

# 基于 LPV 状态空间模型的小型航空煤油 二冲程发动机喷油控制策略

陈林林, 孙 群, 王 翀

(聊城大学 机械与汽车工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘 要:** 为了简化基于平均值模型的喷油控制模型的计算, 根据线性变参数(LPV)状态空间模型原理, 在平均值模型的基础上建立了 LPV 状态空间喷油控制模型, 利用 Matlab/Simulink 工具对稳态工况和瞬态工况的喷油脉宽控制模型进行仿真, 最后在发动机试验台架上进行试验验证. 仿真和试验结果表明: ①基于 LPV 状态空间模型的喷油控制模型能够满足瞬态工况和稳态工况控制的要求, 计算的喷油脉宽精度略低于平均值模型, 由于 LPV 状态空间模型计算简单, 能够直接应用于控制算法的设计, 因此在工程中容易实现. ②与插值算法相比, 基于 LPV 状态空间模型的控制策略使发动机的动力输出有所下降, 主要是由于模型简化造成进气空气流量减小引起的.

**关 键 词:** 航空煤油二冲程发动机; 线性变参数模型; 平均值模型; 喷油控制; 稳态工况; 瞬态工况  
**中图分类号:** V231; TK461 **文献标志码:** A

## Fuel injection control strategies based on LPV state-space model for small two-stroke aviation kerosene engines

CHEN Lin-lin, SUN Qun, WANG Chong

(School of Mechanical and Automotive Engineering,  
Liaocheng University, Shandong Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** To simplify the calculation of fuel injection control model based on the average model, a linear parameter varying (LPV) injection control state-space model was established based on the average model according to LPV state-space model principles. On this basis, the fuel injection pulse width control model under steady operating conditions and transient operating conditions was established, then simulated by Matlab/Simulink tool, and finally verified in an engine test bed. The simulation and experimental results show that: (1) the LPV state-space fuel injection control model meets the control requirements under steady and transient operating conditions. Although the accuracy of calculated fuel injection pulse width is slightly lower than that of the average model, the LPV state-space model calculation is simple, and can be directly used in the injection control algorithm design and easy to implement in engineering. (2) Compared with the interpolation algorithm, the control strategy based on the LPV state-space model leads to a lower engine power output, mainly owing to the simplified model that results in a reduced intake air flow rate.

**Key words:** two-stroke aviation kerosene engines; linear parameter varying (LPV) model; average model; fuel injection control; steady operating conditions; transient operating conditions

采用重油(煤油、柴油)等具有低挥发性的单一燃料是无人机的迫切需要,主要是方便油料在舰船上的管理,以提高安全性<sup>[1]</sup>. 结构简单、体积小、比质量轻、升功率高、使用维护方便等是小型航空活塞式二冲程发动机具有的优点,这种优点非常适用于小型无人机、超轻型飞机及动力翼伞等飞行器的应用<sup>[2]</sup>. 由于进气道预混合二冲程发动机存在短路损失,使得一部分燃气直接进入排气管,所以其喷油控制为开环控制<sup>[3]</sup>. 对安装了进气管压力传感器而采用速度-密度法来确定进入气缸空气流量的二冲程发动机,当二冲程发动机处于瞬态工况,因进气道在瞬态工况发生进气充排效应,从而无法真实测量瞬态工况的进气道压力,使得进入气缸的空气流量存在误差<sup>[4]</sup>. 因此二冲程发动机传统的喷油控制是基于脉谱图(MAP图)的二维插值控制,但因为二冲程发动机的工况非常多,所以使得标定工作十分繁琐.

基于模型的喷油控制策略,能根据二冲程发动机实际运行工况参数来计算进入到气缸的空气流量,然后根据目标空燃比计算出喷油量,这样不仅极大减少了电子控制系统在开发过程中的标定试验工作量,还提高了系统的鲁棒性. 基于模型的二冲程发动机控制器设计的成功与否,很大程度上依赖于被控对象发动机数学模型的准确性. 因为准确的发动机模型能够准确反映主要参数在动态过程中的变化,还可以评价发动机动力性能、经济性能及环境因素等指标<sup>[4]</sup>.

基于平均值模型的喷油控制模型能够计算火花点火式二冲程发动机的燃油喷油量<sup>[5]</sup>,由于其包含的非线性因素太多,使得模型计算仍很复杂,仅仅可以对火花点火式二冲程发动机稳态、瞬态工况控制策略进行仿真研究,而不能将其直接用于控制算法的设计<sup>[6]</sup>. 本文先建立二冲程发动机平均值模

型,然后对平均值模型的喷油模型进行简化,建立线性变参数(LPV)状态空间模型<sup>[7]</sup>,然后基于 LPV 状态空间模型进行喷油控制算法的设计.

本文所研究的小型航空煤油二冲程发动机(下文简称二冲程发动机)为德国某型火花点火式两缸、气冷、电子控制燃油多点顺序喷射、二冲程活塞式发动机,其主要参数如表 1 所示.

表 1 二冲程发动机主要技术参数  
Table 1 Major technical parameters of two-stroke engine

| 参数                 | 数值      |
|--------------------|---------|
| 气缸直径/mm            | 76      |
| 活塞行程/mm            | 69      |
| 排量/cm <sup>3</sup> | 625     |
| 最大功率/kW            | 47.8    |
| 最大扭矩/(N·m)         | 72.4    |
| 压缩比                | 9.5 : 1 |
| 平均有效压力/MPa         | 0.744   |

1 平均值模型的建立

所研究二冲程发动机的动态特性主要包括燃油蒸发与油膜动态子模型、进气道空气流量子模型、曲轴箱扫气子模型及动力输出子模型四部分组成,如图 1 为二冲程发动机平均值模型结构示意图.

平均值模型的建立参见文献[8]. 文献[8]的建模中考虑了簧片阀的建模,同时考虑了扫气过程中的短路损失,进行了空燃比的计算. 文献[8]对航空二冲程汽油发动机动力输出、转速和空燃比进行了 Matlab/Simulink 仿真,仿真结果和试验数据吻合,证明了该平均值模型的正确性.

平均值模型主要由 4 个动态子模块组成:燃油蒸发与油膜动态子模型、进气道空气流量子模型、

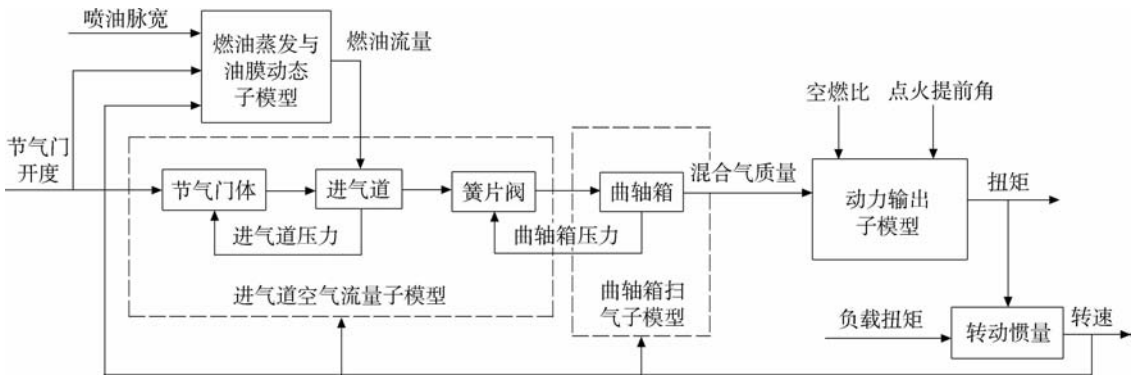


图 1 二冲程发动机平均值模型结构示意图

Fig.1 Schematic of structure of average model for two-stroke engine

曲轴箱扫气子模型及动力输出子模型. 其中燃油蒸发与油膜动态子模型建立的基础是 Hendricks 所建立的平均值模型中的燃油蒸发子模型, 模型中油膜方程的基础是质量守恒方程. 模型中主要公式如下:

$$\dot{p}_m = \frac{RT_m}{V_m} \dot{m}_1 \quad (1)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{at}(\alpha, p_m) - \dot{m}_{ao}(n, p_m, p_s) \quad (2)$$

$$\dot{m}_{at} = f(\alpha)g(p_m) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{ao} = \mu_i A_i \psi \sqrt{\frac{p_m}{v_m}} \quad (4)$$

$$\dot{p}_s = \frac{RT_s}{V_s} \dot{m}_2 + \frac{p_s}{T_s} \dot{T}_s - \frac{p_s}{V_s} \dot{V}_s \quad (5)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{ao}(n, p_m, p_s) + \dot{m}_f - \dot{m}_{ac}(n, p_s) \quad (6)$$

$$\dot{m}_{ac}(n, p_s) = \phi_c(n, p_s) \frac{p_s n V_h i}{60 \tau R T_s} \quad (7)$$

$$\dot{T}_s = \frac{\kappa}{m_2} \left[ \dot{m}_{ao} T_m - \left( \dot{m}_{ac} + \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{dm_2}{dt} \right) T_s \right] \quad (8)$$

$$m_c = \dot{m}_{ac}(n, p_s) \frac{60}{n \phi_s} \quad (9)$$

$$\dot{m}_{ff} = -\frac{m_{ff}}{\tau_{ff}} + \eta \dot{m}_{fi} \quad (10)$$

$$\dot{m}_{fv} = (1 - \eta) \dot{m}_{fi} \quad (11)$$

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{fv} + \frac{m_{ff}}{\tau_{ff}} \quad (12)$$

式中  $m_1$  为进气道中的空气的质量;  $n$  为发动机转速;  $R$  为摩尔气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $p_m, T_m$  和  $V_m$  分别为进气道中的压力、温度和体积;  $\dot{m}_{at}$  为节气门处的空气流量;  $f(\alpha)$  是节气门开度的经验公式;  $\alpha$  为节气门开度;  $\dot{m}_{ao}$  为通过簧片阀进入曲轴箱的空气流量;  $g(p_m)$  为进气道压力的函数;  $\mu_i$  为簧片阀的流量系数;  $\psi$  为流动函数;  $v_m$  为进气道的气体比容;  $A_i$  为簧片阀的瞬时几何流通截面积;  $m_2$  为曲轴箱中混合气质量;  $p_s, T_s$  和  $V_s$  分别为曲轴箱中的压力、温度和体积;  $\dot{m}_{ac}$  为从曲轴箱扫入气缸的混合气流量;  $V_h$  为二冲程发动机的排气量;  $\kappa$  为进气道气体等熵指数;  $m_c$  为每缸每循环的进气量;  $\phi_s$  为扫气系数; 气缸数  $i = 2$ ; 冲程数  $\tau = 2$ ;  $\phi_c$  为二冲程发动机的容积效率;  $\dot{m}_{fv}$  为燃油蒸气流量;  $m_{ff}$  为油膜质量;  $\dot{m}_{fi}$  为喷油器喷出的燃油质量流量;  $\tau_{ff}$  为燃油蒸发时间常数;  $\dot{m}_{ff}$  为油膜质量变化率;  $\eta$  为喷射的燃油中沉积于壁面的比例;  $\dot{m}_f$  为进入曲轴箱内的燃油流量.

## 2 LPV 状态空间模型的建立

虽然基于平均值模型的喷油控制模型能够计

算二冲程发动机的喷油量, 可是太多的非线性因素使模型计算仍很复杂, 可以进行稳态工况、瞬态工况控制策略的仿真研究, 而无法将其直接进行控制算法的设计. 所以将先对基于平均值模型的喷油控制模型进行简化<sup>[9]</sup>, 然后建立二冲程发动机 LPV 状态空间模型, 再基于 LPV 状态空间模型进行喷油控制算法的设计<sup>[10]</sup>.

### 2.1 平均值模型的简化

为简化平均值模型并转化为 LPV 状态空间模型, 采取了以下假设.

1) 对进入曲轴箱空气流量的计算, 假定气体流动达不到临界状态, 在计算时仅考虑亚临界流动, 那么根据以下公式计算  $\dot{m}_{ao}$ :

$$\dot{m}_{ao} = 6\mu_i Z_v \frac{p_m - p_s}{E_v \delta_v^3} l_v^4 \left( \frac{l_v}{5} + \frac{b_v}{4} \right) \sqrt{\frac{p_m}{v_m}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_s}{p_m} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_s}{p_m} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (13)$$

式中  $Z_v$  为簧片阀的阀片数目;  $l_v, b_v, \delta_v$  分别为阀片的长、宽、厚;  $E_v$  为阀片材料的弹性模量.

2) 假设进气道充排过程按等温状态变化, 那么进气道中的温度  $T_m$  不变, 则

$$\dot{p}_m = \frac{RT_m}{V_m} [\dot{m}_{at}(\alpha, p_m) - \dot{m}_{ao}(n, p_m, p_s)] \quad (14)$$

3) 假设在扫气过程中曲轴箱的温度不变, 即  $\dot{T}_s = 0$ , 那么式(5)可简化如下:

$$\dot{p}_s = \frac{RT_s}{V_s} [\dot{m}_{ao}(n, p_m, p_s) + \dot{m}_f - \dot{m}_{ac}(n, p_s)] - \frac{p_s}{V_s} \dot{V}_s \quad (15)$$

式中  $\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ao}}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为二冲程发动机优化后各个工况的最佳目标空燃比, 是已知量.

### 2.2 二冲程发动机 LPV 状态空间模型

麻省理工学院的 Shamma 于 1988 年首次提出 LPV 系统<sup>[11]</sup>, 包括其博士论文在内的很多论文都对这类系统做了大量的研究<sup>[12]</sup>.

LPV 状态空间模型按如下描述:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}[\boldsymbol{\theta}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}[\boldsymbol{\theta}(t)]\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}[\boldsymbol{\theta}(t)]\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}[\boldsymbol{\theta}(t)]\mathbf{u}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\theta}(t) \in \Theta, \forall t \geq 0$$

式中  $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$  是状态向量,  $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^p$  为输出向量,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$  为输入向量,  $\boldsymbol{\theta}(t) = [\theta_1(t), \dots, \theta_i(t), \dots, \theta_r(t)] \in \mathbf{R}^r$  为时变参数向量, 可以为系统输入、输出、状态或外部信号的函数, 其选取原

则是  $\theta(t)$  能反映系统的动态特性.  $\Theta$  为变参数向量  $\theta(t)$  的变化范围. 系统矩阵  $A(\cdot), B(\cdot), C(\cdot), D(\cdot)$  为时变参数向量  $\theta(t)$  的函数.

二冲程发动机平均值模型简化后转化为式 (16) 的形式才能建立 LPV 状态空间模型. 由于控制目的是求得循环喷油量  $\dot{m}_{\text{fcy}}$ , 其计算公式为

$$\begin{cases} \dot{p}_m = \frac{RT_m}{V_m} f(\alpha) g(p_m) - \frac{RT_m}{V_m} 6\mu_i Z_V \frac{p_m - p_s}{E_V \delta_V^3} l_V^4 \left( \frac{l_V}{5} + \frac{b_V}{4} \right) \sqrt{\frac{p_m}{v_m}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_s}{p_m} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_s}{p_m} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \\ \dot{p}_s = \frac{RT_s}{V_s} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) 6\mu_i Z_V \frac{p_m - p_s}{E_V \delta_V^3} l_V^4 \left( \frac{l_V}{5} + \frac{b_V}{4} \right) \sqrt{\frac{p_m}{v_m}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{p_s}{p_m} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{p_s}{p_m} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} - \\ \frac{RT_s}{V_s} \phi_c(n, p_s) \frac{p_s n V_h i}{60 \pi R T_s} - \frac{p_s}{V_s} \dot{V}_s \end{cases} \quad (18)$$

从方程组 (18) 中可知, 在某些项中  $p_m$  和  $p_s$  两个状态变量属于非线性形式, 如果把进入系统的非线性形式的状态变量看作参数, 则可以把简化的平均值模型转化为式 (16) 的形式. 令  $\theta_1 = p_m, \theta_2 = p_s$ , 把看作参数的  $p_m, p_s$  分别用  $\theta_1, \theta_2$  代替, 对式 (18) 进行重新整理, 得到如下 LPV 状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \frac{RT_m}{V_m} f(\alpha) g(\theta_1) - \frac{RT_m}{V_m} \cdot \frac{6\mu_i Z_V}{E_V \delta_V^3} l_V^4 \left( \frac{l_V}{5} + \frac{b_V}{4} \right) \sqrt{\frac{\theta_1}{v_m}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \cdot (\theta_1 - \theta_2) \\ \dot{\theta}_2 = \frac{RT_s}{V_s} \left( 1 + \frac{1}{\lambda} \right) \frac{6\mu_i Z_V}{E_V \delta_V^3} l_V^4 \left( \frac{l_V}{5} + \frac{b_V}{4} \right) \sqrt{\frac{\theta_1}{v_m}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} (\theta_1 - \theta_2) - \\ \left[ \frac{RT_s}{V_s} \phi_c(n, \theta_2) \frac{n V_h i}{60 \pi R T_s} - \frac{\dot{V}_s}{V_s} \right] \theta_2 \end{cases} \quad (19)$$

控制目标选取进入曲轴箱内的空气流量  $\dot{m}_{\text{ao}}$  并将其作为输出变量, 则得到输出方程如下:

$$y = \dot{m}_{\text{ao}} = [W \quad -W] \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中

$$W = \frac{RT_m}{V_m} \cdot \frac{6\mu_i Z_V}{E_V \delta_V^3} l_V^4 \left( \frac{l_V}{5} + \frac{b_V}{4} \right) \sqrt{\frac{\theta_1}{v_m}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[ \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}$$

上述式 (19) 和式 (20) 就是本文建立的火花点火式二冲程发动机 LPV 状态空间模型.

### 3 基于 LPV 状态空间模型的喷油控制仿真

二冲程发动机 LPV 状态空间模型建立后, 由于模型的计算更加简单, 能够直接进行基于 LPV 状态空间模型的喷油控制器设计, 可以建立稳态工况和瞬态工况的喷油控制模型. 基于 LPV 状态空间模型的二冲程发动机喷油控制模型结构示意图如图 2 所示 (图中  $\dot{m}_{\text{in}}$  为每次工况所需喷油量的计算值), 在喷油控制模型中当判断是瞬态工况后通过施加前馈油膜补偿控制器进行瞬态控制<sup>[13]</sup>.

$$\dot{m}_{\text{fcy}} = \frac{60 \dot{m}_f}{n} = \frac{60 \dot{m}_{\text{ao}}}{n \lambda} \quad (17)$$

因此 LPV 状态空间模型的输出量为进入曲轴箱内的空气流量  $\dot{m}_{\text{ao}}$ , 输入向量为表征工况的转速和节气门开度, 即输入向量  $u = [\alpha, n]^T$ .

状态向量选取  $x = [p_m, p_s]^T$ , 则由上述简化的平均值模型可以得到如下方程组:

本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件建立上述喷油控制模型, 并对稳态工况和瞬态工况的喷油脉宽进行仿真计算, 然后把仿真结果与平均值模型计算结果及实际喷油脉宽进行对比分析. 基于 LPV 状态空间模型的喷油控制 Simulink 仿真模型如图 3 所示<sup>[14]</sup>.

选取节气门开度  $\alpha = 60^\circ, n = 5500 \text{ r/min}$  的稳态工况进行二冲程发动机喷油脉宽的仿真计算. 基于 LPV 状态空间模型的喷油脉宽仿真计算结果与基于平均值模型、实际数据的对比曲线如图 4 所示. 仿真计算结果表明, 跟平均值模型相比, 基于 LPV 状态空间模型的喷油脉宽计算结果精度要低, 计算误差小于 3%, 能够满足控制精度要求, 但由于基于 LPV 状态空间模型的计算更加简单, 能够直接进行基于 LPV 状态空间模型的喷油控制器设计, 易于在工程中实现.

在瞬态工况下油膜动态效应会影响实际进入曲轴箱的燃油流量, 本文采用施加前馈油膜补偿控制器的方法来消除这种影响. 在  $\alpha = 60^\circ, n = 5500 \text{ r/min}$  的稳态工况下, 二冲程发动机瞬态工况喷油量的变化可通过对喷油量施加小偏差阶跃干扰的方法来模拟. 对喷油量瞬态阶跃变化后施

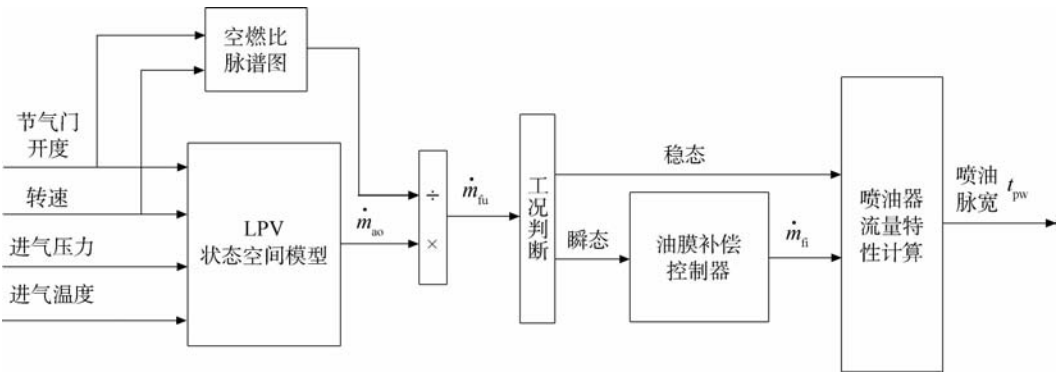


图 2 基于 LPV 状态空间模型的二冲程发动机喷油控制模型结构示意图

Fig. 2 Schematic of structure of fuel injection control model for two-stroke engine based on LPV state-space model

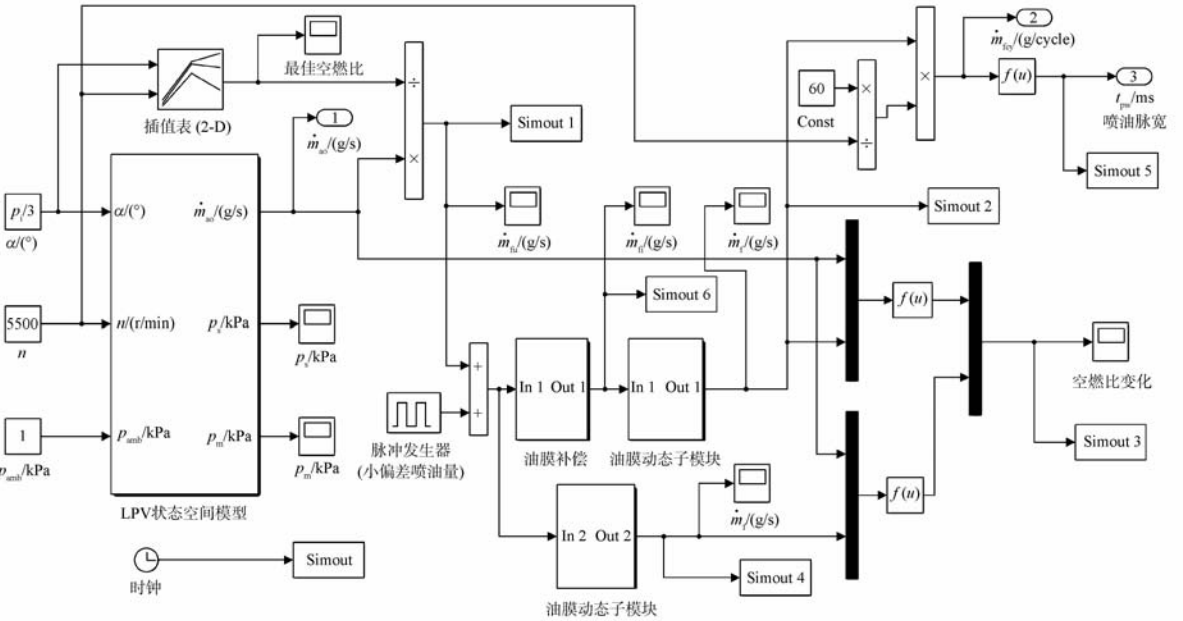


图 3 基于 LPV 状态空间模型的喷油控制 Simulink 仿真模型

Fig. 3 Fuel injection control Simulink simulation model based on LPV state-space model

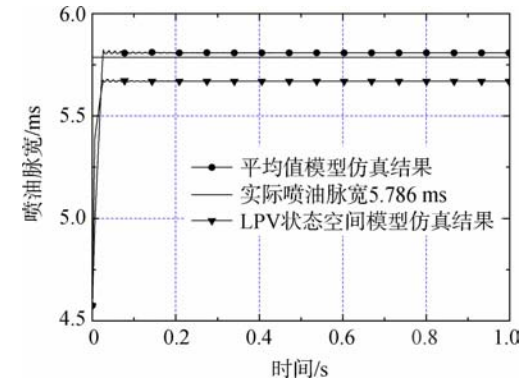


图 4 LPV 状态空间模型、平均值模型喷油脉宽仿真计算与实际数据对比曲线

Fig. 4 Comparison curves of injection pulse width among LPV state-space model, average model simulation results and actual data

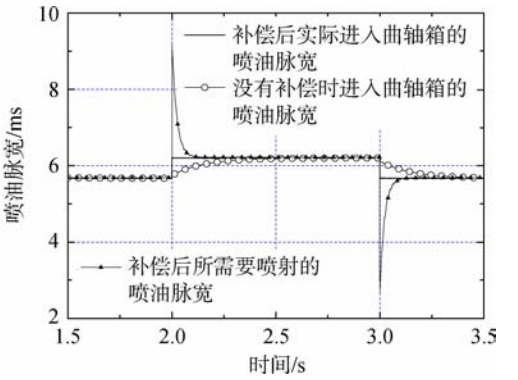


图 5 基于 LPV 状态空间模型的喷油控制模型瞬态工况喷油脉宽仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of injection pulse width of fuel injection control model based on LPV state-space model under transient operation condition

加前馈油膜补偿控制器产生实际喷油脉宽的变化进行仿真,并跟没有施加前馈油膜补偿控制器时实际喷油脉宽的变化进行对比.基于 LPV 状态空间模型的喷油控制模型瞬态工况下的喷油脉宽仿真曲线如图 5 所示.根据图示可以看出瞬态工况施加前馈油膜补偿控制器以后使实际喷油脉宽增大,这样使瞬态工况下的油膜动态效应得以消除,施加补偿后大大减小了喷油量达到稳态所需的时间,并避免了因所需燃油量与实际进入曲轴箱内的燃油量产生较大偏差而造成实际空燃比较大的波动,提高了瞬态工况下空燃比的控制精度.

4 基于 LPV 状态空间模型的台架  
喷油控制试验

基于 MC9S12DP512 微控制器研制了二冲程发动机喷油控制器,用 C 语言和汇编语言混合编程技术实现了基于 LPV 状态空间模型的喷油控制算法,采用模块化思想设计了硬件电路<sup>[15]</sup>,同时从硬件和软件两个方面综合考虑抗干扰性<sup>[16]</sup>.控制器的节气门开度和转速信号由传感器采集,根据 LPV 状态空间模型计算进气空气流量,根据式(17)计算出循环喷油量  $\dot{m}_{fcy}$ ,最后通过喷油器的流量特性公式转换为喷油脉宽.

进行了二冲程发动机稳态工况和瞬态工况的喷油控制台架试验<sup>[17]</sup>,由杭州中成测试设备有限公司 EST-2002 型内燃机测控系统组成发动机试验台架平台<sup>[18]</sup>.燃油蒸发时间常数  $\tau_{ff}$  和燃油沉积于壁面上的比例  $\eta$  已经以 MAP 图的形式写入喷油控制器,实际控制时对两个参数在不同的工况下进行插值.

首先对瞬态工况的前馈油膜补偿控制策略进行验证.做瞬态工况中的急加速和急减速试验.试验时在起动二冲程发动机之前预先喷几次燃油,当二冲程发动机起动以后,采取突然加大节气门开度和突然减小节气门开度方式,完成急加速和急减速试验.图 6 为瞬态工况试验监控曲线,其中图 6(a)中的节气门开度以 ECU 为计量单位.通过喷油控制台架试验监测曲线及二冲程发动机运转情况可知,由于瞬态工况施加了油膜补偿控制,所以瞬态工况中的所需喷油量能及时得到补偿,使得喷油控制精度满足要求.

然后,对二冲程发动机的多个稳态工况点进行了试验,主要是验证稳态工况下基于 LPV 状态空间模型控制算法二冲程发动机动力输出性能.试验中记录了不同工况点的性能数据,最后把这

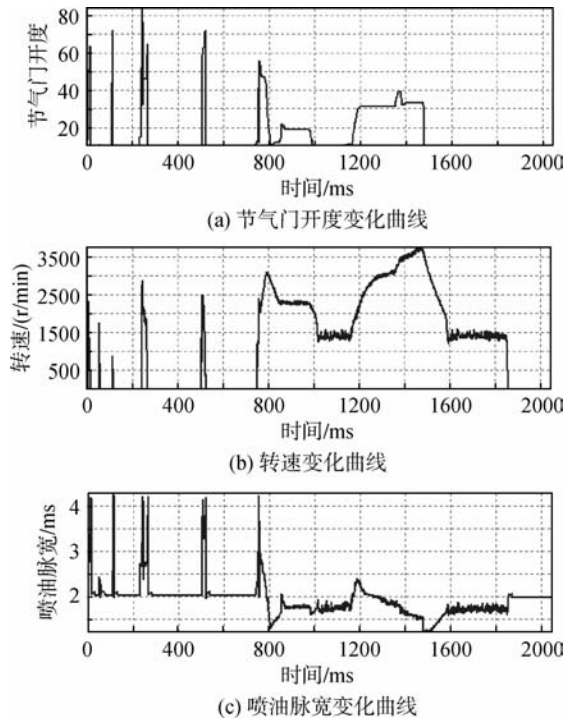


图 6 基于 LPV 状态空间模型控制算法的二冲程发动机瞬态工况试验监测曲线

Fig. 6 Test monitoring curves of two-stroke engine under transient operating condition based on the LPV state-space model control algorithm

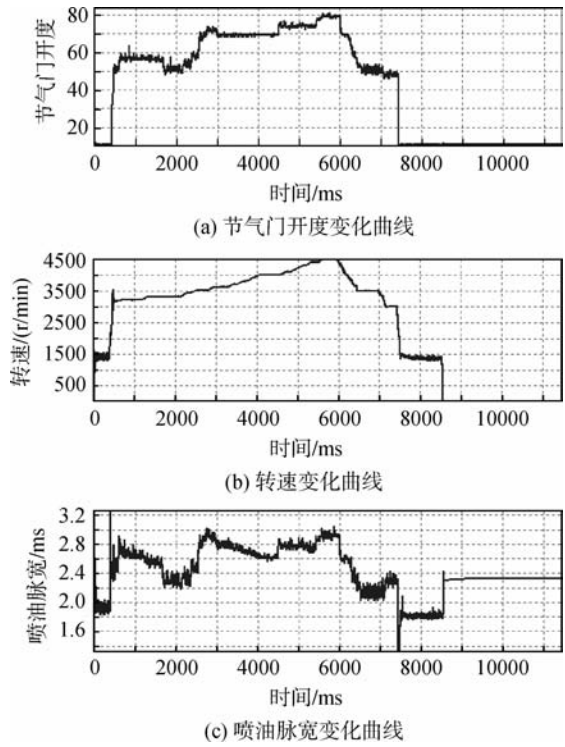


图 7 基于 LPV 状态空间模型控制算法的二冲程发动机稳态工况试验监测曲线

Fig. 7 Test monitoring curves of two-stroke engine under steady operating condition based on the LPV state-space model control algorithm

些数据与基于初始 MAP 图插值算法喷油控制的输出性能数据进行对比. 最高转速在试验中被控制为 4 500 r/min. 稳态工况喷油控制台架试验监测曲线如图 7 所示.

从监测曲线可以看出,基于 LPV 状态空间模型的喷油控制中二冲程发动机运行稳定,满足对二冲程发动机的控制要求.

进行两种控制算法试验时二冲程发动机动力输出性能对比数据如表 2 所示. 根据表 2 中数据对比分析可得,与插值算法相比,基于 LPV 状态

空间模型的控制策略造成二冲程发动机输出动力有所下降,引起下降的主要原因是模型简化造成进气空气流量减小. 不过控制误差在允许的大小范围之内. 更重要的是基于模型的控制算法能够极大减少电控系统开发过程中标定试验的工作量.

从整个二冲程发动机喷油控制台架试验来看,基于 LPV 状态空间模型的二冲程发动机电控系统运行可靠. 硬件和软件采用的各种抗干扰措施使得电控单元有较强抗干扰能力和较高稳定性.

表 2 不同喷油控制算法二冲程发动机动力输出数据对比

Table 2 Comparison of power output data of kerosene engine with different fuel injection control algorithm

| 节气门开度<br>(ECU 计量单位) | 转速/<br>(r/min) | 扭矩/(N·m) |                   | 功率/kW    |                   | 缸盖温度/℃   |                   |
|---------------------|----------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|
|                     |                | 插值<br>算法 | 基于 LPV 状态<br>空间模型 | 插值<br>算法 | 基于 LPV 状态<br>空间模型 | 插值<br>算法 | 基于 LPV 状态<br>空间模型 |
| 62                  | 3 500          | 15. 7    | 15. 3             | 5. 7     | 5. 6              | 145      | 142               |
| 71                  | 4 000          | 20. 2    | 19. 5             | 8. 4     | 8. 2              | 160      | 158               |
| 83                  | 4 500          | 23. 3    | 21. 4             | 10. 9    | 10. 1             | 166      | 161               |

## 5 结 论

对平均值模型进一步简化,建立了小型航空煤油二冲程发动机的 LPV 状态空间模型,然后基于该模型建立了稳态工况和瞬态工况的喷油控制模型,并对稳态工况和瞬态工况的喷油控制进行了仿真与试验. 结论如下:

1) 基于 LPV 状态空间模型的喷油控制模型跟基于平均值模型的喷油模型相比喷油脉宽计算结果精度要低,计算误差小于 3%,能够满足控制精度要求.

2) 基于 LPV 状态空间模型的控制算法可以大大减少电控系统开发过程中标定试验的工作量,又由于模型的计算更加简单,能够直接进行基于 LPV 状态空间模型的喷油控制器设计,易于在工程中实现.

3) 与插值算法相比,基于 LPV 状态空间模型的喷油控制策略造成二冲程发动机输出动力有所下降,引起下降的主要原因是模型简化造成进气空气流量减小.

## 参考文献:

[ 1 ] Cathcart G, Dickson G, Ahern S. The application of air-assist direct injection for spark-ignited heavy fuel 2-stroke and 4-stroke engines[R]. SAE Paper 2005-32-0065, 2005.

[ 2 ] 张金生. 二冲程发动机百年史:一[J]. 摩托车, 1996, 5 (12):17-18.  
ZHANG Jinsheng. Century development of two-stroke engines:one[J]. Motorcycle, 1996, 5 (12): 17-18. (in Chinese)

[ 3 ] Hendricks E. Mean value modeling of large turbocharged two-stroke diesel engines[J]. SAE Paper 890564, 1989.

[ 4 ] Hendricks E, Sorenson S C. Mean value modeling of spark ignition engines[J]. SAE Paper 900616, 1990.

[ 5 ] Chevalier A, Vigild C W, Hendricks E. Predicting the port air mass flow of SI engines in air/fuel ratio control applications[J]. SAE Paper 2000-01-0260, 2000.

[ 6 ] 王海燕, 张均东. 大型低速柴油机线性变参数状态空间模型[J]. 内燃机学报, 2006, 24(6):543-547.  
WANG Haiyan, ZHANG Jundong. Linear variable parameter modeling of large marine low-speed diesel engine[J]. Transactions of CSICE, 2006, 24(6): 543-547. (in Chinese)

[ 7 ] 李文强, 马建军. 基于 LPV 的变增益控制技术及其在航空航天领域的应用[J]. 航空兵器, 2009(2):8-12.  
LI Wenqiang, MA Jianjun. Variable gain control based on LPV and the application in aerospace[J]. Aero Weaponry, 2009(2): 8-12. (in Chinese)

[ 8 ] 陈林林, 魏民祥, 杨海青. 航空二冲程汽油发动机均值模型的试验与仿真[J]. 航空动力学报, 2008, 23 (12): 2249-2255.  
CHEN Linlin, WEI Minxiang, YANG Haiqing. Experiment and simulation of the mean value model on two-stroke gasoline aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2249-2255. (in Chinese)

[ 9 ] Marcos A,Balas G. Development of linear-parameter-varying models for aircraft[J]. Journal of Guidance,Control, and Dynamics,2004,27(2):218-228.

[10] Reberga L, Henrion D, Bernussou J, et al. LPV modeling of a turbo fan engine[C]// Proceedings of the 16th IFAC World Congress, Prague, Czech:IFAC,2005:3-8.

[11] Shamma J S. Analysis and design of gain-scheduled control systems[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology,1988.

[12] Shamma J S. Robust stability with time-varying structured uncertainty[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1994,39(4):714-724.

[13] Onder C H,Geering H P. Model-based multivariable speed and air-to-fuel ratio control of an SI engine[J]. SAE Paper 930859,1993.

[14] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计:MATLAB 语言与应用[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2006.

[15] Barrett S F, Pack D J. 嵌入式系统:使用 68HC12 和 HCS12 的设计与应用[M]. 郑扣根,唐杰,何通能,等译. 北京:电子工业出版社,2004.

[16] 王幸之,王雷,翟成,等. 单片机应用系统抗干扰技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000.

[17] 卓斌,刘启华. 车用汽油机燃料喷射与电子控制[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[18] 陈林林. 二冲程煤油发动机性能数值模拟与喷油控制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.

CHEN Linlin. Research on numerical simulation of performance and fuel injection control for two-stroke kerosene engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2010. (in Chinese)

(编辑:陈 越)