

基于梯度法和最大熵方法的变循环发动机 加速控制规律设计*

宋可染¹, 陈玉春¹, 贾琳渊^{1,2}, 谭甜¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 为了解决变循环发动机(VCE)加减速控制规律设计问题, 提出了一种基于梯度法和最大熵方法的VCE加速控制规律优化设计方法。通过求加速时间对几何变量的导数确定几何变量调整的方向和步长, 逐步得出加速过程的几何调节规律。计算VCE加速过程时, 采用过渡态直接模拟方法保证发动机的喘振裕度、燃烧室油气比和涡轮进口总温均满足约束条件。在优化过程中, 采用最大熵方法, 令几何调节规律的熵值保持在较大的值, 优化出的几何调节规律相对于只考虑时间梯度的结果更为合理, 震荡幅度更小, 更便于实际调节。计算结果表明, 经过约15次优化, 加速时间可以从6.2s缩短到4.1s, 且优化出的几何调节规律更平稳。对优化的控制规律进行分段线性化, 转速误差最大为1.4%, 推力误差最大为1.8%, 可以用于工程实践。本文提出的方法能够实现VCE加速过程几何调节规律优化设计。

关键词: 变循环发动机; 过渡态; 梯度法; 最大熵方法; 几何调节规律

中图分类号: V235.16 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 05-200850-09

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.200850

Design of Variable Cycle Engine Acceleration Control Schedule Based on Gradient Method and Maximum Entropy Method

SONG Ke-ran¹, CHEN Yu-chun¹, JIA Lin-yuan^{1,2}, TAN Tian¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AECC Shenyang Engine Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to design the variable cycle engine(VCE) acceleration and deceleration control law, a VCE acceleration control law design method based on gradient method and maximum entropy method was proposed. This design method determines the direction and step length of the geometric variable adjustment by calculating the derivative of the acceleration time to the geometric variable and then gradually obtains the geometric adjustment schedule of the acceleration process. When calculating the VCE acceleration process, the transient-state direct simulation method were used to ensure that the engine's surge margin, combustion chamber fuel-air ratio and turbine inlet temperature all meet their constraints. In the optimization process, the maximum entropy method is used to keep the entropy value of the geometric adjustment law at a high value. The optimized geometric

* 收稿日期: 2020-10-22; 修订日期: 2021-02-09。

基金项目: 国家重大专项基础研究项目(J2019-I-0015-0014)。

作者简介: 宋可染, 博士生, 研究领域为航空发动机总体设计。

通讯作者: 陈玉春, 博士, 教授, 研究领域为航空宇航科学与技术。

引用格式: 宋可染, 陈玉春, 贾琳渊, 等. 基于梯度法和最大熵方法的变循环发动机加速控制规律设计[J]. 推进技术, 2022, 43(5):200850. (SONG Ke-ran, CHEN Yu-chun, JIA Lin-yuan, et al. Design of Variable Cycle Engine Acceleration Control Schedule Based on Gradient Method and Maximum Entropy Method [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5):200850.)

adjustment schedule is more natural than the result of considering only the time gradient, the oscillation amplitude is smaller, and it is more convenient for practical adjustment. The calculation shows that generally after about 15 optimizations, the acceleration time can be shortened from 6.2s to about 4.1s, and the optimized geometric adjustment law is easy to adjust. Piecewise linear the optimized control law, the maximum speed error is 1.4% and the maximum thrust error is 1.8%, which can be used in engineering practice. This method can get the proper geometric adjustment law of VCE acceleration process.

Key words: Variable cycle engine; Transient; Gradient; Maximum entropy; Geometric adjustment law

1 引言

变循环发动机(VCE)在工作时,调节变几何部件,可以在不同模态之间切换^[1]。在高速时具有较高的单位推力,在低速时具有较低的耗油率,具有很好的稳态性能^[2-3]。而在加减速过程中,合理地调节这些变几何部件,可以缩短加减速的时间。目前加减速过程中变几何部件调节规律的设计是VCE研究的难点。针对这个问题,国内外做过一些研究。

Pilidis等^[4]研究了VCE的过渡态性能并优化了过渡态的控制方法。Przybylko等^[5]设计了发动机多变量控制器,对变循环发动机的加减速过程进行了仿真。Gronstedt等^[6]研究了VCE转模态过程几何调节和供油量的规律,减小了转模态过程的推力波动。Corbett等^[7]模拟了VCE的遭遇加速过程(Bodie加速),并对比了多种因素的影响。Wang等^[8]设计了发动机涡轮导向器调节的控制器,并对导向器可调的加速过程进行了仿真。李嘉^[9]通过调整压气机导叶角度和喷口面积来提高涡轮功率,从而缩短加速时间。薛益春^[10]模拟了变循环发动机PID闭环控制的加速响应。张晓博等^[11]研究了带FLADE风扇的变循环发动机转模态时的几何调节规律对转模态的时间和稳定裕度的影响。对比了导叶角度和喷管面积的三种调节方式。周红^[12]研究了模态转换阀(MSV)、核心机驱动风扇(CDFS)的导叶角度、后可变面积涵道引射器和喷管面积等几何参数的调整对转模态的影响。刘增文等^[13]给定CDFS-VCE的几何调节规律,研究了转模态的性能。这些研究主要集中在变循环发动机过渡态性能的模拟,或人为给定过渡态过程的几何调节规律,研究影响VCE过渡态性能的参数。贾琳渊等^[14-15]建立了VCE的功率提取法模型和逆算法模型,计算了几何调节对加速功率的影响;并利用Isight软件,以加速功率为优化目标,对几何调节规律进行优化,得出加减速控制规律。但功率提取法是按稳态的转差计算供油量和几何调节规律,且没有考虑部件的容积效应。由此得出的过渡态控

制规律有一定的误差^[16]。

本文提出了一种基于梯度法和最大熵方法的变循环发动机加减速控制规律设计方法。采用过渡态直接模拟方法^[17-18]计算发动机加减速过程,以保证加减速过程中发动机喘振裕度、燃烧室油气比和涡轮进口总温均不超限。本文采用几何参数随发动机转速的变化规律来描述过渡态控制规律,并求加速时间对几何参数的导数,用梯度法逐步优化几何调节规律。在优化过程中,采用最大熵方法,尽可能增加几何调节规律的熵值,令几何调节规律更平稳,更具有可实现性。本文提出的方法可以实现VCE加速控制规律的正向优化设计,设计结果考虑了转子转差和容积效应的影响,优化出的几何调节规律较为平稳。以带CDFS的VCE为例,提出的设计方法可以类似地应用于其他类型的变循环发动机。

2 VCE加速过程的梯度法和最大熵方法建模

2.1 VCE过渡态模型

本文讨论是带CDFS的双外涵变循环发动机(VCE),其结构示意图见图1。

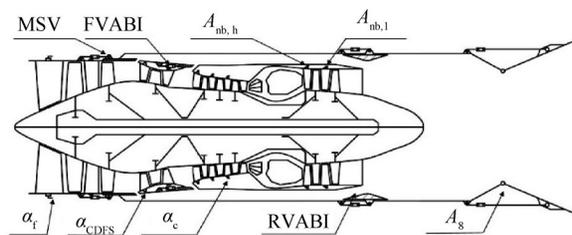


Fig. 1 Construction for CDFS-VCE

如图1所示,CDFS-VCE的变几何参数有风扇、CDFS和压气机的导叶角度 α_f 、 α_{CDFS} 和 α_c ,模态转换阀面积 A_{MSV} ,前可变面积引射器FVABI面积 A_{23} ,后可变面积涵道引射器RVABI面积 A_{25} ,高/低压涡轮导向器喉部面积 $A_{nb,h}$ 和 $A_{nb,1}$,尾喷管喉部面积 A_8 。本文采用部件法建立发动机的过渡态整机性能计算模型,模型考虑了转子动力学和部件容积效应的影响。

VCE过渡态模型是建立并求解发动机非线性方

程组^[15]。方程组的自变量取风扇工作点 β_F , CDFS工作点 β_{CDFS} , 压气机工作点 β_C , 涡轮前温度 T_4 (或燃烧室油气比 FAR_4), 高转转速 n_h , 低转转速 n_l , 高压转子高压涡轮落压比 π_{HT} 和低压涡轮落压比 π_{LT} 这8个量中的7个。固定剩下的一个量作为控制参数。方程组一共有7个方程, 分别为高压涡轮进口与高压压气机出口流量平衡方程 $\delta W_{g,4}$, 高压涡轮出口与低压涡轮进口流量平衡方程 $\delta W_{g,5}$, 尾喷管与低压涡轮出口流量平衡方程 $\delta W_{g,9}$, 高压转子功率平衡方程 δP_h , 低压转子功率平衡方程 δP_l , 混合室静压平衡方程 $\delta p_{s,25}$ 和FVABI处的流量平衡方程 $\delta W_{a,232}$ 。本文采用多元牛顿迭代法求解非线性方程组。表1列出了VCE过渡态模型中具体的自变量组合、控制参数和平衡方程。

加速过程的第一个点按稳态模型计算, 之后给定下一个点的 β_C, T_4, FAR_4 中的一个, 迭代计算下一个点的发动机状态。迭代时, 上一个点的结果(参与迭代的自由变量)作为下一个点的初猜值。整个加速过程的计算流程如图2所示。

采用表1中的三种自变量的组合, 可以保证加速过程中喘振裕度 ΔSM_c , 燃烧室油气比 FAR_4 和涡轮进口总温 T_4 均满足约束条件, 且每一时刻都有一个量恰好等于约束条件, 这样的加速过程用时最短^[17]。

VCE有多个变几何参数, 本文考虑调节的变几何参数为CDFS导叶角度 α_{CDFS} , 高压涡轮导向器喉部面积 $A_{nb,h}$, 低压涡轮导向器喉部面积 $A_{nb,l}$, 混合室外涵进口面积 A_{25} 和尾喷管喉部面积 A_8 。

本文把变几何参数的调节规律描述为高压转子物理转速的函数, 采用离散的形式, 计算加速过程时以高压转速插值变几何参数。

2.2 梯度法优化模型

梯度法优化的思路是求加速时间对每一个变几何参数的导数, 每个导数代表加速时间对相应的变几何参数的敏感程度。导数为正代表调大变几何参数加速时间会增加, 导数为负代表调大变几何参数加速时间会减少, 导数绝对值越大, 在相同的变几何参数调节幅度下加速时间变化越大。然后根据导数确定变几何参数调节的方向和大小, 令几何参数向

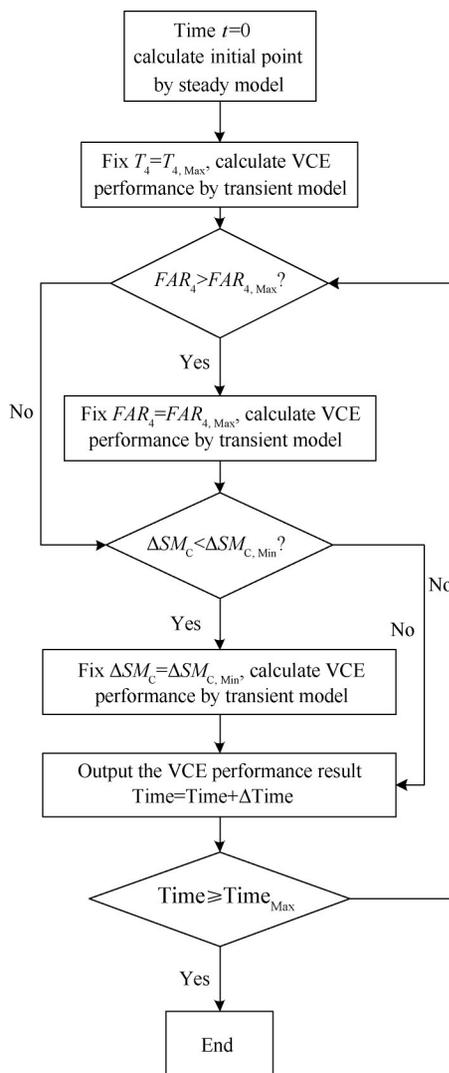


Fig. 2 Flow chart of acceleration process calculation

加速时间缩短的方向调整。公式为

$$a(n_i) = a(n_i) - K \frac{\partial t}{\partial a(n_i)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

式中 a 表示变几何参数 $\alpha_{CDFS}, A_{nb,h}, A_{nb,l}, A_{25}$ 或 A_8 。这些几何参数表示为高压转速的函数, 从加速起点到加速终点取 m 个转速点。 n_i 表示第 i 个转速点, $a(n_i)$ 表示第 i 个转速点对应的变几何参数的值。 t 为整个加速过程的时间, 以高压转子转速和低压转子转速均达到特定值为准(本文取最大转速的98%)。 K 是对应于变几何参数的常数, 表示梯度法的步长。 K 需要取合理的值, 来实现较好的优化效果。如果取值

Table 1 Transition model for CDFS-VCE

Fixed variable	Variable	Controlled parameter	Error equation
T_4	$n_l, n_h, \beta_F, \beta_{CDFS}, \beta_C, \pi_{HT}, \pi_{LT}$	T_4	$\delta W_{g,4}, \delta W_{g,5}, \delta W_{g,9}, \delta W_{a,232}, \delta p_{s,25}, \delta P_h, \delta P_l$
FAR_4	$n_l, n_h, \beta_F, \beta_{CDFS}, \beta_C, \pi_{HT}, \pi_{LT}$	FAR_4	$\delta W_{g,4}, \delta W_{g,5}, \delta W_{g,9}, \delta W_{a,232}, \delta p_{s,25}, \delta P_h, \delta P_l$
β_C	$n_l, n_h, \beta_F, \beta_{CDFS}, T_4, \pi_{HT}, \pi_{LT}$	ΔSM_c	$\delta W_{g,4}, \delta W_{g,5}, \delta W_{g,9}, \delta W_{a,232}, \delta p_{s,25}, \delta P_h, \delta P_l$

较小,则需要的迭代次数过多;如果取值较大,则可能出现几何参数变化过大,发动机计算不收敛的情况。梯度法优化每一步需要求 lm 个偏导数, m 为转速点的个数, l 为考虑的变几何参数的个数,本文考虑了5个变几何参数,因此 l 取值为5。

VCE非线性方程组不能写成解析形式,因此式(1)中偏导数采用差商代替。

2.3 最大熵方法

在工程中,许多问题的解并不是唯一的。针对此类问题,可以采用最大熵方法。

最大熵方法中的熵为信息熵,概率分布函数 f 的信息熵的定义为

$$S = -k \int f \ln f dx \quad (2)$$

离散情况为

$$S = -k \sum_{i=1}^m f_i \ln f_i \quad (3)$$

上面两式的 f 均满足归一化条件, k 为给定常数。 f 的信息熵表示 f 包含的信息有多少。熵越大表示 f 包含的信息越少。当问题的解不唯一时,除了已知条件外,需要对问题做假定,增加条件才能求得特定的解。而最大熵方法的解意义是在满足已知条件下,解包含的总信息量最少,即对解做最少的假定,因此最大熵方法的解是最自然,最协调的。

最大熵方法的本质是:在所有可能的解当中,选择熵最大的那一个。目前最大熵方法已应用于统计物理、频谱分析和图像恢复等问题的研究^[19]。以离散情况为例,考虑离散的概率分布 $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$, 取 $m=30$, 构造A, B两种分布如图3所示。并对比两种分布的熵。

A, B两种分布均满足归一化条件。A分布较为复杂,其中包含的信息较多。而B分布为常数,每一个 f_i 均为 $1/30$, 提供的信息最少。按式(3)计算, A的熵值为3.194, B的熵值为3.401, B的熵值比A的大。

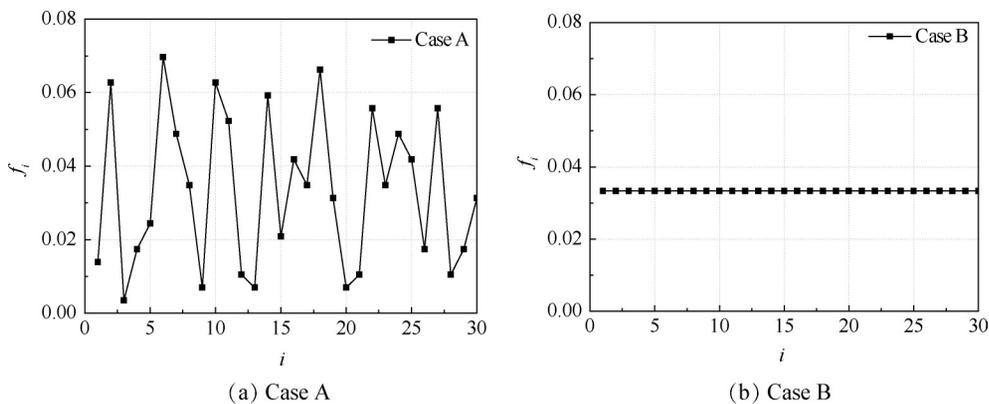


Fig. 3 Two distribution of f_i

数学上可以证明^[19], B是所有可能的分布里熵最大的分布,是最大熵问题的解。对于本文要优化的VCE几何调节规律,工程上更希望调节规律接近B分布,远离A分布。因为A分布的调节规律非常复杂,工程上难以实现。

本文所研究的5个可调几何参数,客观上存在多种使VCE加速过程时间缩短的调节规律。采用最大熵方法,可以获得较为自然、平滑、工程上容易实现的几何调节规律。因此本文把加速时间和几何参数的熵共同作为优化目标,令变几何参数向着既让加速时间缩短又让熵增加的方向运动。

最大熵方法在解决统计物理、频谱分析等问题时,是根据具体问题的数学模型,对熵的公式进行变形,推导出进一步的、较为简便的公式。例如统计力学中用最大熵方法可以推导出单原子分子玻尔兹曼方程的平衡细致原理^[20]。但VCE过渡态模型是一个非线性很强的模型,且没有解析表达式,因此本文应用最大熵方法时采用数值方法,利用梯度法优化,偏导数用差商代替。

首先定义几何调节规律的熵的计算式如式(4)所示

$$S = - \sum_{i=1}^m f_i \ln f_i$$

$$f_i = \frac{a(n_i)}{\sum_{i=1}^m a(n_i)} \quad (4)$$

式中 S 为几何调节规律的熵。

之后把几何调节规律的熵和加速时间结合起来,构造加速时间和熵的组合函数 $(t - K_1 \cdot S)$, K_1 是对熵值的缩放。组合函数中的负号表示时间向缩短的方向优化,而熵向延长的方向优化,优化方向相反。

最后用加速时间和熵的组合函数 $(t - K_1 \cdot S)$ 替换式(1)中的加速时间 t , 得到式(5)。式(5)相当于对加

速时间和熵同时求导数。取合理的 K_1 , 令熵的梯度和时间的梯度处于同一数量级, 则在优化过程中, 几何规律的变化会兼顾熵和加速时间。

$$a(n_i) = a(n_i) - K \frac{\partial(t - K_1 \cdot S)}{\partial a(n_i)} \quad (5)$$

3 结果与讨论

以图 1 中的 CDFS-VCE 为例, 优化单外涵加速控制规律。加速过程的部件参数限制如下: 高压压气机喘振裕度 $\Delta SM_c \geq 15\%$, 涡轮前燃气温度 $T_4 \leq 2000\text{K}$, 主燃烧室油气比 $FAR_4 \leq 0.04$ 。按上述限制计算发动机在地面 ($H=0, Ma=0$) 的加速过程 (单外涵模式), 计算流程如图 2 所示。加速起点和终点的变几何参数和转速如表 2 所示, 其中高压涡轮导向器和低压涡轮导向器喉部面积用设计点的比值表示。

高压转速每 2% 取一个转速点, 从 61% 到 98% 一共有 19 个点。起点和终点的几何调节参数保持不变, 这样在优化时, 一共有 $5 \times 19 = 95$ 个几何调节参数要优化。采用梯度法和最大熵方法, 设置 K 和 K_1 的值如表 3 所示, 进行了 15 次梯度优化计算。几何参数优化的初值根据起始和终点的值线性分布。几何调节规律的优化结果如图 4 所示。

Table 2 Initial and the end points of acceleration of VCE

Point	$n_1/\%$	$n_h/\%$	A_8/m^2	A_{25}/m^2	$A_{nb,i}/A_{nb,i,des}$	$A_{nb,h}/A_{nb,h,des}$	$\alpha_{CDFS}/(^{\circ})$
Initial	33.56	61.0	0.214	0.0859	1.0	1.0	0.0
End	98.0	98.0	0.214	0.0859	1.0	1.0	0.0

Table 3 Value of K and K_1 of max entropy method

Item	A_8	$A_{nb,h}$	$A_{nb,i}$	α_{CDFS}	A_{25}
K	0.01	0.03	0.05	50.0	0.005
K_1			30		

图 4(a)~(e) 中红线是优化前的几何调节规律, 蓝线是优化结束后的几何调节规律, 黑线为每一次优化后的几何调节规律。图 4(f) 是加速时间随优化次数 N 的变化, 可以看出加速时间随着优化次数的增加而缩短。在优化过程中, $A_{nb,i}$ 和 A_8 的值逐渐增加, 说明放大这些几何面积会缩短加速时间。 A_{25} 的值逐渐减小, 说明减小 A_{25} 会缩短加速时间。而 α_{CDFS} 在优化过程中几乎不变, 调节范围在 1° 左右, 说明 CDFS 的导叶角度对加速过程影响很小。从图 4(b) 中可以看出, 在第一步优化后 $A_{nb,h}$ 的值增加幅度很大, 之后又缓慢减小。在第一步优化时发动机加速过程受到

了压气机喘振裕度的限制 (见图 4(g)), 而放大 $A_{nb,h}$ 可以令压气机喘振裕度增加, 这样可以显著缩短发动机的加速时间。因此, 第一步 $A_{nb,h}$ 的值增加的幅度很大。而在压气机喘振裕度足够的情况下, 调小 $A_{nb,h}$ 有利于加速, 所以之后又缓慢减小。在转速较大处 $A_{nb,h}$ 的值一开始很小, 之后逐渐增加, 与转速较小处的值持平, 在此处最大熵方法起了作用, $A_{nb,h}$ 的规律变得平缓。

优化过程中高压转子转速和低压转子转速的变化如图 5 所示, 通过优化, 高转和低转加速到 98% 以上的时间缩短。图中的蓝线是最终的完整加速过程。红线和黑线是初值和优化的过程, 高低压转速均达到 98% 以上即停止加速过程的计算。

最终优化结果的燃烧室油气比和涡轮前温度如图 6 所示。由图 6 可知, 优化前的加速过程是先控压气机喘振裕度, 再控涡轮前温度, 优化后的加速过程先控燃烧室油气比, 再控涡轮前温度, 而压气机喘振裕度没有达到限制。

本文只是以地面单外涵加速过程为例, 展示如何用梯度法和最大熵方法优化加速控制规律。对于其它典型飞行状态, 例如亚声速巡航点 (11km, 0.8Ma) 和超声速巡航点 (11km, 1.5Ma) 的单/双外涵下加/减速控制规律的优化设计, 本文的方法同样适用。

作为对照, 下面不采用最大熵方法, 而按式 (1) 优化, 只考虑时间的梯度。设置 K 和 K_1 的值如表 4 所示, 进行了 16 次梯度优化计算, 得到的加速时间与采用最大熵方法的结果相近。将不采用最大熵方法的优化结果与采用最大熵方法的结果进行对比。两种优化方法的 $A_{nb,h}, A_{nb,i}, A_8$ 和 A_{25} 和加速时间以及 A_{25} 调节规律的熵如图 7 所示。把最大熵方法的结果分段线性处理, 形成便于工程上使用的几何控制规律, 在图 7 中用虚线画出。CDFS 的导叶角度变化很小, 因此没有在图 7 中示出。

Table 4 Value of K and K_1 of without max entropy method

Item	A_8	$A_{nb,h}$	$A_{nb,i}$	α_{CDFS}	A_{25}
K	0.01	0.03	0.10	100.0	0.004
K_1			0		

图 7 中红线为不采用最大熵方法的结果, 只优化时间; 蓝线为采用最大熵方法, 同时优化时间和熵。图 7 中虚线为按最大熵方法优化结果拟合出的适用于工程应用的几何调节规律。从图 7(a)~(d) 中可以看出, 采用两种优化方法, 各个几何变量的大致优化方向是一样的。 $A_{nb,h}, A_{nb,i}$ 和 A_8 的值增大, A_{25} 的值减小

可以使发动机加速时间缩短。图7(e)表明两种优化方法都能令加速时间从6.2s缩短到4.1s左右,优化效果相近。

由图7(a)~(d)可以看出,不采用最大熵方法, A_8 ,

$A_{nb,h}$ 和 A_{25} 的调节规律波动较大, A_{25} 尤为明显。而采用最大熵方法后, A_8 和 A_{25} 的调节规律接近恒定,调节规律更容易实现,便于分段线性化。图7(f)画出了两种方法优化过程中 A_{25} 调节规律的熵的变化, A_{25} 调节

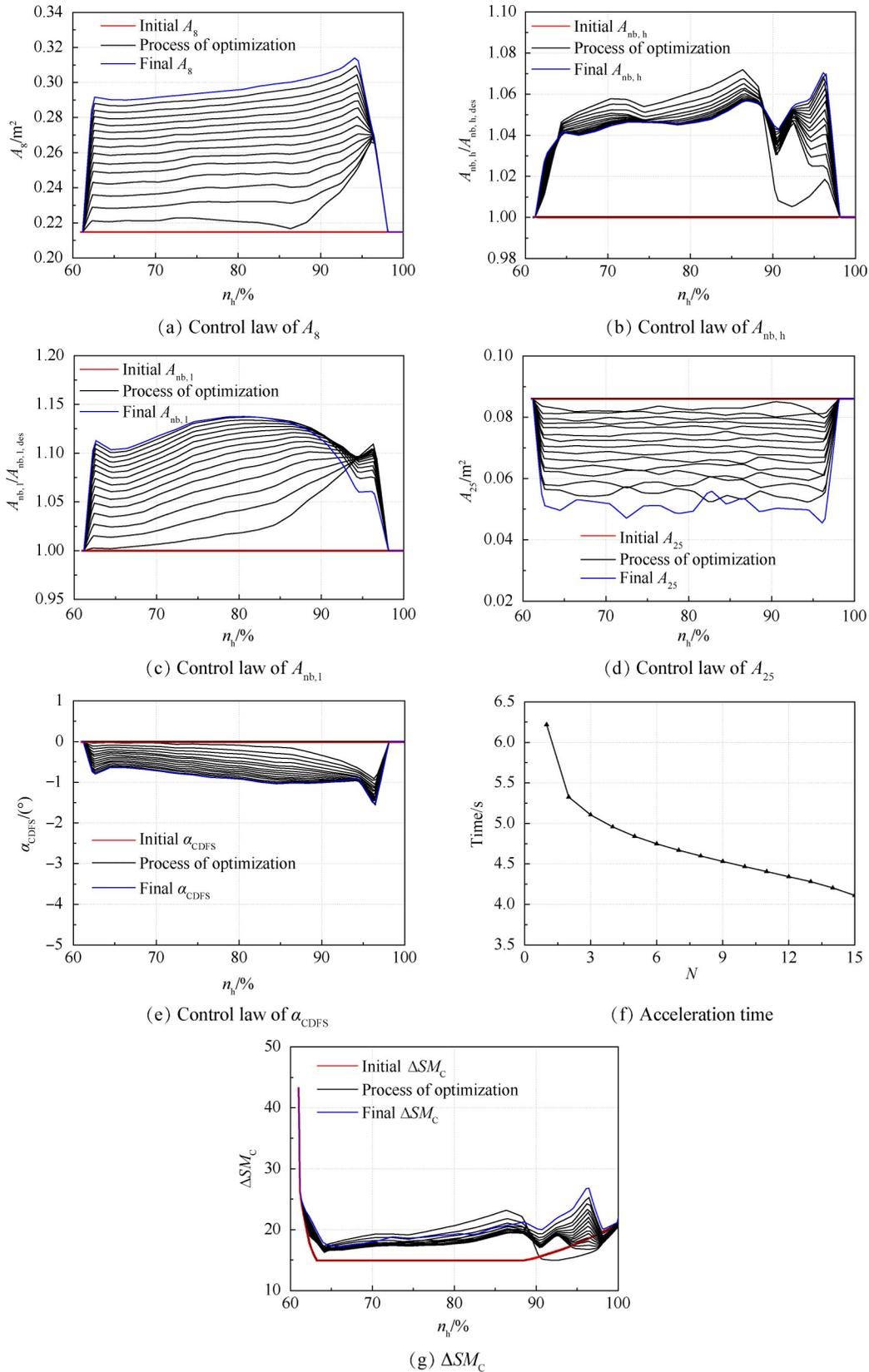


Fig. 4 Results of max entropy theory

规律初值为常数,保持不变(见表 2),所以初始时熵值最大。只对时间优化时, A_{25} 的熵值会逐渐减少;而采用最大熵方法时, A_{25} 调节规律的熵一直保持较大

的值。说明最大熵方法起了作用。

采用分段线性化的几何调节规律(图 7 中的虚线)计算 VCE 加速过程,并与分段线性化前的计算结

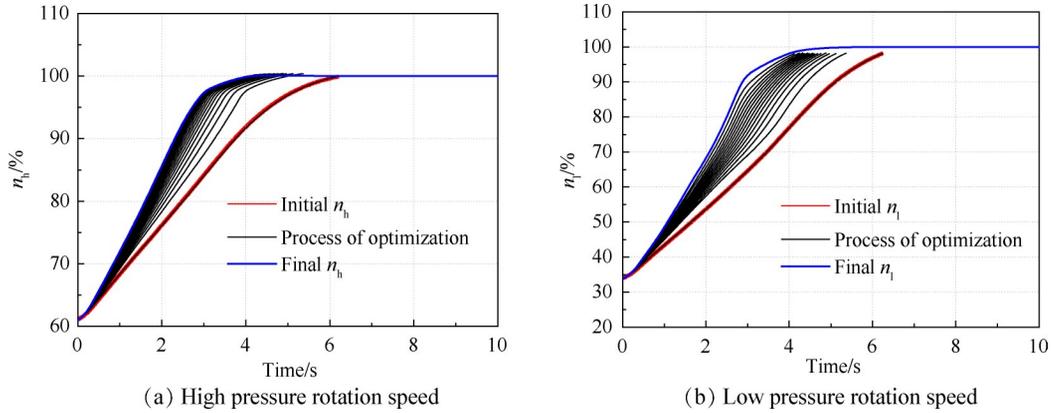


Fig. 5 Rotation speed of VCE in optimization

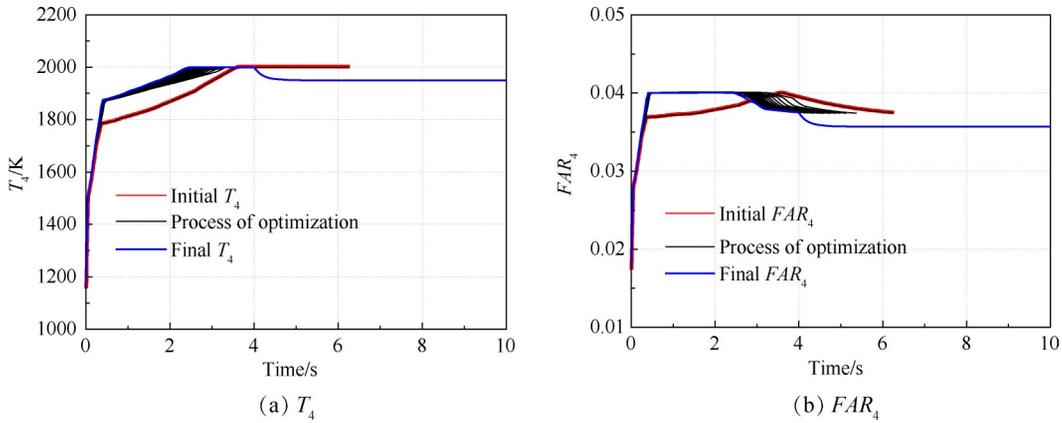
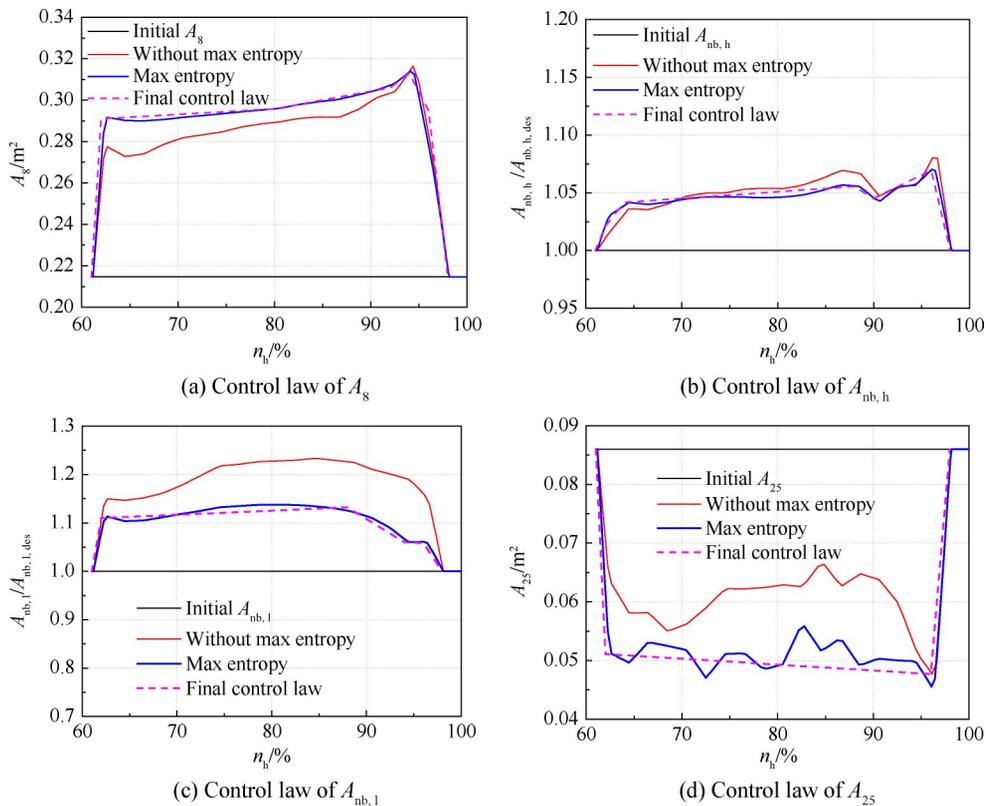


Fig. 6 T_4 and FAR_4 of the final result



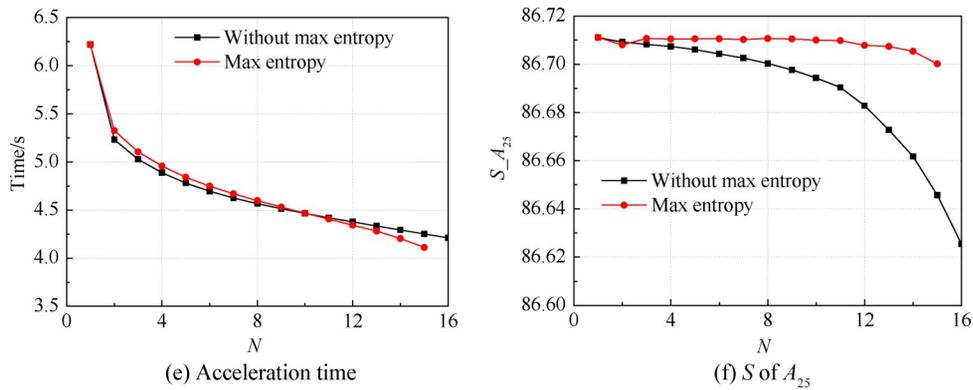


Fig. 7 Max entropy and without max entropy

果对比。转速和推力如图8所示。

从图8中可以看出,对优化得到的控制规律进行分段线性化后,转速的变化规律和推力的变化规律基本不变。对优化的调节规律分段线性化带来的误差很小,转速误差最大为1.4%,推力误差最大为

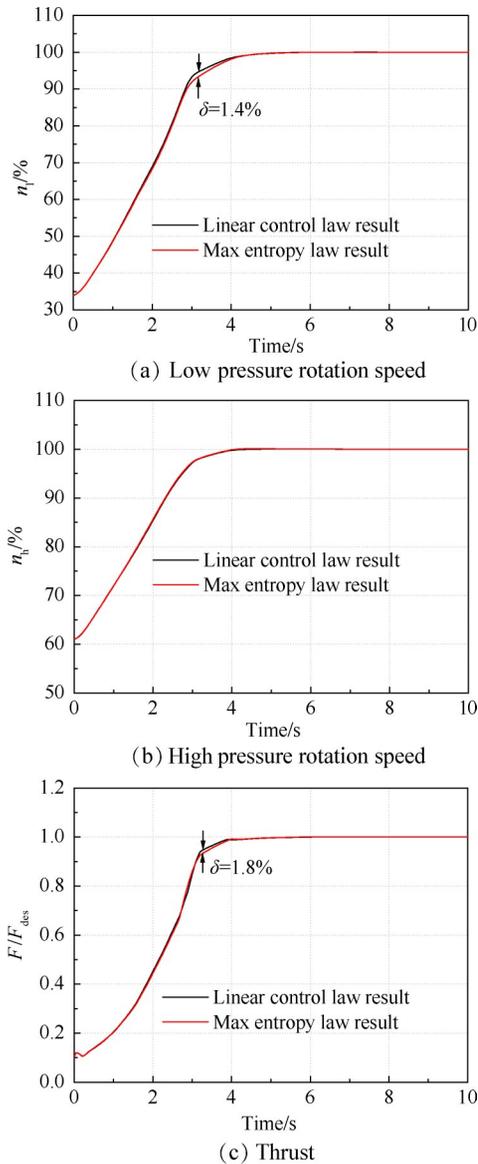


Fig. 8 Linear control law results

1.8%。采用梯度法和最大熵方法优化出的控制规律在分段线性化后可以用于工程实践。

4 结论

本文采用基于最大熵方法的梯度优化方法实现了VCE加速控制规律的正向优化设计。经过本文的计算和分析,可得出以下结论:

(1) 计算加速时间对几何参数的导数,然后采用梯度法调整几何参数,可以优化VCE加速过程的几何调节规律。

(2) 根据优化结果,为了缩短加速时间,应该放大 $A_{nb,h}$, $A_{nb,l}$ 和 A_8 , 缩小 A_{25} , 而CDFs的导叶角度对加速时间影响不大。

(3) 采用最大熵方法和不采用最大熵方法优化出的加速时间接近。但采用最大熵方法,优化出的几何规律接近恒定,更容易分段线性化,在工程中更容易实现。

(4) 对最大熵方法得到的控制规律进行分段线性化带来的误差较小,转速误差最大为1.4%,推力误差最大为1.8%。

(5) 采用梯度法和最大熵方法,可以对CDFs-VCE单外涵加速过程进行几何调节规律的优化。经过15次左右的优化,加速时间从6.2s缩短到4.1s左右。

致谢: 感谢国家重大专项基础研究项目的资助。

参考文献

[1] Adibhatla S, Johnson K L. Evaluation of a Nonlinear PSC Algorithm on a Variable Cycle Engine [C]. Monterey: AIAA/SAE/ASME 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1993.

[2] Sullivan T, Parker D E. Design Study and Performance Analysis of a High Speed Multistage Variable Geometry Fan for a Variable Cycle Engine [R]. NASA CR-159545,

- 1979.
- [3] Johnson J E. Variable Cycle Engine Concepts[C]. *Seattle: AGARD PEP Symposium on Advanced Aero-Engine Concepts and Controls*, 1996.
- [4] Ulizar I, Pilidis P. Transition Control and Performance of the Selective Bleed Variable Cycle Turbofan[C]. *Houston: ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, 1995.
- [5] Przybylko S, Rock S. Evaluation of a Multivariable Control Design on a Variable Cycle Engine Simulation[C]. *Cleveland: 18th Joint Propulsion Conference*, 1982.
- [6] Gronstedt T, Pilidis P. Control Optimization of the Transient Performance of the Selective Bleed Variable Cycle Engine During Mode Transition[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, 124(75): 75-81.
- [7] Corbett M, Wolff M. Modeling Transient Effects of a Double Bypass Engine[C]. *Nashville: 8th International Energy Conversion Engineering Conference*, 2010.
- [8] Wang T, Yin Z, Tan C, et al. High-Power Mode Control for Triaxial Gas Turbines with Variable Power Turbine Guide Vanes [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 86(3): 132-142.
- [9] 李 嘉. 变循环航空发动机自适应控制技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [10] 薛益春. 变循环发动机多变量控制及性能寻优[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [11] 张晓博, 王占学, 周 红. FLADE变循环发动机模式转换过程特性分析[J]. *推进技术*, 2018, 39(1): 14-22. (ZHANG Xiao-bo, WANG Zhan-xue, ZHOU Hong. Analysis on Characteristics of Mode Transition Performance of Variable Cycle Engine with FLADE [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39 (1) : 14-22.)
- [12] 周 红. 变循环发动机及其与飞机一体化设计研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [13] 刘增文, 王占学, 蔡元虎. 变循环发动机模式转换数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(9): 2128-2132.
- [14] 贾琳渊, 陈玉春, 谭 甜, 等. 变几何参数对变循环发动机过渡态性能的影响分析[J]. *推进技术*, 2020, 41(8): 1681-1691. (JIA Lin-yuan, CHEN Yu-chun, TAN Tian, et al. Analysis for Influence of Variable Geometry Parameters on Transition State Performance of Variable Cycle Engine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(8): 1681-1691.)
- [15] 贾琳渊. 变循环发动机控制规律设计方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [16] Jia Linyuan, Chen Yuchun, Cheng Ronghui, et al. Designing Method of the Acceleration and Deceleration Control Schedule for the Variable Cycle Engine[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 34(8).
- [17] 宋可染, 陈玉春, 贾琳渊, 等. 涡扇发动机加减速特性显式与隐式计算方法[J]. *推进技术*, 2021, 42(10): 2169-2176. (SONG Ke-ran, CHEN Yu-chun, JIA Lin-yuan, et al. Explicit and Implicit Methods to Calculate Acceleration and Deceleration Performance of Turbofan Engines[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(10): 2169-2176.)
- [18] 贾琳渊, 陈玉春, 程荣辉, 等. 变循环发动机过渡态性能直接模拟方法[J]. *航空学报*, 2020, 41(12).
- [19] 吴乃龙, 袁素云. 最大熵方法[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991.
- [20] 周子舫, 曹烈兆. 热学、热力学与统计物理(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

(编辑:张 贺)