

基于空气流量预测的发动机空燃比三步非线性控制

王 萍^{1,2} 林佳眉² 陈 虹^{1,2}

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学控制科学与工程系, 长春 130025)

摘要: 为降低排放并保证发动机的动力性,空燃比(Air-fuel ratio, AFR)控制成为人们日益关注的焦点。空燃比的瞬态精确控制可同时兼顾扭矩输出和尾气排放。为达到瞬态空燃比的精确控制,提出了空燃比三步非线性控制方法,包含稳态控制、参考前馈控制和误差反馈控制。当空燃比期望值为恒值时,稳态控制起到主导作用;当车辆扭矩需求发生速变时,空燃比期望值也发生跳变,参考前馈控制此时将及时做出反应;误差反馈控制以废气氧传感器(EGO)测得的空燃比作为反馈量进行修正。考虑喷油器执行机构的延迟,基于模型实时预测未来进气歧管的压力,通过前馈控制进行延迟补偿。利用仿真平台 en-DYNA 中的四缸发动机模型进行仿真验证,证明算法瞬态工况和参考输入快变时的有效性。

关键词: 发动机; 空燃比; 三步非线性控制; 均值模型; 空气流量预测

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)11-0398-07

AFR Triple-step Control of Gasoline Engine Based on Air Mass Flow Prediction

WANG Ping^{1,2} LIN Jiamei² CHEN Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China
2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Control of the air-fuel ratio (AFR) in gasoline engines is of imminent importance when aiming at minimizing calibration effort and meeting performance requirements. People have higher demands on the gasoline engine, which has less exhaust emission, better economic efficiency and favorable engine power performance. In order to keep the air-fuel ratio close to the stoichiometric value under transient conditions, AFR precise control was achieved by employing triple-step method which was easily to be implemented in engineering. The structure of the designed controller consisted of three parts: steady-state control, feed-forward control concerning the reference variations and error feedback control. When the desired AFR was a constant, the steady-state control would play a dominant role. And the feed-forward control would react immediately when the desired AFR was changed on account of the torque requirements changed. The feedback control would amendment AFR measured by the exhaust gas oxygen (EGO) sensor which can enhance the close-loop performance and rearranged into a state-dependent PI. A straightforward design process was provided, and the structure of the designed non-linear controller was easily achieved, which was comparable to those widely used in current automotive control. Furthermore, taking the implement delay of the injection into consideration, it can be compensated by feed-forward control based on predicting the intake manifold pressure. Finally, the simulation results in the environment of en-DYNA with a reasonable common four-cylinder engine model showed the efficiency of the proposed method. And the predicted intake manifold pressure was visibly advanced to that without prediction one in the simulation result.

Key words: engine; air-fuel ratio; triple-step method; mean-value model; air mass flow prediction

收稿日期: 2017-06-21 修回日期: 2017-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(61403159)和吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(2016431)

作者简介: 王萍(1982—),女,副教授,主要从事预测控制和发动机控制研究,E-mail: wangping12@jlu.edu.cn

通信作者: 陈虹(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事先进控制和汽车电子控制研究,E-mail: chenrh@jlu.edu.cn

引言

为了使汽油机在不损失动力性的前提下,尽量降低燃油的消耗,减少有害物的排放,空燃比对扭矩控制和排放控制具有重要的意义^[1]。汽油发动机的空燃比控制是根据进入气缸的空气量来调节喷油器的喷油量,从而满足空气和汽油的化学当量比,使气缸中的混合气体能完全燃烧。空燃比大于理论值的混合气称为稀混合气,气多油少,燃烧完全,油耗低,污染小,但功率较小。空燃比小于理论值的混合气称为浓混合气,气少油多,功率较大,但燃烧不完全,油耗高,污染大。在工程上,根据车辆运行工况的变化,空燃比期望值不单纯设置成理论空燃比,而是在理论空燃比附近一个区域内变化^[2-4]。当汽油机工作在瞬态工况时,由于发动机转速的瞬态变化对进气量影响很大,而氧传感器反馈的缸内空燃比具有较大传输时滞,油路的喷油器也存在执行延迟,这些因素都为瞬态空燃比精确控制带来很大困难。

目前工程上常采用查 MAP 表的方式来控制空燃比^[5]。稳态工况下,发动机空燃比的控制可以通过查取 MAP 表作为前馈并结合反馈 PID 控制来实现。瞬态工况下,采用基于查 MAP 表的开环控制策略。然而由于发动机较强的非线性,MAP 表存在误差,导致控制精度低^[6]。文献[7-8]提出了基于神经网络的模型预测控制,实现了多步预测,提高了前馈的控制精度,但在瞬态工况下,仍存在较大超调。为了提高空燃比控制精度,需要从气路和油路 2 个方面来进行研究。文献[9]采用非线性卡尔曼滤波器对瞬态工况的进气量进行估计,文献[10]利用输入估计算法估计气缸的进气量,降低了空燃比的跟踪误差。燃油湿壁效应和油路部分的执行延迟也是需要重点考虑的因素^[11-13]。考虑油路传输的湿壁效应,文献[14-15]提出了基于扩张卡尔曼滤波的自适应估计器和自适应模糊滑膜控制器来观测油膜动态特性,建立湿壁效应和油膜蒸发的模型,进一步提高了空燃比的控制精度。文献[16]中使用最小二乘的方法预测进气量,补偿了油路部分的时滞。文献[17]中采用鲁棒控制策略控制空燃比,考虑了不确定因素的影响,实现了瞬态工况下空燃比控制,但设计过程相对复杂,工程上不易实现。

文献[18]提出了一种易于工程实现的三步非线性控制器设计方法,并应用于汽油缸内直喷发动机的轨压控制,它采用工程上常见的前馈加反馈的结构,设计过程简单,控制器参数物理意义明确。考虑空燃比控制的前馈加反馈经典结构,本文提出空燃比三步非线性控制方法,兼顾稳态工况、瞬态工况

和空燃比期望值的变化。另外,针对油路执行延迟问题,通过预测进气歧管压力来预测气缸进气量,在稳态控制器中对延迟进行补偿。

1 系统建模

发动机空燃比系统分为 3 部分:进气歧管子模型、气缸进气量子模型和燃油传输子模型。系统模型如图 1 所示,均采用均值模型^[19-20]。

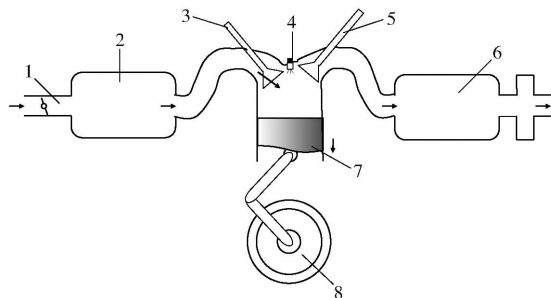


图 1 发动机系统模型

Fig. 1 System model of engine

1. 节气门 2. 进气歧管 3. 进气阀 4. 火花塞 5. 排气阀
6. 排气歧管 7. 活塞 8. 曲轴

1.1 进气歧管子模型

进气歧管子模型描述的是空气从外部进入到气缸的过程。流经节气门处的空气质量流量由节气门开度和发动机转速决定,并可以通过节气门处的空气质量流量传感器测得,记为 $\dot{m}_{th}$ (kg/s)。流入气缸的空气质量流量记为 $\dot{m}_o$ (kg/s)。则整个进气歧管内的空气质量流量 $\dot{m}_a$ (kg/s) 可表示为

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{th} - \dot{m}_o \quad (1)$$

根据理想气体方程 $p_m V_m = m_a R T_m$ (R 为气体常数, T_m (K) 和 V_m (m³) 为进气歧管的温度和体积), 对进气歧管压力 p_m (Pa) 求导, 可得

$$\dot{p}_m = \frac{RT_m}{V_m} (\dot{m}_{th} - \dot{m}_o) \quad (2)$$

定义系数 $c_0 = \frac{RT_m}{V_m}$, 则方程(2)可以改写为

$$\dot{p}_m = c_0 (\dot{m}_{th} - \dot{m}_o) \quad (3)$$

1.2 气缸进气量子模型

在均值模型中,进入气缸中的空气质量流量一般是根据速度密度法求得的。根据进气歧管压力和发动机转速,流经发动机节气门进入气缸的空气质量流量 $\dot{m}_o$ 可以表示为

$$\dot{m}_o = \frac{\eta V_c}{4\pi R T_m} p_m \omega \quad (4)$$

式中 V_c ——发动机排量, m³

η ——发动机容积效率

ω ——根据负载扭矩变化的发动机转速, rad/s

定义系数 $c_m = \frac{\eta V_c}{4\pi RT_m}$, 则方程(4)可以改写为

$$\dot{m}_o = c_m p_m \omega \tag{5}$$

1.3 燃油传输子模型

在汽油机中, 喷油器喷出的燃油由 2 部分组成, 一部分直接形成燃油蒸汽进入气缸, 另一部分则附着在进气管管壁上, 形成油膜。考虑到湿壁效应的影响, 基于微分方程, 建立了燃油传输子模型

$$\begin{cases} \dot{m}_{fc} = \tau_w \dot{m}_{fw} + (1 - \varepsilon_w) u_f \\ \dot{m}_{fw} = -\tau_w \dot{m}_{fw} + \varepsilon_w u_f \end{cases} \tag{6}$$

- 式中 u_f ——喷油器喷出的燃油质量, kg
 m_{fc} ——进入气缸的燃油质量, kg
 m_{fw} ——油膜部分的燃油质量, kg
 τ_w ——油膜挥发时间常数
 ε_w ——燃油沉积系数

根据空燃比 λ 的定义, λ 表示为

$$\lambda = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_{fc}} \tag{7}$$

以 $\dot{p}_m$ 和 $\dot{m}_{fc}$ 为系统状态变量, u_f 为控制输入, λ 为控制输出, 发动机动态特性描述为

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_{fc}} = \frac{c_m p_m \omega}{\dot{m}_{fc}} \\ \dot{p}_m = c_0 (\dot{m}_{th} - \dot{m}_o) = c_0 (\dot{m}_{th} - c_m p_m \omega) \\ \dot{m}_{fc} = -\tau_w \dot{m}_{fc} + (1 - \varepsilon_w) \dot{u}_f + \tau_w u_f \end{cases} \tag{8}$$

其中, $\dot{m}_{th}$ 和 ω 是根据节气门开度和发动机负载扭矩而变化的系统外部输入, 控制目标就是将空燃比控制在理想空燃比附近。

2 三步非线性控制器设计

空燃比三步法非线性控制系统如图 2 所示。图中 θ 为曲轴转角, T_e 为发动机指示扭矩。

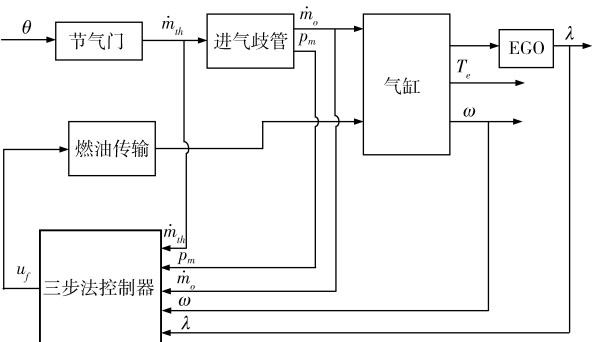


图 2 空燃比三步法非线性控制系统结构示意图
Fig. 2 Block diagram of AFR control

“三步法”控制策略包含 3 个阶段: 稳态控制、参考前馈控制和误差反馈控制。基于“三步法”的控制框图如图 3 所示。根据前面建立的系统模型,

控制目标为空燃比能跟踪期望值 λ_s 。

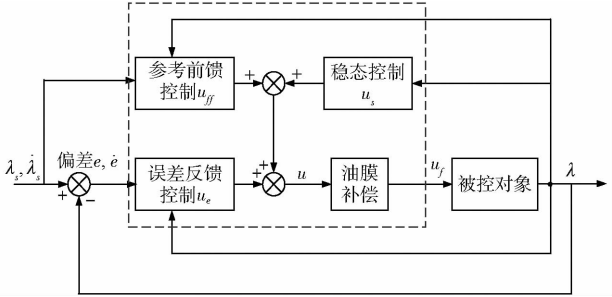


图 3 基于“三步法”的控制框图
Fig. 3 Block diagram of triple-step control scheme

2.1 稳态控制

首先设计稳态控制器, 根据式(8), 对控制器的控制输出 λ 求导

$$\dot{\lambda} = \left(\frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_{fc}} \right)' = \frac{\ddot{m}_o \dot{m}_{fc} - \dot{m}_o \ddot{m}_{fc}}{\dot{m}_{fc}^2} \tag{9}$$

根据式(3)和式(5), $\ddot{m}_o$ 可以表示为

$$\ddot{m}_o = c_m c_0 (\dot{m}_{th} - c_m p_m \omega) \omega + c_m p_m \dot{\omega} \tag{10}$$

那么, $\dot{\lambda}$ 则可以写成

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{\dot{m}_{fc}} [c_m c_0 (\dot{m}_{th} - c_m p_m \omega) \omega + c_m p_m \dot{\omega}] + \tau_w \lambda - \frac{\lambda}{\dot{m}_{fc}} [(1 - \varepsilon_w) \dot{u}_f + \tau_w u_f] \tag{11}$$

将式(11)整理为

$$\dot{\lambda} = A_0(\lambda, \dot{m}_{fc}, p_m) + B(\lambda, \dot{m}_{fc}) u \tag{12}$$

其中

$$\begin{cases} A_0(\lambda, \dot{m}_{fc}, p_m) = \frac{1}{\dot{m}_{fc}} [c_m c_0 (\dot{m}_{th} - c_m p_m \omega) \omega + c_m p_m \dot{\omega}] + \tau_w \lambda \\ B(\lambda, \dot{m}_{fc}) = -\frac{\lambda}{\dot{m}_{fc}} \\ u = (1 - \varepsilon_w) \dot{u}_f + \tau_w u_f \end{cases} \tag{13}$$

令 $\dot{\lambda} = 0$, 稳态控制 u_s 的控制律可以表示为

$$u_s = -\frac{A_0(\lambda, \dot{m}_{fc}, p_m)}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} \tag{14}$$

2.2 参考前馈控制

考虑发动机的扭矩需求, 实际发动机空燃比期望值是在理想空燃比附近区域变化的, 为了能够及时对期望值的变化做出反应, 在稳态控制的基础上, 加入参考前馈控制 u_{ff} 。假设此时的控制律为

$$u = u_s + u_{ff} \tag{15}$$

令 $\dot{\lambda} = \dot{\lambda}_s$, 则前馈控制 u_{ff} 可表示为

$$u_{ff} = \frac{1}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} \dot{\lambda}_s \tag{16}$$

2.3 误差反馈控制

由于外部干扰和建模误差的存在,稳态控制和参考前馈控制也并不能保证输出达到目标期望值,需要加入误差反馈控制 u_e 。此时的控制律为

$$u = u_s + u_{ff} + u_e \quad (17)$$

将式(17)代入到式(12)中,得到

$$\dot{\lambda} = \dot{\lambda}_s + B(\lambda, \dot{m}_{fc}) u_e \quad (18)$$

定义跟踪误差为 $e = \lambda_s - \lambda$, 对误差 e 求导

$$\dot{e} = \dot{\lambda}_s - \dot{\lambda} \quad (19)$$

将式(18)整理为

$$\dot{e} = -B(\lambda, \dot{m}_{fc}) u_e \quad (20)$$

定义李雅普诺夫函数 V 为

$$V = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} k_1 \chi^2 \quad (21)$$

其中

$$\chi = \int e dt$$

式中 k_1 ——待调整参数, $k_1 > 0$

对李雅普诺夫函数 V 求导

$$\dot{V} = e\dot{e} + 2k_1\chi\dot{\chi} = -eB(\lambda, \dot{m}_{fc}) u_e + k_1 e \chi \quad (22)$$

为了使系统渐进稳定,即 $\dot{V} \leq 0$, 设计 u_e 为

$$u_e = \frac{k_0}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} e + \frac{k_1}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} \chi \quad (23)$$

式中 k_0 ——待调整参数, $k_0 > 0$

综合式(14)、(16)、(23), 得到最终的虚拟控制律为

$$\begin{aligned} u = u_s + u_{ff} + u_e = & -\frac{A_0(\lambda, \dot{m}_{fc}, p_m)}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} + \frac{1}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} \dot{\lambda}_s + \\ & \frac{k_0}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} e + \frac{k_1}{B(\lambda, \dot{m}_{fc})} \int e dt \end{aligned} \quad (24)$$

3 进气歧管压力预测

在实际的发动机控制系统中,从发动机喷油指令的更新到实际喷出燃油的执行存在一定的时间延时。根据式(8),期望进入气缸的燃油量可以近似表示为

$$\dot{m}_{fc} \approx \frac{\dot{m}_o}{\lambda_s} \quad (25)$$

从式(25)中可以看到,油路部分中进入气缸的燃油量和进入气缸的空气量有着直接关系。假定喷油指令的延时是 2 个采样周期,为了补偿油路部分的执行延迟,则需要对进入气缸的空气量进行 2 步预测。根据式(5),对进入气缸的进气量的预测可以转换为对进气歧管压力的预测。此时的空燃比控制系统结构示意图如图 4 所示。

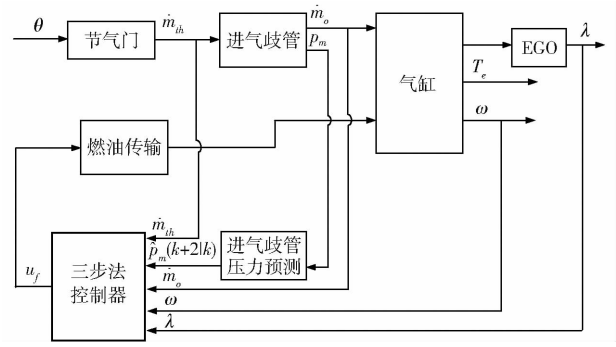


图 4 带有进气歧管压力预测的空燃比控制系统示意图

Fig. 4 Block diagram of AFR control with intake manifold prediction

本文研究的是四缸发动机,将式(2)在曲轴转角域内每 180° 进行离散化,采样周期 T 为

$$T = \frac{1}{2} \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\pi}{\omega} \quad (26)$$

假设通过节气门的空气质量流量 $\dot{m}_{th}$ 和发动机转速 ω 在未来的 2 个采样周期内保持不变,则进气歧管压力可表示为

$$p_m(k+1) = (1-a_2)p_m(k) + a_1 \frac{\dot{m}_{th}(k)}{w(k)} \quad (27)$$

其中

$$a_1 = \frac{\pi RT_m}{V_m} \quad a_2 = \frac{V_c \eta}{4V_m}$$

因为要预测 2 个采样周期的进气歧管压力,将式(27)中的 $p_m(k)$ 用 $p_m(k+1)$ 代替,则 $p_m(k+2)$ 可以表示为

$$p_m(k+2) = (1-a_2)^2 p_m(k) + a_1(2-a_2) \frac{\dot{m}_{th}(k)}{w(k)} \quad (28)$$

在实际工况中,参数 a_1 、 a_2 会根据不同工况而变化,需要通过最小二乘法来辨识这 2 个参数,辨识值可用 $\hat{a}_1$ 、 $\hat{a}_2$ 来表示。因此,两步的进气歧管压力预测可整理为

$$\begin{cases} \hat{p}_m(k+1|k) = (1-\hat{a}_2)p_m(k) + \hat{a}_1 \frac{\dot{m}_{th}(k)}{w(k)} \\ \hat{p}_m(k+2|k) = (1-\hat{a}_2)^2 p_m(k) + \hat{a}_1(2-\hat{a}_2) \frac{\dot{m}_{th}(k)}{w(k)} \end{cases} \quad (29)$$

根据式(2)以及式(29)得到的 $\hat{p}_m(k+1|k)$ 和 $\hat{p}_m(k+2|k)$, 对 $\dot{p}_m$ 使用一阶后向差分法将其进行离散化为

$$\frac{\hat{p}_m(k+2|k) - \hat{p}_m(k+1|k)}{T} = c_0 [\dot{m}_{th}(k+2) - \hat{\dot{m}}_o(k+2|k)] \quad (30)$$

整理式(30),并代入采样周期,则 $\hat{\dot{m}}_o(k+2|k)$ 可以表示为

$$\hat{\dot{m}}_o(k+2|k) = \dot{m}_{th}(k) - \frac{\omega}{\pi c_0} \hat{p}_m(k+2|k) + \frac{\omega}{\pi c_0} \hat{p}_m(k+1|k)$$

(31)

根据式(25)和式(31),考虑油路执行延时的 $\dot{m}_{fc}(k+2)$ 可以表示为

$$\dot{m}_{fc}(k+2) = \frac{\hat{\dot{m}}_o(k+2|k)}{\lambda_s(k)}$$

(32)

为了得到最终的控制律,将式(24)离散化为

$$u = u_s + u_{ff} + u_e = -\frac{A_0(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k), p_m(k))}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k))} + \frac{1}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k))} \frac{\omega(k)(\lambda_s(k) - \lambda_s(k-1))}{\pi} + \frac{k_0}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k))} e(k) + \frac{k_1}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k))} \sum_{j=0}^k e(k_j)$$

(33)

用 $\dot{m}_{fc}(k+2)$ 代替 $\dot{m}_{fc}(k)$,考虑油路执行延时的三步非线性控制律为

$$u = u_s + u_{ff} + u_e = -\frac{A_0(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k+2), p_m(k))}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k+2))} + \frac{1}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k+2))} \frac{\omega(k)(\lambda_s(k) - \lambda_s(k-1))}{\pi} + \frac{k_0}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k+2))} e(k) + \frac{k_1}{B(\lambda(k), \dot{m}_{fc}(k+2))} \sum_{j=0}^k e(k_j)$$

(34)

4 仿真验证

在 TESIS 公司开发的 enDYN 虚拟发动机软件中对所设计的控制系统进行仿真验证。为验证在发动机瞬态工况下,基于“三步法”设计的空燃比控制器的控制效果,选取四缸汽油机模型。在仿真结果中,期望空燃比的变化曲线如图 5 所示,对期望空燃比做归一化处理,当发动机转速或节气门开度较大时,期望空燃比为 1.05;当发动机转速或节气门开度较小时,期望空燃比为 0.95;其他工况下期望空燃比为 1。

4.1 进气歧管压力预测

进气歧管压力预测结果如图 6 所示。由图 6 可以看到,经过预测后的进气歧管压力比原有的进气歧管压力超前一些。

4.2 变发动机转速

为了更直观地表现出“三步法”控制策略的控

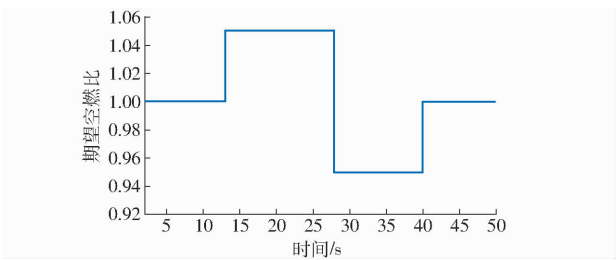


图 5 期望空燃比变化曲线
Fig. 5 Changing curve of reference AFR

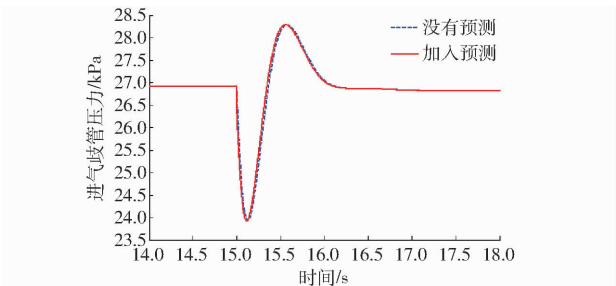


图 6 进气歧管压力预测结果
Fig. 6 Prediction of intake manifold pressure

制效果,采取相同的工况,与文献[21]中的空燃比反馈调节控制方法做了对比,并模拟了 2 种发动机工况。

在变发动机转速工况下,设定节气门开度维持在 30°不变,发动机转速在 1 200 ~ 2 000 r/min 之间变化,模拟加速和减速的过程,如图 7 所示。空燃比跟踪曲线、进入气缸进气量曲线以及燃油喷射量曲线如图 8 ~ 10 所示。

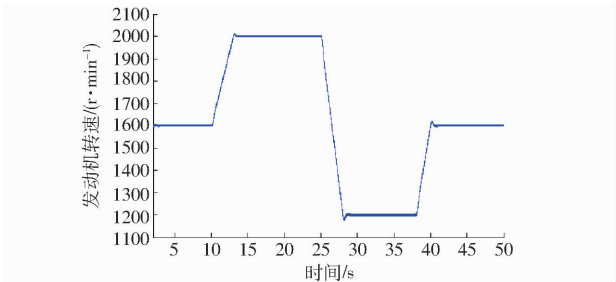


图 7 转速变化曲线
Fig. 7 Changing curve of engine speed

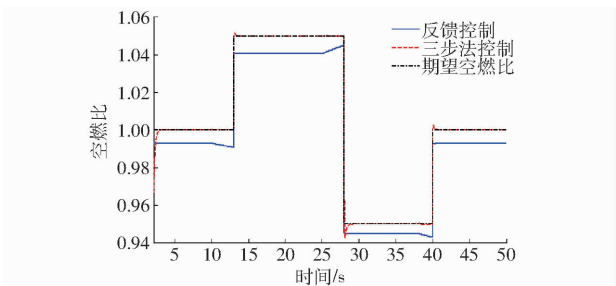


图 8 空燃比跟踪曲线
Fig. 8 Tracking curves of AFR

从图 8 中可以看到,“三步法”控制器的稳态误差比反馈调节器的稳态误差要小,可以将空燃比控制在期望空燃比附近一个很窄的范围内,同时在转

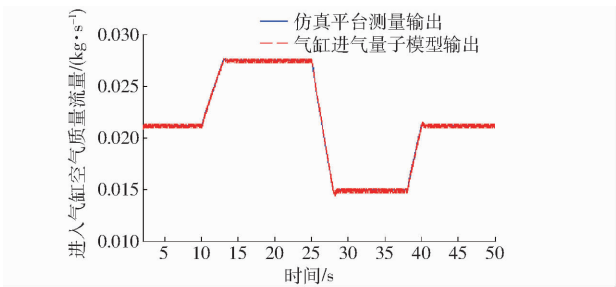


图 9 气缸进气量估计

Fig. 9 Estimation of air mass flow into cylinder

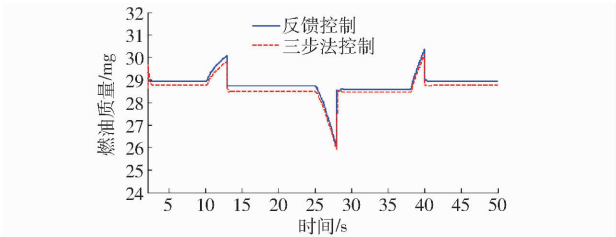


图 10 喷嘴的喷油量

Fig. 10 Fuel injection

速产生变化时,空燃比的超调量也比较小。

4.3 变节气门开度

在变节气门开度工况下,设定发动机转速维持 1 200 r/min 不变,节气门开度在 15°~30°之间变化,如图 11 所示。空燃比跟踪曲线、进入气缸进气量曲线以及燃油喷射量曲线图 12~14 所示。

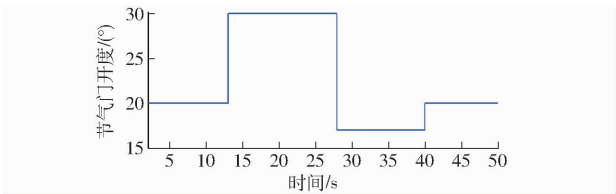


图 11 节气门开度变化曲线

Fig. 11 Changing curve of throttle angle

由图 12 可以看出,2 个控制器都能将空燃比控制在期望空燃比附近,但当节气门开度突变时,普通反馈调节器的超调更加明显,“三步法”控制器能够使空燃比经过一个很小的超调后,快速回到稳态。由此可见,基于“三步法”设计的控制器不仅设计步骤简单,而且控制效果良好。

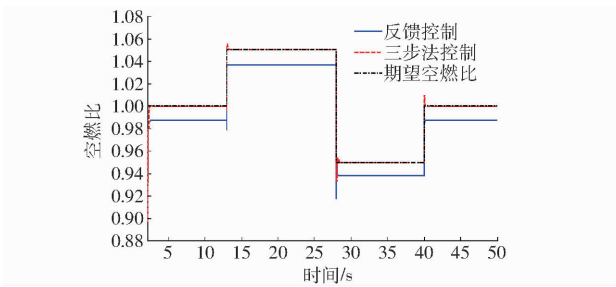


图 12 变节气门开度空燃比跟踪曲线

Fig. 12 Tracking curves of AFR

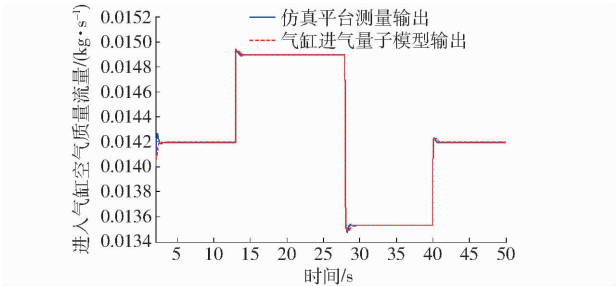


图 13 变节气门开度气缸进气量估计

Fig. 13 Estimation of air mass flow into cylinder

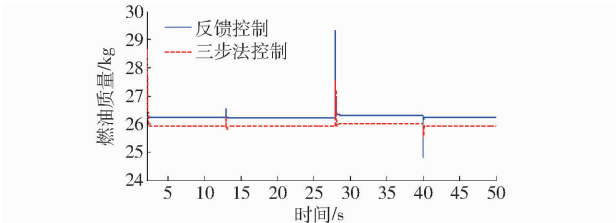


图 14 变节气门开度喷嘴的喷油量

Fig. 14 Fuel injection

5 结束语

本文首先针对油路部分的延迟,对进气歧管压力作了 2 步预测,从而使进入气缸进气量的估计得到改善,补偿了油路部分的时滞。其次,为了更好地跟踪瞬态工况下的空燃比,基于“三步法”控制方法设计了空燃比控制器。在仿真平台 enDYNA 四缸发动机模型下,验证了控制器的跟踪性能,并与普通反馈调节控制器作了对比。结果表明“三步法”控制器的稳态误差和瞬态误差都比较小,响应迅速,跟踪效果好。

参 考 文 献

- 刘丽萍,王祝炜,张振东,等. 电控汽油机满足未来排放和经济性要求的研究[J]. 农业机械学报,2000,31(1):119-122.
LIU Liping, WANG Zhuwei, ZHANG Zhendong, et al. Study on required economy and mession of futrue electronic-controlled gasoline engines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2000,31(1):119-122. (in Chinese)
- PAK. Model predictive engine air-ratio control using online sequential extreme learning machine[J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(1): 79-92.
- GILLES T. Automotive service: inspection, maintenance, repair [M]. Cengage Learning, 2012.
- ZMUDKA Z, POSTRZEDINK S. Inverse aspects of the three-way catalytic converter operation in the spark ignition engine[J]. Journal of KONES, 2011, 18: 509-516.
- 万里平,蒋炎坤,郭岩,等. 基于油耗和空燃比的汽油机充气效率测定方法[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(3):32-36,

25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140306&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.006.
- WAN Liping, JIANG Yankun, GUO Yan, et al. Gasolin engine charge-efficiency measuring based on fuel consumption and AFR test[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(3):32-36,25. (in Chinese)
- 6 刘晓亮,王生昌,李茂月. 汽油机空燃比控制和时间延迟的研究[J]. 公路与汽运, 2008(2):11-14.
- LIU Xiaoliang, WANG Shengchang, LI Maoyue. Study on air fuel ratio control and time delay of gasoline engine[J]. Highways and Automotive Applications, 2008(2):11-14. (in Chinese)
- 7 WANG S W, YU D L, GOMM J B, et al. Adaptive neural network model based predictive control for air-fuel ratio of SI engines[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2006, 19(2):189-200.
- 8 王莉,刘晓新,李万众. 稀燃汽油机瞬态空燃比的滑模-神经网络控制[J]. 农业机械学报,2007,38(10):1-4.
- WANG Li, LIU Dexin, LI Wanzhong. Sliding mode-neural network control for transient air-fuel ratio of lean burn gasoline engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(10):1-4. (in Chinese)
- 9 冯煜,焦晓红. 汽油机非线性卡尔曼滤波暂态进气量估计及空燃比控制[J]. 控制理论与应用, 2015,32(4):546-553.
- FENG Yu, JIAO Xiaohong. Transient cylinder air charge estimation with nonlinear Kalman filter for air-fuel ratio control of gasoline engines[J]. Control Theory and Applications, 2015,32(4):546-553. (in Chinese)
- 10 ALEXANDER S. Application of input estimation techniques to charge estimation and control in automotive engines [J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(12):1371-1383.
- 11 洪木南,李建秋,欧阳明高. 汽油机油膜模型参数辨识[J]. 农业机械学报,2010,41(11):26-30.
- HONG Munan, LI Jianqiu, OUYANG Minggao. Parameters identification of the fuel film model for spark ignition engines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(11):26-30. (in Chinese)
- 12 KHAJOMTRAIDET C, ITO K. Simple adaptive air-fuel ratio control of a port injection SI engine with a cylinder pressure sensor [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2015, 13(2):141-150.
- 13 ZHANG J, SHEN T, XU G, et al. Wall-wetting model based method for air-fuel ratio transient control in gasoline engines with dual injection system [J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14(6):867-873.
- 14 ARSIE I, PIANESE C, RIZZO G, et al. An adaptive estimator of fuel film dynamics in the intake port of a spark ignition engine [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(3):303-309.
- 15 王立标,李岳林. 瞬态空燃比的自适应模糊滑模补偿控制[J]. 台州学院学报,2016,38(3):23-29.
- WANG Libiao, LI Yuelin. Adaptive fuzzy sliding mode compensation control for engine transient air fuel ratio[J]. Journal of Taizhou University, 2016,38(3):23-29. (in Chinese)
- 16 赵亚楠. 发动机暂态进气量估计研究及实验验证[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2013.
- ZHAO Yanan. Air charge estimation under transient mode for SI engines and its experimental verification[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013. (in Chinese)
- 17 石向南,邓元望,朱浩. 电喷发动机过渡工况空燃比鲁棒控制研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2010,37(9):19-23.
- SHI Xiangnan, DENG Yuanwang, ZHU Hao. Research on the transient air fuel ratio control of SI engine based on robust control theory[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010,37(9):19-23. (in Chinese)
- 18 CHEN Hong, GONG Xun, LIU Qifang, et al. Triple-step method to design non-linear controller for rail pressure of gasoline direct injection engines[J]. Control Theory and Applications Iet, 2014, 8(11):948-959.
- 19 HENDRICKS E, SORENSON S C. Mean value modelling of spark ignition engines[C]. SAE Technical Paper,1990.
- 20 ELBERT H, VESTERHOLM H. The analysis of mean value SI engine models[C]. SAE Technical Paper,1992.
- 21 JIAO Xiaohong, SHEN Tielong. Lyapunov-design of adaptive air-fuel ratio control for gasoline engines based on mean-value model [C]//Control Conference (CCC), 2011 30th Chinese. IEEE, 2011:6146-6150.