

文章编号:1000-8055(2013)10-2384-07

加力式双转子混合排气涡扇发动机全状态 数学建模技术

时瑞军¹, 周剑波¹, 张秋贵¹, 皮 星¹, 樊思齐²

- (1. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;
2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 根据部件法建立了加力式双转子混合排气涡扇发动机全包线稳态数学模型. 基于该模型, 利用容积动力学原理, 建立了起动数学模型. 将该原理扩展到慢车状态以上, 建立了包括起动、加减速、开关加力、停车等完整过程的全状态动态数学模型. 以此为基础, 给出了加力式双转子混合排气涡扇发动机在飞行包线内的高度特性. 根据加力式双转子混合排气涡扇发动机原理, 设计了简单的起动调节规律、加减速调节规律、加力调节规律及停车调节规律; 计算了海平面标准大气条件下的从起动、加减速、开关加力、停车的完整动态过程. 理论分析与仿真结果表明: 该建模方法能够正确完成加力式双转子混合排气涡扇发动机的全包线的稳态计算和全状态动态计算, 准确反映了该发动机在整个飞行包线内的全部工作过程.

关 键 词: 加力燃烧室; 涡扇发动机; 全状态; 混合排气; 调节规律

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Modeling of whole processes of mixing exhaust afterburner twin spool turbofan engine

SHI Rui-jun¹, ZHOU Jian-bo¹, ZHANG Qiu-gui¹, PI Xing¹, FAN Si-qi²

- (1. China Aviation Powerplant Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;
2. School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Firstly, a steady state mathematical model was developed for the mixing exhaust afterburner twin spool turbofan engine in full envelope. Secondly, a startup dynamic model was constructed by combining the effects of volume dynamics with the steady model. Then, by extending the volume dynamics theory to idle state, a whole process model was obtained to calculate the startup process, acceleration and deceleration process, turn on/off afterburner process and stop process. Finally, the altitude characteristic was presented with the proposed regulation law in full envelope of the engine; the whole processes from startup to stop were simulated with the designed control algorithm. The results show that the model is able to simulate the steady and dynamic states in full envelope, and correctly describes the whole process of mixing exhaust after burner twin spool turbofan engine including afterburning.

Key words: afterburner; turbofan engine; whole process; mixing exhaust; regulation law

带加力的混合排气式涡扇发动机的动态工作过程较为复杂,包括起动、加减速、开关加力、停车等过程.正确完整地描述其动态工作过程一直是涡扇发动机数学建模工作的主要目标之一.美国的 7901 计算程序模型采用严格的部件匹配技术和变比热方法,能够准确地模拟慢车以上的稳态过程;动态过程采用所谓“准稳态”的计算方法,即假设动态过程中各部件满足气体质量守恒,动态过程由能量的差异引起.这种算法能够较好地模拟慢车以上的动态过程.但对于慢车状态以下的起动过程的模拟,尚未见到成功应用的报导^[1-5].

1980 年以来出现了一些简化的部件级起动模型,用以模拟风车状态和带起动机的辅助起动过程^[6-9].研究表明:上面这些方法需要对原有模型的部件计算算法和数据形式进行较大的改动,因而建立既可用于起动过程,也可用于慢车以上动态过程的统一的、完整的计算程序的难度较大.

本文针对一种通用的加力式双转子混合排气涡扇发动机(后文简称双转子涡扇发动机),通过将慢车以上部件特性扩展到低转速状态,得到了完整的包含全部转速状态的风扇、压气机及高压涡轮、低压涡轮特性.使用容积动态算法代替准稳态计算方法,并沿用严格的部件匹配技术及变比热方法,成功建立了包括起动、加减速、开关加力、停车等动态过程的统一形式的动态数学模型.利用简单设计的各动态过程的调节规律,仿真验证了模型的准确性.

1 基本建模原理

航空发动机实际工作过程异常复杂,包括了热力学过程和气体动力学过程^[10].准确模拟航空燃气涡轮发动机需要准确的部件特性.由于实验的困难,低转速部件特性,通常采用外插方法得到,包括等 β 线外插方法、效率外插方法,以及利用低速泵原理的外插方法^[11-13].本文采用等 β 线外插方法建立低转速状态压气机和涡轮特性.真实的热力学过程其气体参数如比热比等均随着温度、气体成分等参数会发生一定的变化.准确模拟发动机热力学过程必须采用变比热的方法.而包括起动过程在内的各种动态工作过程实际上可用容积动力学和转子动力学方程描述.上述这些原理和方法较为成熟,此处不再赘述.下面主要介绍加力燃烧室的建模方法.

1.1 非加力状态计算方法

当未开加力时,加力燃烧室只存在总压的流

动损失^[14-15].总压损失系数与进口换算燃气流量 $\dot{m}_{in,cor}$ 成正比,故出口总压为

$$\begin{cases} \zeta_{af} = \zeta_{af,ds} \frac{\dot{m}_{in,cor}}{\dot{m}_{in,cor,ds}} \\ p_{out} = p_{in}(1 - \zeta_{af}) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\zeta_{af,ds}$ 和 $\dot{m}_{in,cor,ds}$ 分别为设计状态的总压损失系数和进口换算燃气流量,下标 ds 表示设计状态参数.

其他主要出口参数为

$$\begin{cases} \dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} \\ T_{out} = T_{in} \\ H_{out} = H_{in} \\ f_{out} = f_{in} \end{cases}$$

出口燃气熵为

$$S_{out} = S(f_{out}, T_{out}, p_{out}) \quad (2)$$

1.2 加力状态计算方法

进口燃气油气比为

$$f_{in} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{in} - \dot{m}_f}$$

进口燃气气体常数为

$$R_{in} = R(f_{in})$$

已知进口面积,式(3)仅为进口静温的单变量方程,可通过迭代计算得到进口静温、静压和速度等参数.

$$\begin{cases} \dot{m}_{in} = \frac{p_{in,s}}{R_{in} T_{in,s}} V_{in} A_{in} \\ p_{in,s} = p_{in} \left(\frac{T_{in,s}}{T_{in}} \right)^{\frac{\gamma_{in}}{\gamma_{in}-1}} \\ \gamma_{in} = \gamma(f_{in}, T_{in,s}) \\ V_{in} = \sqrt{2[H_{in} - H(f_{in}, T_{in,s})]} \end{cases} \quad (3)$$

式中下标 s 表示静参数.

当打开加力时,出口燃气流量为

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{f,af} \quad (4)$$

出口燃气油气比为

$$f_{out} = \frac{\dot{m}_f + \dot{m}_{f,af}}{\dot{m}_{out} - (\dot{m}_f + \dot{m}_{f,af})}$$

出口燃气的气体常数为

$$R_{out} = R(f_{out})$$

根据能量守恒方程:

$$\dot{m}_{in} H_{in} + \dot{m}_{f,af} \cdot H_v \cdot \eta_{af} = \dot{m}_{out} H_{out} \quad (5)$$

式中 $\dot{m}_{f,af}$ 为加力燃烧室燃油流量, η_{af} 为加力燃烧室燃烧效率.

由上式解得出口总温和总焓.

根据冲量守恒原理

$$p_{in,s}A_{in} + \dot{m}_{in}V_{in} = p_{out,s}A_{out} + \dot{m}_{out}V_{out} \quad (6)$$

式(6)中 $p_{in,s}, p_{out,s}$ 分别为进出口的静压.

式(6)可变形为

$$\begin{cases} p_{in,s}A_{in} + \dot{m}_{in}V_{in} = \frac{\dot{m}_{out}}{V_{out}}R_{out}T_{out,s} + \dot{m}_{out}V_{out} \\ V_{out} = \sqrt{H_{out} - H(f_{out}, T_{out,s})} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为出口静温的单变量方程,可迭代求解得到出口静温、静焓、速度、比热比等参数.

则出口静压和总压为

$$\begin{cases} p_{out,s} = \frac{\dot{m}_{out}}{V_{out}A_{out}}R_{out}T_{out,s} \\ p_{out} = p_{out,s} \left(\frac{T_{out}}{T_{out,s}} \right)^{\frac{\gamma_{out}}{\gamma_{out}-1}} \end{cases}$$

考虑加力燃烧室总压的流动损失,实际出口总压为

$$p_{out} = p_{out}(1 - \zeta_{af})$$

出口熵为

$$S_{out} = S(f_{out}, T_{out}, p_{out})$$

2 共同工作方程

在稳态过程中,双转子涡扇发动机的部件进出口流量满足平衡,转子功率满足平衡,许多文献都有介绍,这里不再赘述.

在动态过程中,由于容积效应,部件的进出口流量不再相等,其差值形成出口压力梯度.由容积动力学原理,可得双转子涡扇发动机的流量动态方程组为

$$\begin{cases} \frac{dp_{ht,out}}{dt} = (kRT)_{ht,out} \left(\frac{W_{in} - W_{out}}{V} \right)_{ht} \\ \frac{dp_{lt,out}}{dt} = (kRT)_{lt,out} \left(\frac{W_{in} - W_{out}}{V} \right)_{lt} \\ \frac{dp_{nz,out}}{dt} = (kRT)_{nz,out} \left(\frac{W_{in} - W_{out}}{V} \right)_{nz} \\ \frac{dp_{mx,out}}{dt} = (kRT)_{mx,out} \left(\frac{W_{in} - W_{out}}{V} \right)_{mx} \end{cases} \quad (8)$$

其两个转子的动力学方程为

$$\begin{cases} J_h \frac{d\omega_h}{dt} = M_{ht} - M_{cp} \\ J_l \frac{d\omega_l}{dt} = M_{lt} - M_{fn} \end{cases} \quad (9)$$

式中 J_h, J_l 分别为高压转子转动惯量和低压转子转动惯量; ω_h, ω_l 分别为高、低压转速.

式(8)和式(9)组成的非线性方程组即描述双转子涡扇发动机动态过程的共同工作方程,其任意时刻的解即为该时刻双转子涡扇发动机的工作

状态.该方程组的求解方法有很多,如欧拉法、龙格库塔法、阿当姆斯法,这里不再具体介绍.

3 全状态调节器规律

为了模拟双转子涡扇发动机的全部动态过程,必须设定起动调节规律、加减速调节规律、加力调节规律及停车调节规律.下面仅从控制角度出发,暂不考虑各种限制保护的功能,给出双转子涡扇发动机简单的调节规律.

3.1 地面起动调节规律

燃气涡轮发动机起动过程一般包括起动机带转、点火后涡轮与起动机共同带转、起动机断开而由涡轮单独带转发动机到慢车的 3 个过程.此处示意起见,仅给出地面起动调节规律如下:

$$\begin{cases} \dot{m}_f = 0 & n_h < n_{h,ign} \\ \dot{m}_f \rightarrow \dot{n}_h = f(n_h) & n_{h,ign} < n_h < n_{h,idl} - \Delta n \\ \dot{m}_f \rightarrow n_h = n_{h,idl} & n_h > n_{h,idl} - \Delta n \end{cases} \quad (10)$$

式中 $n_{h,ign}, n_{h,idl}$ 分别为高压涡轮点火转速和慢车转速.

3.2 加减速调节规律

慢车以上的加减速调节规律可以有多种形式,此处仅给出简单形式的加减速调节规律.

加速调节规律:

$$\dot{m}_f \rightarrow n_h = n_{h,r} \quad (11)$$

减速调节规律:

$$\dot{m}_f \rightarrow n_h = n_{h,idl} \quad (12)$$

3.3 加力调节规律

双转子涡扇发动机使用的尾喷管为收敛型喷管,当打开加力时,必须同步调整喷管出口面积,以保证加力燃烧室的状态变化不影响核心机的工作.为此必须保证双转子涡扇发动机的高低压涡轮的落压比之积在开加力状态前后保持不变.为此设定加力状态调节规律如下:

$$\begin{cases} \dot{m}_{f,af} \rightarrow T_7 = \text{const} \\ A_8 \rightarrow \pi_{ht} \cdot \pi_{lt} = \text{const} \end{cases} \quad (13)$$

式中 T_7 为加力燃烧室出口温度.

3.4 最大状态调节规律

在整个飞行包线内,随着飞行状态的变化,双转子涡扇发动机进口总温差异较大.设定合理的最大状态调节规律,能够保证双转子涡扇发动机物理转速不超转,换算转速也不超转,同时涡轮后温度不超温,最大可能地安全地发挥双转子涡扇

发动机的性能潜力,下面为设计的简易的最大状态调节规律如下:

$$\begin{cases} n_{h,cor} = n_{h,cor,max} & T_1 < 288.15\text{ K} \\ n_h = n_{h,max} & T_1 \geq 288.15\text{ K} \end{cases} \quad (14)$$

3.5 停车调节规律

停车过程切断主燃烧室的燃油流量

$$\dot{m}_f = 0 \quad (15)$$

4 仿真结果

利用上面建立的数学模型及调节规律,仿真研究了某型双转子涡扇发动机加力状态下的速度特性;同时仿真研究了其地面起动、加减速、开关加力及停车等完整的动态过程.

图 1~图 12 中, n_h 为高压转速, n_l 为低压转速, A_8 为尾喷管出口面积, F_n 为双转子涡扇发动机推力, S_{fc} 为耗油率, W_{fb} 为燃油流量, P_{th} 为高压涡轮落压比, P_{tl} 为低压涡轮落压比, N_{hdot} 为高压转速导数, T_5 为低压涡轮出口截面温度. 以上物理量都为无量纲.

4.1 稳态结果

图 1、图 2 为加力状态下,地面标准大气条件,双转子涡扇发动机主要参数随马赫数的变化曲线. 图 3、图 4 为高度为 15 km,双转子涡扇发动机主要参数随马赫数的变化曲线.

由图 1、图 2 易知,当马赫数从 0 变化到 1.4 时,双转子涡扇发动机高压转速保持恒定,尾喷管出口面积相应增大,推力逐渐增大,耗油率先减小后增大. 原因在于,地面标准大气条件下马赫数为 0 时,双转子涡扇发动机进口总温 T_1 为 288.15 K,随着马赫数增大, $T_1 > 288.15\text{ K}$. 故根据式

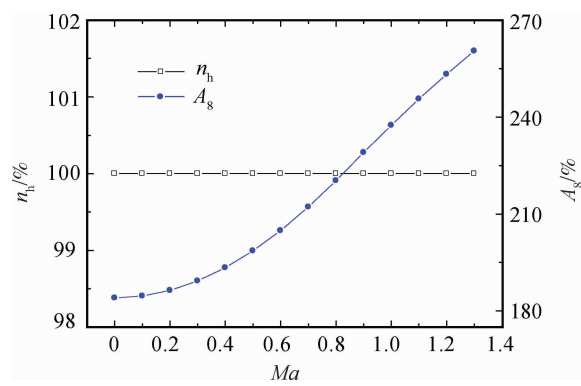


图 1 地面标准大气条件下 n_h 和 A_8 随马赫数的变化曲线

Fig. 1 Variation curves of n_h and A_8 with Mach number at ground standard atmosphere

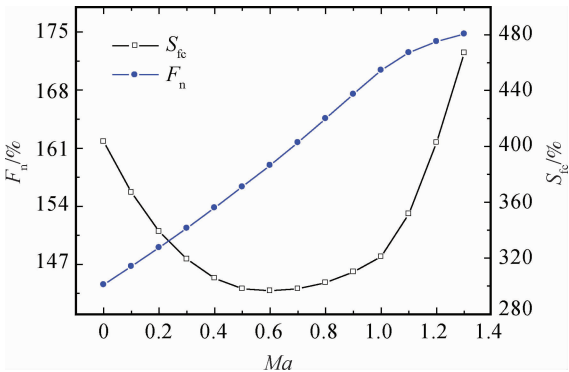


图 2 地面标准大气条件下 F_n 和 S_{fc} 随马赫数的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of F_n and S_{fc} with Mach number at ground standard atmosphere

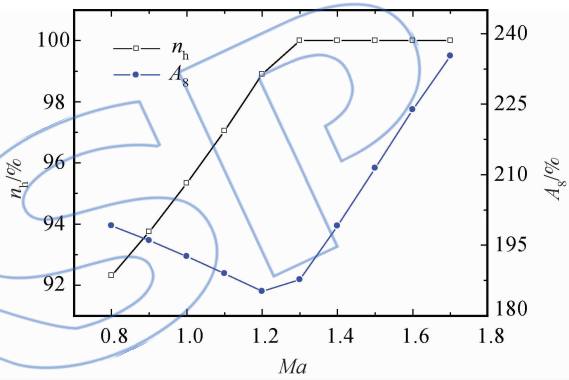


图 3 $H=15\text{ km}$, n_h 和 A_8 随马赫数变化曲线

Fig. 3 Variation curves of n_h and A_8 with Mach number at $H=15\text{ km}$

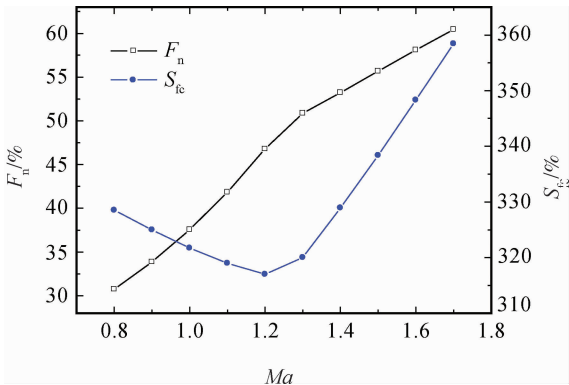


图 4 $H=15\text{ km}$, F_n 和 S_{fc} 随马赫数变化曲线

Fig. 4 Variation curves of F_n and S_{fc} with Mach number at $H=15\text{ km}$

(14)确定的最大状态调节规律,高压物理转速应当保持恒定.同时随着马赫数的增大,双转子涡扇发动机风扇负荷增大,需要低压涡轮功增大,因而低压涡轮落压比增大.根据加力调节规律式(13),则高压涡轮落压比降低,从而必须降低主燃烧室

燃油流量。这样加力燃烧室的加力比增大,因而必须增大喷管出口面积。同理可分析图 2,这里不再赘述。

图 3、图 4 分别为高度为 15 km 时,双转子涡扇发动机主要参数随马赫数的变化曲线。由图 3 可见,当马赫数从 0.8 变化到 1.7 时,高压转速逐渐增大到 100,然后保持恒定;尾喷管出口面积先减小,当马赫数大于 1.3 时,尾喷管出口面积随之增大。这是由于在 15 km 的高度,环境温度为 216.15 K,当马赫数较低时,双转子涡扇发动机进口总温小于 288.15 K,根据式(14)确定的最大状态调节规律,应保持双转子涡扇发动机高压换算转速恒定,因而高压转速随着进口总温的升高而增大;当马赫数大于 1.3 时,双转子涡扇发动机进口总温大于 288.15 K,因而根据式(14),双转子涡扇发动机高压转速保持不变。同理,当马赫数较低时,随着马赫数增大,双转子涡扇发动机高压转速升高,则加力燃烧室进口温度逐渐增大,因而按照式(13),加力燃烧室加力比减小,因而尾喷管出口面积减小;当马赫数大于 1.3 时,按照式(14),双转子涡扇发动机高压转速恒定。随着马赫数增大,风扇负荷随之增大,则低压涡轮落压比增大,高压涡轮落压比减小。从而加力燃烧室进口温度降低,根据式(13),加力比增大,因而尾喷管出口面积增大。同理可分析图 4,这里不再赘述。

4.2 动态结果

图 5、图 6 在速度为 0 m/s,地面标准大气条件下,按照式(10)给定的起动调节规律,双转子涡扇发动机的起动过程仿真结果。由图可见双转子涡扇发动机高压转速导数变化明显分为 3 段,起动过程时间约为 25 s,正确反映了双转子涡扇发动机的起动过程特征。

图 7、图 8 为按照式(11)、式(13)设定的加速和加力调节规律,从前述的慢车状态加速到最大状态,然后 60 s 时从最大状态打开加力的动态过程曲线。由图可见,双转子涡扇发动机状态从慢车迅速加速到最大状态;60 s 后尾喷管出口面积增大,涡轮落压比之积经短暂的调整,很快恢复到打开加力之前的状态,其他状态参数在打开加力过程存在短暂的瞬态调整。整个双转子涡扇发动机状态变化曲线符合了加速和加力调节规律的要求,正确反映了双转子涡扇发动机的加速过程和加力过程特征。

图 9、图 10 为按照式(13)、式(12)设定的调节规律,从开加力状态关闭加力,然后从最大状态

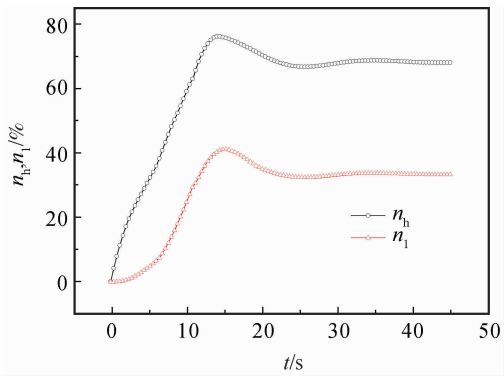


图 5 起动过程 n_h 和 n_l 变化曲线
Fig. 5 Variation curves of n_h and n_l during startup

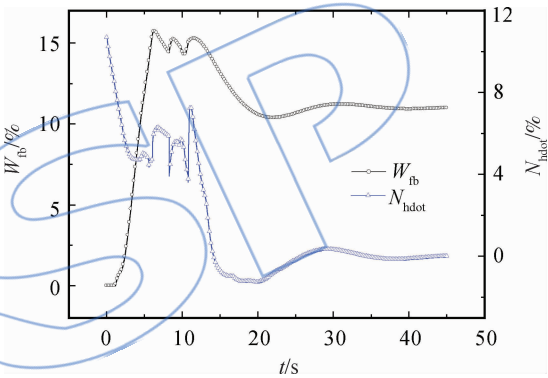


图 6 起动过程 W_{fb} 和 $N_{h\dot{d}}$ 燃油流量及转速导数变化曲线
Fig. 6 Variation curves of W_{fb} and $N_{h\dot{d}}$ during startup

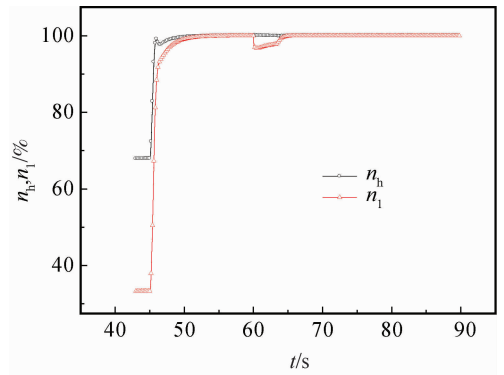


图 7 加速及开加力过程 n_h 和 n_l 变化曲线
Fig. 7 Variation curves of n_h and n_l during acceleration and reheat

减速到慢车状态的动态过程曲线。由图可见各参数变化符合调节规律要求,正确反映了双转子涡扇发动机的关加力和加速过程特征。

图 11、图 12 为按照式(15)确定的调节规律,双转子涡扇发动机停车过程动态曲线。由图可见

各参数变化符合调节规律要求,基本正确反映了双转子涡扇发动机的停车过程。

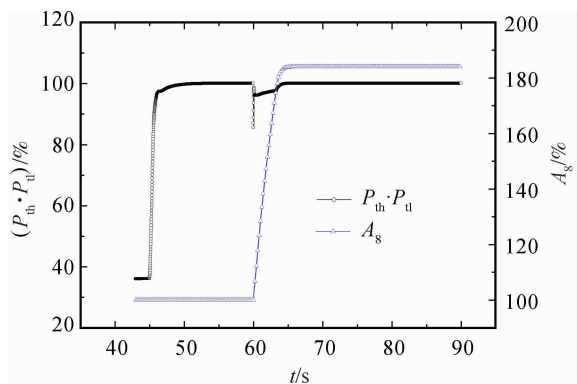


图 8 加速及开加力过程 $P_{th} \cdot P_{tl}$ 和 A_8 变化曲线

Fig. 8 Variation curves of $P_{th} \cdot P_{tl}$ and A_8 during acceleration and reheat

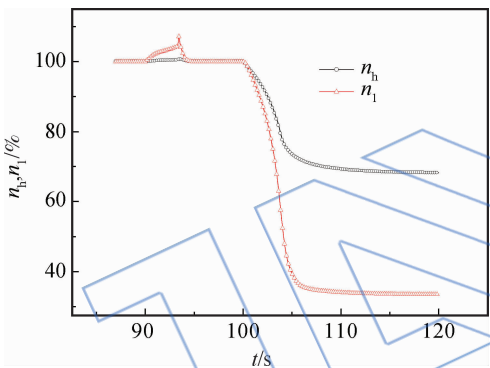


图 9 关加力及减速过程 n_h 和 n_l 的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of n_h and n_l during deceleration and reheat close

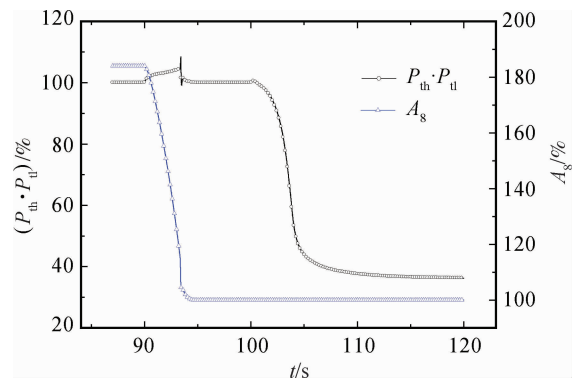


图 10 关加力及减速过程 $P_{th} \cdot P_{tl}$ 和 A_8 的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of $P_{th} \cdot P_{tl}$ and A_8 during deceleration and reheat close

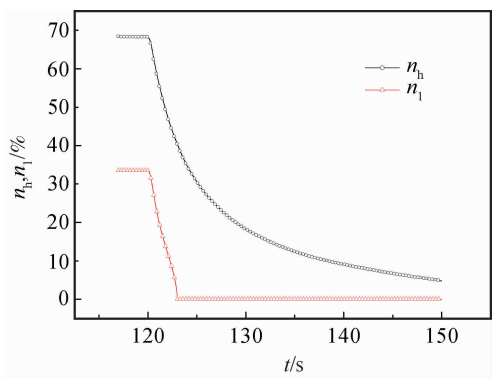


图 11 停车过程 n_h 和 n_l 的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of n_h and n_l during engine stop

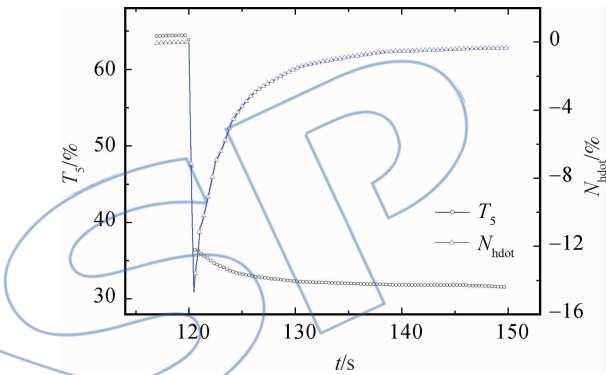


图 12 停车过程 T_5 和 $N_{h\dot{}}$ 的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of T_5 and $N_{h\dot{}}$ during stop

5 结 论

本文建立了双转子涡扇发动机的稳态数学模型和全状态动态数学模型. 该模型能够完成包线内的稳态特性曲线, 以及起动、加速、开加力、关加力、减速、停车等动态过程. 仿真结果表明, 模型正确反映了双转子涡扇发动机在整个包线内的稳态变化规律, 以及从起动到加力直至停车的动态过程。

参考文献:

[1] Sellers J F, Daniele C J. DYNGEN: a program for calculating steady state and transient performance of turbojet and turbofan engines[R]. NASA-TN-D-7901, 1975.

[2] McKinney J S. Simulation of turbofan engine[R]. AFAPL-TR-67-125, 1967.

[3] Palmer J R, YAN Chengzhong. TURBOTRANS: a programming language for the performance simulation of arbitrary gas turbine engines with arbitrary control systems [R]. ASME-82-GT-200, 1982.

[4] Sadler G G, Melcher K J. DEAN: a program for dynamic engine analysis[R]. NASA-TM-S7033, 1985.

[5] Pilidis P, Maccallum, N R L. A general program for the prediction of the transient performance of gas turbines [R]. ASME-85-GT-209, 1985.

[6] Agrawl R K, Yunis M. A generalized mathematical model to estimate gas turbine starting characteristics[J]. Journal of Engineering for Power, 104(1):194-201, 1982.

[7] De-You Y, Zhong Fan M. A dynamic model of turbojet in starting at high altitude[R]. AIAA 83-7045, 1983.

[8] Morita M, Sasaki M. Restarting characteristics of turbofan engines[R]. ISABE 89-7127, 1989.

[9] Chappell M. An approach to modelling continuous turbine engine operation from startup to shutdown[R]. AIAA 91-2373, 1991.

[10] 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.

[11] Sexton W R. A method to control turbofan engines starting by varying compressor surge valve bleed[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.

[12] Kurzke J. Preparing compressor maps for gas turbine performance modeling with smooth C: version 8 [EB/OL]. [2012-01-08]. www.gasturb.de, 2002.

[13] Kurzke J. Preparing turbine maps for gas turbine performance modeling with smooth T: version 8 [EB/OL]. [2011-11-13]. www.gasturb.de, 2002.

[14] 聂恰耶夫 ЮН. 航空动力装置可控制规律与特性[M]. 单凤桐, 译. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[15] 童凯生. 航空涡轮发动机性能变比热计算方法[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.

