

文章编号: 1000-8055(2007)03-0475-05

超燃冲压发动机燃烧室传感器 最佳位置选择

鲍 文¹, 郭林春¹, 崔 涛¹, 林 敏², 牛 军²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 中国航天科工集团公司 31 所, 北京 100074)

摘 要: 超燃冲压发动机的燃烧控制和性能评估需要有效的燃烧室测量信息, 而如何确定传感器的最佳位置和数量是非常重要的, 要求选择最小的传感器数目和最佳的测量位置来较准确的描述燃烧室工作特性。这是一个组合优化问题, 直接求解比较复杂。为此本文利用遗传算法对超燃冲压发动机燃烧室的测点位置和数量进行了选择, 利用遗传算法的全局最优搜索和大规模并行计算能力来获得最佳的传感器位置和数量。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 超燃冲压发动机; 最佳位置选择; 遗传算法

中图分类号: V233. 7

文献标识码: A

Optimal sensor location of scramjet combustor

BAO Wen¹, GUO Lin-chun¹, CUI Tao¹,

L IN Min², NIU Jun²

(1. School of Energy Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. The 31st Research Institute,
China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100074, China)

Abstract: Combustion control and performance evaluation for scramjets need effective measurement information, therefore it is important to choose the optimal location and number of sensors. This problem is a combinatorial optimization problem which is difficult to solve. This paper applies genetic algorithm to choose the optimal location and number of sensors, and the genetic algorithm performs a parallel, non-comprehensive search for the global optimal results.

Key words: aerospace propulsion system; scramjet; optimal sensor location (OSL); genetic algorithm (GA)

超燃冲压发动机流场复杂, 充满了复杂的激波系, 特别是进气道、隔离段产生的厚边界层和分离流与燃烧室中众多的燃烧射流以及漩涡结构的相互作用更是增加了描述流场的复杂度^[1,2], 给发动机参数测量和状态描述带来了极大的挑战。为了提高发动机的控制性能, 就必须在这样恶劣

的环境下比较准确地测量发动机的特性参数^[3-5]。在地面试验中, 超燃冲压发动机燃烧室测量流场参数的传感器可以安置很多个, 而在飞行试验中不可能有那么多。因此选择最小的传感器数目和最佳的测量位置是十分必要的。针对此问题, 本文借鉴组合优化问题的研究思路, 尝试利用遗传算

收稿日期: 2006-03-02; 修订日期: 2006-07-31

作者简介: 鲍文(1970-), 男, 山东泰安人, 哈尔滨工业大学能源科学与与工程学院教授、博士生导师, 博士, 主要从事动力系统建模、仿真与控制的研究。

法对超燃冲压发动机燃烧室的测点位置和数量进行选择。

1 最佳测量位置选择问题的提出

1.1 控制性能的提高对测量系统的要求

超燃冲压发动机宽马赫数范围工作的特性决定了控制系统的重要性,控制系统的性能优劣对发动机的工作性能影响非常大。为了提高发动机的性能,实际飞行中需要进行闭环控制,而闭环控制首要的问题就是要对发动机的运行参数进行测量和估算,这就要求在发动机上安装多个传感器来获取运行数据。对控制系统来说,一个重要的问题是对传感器和执行器等控制部件的数目和测量位置进行选择。一个合适的选择结果不仅仅用来计算反馈增益,而且用来描述系统的运行状态并进行各种闭环控制。

1.2 飞行试验的评估对测量系统的要求

理论上,用于监测超燃冲压发动机特性参数的传感器越多,对发动机特性的描述就越准确,测量和估算的结果也越精确。在地面试验中,用于监测的传感器可以安置很多个,可以足够准确的对流场参数将进行描述。但是在飞行试验和实际应用中,传感器的数量受到质量惩罚和可靠性的限制,布置的传感器越多,付出的代价也就越大,像在地面实验中那样进行安装大量的传感器是不现实的。因此在飞行实验和实际应用中,只能以最小的代价获取最大的收益作为最终的原则来选择传感器的安装。

对控制系统而言,控制系统的性能不仅受测量点个数的影响,而且还受测量点位置的影响,因此,超燃冲压发动机的传感器选择问题,归结到如何在保证一定的精度范围内,选取最少的传感器数目和最佳的测量位置的问题。

1.3 最佳测量位置选择问题的研究现状

在最佳测量位置选择问题上,Kenneth T M 在其博士论文中对可变形超燃冲压发动机进气道,基于控制系统本身的能观性测度对最佳测量位置进行了理论上的研究和选择^[3];Maghami P G. 等人对大范围空间飞行器,利用非线性规划来寻找最佳位置使系统的零极点远离虚轴;Lim K B 等人利用系统的最大能观性测度对传感器位置选择问题进行了研究;Martin J E 和 Aidarous S E 利用控制系统的极小值目标准则进行最佳测量位置选择问题研究^[4,5]。

在传感器最佳位置选择问题上,已发展了多种优化算法,粗略地划分为传统算法和非传统算法两大类。传统算法主要有有效独立法(CDE法)、模型缩减法、模态能量法和推断法等;非传统算法主要有模拟退火法、神经网络法和遗传算法等。各种算法各有其应用的合适范围、优势和局限性^[6,7]。遗传算法是一种高效并行优化概率搜索方法,具有全局最优和隐含并行性两方面的优越性,适用于大规模并行计算。

2 基于遗传算法的测点选择方法

2.1 问题描述

超燃冲压发动机传感器最佳位置选择问题是一个优化问题,由于在冲压发动机中结构设计和安装可行性等方面的限制,传感器的安装位置受很大的局限性的。由于这些限制,本文提出在地面试验的基础上,从安装的众多传感器中选择若干个,组成用于飞行试验的传感器网络。因此,问题进一步归结为组合优化问题。

在超燃冲压发动机传感器选择中,定义 n 维向量 $A = \{\text{所有可选测点测量的一组值}\}$, m 维向量 $B = \{\text{选择的若干测点测量的一组值}\}$,以及定义在 B 上实值函数 $F(B)$:

当 $B = A$ ($m = n$) 时, $F(B) = F(A)$, 当 $B \neq A$ ($m < n$) 时,先将 m 维向量 B 进行线性变换为 n 维向量 B' ,然后计算 $F(B) = F(B')$,在本次计算中线性变换为曲线的线性拟合。 $F(B)$ 定义表述如下:

$$F(B) = F(B') = \sum_{i=1}^{n-1} (A_{i+1} - A_i) \frac{(P_{i+1} + P_i)}{2} \quad (1)$$

式中: A_i 为测点 i 对应位置的流道横截面积, F 的物理含义为发动机流道内产生的推力。

2.2 基于遗传算法的求解方法算法设计

遗传算法是一种高效并行优化概率搜索方法,它摒弃了传统的搜索方式,模拟自然界生物进化过程,采用人工进化的方式对目标空间进行随机优化搜索,具有全局最优和隐含并行性两方面的优越性,非常适用于大规模并行计算,适用于处理复杂系统的寻优问题。

2.2.1 遗传算法编码

采用二进制编码,1 表示选取该测点,0 表示为不选取该测点。按照测点的位置顺序排列构成一个向量,如图 $1\{1\ 0\ 0\ 1\ 0\ \cdots\ 0\ 1\}$ 表示一种选择方式。

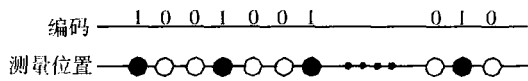


图 1 测量位置编码示意图
Fig.1 Code of sensors location

2.2.2 适应度函数

度量个体适应度的函数称为适应度函数,适应度高的个体遗传到下一代的概率较大,适应度函数定义为:

$$Fit(B) = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^C Fit(B)_i \quad (2)$$

$$Fit(B)_i = \left\| \frac{F(B)_i - F(A)_i}{F(A)_i} \right\| \quad (3)$$

其中:函数 F 为公式(1)定义的函数 F ; C 为一次实验中测量的次数; $F(B)_i$ 为选择测点集为 B 时第 i 组测量数据的函数计算值; $F(A)_i$ 为测点集为 A ,即选择全部测点时,第 i 组测量数据的函数计算值;适应度函数描述了减少了 $(n - k)$ 个测点后导致指标函数产生的平均偏差.

2.2.3 起始种群

在遗传搜索过程中,群体规模大小影响到遗传算法的最终性能和效率.一个新的解群的性能和当前解群大小有关,当前解群越大,串的多样性越高,参与运算的串越多,产生新的模式及高适应度串的几率也就越高,算法陷入局部最优解的危险性也越小.所以,从解群的多样性考虑,解群应该越大越好.但是,随着解群规模的增大,计算工作量将大大增加,可能导致一个无法接收的慢收敛率.考虑到计算机的性能与算法的可接受性和可操作性,不可能将解群规模无限制地增加.

考虑到经典的遗传算法在大解群时进行的搜索可能将遗漏一些最优点,在本文中,采用四分之一择优的选择方式,即采用广义遗传算法,广义遗传算法采用定向演化模式,通过将局部定向寻优与局部最优状态的定向转移结合实现全局最优化的功能.

2.2.4 选择、交叉和变异

种群有 20 个个体,可选测点位置共有 22 个,则每个个体遗传基因有 22 个,在选择时选择适应能力最高的 2 个个体到下一代,对 80 % 的个体进行交叉产生子代.对 5 % 的种群基因进行变异.然后选择最优的 20 个个体组成新的父代进行循环寻优.

2.2.5 终止条件

在搜索过程中,如果父代在 100 代的循环内一

直保持不变,停止遗传操作.认为当前取得最优解.

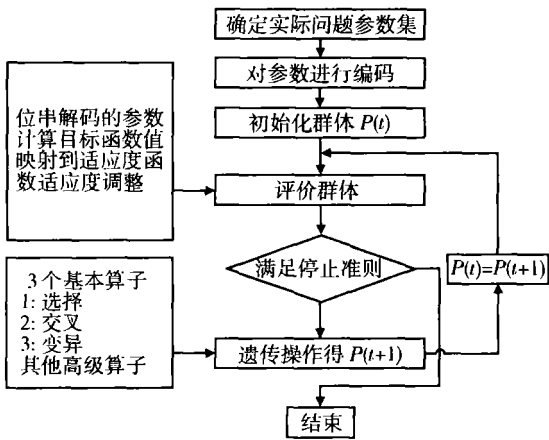


图 2 算法设计流程
Fig.2 Flow chart of genetic algorithm

2.2.6 计算流程

算法设计流程如图 2 所示.

3 算 例

图 3 为实验数据集,共有 189 组数据,也就是沿燃烧室轴向排列若干个测点进行了 189 次测量.从图中可以看出,燃烧室的压力分布在不同燃烧组织下变化的范围很大.

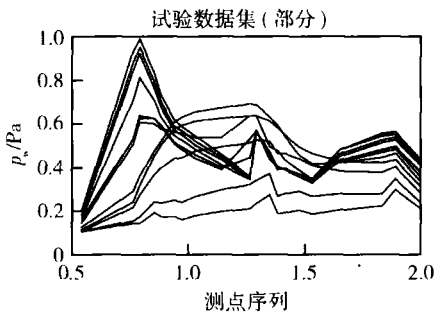


图 3 多组测量数据的压力分布图
Fig.3 Pressure distributing of some training data

3.1 优化选择结果及分析

个选择的最佳测量位置分别在 8 个,7 个,6 个,5 个,4 个时,按照第 3 节给出的算法进行优化,计算得出了不同的误差分布,如图 4 所示.

可以看出当最佳测量位置数目选取 5 个时达到了当前的最优值,如果测点数继续减少 1 个,则误差增大很多.当测量数目增加时,增加至 6 个,7 个,甚至 8 个时,误差虽然有一些变化,但没有明显变小的趋势.虽然可以预测当测点数增加更多时,误差一定会变小,但相应的测点数目会增加很多,是否可以接受还需要考虑实际问题的承受能力.

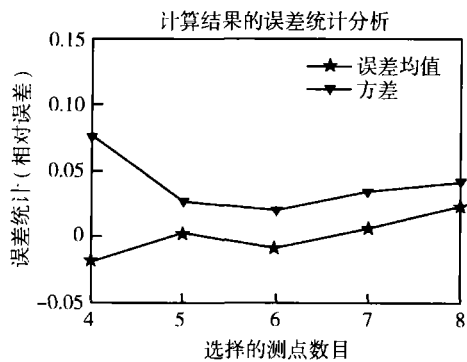


图 4 传感器数目约简到不同结果的误差分析
Fig. 4 Analysis of error on several choose result

分析得出,根据算法选择的测点位置及数量的不同,计算的指标函数误差在测点数目取 5 时达到了一个拐点,对应的测量位置就是算法得出的最佳测量位置.

图 5 和图 6 分别展示了选择 5 个测点的曲线拟合结果和误差分布,图中下部横线上的小方块表示选取的测点位置.

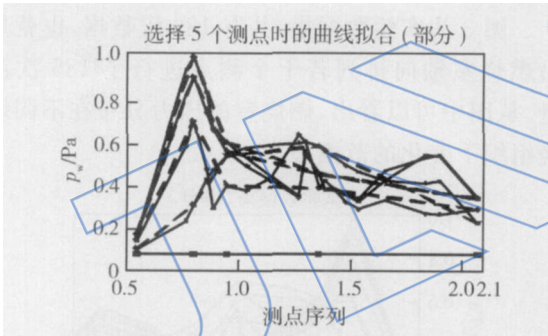


图 5 选择 5 个测点时的压力拟合曲线
Fig. 5 Result of fitness curve when chose five measure point

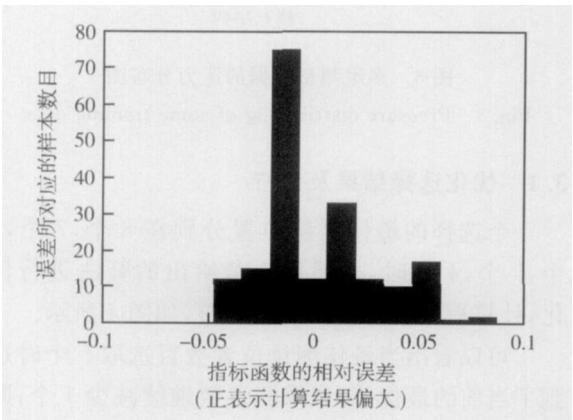


图 6 选择 5 个测点时的指标函数误差统计结果
Fig. 6 Error Analysis of target function

在选择出的 5 个测量位置中,如图 5 中下部横线上的小方块所示,一个在燃烧室的入口,一个

在燃烧室的出口.一个在燃烧室入口激波后压力达到峰值的位置附近,另外两个在燃烧室喷油点附近,都是压力变化出现转折的位置,仿真计算的结果与实际的燃烧室流场分析结果基本一致.

3.2 结果校验

通过前面的计算结果可以看出,当测点数约简到 5 个时取到了当前的最优值,而且保留少量增加若干测点对指标函数的影响不大,因此选取了 5 个测点时的结果在 3 个数据集上进行校验,并给出了误差分析结果.

3.2.1 测试数据集 1

共有 41 个样本,如图 7 所示.

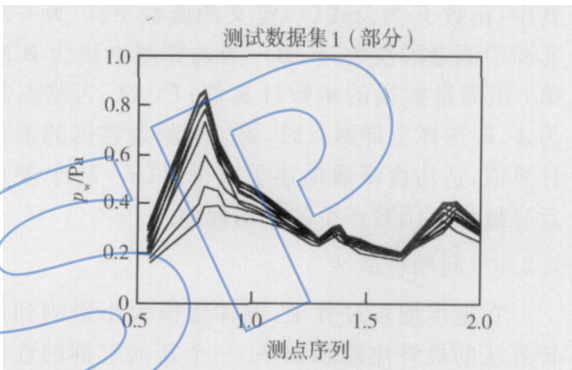


图 7 测试数据集 1 的压力分布图
Fig. 7 Pressure distribution of the first test data

3.2.2 测试数据集 2

共有 151 个样本,如图 8 所示.

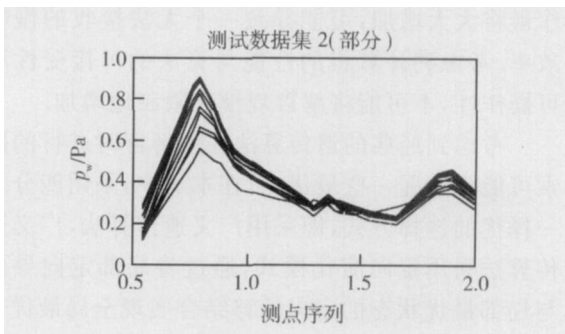


图 8 测试数据集 2 的压力分布图
Fig. 8 Pressure distributing of the second test data

3.2.3 测试数据集 3

共有 111 个样本,如图 9 所示.

3.2.4 校验结果误差分析

校验结果分析如表 1 所示.可以看出在 3 个数据集上,选择的最佳测量位置能使最大的误差和方差保持在 5 % 左右,最大的误差宽度也在 20 % 之内.

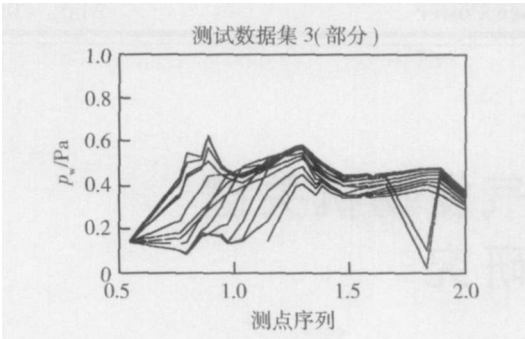


图 9 测试数据集 3 的压力分布图
Fig.9 Pressure distributing of the third test data

表 1 校验结果分析
Table 1 Test result

	数据集 1	数据集 2	数据集 3
误差均值	0.019 7	0.002 1	- 0.059 0
方差	0.015 1	0.011 0	0.050 5
误差范围	0.045 6	0.065 9	0.179 8

注:误差负值表示计算值偏小.

4 结 论

(1) 本文提出了超燃冲压发动机传感器最佳测量位置的选择问题,并在数学上将其转化为组合优化问题.在求解中引入遗传算法,结果显示,该方法能有效地选择出最佳测量位置和数目.

(2) 遗传算法是并行的概率搜索方法,通过多次变化起始种群和各种遗传算子的设置,多次的计算结果都能求出相同的结果,可以认为该方法求得了全局最优解.

(3) 在最后的結果校验中,选择一组最优的测量位置选择结果,在多个数据集上校验结果显示,偏差能保持在一个可以接受的范围.

(4) 通过分析遗传算法求出的最佳测量位置,可以发现几个位置都是燃烧室的压力变化的关键位置,与实际的理论分析基本一致.

参考文献:

[1] Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory. Ramjet technology[M]. 1980:10-12.

[2] 张鹏,俞刚.超燃燃烧室一维流场分析模型的研究[J].流体力学实验与测量,2003,17(1):85-88.
ZHANG Peng, YU Gang. The study of one dimensional flow analysis model of the combustor in supersonic combustion experiments[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003,17(1):85-88.

[3] Kenneth T M. Optimal sensor plancement for control of a supersonic mixed-compression inlet with variable geometry [D]. Ph.D. Paper,1998.

[4] Martin J E. Optimal allocation of actuators for distributed systems[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control,1978,100:227-228.

[5] Aidarous S E, Gevers M R, Installe M J. Optimal pointwise discrete control and controllers[J]. International Journal of Control, 1976,24:493-508.

[6] 郑荣跃,许凯明,唐国金,等.斜拉桥监测系统传感器位置的寻优[J].国防科学技术大学学报,2005,27(2):154-157.
ZHENG Rongyue, XU Kaiming, TANG Guojin, et al. Optimum algorithm for the sensor placement on the structure monitoring system of cable-stayed bridge[J]. National University of Defense Technology, 2005,27(2):154-157.

[7] Holst T L. Genetic algorithms applied to multi-objective aerospace shape optimization [J]. Journal of Aerospace Computing Information and Communication, 2005,2:1389-1392.