

某发动机整机模态分析

邵松林

(北京航天动力研究所, 北京 100076)

摘 要: 为了获得某型号发动机的动态特性, 采用有限元方法进行了发动机整机的模态分析。按照由组件到整机的思想, 分别建立了各个组件的有限元模型。重点对推力室和喷管的建模方法进行了分析。将推力室按等效刚度法等效为单层壳, 喷管按结构特性等效为正交各向异性壳, 并将喷管计算结果同模态试验结果进行对比, 验证了喷管建模方法的准确性。各组件模型组装为整机有限元模型, 计算得到了整机的模态分布。数值计算结果同模态试验结果吻合较好。

关键词: 动态特性; 有限元方法; 喷管; 模态试验

中图分类号: V433.9-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 04-0055-05

Modal analysis of a rocket engine

SHAO Song-lin

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: To obtain the dynamic characteristics of a certain rocket engine, a modal analysis for the engine is conducted with finite element method (FEM). According to the idea from components to integrate, the finite element model for each component is established. In addition, the modeling methods for nozzle and thrust chamber are analyzed emphatically. The thrust chamber is simplified to single-layer shell by stiffness equivalent, while the nozzle is simplified to orthotropic shell in accordance with its structural properties. The calculated result of nozzle is compared with that of modal experiment to verify the precision of the modeling method for nozzle presented in this paper. The finite element model of whole engine is assembled by all the component models, and then its modal distribution is calculated. The result of numerical calculation agrees well with that of modal test.

Keywords: dynamic characteristic; finite element method; nozzle; modal test

收稿日期: 2011-11-14; 修回日期: 2012-02-28

基金项目: 国家“863”项目(2009AA7050409)

作者简介: 邵松林 (1986—), 男, 助理工程师, 研究领域为火箭发动机结构动态特性分析

0 引言

在火箭发射和飞行过程中,会产生强烈的振动,例如火箭的横向弯曲振动、扭转振动、推进剂液体的晃动、火箭结构纵向振动及液体管路输送系统的耦合振动(POGO)等,火箭设计时必须对这些振动进行充分考虑。而火箭发动机作为火箭动力的来源,本身就是一个冲击、振动和噪声的产生源,发动机的启动、关机,级间分离所产生的冲击载荷,以及发动机工作所产生的各种强噪声等,不仅给箭上组件带来了考验,也对发动机自身的结构强度提出了较高的要求。传统的静力分析不足以解决这些振动问题,进行动态特性分析已经成为发动机设计必须要进行的一个环节。

传统的动态特性分析以试验模态分析为主,容易受试验技术条件的限制,同时试验周期较长,成本偏高。结构特性发生变化时,需要进行重复试验。随着计算机技术的发展,利用计算机进行数值模拟分析,并根据试验数据对模型进行修正,已经成为动态特性分析的一种有效的手段,在减少生产成本,缩短研制周期,以及结构优化设计等方面,起到了十分重要的作用。

本文针对我国某型号火箭发动机开展模态分析工作,并结合模态试验数据,对建模的方法和有关参数的选择进行修正,探索了组件及整机建模和简化的一般方法。

1 模态分析理论

对于一个具有线性阻尼的线性系统,其运动微分方程为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

式中: M , C , K 分别为系统的质量、阻尼及刚度矩阵。通常 M , K 矩阵为实系数对称矩阵, C 矩阵也为对称矩阵。 X 和 F 分别为系统各点的响

应向量和激励力向量。

线性系统任一点的响应向量都可以表示为各阶模态向量的线性组合,记由各阶模态向量 φ 组成的模态矩阵为 $\Phi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$, 同时引入模态坐标 Q , $Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, 利用模态矩阵进行坐标变换, $X = \Phi Q$, 得到微分方程为:

$$M\Phi\ddot{Q} + C\Phi\dot{Q} + K\Phi Q = F \quad (2)$$

液体火箭发动机结构中一般均采用金属材料,各部件以及和机架、伺服机构的连接都采用法兰或螺栓连接,材料阻尼和连接间的界面阻尼都很小,对结构固有频率和振型的影响微乎其微,因此将阻尼忽略。对无阻尼自由系统的微分方程进行傅立叶变换,得到:

$$(K - \omega^2 M)\Phi Q(\omega) = 0 \quad (3)$$

根据模态分析的正交性,将变成下面的特征值方程:

$$(K_r - \omega^2 M_r)Q = 0 \quad (4)$$

由此,即可以求出其特征值 ω_i 和特征向量 Φ_i 。求出的特征值 ω_i 即为固有频率,每个特征值 ω_i 对应的特征向量 φ_i 即为模态向量,又称为模态振型。

2 组件建模

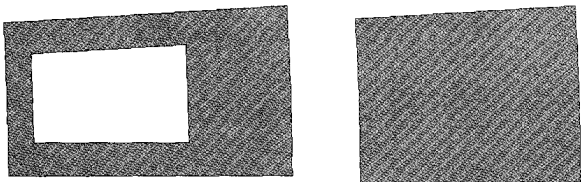
2.1 推力室

推力室为带铄槽的薄壁结构,外壁尺寸较大,可以忽略由于铄槽带来的各个方向上的结构差异,将推力室壁简化为各向同性的壳单元。根据等效刚度法的基本原则,首先按照惯性矩相等进行结构等效转换,取推力室身部直筒段进行计算。由于内外壁所采用的材料不相同,同时还需要进行材料等效转换。

取如图 1 (a)所示的推力室壁结构微元,根据实际结构尺寸,内径 103 mm,外径 114 mm,其中内壁厚度 1 mm,外壁厚厚度 4 mm,铄槽长度 6 mm。计算其对轴心的惯性矩为:

$$I = \int_{103}^{104} \rho^2 \times \rho \times \frac{3.36\pi}{180} d\rho + \int_{110}^{114} \rho^2 \times \rho \times \frac{3.36\pi}{180} d\rho + 2 \int_{104}^{110} \rho^2 \times 1.3 d\rho = 0.5731 \times 10^6$$

等效为图 1 (b) 所示的薄壁结构, 根据惯性矩相等, 可求得图 1 (b) 结构的厚度 $\delta=7.8\text{ mm}$ 。按照质量等效的原则, 等效结构的密度为 $\rho=8\ 378\text{ kg/m}^3$ 。



(a) 真实结构 (b) 等效结构
图 1 推力室壁等效图

Fig. 1 Equivalent for wall of thrust chamber

考虑内外壁材料的差异性, 采用真实材料和真实结构建立室壁单元, 忽略各个方向的差异, 进行轴向拉伸。求得等效的材料弹性模量为 $E=\sigma/\varepsilon=124.4\text{ GPa}$ 。

2.2 喷管

某型号发动机的喷管由薄壁方管空间螺旋而成, 螺旋结构对整体刚度有加强, 建模时采用旋转材料坐标系模拟, 同时忽略方管螺旋角度的变化, 将材料坐标系旋转 40° 。对喷管结构的简化有 3 种方案可供选择: 1) 简化为各向同性单层壳单元; 2) 简化为正交各向异性单层壳单元; 3) 简化为正交各向异性 3 层壳单元。分别就这 3 种方案进行对比分析, 并结合喷管的模态试验数据, 探索最佳的喷管简化方法。

2.2.1 各向同性壳单元

按照等效刚度法, 依据惯性矩相等进行结构等效转换, 忽略方管入口端的截面变化, 取方管的截面最大尺寸进行等效计算。可得到等效壳单元厚度为 3.65 mm , 喷管等效密度为 $3\ 315\text{ kg/m}^3$, 由于将喷管等效为各向同性壳, 对方管进行轴向拉伸, 可得到方管的等效弹性模量为 136 GPa 。

根据上述参数建立喷管有限元模型, 参照喷管模态试验时的边界条件添加边界约束, 进行计算, 结果对比见表 1。

表 1 喷管模态结果对比

Tab. 1 Comparision of modal result of nozzle

阶次	计算结果	试验结果	偏差
1	18.76	25.29	-25.82%
2	36.37	33.2	9.55%

2.2.2 正交各向异性单层壳单元

由于方管的壁很薄, 各个方向的差异比较明显。采用正交各向异性壳单元来等效, 厚度和材料的密度与各向同性等效时相同。对方管进行 3 个方向上的拉伸和扭转, 确定方管 3 个方向上的弹性模量和剪切模量。参照模态试验的边界条件建立喷管模型并计算, 结果对比见表 2。

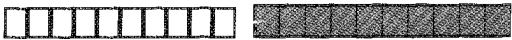
表 2 喷管模态结果对比

Tab. 2 Comparision of modal result of nozzle

阶次	计算结果	试验结果	偏差
1	16.94	25.29	-33.02%
2	29.01	33.2	-12.62%

2.2.3 正交各向异性 3 层壳单元

如图 2 所示, 将喷管按实际结构特点等效为 3 层壳单元, 结构尺寸按真实结构尺寸给定。内、外表层为各向同性壳单元, 采用真实材料参数; 中间层为正交各向异性壳单元, 密度为等效密度, 即用喷管的剩余质量除以中间层的建模体积, 为 $1\ 386\text{ kg/m}^3$ 。



(a) 真实结构 (b) 等效结构
图 2 喷管壁等效图

Fig. 2 Equivalent of nozzle wall

根据中间层结构的特点, 沿周向的刚度很小, 弹性模量和剪切模量都取为一个相对小量。取 10 根方管组成的微元, 按照实际结构和等效结构建立有限元模型, 分别进行模态分析, 并利用实际结构的计算结果对等效结构中间层的其他

4 推广应用情况

该控制系统由于控制精度高、稳定性好、操作简便,已经在多个系统中得到了充分应用,该系统的应用,改变了原系统使用节流圈控制充放气速率不均匀、精度不高的状况,提高了生产效率,使新试验系统适用于多种产品的性能检测,拓宽了系统试验能力,为企业创造了更多的经济效益。

5 结论

电子压力控制系统具有工作可靠性高、稳定性好、安装灵活、可远程控制等优点,可以实现高压气体系统调压的远程自动控制,这项压力自动控制技术也可以应用到气控流量调节阀对流量的调节,使其成为新型的自动化流量调节阀。电子压力控制系统的研究和应用有效提高了试验精度和效率,提高了试验系统自动化水平。

参考文献:

- [1] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 秦宏波, 汪国兴, 胡寿根. 基于压力控制的工业压缩空气供需平衡控制系统的设计及应用研究[J]. 中国机械工程, 2006 (8): 67-70.
- [3] 王福生, 孟晓风. 一种气体压力控制方法及应用[J]. 测控技术, 2001 (20): 26-28.
- [4] 孟昕元, 陈震. PID 调节的适用性[J]. 2002 (6): 58-59.
- [5] 英飞凌, 朱元, 王双全. 电子压力控制器 PID 算法的研究[J]. 今日电子, 2008 (6): 77-79.
- [6] 吴志红, 王双全, 朱元. 基于模糊 PID 控制的电子压力控制器的实现[J]. 机械与电子, 2009 (4): 43-45.
- [7] 衣正尧, 熊伟, 王海涛. 液压力检测试验台的模糊 PID 控制系统设计[J]. 机床与液压, 2008 (10): 88-91.
- [8] 刘忠, 龙国键, 褚福磊. 基于高速开关电磁阀技术的压力控制系统设计[J]. 液压与气动, 2003 (3): 13-14.
- [9] 肖俊旺, 夏静. 基于 LabVIEW 的火箭试验数据处理方法[J]. 电子设计工程, 2001, 19(4): 38-40.
- [10] 张磊. 基于 FPGA 与 PCI 总线的实时控制计算机的设计与实现[J]. 电子设计工程, 2011, 19(20): 173-180.
- [11] 孙诚, 王雪梅, 张艳红. 连接计算机并口的数据采集系统[J]. 电子设计工程, 2011, 19(16): 48-50.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 59 页)

参考文献:

- [1] 黄道琼, 张继桐, 何洪庆. 四机并联发动机低频动态特性分析[J]. 火箭推进, 2004, 30(4): 27-31.
- [3] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 于海昌. 发动机对火箭振动特性的影响[J]. 导弹与航天运载技术. 1997 (4): 30-39.
- [5] 于海昌. 航天器振动试验的最新进展[J]. 导弹与航天运载技术, 1999 (4): 35-41.
- [6] 史宏斌, 侯晓, 钱勤, 等. 固体火箭发动机喷管模态分析[J]. 固体火箭技术, 2001, 24(3): 5-9.
- [7] 白西刚. 柔性喷管动力特性分析 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [8] 管迪华. 模态分析技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

(编辑: 马 杰)