

推力室结构力学分析与优化设计

李 毅, 孙 冰, 方 杰

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 针对某液体火箭发动机推力室建立了参数化模型,使用有限元方法分析结构固有频率和振型,并进行了模态试验验证.采用最优拉丁超立方方法进行计算机数值试验设计,得到了结构质量和 1 阶固有频率对于设计变量的敏感性,对于优化设计过程具有指导意义.使用 NSGA-II 算法开展多目标优化设计,得到了同时满足静力学与动力学设计要求的推力室结构最优设计方案.最优设计方案的推力室质量减轻了 9.1%,1 阶固有频率值提高了 22.6%,结果表明该方法能有效提高推力室的力学性能.

关 键 词: 推力室结构; 静强度分析; 结构动力学; 多目标优化; 遗传算法

中图分类号: V434

文献标志码: A

Structural mechanics analysis and optimization design of thrust chamber

LI Yi, SUN Bing, FANG Jie

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A parameterized model of a liquid rocket engine thrust chamber was established. Natural frequencies and vibration modes of structure were obtained by finite element method, and verified by modal experiment. Computer numerical design of experiments was conducted by optimal Latin hypercube design in order to get sensitivity of design variables for structural mass and first order natural frequency, which had a guiding significance for the process of optimal design. Multi-objective optimization was carried out using NSGA-II algorithm, and the optimal structural parameters were obtained, satisfying both static and dynamic requirements. The mass decrease of the optimal design was 9.1%, meanwhile the first order natural frequency increase was 22.6%. The results show that the proposed method improves the mechanical property of thrust chamber effectively.

Key words: thrust chamber structure; static strength analysis; structural dynamics; multi-objective optimization; genetic algorithm

液体火箭发动机推力室由燃烧室和喷管两部分组成,推进剂燃气在燃烧室内进行化学反应,经过喷管加速后高速喷出以产生推力.推力室在工作状态中处于高温高压环境,其结构设计应该同时满足相应的静力学和动力学要求,以保证工作性能.

现代液体火箭发动机的发展方向是高性能、高可靠性、低成本和可重复使用.传统的经验设计、类比设计和静态设计,已经不能满足当前的工程设计要求,还需要对其进行相应的结构动力学研究^[1-3].目前关于液体火箭发动机结构的静力学与动力学优化设计对象多集中于涡轮泵相关组

收稿日期:2015-01-14

基金项目:国家高技术研究发展计划

作者简介:李毅(1990—),男,辽宁大连人,博士生,主要从事液体火箭发动机研究.

件^[4-6]. 为了改善液体火箭发动机的综合性能, 推力室组件的优化设计也需要同时满足静力学与动力学的设计要求.

本文针对某液体火箭发动机推力室, 进行参数化建模, 采用经验公式开展静强度分析, 使用有限元软件分析结构固有频率和振型; 然后, 将尺寸参数作为设计变量, 采用最优拉丁超立方方法进行计算机数值试验设计, 分别得到了结构质量和 1 阶固有频率对于设计变量的敏感性; 最后, 以推力室结构质量和 1 阶固有频率为优化目标、静力学及动力学准则作为约束条件, 采用遗传优化算法开展多目标优化设计, 得到了同时满足静力学与动力学设计要求的推力室结构最优设计方案.

1 推力室参数化建模

研究对象为某小型液体火箭发动机推力室, 具体结构如图 1 所示. 推力室主要由圆筒形燃烧室和钟形喷管组成, 通过头部法兰盘与喷注器组件连接, 冷却方式为辐射冷却. 由于本研究主要开展结构力学分析与优化设计, 而推力室内型面尺寸影响到液体火箭发动机推力和比冲等性能参数, 所以只将推力室结构的外部尺寸进行参数化处理, 并作为优化设计变量.

图 1 中各结构参数几何意义如下: R_1 表示法兰盘半径, L_1 表示法兰盘厚度, R_2 表示燃烧室外径, L_2 表示燃烧室中间段长度, R_3 表示喉部外径, R_4 表示法兰盘通孔所在圆的半径, D 表示喷管壁厚.

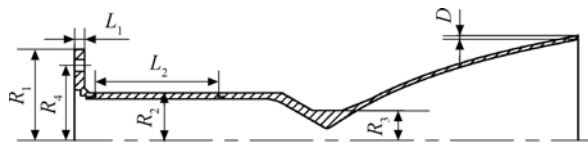


图 1 推力室结构

Fig. 1 Structure of thrust chamber

2 静强度分析

考虑推力室结构特点及工作环境, 燃烧室内压强高, 应力值较大, 因此, 静强度分析主要考察圆筒段的最大应力值.

根据弹性理论, 最大应力出现在筒壁内侧. 参考承压圆筒应力计算公式, 其内侧的周向与径向正应力分别为

$$\sigma_1 = \frac{R^2 + r^2}{R^2 - r^2} p_c \quad (1)$$

$$\sigma_r = -p_c \quad (2)$$

式中 R 表示圆筒外径, r 表示圆筒内径, p_c 表示圆筒内侧压强.

根据第三强度理论, 筒体的强度条件^[7]为

$$\sigma_{\text{e3}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2R^2}{R^2 - r^2} p_c \leq [\sigma] \quad (3)$$

式中 σ_{e3} 为第三强度理论的相当应力, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力.

将推力室初始结构的参数 $R=24 \text{ mm}$, $r=21 \text{ mm}$, $p_c=2.0 \text{ MPa}$, 代入式(3)可得

$$\sigma_{\text{e3}} = 17.07 \text{ MPa} \leq [\sigma] = 100 \text{ MPa}$$

因此, 推力室初始结构符合静强度要求.

3 结构动力学特性分析

3.1 仿真分析

采用有限元软件对推力室结构开展动力学特性分析, 得到结构的前 4 阶自由模态固有频率值及相应的振型图, 分别如表 1 和图 2 所示.

由图 2 可以看出, 在前 4 阶振型中, 喷管尾部的位移都较为明显.

表 1 前 4 阶自由模态固有频率

Table 1 First four order free modal natural frequencies

阶数	1	2	3	4
频率/Hz	682.45	682.48	1626.6	1626.6

3.2 模态试验分析

采用锤击法测量推力室自由模态的固有频率. 采用多点激励一点响应的方式测量模态, 分别敲击 8 个点, 并用两个加速度传感器测量, 得到 16 条频率响应函数曲线, 如图 3 所示.

在模态识别过程结束后, 对各阶模态进行了置信度验证, 得到了模态置信度(modal assurance criterion, MAC)矩阵, 如图 4 所示.

根据模态基本理论, 各阶模态向量是相互独立无耦合的, 各阶向量只和自身相乘得 1, 与其他向量相乘得 0, 理想的 MAC 矩阵应该是对角线数值为 1, 其他值为 0. MAC 矩阵非对角元越小, 说明各阶振型独立性越好^[8]. 因此, 试验得到的前 4 阶模态值是可信的. 表 2 为前 4 阶自由模态频率计算值与试验值对比.

从表 2 中可以看出, 有限元计算结果与试验结果相比, 误差在 4% 以内, 可以认为有限元模型是准确的.

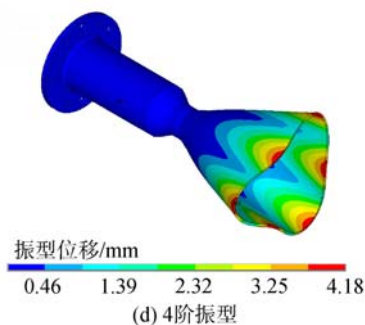
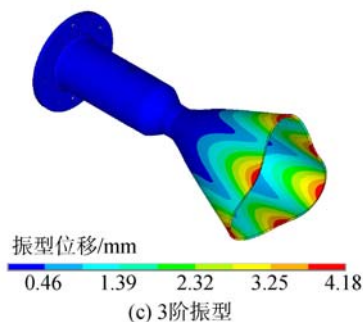
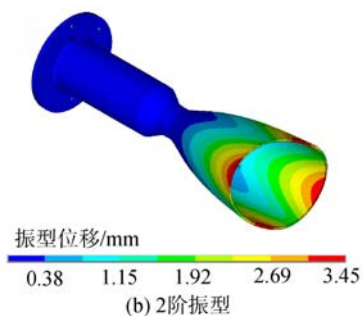
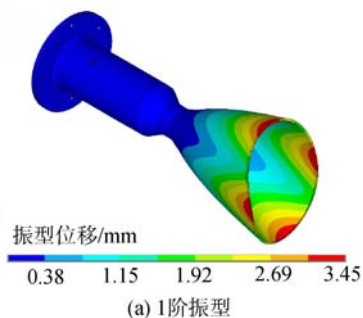


图2 前4阶振型

Fig. 2 First four order vibration modes

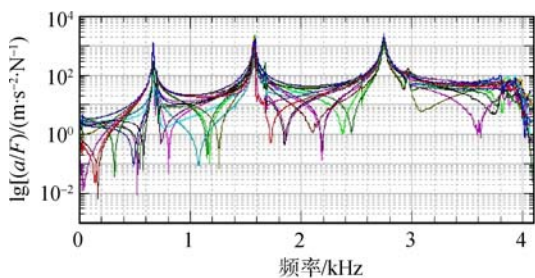


图3 频率响应函数曲线

Fig. 3 Frequency response function curves

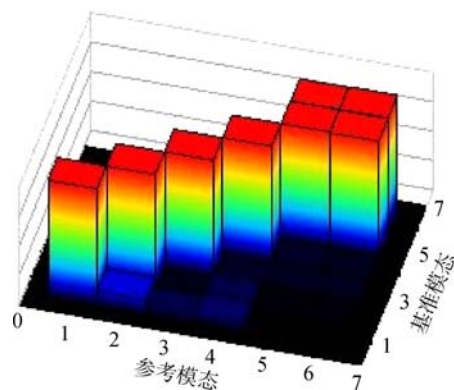


图4 MAC矩阵

Fig. 4 Matrix MAC

表2 前4阶自由模态频率

Table 2 First four order free modal frequencies

阶数	自由模态频率/Hz		误差/%
	计算值	试验值	
1	682.45	666.8	2.34
2	682.48	702.4	-2.83
3	1626.6	1574.6	3.30
4	1626.6	1582.7	2.77

4 多目标优化设计

4.1 优化模型及分析过程的集成

如图1所示,推力室结构的优化设计变量为:法兰盘半径 R_1 , 法兰盘厚度 L_1 , 燃烧室外径 R_2 , 喉部外径 R_3 , 法兰盘通孔所在圆的半径 R_4 , 喷管壁厚 D 。

优化目标:推力室结构质量 m 最小化,同时在推力室头部的部分通孔施加全约束后的1阶固有频率 f 最大化。

优化的约束条件:每个设计变量给出相应的几何约束,以防止结构发生干涉; σ_{e3} 小于许用应力;前4阶振型的最大位移 $X_i (i=1,2,3,4)$ 满足给定范围,以使结构在发生共振时不会有过大变形,防止影响周围元器件。

利用有限元软件的APDL(ANSYS parametric design language)语言生成脚本文件,执行静强度分析和结构动力学特性分析;结合优化软件的集成功能,读取并改写脚本文件中的参数,获取相应的计算分析结果,从而实现推力室结构力学的参数化分析与优化设计的全过程。

4.2 计算机数值试验设计

为了得到优化目标对于设计变量的敏感性,

采用最优拉丁超立方方法对推力室结构开展了计算机数值试验设计. 最优拉丁超立方方法使所有数据点在设计空间分布均匀, 具有比较好的空间填充性和均衡性^[9]. 在分析过程中存在建模失败的情况, 原因是尺寸变化范围过大导致干涉, 无法生成有效实体. 因此在灵敏度计算前进行了校核计算, 排除了无法生成实体结构的尺寸范围, 保证了灵敏度计算的完整有效性. 图 5 和图 6 分别是各试验变量对于推力室结构质量 m 和 1 阶固有频率 f 的 Pareto 分析图.

Pareto 图反映了样本拟合后模型中所有项对每个响应的贡献程度百分比, 因此可以得出各个变量对于目标和约束的影响^[9-10]. 可以看出, 对于推力室结构质量 m 影响较大的设计变量是燃烧室外径 R_2 、喷管厚度 D 以及法兰盘半径 R_1 ; 对于 1 阶固有频率 f 影响较大的设计变量是燃烧室外径 R_2 和法兰盘通孔所在圆的半径 R_4 和喷管厚度 D . 考虑到 Pareto 图中的各个柱状图表示该输入变量对于输出参数的正效应或负效应的数值, 由图 6 可以看出: 增大燃烧室外径有利于提高 1 阶固有频率值; 而增大喷管厚度或法兰盘上通孔排列半径则会减小 1 阶固有频率值.

4.3 优化结果及分析

利用优化软件中的多目标遗传算法 NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II) 进行寻优, 得到关于推力室结构质量 m 和 1 阶固有频率 f 的 Pareto 解集. 相对于多目标遗传算法, NSGA-II 算法在保证计算量更小的同时, 采用更加合理的适值分配方法, 具有更加优越的优化性能^[11-15].

采用 p 模理想点法^[16-18] 在 Pareto 解集中求得最优设计方案. 此处取 p 值为 2, 求解方法也称为最短距离法, 相应的优化目标定义如下:

$$\min Y = \min \left[\left(\frac{m - m^*}{m^*} \right)^2 + \left(\frac{f - f^*}{f^*} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中上标 * 表示相应变量的单目标最优值. Y 最小值对应的即为最优设计方案. 图 7 给出了目标解集的优化过程, 图中的三角形表示目标空间中的初始设计点, 圆形表示普通迭代点, 方形表示 Pareto 设计点, 白色菱形表示采用 p 模理想点法得到的最优设计点.

表 3 列出了推力室结构初始值与优化值的对比. 可以看出, 静力约束对于优化过程没有起到太大作用, 主要是各阶振型的最大位移限制了最优

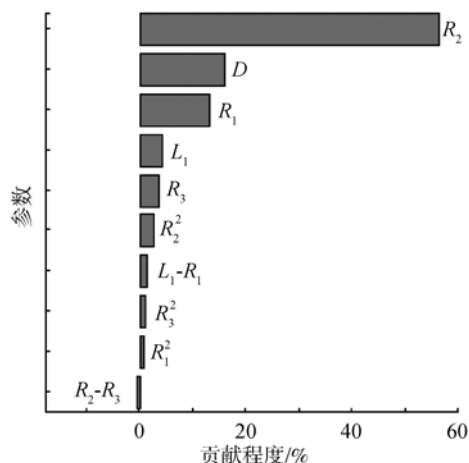


图 5 结构质量 Pareto 分析图

Fig. 5 Pareto analysis of factors effect on structural mass

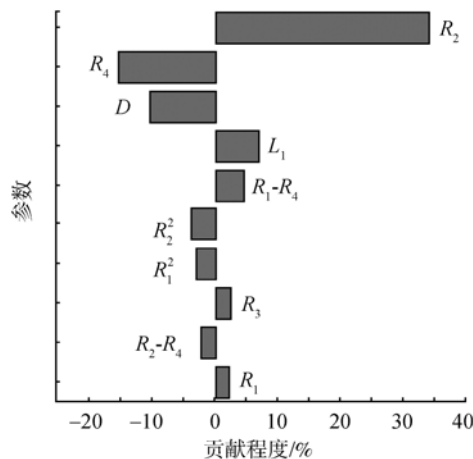


图 6 结构 1 阶固有频率 Pareto 分析图

Fig. 6 Pareto analysis of factors effect on structural first order natural frequency

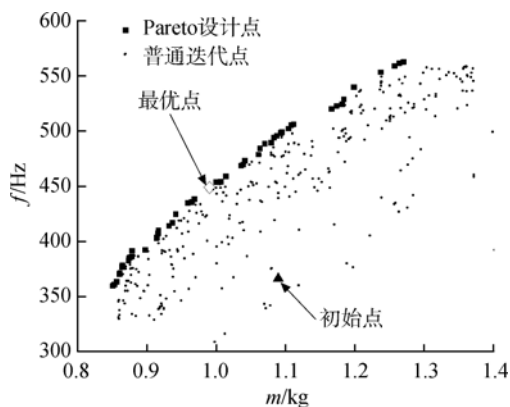


图 7 优化过程散点图

Fig. 7 Scatter plot of optimization procedure

解. 关于设计变量, 法兰盘厚度 L_1 接近了上限值, 而法兰盘半径 R_1 、尾喷管厚度 D 、法兰盘通孔所

在圆半径 R_4 接近了下限值,因此,在设计推力室结构时,若要实现 1 阶固有频率最大化,同时保证质量最小化,可以考虑适当减小燃烧室外径和尾喷管厚度,增加法兰盘的厚度,并在结构不发生干涉的前提下减小法兰盘通孔所在圆的半径,以满足设计要求.在给定的权重系数下,最优设计方案的推力室质量减轻 9.1%,1 阶固有频率值提高 22.6%,性能得到提升.

表 3 设计变量、约束条件及优化目标

Table 3 Design variables, constrains and optimization objectives

	变量	初始值	下限	上限	最优值
设计变量	R_1/mm	46	41.4	50.6	41.80
	L_1/mm	5	4.5	5.5	5.36
	R_2/mm	24	23.04	26.4	24.04
	R_3/mm	15	13.5	16.5	14.32
	D/mm	2	1.7	2.3	1.71
	R_4/mm	38	34.2	39.52	34.49
约束条件	X_1/mm	1.93		2.2	2.17
	X_2/mm	1.93		2.2	2.17
	X_3/mm	3.45		4	3.74
	X_4/mm	3.45		4	3.74
	σ_3/MPa	17.07		100	16.88
优化目标	Y	0.448			0.260
	m/kg	1.0887			0.9891
	f/Hz	366.22			448.93

5 结 论

通过本文的研究,可以得出以下结论:

1) 对某液体火箭发动机推力室结构进行了力学特性分析,并通过模态试验验证了有限元模型.利用遗传算法,得到最优设计方案的推力室质量减轻 9.1%,1 阶固有频率值提高 22.6%,结果表明该方法能有效提高推力室的力学性能.

2) 通过计算机数值试验设计分别得到了质量和 1 阶固有频率对于设计变量的敏感性,分析结果对于优化设计过程具有指导意义.尤其是燃烧室外径、法兰盘通孔位置和喷管厚度对于推力室 1 阶固有频率有较大影响.

参考文献:

[1] 杜飞平,谭永华,陈建华.基于 ITD 和 STD 的液体火箭发

动机模态参数辨识方法[J].火箭推进,2012,38(3):34-39.

DU Feiping, TAN Yonghua, CHEN Jianhua. ITD and STD based identification for modal parameters of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(3): 34-39. (in Chinese)

[2] 张锦江,杨智春.具有多阶频率与振型约束的结构动力学优化设计[J].强度与环境,2007,34(1):11-16.

ZHANG Jinjiang, YANG Zhichun. Structural dynamics optimization design with constraints of multiple natural frequencies and modal shape[J]. Structure and Environment Engineering, 2007, 34(1): 11-16. (in Chinese)

[3] 陈建军,车建文,崔明涛,等.结构动力学优化设计评述与展望[J].力学进展,2001,31(2):181-192.

CHEN Jianjun, CHE Jianwen, CUI Mingtao, et al. A review on structural dynamic optimum design[J]. Advances in Mechanics, 2001, 31(2): 181-192. (in Chinese)

[4] 樊江,曾维维,王荣桥,等.基于 iSIGHT 的涡轮叶片叶冠优化设计[J].航空动力学报,2011,26(4):745-751.

FAN Jiang, ZENG Weiwei, WANG Rongqiao, et al. Optimization design of the turbine blade shroud based on iSIGHT software[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(4): 745-751. (in Chinese)

[5] 王婧超,李立州,岳珠峰.涡轮叶片的多学科设计优化系统[J].航空动力学报,2007,22(1):23-29.

WANG Jingchao, LI Lizhou, YUE Zhufeng. Multidisciplinary optimization design system for turbine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 23-29. (in Chinese)

[6] 张琰.涡轮泵静压轴承的动力特性分析及结构优化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

ZHANG Yan. Dynamic characteristic analysis and structure optimization for the hydrostatic bearing of turbopump [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)

[7] 单辉祖.材料力学: I [M].北京:高等教育出版社,2009.

[8] 林贤坤,张令弥,郭勤涛,等.协同进化遗传算法在传感器优化配置中的应用[J].振动与冲击,2009,28(3):190-194.

LIN Xiankun, ZHANG Lingmi, GUO Qintao, et al. Application of coevolutionary genetic algorithm in optimal sensor placement[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(3): 190-194. (in Chinese)

[9] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M].北京:北京航空航天大学出版社,2012.

[10] 方杰,童晓燕,毛晓芳,等.某型发动机喷管的多学科设计优化[J].推进技术,2004,25(6):557-560.

FANG Jie, TONG Xiaoyan, MAO Xiaofang, et al. An MDO approach for engine nozzle design[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 557-560. (in Chinese)

[11] 李玥,孙健国.基于遗传算法的航空发动机多目标优化 PID 控制[J].航空动力学报,2008,23(1):174-178.

- LI Yue, SUN Jianguo. Multi-objective optimization of aeroengine PID control based on multi-objective genetic algorithms[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 174-178. (in Chinese)
- [12] Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [13] Tomoiaga B, Chindris M, Sumper A, et al. Pareto optimal-reconfiguration of power distribution systems using a genetic algorithm based on NSGA-II [J]. Energies, 2013, 6(3): 1439-1455.
- [14] LI Hui, ZHANG Qingfu. Multiobjective optimization problems with complicated pareto sets, MOEA/D and NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 284-302.
- [15] 熊剑, 王新月, 施永强, 等. 基于并行多目标遗传算法大涵道分开始排气系统气动优化设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(6): 1384-1390.
- XIONG Jian, WANG Xinyue, SHI Yongqiang, et al. Aerodynamic optimization design of high bypass ratio separate-flow exhaust system based on parallel multi-objective genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(6): 1384-1390. (in Chinese)
- [16] 郑赞韬, 方杰, 蔡国飙. 应用于工程设计的多目标优化方法比较[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(7): 860-864.
- ZHENG Yuntao, FANG Jie, CAI Guobiao. Comparison of multi-objective optimization methods on engineering design [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(7): 860-864. (in Chinese)
- [17] 朱丽, 侯丽雅, 董涛. 叠层制造中基于混合遗传算法的分层方向优化[J]. 中国机械工程, 2003, 14(19): 1642-1645.
- ZHU Li, HOU Liya, DONG Tao. Optimization of part-building orientation based on mixed genetic algorithm or layered manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(19): 1642-1645. (in Chinese)
- [18] 杨荣山. 轿车底盘平台开发中多目标优化方法的研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- YANG Rongshan. Study & application of multi-objective-optimization methodology in the car chassis platform development [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)