

非加力发动机加速过程数学模型简化法

沈阳航空发动机研究所 于维风* * 张绍基

一、发动机简化数学模型的建立

建立一个能够实时模拟航空发动机的数学模型, 在保证足够快速性的前提下, 首先要保留发动机内部最本质的物理关系, 其次要使模型直接逼近发动机特性。为使模型可以描述不同飞行状态下的稳态和过渡态特性, 在建立实时模型的过程中, 要运用发动机各状态下的相似参数。对双转子涡轮喷气发动机, 只考虑涡轮和压气机这一储能元件, 忽略部件间的容积和热惯性等动态因素。将双转子发动机看作两个相互关联的动力学过程, 其转速增量是剩余转矩的积分。以此为核心, 注意到在稳态情况下换算转速和换算供油量之间满足一定的函数关系, 根据文献 [1] 中的单转子发动机的数学模型, 结合对双转子发动机在各种状态下加速过程的分析, 同时考虑到双转子发动机的高、低压转子转差在不同状态下对发动机动态特性的影响, 提出如图 1 所示的数学模型。发动机过渡态的动态方程组如下:

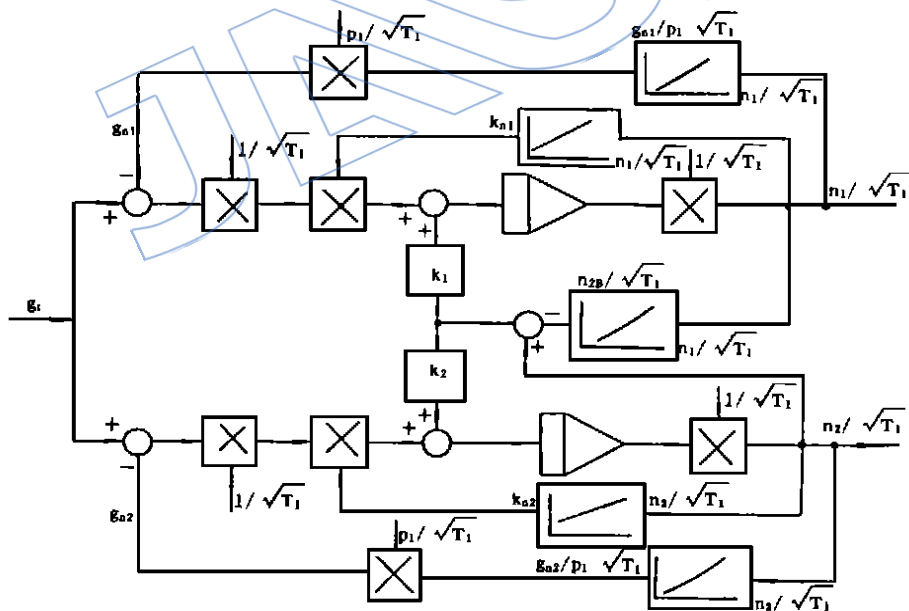


图 1 发动机简化模型方块图

$$\dot{n}_1 = (g_t - g_{n1})K_{n1} / \overline{T_1 + (n_2 - n_{2B})K_1 / \overline{T_1}} \quad (1)$$

$$\dot{n}_2 = (g_t - g_{n2})K_{n2} / \overline{T_1 + (n_2 - n_{2B})K_2 / \overline{T_1}} \quad (2)$$

式中, n_1 是低压压气机转速, n_2 是高压压气机转速, g_t 是燃油流量的给定值, g_{n1} 是由前次 n_1 经过插值后的燃油流量, g_{n2} 是由前次 n_2 经过插值后的燃油流量, n_{2B} 是由前次 n_1 经过插值后的高压转速, T_1 是发动机进口总温。除 g_t 外, 其它的 g 参数均由发动机稳态特性决定。 K 参数是发动机状态变量的函数, 它们与发动机小偏离动态模型的系统矩阵存在对应关系, 可以通过发动机非实时的精确模型求得。将 g 插值公式代入上式得:

$$\begin{aligned} \dot{n}_1 &= \frac{1}{T_1} \left[K_{n1} \left(g_t - g^k - \frac{g^{k+1} - g^k}{n_1^{k+1} - n_1^k} (n_1 - n_1^k) \right) + K_1 \left(n_2 - n_2^k - \frac{n_2^{k+1} - n_2^k}{n_1^{k+1} - n_1^k} (n_1 - n_1^k) \right) \right] \\ &= \frac{K_{n1}g_t - g_{n1}K_{n1}n_1 + K_{n1}g_{21} + K_1n_2 - n_{2n1}K_{n1}n_1 + K_1n_{21}}{\overline{T_1}} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{n}_2 &= \frac{1}{T_1} \left[K_{n2} \left(g_t - g^k - \frac{g^{k+1} - g^k}{n_2^{k+1} - n_2^k} (n_2 - n_2^k) \right) + K_2 \left(n_2 - n_2^k - \frac{n_2^{k+1} - n_2^k}{n_2^{k+1} - n_2^k} (n_2 - n_2^k) \right) \right] \\ &= \frac{K_{n2}g_t - g_{n2}K_{n2}n_2 + K_{n2}g_{22} + K_2n_2 - n_{2n1}K_{n2}n_1 + K_2n_{21}}{\overline{T_1}} \quad (4) \end{aligned}$$

在 (3)、(4) 式中, 由插值引起的各参数定义如下:

$$\begin{aligned} g_{n1k} &= \frac{g^{k+1} - g^k}{n_1^{k+1} - n_1^k}, \quad n_{21} = \frac{n_2^{k+1} - n_2^k}{n_1^{k+1} - n_1^k} \cdot n_1^k - n_2^k, \quad g_{n2k} = \frac{g^{k+1} - g^k}{n_2^{k+1} - n_2^k} \\ g_{21} &= \frac{g^{k+1} - g^k}{n_1^{k+1} - n_1^k} \cdot n_1^k - g^k, \quad g_{22} = \frac{g^{k+1} - g^k}{n_2^{k+1} - n_2^k} \cdot n_2^k - g^k, \quad n_{2n1k} = \frac{n_2^{k+1} - n_2^k}{n_1^{k+1} - n_1^k} \end{aligned}$$

由 (3)、(4) 式可见, 参数 g_{n1k} , g_{n2k} 分别是发动机稳态特性线上不同稳态点的增量比; 参数 n_{21} , g_{21} , g_{22} 分别是插值引起的常数; 这些参数随插值点从慢车状态到最大状态改变而改变, 从而使模型的状态也随之改变, 这就为模型的大偏离过程奠定了基础, 再适当地选取 K 参数, 即可使上述方程与发动机的工作过程良好地匹配。

二、影响发动机动态特性的参数及其物理意义

由 (3)、(4) 式可见, g 参数已由发动机的稳态工作特性线所决定, 它们均采用相似参数。在发动机从慢车状态到最大状态的加速过程中, 或发动机的状态发生变化时, g 参数保证了模型的大偏离过程终点不会偏离发动机的稳定工作状态, 它们在不同状态下的变化幅度很大, 对模型的精度和动态品质都起着重要的作用。 K 参数需由发动机的精确模型所得到的小偏离线性模型确定, 其值的选取对该模型的过渡态影响很大。

由于小偏离模型的系统矩阵随发动机工作状态改变, 因此, 为使模型具有较强的逼真度, 同时又考虑到实时要求, 选取 K 参数 K_{n1} , K_{n2} 为状态变量的函数形式, 即:

$$K_{n1} = f(n_1 / \overline{T_1}), \quad K_{n2} = f(n_2 / \overline{T_1})$$

其余的 K 参数可选取为状态变量的函数形式, 也可近似取为常数, 当然要保证模型的精度在所需的范围内。

在双转子系统中, K_1 , K_2 两参数反映了发动机高、低压转子间的气动联系, 若两者选取过大, 则高、低压回路的交链程度增强, 因此会造成模型失真, 并引起动态过程不稳定。 K_{n1} ,

K_{n2} 反映了供油量对过渡过程时间以及过渡态品质的影响,若两者选取过大,则引起系统过流量增大,模型的时间常数减小,甚至会使模型失稳。

三、模型参数的确定

在模型 (1)、(2) 式中, g 参数已由发动机稳态特性线唯一确定,只有 K 参数可由发动机的非线性精确模型或系统辨识所得到的发动机各状态下的小偏离线性方程系统矩阵求得。求取 K 参数的算法简便通用,只需求解一组线性方程组即可。

假设双转子发动机某状态下的小偏离状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{n}_1 \\ \dot{n}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \cdot g_t \quad (5)$$

对比 (3) 和 (4) 式,很容易得出下列方程

$$\left. \begin{aligned} \overline{K_{n1}} / \overline{T_1} &= \overline{b_1} & \overline{K_{n2}} / \overline{T_1} &= \overline{b_2} \\ \overline{K_1} / \overline{T_1} &= \overline{a_{12}} & - \overline{K_{2n2k}} / \overline{T_1} &= \overline{a_{21}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据 (6) 式可以求出不同状态下的 K_1 、 K_2 、 K_{n1} 、 K_{n2} , 最终拟合成近似曲线。在 (5) 式中的 a_{11} 和 a_{22} 两元素已经隐含在 $\overline{g_{n1}} / \overline{P_1} \quad \overline{T_1} = f(\overline{n_1} / \overline{T_1})$ 和 $\overline{g_{n2}} / \overline{P_1} \quad \overline{T_1} = f(\overline{n_2} / \overline{T_1})$ 两个插值项之中 (参见图 1 和 (3)、(4) 式)。用发动机稳态工作线上的小偏离动态参数代替加速线上的动态参数是本文简化模型的一种近似,但从精确模型的模拟结果表明,发动机的加速过程偏离稳态工作线并不远,因此这种近似足以达到满意的模拟精度。

将此模型应用于不同型号的发动机,只需将不同型号的发动机稳态特性线上各点的小偏离线性模型与 (3) 和 (4) 式相比较,即可通过 (6) 式得到该类发动机的大偏离模型的 K 系数。如果再将模型中的 $\overline{g_{n1}}$ 、 $\overline{g_{n2}}$ 、 $\overline{n_{2B}}$ 的插值曲线换成相应型号的发动机稳态特性曲线,则该实时模型就可以适用于相应型号的发动机。

四、结 论

运用本文提出的模型,对某型航空发动机进行动态模拟,模拟在 HH-AT 微机上进行,软件采用 C 语言编程,程序中使用长整型数运算,改善了精度,提高了快速性。仿真结果表明,简化模型能较准确地模拟真实发动机的稳态和动态过程,误差在 3% 以内,从采集数据到输出发动机的状态值,总处理时间约 18ms,完全可以满足采样周期为 20ms 的控制器实时要求。

该模型主要特点: (1) 将发动机的小偏离模型和稳态工作过程相结合,并保持结构不变,将模型的参数定义为发动机状态的函数,使模型对发动机的大范围工作状态具有良好的逼真度; (2) 模型的 K 系数确定方便,可通过解一组线性方程组求得; (3) 模型采用 C 语言编程,输入/输出简洁; (4) 不用迭代,运算速度快,实时性好; (5) 适用于发动机在整个飞行包线下的不同工作状态。可适用于不同型号的发动机; (6) 易于更换参数,易于扩展。

参 考 文 献

- [1] Harrison R. A. and Yates M. S., "Gas Turbine Fuel Control Systems for Unmanned Applications", ASME-87-GT-76, 1987.

FAILURE DETECTION OF ENGINE SENSORS WITH A BANK OF KALMAN FILTERS

Wang Shengyuan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A detection method is presented for sensor failures in FADEC engine. In order to avoid that the output of a fault sensor affects other system states through state feedback, we use a bank of Kalman filters in which different combinations of sensor outputs as inputs of the filters are fed to each filter. According to the characteristics of innovation sequences of each filter, the failure can be detected and isolated. The sample frequencies are different in feedback control path and computation of innovation sequences. When a failure has occurred in one sensor but before the failure affects other system states, the failure can be detected and isolated effectively. Therefore, the effects of failure on the outputs of other sensors are avoided. A digital simulation has been made for a rotational-speed and temperature control system of a twin-spool turbine engine. The simulation results show that this failure detection and isolation method is effective.

STUDY ON THE RELIABILITY EVALUATION OF ENGINE FUEL ACCESSORIES

Xue Jianhua, Ai Xianfeng, Liu Yiyu

(Xian Yuan Dong Machine Building Company)

ABSTRACT

Application of Bayes method to the reliability analysis of mechanical products is considered. The key to the application of Bayes statistics—selection of prior probability has been solved by means of comparison and discrimination. Bayes statistics is of universal significance for the reliability analysis of complicated mechanical products. Satisfactory results can be achieved if the proper selection of prior probability is made.

A SIMPLIFIED METHOD OF TRANSIENT MATHEMATICAL MODEL FOR NON-AUGMENTATION ENGINE

Yu Weifeng and Zhang Shaoji

(Shenyang Aeroengine Research Institute)

ABSTRACT

A simplified method of transient mathematical model for non-augmentation engine is presented, which is used in real-time simulation for developing engine control system. Two spool inertias are considered in the simplified model, which are the main factors for engine transient performance. The combination of engine steady characteristics with transient characteristics is used in the model. The simulation shows: (1) The model has better accuracy and fast operating speed. (2) The model has better flexibility, is easy to use in different engines. (3) The model is convenient for programming in C or FORTRAN language.