

# 航空发动机燃油计量装置稳定性分析

陈昭阳<sup>1</sup>,肖玲斐<sup>1</sup>,叶志锋<sup>1</sup>,胡文佳<sup>2</sup>,吴忠敏<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016;

2. 中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司,贵州 贵阳 550025)

**摘要:**燃油计量装置是航空发动机控制系统的重要组成部分,其输出稳定性直接关系到发动机转速控制性能。建立燃油计量装置的力平衡方程和流量连续性方程,在 MATLAB 中建立其仿真模型,对所列方程进行线性化处理,分别应用特征方程根轨迹以及基于李雅普诺夫函数和遗传算法的多参数稳定性设计方法,分析主要物理参数对燃油计量装置稳定性的影响。研究发现,节流孔  $a_6$  是对稳定性有重要影响的参数,且当前设计值(孔面积)处于不合理的区域;适当增大弹簧刚度  $k_d$ 、 $k_z$  和节流孔  $a_5$ 、 $a_7$  的面积,能够改善稳定性,但不建议增大太多,因为会增大稳态误差及导致回油流量损失。

**关键词:**航空发动机;燃油计量;稳定性分析;李雅普诺夫;遗传算法

**中图分类号:**V233.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0052-05

## Stability Analysis of Aeroengine Fuel Metering Device

CHEN Zhaoyang<sup>1</sup>, XIAO Lingfei<sup>1</sup>, YE Zhifeng<sup>1</sup>, HU Wenjia<sup>2</sup>, WU Zhongmin<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Guizhou Honglin Aviation Power Control Technology Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

**Abstract:** As an important part of aeroengine control system, the output stability of fuel metering device is directly related to the engine speed control performance. The force balance equation and flow continuity equation of the fuel metering device are established, and its simulation model is built in MATLAB. The equations are linearized. The root locus of the characteristic equation and the multi-parameter stability design method based on Lyapunov function and genetic algorithm are adopted to analyze the influence of the main physical parameters on the stability of the fuel metering device. It is found that the orifice  $a_6$  is the parameter that has important influence on the stability, and the current design value (orifice area) is in an inappropriate range. Proper increase of the spring stiffness  $k_d$ ,  $k_z$  and the area of the orifice  $a_5$ ,  $a_7$  can improve the stability, but excessive increase is not recommended to avoid increasing steady-state errors and the loss of return oil flow.

**Keywords:** aeroengine; fuel metering; stability analysis; Lyapunov; genetic algorithm

## 0 引言

尽管航空发动机控制系统逐渐由液压机机械式控制发展为全权限数字电子控制,但是燃油计量装置仍然是控制系统中不可或缺的重要组成部分。燃油计量装置本身可以视为一个小闭环系统,其内部零部件较多,结构参数设计过程复杂<sup>[1-2]</sup>。事实上,我国长期以来对发动机燃油计量装置的研发以仿制为主,缺少理论分析,在新型航空发动机控制系统的研发过程中出现了因燃油计量装置输出流量不稳定而引起的发动机转速波动,影响了发动机的控制性能。

国内的研究人员一般通过在 AMESim 中建立仿真模型来对燃油计量装置进行研究。余玲等对燃油计量装置进行 AMESim 建模,通过仿真得到了燃油计量装置的稳态及动态特性,并研究了燃油计量装置的主要结构参数对其

稳态及动态特性的影响<sup>[3]</sup>;周立峰基于 AMESim 建立了燃油计量装置的模型,分析了燃油计量装置所面临的三种典型工况,通过仿真得到这三种工况下燃油计量装置的稳态及动态特性,并构建了燃油计量装置试验系统,通过试验验证了模型的准确性和仿真结果的可信度<sup>[4]</sup>;李洪胜等研究了某型发动机燃油计量装置压差控制器的性能,分析并推导出其影响控制压差能力的主要因素,通过 AMESim 仿真实验验证了所得结论的正确性。在此基础上对其进行合理的改型,为保证改型不影响系统的性能,用小偏差原理对改型前后的压差控制器辨识,得到传递函数,确保改型并未损失其动态性能,最终得到改进压差控制器压差能力的理论依据<sup>[5]</sup>。

目前尚没有看到关于燃油计量装置稳定性的研究,当相关参数不合理的时候,就可能导致燃油控制精度低、输出不稳定等问题。由于在 AMESim 中建立的仿真模型只能用于分析燃油计量装置的稳态及动态性能,不易进行关

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51876089)

**第一作者简介:**陈昭阳(1996—),男,江苏昆山人,硕士研究生,研究方向为航空发动机系统仿真与控制。

于稳定性的研究。因此,本文通过建立燃油计量装置的力平衡方程、流量连续性方程,并在 MATLAB 中建立其仿真模型。为了分析燃油计量装置的稳定性,对所列方程进行线性化处理,之后分别应用特征方程根轨迹以及基于李雅普诺夫函数和遗传算法的多参数稳定性设计方法,分析了主要物理参数对燃油计量装置稳定性的影响。

## 1 燃油计量装置工作原理

某型发动机研制的燃油计量装置主要由电液伺服阀、带位移传感器的计量活门、等压差活门、执行活门以及一系列节流孔、弹簧构成,工作原理如图 1 所示(未绘出伺服阀及传感器)。

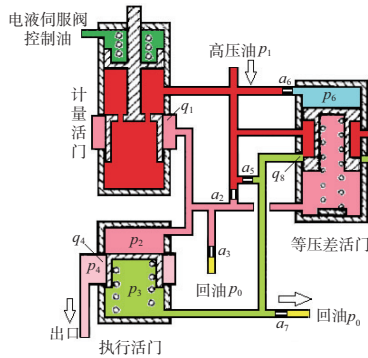


图 1 燃油计量装置原理图

计量活门的主要作用是通过调节计量活门窗口的开度来控制发动机燃油量,计量活门出口的流量可用如下公式计算:

$$q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\rho}} \quad (1)$$

式中: $C_d$ 为流量系数; $A$ 为计量活门开口面积(由计量活门位移  $x_j$  决定); $\Delta p_1$ 为计量前后的压差; $\rho$ 为燃油密度。根据公式,若保持  $\Delta p_1$  为常数,则流量仅与阀芯位移  $x_j$  有关。

等压差活门的两端分别与计量活门前后的油压相通,它的作用是感受压差变化,根据两端的压差,等压差活门阀芯产生相应的位移,从而改变等压差活门节流口的面积,控制执行活门下腔的压力,使得执行活门的阀芯产生相应的位移,从而改变执行活门节流口的开口面积,进而控制中腔也就是计量后的压力,最终保持计量活门前后的压差不变。所以燃油计量装置本质上是压差闭环控制,其稳态、动态特性及输出稳定性主要取决于弹簧、节流孔等参数。

## 2 建模与仿真

由于伺服阀位置环的动态响应非常快,故忽略其动态特性。根据燃油计量装置的工作原理,建立等压差活门、执行活门的力平衡方程及各节流口流量连续性方程<sup>[6-7]</sup>:

$$-k_d x_d - f_{y_d} + a_d (p_6 - p_2) = m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} + b_d \cdot \frac{dx_d}{dt} \quad (2)$$

$$-k_z x_z + f_{y_z} - a_z (p_2 - p_3) = m_z \frac{d^2 x_z}{dt^2} + b_z \cdot \frac{dx_z}{dt} \quad (3)$$

$$q_1 - q_4 - q_3 + q_2 + a_d \frac{dx_d}{dt} = c_z (p_2 - p_3) + \frac{v_2}{\beta_e} \cdot \frac{dp_2}{dt} \quad (4)$$

$$q_5 + q_8 - q_7 = -c_z (p_2 - p_3) + \frac{v_3}{\beta_e} \cdot \frac{dp_3}{dt} \quad (5)$$

$$q_6 - a_d \frac{dx_d}{dt} = \frac{v_6}{\beta_e} \cdot \frac{dp_6}{dt} \quad (6)$$

$$q_i = \mu A_i \sqrt{\frac{2\Delta p_i}{\rho}} \quad (i=1 \sim 8) \quad (7)$$

式中: $x$ 、 $p$ 、 $q$  分别为位移、压力和节流口(孔) $i$  的流量; $k$ 、 $f_y$ 、 $a(A)$ 、 $m$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $v$ 、 $\beta_e$  分别为弹簧刚度、预压缩弹簧力、面积、质量、阻尼、泄漏系数、容积、有效体积弹性模量,下标  $d$ 、 $z$  分别表示等压差活门和执行活门。

考虑最不稳定高压大流量的工况,在额定稳态工作点,用泰勒级数展开的方法,对各个节流口的流量表达式进行小偏差线性化处理,然后代入力平衡方程与流量连续性方程中,为了简单起见,仍用变量本身表示它们在某一稳态点的增量:

$$-k_d x_d + a_d (p_6 - p_2) = m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} + b_d \frac{dx_d}{dt} \quad (8)$$

$$-k_z x_z - a_z (p_2 - p_3) = m_z \frac{d^2 x_z}{dt^2} + b_z \frac{dx_z}{dt} \quad (9)$$

$$K_{z4} x_z + (K_{p1} + K_{p2}) p_1 - (K_{p1} + K_{p2} + K_{p3} + K_{p4} + c_z) p_2 + c_z p_3 + K_{p4} p_4 + a_d \frac{dx_d}{dt} = \frac{v_2}{\beta_e} \cdot \frac{dp_2}{dt} \quad (10)$$

$$K_{d8} x_d + (K_{p5} + K_{p8}) p_1 + c_z p_2 - (K_{p5} + K_{p7} + K_{p8} + c_z) p_3 = \frac{v_3}{\beta_e} \cdot \frac{dp_3}{dt} \quad (11)$$

$$K_{p6} (p_1 - p_6) - a_d \frac{dx_d}{dt} = \frac{v_6}{\beta_e} \cdot \frac{dp_6}{dt} \quad (12)$$

式中: $K_{z4}$ 、 $K_{d8}$  分别为可变节流口 4、8 的流量增益,由于其他节流装置均为固定节流孔,所以其流量增益近似为常数; $K_{pi}$  为节流口  $i$  的流量-压力系数( $i=1 \sim 8$ ),具体的数值由式(2)-式(7)中的相关系数计算得出。

为了验证方程线性化的动态精度,在计量活门位移  $x_j$  为 9 mm、进口压力为 9 MPa、出口压力为 7 MPa 的稳态工作点,给计量活门位移加一个  $\Delta x_j = 0.1$  mm 的阶跃信号,用 MATLAB 进行仿真,比较方程线性化前后计量装置输出流量  $q_4$ 、等压差活门位移  $x_d$  的参数阶跃响应,结果如图 2 所示。

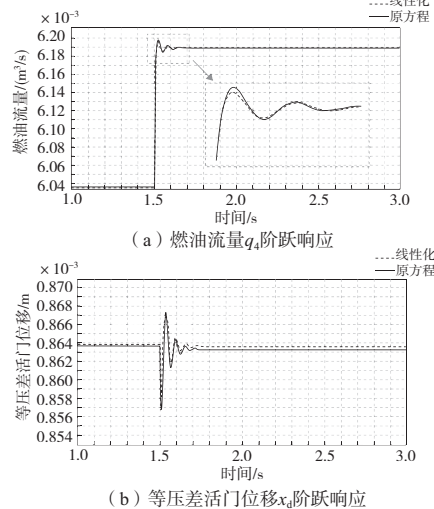


图 2 燃油计量装置对计量活门位移的阶跃响应

由于燃油计量装置的强非线性,通过线性化之后的方程与原始方程的动态响应存在一定误差,但两者总体上相符。

### 3 根轨迹稳定性分析

求解线性化后的式(8)-式(12),将压力 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_6$ 和位移 $x_d$ 、 $x_z$ 作为变量,得到一个含有变量的7阶闭环传递函数。对传递函数的分母即闭环特征方程进行分析,发现影响系统稳定性且可调节的设计参数有7个:节流孔面积 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$ 及压差活门和执行活门的弹簧刚度 $k_d$ 、 $k_x$ 。

根据特征方程根轨迹判断稳定性的原理,对燃油计量装置上述7个参数由0变化到正无穷,观察特征方程的根轨迹。

等压差活门弹簧刚度 $k_d$ 的值由0变化到正无穷(原始值为 $4.8 \times 10^4$  N/m),其他参数保持不变时,闭环特征方程的根轨迹在复平面上,如图3所示。其中:圆圈代表0点;叉号代表极点;B点为 $k_d$ 取原始值 $4.8 \times 10^4$  N/m时的根所在的位置;A点为 $k_d$ 扩大为 $4.84 \times 10^4$  N/m时的根所在的位置;C点为 $k_d$ 缩小为 $4.75 \times 10^4$  N/m时的根所在的位置。根据特征方程根轨迹判断稳定性的原理,因B点处于右半复平面,所以燃油计量装置是不稳定的,出口流量、压力出现了振荡现象。

通过根轨迹图,可以判断出在一定范围内, $k_d$ 逐渐增大,可以使得B点逐渐向左移动,出口流量、压力的振荡幅值逐渐减小,当B点穿过虚轴进入到左半复平面后,系统将处于稳定状态,理论上振荡现象将完全消失; $k_d$ 逐渐减小,将使得B点向右移动,振荡幅值将会增大。

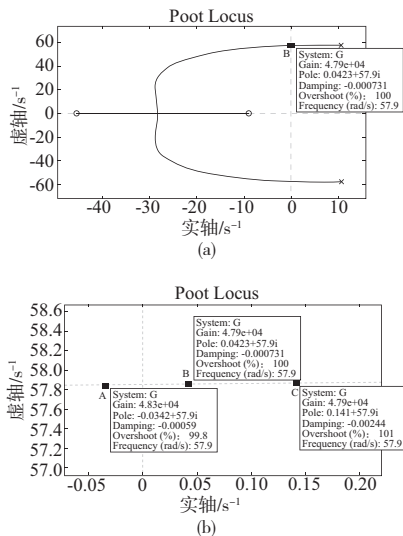


图3  $k_d$ 作为参数的根轨迹

在原始值 $4.8 \times 10^4$  N/m的基础上增大和缩小 $k_d$ ,通过MATLAB仿真观察振荡幅值的变化,结果如图4所示。可以看出, $k_d$ 增大,振荡幅度减小,反之亦然。这与根轨迹图得到的结论相一致。

但是, $k_d$ 的值也不能过大,因为随着 $k_d$ 的增加,等压差活门控制的稳态误差也会随之增加。图5为等压差活门的输出值(压差)在不同 $k_d$ 值下随计量活门位移(对应流量)变

化的曲线。可见增大 $k_d$ 要兼顾稳定性与稳态精度的平衡。

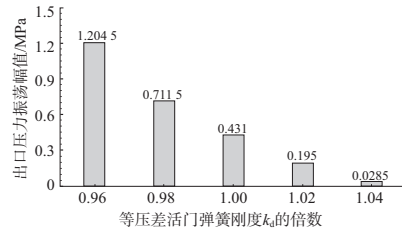


图4 出口压力振荡幅值随 $k_d$ 的变化

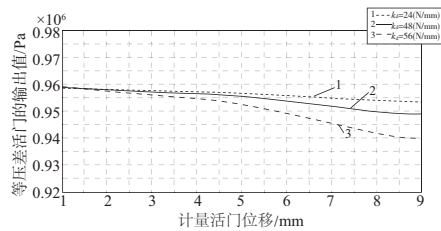


图5  $k_d$ 对稳态误差的影响

研究发现节流孔6的面积 $a_6$ 对稳定性影响十分明显且不是单调的变化关系。图6(a)、图6(b)分别为 $a_6$ 从0到正无穷时的根轨迹和 $a_6$ 在原始值附近变化的输出振荡幅度。图6(b)中,B点为 $a_6$ 取原始值 $8.171 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>时的根所在的位置;A点为 $a_6$ 缩小为 $3.109 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>时的根所在的位置;C点为 $a_6$ 扩大为 $7.234 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>时的根所在的位置,点为 $a_6$ 扩大为 $5.049 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>时的根所在的位置。

通过根轨迹图,可以判断出在一定范围内, $a_6$ 逐渐减小,可以使得B点逐渐向左移动,出口流量、压力的振荡幅值逐渐减小,当B点穿过虚轴进入到左半复平面后,系统将处于稳定状态,理论上振荡现象将完全消失; $a_6$ 逐渐增大,B点距离虚轴的距离先增大后减小,但是始终处于右半复平面,因此 $a_6$ 逐渐增大,振荡幅值将会先增大后减小。

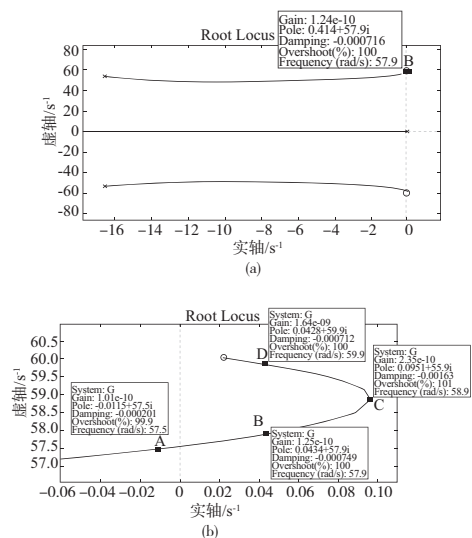


图6  $a_6$ 作为参数的根轨迹

通过仿真观察增大和缩小 $a_6$ 时振荡幅值的变化,结果如图7所示。可以看出, $a_6$ 减小,振荡幅度减小; $a_6$ 增

大,振荡幅度先增大后减小。这与根轨迹图得到的结论相一致。由此可见 $a_6$ 的原始值正是处于稳定性不佳的取值范围,因此改变这一设计参数可以有效改善燃油计量装置稳定性。

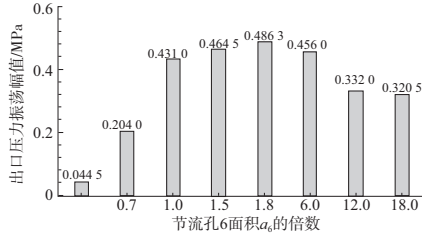


图7 出口压力振荡幅值随 $a_6$ 的变化

类似地,可以用根轨迹法分析其余5个参数对稳定性的影响。限于篇幅,这里不再给出其根轨迹图,分析结果见结论。

#### 4 基于李雅普诺夫函数和遗传算法的多参数稳定性设计方法

通过根轨迹的方法分析并找到了对系统稳定性有着较大影响的5个设计参数:等压差活门和执行活门的弹簧刚度 $k_1$ 、 $k_2$ 以及节流孔面积 $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$ 。然而,该方法只能得到在其他设计参数保持不变时,单独的某一个设计参数对系统稳定性的影响,进而通过改变这个参数来改善系统的稳定性。但是,如果仅仅通过改变一个设计参数的值来改善系统稳定性,有时需要对这个参数做较大幅度的改动,这可能在工程上不易实现。例如,将节流孔 $a_5$ 的面积扩大为原来的1.6倍后,出口燃油压力还是存在小幅度的振荡,如果想要完全消除振荡,节流孔 $a_5$ 的面积需要继续扩大,但是 $a_5$ 的面积如果较大的话会导致回油流量损失。为了研究多个设计参数同时作用时对系统稳定性的影响,从而通过同时调节多个参数来改善系统的稳定性,决定采用基于李雅普诺夫函数和遗传算法的多参数稳定性设计方法<sup>[8]</sup>,令:

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_d & x_z & \dot{x}_d & \dot{x}_z & p_6 & p_3 & p_2 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

将式(13)代入燃油计量装置的线性化模型式(8)~式(12),得到其状态方程式(14),并可以得到该方程的一个平衡点为 $x_e = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_3 = [-k_1 x_1 + a_d(x_5 - x_7) - b_d x_3] \cdot \frac{1}{m_d} \\ \dot{x}_4 = [-k_2 x_2 - a_d(x_7 - x_6) - b_z x_4] \cdot \frac{1}{m_z} \\ \dot{x}_5 = -(K_{p6} x_5 + a_d x_3) \cdot \frac{\beta_c}{v_6} \\ \dot{x}_6 = [K_{18} x_1 + c_2 x_7 - (K_{p5} + K_{p7} + K_{p8} + c_2) x_6] \cdot \frac{\beta_c}{v_3} \\ \dot{x}_7 = [-K_{24} x_2 - (K_{p1} + K_{p2} + K_{p3} + K_{p4} + c_z) x_7 + c_2 x_6 + a_d x_3] \cdot \frac{\beta_c}{v_2} \end{cases} \quad (14)$$

一般地说,对于相当一部分系统,要构造一个李雅普诺夫函数 $V(x)$ 使其满足 $V(x)$ 为正定、 $\dot{V}(x)$ 为半负定这一条件,常常不易做到,需要一定的经验和技巧。为了得到满足要求的李雅普诺夫函数 $V(x)$ ,令:

$$V(x) = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 x_2^2 + \frac{1}{2} k_3 x_3^2 + \frac{1}{2} k_4 x_4^2 + \frac{1}{2} k_5 x_5^2 + \frac{1}{2} k_6 x_6^2 + \frac{1}{2} k_7 x_7^2 \quad (15)$$

其中 $k_1$ ~ $k_7$ 均为 $>0$ 的待定系数。显然, $V(x)$ 为正定。令 $V(x)$ 对时间 $t$ 求导得到 $\dot{V}(x)$ ,将式(14)以及所有参数的数值代入 $\dot{V}(x)$ ,可以将 $\dot{V}(x)$ 写成二次型的形式:

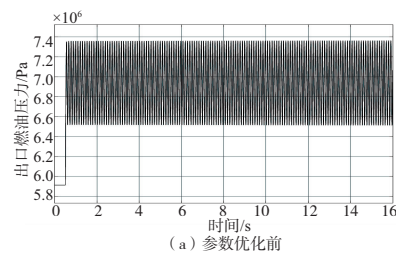
$$\dot{V}(x) = x^T A_1 x \quad (16)$$

式中 $A_1$ 是一个含有变量 $k_1$ ~ $k_7$ 的7阶方阵。根据半负定矩阵的性质:若矩阵 $A_1$ 是半负定矩阵,则 $A_1$ 的偶数阶顺序主子式均 $\geq 0$ ,奇数阶顺序主子式均 $\leq 0$ 。因此,依次计算出矩阵 $A_1$ 的各阶顺序主子式,令其满足半负定矩阵的性质。利用MATLAB的工具包Optimization中的遗传算法,依次将各阶主子式设为目标函数,再适当限定变量的变化区间,通过遗传算法寻优可以计算得到一组符合要求的系数,再将每一阶主子式计算得到的系数取平均值,便构造出了符合要求的李雅普诺夫函数 $V(x)$ 。令 $V(x)$ 对时间 $t$ 求导,将式(14)代入 $\dot{V}(x)$ ,并将除去 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$ 这5个设计参数以外其他参数的具体数值代入,可以将 $\dot{V}(x)$ 写成二次型的形式,即

$$\dot{V}(x) = x^T A_2 x \quad (17)$$

式中矩阵 $A_2$ 是一个含有变量 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $a_5$ 、 $a_6$ 、 $a_7$ 的7阶方阵。依次计算出矩阵 $A_2$ 的各阶顺序主子式,令其满足半负定矩阵的性质。利用MATLAB的工具包Optimization中的遗传算法,将各阶主子式设为目标函数,并限制这5个设计参数与原始值的差值分别在 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 30\%$ 、 $\pm 50\%$ 以内,通过遗传算法寻优可以得到4组不同的设计参数。接下来利用优化前后的设计参数对燃油计量装置进行仿真,仿真条件是进口压力为9 MPa,计量活门阀芯位移为11.3 mm,得到优化前后的出口燃油压力仿真结果如图8所示。图8(a)是参数优化前的出口燃油压力响应曲线,可以看出,出口压力存在振荡现象,振荡幅值大约是 $\pm 430$  kPa,频率大约是10 Hz;图8(b)是参数优化后的出口燃油压力响应曲线(设计参数与原始值的差值限制在30%以内),可以看出,参数优化后,出口压力的振荡很快衰减。

通过仿真研究了优化前后设计参数的调节时间,发现调节时间随着限制差值范围的增大而减小,当设计参数与原始值的差值限制在5%、10%时,调节时间较长,系统的动态性能较差;当差值限制在30%、50%时,调节时间明显缩短。当然这意味着设计参数偏离原始值较大。



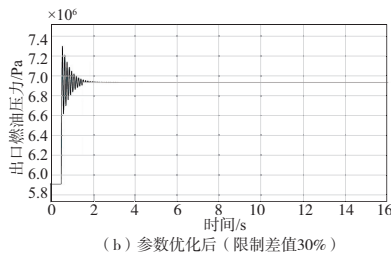


图8 出口燃油压力响应曲线

## 5 结语

1) 燃油计量装置是一个闭环控制系统,通过对非线性方程的线性化,利用闭环特征方程的根轨迹以及基于李雅普诺夫函数和遗传算法的多参数稳定性设计方法分析其稳定性是可行的。

2) 适当增大等压差活门和执行活门的弹簧刚度  $k_d$ 、 $k_z$  的值,可以改善稳定性,但是会增大稳态误差,所以参数设计中要考虑两者的平衡。

3) 节流孔  $a_6$  是对稳定性有重要影响的参数,且当前设计值(孔面积)处于不合理的区域。节流孔  $a_2$  和  $a_3$  对稳定性的影响不显著;增大节流孔  $a_5$  和  $a_7$  能改善稳定性,但是不建议增大太多,因为会导致回油流量损失。

4) 利用李雅普诺夫稳定性理论,研究了多个设计参数同时作用时对系统稳定性的影响,并利用 MATLAB 的工具包 Optimization 中的遗传算法进行寻优,得到优化后的设计参数,提高了系统的稳定性。

### 参考文献:

- [1] 廖光煌,黄金泉. 某型涡轴发动机数控系统的机械液压备份控制方案研究[J]. 航空动力学报,2015,30(11):2713-2720.
- [2] ZHANG S J. A simplified real-time engine model for developing aeroengine control system[C]//28th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Nashville, TN. Reston, Virginia; AIAA, 1992.
- [3] 余玲,叶志锋. 航空发动机燃油计量装置的 AMESim 建模[J]. 现代机械,2014(5):26-29.
- [4] 周立峰. 发动机燃油计量装置特性仿真与试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
- [5] 李洪胜,王曦,王华威,等. 压差控制器的稳定性分析和设计参数的研究[J]. 航空发动机,2016,42(3):12-16.
- [6] 高强,宋玉川,王睿,等. 高速开关阀控液位置伺服系统自适应鲁棒控制[J]. 航空动力学报,2019,34(2):503-512.
- [7] 黄妮,杜光超,戴作强,等. 液压约束活塞发动机的流量脉动仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2020,49(1):75-77,90.
- [8] 田军南,谭光兴,冯楚楚,等. 基于 Lyapunov 理论的线控转向系统稳定性分析[J]. 机械设计与制造,2020(12):34-38,43.

收稿日期:2021-10-28

(上接第 51 页)

使用 ASM2-3-X 旋钮式应力检测仪检测焊接完成后工件内部的残余应力,共测 4 个点,分别距离焊缝中心 0 mm、16 mm、18 mm、70 mm。图 9 是实验测得的残余应力数据与数值分析结果的对比,二者的相符程度较好。因此,模拟分析结果可以较为准确地表征焊接过程及热处理效果。

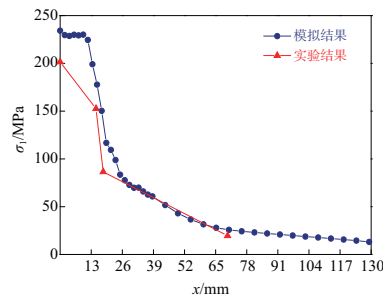


图9 实验与数值分析残余应力对比

## 4 结语

1) 在本研究所确定的焊接参数下(焊接电压为 32.9 V,焊接电流为 647 A),埋弧焊焊接时焊缝中心的温度最高,可达到 1 800 °C,熔宽和熔深分别为 26 mm 和 4 mm,与试验结果基本符合。

2) 焊接接头处的焊后残余应力主要是拉应力,焊缝区最大残余应力值为 233 MPa,热影响区值为 189 MPa,母材区值为 51 MPa。

3) 焊后感应热处理工艺能明显地消除接头处的残余

应力。在本文制定的工艺下(热处理温度 550 °C,保温 2 h,缓冷至 200 °C 后空冷),焊缝区最大残余应力值为 160 MPa,热影响区值为 135 MPa,母材区值为 37 MPa,焊缝区残余应力减小最多,达到 30%。

### 参考文献:

- [1] 修磊,吴杰峰,沈旭. 316LN 不锈钢焊后热处理工艺及对残余应力的影响[J]. 材料热处理学报,2015,36(5):67-71.
- [2] 卢新生,郭新芳,万夫伟,等. 不同加热方法对大径厚壁 P91 管道焊后热处理温度分布的影响[J]. 焊接技术,2019,48(增刊1):44-46.
- [3] 刘川,沈嘉斌,陈东俊,等. 大厚板内部焊接残余应力分布实验研究[J]. 船舶力学,2020,24(4):484-491.
- [4] 张磊,柳长青,于静伟,等. 窄间隙埋弧焊温度场数值分析[J]. 焊接学报,2016,37(3):83-87,132.
- [5] DI LUOZZO N, FONTANA M, ARCONDO B. Modelling of induction heating of carbon steel tubes; mathematical analysis, numerical simulation and validation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012,536:S564-S568.
- [6] 宗峰,霍光瑞,吴松林. 双丝埋弧焊工艺焊接温度场模拟分析[J]. 材料开发与应用,2016,31(4):51-56.
- [7] 郝子龙,石光林. 基于 ANSYS 的平板堆焊凝固过程的应力分析[J]. 广西科技大学学报,2016,27(1):54-57.
- [8] 王波,郭顺,蔡雅君. 高氮钢 TIG 焊接数值模拟及组织性能分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(6):25-28.
- [9] 陈爱国,耿军,黄亚军,等. 大型管板结构焊接残余应力的预测与消除[J]. 热加工工艺,2020,49(11):136-141,146.

收稿日期:2020-12-17