

基于遗传算法的涡扇发动机多变量加速寻优控制^{*}

时瑞军, 樊思齐

(西北工业大学 航空动力与热力工程系, 陕西 西安 710072)

摘 要: 研究了变几何涡扇发动机不等式约束下的遗传算法最优加速控制规律, 在全飞行包线内进行了仿真计算。通过分析多变量变几何涡扇发动机加速过程的特点和性能要求, 用离散化加速模型结合遗传算法, 使得加速过程最优。仿真计算表明该控制律可以保证变几何涡扇发动机在全飞行包线内稳定工作, 且加速时间最短。

关键词: 涡轮风扇发动机; 变几何形状结构; 遗传算法⁺; 加速寻优控制⁺

中图分类号: V235.13 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2003) 04-0357-04

Optimal acceleration control of turbofan engine with genetic algorithm

SHI Rui-jun, FAN Si-qi

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ. Xi'an 710072, China)

Abstract: An optimal acceleration control law, verified in the whole envelope, is studied for variable geometry turbofan engine based on genetic algorithm (GA) and control design with inequality constraints is discussed in this paper. Combining discrete model with GA, the method is achieved via analysis of the characteristic and performance requirements of engine speedup process. The control scheme is stable, fast and applicable to acceleration optimization. Simulations show that this control methodology can obtain more satisfactory acceleration characteristic of the engine.

Key words: Turbofan engine; Variable geometry structure; Genetic algorithm⁺; Acceleration optimization control⁺

1 引 言

航空发动机良好的加速性, 要求发动机在最短时间内由慢车状态达到最大推力状态, 同时保证发动机在整个飞行包线内安全, 不喘振, 不超温^[1,2]。采用变几何通道的多变量控制是改善发动机加速性的重要途径。为此, 加速过程中必须以主燃烧室供油量、尾喷管喉部面积和风扇/压气机导流叶片角度为控制变量, 寻找最优变化规律。国内外不少学者曾将常规的非线性规划方法应用于发动机加速过程控制, 以改进发动机加速性。但常规方法过于复杂, 而且必须通过求取偏导数来实现。对于本质上大范围、不可微、多峰值、多平衡点的发动机系统, 往往不能取得全局最优解, 甚至根本不能求解。

GA 算法是 21 世纪计算智能技术的关键技术之一^[3,4], 是根据达尔文的自然界生物进化理论, 实现优

化过程的新兴寻优技术。因为 GA 并行处理空间上的多个点, 而且无需求取偏导数, 所以只要非线性系统存在全局最优点, 就一定能够搜索到最优解。因而遗传算法实现的加速寻优过程, 加速时间更短, 安全性更高, 可作为提高发动机加速性的重要技术。

本文的主要工作是: 研究用遗传算法实现多变量的变几何涡扇发动机寻优控制, 并在全飞行包线内进行仿真计算^[5,6]。

2 用 GA 算法设计发动机寻优控制规律

本文研究的涡扇发动机风扇/压气机导流叶片角度以及喷管喉部面积可调, 其风扇/压气机的基准特性为

$$\begin{cases} m_{\text{acor}, b} = f(\pi_k, \bar{n}_{\text{cor}}) \\ \eta_b = g(\pi_k, \bar{n}_{\text{cor}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $m_{\text{acor}, b}$, η_b , π_k 和 $\bar{n}_{\text{cor}}$ 分别表示基准流量、基准效

^{*} 收稿日期: 2002-08-05; 修订日期: 2003-03-03。

作者简介: 时瑞军 (1973—), 男, 助教, 博士生, 研究领域为发动机的数学建模与控制, 飞机/推进系统一体化控制。

率、增压比和相对换算转速。进口导流叶片角度发生变化时,对空气流量及效率的修正用下式表示

$$\begin{cases} \Delta m_{\text{acor}} = F(\alpha, \pi_k, \bar{n}_{\text{cor}}) \\ \Delta \eta = G(\alpha, \pi_k, \bar{n}_{\text{cor}}) \\ m_{\text{acor}} = m_{\text{acor}, b} \pm \Delta m_{\text{acor}} \\ \eta = \eta_b \pm \Delta \eta \end{cases} \quad (2)$$

式中 α , Δm_{acor} 和 $\Delta \eta$ 依次为进口导流叶片角度、空气流量修正量和效率修正量。

2.1 发动机加速优化控制

发动机的离散状态空间模型为

$$x^{k+1} = F(x^k, u^k, \Delta t) \quad (3)$$

状态变量和控制输入为

$$\begin{aligned} x^k &= [\bar{n}_h^k, \bar{n}_1^k, p_3^k, T_5^k]^T \\ u^k &= \left[\frac{m_f^k}{p_3}, A_8^k, \alpha_1^k, \alpha_2^k \right]^T \end{aligned}$$

式中: $\bar{n}_h$, $\bar{n}_1$, p_3 , T_5 , m_f , A_8 , α_1 , α_2 分别为高低压转子转速、高压压气机出口压力、高压涡轮出口温度、主燃烧室供油量、喷管喉部面积和风扇/压气机进口导流叶片角度。

目标函数为

$$\min J = 1 - \frac{F_n^k}{F_{nd}} \quad (4)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \bar{n}_h^k \leq \bar{n}_{h, \max} \\ \bar{n}_1^k \leq \bar{n}_{1, \max} \\ T_4^k \leq T_{4, \max} \\ smc^k \geq smc_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{n}_{h, \max}$, $\bar{n}_{1, \max}$, $T_{4, \max}$, $smc_{\min}$ 分别是高低压转速约束、高压涡轮进口温度约束和高压压气机喘振裕度约束。上式的约束条件保证发动机工作安全,不超转、不超温、不喘振。

寻优过程的初始状态为慢车状态,终端状态为发动机最大状态。上面每一步最优,则整个加速过程最优^[7]。

2.2 遗传算法最优加速控制

GA 算法应用于涡扇发动机加速寻优过程的关键是:(1)确定寻优变量的基因编码和基因编码的长度;(2)确定适应度函数;(3)参数的选择。

单变量系统寻优变量 $u \in [a, b]$, 采用二进制编码,优化结果精确到 10^{-H} , 则其长度 L 由下式确定:

$$2^{L-1} \leq (b-a) \cdot 10^H \leq 2^L \quad (6)$$

将式(6)推广到多变量系统 $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, $u_i \in$

$[a_i, b_i] (i = 1, 2, \dots, n)$ 。依据优化精度求得二进制编码长度 L_i 。将 n 条二进制编码顺次连接,构成一个个体的基因编码,其编码长度 $L = \sum_{i=1}^n L_i$ 。因此,在发动机加速寻优过程中,取控制增量 Δm_f , ΔA_8 作为寻优变量, α_1 , α_2 按给定规律变化。由于物理限制,控制增量满足下式:

$$\begin{aligned} \Delta m_f &\in [a_1, b_1] \\ \Delta A_8 &\in [a_2, b_2] \end{aligned} \quad (7)$$

依据式(6),确定各自二进制编码及长度。两条基因编码串连构成一个个体的基因编码。

适应度函数不仅要满足单值、连续、非负,还必须存在极大值;并且形式上应尽可能简单以减小计算量,故通常由目标函数变换而成。为此,根据发动机加速寻优的目标函数,设计适应度函数为

$$fit = 1 - \left| \frac{F_n - F_{nd}}{F_{nd}} \right|^2 \quad (8)$$

当 $F_n < F_{nd}$ 时,适应度函数单调增加, $F_n > F_{nd}$ 时,适应度函数单调减小,在 $F_n = F_{nd}$ 时,存在唯一极大值。GA 的其他参数选择可以根据实际情况确定。

发动机加速寻优控制的 GA 算法是:

(1)对第 k 步的 Δm_f^k , ΔA_8^k 进行二进制编码,编码代表解空间的一个解;根据(7)式,并由寻优精度,确定 Δm_f^k , ΔA_8^k 的编码和长度,形成一个个体。

(2)在编码的解空间内,随机生成一个大小为 n 的初始种群;种群大小根据控制器的实时性、优化的精度确定。

(3)对解空间中每个个体计算适应度;不满足约束条件的个体适应度强制为 0。

(4)根据适应度,按一定的概率,对种群中的个体进行选择、交叉和变异遗传操作。

(5)由新一代个体组成新一代种群;重复(3)~(5),进化到最大进化世代数。

(6)从最后一代种群中,选出最大适应度的个体,该个体满足:

$$\begin{cases} fit = fit_{\max}^k \\ \Delta m_f^k = \Delta m_{f, \max}^k \\ \Delta A_8^k = \Delta A_{8, \max}^k \end{cases}$$

则发动机控制输入为

$$\begin{cases} m_f^k = m_f^{k-1} + \Delta m_{f, \max}^k \\ A_8^k = A_8^{k-1} - \Delta A_{8, \max}^k \end{cases}$$

(7)计算下一步加速寻优,直到推力达到最大值。

3 计算仿真结果

利用上面讨论的算法,对发动机加速控制规律进行了优化。发动机加速寻优控制规律为

$$\begin{cases} \bar{m}_f = h_1(t) \\ p_3 = h_2(t) \\ \alpha_1 = h_3(\bar{n}_{h, \text{cor}}) \\ \alpha_2 = h_4(\bar{n}_{l, \text{cor}}) \end{cases}$$

风扇/压气机导流叶片角度分别随 $\bar{n}_{h, \text{cor}}$, $\bar{n}_{l, \text{cor}}$ 按

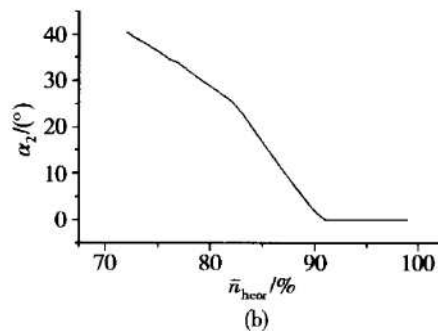
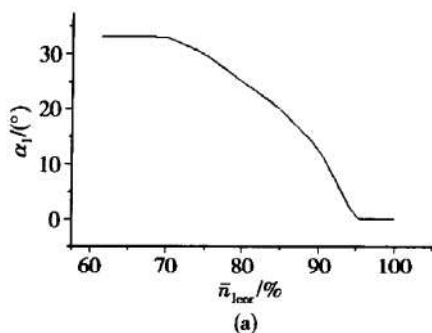


Fig. 1 Fan and compressor guide vane angles

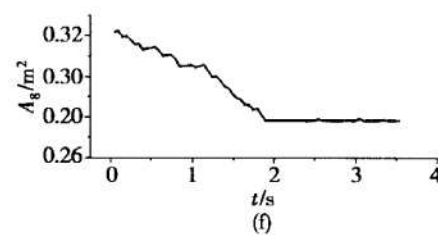
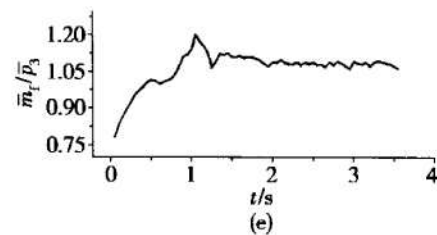
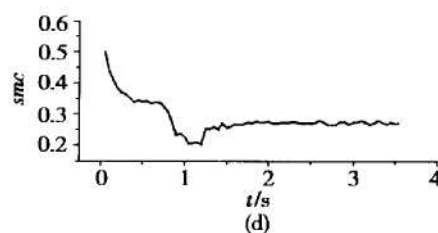
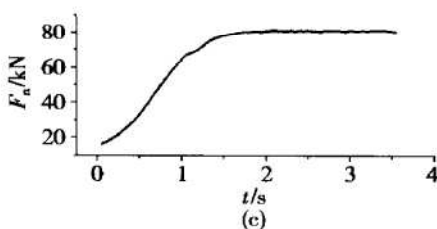
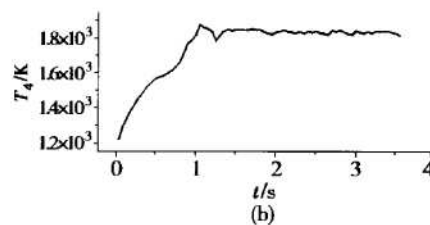
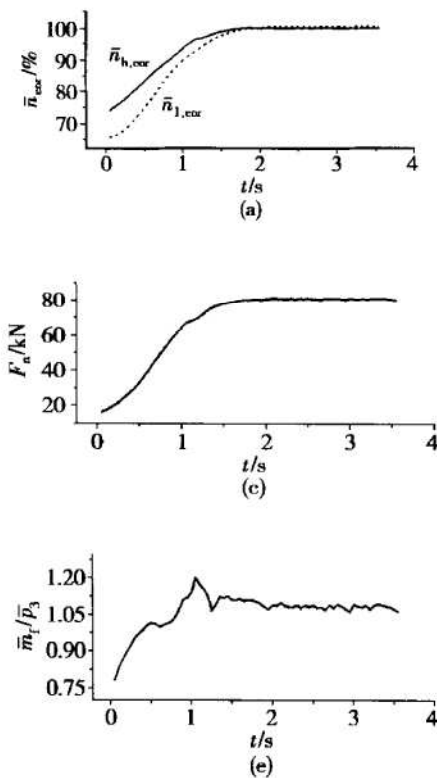


Fig. 2 Acceleration at Mach 0 and 0km altitude

图1 规律变化:

图2为 $H = 0\text{km}$, $Ma = 0$ 时,转速、推力、约束和控制输入的变化规律。加速到 1.0s 时 T_4 达到约束上限;加速到 1.2s 时,发动机达到喘振裕度限制边界,2s 后推力到达最大值。

图3为 $H = 10\text{km}$, $Ma = 1.2$ 时,转速、推力和约束和控制输入的变化规律。加速后 2.0s, T_4 达到上限,2.5s 推力达到最大值。

图4为 $H = 18\text{km}$, $Ma = 1.5$ 时,转速、推力、约束和控制输入的变化规律。加速后 2.5s 推力达到最大值。

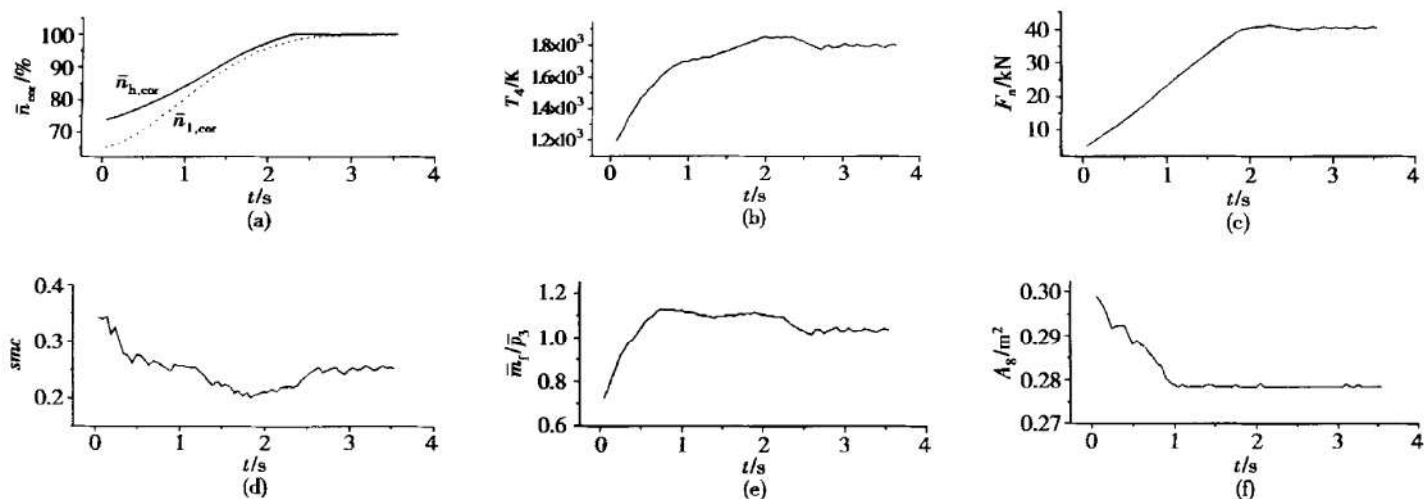


Fig. 3 Acceleration at Mach 1.2 and 10km altitude

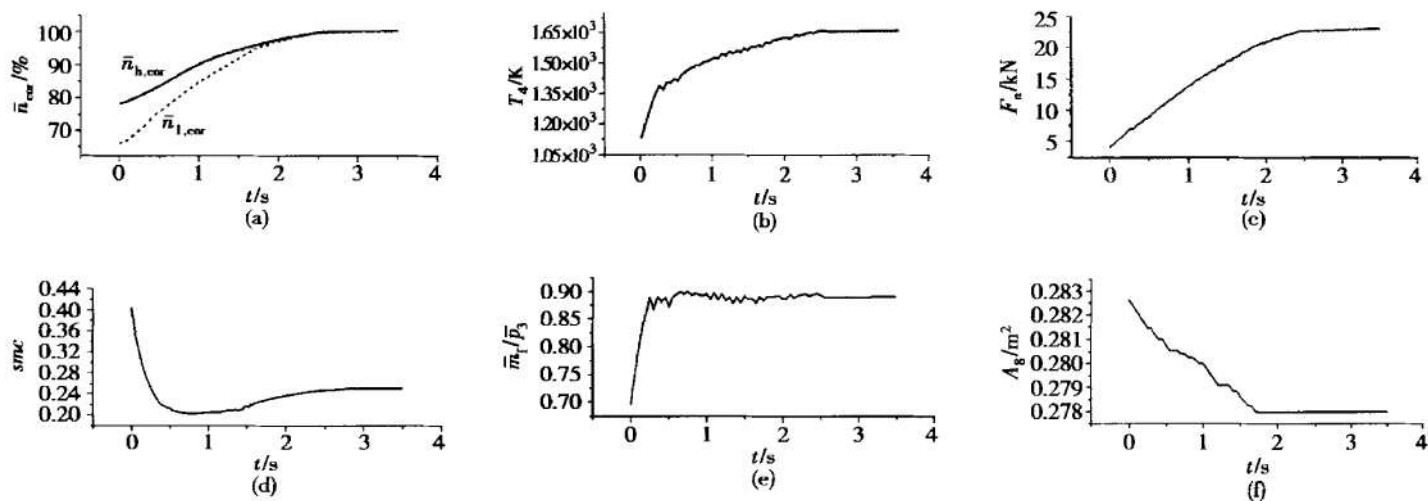


Fig. 4 Acceleration at Mach 1.5 and 18km altitude

4 结 论

本文提出的遗传算法加速寻优规律, 保证涡扇发动机快速、安全的加速, 发挥了发动机的最大潜力。仿真结果表明, 基于遗传算法的加速寻优控制完全适用于发动机加速过程控制。比较常规的寻优算法, GA 算法加速时间更短, 加速过程更安全。

参考文献:

- [1] 樊思齐, 徐芸华. 航空推进系统控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
- [2] 廉小纯, 吴 虎. 航空燃气轮机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [3] Goldberg D E. Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning[M]. Addison-Wisely, 1989.
- [4] De Jong K A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems [D]. Doctoral Dissertation, University of Michigan, 1995.
- [5] 范鸣玉, 张 莹. 最优化技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1982.
- [6] 罗安禄. 涡扇发动机最优控制规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 1998.
- [7] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

(编辑: 王居信)