

# 某型涡轴发动机等压差活门建模分析

魏艳艳,王宏宇,缪万波

(中国人民解放军陆军航空兵学院,北京 101123)

**摘要:**考虑某型涡轴发动机燃油流量调节器通道截面的局部能量损失,推导出流经计量油针的燃油流量方程,在此基础上详细分析等压差活门的功用、结构组成及其工作原理,以连续方程和力平衡方程为基础,采用线性化处理方法,建立等压差活门的数学模型。通过分析等压差活门系统结构,得到等压差活门系统的传递函数,进而对其稳定性进行分析,计算单位阶跃输入的稳态误差。结果表明:以流量方程和力平衡方程为基础建立等压差活门数学模型的方法可行,分析出等压差活门稳定工作条件和稳态误差的主要影响因素,并且为燃油调节器数学模型的建立以及仿真计算奠定了基础。

**关键词:**燃油调节器;等压差活门;涡轴发动机;建模;稳定性

中图分类号:V235.12

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2014.04.014

## Analysis on Modeling of Constant Pressure Difference Valve for a Turboshaft Engine

WEI Yan-yan<sup>1</sup>, WANG Hong-yu<sup>1</sup>, MIAO Wan-bo<sup>1</sup>

(Army Aviation Institute, People's Liberation Army, Beijing 101123, China)

**Abstract:** Considering of local fuelline energy loss of fuelline section for a turboshaft engine fuel xegulator, the equation of fuel flow rate flowing through metering needle was derived. The function, structure and operation principle of the constant pressure difference valve were analyzed in detail. The model of the constant pressure difference valve was constructed base on the continuity equation and equilibrium equation, and the linearization method. The transfer function of the constant pressure difference valve system was obtained, its stability was analyzed, and the steady state error of step input was calculated by analyzing the system structure of the constant pressure difference valve. The results show that the modeling method which is based on continuity equation and equilibrium equation is feasible, and the stable operation condition and steady state errors are the main influence factors. The model of the constant pressure difference valve provides the base for constructing the fuel regulator model and simulation calculation.

**Key words:** fuel regulator; constant pressure difference valve; turboshaft engine; model; stability

## 0 引言

某型涡轴发动机主要是直九系列直升机的动力装置。燃油系统是涡轴发动机重要的工作系统,其工作是否正常,直接影响发动机以及直升机的可靠性和安全性。燃油调节器作为燃油系统的核心附件,实现发动机各种状态供油量的调节,目前航空发动机燃油调节器数字化要求提高,建立燃油调节器的数学模型尤为重要<sup>[1-2]</sup>。

在燃油调节器中用于对通往燃烧室的燃油流量

直接进行调节的最基本的调节器是流量调节器,其中为了保证燃油计量油针前后压差恒定,设置有等压差活门,等压差活门作为燃油调节器中1个组件,是燃油调节器数学模型的基础。

本文在分析等压差活门的结构以及工作原理的基础上,以连续方程和力平衡方程为切入点,采用线性化处理方法<sup>[3]</sup>,建立等压差活门的简易数学模型,并对等压差活门系统的稳定性进行了分析,为燃油调节器数学模型的建立奠定了基础。

收稿日期:2013-05-09

作者简介:魏艳艳(1983),女,硕士,讲师,研究方向为飞行器设计;E-mail:yanyan\_worldmap@126.com。

引用格式:魏艳艳,王宏宇,缪万波.某型涡轴发动机等压差活门建模分析[J].航空发动机,2014,40(4):75-78. WEI Yanyan, WANG Hongyu, MIAO Wanbo. Analysis on modeling of constant pressure difference valve for a turboshaft engine[J]. Aeroengine, 2014, 40(4): 75-78.

## 1 等压差活门

### 1.1 等压差活门的功用

燃油流量调节的基本原理如图1所示。计量油针的左端受燃油调节器内其他调节器控制,另一端与节流孔板配合控制着燃油的流通面积,进而控制通往燃烧室的燃油流量。

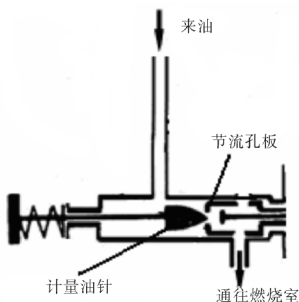


图1 燃油流量调节原理

根据伯努利方程,考虑计量油针与节流孔板形成的锥形阀口,即燃油通道截面的局部能量损失<sup>[4-5]</sup>,可计算出流经计量油针的燃油流量为

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为通往燃烧室的燃油流量; $C_d$ 为燃油通道的流量系数; $A$ 为燃油通道截面积; $\Delta P$ 为计量油针前后的油压差; $\rho$ 为燃油密度。

在结构一定、燃油种类确定的情况下,忽略温度变化对燃油流量的影响,上式中燃油通道的流量系数 $C_d$ 和燃油密度 $\rho$ 可近似为常数,则发动机的供油量仅取决于燃油通道截面积 $A$ 和计量油针前后的油压差 $\Delta P$ ,但同时改变这2个参数控制供油量,调节过程将非常复杂,而如果保证计量油针前后油压差 $\Delta P$ 恒定,那么供油量仅是燃油通道截面积的单值函数,可以通过改变计量油针的位置来改变燃油通道截面积,从而调节发动机的供油量。

等压差活门的作用就是保持计量油针前、后油压差 $\Delta P$ 基本不变,对于该型发动机,等压差活门保持计量油针前、后油压差 $\Delta P \approx 0.02 \text{ MPa}$ 。

### 1.2 等压差活门的结构及工作原理

等压差活门的结构主要由锥形活门、薄膜及弹簧等组成,如图2所示。

等压差活门与燃油计量装置的原理如图3所示。

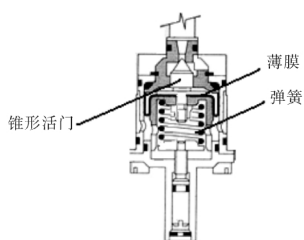


图2 等压差活门结构

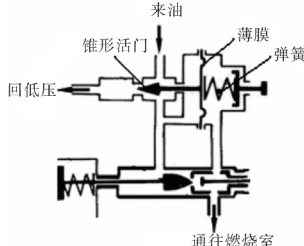


图3 等压差活门原理

等压差活门薄膜左边控制来油的油压,即计量油针前的燃油压力 $P_{\text{front}}$ , $A$ 为薄膜与燃油的接触面积;薄膜的右边作用着设定好的弹簧力和计量油针后的燃油压力 $P_{\text{behind}}$ ,薄膜在两侧力的共同作用下控制着锥形活门的位置,进而控制返回低压的燃油流量。

当发动机处于稳定工作状态下,燃油计量油针位置一定,等压差活门中薄膜处于中立位置,薄膜前、后燃油压力差与调定的弹簧力相等,即

$$(P_{\text{front}} - P_{\text{behind}}) \cdot A = \Delta P \cdot A = F_s \quad (2)$$

当燃油计量油针前、后的油压差 $\Delta P$ 减小时,薄膜向左弯曲,锥形活门左移,关小回油路。在来油流量不变的情况下,由于回油量减少,因此通往计量油针的供油量增加,使计量油针前、后压差 $\Delta P$ 增大,直至薄膜回复中立位置,此时燃油计量油针前、后压力差仍与调定的弹簧力相等。

反之,当计量油针前、后油压差 $\Delta P$ 增大时,调节过程与上述相反,调节结构使 $\Delta P$ 减小,直至薄膜回复中立位置,燃油计量油针前、后压力差与调定的弹簧力相等。

## 2 等压差活门的数学模型及传递函数

### 2.1 等压差活门数学模型

从图2中可见,设等压差活门的进油腔的燃油流量为 $Q_j$ ,通过锥形活门回到低压的燃油流量为 $Q_h$ ,由薄膜变形造成的流量变化为 $Q_b$ ,燃油本身的压缩性造成的流量变化为 $Q_y$ ,锥形活门与弹簧座之间泄漏的燃油流量为 $Q_l$ 。

由连续方程可得

$$Q_j = Q_h + Q_b + Q_y + Q_l \quad (3)$$

燃油通过等压差活门中的锥形活门回油,则

$$Q_h = C_d A_d \sqrt{\frac{2(P_s - P_l)}{\rho}} \quad (4)$$

式中: $C_d$ 为等压差活门回油通道的流量系数; $A_d$ 为等压差活门回油通道截面积; $P_s$ 、 $P_l$ 分别为经过锥形活门前、后燃油压力,且 $P_s = P_{\text{front}}$ ; $\rho$ 为燃油密度。

等压差活门锥形活门回油通道截面积为

$$A_d = \pi(d - x_d \cos \alpha \sin \alpha) x_d \sin \alpha \approx \pi d x_d \sin \alpha \quad (5)$$

式中: $d$ 为回油管路直径; $x_d$ 为锥形活门的开度; $\alpha$ 为锥形活门圆锥顶角,如图4所示。

由于薄膜变形造成的流量变化为

$$Q_b = A \frac{dx_d}{dt} \quad (6)$$

由于燃油压缩性造成的流量变化为

$$Q_v = \frac{V}{E} \cdot \frac{dP_s}{dt} \quad (7)$$

式中:  $V$  为等压差活门进油腔容积;  $E$  为燃油体积弹性模量。

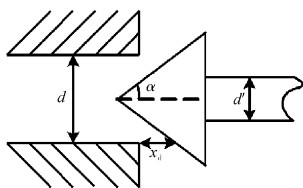


图4 锥形活门

由锥形活门与弹簧座之间泄漏的燃油流量为

$$Q_l = \frac{\pi d^3 h^3}{12 \mu l} \Delta P \quad (8)$$

式中:  $d$  为锥形活门杆直径;  $h$  为锥形活门杆与弹簧座之间间隙距离;  $\mu$  为燃油的动力黏性系数;  $l$  为锥形活门杆与弹簧座接触面长度。

由于燃油泄漏量与泄漏缝隙的3次方成正比,因此在泄漏缝隙很小的情况下,  $Q_l$  为小量,考虑到等压差活门的实际结构,锥形活门杆与弹簧座之间的间隙非常小,故  $Q_l$  可忽略不计<sup>[6-14]</sup>。

综上所述,等压差进油腔的流量方程为

$$Q_i = C_d \pi d x_d \sin \alpha \sqrt{\frac{2(P_s - P_i)}{\rho}} + A \frac{dx_d}{dt} + \frac{V}{E} \cdot \frac{dP_s}{dt} \quad (9)$$

设等压差活门出口压力为零,即锥形活门后燃油压力  $P_i$  为零,对式(9)进行线性化处理,可得

$$\Delta Q_i = C_d \pi d \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{s0}}{\rho}} \cdot \Delta x_{d0} + A \frac{d\Delta x_d}{dt} + \frac{V}{E} \cdot \frac{d\Delta P_s}{dt} + \frac{1}{2} C_d \pi d x_{d0} \sin \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho P_{s0}}} \cdot \Delta P \quad (10)$$

式中:  $P_{s0}$  为稳定工作状态流经锥形活门前燃油压力;  $x_{d0}$  为稳定工作状态锥形活门的开度。

对式(10)进行拉普拉斯变换可得

$$Q_i(s) = (As + B_1)X_d(s) + \left( \frac{V}{E}s + B_2 \right)P_s(s) \quad (11)$$

其中

$$B_1 = C_d \pi d \sin \alpha \sqrt{\frac{2P_{s0}}{\rho}}; B_2 = \frac{1}{2} C_d \pi d x_{d0} \sin \alpha \sqrt{\frac{2}{\rho P_{s0}}}$$

式(11)描述了进入等压差活门的燃油流量  $Q_i$  与计量油针前燃油压力  $P_s$ , 锥形活门的位移  $x_d$  之间的关系。

以等压差活门中的薄膜为研究对象,分析其受力情况,可得力平衡方程为

$$P_s A - P_{\text{behind}} A = m \frac{d^2 x_d}{dt^2} + K(x_d + x_0) \quad (12)$$

式中:  $m$  为活门、薄膜及弹簧的等效质量;  $K$  为弹簧的弹性系数;  $x_0$  为等压差活门弹簧的预设压缩量。

对式(12)进行线性化处理,可得

$$\Delta P_s A - \Delta P_{\text{behind}} A = m \frac{d^2 \Delta x_d}{dt^2} + K \Delta x_d \quad (13)$$

对式(13)进行拉普拉斯变换,可得

$$P_s(s)A - P_{\text{behind}}(s)A = (ms^2 + K)X_d(s) \quad (14)$$

式(14)描述了等压差活门薄膜前、后压强,即计量油针前、后压强与锥形活门位移之间的关系。

## 2.2 等压差活门系统结构图及传递函数

设等压差活门进油腔燃油流量  $Q_i$  为输入量,计量油针前、后的燃油压力  $P_s$ 、 $P_{\text{behind}}$  分别为输出量和干扰量,综合式(11)、(14),可得等压差活门系统结构,如图5所示。

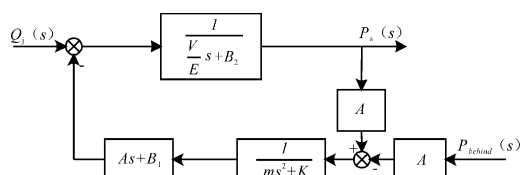


图5 等压差活门系统结构

若薄膜后燃油压力没有变化,以薄膜前燃油压力  $P_s(s)$  为输出量,等压差活门的进油量  $Q_i(s)$  为输入量,则传递函数为

$$G_Q(s) = P_s(s)/Q_i(s) = (Ems^2 + EK)/B_3 \quad (15)$$

其中

$$B_3 = mVs^3 + mB_2Es^2(A^2E + KV)s + AEB_1 + KB_2E$$

若流入等压差活门的燃油流量没有变化,以薄膜前燃油压力  $P_s(s)$  为输出量,薄膜后燃油压力  $P_{\text{behind}}(s)$  为输入量,则传递函数为

$$G_P(s) = P_s(s)/P_{\text{behind}}(s) = (EA^2s + EAB_1)/B_3 \quad (16)$$

## 3 等压差活门系统稳定性分析

### 3.1 稳定性分析

当进油量  $Q_i(s)$  为输入量,薄膜前燃油压力  $P_s(s)$  为输出量,由式(15)可得系统的特征方程为

$$D(s) = mVs^3 + mB_2Es^2 + (A^2E + KV)s + AEB_1 + KB_2E = a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3 \quad (17)$$

根据劳斯稳定判据,若  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  均大于零,且  $a_1a_2 - a_0a_3 > 0$ ,则等压差活门的工作稳定<sup>[15]</sup>。将已知物理量带入可得等压差活门稳定工作条件为

$$AEB_2 - B_1V > 0 \quad (18)$$

当薄膜前、后燃油压力  $P_s(s)$ 、 $P_{\text{behind}}(s)$  分别为输出量、输入量时,由式(16)可知传递函数的特征方程

与式(17)相同,故分析结论同上。

### 3.2 稳态误差

根据拉普拉斯变换的终值定理,可得稳态误差为

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1+G_0(s)} \quad (19)$$

式中:  $G_0(s)$  为等压差活门系统开环传递函数。

对于单位阶跃输入,当  $P_{\text{behind}}(s)=0$  时,系统稳态误差为

$$e_{ssQ} = \frac{1}{1+G_{Q0}(0)} = \frac{KB_2}{KB_2+AB_1} \quad (20)$$

对于单位阶跃输入,当  $Q_i(s)=0$  时,系统稳态误差为

$$e_{ssQ} = \frac{1}{1+G_{P0}(0)} = \frac{AKB_2}{KB_2+AB_1} \quad (21)$$

## 4 结束语

本文主要对某型涡轴发动机燃油调节器中的等压差活门的功用、组成及工作原理进行详细论述,建立了等压差活门的数学模型,通过数学模型对等压差活门系统的稳定性进行分析,计算了单位阶跃输入时的稳态误差,证明了以流量方程和受力平衡方程为基础,采用线性化的处理方法建立等压差活门的数学模型的可行性,在燃油调节器中类似的元件均可采用该方法建立数学模型,为各型涡轴发动机燃油调节器模型的建立奠定了一定的理论基础。

在进一步的研究工作中,可对燃调中的其他液压结构进行数学建模,并通过调研获取相关结构及燃油参数,进行仿真计算。

### 参考文献:

- [1] 朱迪. WZ-8 系列发动机构造 [M]. 北京: 陆军航空兵学院, 2010: 78-79.  
ZHU Di. Structure of WZ-8 turboshaft engine [M]. Beijing: Army Aviation Institute, 2010: 78-79. (in Chinese)
- [2] 王正生, 刘翔. 涡轴八发动机的发展问题研究 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(2): 14-15.  
WANG Zhengsheng, LIU Xiang. The development and research of WZ-8 engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2003, 16(2): 14-15. (in Chinese)
- [3] 陈云, 张天宏. 仿真技术在航空推进控制系统中的应用[J]. 航空发动机, 2006, 32(3): 39-41.  
CHEN Yun, ZHANG Tianhong. Application of simulation technology in aeropropulsion control system [J]. Aeroengine, 2006, 32(3): 39-41. (in Chinese)
- [4] 沈兴全. 液压传动与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 30-41.
- SHEN Xingquan. Fluid drive and control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 30-41. (in Chinese)
- [5] 李成功, 和彦森. 液压系统建模与仿真分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008: 2-11.  
LI Chenggong, HE Yanmiao. Modeling and simulation analysis of hydraulic system [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008: 2-11. (in Chinese)
- [6] 曾德堂, 王曦, 覃道亮. 燃油计量装置回油型面特性分析[J]. 航空发动机, 2010, 36(6): 22-25.  
ZENG Detang, WANG Xi, QIN Daoliang. Fuel scavenger contour performance analysis of fuel metering devices [J]. Aero-engine, 2010, 36(6): 22-25. (in Chinese)
- [7] 谢小平, 张学军, 贺孝涛. 某型航空发动机燃油流量调节器建模与故障仿真[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 15-18.  
XIE Xiaoping, ZHANG Xuejun, HE Xiaotao. Modeling and fault simulation of an aeroengine fuel regulator [J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 15-18. (in Chinese)
- [8] 冯海峰, 樊丁. 某型航空涡轴发动机燃油调节器建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(12): 45-46.  
FENG Haifeng, FAN Ding. Modeling and simulation of a turboshaft aeroengine controller [J]. Computer Simulation, 2007, 24(12): 45-46. (in Chinese)
- [9] 马静. 某型燃油调节器的建模和仿真[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.  
MA Jing. Modeling and simulation of an aeroengine fuel regulator [D]. Xi'an: North Western Polytechnic University, 2002. (in Chinese)
- [10] 李吉. X6 发动机燃油调节器建模和仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
LI Ji. Modeling and simulation of X6 aeroengine fuel regulator [D]. Xi'an: North Western Polytechnic University, 2006. (in Chinese)
- [11] 陈宏亮. X-8 航空发动机燃油调节系统建模仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
CHEN Hongliang. Modeling and simulation of X-8 aero-engine fuel regulating system [D]. Xi'an: North Western Polytechnic University, 2006. (in Chinese)
- [12] 葛树宏, 樊丁, 彭凯. 某型航空发动机燃油调节器改型设计研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 81-82.  
GE Shuhong, FAN Ding, PENG Kai. Study on remodel design of aeroengine fuel control [J]. Computer Simulation, 2012, 29(8): 81-82. (in Chinese)
- [13] 马静, 王镛根. 某型导弹燃油调节器的建模及仿真研究[J]. 计算机仿真, 2003, 20(9): 35-37.  
MA Jing, WANG Yonggen. Research on modeling and simulation of the fuel control system of certain missile [J]. Computer Simulation, 2003, 20(9): 35-37. (in Chinese)
- [14] 曾德堂, 赵威力, 王曦. 回油型面结构对计量装置特性影响研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(1): 41-42.  
ZENG Detang, ZHAO Weili, WANG Xi. Effects of fuel returned shape on metering devices characteristics [J]. Aero-engine, 2012, 38(1): 41-42. (in Chinese)
- [15] 戴忠达. 自动控制理论基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 17-23, 113-118.  
DAI Zhongda. Automatic control theory [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 17-23, 113-118. (in Chinese)