

# 某型航空发动机燃油调节器改型设计研究

葛树宏 樊 丁 彭 凯

(西北工业大学动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 航空推进系统仿真技术在发动机预研和型号研制中具有重要的作用。某型现役飞机飞行高度增加,需对其燃油调节器进行改型设计,而关于航空发动机燃油调节仿真的问题,大多数是以传递函数及插值表等形式来描述的,计算量大,物理意义不直观,仿真效果不明显。针对以上不足,在对某型发动机燃油调节器的组成、功能、工作原理进行了详细分析的基础上,以流量连续方程及力平衡方程为基础,结合 Adaptive Simpson 积分方法,基于 AMESim 仿真软件,采用图形化时域仿真建模方式建立了相关部件的数学模型,对其高空工作特性进行了仿真分析。结果表明,保证了发动机的正常工作,为燃油调节器的设计与改进提供了依据。

**关键词:** 燃油调节器; 改型; 建模; 仿真

**中图分类号:** V233; TP391.9 **文献标识码:** B

## Study on Remodel Design of Aero-engine Fuel Controller

GE Shu-hong, FAN Ding, PENG Kai

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

**ABSTRACT:** In the field of aviation propulsion system, simulation technologies are becoming more and more important in the processes of advanced research and model research project. As the plane flight level increases, the fuel controller needs to be modified. However, the aero-engine fuel regulating simulation is mostly expressed as transfer function and interpolation table. It needs large amount of calculation, the physical significance is ambiguous and the simulation results are inferior. In order to solve the above problems, on the basis of analysing the composing, functioning and operating principle of the aero-engine fuel controller in detail, and by utilizing flow continuous equation and force equilibrium equation, combining with Adaptive Simpson integration method, and using AMESim simulation software and schematize time domain simulation modeling methods, we set up the mathematical model and simulate the aloft working characteristics. The simulation results show that it can not only ensure the normal work of the aero-engine, but also provide the basis for design and improvement of the fuel controller.

**KEYWORDS:** Fuel controller; Modified; Modeling; Simulation

## 1 引言

由于装备某型双转子非加力涡轮风扇发动机的某型现役飞机飞行高度的增加,而装备在该型发动机上的机械液压燃油调节系统在高度增加时流量偏大,无法满足要求。为了沿用该型机械液压燃油调节系统,针对该型发动机提高其使用高度的需求,需要对发动机的机械液压燃油调节系统做出相应的改进。

文献[1][2]采用了数值计算和在 Matlab 的 Simulink 环境下进行仿真的方法对某型燃油调节器的高空适应性进行

了分析,并定性提出了改进建议,运算量大,仿真效果不明显,不能很好的满足工程实践要求。

本文主要分析了该型发动机燃油调节器的工作原理,建立了相关部件的数学模型,利用 AMESim 仿真软件,对其高空工作的适应性进行了深入分析。针对燃油柱塞泵调节器的最小流量范围向减小方向扩展的技术方案和技术途径进行了分析与研究,提出改进建议,取得了较好的效果。

## 2 某型燃油调节器工作原理及建模

### 2.1 组成和功能

该型发动机燃油调节器主要由流量可调的柱塞泵、等压差活门、定压活门、计量活门、最小流量修正器、 $n_2$  转速调节器、转速调节器给定组件、 $n_2$  物理转速传感器、加速控制器、

收稿日期: 2011-07-08 修回日期: 2011-11-15

自动启动控制器、发动机进口温度传感器、压气机出口压力传感器、防喘系统执行机构、压气机可调静叶调节器及操纵机构等组成。

该型燃油调节器主要是向主燃烧室提供具有一定压力与流量的燃油,采用了保持高压压气机转速不变,并根据发动机进口温度对希望转速量值进行修正的控制规律。在发动机启动过程中,调节器根据发动机进口压力( $P_H$ )及发动机压气机出口压力( $P_2$ )对启动燃油流量进行修正。根据发动机进口压力设定供给发动机的最小燃油流量。根据压气机换算转速调节其进口可调静叶角度以实现防止压气机喘振的目的;系统还具有转速超限保护等功能。

该型燃油调节器的工作原理:计量活门内套筒通过摇臂组件与随动活塞相连接,内套筒相对外衬套的转动由随动活塞来控制;计量活门流通面积由随动活塞控制,计量活门前后的压差由压差活门来保证,以实现燃油流量与随动活塞位置的一一对应关系。而随动活塞位置则由 $n_2$ 转速调节器、加速控制装置、最小流量修正器来控制; $n_2$ 转速调节器、加速控制装置通过调节随动活塞上腔的燃油压力 $P_M$ 来改变随动活塞的位移,当 $P_M$ 指定的燃油流量小于最小燃油流量修正器指定的燃油流量时,通过高选由最小燃油流量修正器通过制动器来改变随动活塞的位移,以保证最小燃油流量的量值。调节器工作原理如图1。

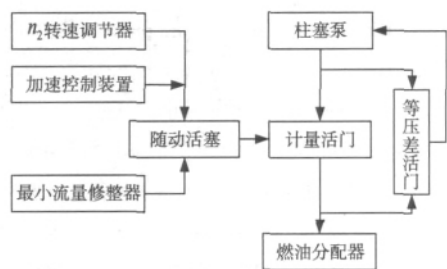


图1 某型发动机燃油流量调节工作原理图

## 2.2 主要部件数学模型

本文采用了AMESim仿真软件建立了该型发动机燃油调节器主要部件的数学模型。该软件是一种用于机械液压系统建模与仿真的软件,近年来在我国机械液压行业中得到广泛的应用<sup>[3]</sup>。该软件以完全图形化界面和积分算法自动选择为主要特色,当前,在航空发动机燃油调节系统建模仿真等研究领域越来越受到重视。

### 2.2.1 燃油柱塞泵

该型柱塞泵是流量可变的供油泵,它的作用是向主燃烧室和发动机自动控制系统提供具有一定压力与流量的燃油<sup>[4]</sup>。

忽略泵的容积效率、机械效率、液压冲击等因素,柱塞泵的供油量方程为

$$Q_T = \frac{\pi}{2} d_z^2 Z n \sin \theta \tan \varphi \quad (1)$$

式中, $Q_T$ 为柱塞泵理论供油量; $d_z$ 为柱塞直径; $Z$ 为柱塞个数; $n$ 为柱塞泵的转速; $\mu$ 为柱塞锥顶点到斜盘旋转轴线的距离; $\theta$ 为柱塞轴线与转子轴线的夹角; $\varphi$ 为斜盘倾角。

### 2.2.2 最小流量修正器

最小流量修正器的作用是保证通过计量活门供给发动机的最小燃油流量随发动机进口压力 $P_H$ 的变化而变化<sup>[5]</sup>。当发动机进口压力 $P_H$ 增大时,最小流量修正器中的气压修正膜盒被压缩,通过杠杆使滑套遮蔽最小流量修正器活塞上腔向低压腔的回油孔,导致最小流量修正器活塞上腔的燃油压力增大,推动制动器向下移动,限制随动活塞的上位移点,使供给发动机的最小燃油流量增大,在 $P_H$ 减小时,作用相反。

### 2.2.3 等压差活门

等压差活门通过改变柱塞泵斜盘的倾角,保持计量活门前后压差为定值。它由活门、弹簧和温度补偿片等组成。其工作过程为:当计量活门前后压差偏大时,将增大柱塞泵调节活塞弹簧腔控制油的回油量,减小柱塞泵斜盘角度,进而降低计量活门前后压差;当压差偏小时则反之。忽略库仑摩擦力、液流的瞬态液动力,则等压差活门阀芯的力平衡方程为:

$$p_{S1} A_d - p_{L1} A_L = M_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} + B \frac{dx_d}{dt} + K_d x_d + F_{\omega d} \quad (2)$$

式中, $p_{S1}$ 为活门前的压力(MPa); $p_{L1}$ 为活门后的压力(MPa); $A_d$ 为活门在高压腔侧的面积( $\text{cm}^2$ ); $A_L$ 为活门在低压腔侧的面积( $\text{cm}^2$ ); $M_d$ 为活门和弹簧的等效质量; $B$ 为粘性阻尼系数; $K_d$ 为调压弹簧刚度(N/cm); $x_d$ 为弹簧压缩量(cm); $F_{\omega d}$ 为稳态液动力(N)。

### 2.2.4 计量活门

在燃油调节器中,计量活门用来确定向发动机主燃烧室提供的燃油流量。计量活门的位移与流通面积一一对应,内套筒相对于衬套的转动可以改变计量活门的流通面积,从而改变供给发动机的燃油流量。

通过计量活门的燃油流量计算公式为:

$$Q_q = C_q A_q \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_L)} \quad (3)$$

式中, $Q_q$ 为通过计量活门的燃油流量(L/h); $p_s$ 为计量活门前燃油压力(bar); $p_L$ 为计量活门后燃油压力(bar); $A_q$ 为计量活门出油窗口面积( $\text{mm}^2$ ); $C_q$ 为计量活门窗口燃油流量系数; $\rho$ 为燃油密度。

式(3)中的流量系数 $C_q$ 的计算公式如式(4)所示。

$$C = C_m \tanh\left(\frac{2\lambda}{\lambda_{crit}}\right) \quad (4)$$

式中, $C_m$ 为最大流量系数; $\lambda$ 为流数; $D_h$ 为水力直径; $\eta$ 为运动粘性系数; $|\Delta p|$ 为压差; $\rho$ 为流体密度; $\lambda_{crit}$ 为流数临界值。

### 2.2.5 燃油分配器

该型燃油分配器根据控制器提供的占空比信号控制高速电磁阀的开启时间,从而改变燃油分配器的供油量,保证

发动机在各种状态下能正常工作<sup>[6]</sup>。在计算出主分配活门衬套型孔水力直径时,需要计算型孔的湿周长。为此,可在柱坐标中按照式(5),沿型孔边线进行弧长积分而求取湿周长。

$$C = \int_r ds = \int_r \sqrt{(R_i d\theta)^2 + (dz)^2} \quad (5)$$

对于主分配活门衬套型孔流通面积的计算,也可在柱坐标中对型孔进行曲面积分:

$$A = \iint_{\Omega} dA = \iint_{\Omega} R_i d\theta dz \quad (6)$$

在具体计算时,式(5)、(6)的计算主要在于积分域的确定。其中,包括圆角积分域的分段(以规避奇异点)、型孔投影拐点的确定等。积分时采用一维、二维 Adaptive Simpson 方法<sup>[7][8]</sup>。分配活门出油窗口的流通面积 A 及水力直径 dh 随其负重叠量的变化曲线如图 2。

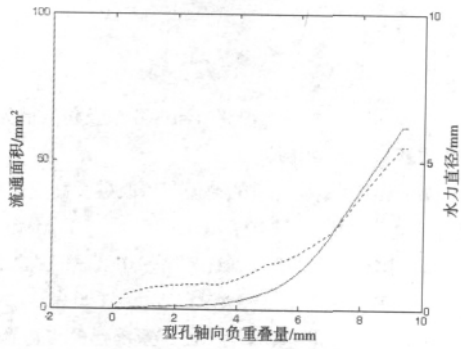


图 2 流通面积 A 及水力直径 dh 随其负重叠量的变化曲线

### 3 最小流量仿真分析

对前面所建的各子系统模型,按照技术要求、实物试验数据进行参数调整验算后,将其组合在一起,得到产生最小流量的燃油调节器数学模型。在某一飞行马赫数下,随着飞行高度增加,发动机在单位时间内所需的燃油量将减少。表 1 是不同高度下对发动机燃油调节器燃油流量  $G_{\min}$  的要求值。

表 1 最小流量要求值( $G_{\min}$  (kg/h))

$P_H$ (MPa)	要求值	实测值			
0.049	$280 \pm 10$	290	286	277	272
0.07	$310 \pm 10$	296	287	279	279
0.101	$340 \pm 10$	339	350	344	346

在表 1 中,第 2 列为给定  $P_H$  压力下  $G_{\min}$  的要求值,第 3 ~ 6 列为  $G_{\min}$  的实测值。在最小流量的实测实验中, $P_M$  取 0.4MPa(表压,相对地面气压),调节器处于最小流量状态。

从表 1 中可以看出  $P_H = 0.049\text{MPa}$ 、 $0.07\text{MPa}$  处的  $G_{\min}$  实测值相近,变化不大,表明在这两个压力点处最小流量修正器已止靠于调整钉上,随动活塞位移也处于上位移点,也就是说  $P_H$  从 0.049MPa 到 0.07MPa 变化时,计量活门内套筒

与外衬套几乎没有相对转动,所以通过修改计量活门型孔不能使  $G_{\min}$  在  $P_H = 0.049\text{MPa}$ 、 $0.07\text{MPa}$  两点处都满足要求。初步的判断是气压修正器膜盒对滑套的控制作用特性不满足要求。

当  $P_M$  为 0.4MPa(表压),调节调整钉使  $P_H = 0.101\text{MPa}$  时的  $G_{\min}$  为 340kg/h,仿真结果如图 3,实线表示  $G_{\min} = [280, 310, 340]\text{kg/h}$  所需的随动活塞位置关系,点划线表示在气压修正器膜盒控制下、 $P_H = [0.049, 0.07, 0.101]\text{MPa}$  时的随动活塞实际位置关系。可见随动活塞所需的位置与气压修正器膜盒控制的实际结果有差异: $G_{\min}$  从 280 ~ 340kg/h 所需的随动活塞位移量小于气压修正器膜盒控制下的随动活塞位移量。如果调节调整钉使  $P_H = 0.049\text{MPa}$  处的  $G_{\min}$  为 280 左右时,  $G_{\min}$  随  $P_H$  的变化关系曲线如图 4。

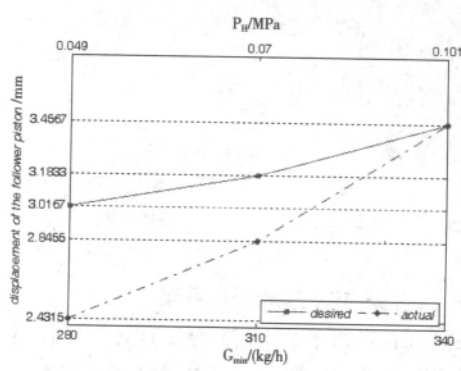


图 3 所需的随动活塞位置关系与气压膜盒控制下的随动活塞位置关系

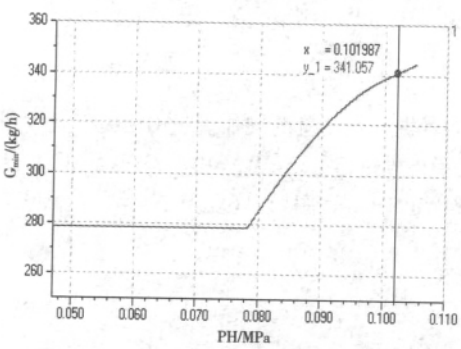


图 4  $G_{\min}$  随  $P_H$  的变化曲线(一)

上面的仿真结果表明,由于  $G_{\min}$  从 280 ~ 340kg/h 所需的随动活塞位移量小于气压修正器膜盒控制下的随动活塞位移量,导致了在现有的气压修正器控制下  $G_{\min}$  不能满足主机所提出的要求。

由图 3 可看出,  $G_{\min}$  从 280 ~ 340kg/h 所需的随动活塞位移量  $S1 \approx 0.44\text{mm}$ ,气压修正器膜盒控制下的随动活塞位移量  $S2 \approx 1.0252\text{mm}$ ,对应气压修正器膜盒工作位移为  $S3 \approx S2/2 = 0.5126\text{mm}$ ,而气压修正器膜盒与滑套之间的杠杆比

为 1: 2。因此,如果能使

① 气压修正器膜盒在绝对压力 100 ~ 2000mmHg 变化时,其工作位移(原位移为  $2.5 \pm 0.3\text{mm}$ ) 为  $2.5 * (S1 / S2) \approx 1.073\text{mm}$ ; 或

② 气压修正器膜盒与滑套之间的杠杆比调整为  $S3 / S1 \approx 1.165: 1$ ; 则  $G_{\min}$  随  $P_H$  的变化关系即可满足主机所提出的要求。

在①或②的条件下,可得  $G_{\min}$  随  $P_H$  的变化曲线如图 5。

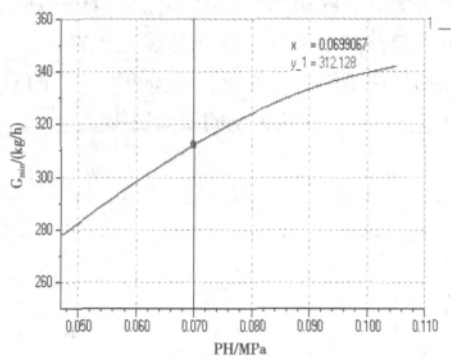


图 5  $G_{\min}$  随  $P_H$  的变化曲线(二)

针对上述两种技术措施分析可知:

措施①对应的气压修正器膜盒工作位移比较小,具体工程实践中可能会碰到加工精度难以实现的问题;

措施②比较容易实现。

如果气压修正器膜盒与滑套之间的杠杆比为 1: R,气压修正器膜盒在绝对压力 100 ~ 2000mmHg 变化时,其工作位移为 S,则①与②可用下式统一起来:

$$\frac{S1}{R} = \frac{S2}{2} \cdot \frac{S}{2.5\text{mm}} \quad (4)$$

下面对供给发动机的燃油流量  $G_{\min}$  关于发动机进口气压  $P_H$  的稳定性进行分析。 $P_H = 0.007\text{MPa}$  附近,  $G_{\min}$  关于  $P_H$  的奈奎斯特(Nyquist)图如图 6。

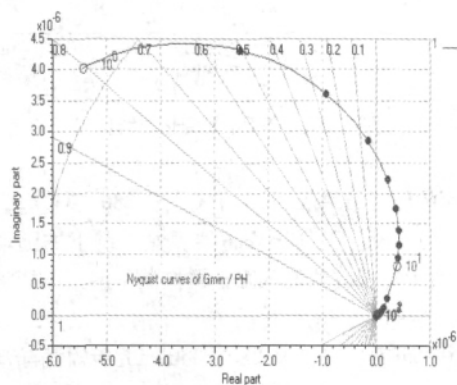


图 6  $P_H = 0.007\text{MPa}$  附近,  $G_{\min}$  关于  $P_H$  的 Nyquist 图

从图 6 可以看出:供给发动机的燃油流量  $G_{\min}$  对于发动机进口气压  $P_H$  扰动的响应,在低频段是超前的且基本上是线性相位,传递函数的前向增益较小。也即,供给发动机的燃油流量  $G_{\min}$  对于发动机进口气压  $P_H$  的小扰动不敏感,完全符合系统稳定性要求。

## 4 结论

根据某型涡扇发动机改型的需求,本文对发动机燃油调节器的结构、工作原理进行了分析,在此基础上通过图形化时域仿真建模方式建立了其组成部件的数学模型,最终获得发动机燃油调节系统数学模型。从拓展发动机使用高度的角度,对燃油调节器最小流量范围向进一步减小方向扩展的技术方案和技术途径进行了分析与研究,并提出了相应的改进建议。本文所提出的改进技术建议已应用于工程实践,并经高空台试验验证措施有效,在该型发动机上得到实际应用。

## 参考文献:

- [1] 马静,王镛根. 某导弹燃油调节器的建模及仿真研究[J]. 计算机仿真, 2003, 20(9): 35-38.
- [2] 苏三买. 某型涡扇发动机燃油调节器改进及高空适应性分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10).
- [3] 付永领,祁晓野. AMESim 系统建模和仿真——从入门到精通[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006-6.
- [4] 李永堂,雷步芳,高雨苗编著. 液压系统建模与仿真[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003-2.
- [5] 樊思齐,李华聪,樊丁. 航空发动机控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008-6.
- [6] 李吉. X6 发动机燃油调节器建模与仿真研究[D]. 西北工业大学, 2006.
- [7] Morteza Montazeri - Gh. Real - time multi - rate HIL simulation platform for evaluation of a jet engine fuel controller[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, March 2011, 19(3): 996-1006.
- [8] Prince, P Stewart. Development of a transient air fuel controller for an internal combustion engine[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, v 4, 1995: 3766-3771.

## [作者简介]



葛树宏(1982-),男(汉族),河北唐山人,硕士研究生,主要研究领域为航空推进系统控制研究。  
樊丁(1954-),男(汉族),陕西西安人,教授,博导,主要从事航空动力装置控制及仿真技术,计算机测控技术,最优研究方法研究。  
彭凯(1984-),男(汉族),陕西富平人,博士研究生,主要从事航空推进系统控制研究。