

某型发动机动态特性仿真研究

姜涛, 王进, 李应红
(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:根据气动热力学理论,考虑转子惯性和容积特性的影响,在发动机稳态模型的基础上,建立了某型发动机的动态模型,并利用C语言编制了相应的仿真程序。仿真结果与实际物理过程相符合,证明了模型和程序的正确性,为深入研究该型发动机提供了一个有力的工具。

关键词:发动机;动态模型;动态特性;仿真

中图分类号:V23 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2001)06-0015-04

利用数学模型对航空发动机进行仿真计算,是现代航空发动机在制造、调试、试验和使用过程中的主要工具。随着现代发动机控制日益复杂,动态特性在发动机预研等方面显得越来越重要。某型发动机作为我国引进的一种先进发动机,对其稳态特性仿真计算已进行了不少研究,并取得了一定的成绩。然而针对该型发动机的动态特性仿真计算还很少有人进行这方面的工作。

1 动态模型的建立

在稳态模型中,压气机和涡轮之间达到功率平衡,发动机转速保持不变,发动机各部件之间满足流量平衡。任何一个转子上不存在剩余转动力矩,发动机的任何位置不存在流量积累。但在实际使用中,发动机迅速地从一种状态改变到另一种状态,发动机的流量和转子上的功率是不平衡的。当发动机各部件联合工作时,彼此之间要受到制约,这种制约不仅在发动机稳态工作时存在,在发动机动态过程中同样存在。考虑了功率、流量以及能量的不平衡,以及各部件之间的制约关系,建立如下新的平衡方程

1) 考虑转子的转动惯量和转子的加速度,建立新的功率平衡方程

$$W_T \Delta H_T = W_K \Delta H_K + P_{T,ex} + \left(\frac{2\pi^2}{60} \right) \cdot I \cdot N \cdot \frac{dN}{dt}$$

式中, W 为空气流量; ΔH 为单位流量焓降; $P_{T,ex}$ 为涡轮输出功率; I 为转子转动惯量; N 为转速。下注角T表示涡轮;K表示压气机。

2) 考虑流量的不平衡。利用发动机各截面压力的动态变化,建立平衡方程

$$m_{out} = m_{in} - \frac{V}{KRT} \frac{dP}{dt}$$

式中, m_{out} 为部件出口气体流量; m_{in} 为部件进口气体流量; V 为部件容积体积; P 为压力。

3) 考虑能量的不平衡。主要由控制体内质量的变化引起内能的变化和单位内能的变化引起的内能变化,新的平衡方程如下

$$h_{out} = \left[m_{in} h_{in} - (m_{in} - m_{out}) u - \frac{PV du}{RT dt} \right] / m_{out}$$

式中, h 为单位质量气体的热焓; u 为容腔内气体的内能;下注角in表示进口;out表示出口。

分别选取低压压气机转速 n_L 、低压压气机增压比 π_{CL}^* 、高压压气机转速 n_H 、高压压气机增压比 π_{CH}^* 、高压涡轮落压比 π_{TH}^* 、和低压涡轮落压比 π_{TL}^* 6个参数和作为发动机的状态参数。同时,它们的工作状态不是独立的,要受共同工作条件的约束,因此求解发动机状态参数时,必须满足发动机共同工作方程。发动机的共

同工作方程可写为一般形式:

$$f_i(n_L, n_H, \pi_{CL}^*, \pi_{CH}^*, \pi_{TH}^*, \pi_{TL}^*) = 0 \quad (i = 1 \sim 6)$$

上述是包含微分方程和代数方程的非线性方程组。将微分方程和代数方程分开,可表示为

$$\left. \begin{aligned} n_h &= \frac{\Delta P_H}{D_H} \\ n_l &= \frac{\Delta P_L}{D_L} \end{aligned} \right\}$$

$$g_i(n_L, n_H, \pi_{CL}^*, \pi_{CH}^*, \pi_{TH}^*, \pi_{TL}^*) = 0 \quad (i = 1 \sim 4)$$

式中, ΔP_H 为高压轴剩余功率, $\Delta P_H = P_{TH} - P_{CH} - P_{H,ex}$, P_{TH} 为高压涡轮功率, P_{CH} 为高压压气机功率, $P_{H,ex}$ 为高压涡轮输出功率。 ΔP_L 为低压轴剩余功率, $\Delta P_L = P_{TL} - P_{CL}$, P_{TL} 为低压涡轮输出功率, P_{CL} 为低压压气机功率。

利用数值解法求解上述方程组即可确定发动机过渡过程中某一时刻的状态,称为动态平衡点或准稳态点。过渡过程的求解过程就是在一定的初始条件下,求解动态平衡点的过程。

2 计算机仿真

将转子的转动惯量、控制体的容积惯性加入到稳态求解程序的残量中,也就是在稳态残量方程中加入动态项。在计算特定的过渡过程时,本程序需要相应的供油规律,也就是供油量随时间的变化关系。和稳态计算相比,燃烧室温度不需要试给,而是由供油量的值唯一确定。燃烧室中油气比也不再由迭代得出,而由供油量和空气流量直接算出。本文采用欧拉法解微分方程,欧拉法具有算法简单,计算速度快的优点。

2.1 猜测矢量的选择

选择猜测矢量: $V = [N_L, N_H, Z_{CL}, Z_{CH}]$

式中, N_L, N_H 分别为高、低压转子转速; Z_{CH}, Z_{CL} 分别为高、低压流量。

2.2 残量的选取

所选残量 (E_1, E_2, E_3, E_4) 由以下方程组产生:

$$\begin{cases} (W_{TH} - W_{THC})/W_{THC} = E_1 \\ (W_{TL} - W_{TLC})/W_{TLC} = E_2 \\ (P_{15s} - P_{5s})/P_{5s} = E_3 \\ (A_{8c} - A_8)/A_8 = E_4 \end{cases}$$

式中, W_{TH} 为利用涡轮特性求出的高压涡轮流量; W_{THC} 为利用流量连续求出的高压涡轮流量; W_{TL} 为利用涡轮特性求出的低压涡轮流量; W_{TLC} 为利用流量连续求出的低压涡轮流量; P_{15s} 为外涵出口静压, P_{5s} 为内涵出口静压; A_{8c} 为计算出的喷口喉道面积; A_8 为控制规律给出的喷口喉道面积。

当给定发动机的燃油流量和喷口面积后,在要求的进口条件下,给出发动机的猜测矢量,就可沿流程进行计算。直至残量 $E_i \leq \varepsilon$ (ε 为一小的正数) ($i = 1, 2, 3, 4$) 计算结束。

2.3 仿真程序流程

仿真程序的流程为:首先,输入计算入口参数(设计点数据、部件特性和发动机进口条件),计算设计点状态参数;其次,根据供油规律,确定猜测矢量 V ,进行发动机动态特性计算;最后,将仿真结果输入到文件 out.dat 中。

为了提高计算精度,同时加速程序收敛,本文选择了较小的计算步长 0.02 s。在进行仿真时,如计算平衡推、收油门,以前一次的计算结果作为下一次计算的试给值,若计算燃油阶跃或燃油突降时,依据稳态计算点的数据,利用插值函数为动态仿真计算提供入口试给值,以减少迭代次数。

3 结果与分析

本文对加速过程和减速过程两种典型的动态过程进行仿真,并与稳态程序计算结果相比较,并利用 MATLAB 语言对动态计算结果数据进行了分析处理,并绘图。图中,实线表示动态仿真结果曲线,虚线表示

稳态仿真结果曲线。

减速过程。燃油从 1.72 kg/s 下降到 0.26 kg/s, 发动机主要性能参数, 高、低压转子相对换算转速和燃烧室温度随时间的变化的计算曲线如图 1 ~ 图 3 所示。

加速过程。燃油从 0.26 kg/s 推油门增加供油量到 1.75 kg/s, 发动机主要性能参数, 高、低压转子相对换算转速和燃烧室温度随时间的变化的计算曲线如图 4 ~ 图 6 所示。

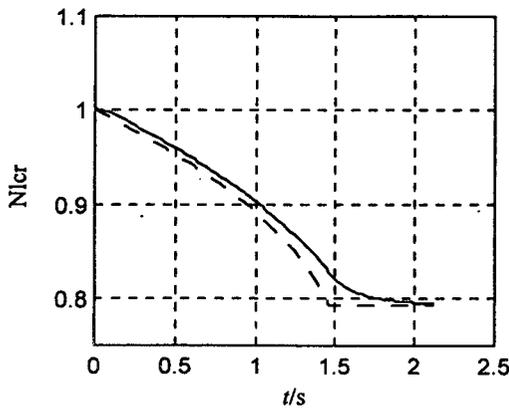


图1 低压转子相对换算转速

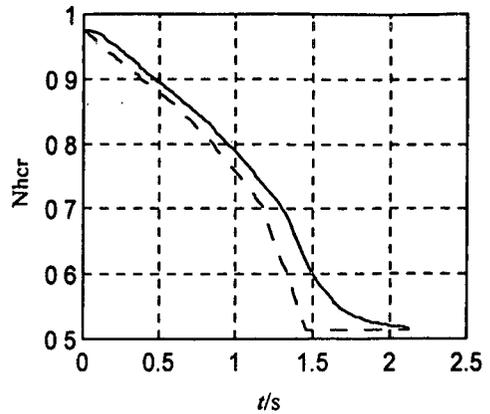


图2 高压转子相对换算转速

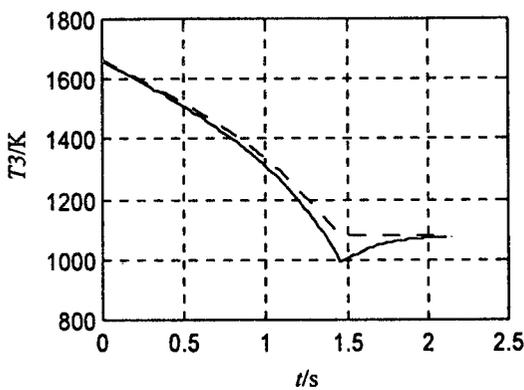


图3 燃烧室温度

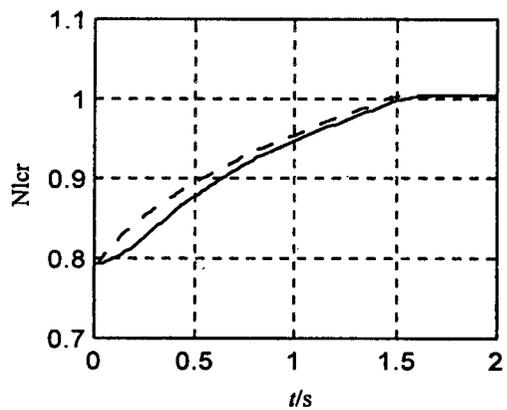


图4 低压转子相对换算转速

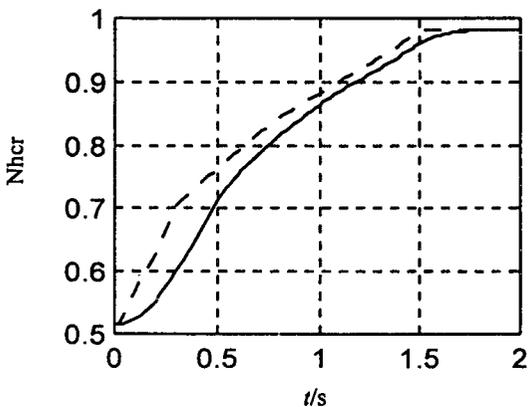


图5 高压转子相对换算转速

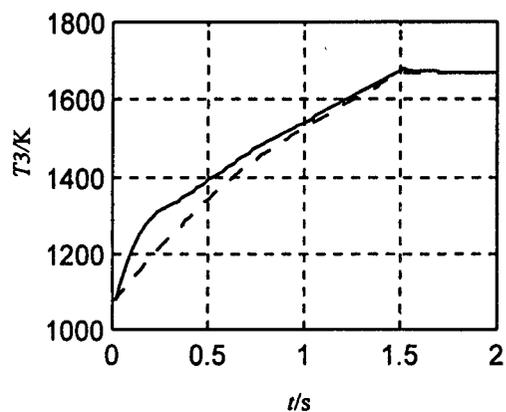


图6 燃烧室温度

从上述计算结果图表可以看出, 燃油阶跃或突降时, 发动机高、低压转子转速和推力平稳上升或下降, 无振荡现象, 燃烧室温度却出现了超调现象, 并最终达到稳定值, 该值与稳态计算值相吻合。这说明由于转子惯性的存在以及燃烧延迟的影响, 发动机高、低压转子转速不可能随着供油量的上升而迅速上升, 而是需要一定的延迟时间。燃烧室温度则不同, 它随着供油量的增加或减少, 迅速地升高或降低, 这是与实际物理过程相符合的。

4 结论及进一步工作

从仿真结果可以看出:

- 1) 本文所使用的建模方法是正确的,某型发动机动态模型是合理的;
- 2) 本文所编制的计算机仿真程序是正确的,能够满足一定的精度要求,为进一步研究该型发动机提供了有力工具;
- 3) 本文还有不少不完善的地方,如发动机特性精度不够。另外,本文还未对该型发动机的加力状态进行仿真研究,还有待于进一步完善。

参考文献:

- [1] James F Sellers, Carl J Daniele DYNGEN - A PROGRAM FOR CALCULATING STEADY - STATE AND TRANSIENT PERFORMANCE OF TURBOJET AND TURBOFAN ENGINES[R]. NASA TECHNICAL NOTE, NASA TN D - 7901, APRIL 1975.
- [2] 唐世建,李健民,王戈一. 涡扇发动机模型计算程序[A]. 第五届中印先进燃气涡轮技术学术会论文集[C]. 2000.
- [3] 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.

Simulating Research on Dynamic Character of Certain Aeroengine

JIANG Tao, WANG Jin, LI Ying - hong

(The Engineering Institute of the Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: According to thermodynamics theories, a dynamic model of a certain engine based on static model is set up. Inertia of rotators and cubage that result in unbalanced work and flow are fully taken into account. A simulating program of the dynamic model edited by C is worked out. The simulation results agree with practical operation. It is proved the verity of the dynamic model. Then a powerful tool is achieved to investigate such type of engines.

Keywords: aeroengine; dynamic model; transient performance; simulation