燃气发生器身部多学科设计优化

童晓艳 蔡国飙 尘 军 王 珏

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083) (北京航天动力机械研究所, 北京 100076)

摘 要: 为了探索液体火箭发动机多学科设计优化的一般方法,以液体火箭发动机燃气发生器身部为研究对象,在对其进行面向设计的多学科分析的基础上,建立了燃气发生器身部的多学科优化模型,涉及流动、传热、结构强度3个相互耦合的学科.引入了一种新的多目标方法——物理规划方法处理其中的多目标优化问题,通过类别函数将设计者的偏好转化为优化目标,避免了对各个不同大小和量纲的分目标之间重要性的比较和权衡.优化结果显示,利用多学科设计优化减轻了燃气发生器的质量,改善了原有设计,能够提高发动机的设计水平.

关 键 词: 优化; 燃气发生器; 规划理论; 多学科设计优化; 物理规划

中图分类号: V 434^{+}.22

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1250-05

Multidisciplinary design optimization of gas-generator body

Tong Xiaoyan Cai Guobiao

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Chen Jun Wang Jue

(Institute of Beijing Aerospace Power Mechanics, Beijing 100076, China)

Abstract: To exploit a generic multidisciplinary design optimization (MDO) method on liquid propellant rocket engines, a gas-generator body in a liquid propellant rocket engine was used as the object of this research. Based on the design-oriented multidisciplinary analysis, the multidisciplinary design optimization model of the gas-generator body was constructed. Three coupling disciplines, fluid dynamics, heat transfer and mechanics were included in the MDO model. A new multi-objective method called physical programming was introduced to deal with the multi-objective optimization problem in this research. In physical programming, the objective in the optimization problem reflects the preference of designers through class function, which avoids the balance among objectives with different magnitudes and dimensions. The result shows that the mass of the gas generator was reduced and the original design was improved by multidisciplinary design optimization. Multidisciplinary design optimization can be used to obtain the better design of the whole liquid propellant rocket engines.

Key words: optimization; gas generators; programming theory; multidisciplinary design optimization; physical programming

多学科设计优化(MDO,Multidisciplinary Design Optimization)是对由相互影响和耦合的物理现象主导并由相互作用的子系统组成的复杂工程系统进行设计的方法论,它强调各学科和子系统间的协同作用[1].由于现代设计问题的规模大、涉及的学科多,并且学科之间的耦合关系强,传统单学科的串行设计优化方法将学科之间的耦合关联隔离开来,往往找到的不是设计问题的最优解,而MDO方法能克服这一弊病,所以很快得到了广泛关注,应用领域从早期的航空、航天扩展到船

收稿日期: 2005-11-25

作者简介: 童晓艳(1975-),女,湖北荆门人,副教授,tongxy_buaa@163.com.

舶、车辆、制造甚至管理等领域[2-4]. 我国对 MDO 的研究是高等院校首先开展的,文献[5-6]最早介绍了 MDO 基本概念、MDO 算法,对其在飞行器设计中的应用进行了研究. 文献[7]进行了某型发动机喷管的 MDO,涉及了气动、结构学科,改善了原有设计,但是没有考虑传热和结构热强度的问题. 文献[8]利用协同优化算法和并行计算进行了火箭发动机再生冷却推力室的 MDO. 推力室是液体火箭发动机中的重要组件,在液体火箭发动机的燃气发生器设计中所涉及的学科和推力室设计中所涉及的学科基本相同,但是燃气发生器中流场计算要简单省时一些. 为了既能反映火箭发动机设计中的一般问题,又简化模型,缩短计算时间,本文对某液体火箭发动机上的燃气发生器身部进行了多学科设计优化,涉及流动、传热、结构强度 3 个学科,对于优化中常遇到的多目标优化问题,利用一种新的多目标方法——物理规划方法进行多目标处理,将燃气发生器的设计从单学科的隔离设计扩展到多个学科的协同设计,所采用的方法可以推广应用到推力室设计或其它发动机组件的设计中.

1　多学科设计优化问题的描述

本文进行多学科设计优化的研究对象为简化的液体火箭发动机上的燃气发生器身部,图 1 为相关的结构参数示意图. 燃气发生器身部材料是高温合金 GH4169,燃烧工质为氢气和氧气,燃气的总温 $T=860\,\mathrm{K}$,总压 $P=8.5\,\mathrm{MPa}$,其它参数由热力计算得到.

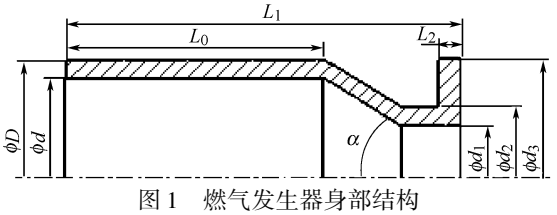


图 1　燃气发生器身部结构

假设燃气在燃气发生器头部已进行了充分的化学反应,在身部进行的是化学冻结流动. 考虑到燃气发生器的身部前后都有连接件,所以设计优化时保持其流道的入口、出口直径和总长度不变,入口水平直段的长度也不变,只改变其收缩段的形状、长度以及整个身部的壁厚,即优化变量为燃气发生器身部壁厚和收缩段的内、外型面的相关参数. 用 NURBS 曲线拟合收缩段在轴对称平面的型线,取内型线的优化变量为控制点的径向坐标 y_1, y_2, y_3, y_4. 图 2 给出了 5 个优化变量的示意.

在燃气发生器设计过程中,一般希望它能产生温度均匀、压强稳定的燃气. 对于稳态的分析,这样的性能不便于用确定性目标函数表达,本文为了研究对燃气发生器进行多学科分析与设计优化的可行性和一般过程,出于简便的考虑,确定优化目标为燃气发生器质量 M 最小化、总压恢复系数 σ 最大化(燃气流动的总压损失最小化).

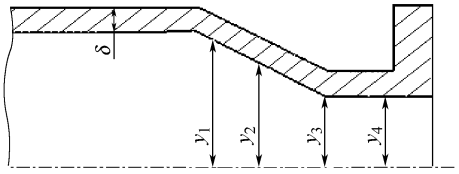


图 2　设计变量示意图

2　问题的求解

2.1　MDO 算法的选择

MDO 的算法分为单级优化算法和多级优化算法两大类,其中单级优化算法有 MDF(Multidisciplinary Design Feasibility)、IDF(Individual Disciplinary Feasibility)、AAO(All At Once)等,多级优化算法有 CO(Collaborative Optimization)、CSSO(Concurrent SubSpace Optimization)、BLISS(Bi-Level Integrated System Synthesis)等多种. 对于并不十分复杂的系统,单级优化算法具有能够可靠地找到改进解、收敛性好的优点. 多级优化算法一般适用于多学科分析耗时长的复杂系统. 在本文的设计优化中,学科之间的耦合量是用离散的数值量(相当于边界条件)表达的,采用多级算法无法求解优化问题,所以选择了单级优化算法. 在单级优化算法中,MDF 算法所需的设计变量最少,并且对已有的学科分析程序进行很少的改动,就能够满足 MDF 算法进行多学科设计优化的需要,所以在对燃气发生器的优化过程中采用了 MDF 算法.

2.2　多目标处理

多目标优化是优化中的常见形式,一般用线性加权法、理想点法、逐步宽容约束法等多种方法来将多目标优化问题转化为单目标优化问题. 本文的多目标处理采用了一种新的多目标方法——物理规划法.

物理规划是由 A. Messac 提出的一种多目标优化方法[9]. 该方法根据目标的类型将目标分为软目标和硬目标,硬目标作为约束按常规方法处理,软目标有 4 种类型(1S,2S,3S 和 4S),按以下方法处理:设计者首先根据自己的偏好对各个软目标的函数值确定出自己很满意、满意、可接受、

不满意、很不满意以及不可行的区间,然后利用凹的三次样条将它映射成为类别函数(class-function),每一个目标函数的值都通过三次样条映射与一个类别函数的值 $\bar{g}_i$ 对应,如图3、图4所示. 然后将所有目标函数的类别函数值综合起来构成总的偏好函数作为优化目标,这样就将多目标问题转化成了单目标问题. 物理规划中的类别函数将量纲和大小都不同的各个目标分别映射成为设计者的偏好,反映了设计者的满意程度,避免了一般多目标优化方法中对各个不同类型和量纲的目标之间重要性的比较和权衡,具有更明确的物理意义,使用起来更方便.

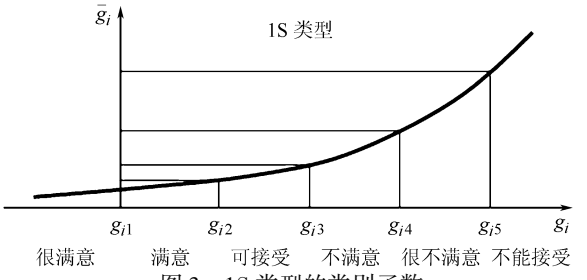


图3 1S类型的类别函数

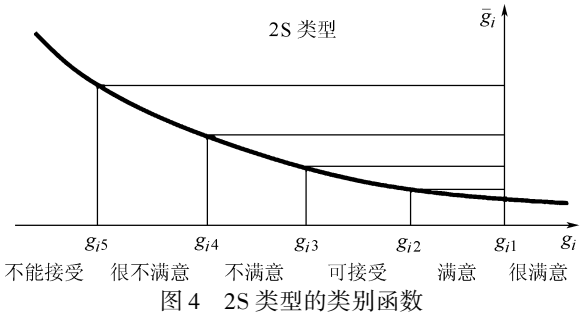


图4 2S类型的类别函数

本文的优化目标燃气发生器质量最小化属于物理规划中的1S类型,总压恢复系数最大化属于物理规划中的2S类型. 根据个人的偏好和经验确定的这两个目标的满意程度区间如表1所示. 例如,对于燃气发生器质量,如果大于6 kg则不可接受,处于4.0~4.8 kg之间则满意,小于4 kg则很满意. 通过图3和图4所示的样条映射,就将燃气发生器的质量和总压恢复系数转化为相应的类别函数值,再构成总目标函数 $\hat{g} = \lg\left(\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\bar{g}_i\right)$. 在物理规划中,虽然总目标函数也是采用线性求和的方式获得,但它是对转换后的各目标的满意度的叠加,要比直接对目标赋予不同权系数再求和的物理意义更明确,也更合理.

2.3 面向设计的多学科分析

燃气发生器所涉及的流动、传热和结构问题都是通过内外壁面联系起来的. 对于一给定型面,将其气动和传热的仿真分析耦合起来,求出燃气的总压恢复系数和燃气发生器质量,并求出内外壁面的温度和压力分布后,作为结构强度求解的边界条件. 图5的结构设计矩阵(DSM, Design Structure Matrix)表示了燃气发生器设计分析仿真中各学科模块之间的耦合关系,黑色节点表示模块之间存在耦合.

表1 优化目标满意程度的区间划分

目标	类型	满意度						
		不能接受	很不满意	不满意	可接受	满意	很满意	
		边界	g_{i5}	g_{i4}	g_{i3}	g_{i2}	g_{i1}	边界
质量/kg	1S	$+\infty$	6.0	5.5	5.0	4.8	4.0	0
总压恢复系数	2S	0	0.990	0.993	0.995	0.997	0.998	1

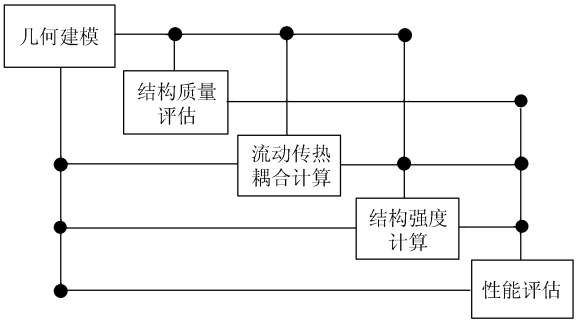


图5 燃气发生器身部设计结构矩阵

在流动和传热的分析仿真中,为了能够优化出适合流动的内部型面,将燃气发生器收缩段在轴对称平面的内型线用NURBS曲线拟合,考虑到外型面的光滑与减轻结构质量的需要,相应的收缩段外型线也用NURBS曲线拟合. 采用二维轴对称坐标系,将燃气发生器壁的传热方程和内流场的N-S方程耦合求解,流动的湍流模型为Spalart-Allmaras一方程模型,其它相关参数由热力计算后插值获得. 为了计算的方便,根据燃气的流量算出一假想的喉部,后接一扩张段,边界条件中流场亚声速进口给定总温、总压和入流方向,为计算方便,超声速出口边界给定环境气体的总温和总压. 外部环境流场的尺度取为燃气发生器半径的2.5倍.

用有限元分析的方法计算热结构强度. 用第四强度理论计算等价应力,然后作为优化问题中的约束条件. 材料的安全系数取1.25.

2.4 优化算法的选择

针对该优化问题的高阶、非线性和多峰值等特性,选择确定性混合优化策略. 首先利用多岛遗传算法(GA, Genetic Algorithm)的全局搜索性对优化问题进行全局寻优;在全局寻优找到的最优解的可能存在域,再利用序列二次规划(SQP, Se-

quential Quadratic Programming)方法进行局部寻优.

2.5　优化流程

根据图 5 的设计结构矩阵,利用 iSIGHT 将进行结构强度、流动传热、质量计算的程序集成起来,实现可执行代码和优化流程的自动化、实时监控、数据可视化及后处理等. 优化流程如图 6 所示.

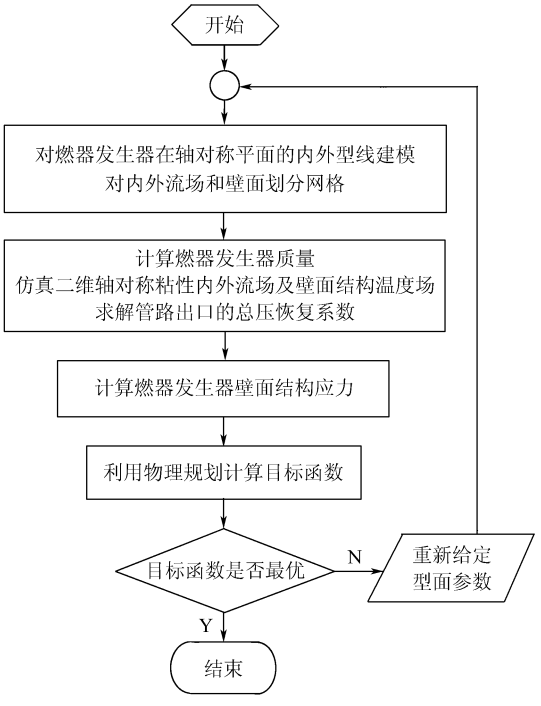


图 6　燃气发生器身部多学科设计优化流程图

3　结果与讨论

通过对燃气发生器在所设定的解空间进行寻优,得到其型面优化结果如表 2 所示,其中的初始值参考某发动机的燃气发生器选取. 图 7 为优化型面的局部放大图,图中的虚线表示原来的设计型面,实线表示优化设计后的型面. 从优化结果来看,燃气发生器的流动总压恢复系数基本保持不变,质量减轻较多,约 27%. 优化后的燃气发生器型面收缩段变得更光滑,利于流动,整体壁厚减薄,质量减轻. 收缩段变光滑后,使流动更加顺畅,燃气的总压恢复系数有所提高;而另一方面,由于燃气发生器壁厚变薄,燃气在流动过程中通过壁面传导而损失的热量增加,这会降低燃气总压恢复系数,这二者的共同作用使燃气总压恢复系数基本保持不变. 壁厚的变化不仅影响到强度与质量,也影响了燃气的流动. 从这里就可以看出在多学科设计优化过程中,考虑了各因素的变化对各个学科的影响,更为全面合理,它综合权衡各学科对性能的影响,找出一个较好的折衷值.

表 2　燃气发生器身部参数多学科设计优化的取值范围与结果

变量	上限	下限	初值	优化结果
y_1/mm	70.00	68.00	68.80	69.22
y_2/mm	67.50	56.00	56.30	66.60
y_3/mm	50.00	42.00	42.50	45.55
y_4/mm	45.00	42.50	42.50	44.64
δ/mm	3.00	1.10	3.00	2.10
σ	–	–	0.998 7	0.998 4
M/kg	–	–	4.8	3.5

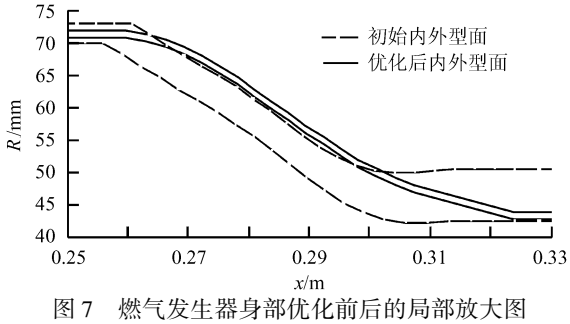


图 7　燃气发生器身部优化前后的局部放大图

4　结　论

液体火箭发动机燃气发生器是发动机中具有多学科的代表性而又相对简单的组件,它的 MDO 设计方法与经验可以借鉴到推力室或别的组件的设计中. 通过对燃气发生器身部进行多学科设计优化,得出以下结论.

1) 在保持其流动性能基本不变时结构质量明显减轻,利于减轻整个发动机的质量. 多学科设计优化方法考虑了各因素对系统整体性能的综合影响,比单学科优化更为全面合理,在火箭发动机组件和系统设计中采用多学科设计优化方法可以提高设计水平.

2) 采用物理规划进行多目标处理具有明确的物理意义,调整满意度区间划分的数值,也可以调整最终的优化结果.

数值仿真是多学科设计优化的基础,数值仿真的精度决定了优化结果的可信度和多学科设计优化结果能否在工程实践中应用,所以在改善优化方法的同时,也应致力于提高设计仿真的精度. 如果学科间的耦合变量是用离散的数值表达的,目前适宜采用单级优化算法. 对此类问题如何采用多级优化算法求解,是 MDO 研究中还需解决的问题.

参考文献 (References)

[1] Sobieski J. Multidisciplinary design optimization: an emerging new engineering discipline[R]. NASA TM-107761, 1993

[2] Giesing J P. A summary of industry MDO applications and needs [R]. AIAA 98-4737, 1998

[3] Liu W, Cui W. Multidisciplinary design optimization (MDO): a promising tool for the design of HOV[J]. Journal of Ship Mechanics, 2004,8(6):95-112

[4] 吴宝贵,黄洪钟,原薇. 汽车设计的多学科设计优化方法[J]. 应用科学学报,2005,23(4):420-423
Wu Baogui, Huang Hongzhong, Yuan Wei. Multidisciplinary design optimization: its methodology and application to vehicle design[J]. Journal of Applied Sciences, 2005,23(4):420-423(in Chinese)

[5] 余雄庆. 飞机设计新技术——多学科设计优化[J]. 航空科学技术,1999,1:19-21
Yu Xiongqing. A new methodology for aircraft design: multidisciplinary design optimization[J]. Journal of Aviation Science and Technology, 1999,1: 19-21(in Chinese)

[6] 余雄庆,丁运亮. 多学科设计优化算法及其在飞行器设计中应用[J]. 航空学报,2000,21(1):1-6
Yu Xiongqing, Ding Yunliang. Multidisciplinary design optimization, a survey of its algorithms and applications to aircraft design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000,21(1):1-6(in Chinese)

[7] 方杰,童晓艳,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)

[8] 方杰,蔡国飙,王珏,等. 再生冷却推力室的多学科设计优化[J]. 火箭推进,2005,31(2):12-16
Fang Jie, Cai Guobiao, Wang Jue, et al. A multidisciplinary design optimization approach for a regeneratively cooled thrust chamber[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005,31(2):12-16(in Chinese)

[9] Messac A. Physical programming: effective optimization for design[J]. AIAA Journal, 1996, 34(1):149-158

(上接第1249页)

4.2 轻量IP上层协议的通信模式

轻量IP上层协议只提供MAC地址标识通信节点的机制和点到点简单数据传输,对于多点的通信,底层依赖于FC的链路传输机制,上层没有任何规定,可以通过应用层来设计实现.

基于点到点的简单传输,应用层可以根据测试的需要设计特定的传输机制,来为性能测试服务,所以这种最基本的点到点传输对于测试十分有利.

轻量IP协议采用MAC地址来标识通信节点,MAC地址又对应于应用层的IP地址.由于IP地址的技术成熟、使用广泛,所以对于测试程序的设计十分有利.

5 结束语

本文针对FC应用于航空电子系统时网络性能测试的需要,在IP上层协议的基础上,设计了一种轻量IP上层协议,并提出了可行的实现方法.轻量IP上层协议具有传输效率高,通信模式灵活,节点标识便于实现等优点,使其适合FC性能测试使用.

参考文献(References)

[1] NCITS/Project 1331-D, Fibre channel framing and signaling [S]

[2] 姜震,熊华钢,邵定蓉. 基于SCI的未来航空电子高速数据总线测试系统[J]. 航空计算技术, 2002,23(3): 85-92
Jiang Zhen, Xiong Huagang, Shao Dingrong. Test system of future avionics high speed data bus based on SCI [J]. Aeronautical Computer Technique,2002,23(3): 85-92(in Chinese)

[3] INCTIS TR-31-2002, Fibre channel avionics environment [S]

[4] RFC2625, IP and ARP over fibre channel[S]

[5] (美)微软著. Windows 2000 驱动程序开发大全[M]. 冯博琴,朱丹军, 薛涛,等译. 北京:机械工业出版社,2001
Microsoft. Design on windows 2000 driver program [M]. Translated by Feng Boqin, Zhu Danjun, Xue Tao, et al. Beijing: Machine Industry Press,2001(in Chinese)

[6] Walter O. Programming the microsoft windows driver model [M]. American: Microsoft Press, 2002

[7] 郭蔡健. 光纤通道网络数据传输软件的设计与开发[D]. 北京:北京航空航天大学电子信息工程学院,2005
Guo Caijian. Design on FC transmitting program [D]. Beijing: School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2005 (in Chinese)