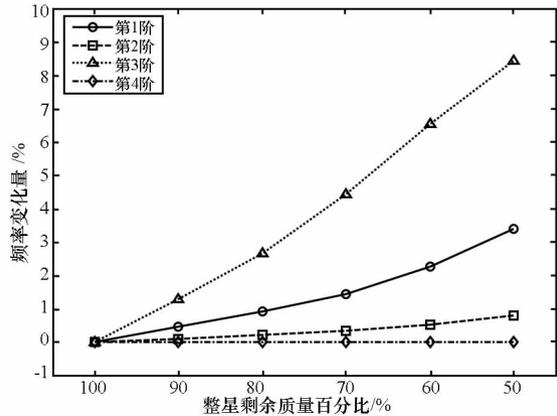


图9 前4阶固有频率变化量随推进剂消耗的变化
Fig.9 The first four frequency varying ratio with the consuming of liquid propellant

通过以上分析不难看出,推进剂消耗对不同振型的固有频率影响不同。比较而言,对整体振型(如前三阶)影响较大,而对局部振型(如第四阶)影响非常小。另外,通过对不同时刻的振型进行对比分析可知,推进剂消耗对贮箱及其安装面板的局部振型影响较大,不仅会改变振型出现的顺序,还会影响振型形状。

4 推进剂消耗对动力学响应的影响

推进剂消耗对结构动特性影响的另一个方面

体现在动力学响应。对于航天器而言,外载荷作用下的动力学响应直接影响星载仪器设备的正常工作,响应过大则会使仪器不能正常工作,甚至发生局部破坏。本文所研究的卫星结构分为上、中、下3层仪器安装板,在发动机工作时会产生振动,振动沿结构传递到每一层仪器安装板都会产生不同程度的放大。为了研究推进剂消耗对仪器安装板上动力学响应的影响,在发动机安装位置施加了幅值为1的平直谱激励,采用虚拟质量法进行了频率响应分析。其中,边界条件为自由-自由,模态阻尼比取8%。图10和图11分别给出了中层和上层仪器安装板的加速度频率响应曲线,其中 M 表示总质量,前面的系数表示剩余质量比值。从图中可以看出,随着推进剂的消耗,固有频率逐渐增大,最大响应峰值总体上逐渐增大。

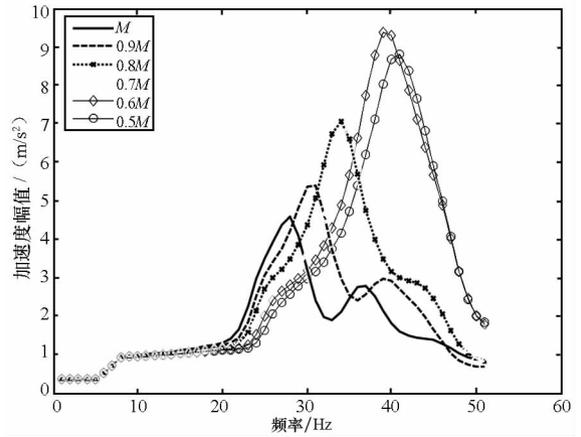


图10 中层仪器安装板频率响应曲线
Fig.10 Frequency response of the middle plate

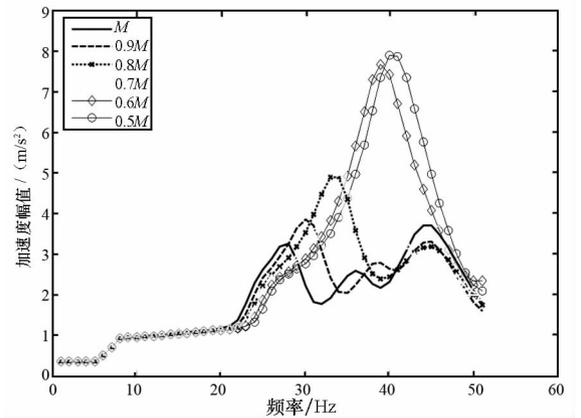


图11 上层仪器安装板频率响应曲线
Fig.11 Frequency response of the upper plate

5 结论

本文研究了液体推进剂消耗对某大型卫星结构动特性的影响,分别基于简化“弹簧-质量”模型和有限元模型进行了分析,给出了卫星结构动

特性和动响应随推进剂消耗的变化规律, 研究结果表明: (1) 随着推进剂的消耗, 卫星整体振型的固有频率逐渐增大, 但部分局部振型的固有频率保持不变; (2) 随着推进剂的消耗, 动力学响应峰值逐渐增大, 所对应的频率也逐渐增大。

参考文献 (References)

- [1] 屠善澄. 卫星姿态动力学与控制[M]. 2 版. 北京: 中国宇航出版社, 2005:185 - 191.
TU Shancheng. Satellite attitude dynamics and control [M]. 2nd Edition, Beijing: China Astronautic Publishing House. 2005:185 - 191. (in Chinese)
- [2] Falugi M A. Minimum weight design of cryogenic tank configurations for a space operating vehicle (SOV) [C] // AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition, Long Beach, California, 2007:1 - 11.
- [3] Djerassi S. An algorithm for simulation of motions of variable-mass system [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(3): 427 - 434.
- [4] Cveticanin L. Conservation laws in systems with variable mass [J]. Journal of Applied Mechanics, 1993, 60(12): 954 - 958.
- [5] Kane T R, Levinson D A. Formulation of equations of motion for complex spacecraft [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1980, 3(2): 99 - 112.
- [6] Pan Z W, Xing Y F, Zhu L W, et al. Liquid propellant analogy technique in dynamic modeling of launch vehicle [J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 53(8): 2102 - 2110.
- [7] 潘忠文, 王旭, 邢誉峰, 等. 基于梁模型的火箭纵横扭一体化建模技术 [J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1310 - 1316.
PAN Zhongwen, WANG Xu, XING Yufeng, et al. A beam model based longitudinal-lateral-torsional integrated modeling technique for launch vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(5): 1310 - 1316. (in Chinese)
- [8] Brennen C E. A review of added mass and fluid inertial forces [R]. AD - A110190, 1982.
- [9] 胡盈辉, 庄茁, 由小川. 大型储液罐在地震作用下的附加质量法研究 [J]. 压力容器, 2009, 26(8): 1 - 6.
HU Yinghui, ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan. Added mass approach to a large-scale liquid-storage tank under seismic pitations [J]. Pressure Vessel Technology, 2009, 26(8): 1 - 6. (in Chinese)
- [10] 刘焕忠, 李青, 庄茁, 等. 发展附加质量模型应用于储液罐的动力分析 [J]. 工程力学, 2005, 22: 161 - 171.
LIU Huanzhong, LI Qing, ZHUANG Zhuo, et al. Development of added mass model and application to dynamic analysis of cylindrical tanks [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22: 161 - 171. (in Chinese)
- [11] 李道奎, 刘林, 万军. 牵制释放过程中火箭液体推进剂的建模研究 [J]. 强度与环境, 2008, 35(6): 14 - 18.
LI Daokui, LIU Lin, WAN Jun. Study of the model of rocket's liquid propellant in the process of hold-own and release [J]. Structure & Environment Engineering, 2008, 35(6): 14 - 18. (in Chinese)
- [12] Damir S, Zeljan L, Damir V. Virtual mass measurement of cantilever beam partially submerged in fluid [C] // International Symposium on Coupled Methods in Numerical Dynamics, Split, Croatia, 2009: 303 - 310.
- [13] Abdullah A K. The Virtual Mass of a Rotating Sphere in Fluids [J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 72: 801 - 802.
- [14] 韩增尧. 航天器充液贮箱的动强度分析 [C] // MSC. Software 中国会议论文集, 2002.
HAN Zengyao. Dynamic analysis of liquid-filled space vehicle [C] // MSC. Software Conference, 2002. (in Chinese)
- [15] MSC. Software Corporation. Advanced dynamic analysis users guide [M]. 2005.
- [16] 富明慧, 尹久仁. 蜂窝芯层的等效弹性参数 [J]. 力学学报, 1999, 31(1): 113 - 118.
FU Minghui, YIN Jiuren. Equivalent elastic parameters of the honeycomb core [J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(1): 113 - 118. (in Chinese)