

汽油发动机瞬态工况油膜参数辨识的研究

陈林林, 魏民祥, 杨海青

(南京航空航天大学能源与动力学院车辆工程学院 南京 210016)

【摘要】以四冲程汽油发动机为研究对象建立瞬态工况下油膜模型,用最小二乘递推算法对油膜参数进行辨识计算研究;建立了发动机空燃比的仿真模型。将辨识结果模型进行某瞬态工况空燃比仿真,并和实际发动机试验采集的空燃比进行对比。结果表明,最小二乘递推算法所辨识的油膜参数精确度较高,能满足实际控制要求,证明该辨识算法辨识油膜参数的实用性。

关键词 空燃比; 油膜模型; 汽油发动机; 辨识; 最小二乘递推算法; 瞬态

中图分类号 TK432

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.04.037

Parameter Identification of Fuel Film Model Transient Condition for Gasoline Engine

CHEN Lin-lin, WEI Min-xiang, and YANG Hai-qing

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016)

Abstract A transient fuel film model is established by four-stroke gasoline engine as the research object. The recursive least square algorithm is used to identify parameters of the film. The simulation model of engine air-fuel ratio is established. The identified model is used to simulate transient operating conditions which are compared with the actual acquisition of the air-fuel ratio. The results show that identified parameters of the film can meet the requirements of actual control using recursive least squares algorithm.

Key words air-fuel ratio; fuel film model; gasoline engine; identification; least squares method; transients

精确控制发动机瞬态工况的空燃比,以满足日益严格的排放法规成为现代发动机管理系统的一个重要任务^[1]。在瞬态工况下,由于进气系统的充排气效应和油膜动态效应等的影响,空燃比会发生偏离。较准确地确定各个工况下的油膜参数,对于瞬态工况下空燃比的精确控制十分重要^[2]。

油膜参数的研究主要有试验标定、Matlab仿真和计算三种方法^[3]。其中试验标定的方法对下位机的要求较高,能根据油膜质量和补偿的喷油脉宽的计算,在线实时调整油膜参数来改变喷油脉宽;Matlab仿真对发动机模型要求较高,根据油膜模型结合采集到的发动机各个工况的性能参数、利用系统辨识的方法对油膜参数进行估计。

本文以一台某型四冲程电喷汽油发动机为研究对象,研究利用系统辨识方法计算各个工况的油膜参数。首先建立了油膜辨识模型,然后设计发动机性能参数采集系统,采集发动机各个工况的性能参数,用最小二乘递推辨识算法对油膜参数进行估计。实验表明辨识模型正确。

1 油膜辨识模型的建立

燃油蒸发与油膜动态模型为^[4]:

$$\dot{m}_f = \lambda \frac{m_{ff}}{m_{ff}} - \frac{m_{ff}}{\tau} \quad (1)$$

$$\dot{m}_v = (1 - \lambda x) m_f \quad (2)$$

$$\dot{m}_f = m_f - \frac{m_{ff}}{\tau} \quad (3)$$

式中 m_f 为喷油器喷出的燃油质量流量; m_{ff} 为油膜质量; \dot{m}_f 为油膜质量变化量; τ 为油膜蒸发时间常数; m_v 为燃油蒸汽流量; m_f 为进入缸内的燃油流量; x 为喷射的燃油中沉积于壁面的比例。油膜参数 τ 和 x 为辨识估计参量。

以 m_f 为输入量, m_f 为输出量的状态方程为:

$$\dot{m}_f(t) = \lambda \frac{1}{m_{ff}(t)} m_{ff}(t) - \frac{m_{ff}(t)}{\tau} \quad (4)$$

$$\dot{m}_f(t) = \frac{1}{m_{ff}(t)} (1 - \lambda x) m_f(t) \quad (5)$$

收稿日期: 2008年03月17日; 修回日期: 2008年09月21日

基金项目: 部级预研项目

作者简介: 陈林林(1974年), 男, 博士生, 主要从事发动机数学建模、电子控制等方面的研究。

采用零阶保持器建立离散模型, 离散时间为 T , 则有:

$$m_{ff}(k) = \exp(-\lambda T) m_{ff}(k-1) + [1 - \exp(-\lambda T)] n_{ff}(k) \quad (6)$$

$$n_{ff}(k) = \frac{1}{M} m_{ff}(k) + \lambda x n_{ff}(k) + e(k) \quad (7)$$

式中 $e(k)$ 为由于模型的不确定性和数据采集中引起的测量误差。由式(6)和式(7)经变换可得:

$$n_{ff}(k) = \exp(-\lambda T) n_{ff}(k-1) + [1 - \exp(-\lambda T)] m_{ff}(k) + e(k) \quad (8)$$

令 $a = \exp(-\lambda T)$ 、 $b_1 = 1 - \exp(-\lambda T)$ 、 $b_2 = \exp(-\lambda T)$, 差分方程可简化为:

$$n_{ff}(k) = a n_{ff}(k-1) + b_1 m_{ff}(k) + b_2 n_{ff}(k-1) + e(k) \quad (9)$$

在实际工程中, 实际进入气缸内的燃油流量 n_{ff} 无法直接测量, 需通过间接的方法计算得到^[3]。由氧传感器测得的发动机实际燃空比为 λ , 空气流量计测得的进气流量为 n_{ac} , 根据 $\lambda = \frac{n_{ff}}{n_{ac}}$, 可将式(9)变换为:

$$\lambda(k) = \frac{n_{ff}(k)}{n_{ac}(k)} = a \frac{n_{ff}(k-1)}{n_{ac}(k)} + b_1 \frac{n_{ff}(k)}{n_{ac}(k)} + b_2 \frac{n_{ff}(k-1)}{n_{ac}(k)} + \frac{e(k)}{n_{ac}(k)} \quad (10)$$

$$\text{令 } A(k) = \frac{n_{ff}(k-1)}{n_{ac}(k)}, \quad B_1(k) = \frac{n_{ff}(k)}{n_{ac}(k)}, \quad B_2(k) = \frac{n_{ff}(k-1)}{n_{ac}(k)}$$

, 可将式(10)变为:

$$\lambda(k) = a A(k) + b_1 B_1(k) + b_2 B_2(k) + e(k) \quad (11)$$

式中 a 、 b_1 和 b_2 为待辨识参数。在实际工程中还要考虑氧传感器的延迟, 通常认为 $e(k)$ 是均值为零且为独立的高斯分布。当 a 、 b_1 和 b_2 辨识出来时, 即可求出 λ 和 x 。

2 最小二乘递推算法辨识^[5]

将式(11)写为以下的最小二乘格式:

$$\lambda(k) = h^T(k) \theta e(k) \quad (12)$$

式中

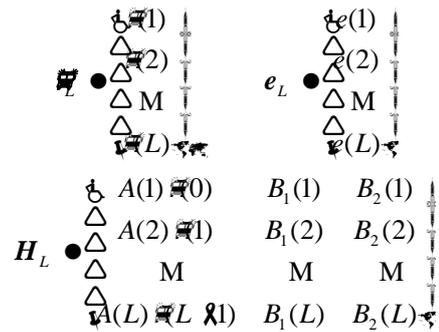
$$\theta(k) = [A(k), B_1(k), B_2(k)]^T \quad (13)$$

$$\theta = [a, b_1, b_2]$$

对于 $k=1, 2, \dots, L$, 式(12)构成一个线性方程组, 即:

$$\lambda(k) = H_L(k) \theta e_L(k) \quad (14)$$

式中



取准则函数有:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^L [e(k)]^2 = \sum_{k=1}^L [\lambda(k) - h^T(k) \theta]^2 = (\lambda - H_L \theta)^T (\lambda - H_L \theta) \quad (15)$$

极小化 $J(\theta)$, 求出参数 θ 的估计值, 使模型的输出最好地预报系统的输出。设 $\hat{\theta}_{LS}$, 使 $J(\theta)|_{\hat{\theta}_{LS}} = \min$, 则有:

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\hat{\theta}_{LS}} = 0 \quad (16)$$

$$\hat{\theta}_{LS} = (H_L^T H_L)^{-1} H_L^T \lambda \quad (17)$$

当获得一批数据后, 利用式(17)可一次求出相应的参数估计值。但当矩阵的维数增加时, 矩阵求逆运算的计算量会急剧增加, 给计算机的计算速度和存储量带来负担。为了减少计算量及数据在计算机中所占的存储量, 也为了有可能实时地辨识出动态系统的特性, 可以采用最小二乘参数估计的递推算法^[10]。当辨识系统在运行时, 每取得一次新的观测数据, 就在前次估计结果的基础上利用新引入的观测数据对前次估计的结果, 根据递推算法进行修正, 从而递推地得出新的参数估计值。

最小二乘递推算法为:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k) [\lambda(k) - h^T(k) \hat{\theta}(k-1)] \quad (18)$$

$$K(k) = P(k) h(k) [h^T(k) P(k) h(k) + 1]^{-1}$$

$$P(k) = [I - K(k) h^T(k)] P(k-1)$$

在式(18)中, 根据前次观测数据得到的 $P(k-1)$ 及新的观测数据, 可以计算出 $K(k)$, 从而由 $\hat{\theta}(k-1)$ 递推算出 $\hat{\theta}(k)$; 下一次的递推计算所需的 $P(k)$ 也可根据 $P(k-1)$ 和 $K(k)$ 等计算出来。参数递推估计过程中的信息变换如图1所示^[5]。

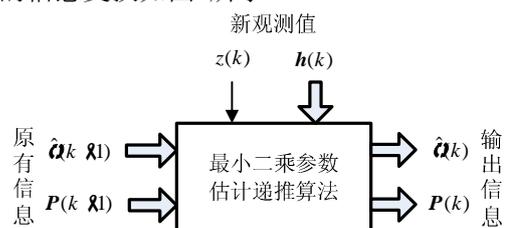


图1 参数递推估计过程中的信息变换

递推计算需要事先选择初始参数 $\hat{\alpha}(0)$ 和 $P(0)$ ，本文根据一批数据利用一次完成算法，可预先求出：

$$\hat{\alpha}(L_0) = (H_{L_0}^T H_{L_0})^{-1} H_{L_0}^T y_{L_0} \quad (19)$$

$$P(L_0) = P(0) - H_{L_0}^T H_{L_0}^{-1} H_{L_0} P(0)$$

式中 L_0 为数据长度，为了减少计算量， L_0 不宜取太大。并置 $P(0) = P(L_0)$ ， $\hat{\alpha}(0) = \hat{\alpha}(L_0)$ 。

本文对某型四冲程汽油发动机辨识了节气门开度 α 、 $n = 2000$ r/min 稳态工况下的油膜参数 b_1 和 x 。在该工况下，给喷油量一个阶跃变化扰动信号，同时采集此时的转速、喷油量、进气流量和空燃比等数据用于辨识，采样间隔 $T = 0.1$ s，辨识数据长度为 $L = 20$ 。

最小二乘递推算法辨识结果如图2所示，辨识参数相对误差曲线如图3所示，最小二乘递推算法辨识流程如图4所示。从图3中可以看到，开始阶段辨识参数的相对误差较大，递推到第6步时，辨识参数基本上达到了稳定状态，参数的相对变化量 $E \leq 0.05$ ，辨识速度较快。

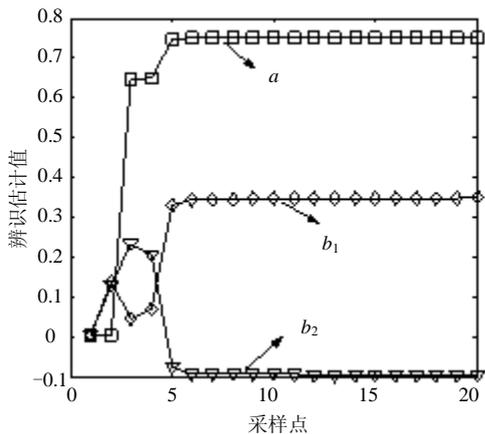


图2 最小二乘递推算法参数辨识估计结果

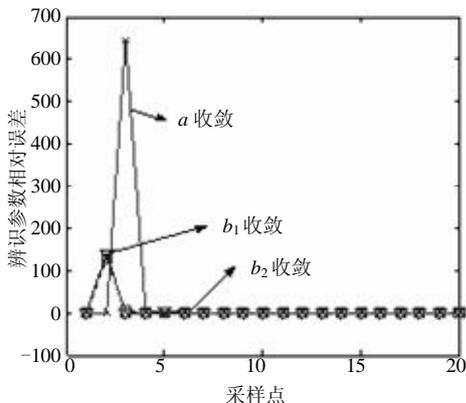


图3 最小二乘递推算法参数相对误差曲线

表1 最小二乘递推算法待辨识参数的辨识结果

参数	a	b_1	b_2	α	x
估计值	0.749 8	0.348 3	0.098 1	0.347 3	0.651 7

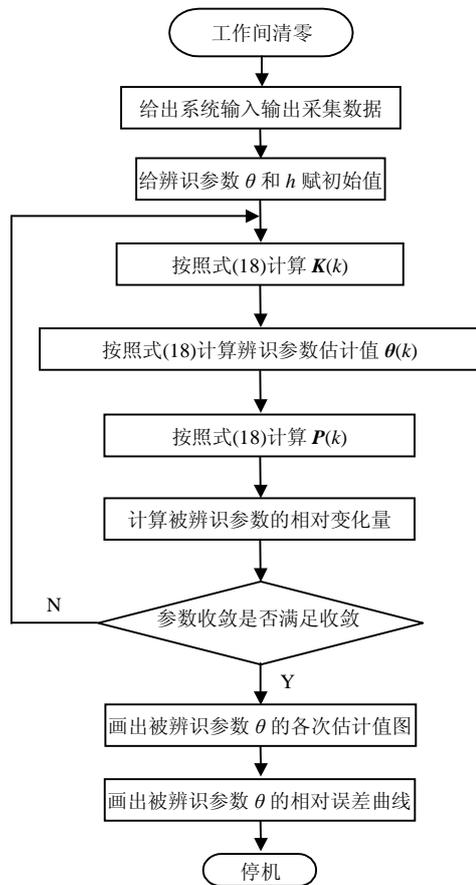


图4 最小二乘递推算法辨识流程

3 瞬态工况的空燃比仿真和实验验证

为了验证辨识模型及所辨识参数的正确性，本文采用了实验和仿真相结合的验证方法。采用 Matlab 中的 Simulink 工具建立了该型汽油发动机空燃比模型^[6-10]，把所辨识的油膜参数 b_1 和 x 代入模型中的油膜子模型模块，发动机燃油蒸发模型和空燃比模型分别如图5和图6所示。

由于瞬态工况实质是节气门突变导致喷油量的突变，可采用某稳态工况下喷油量小偏差阶跃干扰的方法来模拟发动机瞬态工况喷油量的变化^[10]。由于处于稳态工况，节气门开度和发动机转速恒定，所以发动机的空气进气流量恒定，当喷油量阶跃变化时，发动机的空燃比是变化的。把发动机实验采集的空燃比曲线和 Simulink 模型仿真出来的空燃比曲线进行比较，如果两者曲线重合度较好，则认为参数估计是比较准确的。这种实验验证方法的原理在于，当给喷油脉宽一个阶跃扰动时，空燃比也会

表1为待辨识参数的辨识结果。

随着扰动周期阶跃变化。由于油膜动态效应的作用, 在空燃比的上升沿和下降沿都有圆滑的过渡, 这个过渡的大小与 β 和 x 值有关。当以实际的发动机运转参量作为油膜子模型输入时, 如果参数估计正确,

仿真得到的空燃比上升沿和下降沿的圆滑过渡与实际空燃比的圆滑过渡基本重合, 说明估计的油膜动态模型参数 β 和 x 值是基本正确的^[2-3,11]。

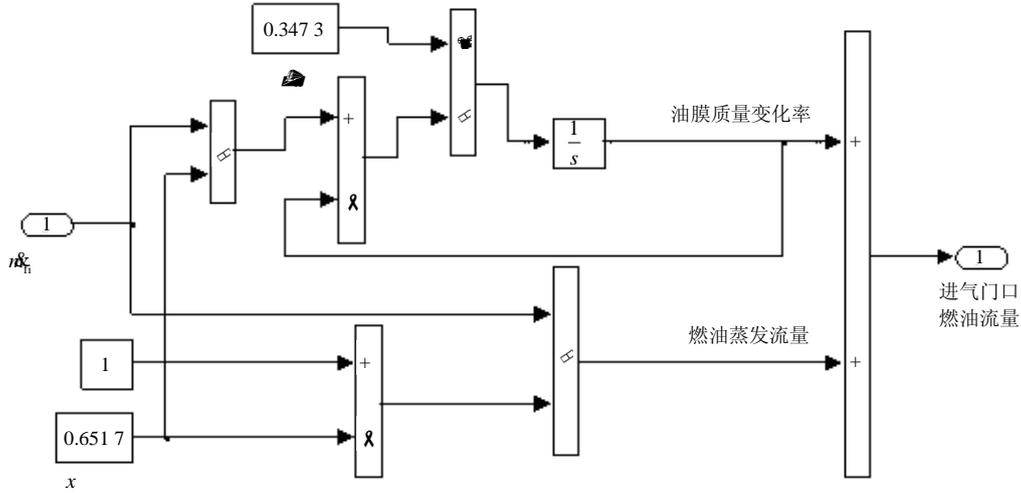


图5 发动机燃油与蒸发动态模型仿真框图

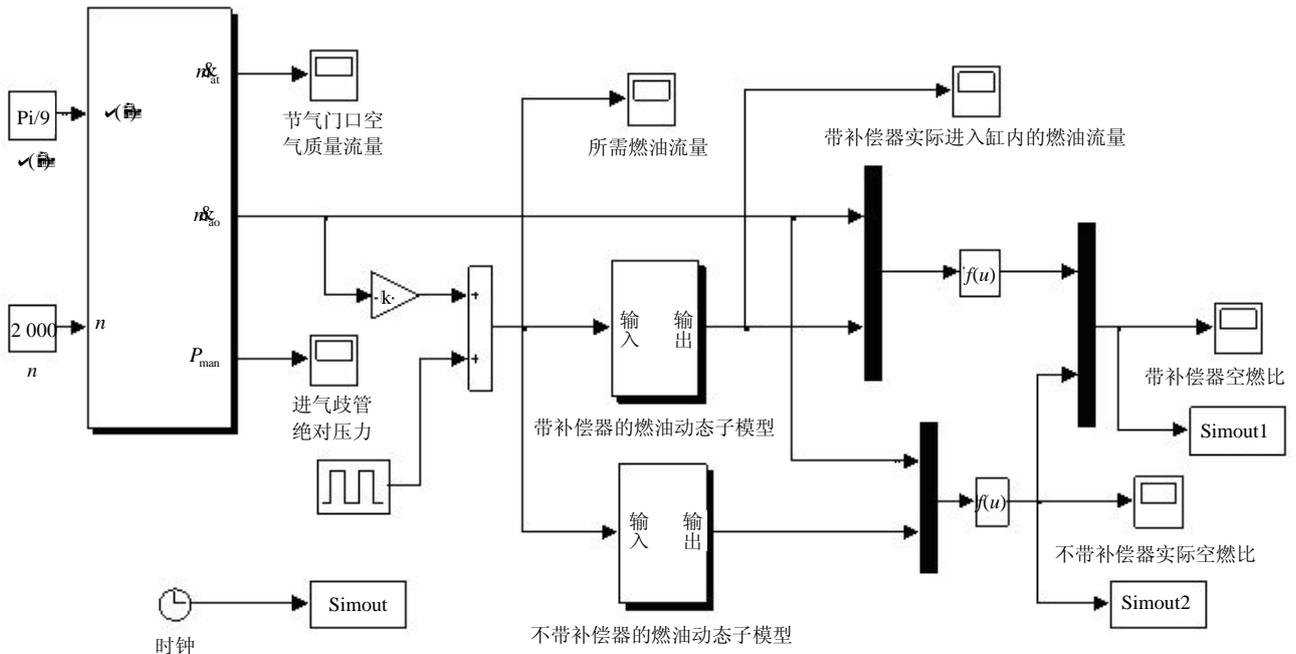


图6 发动机空燃比模型仿真框图

发动机空燃比模型加小偏差阶跃干扰后, 空燃比的变化仿真曲线如图7所示。从图中可以看出, 油膜动态效应导致空燃比曲线的上升沿和下降沿都有圆滑的过渡。

膜参数的精确度。

选取该稳态工况点在发动机上做实验, 给喷油脉宽加小偏差阶跃扰动, 同时采集空燃比, 保存数据。数据处理后实际空燃比变化曲线如图8所示, 证实了发动机瞬态工况的油膜动态效应。

采集的空燃比曲线和仿真的空燃比曲线的比较如图9所示。从图中可以看出, 比较曲线重合度较好, 证明了油膜子模型的正确性, 也说明了所辨识的油

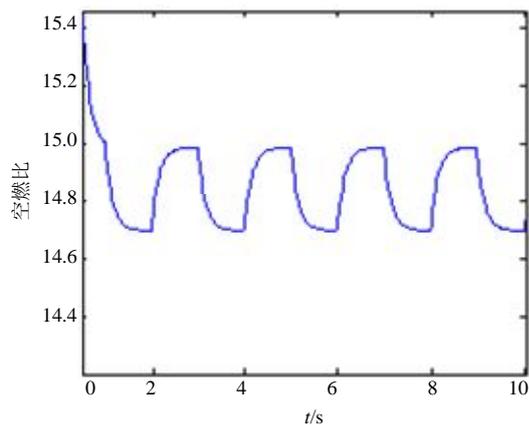


图7 喷油量小偏差干扰变化后空燃比变化仿真曲线

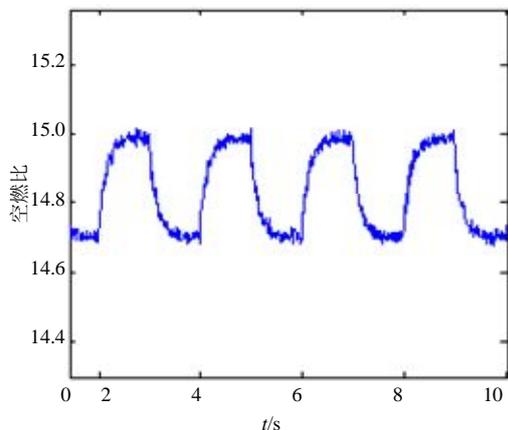


图8 喷油量小偏差干扰变化后实际空燃比变化曲线

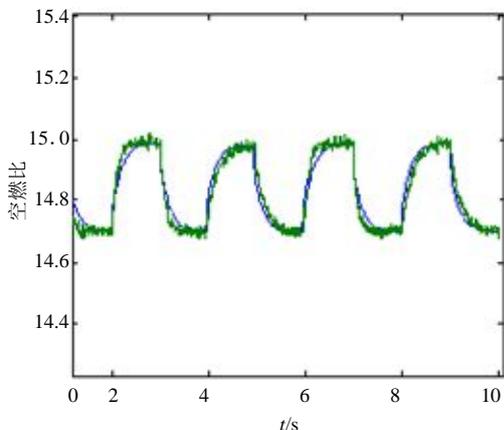


图9 喷油量小偏差后仿真空燃比和实际空燃比曲线比较

4 结 论

各个工况下的油膜参数对于瞬态工况下空燃比的精确控制十分重要, 本文采用最小二乘递推算法对油膜参数进行辨识估计。结果表明, 最小二乘递推算法辨识油膜参数速度快, 辨识精度高, 满足实际工程需要。最小二乘递推算法简单而实用。

参 考 文 献

- [1] HE Yong-sheng, LIN Chan-chiao. Development and validation of a mean value engine model for integrated engine and control system simulation[C]//SAE International Conference. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 2007.

- [2] 朱 航, 王绍光. 电控汽油机进气管道油膜特性参数的标定[J]. 汽车工程, 2004, 26(2): 127-130.
ZHU Hang, WANG Shao-guang. Calibration for characteristic parameters of fuel film in intake duct of EFI gasoline engine[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(2): 127-130.
- [3] 钟祥麟. 基于油膜模型的多点喷射汽油机瞬态工况控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
ZHONG Xiang-lin. Study on control of MPI gasoline engine in transient condition based on fuel film model[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [4] HENDRICKS E, SORENSON S C. Mean value modeling of spark ignition engines[C]//SAE International Conference. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1990.
- [5] 侯媛彬, 汪 梅. 系统辨识及其MATLAB仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
HOU Yuan-bin, WANG Mei. System identification and MATLAB simulation[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [6] HENDRICKS E, CHEVALIER A, JENSEN M. Modeling of the intake manifold filling dynamics[C]//SAE International Conference. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1996.
- [7] ONDER C H, GEERING H P. Model-based multivariable speed and air-to-fuel ratio control of an SI engine[C]// SAE International Conference. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1993.
- [8] AQUINO C F. Transient A/F control characteristics of the 5 liter central fuel injection engine[C]//SAE International Conference. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1981.
- [9] CHEVALIER A, MULLER M, HENDRICKS E. On the validity of mean value engine models during transient operation[C]//SAE International Conference. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 2000.
- [10] HENDRICKS E. The analysis of mean value SI engine model[C]//SAE International Conference. [S.l.]: Society of Automotive Engineers, 1992.
- [11] 邹博文, 吴 锋. 电喷汽油机进气管燃油动态模型及补偿的仿真[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 423-425.
ZOU Bo-wen, WU Feng. A simulation on fuel dynamic model and its compensation for the intake manifold of an EFI gasoline engine[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(4): 423-425.

编 辑 黄 莘