

文章编号: 1000-8055(2005)03-0503-05

# MAPS 方法在航空发动机性能寻优控制中的应用

王芳, 樊思齐, 吴丹, 任新宇

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 利用模型辅助模式搜索方法(MAPS 方法), 研究了某型涡扇发动机基于部件级非线性实时数学模型的性能寻优控制。该方法是一种直接搜索方法, 不需要计算发动机非线性模型对控制量的偏导数, 并通过运用kriging 方法构造非线性代理模型来减少发动机模型的调用次数, 进而减少了计算量, 提高了优化速度。应用MAPS 方法对航空发动机最低油耗、最大推力和加力最大推力3种控制模式进行了优化计算, 论文给出了优化计算结果。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 模型辅助模式搜索方法; 性能寻优控制; 控制模式; kriging 方法

**中图分类号:** V 233. 7

**文献标识码:** A

## Study of MAPS Methods for Turbofan Engine Performance Seeking Control

WANG Fang, FAN Si-qi, WU Dan, REN Xin-yu

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Model-Assisted Pattern Search method (MAPS) was applied to the study of performance seeking control using an aircraft engine nonlinear component level model. MAPS algorithm is one of the direct search method, in which partial derivative doesn't need to calculate. Kriging algorithm was used to construct a sequence of surrogate models in order to reduce the amount of calculations and increase speed of optimization. Then, MAPS algorithm was applied to three control modes separately, including minimum fuel flow mode, maximum thrust mode and afterburning maximum thrust mode. Calculation results are presented in this paper.

**Key words:** aerospace propulsion system;

Model-Assisted Pattern Search Method (MAPS);

Performance Seeking Control (PSC); Control Mode; Kriging method

20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 美国开展了航空发动机性能寻优控制 PSC (Performance Seeking Control) 研究。性能寻优控制系统主要包括以下 3 个部分: 发动机性能参数估计; 不断被修正的推进系统模型; 发动机性能优化。在性能优化

部分采用了发动机线性化模型和线性规划优化方法。由于线性模型精度低, 在很大程度上影响到 PSC 控制效果。为了克服线性模型的弊端, 本文将采用发动机部件级非线性模型和非线性优化方法进行性能优化。

收稿日期: 2004- 06- 30; 修订日期: 2004- 09- 22

作者简介: 王芳(1979- ), 女, 辽宁沈阳人, 西北工业大学动力与能源学院硕士生, 主要从事航空发动机控制理论与应用研究

针对作为优化函数的发动机非线性模型计算量大和数值导数计算精度低的特点, 本文采用了模型辅助模式搜索方法(MAPS 方法)来求解非线性优化问题。该方法不必计算偏导数, 并且运用 Kriging 方法构建非线性代理模型, 通过对代理模型的优化减少直接搜索次数, 即减小了发动机模型的调用次数, 从而达到减少计算量的目的。应用该方法对航空发动机最低油耗模式、最大推力模式和加力最大推力模式这 3 种控制模式进行优化计算, 计算结果表明该方法能用较少的计算量得到较好的优化效果。该方法在航空发动机性能寻优控制中具有实际应用价值。

## 1 模型辅助模式搜索方法

模型辅助模式搜索方法 MAPS (Model-Assisted Pattern Search) 是求解非线性约束优化问题的一种直接搜索方法。直接搜索方法由于其优化过程不需要偏导数信息, 因此在工程上经常使用, 但该方法存在计算量大的缺点。为了减少直接搜索的计算量, 又提出了模式搜索的方法, 该方法规定了搜索过程必须按一定的模式进行, 限制搜索方向, 这从一定程度上避免了直接搜索的缺点。此后的几年中, 模式搜索方法得到了很大的发展, 在此基础上出现了模型辅助模式搜索方法, 并在大规模工程优化问题上取得了成功的应用<sup>[1,2]</sup>。

### 1.1 问题描述

考虑以下非线性优化问题:

$$\begin{aligned} \min & f(x) \\ \text{st } x \in B & \equiv \{x | a \leq x \leq b\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $f: R^n \rightarrow R \cup \{\infty\}$ ,  $a, b \in R^n$ , 同时  $f(x)$  具有以下特点:

- (1) 当  $x$  在可行域内时, 计算  $f(x)$  工作量很大;
- (2) 当  $x$  不在可行域内时,  $f(x)$  的计算不收敛, 即根本得不到  $f(x)$  的值;
- (3)  $\partial f / \partial x_i$  的值无法得到, 或者是即使能到一个近似值也不够准确;

定义具有以上特点的优化问题为标准  $\Theta$  问题。

### 1.2 算法描述

为了克服直接搜索法计算量大的缺点, 可以在  $B$  上构造  $f(x)$  的一个相对简单的代理模型  $\hat{f}(x)$ , 通过对代理模型  $\hat{f}(x)$  的优化来逐次逼近  $f(x)$  的最优解<sup>[3]</sup>。MAPS 方法就遵循了这种思想,

在标准模式搜索法中加入了代理模型的概念, 其算法如下:

第 1 步: 对区域  $B$  进行一个初始划分  $\Gamma_0$ , 确定允许计算  $f(x)$  的最多次数  $V$ ,  $k = 0$ ;

第 2 步: 初始计算:

(a) 选择初始采样点  $x^1, \dots, x^N \in \Gamma_0, N < V$

(b) 计算  $f(x^1), \dots, f(x^N)$

(c) 通过  $f(x^1), \dots, f(x^N)$  构造  $f(x)$  的代理模型  $\hat{f}_0(x)$

(d) 确定搜索模式  $S_0$

第 3 步:  $k = 0$ , 置  $\Gamma_k = \Gamma_0$ ,

$$x_k = \arg \min [f(x^1), \dots, f(x^N)]$$

即:  $f(x_k) = \min [f(x^1), \dots, f(x^N)]$

置  $\hat{f}_k(x) = \hat{f}_0(x)$ ,  $S_k = S_0$  及采样点集合  $\text{Eval}_k = \{x^1, \dots, x^N\}$

第 4 步: Do while  $N + k < V$

(a) 根据  $S_k$  计算各搜索点的代理模型  $\hat{f}_k$  函数值, 选取最优值  $x^1 \in \Gamma_k \setminus \text{Eval}_k$

(b) 计算实际模型  $f(x^1)$ , 令:

$$\text{Eval}_k = \text{Eval}_k \cup \{x^1\}, \text{ update } \hat{f}_k$$

(c) if  $f(x^1) < f(x_k)$ , then  $x_k = x^1$   
 else if  $\text{Core}(x_k) \subset \text{Eval}_k$ ,  
 then  $\Gamma_k = \Gamma_k / 2$ , update  $S_k$   
 else, goto 第 4 步 (a)

(d)  $k = k + 1$

与模式搜索法相比, MAPS 方法通过代理模型计算进行探测移动, 再通过实际模型计算来确定是进行模式移动还是减小步长。从以上的算法中可看出, 要运用 MAPS 方法需要说明以下 3 个问题, 即: 初始点的选择问题、代理模型的构造问题和搜索模式的选择问题。

#### 1.2.1 用 Uniform Design 方法选择初始计算点

对于标准  $\Theta$  问题, 由于  $f(x)$  的计算量大,  $f(x)$  的计算占据了优化过程的绝大部分时间, 因此  $f(x)$  的计算次数要受到严格的限制, 同时每个因素的水平应选得尽可能多, 这样有助于减小计算步长, 提高精度。在这两个前提下, 必须用尽可能少的有代表性的点集  $\{x^1, \dots, x^N\}$  来填充  $n$  维空间  $B$ 。考虑到均匀试验设计的特点, 可以利用均匀设计表来对  $n$  维连续空间  $B$  进行均匀采样, 从而实现  $B$  的一个有效填充。

#### 1.2.2 用 Kriging 方法构造代理模型

MAPS 方法的一个显著特点就是引入了代理模型 (surrogate model), 代理模型的好坏直接

影响优化效率,因此构造一个合适的代理模型非常重要。本质上,代理模型只是实际模型的一个逼近,从这一点上看,构造逼近模型可以有很多种选择,如神经网络,样条函数,响应曲面等。本文采用一种地统计学方法——克立格法(Kriging)来构造代理模型<sup>[4]</sup>。

构造模型:

$$y(x) = \beta + Z(x)$$

其中,  $\beta$  为常数,  $Z(x)$  为一高斯过程, 其均值  $E[Z(x)] = 0$ , 方差:

$$\text{Cov}[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R(x^i, x^j)$$

$R(x^i, x^j)$  为两采样点  $x^i, x^j$  之间的相关函数, 定义为:

$$R(x^i, x^j) = \exp\left[-\sum_{k=1}^n \theta_k |x_k^i - x_k^j|_2\right]$$

$\theta_k(k = 1, \cdots, n)$  为未知系数。

给出一组采样点  $\{x^1, \cdots, x^N\}$ , 和其相应的输出值  $y_D = [y^1, \cdots, y^N]$ , 则  $y(x)$  的最佳线性无偏估计表示为:

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r_D(x)^T R_D^{-1} (y_D - J_N \hat{\beta})$$

其中  $J_N$  为  $N$  维 1 向量;  $R_D$  为  $N \times N$  的相关系数矩阵, 其分量  $R_{Dij} = R(x^i, x^j), 1 \leq i, j \leq N$ ;  $N$  维向量  $r_D(x)$  的分量  $r_{Di}(x) = R(x^i, x), 1 \leq i \leq N$ ;  $\hat{\beta} = \frac{J_N^T R_D^{-1} y_D}{J_N^T R_D^{-1} J_N}$  为  $\beta$  的最小方差估计。未知参数  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n]$  和  $\sigma^2$  通过最大化似然函数得到。

1.2.3 用 Positive Basis 方法选择搜索模式

MAPS 方法是按照一定的搜索模式进行搜索的, 搜索模式核心其实是  $n$  维空间的一组正向基(Positive Basis), 通过选取不同的基可以得到不同的搜索模式<sup>[5]</sup>。一般地, 模式搜索法都采用最大正向基。

2 发动机最优控制模式研究

发动机最优控制规律研究的目的是通过对发动机数学模型的优化, 以达到特定性能指标的最优。为了保证精度, 发动机数学模型采用部件级非线性模型, 将前面所述的 MAPS 方法分别应用到某型涡扇发动机最低油耗、最大推力和加力最大推力 3 种控制模式。

2.1 巡航最低油耗控制模式

对于战斗机来讲, 发动机的耗油率直接影响着飞机的作战半径, 所以巡航最低油耗控制模式的目的是在保持推力不变的情况下降低耗油率,

以此来增大航程。该模式的数学模型为:

$$\begin{aligned} &\min \quad SFC \\ &\text{st} \quad \begin{cases} F_N = \text{const} \\ x \in B \equiv \{x \mid a \leq x \leq b\} \end{cases} \end{aligned} \tag{2}$$

其中, 选择控制量  $x$  为  $[m_f, A_8, \alpha_i, \alpha_e]^T$ ,  $m_f$  为供油量,  $A_8$  为尾喷管喉部面积,  $\alpha_i$  为风扇进口导流叶片角度,  $\alpha_e$  为压气机导流叶片角度。

将其中的等式约束作为一个误差方程加入到发动机非线性数学模型计算程序中, 同时减少一个自由变量  $m_f$ , 则可将该问题转化为以下的标准  $\ominus$  问题:

$$\begin{aligned} &\min \quad SFC \\ &\text{st} \quad x' \in B' \equiv \{x' \mid a' \leq x' \leq b'\} \end{aligned} \tag{3}$$

其中:  $x' = [A_8, \alpha_i, \alpha_e]^T$ 。通过 MAPS 方法求解该优化问题。

2.2 最大推力控制模式

在不加力的情况下最大限度地挖掘发动机的潜力, 提高发动机的推力, 同时要求发动机不超温、不超转、不喘振。对于已工作在最大状态的发动机,  $\alpha_i$  和  $\alpha_e$  已处于最大角度。所以, 该模式的求解可归结为非线性约束优化问题:

$$\begin{aligned} &\max \quad F_N \\ &\text{st} \quad \begin{cases} T_4 < T_{4\max} \\ SMF \geq SMF_{\min} \\ SMC \geq SMC_{\min} \\ n \leq n_{\max} \\ x \in B \equiv \{x \mid a \leq x \leq b\} \end{cases} \end{aligned} \tag{4}$$

其中: 控制量  $x = [A_8, m_f]^T$ 。

在标准  $\ominus$  问题中引入可行域的概念, 即将所有满足温度、稳定裕度和转速约束的参数组合放入可行域内, 将所有不满足温度、稳定裕度和转速约束的参数组合放入不可行域内, 则上述问题可转化为如下标准  $\ominus$  问题:

$$\begin{aligned} &\max \quad F_N \\ &\text{st} \quad x \in F \end{aligned} \tag{5}$$

其中:  $F$  为可行域集, 利用 MAPS 方法求解该优化问题。

2.3 加力最大推力控制模式

该模式希望在加力状态时发动机提供尽可能大的推力, 同时满足各部件的约束。它在最大推力控制模式的基础上增加一个控制量, 加力燃烧室

供油量 $m_{faf}$ 和一个约束,加力燃烧室温度,所以,该模式的求解可归结为以下非线性约束优化问题:

$$\begin{aligned} &\max F_N \\ &\text{st} \begin{cases} T_4 < T_{4\max} \\ SM F \geq SM F_{\min} \\ SM C \geq SM C_{\min} \\ n \leq n_{\max} \\ T_7 \leq T_{7\max} \\ x \in B \equiv \{x \mid a \leq x \leq b\} \end{cases} \end{aligned}$$

(6)

其中:控制量 $x=[A_8,m_f,m_{faf}]^T$ 。

利用同样的方法引入可行域,将上述问题转化为以下标准①问题:

$$\begin{aligned} &\max F_N \\ &\text{st} \ x \in F \end{aligned}$$

(7)

其中 $F$ 为可行域集,利用MAPS方法求解该优化问题。

以上3种控制模式应用MAPS方法时,选择4

~7个初始点,采用最大正向基搜索模式。并将发动机非线性模型的已计算点 $[x_1,f(x_1)],\cdots,[x_k,f(x_k)]$ ( $k$ 为实际模型计算点的个数,反应发动机有效调用次数)数据构成一个采样点集合,便于采用Kriging方法通过该集合的数据插值计算当前区域内各模式点的性能指标估计值 $\hat{f}(x)$ 。其它步骤参照前文所述算法。

3 算 例

以某型混合排气涡轮扇发动机为例,进行3种控制模式优化计算。当 $H=11\text{ km},M_a=1.3$ 时,采用最大推力模式,推力增加8.2%,优化过程数据见表1,该表表示优化过程中在不同控制量组合下的发动机稳态参数,即已计算点集合,优化结果为表中推力最大的控制量组合。限于论文篇幅,本文仅列出了其中一组优化过程数据。

另外,选择飞行包线内有代表性的点进行了优化计算,结果列于表2、表3中。当采用最大推

表1 最大推力模式  
Table 1 Maximum thrust mode

| $F_N$     | $A_8$    | $m_f$    | $SM F$   | $SM C$   | $T_{41}$  | $T_{51}$  | $ERP$    |
|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| 3 653.796 | 0.280 18 | 1.012 46 | 0.161 51 | 0.272 35 | 1 636.825 | 1 299.013 | 3.209 74 |
| 3 739.115 | 0.280 18 | 1.042 83 | 0.166 06 | 0.271 08 | 1 659.087 | 1 317.393 | 3.253 45 |
| 3 808.4   | 0.277 38 | 1.065 61 | 0.159 09 | 0.268 88 | 1 672.317 | 1 328.485 | 3.312 81 |
| 3 669.238 | 0.282 98 | 1.020 05 | 0.173 14 | 0.273 59 | 1 645.512 | 1 305.992 | 3.194 21 |
| 3 706.529 | 0.274 58 | 1.027 65 | 0.140 53 | 0.269 03 | 1 642.294 | 1 303.855 | 3.284 35 |
| 3 775.993 | 0.271 78 | 1.050 43 | 0.133 65 | 0.266 94 | 1 655.035 | 1 314.547 | 3.345 66 |
| 3 699.486 | 0.288 59 | 1.035 24 | 0.195 1  | 0.275 47 | 1 662.854 | 1 319.958 | 3.163 4  |
| 3 769.75  | 0.285 79 | 1.058 02 | 0.186 45 | 0.272 1  | 1 676.514 | 1 331.428 | 3.221 38 |
| 3 829.381 | 0.277 38 | 1.073 21 | 0.159 99 | 0.268 59 | 1 677.748 | 1 332.979 | 3.323 34 |
| 3 850.575 | 0.277 38 | 1.080 8  | 0.160 47 | 0.268 25 | 1 683.065 | 1 337.377 | 3.334 28 |
| 3 856.365 | 0.274 58 | 1.080 8  | 0.149 7  | 0.266 99 | 1 679.58  | 1 334.665 | 3.362 38 |
| 3 877.306 | 0.274 58 | 1.088 39 | 0.150 53 | 0.266 89 | 1 684.767 | 1 338.927 | 3.373 42 |
| 3 882.82  | 0.271 78 | 1.088 39 | 0.138 94 | 0.265 4  | 1 681.353 | 1 336.31  | 3.401 61 |
| 3 887.46  | 0.268 98 | 1.088 39 | 0.126 57 | 0.264 38 | 1 677.783 | 1 333.503 | 3.430 03 |
| 3 908.546 | 0.268 98 | 1.095 99 | 0.127 53 | 0.264    | 1 683.073 | 1 337.898 | 3.440 88 |
| 3 912.691 | 0.266 17 | 1.095 99 | 0.114 4  | 0.263 2  | 1 679.336 | 1 334.936 | 3.469 39 |
| 3 933.852 | 0.266 17 | 1.103 58 | 0.115 3  | 0.262 81 | 1 684.463 | 1 339.194 | 3.480 71 |
| 3 937.394 | 0.263 37 | 1.103 58 | 0.101 25 | 0.262 34 | 1 680.496 | 1 336.017 | 3.509 22 |
| 3 948.083 | 0.263 37 | 1.107 38 | 0.101 73 | 0.262 08 | 1 683.045 | 1 338.141 | 3.514 97 |
| 3 945.957 | 0.264 77 | 1.107 38 | 0.108 74 | 0.262 48 | 1 684.909 | 1 339.609 | 3.500 43 |
| 3 953.389 | 0.263 37 | 1.109 28 | 0.102 03 | 0.261 89 | 1 684.353 | 1 339.237 | 3.518 03 |

表2 最大推力模式和加力最大推力模式  
Table 2 Maximum thrust mode and afterburning maximum thrust mode

| 控制<br>模式 | 工作<br>状态 | 飞行状态              |                   |                    |                    |                    |                    |
|----------|----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|          |          | $H = 0\text{ km}$ | $H = 9\text{ km}$ | $H = 11\text{ km}$ | $H = 11\text{ km}$ | $H = 15\text{ km}$ | $H = 18\text{ km}$ |
|          |          | $Ma = 0$          | $Ma = 1.3$        | $Ma = 1.3$         | $Ma = 1.8$         | $Ma = 1.5$         | $Ma = 1.5$         |
| 最大<br>推力 | 不加力      | 6.2%              | 8.6%              | 8.2%               | 9.0%               | 8.4%               | 8.3%               |
|          | 加力       | 4.5%              | 4.9%              | 2.5%               | 8.5%               | 5.6%               | 5.5%               |

表3 最低油耗模式  
Table 3 Minimum fuel flow mode

| 控制<br>模式 | 飞行状态              |                   |                    |                    |                    |
|----------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|          | $H = 9\text{ km}$ | $H = 9\text{ km}$ | $H = 11\text{ km}$ | $H = 15\text{ km}$ | $H = 18\text{ km}$ |
|          | $Ma = 0.9$        | $Ma = 1.3$        | $Ma = 1.3$         | $Ma = 0.9$         | $Ma = 0.9$         |
| 最低油耗     | 0.4%              | 1.0%              | 0.8%               | 0.5%               | 0.5%               |

力控制模式时, 结果为推力提高的百分比, 而采用最低油耗控制模式时, 结果为耗油率降低的百分比. 通过算例的计算结果可以看出, 各控制模式下的发动机性能都有明显提高, 取得了良好的优化效果.

4 结 论

航空非线性性能寻优控制与线性性能寻优控制比较存在许多优点. 它采用了发动机部件级非线性模型, 与线性模型比较, 精度更高, 控制系统设计更加灵活, 但需要进行非线性优化. 基于这种考虑, 本文将一种非线性优化方法—MAPS 方法, 应用于性能优化部分并进行了算例计算. 结果表明, 该方法能用较少的计算量得到较好的优化效果, 在航空发动机性能寻优控制中具有实际应用价值.

参考文献

[ 1 ] Kodiyalam S Multidisciplinary Aerospace Systems

Optimization Computational AeroSciences ( CAS ) Project[R] NASA /CR- 2001- 211053  
[ 2 ] Sobieszczanski Sobieski J, Haftka R T. Multidisciplinary Aerospace Design Optimization: Survey of Recent Developments [ J ]. Structural Optimization, 1997, 14 ( 1): 1~ 23  
[ 3 ] Christopher M Siefert, Virginia Torczon, Michael W Trosset Model-Assisted Pattern Search Methods for Optimizing Expensive Computer Simulations[R] Joint Statistics Meeting, 2002  
[ 4 ] Soren N Lophaven, Hans Bruun Nielsen, Jacob Sondergaard DACE A MATLAB Kriging Toolbox, Version 2.0[M] IMM Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 2002  
[ 5 ] Lewis R M, Torczon Rank Ordering and Positive Bases in Pattern Search Algorithms[R] Technical Report 96-71, ICASE, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681- 2199, 1996