

再生冷却推力室的多学科设计优化

¹方 杰, 蔡国飙, ²王 珏, 尘 军

(¹北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; ²北京航天动力机械研究所, 北京 100076)

摘 要: 以某型火箭发动机的再生冷却推力室为研究对象, 建立了关于推力室的几何型面、质量、流动、传热和结构应力的仿真模型, 在 iSIGHT 软件平台上利用基于响应面模型的协同优化算法对其进行了分布并行的多学科设计优化 (MDO), 优化目标为权衡推力室质量、出口比冲和冷却通道压降的综合改善。改进的计算结果表明了 MDO 在推力室设计中的可行性和实用性。

关键词: 推力室; 多学科设计优化; 协同优化; 响应面模型; 多目标优化

中图分类号: V430

文献标识码: A

文章编号: (2005)02-0012-05

A multidisciplinary design optimization approach for a regeneratively cooled thrust chamber

¹Fang Jie, Cai Guobiao, ²Wang Jue, Chen Jun

(¹School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

²Institute of Beijing Aerospace Power Mechanics, Beijing 100076, China)

Abstract: A multidisciplinary design optimization (MDO) approach dealing with regeneratively cooled thrust chamber of a certain rocket engine was presented. Multiple analyses codes of thrust chamber about size, mass, flow, heat transfer and stress were developed and incorporated by iSIGHT software system. Then collaborative optimization (CO) method based on embedded response surface models (RSM) was investigated with distributed and parallel processing. The objective function was a trade-off among the improvements of chamber mass, specific impulse and pressure drop in cooling passages. The improved results proved the feasibility and applicability of the MDO approach for thrust chamber design.

Key words: thrust chamber; MDO; CO; RSM; multi-objective optimization

收稿日期: 2004-12-14; 修回日期: 2005-01-19。

作者简介: 方杰 (1979—), 男, 硕士研究生, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。

1 引言

复杂工程系统的设计优化涉及多门相互影响和耦合的学科；而传统的方式是对单个学科（或子系统）按序列分别进行设计优化，设计周期长，开发成本高，并且这种串行式设计往往得不到系统最优解。多学科设计优化（Multidisciplinary Design Optimization, 简称 MDO）是解决这一问题的有效方法和工具。MDO 在设计各个阶段力求各学科的平衡，充分考虑学科间的影响和耦合作用；应用有效的设计优化策略和分布式计算机网络系统，来组织和管理整个系统的设计过程；通过充分利用各个学科之间的相互作用所产生的协同效应，以获得系统的整体最优解^[1-3]。

MDO 经过二十多年的发展，在传统优化算法的基础上，已经形成了一些较为成熟的 MDO 算法：从单级优化算法到并行子空间算法、协同优化算法和两级系统综合算法^[3-6]。针对不同的问题，应选取相应的 MDO 算法，用最合理的计算消耗来得到优化结果。而 iSIGHT 软件是美国 Engineous Software 公司开发的一个集试验设计、近似建模、设计优化、可靠性分析和质量工程为一体的用于多领域工程自动设计优化的开发平台^[7]，是目前最为典型的通用 MDO 计算框架之一。

本文针对某型再生冷却推力室建立了多学科的仿真模型，在 iSIGHT 软件平台上应用基于响应面模型的 CO 算法开展了分布并行的多学科设计优化的研究，目的在于对 MDO 在推力室设计中的开发应用进行初步评估。

2 模型的建立

2.1 物理模型及其学科分析

研究对象为工程单位在研的某型短喷管推力室，其身部采用低温燃料再生冷却，相关结构如图 1 所示。推力室内壁有 300 个变肋宽和槽深的纵向沟槽，与外壁共同组成了再生冷却通道。为简化研究，假设燃烧工质为无粘的化学冻结流动，并忽略推力室头部结构。

关于推力室的 MDO 研究包括了几何型面、质量、流动、传热和结构应力等学科内容。各学科间的耦合关系可通过图 2 所示的设计结构矩阵

(DSM) 来表示。图中各方框表示特定的研究项目（具体内容将在后文叙述）；在方框对角线上面的线条表示数据必须向右下方传递，对角线下面的线条则表示数据流的方向只能为左上方；黑点表示线条两端的研究项目存在耦合关系；而相应于对角线的封闭的线框则表示该封闭环上的所有研究项目相互间为强耦合关系。

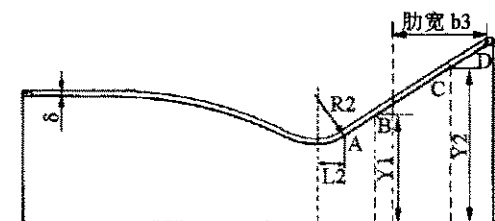


图1 推力室结构示意图

Fig.1 Schematic of thrust chamber structure

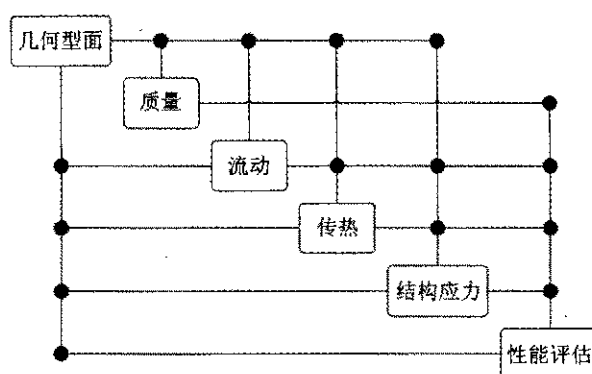


图2 推力室的多学科仿真及优化设计结构矩阵

Fig.2 MDO design structure matrix for thrust chamber

2.2 仿真模型

根据仿真的精度，对推力室的二维轴对称型面进行参数化建模。其中，扩张段的特型曲线是通过 4 个控制点先后进行 Chebyshev 二次多项式拟合和 Hermite 插值得到的，其型面控制点和参数化模型如图 3 所示。

推力室的质量是根据其参数化模型分别对内、外壁进行逐段差分计算得到的。

流场初始参数由热力计算结果给定，控制方程采用二维轴对称的 Euler 模型，计算网格数为 80350，用 LU 隐式计算格式差分求解。在推力室短喷管出口截面处，积分得到内流场推力、比冲等性能值，并为后续的传热和应力计算输出壁面

静压和静温分布。

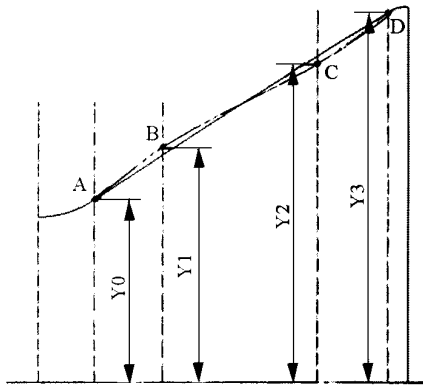


图 3 推力室扩张段的型面控制点和参数化模型

Fig.3 Control points and parametric model for thrust chamber extension

传热计算主要使用经验公式。其中，燃气侧的对流换热系数根据修正的 Bartz 公式计算得到，辐射热流密度则通过插值试验曲线获得；而冷却剂侧的对流换热系数计算采用如下公式^[8]：

$$h_l = 0.0208 c_p (u_l r_l)^{0.8} \left(\frac{m}{d_{eq}} \right)^{0.2} Pr_l^{-0.6} f(n_w/n_f) \quad (1)$$

式中， d_{eq} 表示单元冷却通道的当量直径，下标 l 表示的物理参数以近壁面流体平均温度为定性温度，下标 w 表示的物理参数以液壁面温度为定性温度，下标 f 表示的物理参数以冷却剂温度为定性温度。

在传热模型中，关于内壁热传导和冷却剂侧的对流换热都考虑了槽间肋片的散热效应。而冷却通道的压降计算则包括了摩擦损失和局部损失。

简化认为，推力室外壁只承受由冷却剂压力所引起的应力，而内壁承受的是冷却剂与燃气间的压力差所引起的压缩应力和由内壁的温度梯度引起的热应力的组合应力。因此，最大的应力发生在推力室内壁的内表面处，并可从下式得到：

$$S_c = \frac{(p_l - p_g) d_{eq}}{2d} + \frac{E a q d}{2(1 - \mu) l} \quad (2)$$

式中， d 表示内壁厚度， E 表示弹性模量， a 表示线膨胀系数， q 表示热流密度， μ 表示泊松比， l

表示导热系数，下标 l ， g 分别表示冷却剂和燃气。

2.3 优化问题的描述

如图 1 所示，优化变量为：喉部后圆弧半径 R_2 ，特型曲线左端点 A 与喉部的水平距离 L_2 ，特型曲线控制点 B 的纵坐标 Y_1 ，特型曲线控制点 C 的纵坐标 Y_2 ，内壁厚度 d 和扩张段冷却通道肋宽 b_3 。

优化目标为：基于无量纲和线性加权的评价函数 U 最小化。

$$U = w_1 \frac{M_n}{M_0} - w_2 \frac{I_n}{I_0} + w_3 \frac{\Delta p_l}{\Delta p_0} \quad (3)$$

式中， M_n 表示推力室质量， I_n 表示短喷管的出口比冲， Δp_l 表示冷却通道的压降，下标 0 表示相应参数在初始设计状态下的值， w_1 、 w_2 和 w_3 分别表示质量、比冲和压降在评价函数中的权重， $w_1 = 2$ ， $w_2 = w_3 = 1$ 。

优化的约束条件包括 2 个结构约束、7 个几何约束和 3 个目标约束，在此从略。

3 CO 算法及其分布并行的实现

CO 算法是由 Kroo 等人提出的一种多级 MDO 算法^[9-10]，该算法将复杂系统分解为若干子系统，子系统之间不直接发生联系，通过系统级优化来协调子系统的优化结果；子系统的优化目标与系统级的优化目标不一样；子系统可以并行运算和优化。但由于子系统分析的次数多，所以该算法总的计算量可能并不减少；而且只有当系统级所有约束都满足时才能找到一个可行解。目前还没有理论证明 CO 算法的收敛性；并且对于有些问题，该算法确实得不到改进解。

为了降低 CO 算法的计算消耗，可以在各子系统应用响应面模型来做近似仿真。响应面模型使用简单的低阶多项式在整个设计空间内拟合目标函数和约束方程，能够减少数值计算的次数，平滑设计空间的数值噪声，并估计最优设计^[11-12]。iSIGHT 软件内嵌的近似模块中就包含了 1 到 4 阶的响应面模型，可以方便地在 MDO 过程中调用^[7]。

针对本文研究的问题，结合已建立的仿真模型，通过解耦推力室内壁燃气侧的压力和温度边

界,可以将仿真分解为两个子系统,从而实现 CO 算法的应用。如图 4 所示,子系统 1 主要为关于推力室流动的仿真优化,优化变量 $Z_1 = \{R_2, L_2, Y_1, Y_2\}$; 子系统 2 主要为关于推力室内壁传热和结构应力的仿真优化,优化变量 $Z_2 = \{R_2, L_2, Y_1, Y_2, d, b_3\}$; 两个子系统的优化算法均为序列二次规划法(SQP), 并采用 2 阶响应面模型近似:

$$\tilde{F}(\mathbf{X}) = a_0 + \sum_{i=1}^2 b_i x_i + \sum_{i=1}^2 c_i x_i^2 + \sum_{ij(1 \leq i < j)} c_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

系统级优化的优化算法为遗传算法 (GA), 优化变量 $Z_s = Z_{s,1} \cup Z_{s,2} = \{R_2, L_2, Y_1, Y_2\} \cup \{R_2, L_2, Y_1, Y_2, d, b_3\}$; 而 $g_j(\mathbf{Z}) \leq 0$ 表示优化问题自身的约束条件。各系统的优化通过 iSIGHT 软件的 isightd 模块在同一局域网的 3 台 PC 机上实现了双层并行运算。

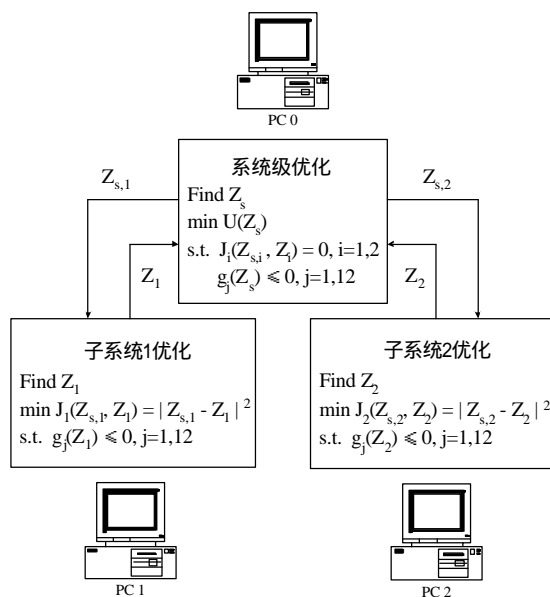


图 4 基于 CO 算法的系统分解及其分布并行的示意

Fig.4 System decomposition using CO method and its distributed-and-parallel processing representation

4 MDO 结果及分析

表 1 总结和比较了关于推力室多学科设计优化前后的优化目标的相关参数值。可以看出,在出口比冲略有损失的情况下,推力室质量和冷却通道压降均得到了明显改善。

表 1 MDO 前后的优化目标的相关参数值

Tab.1 Values of MDO objectives

变量名称	初始值	优化结果	改进程度
M_n/kg	70.12	68.12	4.28%
$I_n/(\text{m/s})$	2806.30	2797.10	-0.33%
$\Delta p_l/\text{MPa}$	2.754	2.645	3.96%
U	1.973	1.907	3.35%

图 5 比较了优化前后的推力室内流场马赫数的分布。由于扩张段的内型面变化不大,所以马赫数曲线基本相同,只是在近壁区域略有差异。因而优化前后的推力室短喷管出口比冲值变化很小。

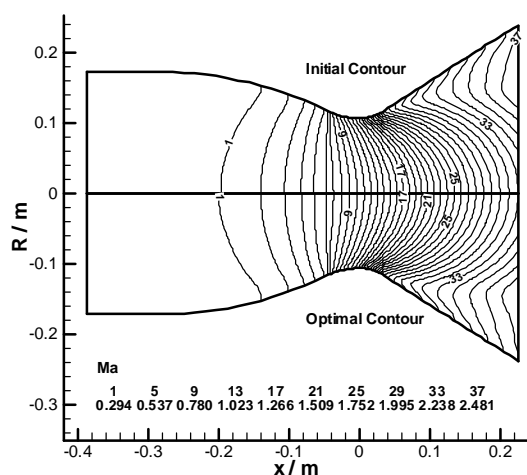


图 5 MDO 前后的推力室内流场马赫数的分布

Fig.5 Comparison of Mach number

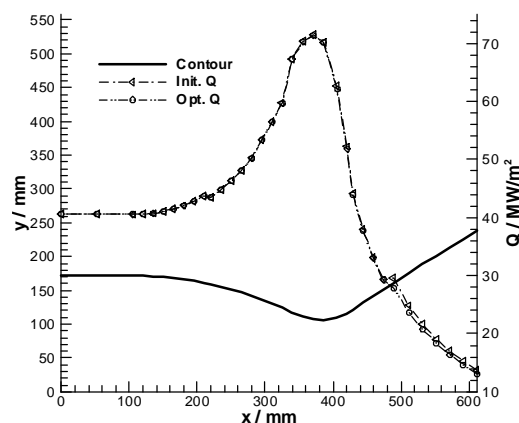


图 6 MDO 前后的再生冷却通道内热流的分布

Fig.6 Comparison of heat flux in cooling passages

图 6 比较了优化前后的再生冷却通道内热流的分布。考虑到优化变量主要集中在扩张段, 所以该处的热流分布的变化较大。其冷却通道肋宽变小, 增大了流通面积, 减小了冷却剂的流速, 这使得相应的换热量减少, 但同时也较大幅度的减少了冷却通道内的压力损失。

5 结束语

本研究在 iSIGHT 平台上对某型再生冷却推力室进行了多学科设计优化。结果表明, 其内型面的初始设计已经比较优化, 流场性能基本不变; 而改变原有的冷却通道结构则能较大幅度的减小压力降 (3.96%) 和推力室质量 (4.28%)。因此应用多学科设计优化手段可以挖掘出一定的设计潜力。

在对推力室的多学科设计优化过程中, 首次实现了基于分布并行和近似模型的 CO 算法的应用; 但如何使 CO 的收敛结果达到全局最优, 还需要进一步地研究。

致谢: 文中关于流动和传热仿真模型的建立分别得到了北京航空航天大学宇航学院的徐旭教授和北京航天动力机械研究所的裴慧峰设计员的大力支持, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Sobieski J S. Multidisciplinary design optimization: an emerging new engineering discipline [R]. NASA-TM-107761, 1993.
- [2] Sobieski J S, Haftka R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent development [R]. AIAA-96-0711.
- [3] 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
- [4] Hulme K F, Bloebaum C. A comparison of solution strategies for simulation-based multidisciplinary design optimization [R]. AIAA-98-4977.
- [5] Acton D E, Olds J R. Computational frameworks for collaborative multidisciplinary design of complex systems [R]. AIAA-98-4942.
- [6] Kodiyalam S, Sobieski J S. Bi-level integrated system synthesis with response surfaces [R]. AIAA-99-1306.
- [7] Koch P N, Evans J P, Powell D. Interdigitation for effective design space exploration using iSIGHT [J]. Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 23(2): 111~126.
- [8] 朱森元. 氢氧火箭发动机及其低温技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [9] Kroo I, Altus S, Braun R, Gage P, *et al*. Multidisciplinary optimization methods for aircraft preliminary design [R]. AIAA 94-4325.
- [10] Sobieski I, Kroo I. Aircraft design using collaborative optimization [R]. AIAA 96-0715.
- [11] Sobieski I P, Manning V M, Kroo I M. Response surface estimation and refinement in collaborative optimization [R]. AIAA-98-4753.
- [12] Cramer, Evin J. Using approximate models for engineering design [R]. AIAA 98-4716.

(编辑: 侯 早)