

煤层气发动机稳态空燃比前馈控制脉谱生成

滕勤 马标 左承基 谈建

【摘要】 基于煤层气发动机进气系统的物理特性,采用平均值、多项式和模糊神经网络建模方法,建立了用于稳态空燃比前馈控制的递阶模型,并通过该模型生成了三维初始控制脉谱图。借助于辨识的过量空气系数自适应神经网络模糊推理系统(ANFIS)模型,进行了静态空燃比前馈控制仿真。利用前馈控制模型生成的数据,检验了实际控制效果。结果表明,前馈控制模型具有良好的预测能力,模型最大和平均预测误差分别小于8%和5%。

关键词: 煤层气发动机 空燃比 前馈控制 静态模型 脉谱

中图分类号: U464.174

文献标识码: A

MAP Generation for Steady State Air Fuel Ratio Feed-forward Control of a Coal-bed Gas Engine

Teng Qin Ma Biao Zuo Chengji Tan Jian
(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

Based on the physical characteristics of the intake system in a coal-bed gas engine equipped with two-valve type gas mixer, a hierarchical model for steady state air fuel ratio feed-forward control was established using mean value and polynomial regression analysis as well as fuzzy-neural network modelling methods. A 3D original control MAP graph was generated from the model. By means of an identified adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) model of the excess air factor, the simulation of static state air fuel ratio feed-forward control was carried out. Subsequently, the actual engine control experiment was performed with data produced by the feed-forward control model. The results show that the feed-forward control model has good predication ability. Maximal and average prediction errors of the model are less than 8% and 5%, respectively.

Key words Coal-bed gas engine, Air fuel ratio, Feed-forward control, Static state model, MAP

引言

现代发动机的空燃比控制普遍采用前馈与反馈控制相结合的控制形式。由于一些变量不便测量,高性能的空燃比控制器必须借助于一些前馈控制作用来抵消可测扰动的影响^[1~3]。基于发动机负荷信息的稳态空燃比控制本质上是一种非线性前馈静态控制,这种开环控制功能大多数通过查取2维或3维查询表(look-up table)来实现。因此,在发动机

控制单元中,通常具有50~120个与大约15个测量输入和30个控制量相关的查询表^[4]。建立查询表需要经历标定、调整和优化过程,而借助于计算和仿真,使用简单的物理模型和基于模型的控制设计可以大大降低开发费用和标定实验的工作量。

为了有效地控制煤层气发动机的空燃比,在对控制参数进行优化之前,需要建立一个存储在发动机电控单元只读存储器中的初始控制脉谱(MAP)。本文主要研究如何根据系统的物理知识并结合系统

收稿日期: 2007-10-08

滕勤 合肥工业大学机械与汽车工程学院 副教授 博士, 230009 合肥市

马标 合肥工业大学机械与汽车工程学院 硕士生

左承基 合肥工业大学机械与汽车工程学院 教授 博士生导师

谈建 合肥工业大学机械与汽车工程学院 高级工程师

辨识技术,利用有限的实验数据,建立用于发动机稳态工况空燃比前馈控制的模型,并利用所建模型生成初始控制 MAP 图。

1 煤层气发动机控制系统结构

煤层气发动机空燃比开-闭环控制系统如图 1 所示。闭环控制的作用是消除稳态控制偏差,但如果完全基于废气氧(exhaust gas oxygen,简称 EGO)传感器的测量值进行反馈控制,则存在明显的时间滞后,况且 EGO 传感器提供的是混合气浓度状态信号,仅适用于在理论空燃比附近的校正。

采用前馈-串级控制的开环控制结构,能够及时克服进入前馈回路和串级副控回路的扰动对被控量

的影响,降低了对控制阀的要求。基于静态 MAP 和简单模型的前馈控制用于迅速调整控制量,但由于影响空燃比的因素很多,前馈控制不可能同时对所有扰动进行补偿,因此在发动机控制系统中,通常针对变化较快的主要扰动进行控制。前馈控制器的输入为发动机的主控信号,即歧管压力(或节气门开度)和转速,对于次要扰动(辅控信号)的影响,则通过对控制量的修正予以补偿。在图 1 所示的控制系统中,直接控制量为燃气阀和空气阀位置,空燃比前馈控制采用速度-密度法,根据歧管压力和转速产生燃气阀和空气阀的基本位置控制信号,并利用实测的燃气和空气流量计算进气空燃比,校正控制器的输出。

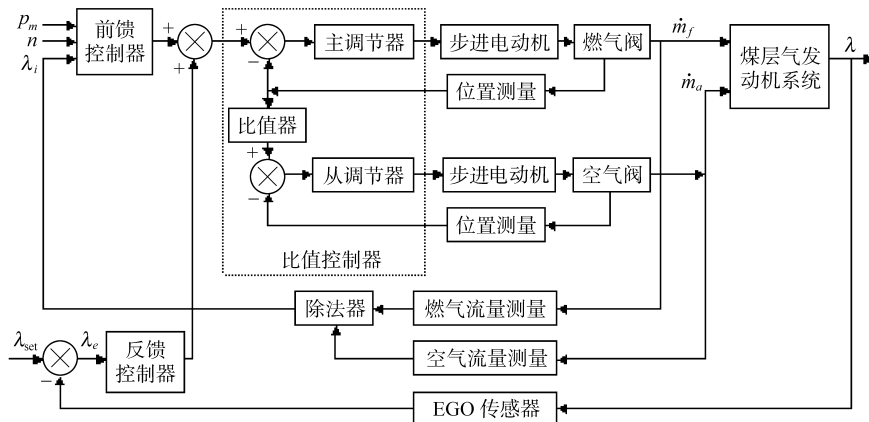


图 1 空燃比开-闭环控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of air fuel ratio opened loop control and closed loop control system

串级控制器是一个双闭环比值控制器,用来对控制阀进行精确定位。主调节器对燃气阀的控制为定值控制,从调节器对空气阀的控制为随动控制。

2 空燃比前馈控制系统的静态建模

由 S195 型柴油机改制的点燃式煤层气发动机和实验装置参见文献[5]。混合气流量由节气门控制,加装在燃气和空气通路中的控制阀由 ECU 通过步进电动机控制,用于调节空燃比。为了寻求空燃比控制规律和理想控制参数值,进行了不同转速下的负荷特性实验,转速 800~1 800 r/min,负载功率 0~6 kW。实验过程中的主要参数和发动机工作状态分别由相应的传感器测量,其中,进气歧管压力和温度、空气流量、燃气流量的测量分别采用了电喷发动机上专用的歧管绝对压力传感器、进气温度传感器、热膜和热线式空气质量流量传感器。节气门位置、控制阀开度、燃气和空气流量、燃气阀两端压差、混合器出口压力、发动机转速、歧管压力由 DSP 动态参数测量仪记录,进气温度、排气温度和冷却水温度由 DAS-1B 型温度巡检仪记录,过量空气系数由

HORIBA MEXA-700λ 型空燃比分析仪测量。

2.1 前馈控制模型

前馈控制模型除了用于控制系统的仿真和检验控制策略,还可用来产生包括非实验工况点在内的稳态工况控制参数,形成初始控制 MAP。为了便于引入校正信号,将前馈控制模型分成几个递阶子系统,模型结构如图 2 所示。其中,混合气流量模型和燃气流量模型采用进气系统平均值模型(mean value model,简称 MVM),燃气阀开度模型采用模糊神经网络模型,燃气阀、空气阀配比模型则采用多项式模型。

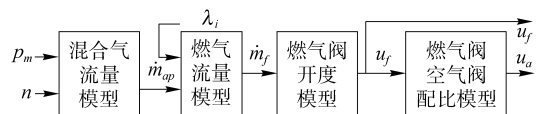


图 2 空燃比前馈控制模型框图

Fig. 2 Block diagram of A/F ratio feed-forward control model

2.2 混合气流量模型与燃气流量模型

在只考虑混合气平均稳定流动效果的情况下,煤层气发动机的速度-密度方程为

$$\dot{m}_{ap} = \frac{V_d n p_m \eta_v}{120RT_m} \quad (1)$$

式中 \dot{m}_{ap} ——进入气缸的混合气质量流量

V_d ——发动机的排量

n ——发动机转速 p_m ——歧管压力

T_m ——进气温度 R ——气体常数

η_v ——混合气充量系数

为了简单起见,式(1)中的混合气充量系数模型选择为非线性多项式形式,其残差平方和(RSS)为 0.069^[5]。

$$\eta_v = -1.3974 + 2.382 \times 10^{-3} n - 7 \times 10^{-7} n^2 + (699.81 - 1.3866n - 1.066 \times 10^{-3} n^2 - 3.8 \times 10^{-7} n^3 + 10^{-10} n^4) p_m^{-1} \quad (2)$$

根据不同工况下实测的 n 、 p_m 和 T_m ,由式(1)和式(2)便可算出进入气缸的混合气质量流量,燃气质量流量为

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{ap}}{1 + \lambda_i \alpha_s} \quad (3)$$

式中 λ_i ——过量空气系数

α_s ——理论空燃比

在建模时 λ_i 取自稳态工况下空燃比测量仪的实测数据,而在控制系统中 λ_i 不可直接测量,只能根据测量的空气和燃气质量流量来估算。而对于由进气温度不同引起的 η_v 估计误差,需根据进气温度传感器的输出来修正,或者通过控制策略的设计,在基本 η_v 脉谱数值的基础上增加一个校正项来修正^[6-7]。

2.3 燃气阀开度模型

通过燃气阀的燃气质量流量为

$$\dot{m}_f = \epsilon \alpha A \sqrt{2\rho_f \Delta p} \quad (4)$$

式中 α ——流量系数

ϵ ——流体膨胀校正系数

A ——流通截面 ρ_f ——燃气密度

Δp ——阀两端的压差

为了建立燃气流量与控制阀开度之间的关系,引入理想可调比 K_R 和压降比(阀阻比) s 的定义,则与管路串联时的控制阀对数流量特性为^[8]

$$\dot{m}_f = \dot{m}_{f100} K_R^{(l/L-1)} [(1-s)K_R^{2(l/L-1)} + s]^{-1/2} \quad (5)$$

$$K_R = \frac{\dot{m}_{f\max}}{\dot{m}_{f\min}} \quad (6)$$

$$s = \frac{\Delta p_{\min}}{\Delta p_s} = \frac{\Delta p_{\min}}{\Delta p_s + \Delta p_{\min}} \quad (7)$$

$$0.02 \dot{m}_{f\max} < \dot{m}_{f\min} < 0.04 \dot{m}_{f\max} \quad (8)$$

式中 \dot{m}_{f100} ——管道压降不为零时控制阀全开的质量流量

$\dot{m}_{f\max}$ ——管道压降为零时控制阀全开的质量流量

$\dot{m}_{f\min}$ ——控制阀可调节的最小质量流量

Δp_{\min} ——控制阀全开时阀两端的压降

Δp_s ——系统总压降 Δp_Σ ——管路总压降

l ——控制阀某一开度时的行程

L ——控制阀全开时的行程

l/L ——控制阀相对开度

由实验得到燃气阀位置传感器输出电压为

$$u_f = 0.1513 + 0.0105l/L \quad (9)$$

显然,燃气阀相对开度 l/L (或传感器输出电压 u_f) 与燃气质量流量 \dot{m}_f 之间呈现复杂的非线性关系,且存在一些难以确定的待定系数。为此,将 u_f 作为 Δp 与 \dot{m}_f 的函数,即 $u_f = \varphi(\Delta p, \dot{m}_f)$,根据实验中测量得到的 Δp 和 u_f 以及由式(3)计算出的 \dot{m}_f ,辨识燃气阀开度的模糊神经网络模型。

2.3.1 模糊神经网络建模原理

模糊模型用一组与系统状态相关的模糊规则及其隶属函数来描述系统特征,已成功应用于发动机气缸空气充量的估计^[9]和怠速工作模式的建模^[10]。但模糊系统缺乏自学习和自适应能力,而神经网络则可直接从样本中进行有效的学习,两者结合形成的自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro-fuzzy inference system,简称 ANFIS),融合了模糊系统易于表达直观语义知识和神经网络分布式信息存储、容错能力强的特性,为非线性系统建模提供了有效工具。ANFIS使用模糊推理系统对输入空间矩阵线性增益光滑内插,其隶属度函数与模糊规则中的参数通过神经网络的自适应学习能力来调整,从而使函数和自变量间复杂关系的信息蕴含在网络的连接中。

双输入、单输出系统的 ANFIS 结构见文献[5],其一阶 Sugeno 模糊推理规则为

若 x 为 A_1 且 y 为 B_1 ,则

$$z_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \quad (10)$$

若 x 为 A_2 且 y 为 B_2 ,则

$$z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \quad (11)$$

模糊系统的输出为

$$z = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} = \overline{w}_1 z_1 + \overline{w}_2 z_2 \quad (12)$$

式中 p_i 、 q_i 、 r_i ——常数

w_i ——第 i 条规则的适应度, $i = 1, 2$

2.3.2 燃气阀开度的 ANFIS 模型

将 179 组实验数据分成两部分,前 89 组数据用于建模,后 90 组数据用于模型验证。借助 Matlab 模糊系统工具箱建立燃气阀开度的 ANFIS 模型,隶属函数选钟型函数,模糊空间分割数取 9,通过网格法生成初始模糊推理系统,采用混合学习算法训练网络,训练误差设为 10^{-4} 。经 50 次训练后,最终均方根误差为 1.513×10^{-3} 。

训练后燃气阀两端压差和燃气质量流量的隶属函数如图 3 所示;燃气阀开度 ANFIS 模型的建模误差和校验误差如图 4 所示。其 RSS 值分别为 $2.224 2 \times 10^{-4}$ 和 $1.874 7 \times 10^{-4}$,表明模糊神经网络模型具有较高的逼近精度。

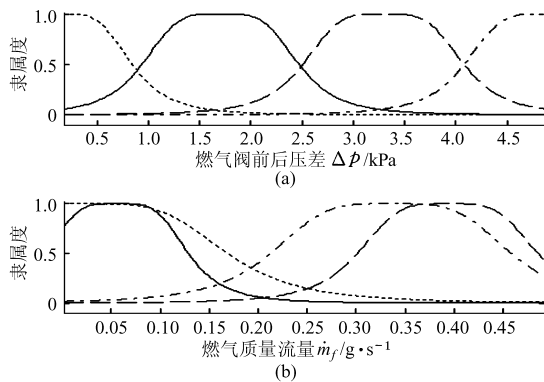


图 3 训练后燃气阀两端压差和燃气质量流量的隶属函数

Fig.3 Trained membership functions of differential pressure across both sides of fuel gas valve and fuel gas flow

- (a) 训练后燃气阀前后压差的隶属函数
- (b) 训练后燃气质量流量的隶属函数

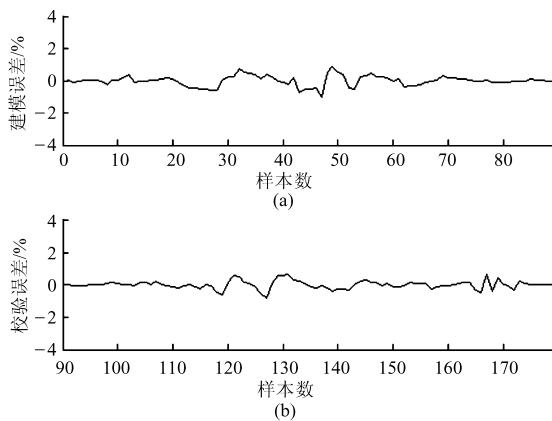


图 4 燃气阀开度 ANFIS 模型的建模误差与校验误差曲线

Fig.4 Modeling error and verifying error of ANFIS model of fuel gas valve opening

- (a) 建模误差
- (b) 校验误差

2.4 燃气阀与空气阀配比模型

燃气阀与空气阀配比模型实际上反映了比值控制器中比值器的静态非线性关系。为了便于控制计算,控制阀开度用电压表示。选取 32 组 λ 在 0.98 ~ 1.02 之间的空气阀和燃气阀开度数据,采用最小

二乘法,在 RSS 值为 0.068 2 时,拟合得到空气阀与燃气阀多项式配比模型

$$u_a = 928.023 2 u_f^3 - 1 165.128 4 u_f^2 + 487.610 6 u_f - 67.782 8 \quad (13)$$

式中 u_a ——空气阀位置传感器输出电压

2.5 初始控制 MAP 的生成

分别按 20 r/min 和 1 kPa 间隔,在所建模型中输入 800 ~ 1 800 r/min 转速和 46 ~ 96 kPa 歧管压力。模型中的其他参数,如 Δp 、 λ 、 T_m 通过实验数据插值产生。计算得到主控信号与 2 个阀开度关系的控制 MAP 如图 5 所示。

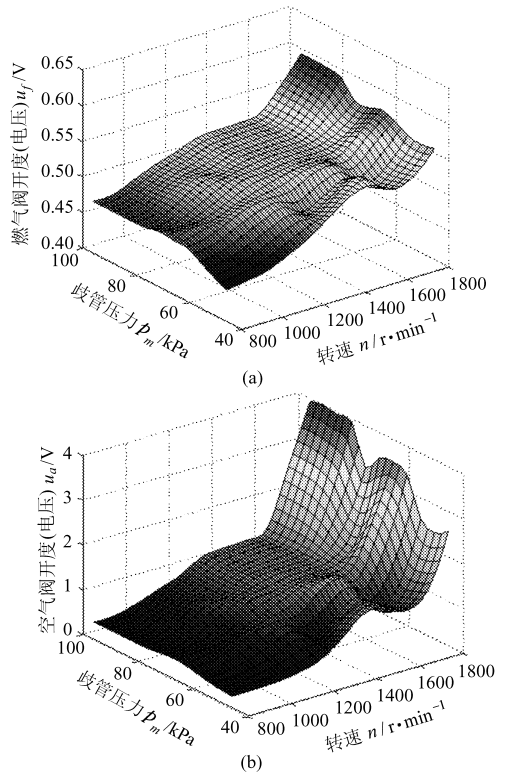


图 5 控制脉谱图

Fig.5 MAP graphs for control

- (a) 燃气阀位置
- (b) 空气阀位置

3 前馈控制 MAP 仿真计算与实验验证

3.1 控制 MAP 的仿真计算

通过仿真来检验生成的 MAP 是否满足控制的需要,必须建立过量空气系数 λ 与 2 个控制阀开度之间的仿真模型。取 λ 在 0.7 ~ 1.46 时的 281 组控制阀开度数据,前 140 组数据用于建模,后 141 组数据用于模型校验,采用与燃气阀开度相同的建模方法建立 ANFIS 模型。训练误差设为 10^{-4} ,经 50 次训练后,均方根误差为 2.35×10^{-5} 。模型检验的 RSS 值为 $1.060 9 \times 10^{-7}$,过量空气系数 ANFIS 模型输入、输出关系如图 6 所示。

将生成的 2 个控制阀位置数据代入过量空气系

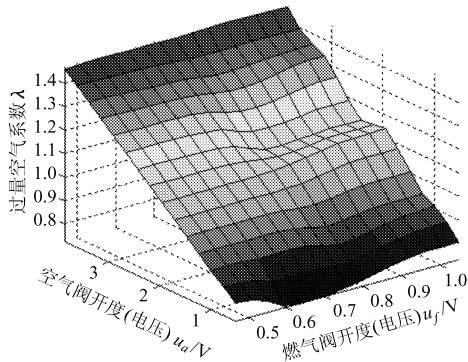


图 6 控制阀开度与过量空气系数之间的关系

Fig. 6 Relationship between control valves opening and excess air factor

数 ANFIS 模型,模型输出如图 7 所示。仿真结果表明,根据计算得到的 MAP,预测的 λ 在 0.8~1.1 范围内,但在某些工作区域 2 个阀位置有些失配,使得转速低于 1 100 r/min 时混合气偏浓,转速高于 1 700 r/min 时混合气偏稀。

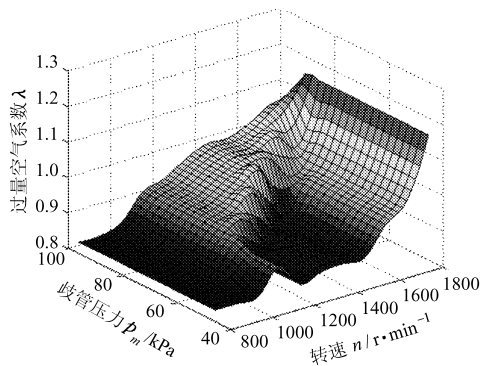


图 7 静态前馈控制的仿真结果

Fig. 7 Simulation result of static state feed-forward control

3.2 控制 MAP 的实验验证

为了验证实际控制效果,将由模型生成的空气阀和燃气阀位置数据以表格的形式存储在电控单元的 Flash 存储器中,由 ECU 根据发动机实际工况进行查表控制。负载功率为 2.4 kW 时,不同转速下实测的歧管压力、控制阀开度和过量空气系数以及在相同控制阀开度下由前馈控制模型预测的过量空气系数如图 8 所示。

由图可见,实验结果与仿真结果的趋势很相似,虽然在大部分工况点,模型的预测值小于实测值,但实际控制效果比预期的要好。一系列控制实验表

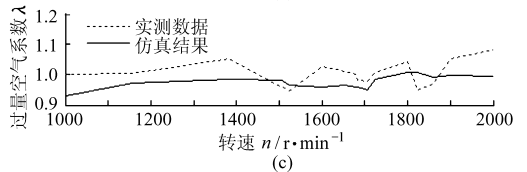
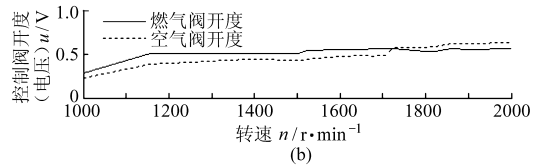
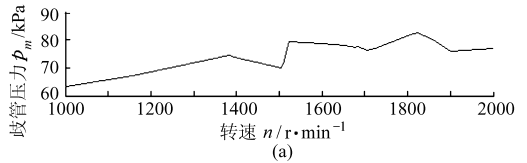


图 8 前馈控制 MAP 的实验验证

Fig. 8 Experimental verification of feed-forward control MAP graphs

明,在未进行控制数据优化和用控制器校正的情况下,借助于初始控制 MAP 可以将 λ 控制在 0.95~1.08 之间,模型最大预测误差为 7.87%,平均预测误差为 4.22%。采用初始控制 MAP,相对于理论空燃比的最大控制误差为 8.1%,平均控制误差为 3.21%。若通过实验校正控制阀的配比特性,并根据进气温度校正混合气充量系数,依据形成的修正控制 MAP 有望进一步提高控制精度。

4 结论

(1) 基于煤层气发动机进气系统的物理特性,采用平均值、多项式和模糊神经网络建模方法,建立了用于稳态工况的空燃比前馈控制模型。仿真和实验结果表明,该模型能够较好地预测被控参数的变化趋势,模型平均预测误差小于 5%。

(2) 利用所建模型,生成了燃气阀位置和空气阀位置控制的初始 MAP 图,部分负荷工况下的实际控制效果表明,相对于 λ = 1 的最大控制误差小于 9%。

(3) 前馈模型的精确性在很大程度上依赖于用来辨识模型的数据,如果数据能够很好体现模型的特征,辨识模型便能取得很好的效果。部分工作区域模型计算值与发动机实际工作状态之间的差异,尚需通过实验对模型的修正来消除。

参 考 文 献

- 1 Ault B A, Jones V K, Powell J D, et al. Adaptive air to fuel ratio control of a spark-ignition engine[C]. SAE Paper 940373, 1994.
- 2 Benninger N F, Plapp G. Requirements and performance of engine management systems under transient conditions[C]. SAE Paper 910083, 1991.

油机在采用 EGR 后,对进气流量的影响并不明显,这说明设计的文丘利管 EGR 系统的进气损失较小。从以上结果可以得知,由模拟得出的结论与试验结论相符,由此说明,EGR 系统的计算模型与柴油机 EGR 系统实际工作情况相符合。

5 结束语

建立的柴油机 EGR 系统一维模型能够对柴油

机在不同转速、不同负荷时的工作情况进行模拟,在与无 EGR 柴油机工作过程的模拟结果进行对比时发现,其分析结论与柴油机 EGR 台架试验的结论相符,进而可以对建立的带有 EGR 系统柴油机的一维模型进行推广,简化试验中的测试方法,通过模拟的手段得到试验中难以实测的数据。

参 考 文 献

- 1 Yoshio, Akira Noda, Tadashi Sakamoto. Combustion and NO_x emission characteristics in a DI methanol engine using supercharging with EGR[C]. SAE Paper 971647, 1997.
- 2 张煜盛,常汉宝,陆艺红. 排气再循环对柴油机性能影响的计算研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2001,30(4):1~4.
Zhang Yusheng, Chang Hanbao, Lu Yihong. The effects of EGR on performances of diesel engines[J]. Small Internal Combustion Engine, 2001, 30(4): 1~4. (in Chinese)
- 3 郭静川,邓康耀,尹琪,等. 开发 EGR、压缩空气补气技术,综合治理车用柴油机的有害排放[J]. 柴油机设计与制造, 2001,89(2):15~19.
Wu Jingchuan, Deng Kangyao, Yin Qi, et al. The development of EGR and compressed air make-up air technique and comprehensive treatment of diesel engine emission[J]. Design and Manufacture of Diesel Engine, 2001, 89(2): 15~19. (in Chinese)
- 4 Mattarelli E, Bianchi G M, Ivaldi D. Experimental and numerical investigation on the EGR system of a new automotive diesel engine[C]. SAE Paper 2000-01-0224, 2000.
- 5 杨帅,李秀元,应启夏,等. EGR 率对柴油机排放特性影响的试验[J]. 农业机械学报,2006,37(5):29~33.
Yang Shuai, Li Xiuyuan, Ying Qijia, et al. EGR rates optimization rule and experimental study about influence of EGR rates on diesel engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 29~33. (in Chinese)
- 6 杨帅,姚喜贵,李秀元,等. 增压直喷柴油机 EGR 系统开发及试验分析[J]. 上海理工大学学报,2005,27(2):172~175.
Yang Shuai, Yao Xigui, Li Xiuyuan, et al. Structure design and experiment analysis of an EGR system for turbocharged diesel engine[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2005,27(2): 172~175. (in Chinese)
- 7 黄忠霖. 控制系统 Matlab 计算及仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

(上接第 17 页)

- 3 Onder C H, Geering H P. Model-based engine calibration for best fuel efficiency[C]. SAE Paper 950983, 1995.
- 4 Rolf Isermann, Norbert Mueller. Design of computer controlled combustion engines[J]. Mechatronics, 2003, 13(10): 1 067~1 089.
- 5 滕勤,杨瑜,左承基,等. 煤层气发动机混合气充量系数模型的辨识[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3):47~51.
Teng Qin, Yang Yu, Zuo Chengji, et al. Identification of the volumetric efficiency model of mixture gas in coal-bed gas engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3):47~51. (in Chinese)
- 6 Tseng Tung-Ching, Cheng W K. An adaptive air/fuel ratio controller for SI engine throttle transients[C]. SAE Paper 1999-01-0552, 1999.
- 7 Kotwicki A, Russell J, Pursifull R, et al. An air meter based cylinder air charge estimator[C]. SAE Paper 1999-01-0856, 1999.
- 8 何衍庆,邱宣振,杨洁,等. 控制阀工程设计与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2005:99~100.
- 9 Sethuraman H R, Zhang Weijun, Bedi J S. Fuzzy model for cylinder air charge estimation[C]//Proceedings of the 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Lafayette, Louisiana, 1994: 1 523~1 526.
- 10 Mohamed H M, Munzir S, Abdulmuin M Z, et al. Fuzzy modeling and control of a spark ignition engine idle mode[C]//TENCON 2000 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia, 2000: 586~591.