

文章编号: 1000-8055(2005) 04-0545-04

# 涡轮风扇发动机接通加力过程的数值模拟

薛 倩, 肖 洪, 廉筱纯  
(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 发展了一种低涵道比混合排气加力涡轮风扇发动机接通加力时的数值模拟方法。该方法考虑混合室加力燃烧室、主燃烧室和外涵道的容积效应, 风扇、压气机、高压和低压涡轮等部件的特性, 加力燃烧室供油管的充油时间。以混合室加力燃烧室、主燃烧室和外涵道 3 个容积室的动态方程为基础, 用很小的时间步长逐渐逼近, 计算不需要迭代, 速度快, 精度满足工程要求。

关键词: 航空、航天推进系统; 涡轮风扇; 发动机; 接通加力; 数值模拟  
中图分类号: V 231 文献标识码: A

## Numerical Simulation of Turbofan Engine Afterburner Light-on Process

XU E Qian, XIAO Hong, LIAN Xiao-chun  
(School of Power and Energy,  
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Numerical simulation of turbofan engine afterburner light-on process was presented. The volume effects of mixer, afterburner and outlet duct was taken into account. Performances of fan, compressor, turbine and time consumed for filling afterburner fuel ducts were incorporated into simulation. Based on the dynamic equations of three volumes, i. e. volumes of afterburner, main combustion chamber and fan duct, the simulation could be rapidly performed with high fidelity and without iteration.

**Key words:** aerospace propulsion system; turbofan; engine; afterburner;  
numerical simulation

接通加力时为了保证主发动机的工作状态不受影响, 理论上应保持加力燃烧室中燃气温度的增加与尾喷管喉部面积的增加相协调。但是在实际接通或断开加力的过程中, 上述 2 个参数严格的保证协调是不可能的, 因此发动机的涡轮和风扇、压气机的匹配处于短时间的过渡过程之下<sup>[1]</sup>。国内现有的发动机性能数值模拟程序<sup>[2, 3]</sup>及在此

基础上发展改进的一些程序, 都不具有对接通加力的过程进行数值模拟的功能。本文发展了一种方法, 可以对加力涡轮喷气发动机和混合排气加力涡轮风扇发动机接通加力过程进行数值模拟。整个模拟计算过程无需迭代, 计算速度快, 精度可满足工程要求。

收稿日期: 2004- 09- 24; 修订日期: 2005- 01- 05

作者简介: 薛倩(1974- ), 女, 陕西宝鸡人, 西北工业大学动力与能源学院硕士生, 工程师, 主要从事航空发动机总体性能计算研究。

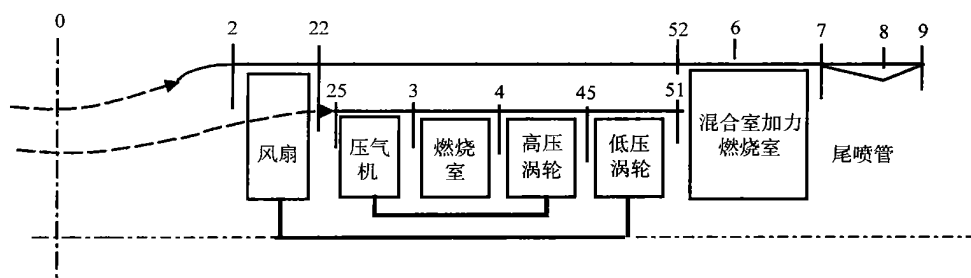


图 1 混合排气涡轮风扇发动机示意图和截面符号

Fig. 1 Sketch map of mix-exhaust turbofan engine and section symbol

## 1 物理模型

低涵道比混合排气加力涡轮风扇发动机的物理模型和截面符号如图 1 所示。

## 2 接通加力过程的发动机气动热力数学模型

数值模拟主要应用燃烧室容积、外涵道容积和加力燃烧室容积中的一维非定常流的连续方程、能量方程和动量方程以及 2 个转子的运动学方程。

$$\text{连续方程: } \frac{\partial}{\partial t} \oint_V \rho \cdot dV = - \oint_S \rho \cdot c \cdot dS \quad (1)$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial}{\partial t} \oint_V \left[ C_v T + \frac{C^2}{2} \right] dV = - \oint_S \left[ C_p T + \frac{C^2}{2} \right] (c \cdot dS) + Q + N \quad (2)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial}{\partial t} \oint_V \rho C \cdot dV = - \oint_S \rho C (c \cdot dS) - \oint_S \rho \cdot dS + F_x \quad (3)$$

$$\text{转子的运动学方程: } \frac{dn_i}{dt} = \left( \frac{\pi}{30} \right)^2 \frac{1}{J \cdot n_i} (N_T \eta_m - N_K)_i \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

## 3 接通加力过程中加力供油量的控制

加力燃烧室一般有 5 个供油总管,即起动燃油总管、No. 1、No. 2、No. 3 和 No. 4 燃油总管。

(1) 接通加力时,首先起动燃油总管充油。

加力燃油起动总管充油时间,按设计时规定或由用户给出,例如为 0.4 s。

起动油管供油量:

加力燃油起动总管充油完成后,其向加力燃烧室的供油量为预先规定的值,例如为:

$$W_{f.st} = 0.1 \cdot W_{f.af}$$

式中  $W_{f.af}$  为最大加力(或部分加力)稳态工作时的供油量,根据加力调节规律确定,一般  $W_{f.af}$  是发动机进口总压和总温的函数:

$$W_{f.af} = f(p_2^*, T_2^*)$$

(2) 起动总管充油完成并开始向加力燃烧室供油后,其它 4 个燃油总管依次充油,其冲油时间

和向加力燃烧室的供油量按设计时的分配给定。例如:

No. 1 燃油总管: 充油时间 0.4 s;

$$\text{供油量 } W_{f.st} = 0.225 \cdot W_{f.af}$$

No. 2 燃油总管: 充油时间 0.5 s;

$$\text{供油量 } W_{f.st} = 0.225 \cdot W_{f.af}$$

No. 3 燃油总管: 充油时间 0.6 s;

$$\text{供油量 } W_{f.st} = 0.225 \cdot W_{f.af}$$

No. 4 燃油总管: 充油时间 0.8 s;

$$\text{供油量 } W_{f.st} = 0.225 \cdot W_{f.af}$$

## 4 接通加力过程尾喷管临界面积的控制

稳态的最大加力状态或部分加力状态的尾喷管临界截面积,由加力状态下的调节规律确定,一般是发动机进口总温的函数:

$$A_{8.af,max} = f(T_2^*)$$

同样最大状态的尾喷管临界截面积, 由发动机最大状态的调节规律确定, 通常也是发动机进口总温的函数:

$$A_8 = f(T_2^*)$$

接通加力时加力过程中尾喷管的瞬时临界截面积的变化, 通常是希望主发动机的工作状态不受接通加力过程的影响, 为此应该采用保持涡轮总膨胀比不变的调节。当然也可采用其它如保证足够的风扇、压气机稳定裕度的调节等。但是无论采用何种调节方法, 尾喷管喉部面积的变化与加力燃烧室出口总温的变化不可能完全协调, 加力过程中的发动机参数总是会有一定程度的波动。加力过程的数值模拟的目的在于揭示发动机参数的时间历程, 以便改进加力过程的调节。

### 5 算 例

以某型涡轮风扇发动机为例, 在  $Ma_0 = 0, H = 0$  从最大状态接通到最大加力状态的过程进行数值模拟。本例采用保持加力前起始状态时的涡轮总膨胀比  $\pi_r = const$  调节, 虽然如此, 但加力过程进行迅速, 尾喷管临界面积的变化很难与供油量变化严格协调, 所以加力过程中  $\pi_r$  不可避免有波动。

图 2 表示接通加力时加力燃烧室供油量随时间变化, 大致呈阶梯形上升。这是因为油门杆角度按一定速率变化, 当达到最小加力角度时起动总油管开始充油, 充油完成后才供油, 随着油门杆角度继续增加, 其它总油管依次充油、供油。图 3 表示加力燃烧室出口总温  $T_7^*$  随时间变化关系。由于供油量的阶梯形上升, 故  $T_7^*$  基本上也呈阶梯形上升。

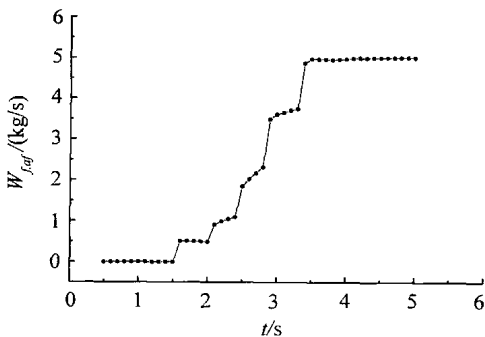


图 2 接通加力时加力燃烧室供油量随时间变化  
Fig.2 Variation of afterburning fuel consume with time

图 4 表示加力过程中尾喷管临界面积  $A_8$  随

时间变化关系。随着加力燃烧室出口总温  $T_7^*$  的上升, 为了保持涡轮总膨胀比不变,  $A_8$  的基本趋势是增加的, 但是其变化也有一定的速率, 故在加力过程的后半段有所波动。图 5 表示涡轮总膨胀比  $\pi_r$  随时间的变化关系。可见, 在加力过程结束后,  $\pi_r$  保持加力起始状态的值不变, 但在加力过程中是波动的。为了减少这种波动的不良现象与

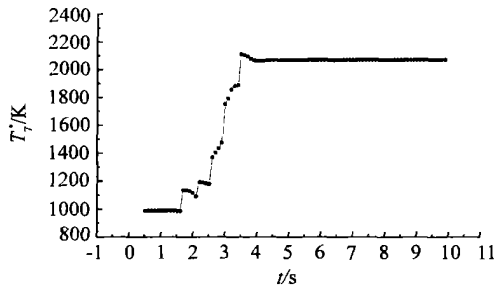


图 3 接通加力时加力燃烧室出口总温随时间变化  
Fig.3 Variation of total temperature at after-burning combustor exit with time

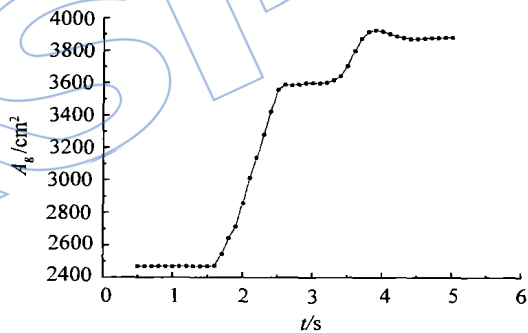


图 4 尾喷管临界面积  $A_8$  随时间变化关系  
Fig.4 Variation of  $A_8$  with time

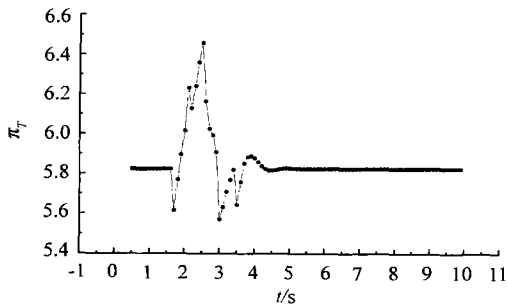


图 5 涡轮总膨胀比  $\pi_r$  随时间的变化关系  
Fig.5 Variation of  $\pi_r$  with time

缩短加力过程所需要的总时间起见, 必须力求使得  $A_8$  与温度  $T_{af}^*$  随时间而变化的尽可能的协调, 这就要求提高加力燃烧室的自动调节系统工作的精确度。

图 6 表示发动机推力随时间变化关系, 基本趋势是推力迅速的增加, 但由于尾喷管临界面积与加力燃烧室出口总温变化的并非严格协调, 推

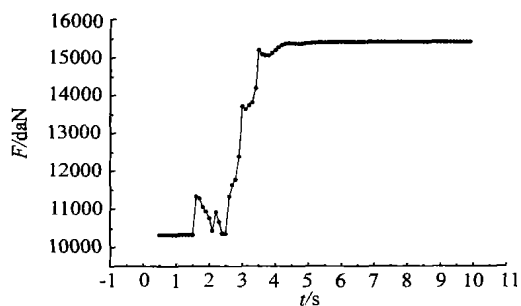


图 6 发动机推力  $F$  随时间变化关系

Fig. 6 Variation of total thrust  $F$  with time

力也有一些波动。切断加力过程与接通加力过程的情况是类似的。

## 6 结 论

(1) 本文发展的模型可以对涡轮喷气和涡轮

风扇发动机的加力过程进行数值模拟, 整个模拟计算过程无需迭代, 计算速度快, 精度可满足工程要求。

(2) 本文发展的模型, 可由用户设置加力过程的供油规律和尾喷管喉部面积的变化规律, 以期得到它们的良好匹配。

## 参考文献:

- [1] [俄] 古列维奇, 戈尔别格讲稿. 航空涡轮发动机的控制方法与燃气涡轮发动机动态特性的数学模拟[M]. 江苏 无锡: 中国航空动力控制系统研究所整理, 1998.
- [2] Hideaki, Yamane. High Fidelity Simulation of Engine Acceleration Characteristics with Effect of Combustor Performance Variation under Transient Conditions[J]. *AIAA* - 1994-2957, 1994.
- [3] James F Sellers, Carl J Daniele. DYNGEN - A Program for Calculating Steady-State and Transient Performance of Turbojet and Turbofan Engines[R]. *NASA TN D-7901*.