

# 基于喷射量波动的燃气发动机 空燃比自适应控制器设计

孔雪艳<sup>1</sup>,杨君<sup>1</sup>,王明杰<sup>2</sup>,王健<sup>1</sup>,黄万友<sup>1</sup>

1. 山东交通学院 汽车工程学院,山东 济南 250357;2. 山东交通学院 机动车检测实验中心,山东 济南 250357

**摘要:**为降低燃气喷射量波动对空燃比的影响,设计基于喷射量波动的燃气发动机空燃比自适应控制器。采用李雅普诺夫方法来确定控制律参数,利用 Matlab/Simulink 仿真平台,搭建天然气发动机空燃比控制模型。通过仿真验证3种运行工况下该自适应控制器的有效性。结果表明,当发动机燃气喷射量波动时,自适应控制器可以将燃气发动机的空燃比控制在理想值附近,有效降低燃气喷射量不确定对空燃比控制精度的影响。

**关键词:**燃气发动机;喷射量波动;空燃比;自适应控制

中图分类号:TK431

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)03-0035-06

**引用格式:**孔雪艳,杨君,王明杰,等. 基于喷射量波动的燃气发动机空燃比自适应控制器设计[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(3):35-40.

KONG Xueyan, YANG Jun, WANG Mingjie, et al. Design of air-fuel ratio adaptive controller based on injection quantity fluctuation for gas engine [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39 (3):35-40.

## 0 引言

天然气凭借安全可靠、经济实惠、污染小等优势成为车用清洁燃料的主力之一,为带动社会经济发展、促进环境改善提供了新的驱动力。与柴油机相比,同一功率下的天然气发动机燃烧成本更低,且天然气不含一氧化碳,燃烧后产生的二氧化碳、氮氧化物等排放较少。天然气发动机的排放受空燃比影响较大,因此对天然气发动机控制系统准确性要求日渐提升,发动机故障诊断与自适应控制也受到了更为广泛的关注。

王春禄等<sup>[1]</sup>针对燃气发动机在控制模块、进气方式、混合方式等方面的差异,对不同形式燃气发动机的空燃比控制原理进行了较为详细的解读;Li等<sup>[2]</sup>研究了汽油直喷发动机空燃比调节问题,为减少空燃比调节时间,设计了一种比例积分(proportional integral, PI)模糊知识控制器,并通过试验验证了其有效性;杨君等<sup>[3]</sup>研究了燃气发动机废气再循环的随机调节问题,设计了一种随机调节器实现对缸内废气总质量的调节,并对调节器进行了仿真验证;崔宏宇等<sup>[4]</sup>分析了单燃料燃气发动机的空燃比控制问题,设计了PI控制器,通过调整燃气供给量控制空燃比,并对该控制系统进行数值仿真研究,结果表明该控制器具有较强的鲁棒性,可以将空燃比控制在理论值附近;Song等<sup>[5]</sup>建立汽油机空燃比模型,设计了一款空燃比控制器,通过调整模型参数减小误差和干扰,缩短空燃比的稳定时间,解决发动机空气流量估计不确定性和废气传输延迟问题,并通过汽油机试验台进行了试验验证;Yang等<sup>[6]</sup>研究了在沼气中甲烷浓度不确定情况下的空燃比控制问题,在自适应律的基础上设计了考虑残留气体随机性的随机自适应控制器,

收稿日期:2022-07-20

基金项目:山东省高等学校青创科技计划项目(2020KJB002);山东省交通运输厅科技计划项目(2020B94)

第一作者简介:孔雪艳(1996—),女,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为汽车运行安全与节能环保,E-mail:3099989432@qq.com。

估计理论空燃比,并通过仿真研究验证了该控制器的有效性;张腾等<sup>[7]</sup>分析了天然气发动机过量空气系数、尾气中污染气体的浓度等因素对  $\text{NH}_3$  排放的影响,比较分析了 3 种  $\text{NH}_3$  排放控制方法,最后提出了采用三效催化转化器和  $\text{NH}_3$  逃逸催化器方案对国六发动机的  $\text{NH}_3$  排放进行控制处理;Arslan 等<sup>[8]</sup>研究了内燃机在噪声和故障条件下的空燃比控制问题,提出了一种主动容错控制系统来控制空燃比,使系统在故障条件下仍能保持稳定,仿真结果表明,主动容错控制系统在故障条件下可以保持良好的空燃比,并且对噪声具有鲁棒性;Yang 等<sup>[9]</sup>考虑到残余气体份数的随机循环变化,提出了一种空燃比随机最优控制方案,利用残余气体份数的空燃比动态模型设计出最优控制器,并通过仿真和试验验证了控制方案的有效性;Yang 等<sup>[10]</sup>研究了压缩天然气发动机的空燃比调节问题,利用压缩天然气发动机的动态模型,设计了一款随机鲁棒空燃比调节器,抑制新鲜空气的不确定性波动,进而实现对空燃比的精确控制,并通过数值模拟验证调节器的性能;Shamekhi 等<sup>[11]</sup>设计了一种具有自适应变函数的模型预测自校正调节器,用于燃油喷射反馈控制,以处理燃油喷射火花点火发动机控制瞬态过程中的壁面润湿效应,以优化发动机燃烧,提高发动机性能;Shahbaz 等<sup>[12]</sup>研究了火花点火发动机的空燃比控制问题,提出一种基于人工神经网络的主动容错控制系统对空燃比控制系统传感器故障进行容错,并通过仿真试验验证了该系统的稳定性。

发动机燃气供给系统出现故障,会直接造成燃气喷射量偏离正常值,进而影响燃气发动机空燃比的控制精度和发动机的性能。本文中基于燃气发动机动力学模型,设计自适应空燃比控制策略,确定自适应律;通过李雅普诺夫方法验证控制器的稳定性;利用仿真平台验证 3 种工况下所设计控制器的有效性,有效控制燃气喷射量波动情况下的空燃比。

## 1 空燃比自适应控制器设计

自适应控制是一种为应对未知参数和干扰而兴起的技术,目前已经发展得相当成熟。它能够根据外界环境或系统参数的变化自动调节系统或控制参数,进而满足系统的性能指标。

天然气发动机气路、油路动态方程<sup>[9]</sup>为:

$$M_a(k+1) = r(k) [M_a(k) - \lambda_d M_f(k) \eta_c(k)] + M_{an}(k), \quad (1)$$

$$M_f(k+1) = r(k) [1 - \eta_c(k)] M_f(k) + M_{fn}(k), \quad (2)$$

式中:  $M_a(k)$  为气缸内总空气质量,kg;  $r(k)$  为残存气体份数; $k$  为计算循环数;  $\lambda_d$  为理想空燃比,  $\lambda_d = 17.4$ ;  $M_f(k)$  为气缸内燃气总质量,kg;  $\eta_c(k)$  为燃烧效率,  $\eta_c(k) \in [0, 1]$ ;  $M_{an}(k)$  为吸入缸内的新鲜空气质量,kg;  $M_{fn}(k)$  为进入缸内的燃气质量,kg。

引入燃气供给系统失效因子  $\rho$  衡量天然气发动机燃气供给系统管路堵塞、压力波动等对燃气喷射量造成的影响。对于所有可能发生的故障模式,  $0 < \rho \leq 1$ ,  $\rho = 1$  时表示系统工作状况正常,  $0 < \rho < 1$  时表示系统出现部分故障。引入  $\rho$  后,天然气发动机油路的动力学方程可表示为:

$$M_f(k+1) = r(k) [1 - \eta_c(k)] M_f(k) + \rho M_{fn}(k). \quad (3)$$

天然气发动机空燃比调节误差

$$y(k) = M_a(k) - M_f(k) \lambda_d. \quad (4)$$

由式(1)(3)(4)可以得出如下系统:

$$\begin{cases} y(k) = M_a(k) - M_f(k) \lambda_d \\ M_a(k+1) = r(k) [M_a(k) - \lambda_d M_f(k) \eta_c(k)] + M_{an}(k) \\ M_f(k+1) = r(k) [1 - \eta_c(k)] M_f(k) + \rho M_{fn}(k) \end{cases} \quad (5)$$

对式(5)进行整理可得:

$$y(k+1) = M_a(k+1) - M_f(k+1) \lambda_d = r(k) y(k) + M_{an}(k) - \rho \lambda_d M_{fn}(k). \quad (6)$$

对于失效因子  $\rho$ , 令  $\tilde{\rho}(k) = \rho - \hat{\rho}(k)$ ,  $\hat{\rho}(k)$  为  $\rho$  的估计值。利用李雅普诺夫方法确定控制律参数,定

义系统的李雅普诺夫函数

$$V(k) = cy^2(k) + \Gamma \hat{\rho}^2(k), \quad (7)$$

式中  $c$ 、 $\Gamma$  均为设计参数。

对于任意的  $\rho \in (0, 1)$ , 都有:

$$V(k+1) = cy^2(k+1) + \Gamma \hat{\rho}^2(k+1)。 \quad (8)$$

在一定的故障模式下,根据渐进稳定判据要求,可得:

$$\begin{aligned} V(k+1) - V(k) &= cy^2(k+1) + \Gamma \hat{\rho}^2(k+1) - cy^2(k) - \Gamma \hat{\rho}^2(k) = \\ &c[r(k)y(k) + M_{an}(k) - \rho\lambda_d M_{fn}(k)]^2 + \Gamma \hat{\rho}^2(k+1) - cy^2(k) - \Gamma \hat{\rho}^2(k) \leq \\ &2c[r(k)y(k) + M_{an}(k) - \hat{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)]^2 + 2c + \Gamma \hat{\rho}^2(k+1) - cy^2(k) - \Gamma \hat{\rho}^2(k)。 \end{aligned} \quad (9)$$

利用自适应律计算  $k+1$  循环的未知量

$$\hat{\rho}(k+1) = \hat{\rho}(k) - \gamma[y(k+1) - \hat{y}(k+1)], \quad (10)$$

式中:  $\hat{\rho}(k+1)$  为第  $k+1$  循环  $\rho$  的估计值,  $\gamma$  为设计参数。

整理式(10)可得:

$$\begin{aligned} \rho - \hat{\rho}(k+1) &= \rho - \hat{\rho}(k) - r[y(k+1) - \hat{y}(k+1)], \\ \tilde{\rho}(k+1) &= \tilde{\rho}(k) + \gamma[y(k+1) - \hat{y}(k+1)], \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可推导出:

$$\hat{y}(k+1) = r(k)y(k) + M_{an}(k) - \hat{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)。 \quad (12)$$

$y(k+1)$  和  $\hat{y}(k+1)$  的差

$$\begin{aligned} y(k+1) - \hat{y}(k+1) &= r(k)y(k) + M_{an}(k) - \rho\lambda_d M_{fn}(k) - r(k)y(k) - M_{an}(k) + \hat{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k) = \\ &\hat{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k) - \rho\lambda_d M_{fn}(k) = -[\rho - \hat{\rho}(k)]\lambda_d M_{fn}(k) = -\tilde{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)。 \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)代入式(11),整理得到:

$$\tilde{\rho}(k+1) = \tilde{\rho}(k) + \gamma[-\tilde{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)] = \tilde{\rho}(k) - \gamma\tilde{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)。 \quad (14)$$

将式(14)代入不等式(9),得到:

$$\begin{aligned} V(k+1) - V(k) &\leq \\ &2c[r(k)y(k) + M_{an}(k) - \hat{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)]^2 + 2c\lambda_d^2 M_{fn}^2(k)\hat{\rho}^2(k) - \\ &cy^2(k) - \Gamma\hat{\rho}^2(k) + \Gamma[\tilde{\rho}(k) - \gamma\tilde{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)]^2 = \\ &2c[r(k)y(k) + M_{an}(k) - \hat{\rho}(k)\lambda_d M_{fn}(k)]^2 + 2c\lambda_d^2 M_{fn}^2(k)\hat{\rho}^2(k) - \\ &cy^2(k) - \Gamma\hat{\rho}^2(k) + \Gamma\hat{\rho}^2(k)[1 - \gamma\lambda_d M_{fn}(k)]^2。 \end{aligned} \quad (15)$$

根据渐近稳定性判据要求,抵消平方项,则设计喷入气缸的燃气质量  $M_{fn}(k)$  为:

$$M_{fn}(k) = \frac{1}{\lambda_d \hat{\rho}(k)} [r(k)y(k) + M_{an}(k)] + \sqrt{\frac{\varepsilon}{2c}} y(k) \frac{1}{\lambda_d \hat{\rho}(k)}, \quad (16)$$

式中  $\varepsilon$  为设计参数。将式(16)代入式(15),得到:

$$\begin{aligned} V(k+1) - V(k) &= \\ &2c \left\{ r(k)y(k) + M_{an}(k) - \lambda_d \hat{\rho}(k) \left[ \frac{1}{\lambda_d \hat{\rho}(k)} [r(k)y(k) + M_{an}(k)] + \sqrt{\frac{\varepsilon}{2c}} y(k) \frac{1}{\lambda_d \hat{\rho}(k)} \right] \right\}^2 + \\ &2c\lambda_d^2 M_{fn}^2(k)\hat{\rho}^2(k) - cy^2(k) - \Gamma\hat{\rho}^2(k) + \Gamma\hat{\rho}^2(k)[1 - \gamma\lambda_d M_{fn}(k)]^2 = \\ &\varepsilon y^2(k) + 2c\lambda_d^2 M_{fn}^2(k)\hat{\rho}^2(k) - cy^2(k) - \Gamma\hat{\rho}^2(k) + \hat{\rho}^2(k)[1 - \gamma\lambda_d M_{fn}(k)]^2 = \\ &-(c - \varepsilon)y^2(k) + 2c\lambda_d^2 M_{fn}^2(k)\hat{\rho}^2(k) - \Gamma\hat{\rho}^2(k) + \Gamma\hat{\rho}^2(k)[1 - \gamma\lambda_d M_{fn}(k)]^2。 \end{aligned} \quad (17)$$

根据李雅普诺夫稳定判据,为使控制器能较好地将天然气发动机的空燃比控制在理想值附近,应使式(17)满足:

$$-\frac{\Gamma}{2}\hat{\rho}^2(k) + 2c\lambda_d^2 M_{in}^2(k)\hat{\rho}^2(k) < 0. \quad (18)$$

由式(18)可得  $c$  的取值范围:  $c < \frac{\Gamma}{4\lambda_d^2 M_{in}^2(k)}$ , 即  $c < \frac{\Gamma}{4\lambda_d^2 \max\{M_{in}^2(k)\}}$ , 其中,  $\max\{M_{in}(k)\}$  为某个循环下进入缸内的最大燃气质量, kg。

为抵消式(17)中最后平方项,应满足以下条件:

$$\Gamma \hat{\rho}^2(k) [1 - \gamma\lambda_d M_{in}(k)]^2 - \frac{\Gamma}{2}\hat{\rho}^2(k) < 0. \quad (19)$$

由式(19)可知  $\gamma$  需满足:

$$-\frac{\sqrt{2}}{2} < 1 - \gamma\lambda_d M_{in}(k) < \frac{\sqrt{2}}{2}. \quad (20)$$

由式(18)(20)可知,控制器设计参数应该满足以下条件:

$$\begin{cases} \gamma \in \left( (1 - \frac{\sqrt{2}}{2}) \frac{1}{\lambda_d \min\{M_{in}(k)\}}, (1 + \frac{\sqrt{2}}{2}) \frac{1}{\lambda_d \max\{M_{in}(k)\}} \right) \\ c > \varepsilon \\ c < \frac{\Gamma}{4\lambda_d^2 \max\{M_{in}^2(k)\}} \end{cases}, \quad (21)$$

式中:  $\min\{M_{in}(k)\}$  为某个循环下进入缸内的最小燃气质量, kg。

由式(17)(18)可知,满足以上条件时,闭环系统是李雅普诺夫稳定的,所设计的自适应控制器能够使空燃比回归到理想值附近。另外,通过选取适当的参数  $\gamma$  和  $c$ , 能够使空燃比的调节误差控制在较小邻域内。

## 2 仿真验证

利用 Matlab/Simulink 仿真平台,对所设计的控制器进行验证。根据式(5)和相关天然气发动机仿真模型<sup>[9]</sup>,搭建的仿真模型如图1。

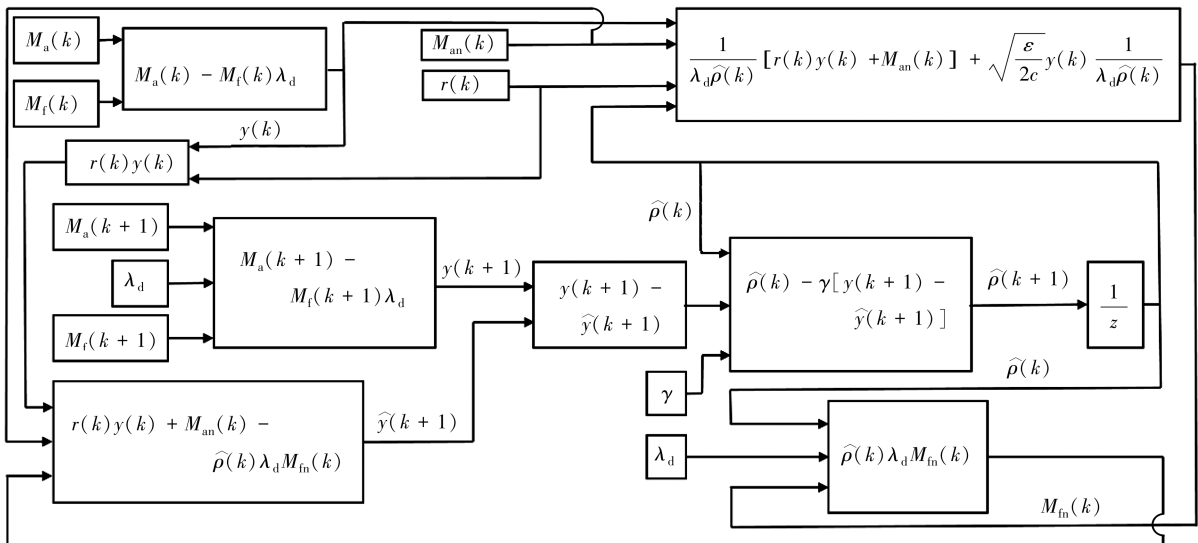


图1 空燃比控制仿真模型

分别选取3种工况对所设计的控制器的有效性进行验证:1)工况W1,发动机转速为1200 r/min,外部负载为60 N·m;2)工况W2,发动机转速为1600 r/min,外部负载为30 N·m;3)工况W3,发动机转速为1600 r/min,外部负载为60 N·m。

当 $\rho = 0.5, 0.7$ 时,3种不同工况下的空燃比信号如图2~4所示。

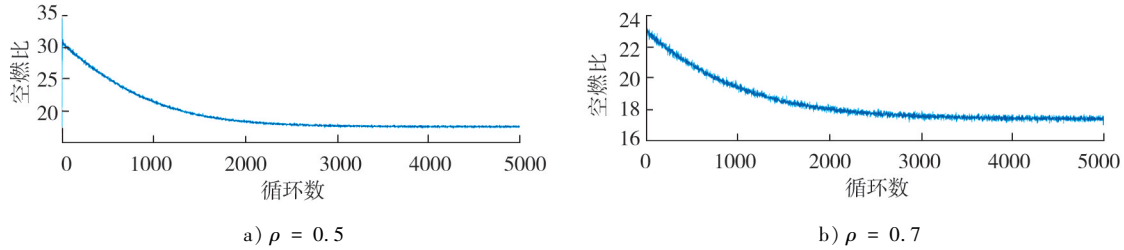


图2 工况W1的空燃比信号

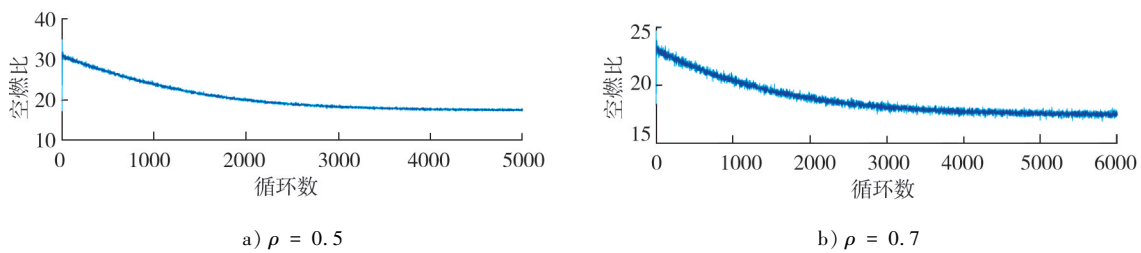


图3 工况W2的空燃比信号

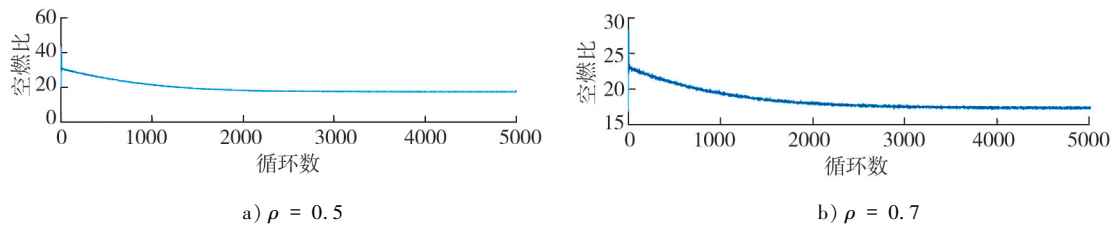


图4 工况W3的空燃比信号

考虑到在天然气发动机运行过程中可能出现的不确定因素,将 $\rho$ 定义为由1—0.8—0.85的跳变信号,通过仿真得到W2工况下的空燃比信号如图5所示。

由图2~5可知:1)当 $\rho = 0.5$ 时,空燃比信号的波动幅度较小; $\rho$ 为0.7时,空燃比信号波动稍大;2)在 $\rho$ 为常数的情况下,所设计的自适应控制器在3种不同工况下均能将天然气发动机的空燃比控制在理想值附近,具有良好的控制效果;3)当 $\rho$ 为跳变信号时,控制器仍能将空燃比调节到理想值范围附近,以W2工况为例,自适应控制器也能将天然气发动机空燃比控制到理想值的较小邻域内,控制效果良好。

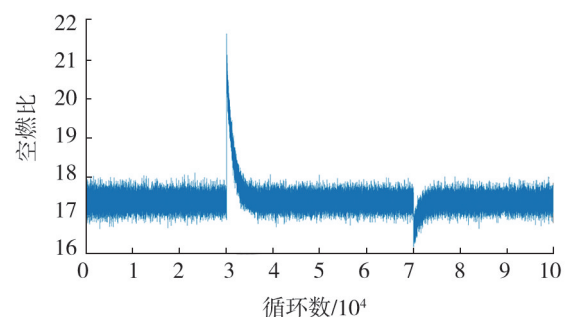


图5 工况W2, $\rho$ 跳变信号的空燃比信号

### 3 结语

针对天然气发动机燃气供给系统故障引起的燃气喷射量波动问题,设计空燃比自适应控制器,通过调整燃气喷射量将天然气发动机的空燃比控制在理想值附近。利用Matlab/Simulink仿真平台,搭建天然气发动机空燃比控制模型,验证3种运行工况下该自适应控制器的有效性,当燃气供给系统发生故障造

成燃气喷射量偏离正常值时,该控制器可以有效抑制燃气喷射量不确定对空燃比控制精度的影响。

### 参考文献:

- [1] 王春禄,章伯跃,陈密,等. 浅析燃气发动机的空燃比控制[J]. 石化技术,2016,23(6):45.
- [2] LI Z Y, LI J, ZHOU Q, et al. Intelligent air/fuel ratio control strategy with a PI-like fuzzy knowledge-based controller for gasoline direct injection engines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering,2019,233(8): 2161-2173.
- [3] 杨君,王明杰,李延骁. 燃气发动机废气再循环随机调节控制器设计[J]. 内燃机与动力装置,2021,38(1):1-6.
- [4] 崔宏宇,崔宏巍. 单燃料燃气汽车发动机空燃比控制器设计[J]. 农机化研究,2006(5):106-108.
- [5] SONG K, HAO T Y, XIE H. Disturbance rejection control of air-fuel ratio with transport-delay in engines[J]. Control Engineering Practice,2018,79: 36-49.
- [6] YANG J, LI Y X, WANG J, et al. Model-based stochastic adaptive air-fuel ratio control of direct injection biogas-fueled engines[J]. Mathematical Problems in Engineering,2020:1-9.
- [7] 张腾,谭建伟,田茂军,等. 天然气发动机氮排放控制应用研究[J]. 内燃机工程,2021,42(1):47-52.
- [8] ARSLAN AA, KHALID M H. Robust active fault-tolerant control for internal combustion gas engine for air-fuel ratio control with statistical regression-based observer model[J]. Measurement and Control, 2019, 52(9/10): 1179-1194.
- [9] YANG J, SHEN T L, JIAO X H. Model-based stochastic optimal air-fuel ratio control with residual gas fraction of spark ignition engines[J]. IEEE transactions on control systems technology: A publication of the IEEE Control Systems Society, 2014,22(3): 896-910.
- [10] YANG J, WANG J, ZHOU X S, et al. Stochastic air-fuel ratio control of compressed natural gas engines using state observer [J]. Mathematical Problems in Engineering,2020(3):1-8.
- [11] SHAMEKHI A M, SHAMEKHI A H. Engine adaptive fuel injection control using model predictive self-tuning regulator with adaptive variable functioning[J]. SAE International Journal of Engines,2021,14(5):221-233.
- [12] SHAHBAZ M H, AMIN A A. Design of active fault tolerant control system for air fuel ratio control of internal combustion engines using artificial neural networks[J]. IEEE ACCESS, 2021,99:1.

## Design of air-fuel ratio adaptive controller based on injection quantity fluctuation for gas engine

KONG Xueyan<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, WANG Mingjie<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, HUANG Wanyou<sup>1</sup>

1. School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Motor Vehicle Testing Center, Shandong Jiaotong University, Jinan 250100, China

**Abstract:** In order to reduce the influence of the uncertainty of fuel injection quantity on the air-fuel ratio, an adaptive air-fuel ratio controller based on the fluctuation of fuel injection quantity is designed. Lyapunov method is used to determine the parameters of the control law, and Matlab/Simulink simulation platform is used to build the air-fuel ratio control model of natural gas engine. The effectiveness of the adaptive controller under three operating conditions is verified by simulation. The results show that the adaptive controller can control the air-fuel ratio of the gas engine near the ideal value when the fuel injection quantity of the engine fluctuates, and effectively reduce the influence of the uncertainty of the fuel injection quantity on the control accuracy of the air-fuel ratio.

**Keywords:** gas engine; injection quantity fluctuation; air-fuel ratio; adaptive control

(责任编辑:郎伟锋)