

# 稀燃汽油机瞬态空燃比的滑模-神经网络控制\*

王 莉 刘德新 李万众

**【摘要】** 提出了稀燃汽油机空燃比滑模-神经网络控制方案,采用滑模变结构控制对稀燃工况的空燃比进行反馈控制,采用神经网络实现对进气量的精确预测和油膜动态特性的前馈补偿,进而实现对稀燃发动机瞬态空燃比的精确控制。采用自行开发的电控系统,在一台稀燃发动机上进行了瞬态空燃比实验。实验结果表明:节气门急速变化时空燃比超调可以控制在1个空燃比单位以内,调整时间不超过3s;转速越低,节气门变化越剧烈;空燃比超调越大,调整时间越长。

**关键词:** 汽油机 稀薄燃烧 瞬态空燃比 神经网络 滑模变结构控制

**中图分类号:** TK411<sup>+</sup>.25 **文献标识码:** A

## Sliding Mode-neural Network Control for Transient Air-fuel Ratio of Lean Burn Gasoline Engine

Wang Li Liu Dexin Li Wanzhong  
(Tianjin University)

### Abstract

To meet the special requirement of the transient air-fuel ratio control for lean burn engine, a sliding mode-neural network control scheme was presented. The sliding variable structure control strategy has been provided as feedback to control the air-fuel ratio. At the same time, the neural network method was applied to build the intake air flow observer and realize the instantaneous fuel compensation as feedforward. By way of employing the engine control system that developed by ourselves, the lean burn engine air-fuel ratio control experiments were carried out on a lean burn gasoline engine. The experiments results showed that the maximal overshoot of air-fuel ratio is one AFR unit and the longest transient period is less than 3 seconds when the throttle body moves rapidly. The more slowly the engine worked, the more rapidly the throttle body moved; the bigger the overshoot of air-fuel ratio was, the longer the transient period would be.

**Key words** Gasoline engine, Lean burn, Transient air-fuel ratio, Neural network, Sliding mode variable structure control

### 引言

与普通发动机相比,稀燃发动机在过渡工况时所产生的瞬态空燃比相对于目标空燃比的偏离将更易引起失火,从而直接对发动机的排放性能、燃油经济性和过渡工况的驱动性能产生很大的消极影响。

因此,本文综合几种控制方法的特点<sup>[1]</sup>,提出了一个稀燃汽油机空燃比滑模-神经网络控制方案,该方案采用滑模变结构控制对稀燃工况的空燃比进行反馈控制,采用神经网络处理发动机模型中的非线性环节,实现对瞬态过程中实际进入气缸内进气量的精确预测和进气管内油膜动态特性的前馈补偿,从而

收稿日期:2007-01-17

\* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50322261)

王 莉 天津大学机械工程学院 博士后,300072 天津市

刘德新 天津大学机械工程学院 副教授

李万众 天津大学机械工程学院 工程师

实现对稀燃发动机瞬态空燃比的精确控制。

## 1 系统总体控制方案

系统总体结构如图1所示,主要包括滑模控制、进气观测以及瞬态喷油补偿3部分。其中瞬态喷油补偿起前馈作用,由神经网络实现,主要在节气门快速运动,即急过渡过程中起作用,用以补偿在节气门快速开关时气道内油膜的变化,削弱空燃比变化的尖峰;滑模控制主要用于决定“准稳态”(节气门开度保持一定或缓慢变化)时喷油量。当节气门开度迅速变化时,单纯使用滑模控制会造成空燃比的超调过大,此处使用神经网络瞬态喷油补偿。发动机进气量的准确预测是精确控制空燃比的前提,鉴于每循环进入气缸的空气量是无法直接测量的,此处构造进气观测器,以神经网络实现。

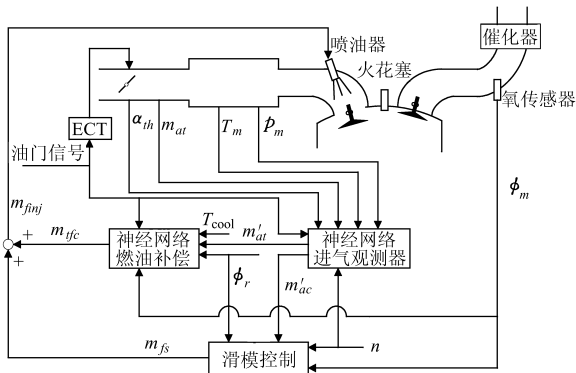


图1 系统总体框图

Fig. 1 Structure of the control system

图中  $\alpha_{th}$ ——节气门开度  $T_m$ ——进气温度  
 $m_{at}$ ——节气门处空气质量  
 $p_m$ ——进气歧管压力  
 $T_{cool}$ ——冷却水温  $n$ ——发动机转速  
 $m'_{at}$ ——节气门处空气质量观测值  
 $\phi_m$ ——UEGO 测到的混合气质量分数  
 $\phi_r$ ——混合气质量分数目标值  
 $m'_{ac}$ ——进气门处空气质量观测值  
 $m_{fs}$ ——滑模控制的喷油量  
 $m_{tfc}$ ——神经网络补偿的喷油量  
 $m_{finj}$ ——实际控制的喷油量

## 2 空燃比的滑模变结构控制

在滑模变结构控制中,以离散指数趋进律为求解滑模控制的基础。即

$$s(k+1) = s(k) - qTs(k) + \varepsilon T \operatorname{sgn}(s(k)) \quad (1)$$

( $q > 0, \varepsilon > 0, qT < 1$ )

式中  $T$ ——采样周期  $q, \varepsilon$ ——可选参数

对稀燃发动机的空燃比控制,主要的目标是使

排气氧传感器检测到的空燃比达到目标值,使排气后处理装置能够发挥最大效率。因此取切换函数

$$s(k) = \phi_m(k) - \phi_r \quad (2)$$

控制目标为  $s(k) = 0$

利用离散指数趋进律

$$s(k+1) = \phi_m(k) - \phi_r - qT(\phi_m(k) - \phi_r) + \varepsilon T \operatorname{sgn}(\phi_m(k) - \phi_r)$$

可解得  $m_{fc}(k) =$

$$\left[ \frac{\phi_m(k)(1 - \gamma_0 - qT) + \phi_r qT + \varepsilon T \operatorname{sgn}(\phi_m(k) - \phi_r)}{(A/F)_s} - \gamma_1 \frac{m_{fc}(k-1)}{m_{ac}(k-1)} \right] \frac{m_{ac}(k)}{\gamma_2}$$

式中  $m_{fc}(k)$ ——进入气缸的燃油量

$\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ ——线性空燃比传感器的模型参数,

可通过实验得到

稀燃发动机的燃油回路模型借鉴目前广泛采用的油膜蒸发模型<sup>[2]</sup>,得到二次喷油稀燃发动机<sup>[3]</sup>燃油回路模型,离散化并简化可得差分方程为

$$\begin{cases} m_{fc}(k) = f_\beta m_{fp}(k) + f_a X m_{fi}(k) + (1-X)m_{fi}(k) \\ m_{fp}(k+1) = (1-f_\beta)m_{fp}(k) + (1-f_a)X m_{fi}(k) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $m_{fp}(k)$ ——壁面油膜内的燃油量

$m_{fi}(k)$ ——每循环喷油量

$X$ ——第一次喷油所占的比例

$f_a, f_\beta$ ——与冷却水温及转速相关的处理系数,通过标定得到

该模型在喷油量的变化不太剧烈时可达一定精度,可以满足滑模控制起主导作用的“准稳态”的控制。只要进气观测模块能准确地预测  $m_{ac}(k)$ ,即可解得  $m_{fi}(k)$ ,即滑模控制的喷油量  $m_{fs}(k)$ 。

## 3 神经网络进气观测

神经网络进气观测模块以进气回路模型<sup>[4]</sup>为基础,在线预测节气门处空气流量,并以此流量为输入,构造神经网络进气观测器,以实现对实际进入气缸的空气量的预测。进气回路模型为

$$\begin{cases} \dot{m}_{at} = C_d A p_0 \sqrt{\frac{2}{RT_0}} \phi \\ \dot{m}_{ac} = \frac{\eta_{vol} V_d n}{120 RT_m} p_m \end{cases} \quad (4)$$

式中  $T_0$ ——大气温度  $p_0$ ——大气压力

$R$ ——普适气体常数  $\eta_{vol}$ ——充气效率

$m_{ac}$ ——进气门处空气质量

$V_d$ ——发动机排量

其中

$$\phi = \psi\left(\frac{p_m}{p_0}\right) =$$

$$\begin{cases} \left(\frac{p_m}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{p_m}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} & \left(\frac{p_m}{p_0} < 0.528\right) \\ \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa+1}} & \text{(其他)} \end{cases}$$

式(4)中  $C_d A$  是节气门处空气流量模型的非线性环节,是节气门开度  $\alpha_{th}$  的非线性函数,采用神经网络进行辨识。输入为节气门开度  $\alpha_{th}$ ,该网络训练采用完全离线的方式进行,对应不同的节气门开度  $\alpha_{th}$  测量每循环流经节气门的空气质量  $m_{ai}(k)$ ,与通过神经网络计算得到的  $m'_{ai}(k)$  相比,得到误差信号。训练得到的  $C_d A$  关于  $\alpha_{th}$  的非线性关系用于在线的预测节气门处空气质量流量  $m_{ai}(k)$ 。 $\eta_{vol}$  是非线性环节,是  $p_m$  和  $n$  的函数。

构造神经网络观测器以预测进入气缸的空气量。结构如图 2 所示。神经网络观测器的输入为  $m'_{ai}(k)$ 、 $T_m$ 、 $n$ ,输出为每循环流经进气门的空气质量  $m'_{ac}(k)$ 。网络结构采用 3:5:1 的 BP 网络。神经元的激活函数采用双曲正切函数。

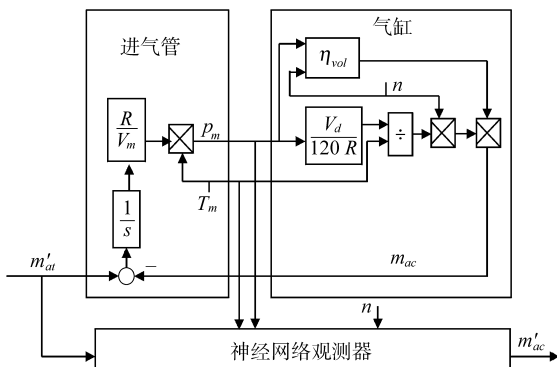


图 2 神经网络进气观测器

Fig. 2 Outline of the neural network intake air flow observer

其中  $m'_{ai}(k)$  由前述计算得到,  $T_m$ 、 $n$  由发动机测量得到。利用观测器得到的  $m'_{ai}(k)$ 、 $m'_{ac}(k)$  可计算得  $p'_m$ , 与测量得到的  $p_m$  实际值构成误差信号,用以对神经网络观测器进行训练。BP 网络的学习采用误差反向传播算法,学习过程分离线和在线 2 个阶段进行。兼顾了神经网络对发动机状态偏移的自适应性和控制系统的计算能力。离线阶段得到发动机初始状态的辨识结果,发动机在运行过程中的老化现象通过神经网络的定期学习得到处理。这种定期学习运算实时性要求不高,降低了神经网络在线学习对控制系统计算能力的要求。

#### 4 神经网络瞬态燃油补偿

空燃比滑模变结构控制在节气门开度缓慢变化

的情况下能够得到较为理想的控制结果。然而,当节气门开度快速变化时仍然会产生较大的超调,这主要是由于对油膜传输特性的描述并非完全精确引起的。因此,考虑采用神经网络的方法对节气门快速变化的瞬态燃油量进行补偿。

燃油蒸发过程是一个滞后过程,因此,瞬态燃油补偿的输入应选择超前于进气量  $m_{ac}(k)$  的量。瞬态燃油补偿量的加减和大小是同节气门开度的变化率  $\dot{\alpha}_{th}$ 、 $m_{ai}(k)$  和  $T_{cool}$  相关的,因此,选择这 3 个量作为瞬态燃油补偿模块的输入。瞬态燃油补偿模块也采用结构为 3:5:1 的 BP 网络,隐层为 1 层,神经元个数为 5,激活函数仍为双曲正切函数,输出为瞬态燃油补偿量  $m_{tfc}(k)$ 。可得到发动机的实际喷油量为

$$m_{finj}(k) = m_{fs}(k) + m_{tfc}(k)$$

该神经网络的训练也采用离线加在线的方式,同进气量神经网络观测器类似,仍然采用误差反向传播算法,误差信号由线性氧传感器提供。离线学习时测取不同的过渡过程曲线,由氧传感器信号  $\phi_m$  和实际进气量  $m_{ac}$  以及目标空燃比计算目标  $m_{tfc}$ ,通过与神经网络的输出比较,得到误差信号。

#### 5 实验结果

稀燃发动机空燃比控制实验在一台丰田 8A 发动机上进行,根据实验结果,丰田 8A 发动机原机即具有很强的稀燃能力,采用每缸顺序喷射的二次喷油方式实现准均质燃烧,可使稀燃极限达到 23.5,完全可以满足稀燃实验的要求<sup>[5]</sup>。控制单元采用自行开发的稀燃发动机电控开发系统,线性空燃比传感器采用日本 NGK 公司生产的线性空燃比检测系统。

进气流量神经网络观测器的训练过程取为发动机的稳态工况。节气门在全开与全关之间取 40 个点,转速在 1 000~6 000 r/min 之间每 500 r/min 取一点,冷却水温在 -30℃、30℃ 和 90℃ 各取一点构成网格对网络进行训练。过渡过程喷油补偿神经网络的训练过程取为欧洲排放测试循环,测试过程取为自由提速减速过程。

在发动机空燃比控制实验中,测试工况选尽量接近实际使用的工况。由于节气门的开度超过 80% 之后其变化对进气的影响不大,因此过渡过程都是在节气门开度不太大的情况下进行的。实验还测取发动机原机 ECU 的响应曲线,用以同自行开发的稀燃电控系统滑模-神经网络控制结果相对比。

图 3 为节气门开度在 10%~25% 之间阶跃变换时控制结果的对比。其中,图 3a 为转速 1 800 r/min、节气门开度为 10% 时发动机原机

ECU 的过渡过程空燃比响应曲线。从图中可以看出,由于采用开关型氧传感器,空燃比在稳态情况下仍在 14.7 附近呈振荡状态,过渡过程最大超调达到了 2.5 个空燃比单位,调整时间为 4~5 s。图 3b 为转速 1 800 r/min、节气门开度为 10%,目标空燃比为 20 时采用滑模-神经网络控制的空燃比响应曲线。与发动机原机 ECU 的控制结果相比,空燃比的稳态控制结果有明显改善,基本稳定在目标空燃比附近,空燃比的超调有明显下降,最大值也在 1 个空燃比单位之内,调整时间也有所减少,一般在 3 s 以内。图 3c 为转速 3 000 r/min 时,节气门开度在 10%~25% 之间变换的滑模-神经网络控制空燃比过渡过程响应曲线。从图中可以看出,该工况下的空燃比过渡过程较为理想,空燃比超调在 0.2~0.3 个空燃比单位之间且响应速度很快,在 1 s 以内。这是因为转速的提高同时也提高了喷油的频率,加快了

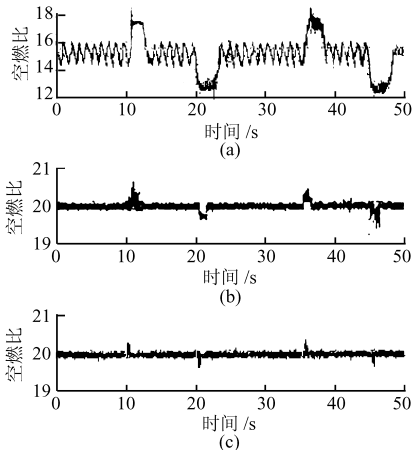


图3 节气门开度在 10%~25% 的控制结果对比  
Fig. 3 Control result when throttle opening changed between 10%~25%

- (a) 转速 1 800 r/min,原机 ECU 控制空燃比响应曲线  
(b) 转速 1 800 r/min,神经网络-滑模控制空燃比响应曲线  
(c) 转速 3 000 r/min,神经网络-滑模控制空燃比响应曲线

空燃比调整的速度。

图 4 为转速 1 800 r/min,平稳加、减速时控制结果的对比。其中,图 4a 为车用发动机 ECU 的空燃比响应曲线,图 4b 为滑模-神经网络控制空燃比过渡过程响应曲线。从图中可以看出,在车用发动机 ECU 控制中,空燃比在加减速时分别会保持长达 10 s 左右的偏稀或是偏浓状态,在滑模-神经网络控制方案中,空燃比始终保持稳定在 22,是比较理想的结果。

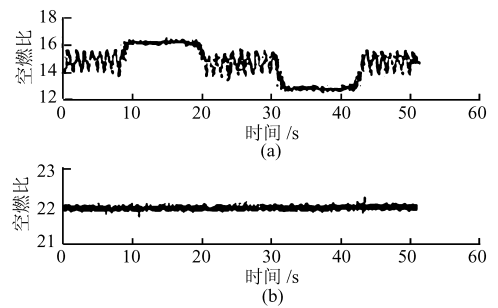


图4 平稳加减速控制结果对比

Fig. 4 Control result when throttle opening changed smoothly

- (a) 转速 1 800 r/min,原机 ECU 控制空燃比响应曲线  
(b) 转速 1 800 r/min,神经网络-滑模控制空燃比响应曲线

## 6 结论

(1)采用滑模-神经网络方案对稀薄燃烧发动机瞬态空燃比进行控制可以缩短过渡过程调整时间,并降低空燃比超调。节气门开度平稳变化时可以达到将空燃比稳定控制在某一点的水平,大大优于车用 ECU 的控制结果。

(2)节气门急速变化时的空燃比超调可以控制在 1 个空燃比单位以内,调整时间不超过 3 s。

(3)转速越低,节气门变化越剧烈;空燃比超调越大,调整时间越长。

## 参 考 文 献

- 杨斌,王绍铤. 瞬态空燃比控制策略研究及智能控制的应用[J]. 内燃机工程,2002,23(5):12~13.
- Powell J David, Fekete N P, Chang Chenfang. Observer-based air-fuel ratio control[J]. IEEE Control System Magazine, 1998, 18(5): 72~83.
- Liu Shuliang, Fan Yongjian, Pei Pucheng. Twice electronic fuel injection (TEFI)——a new idea of lean combustion in S. I. engines[C]. SAE Paper 2000-01-1087,2000.
- Hendricks E, Sorenson S C. Mean value modeling of spark ignition engine[C]. SAE Paper 900616,1990.
- 王莉. 准均质稀薄燃烧发动机的建模与控制[D]. 天津:天津大学,2003.
- 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京:科学出版社,1996.
- 陈渝光,李山,廖仕利,等. 基于遗传算法的发动机多元回归控制模型[J]. 农业机械学报,2006,37(6):9~12.