

汽油机进气道油膜动力学模型参数辨识*

郑太雄¹ 周可君² 李永福² 李宣政²

(1. 重庆邮电大学先进制造学院, 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学自动化学院, 重庆 400065)

摘要: 为了更加精确地辨识汽油机进气道油膜模型参数,从而更加精确地控制空燃比,在油膜动力学模型的基础上,考虑模型误差和随机误差,建立了油膜辨识方程。根据递推最小二乘算法得到油膜参数估计的加权矩阵表达式,利用马尔可夫估计得到该加权矩阵,进而得到油膜参数的最优估计。应用 GT-power 建立了发动机模型,在转速 1 000 ~ 3 500 r/min、节气门开度 5% ~ 75% 变化时,分别利用提出的算法和最小二乘法对油膜参数进行了辨识,并与标定值进行了比较。结果表明,燃油沉积系数 X 在同一转速时,随着节气门开度的增大而减小,在同一节气门开度时,随着转速的增加而减小;油膜质量蒸发时间常数 τ 在同一转速时,随着节气门开度的增大而增加;在同一节气门开度时,随着转速的增加而减小。通过误差分析,表明所提出的方法比最小二乘算法的辨识结果精度更高。

关键词: 发动机 油膜模型 参数辨识 递推最小二乘算法 马尔可夫估计

中图分类号: TK417 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0296-06

Parameter Identification of Intake Port Fuel Film Dynamic Model for Gasoline Engine

Zheng Taixiong¹ Zhou Kejun² Li Yongfu² Li Xuanzheng²

(1. School of Advanced Manufacturing Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Accurate air-fuel ratio control is the key element for fuel economy low emissions and good driveability of spark ignition engine. In order to more accurately identify the fuel film model parameter and achieve precise control of air-fuel ratio, the film identification equation based on fuel film dynamic model was built under the consideration of model error and random error. According to recursive least squares, the parameter estimation with weighted matrix expression was got, then the weighted matrix was solved using Markov estimation and the estimated value of optimal film parameter was got consequently. An engine model was set up using GT-power, and air fuel ratio, mass injection flow engine speed and air mass flow were obtained by using sampling experiment. Parameter identification applying the proposed algorithm and the least squares were conducted at 1 000 ~ 3 500 r/min with throttle opened from 5% ~ 75%, respectively. Meanwhile, the identification results were compared with the calibration value. The results showed that the deposition coefficient X of fuel reduced and evaporation time constant τ of film quality increased with increase of throttle opening degree when speed was the same, and X , τ decreased as speed increasing when throttle opening degree was the same. Compared with the least squares algorithm, more accurate identification result can be got by using the proposed algorithm.

Key words: Engine Fuel film model Parameter identification Recursive least squares algorithm Markov estimation

收稿日期: 2014-05-30 修回日期: 2014-06-20

* 国家自然科学基金资助项目(61304197)、重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ130506)和重庆邮电大学青年基金资助项目(A2012-78)

作者简介: 郑太雄,教授,博士,主要从事汽车电子相关研究,E-mail: zhengtx@cqupt.edu.cn

引言

发动机空燃比的精确控制对汽车节油及减少污染物排放至关重要。发动机处于稳态工况时,空燃比的精确控制容易实现,但是当发动机处于瞬态工况时,由于油膜动态效应的存在,空燃比控制会出现偏差^[1]。因此准确获知瞬态工况进气道油膜参数是精确控制汽油机过渡工况空燃比的关键^[2-3]。

对油膜现象的研究,Jørgen 等^[4]和 Almkvist^[5]最早进行了进气道附壁油膜实验测量,对附壁油膜的形成、流动及蒸发机理进行了理论研究,使人们对进气道油膜的机理有了非常直接的认识。但是由于没有直接测量油膜参数的传感器,人们必须借助辅助手段来获取油膜参数^[6]。因此,国内外学者又对油膜动力学参数的精确测量做了深入研究。目前,油膜参数的获取方法分为实验标定法和参数辨识法^[7-14]。朱航等^[15]分析了油膜的表现形式,提出了参数实验标定方法,结果表明由此方法标定的油膜模型参数能够较好地满足空燃比控制要求。但是实验标定受工况及温度影响较大,而且需要大量实验^[15-16]。Aquino^[17]针对瞬态工况时附壁油膜的动态效应,提出了双参数油膜动力学模型,为人们利用系统辨识方法辨识油膜参数创造了条件。李顶根等^[7]根据测量的氧传感器的值,采用最小二乘法对油膜模型参数进行辨识,但是,该方法辨识精度较低,实时性不高。李顶根等^[18]又提出先对基于广义最小二乘法的油膜参数辨识方法。但是,当测量过程中的输出噪信比较大时,辨识结果容易陷入局部极值点。文献[7]还提出了一种夏氏偏差算法用于估计油膜模型参数,但是该方法仍存在着较大的偏差。Qadeer Ahmed^[19]还提出了一种非线性观测器对油膜动力学参数进行辨识,但该方法要求系统模型、系统误差模型和观测误差模型精确已知,这在实际应用中很难满足。本文提出一种递推最小二乘的马尔可夫估计算法对油膜模型参数进行辨识,并将所提出算法的辨识结果和最小二乘辨识结果与标定结果进行对比。

1 油膜辨识模型的搭建

燃油蒸发油膜动力学模型^[16,20]为

$$\dot{m}_{ff} = X \dot{m}_{fi} - \frac{m_{ff}}{\tau} \tag{1}$$

$$\dot{m}_{fe} = (1 - X) \dot{m}_{fi} + \frac{m_{ff}}{\tau} \tag{2}$$

式中 $\dot{m}_{fe}$ ——实际进入气缸的燃油质量流量
 $\dot{m}_{fi}$ ——喷油器喷射的燃油质量流量

m_{ff} ——附壁油膜质量
 X ——燃油沉积系数
 τ ——油膜质量蒸发时间常数

对油膜动态模型离散化,并对离散化的方程作差分变换,得到离散差分方程^[13]为

$$\dot{m}_{fe}(k) = \left[\frac{1}{\tau} X \int_0^T e^{-\frac{1}{\tau} T} dt - e^{-\frac{1}{\tau} T} (1 - X) \right] \dot{m}_{fi}(k - 1) + e^{-\frac{1}{\tau} T} \dot{m}_{fe}(k - 1) + (1 - X) \dot{m}_{fi}(k) \tag{3}$$

式中 T ——氧传感器采样周期

令 $a = e^{-\frac{1}{\tau} T}$, $b = 1 - X$, $c = X - e^{-\frac{1}{\tau} T}$, 则离散差分方程简化为

$$\dot{m}_{fe}(k) = a \dot{m}_{fe}(k - 1) + b \dot{m}_{fi}(k) + c \dot{m}_{fi}(k - 1) \tag{4}$$

在实际测量中, m_{fe} 无法直接测量, 只能通过氧传感器间接测量, 然而氧传感器一般安装在排气口后, 三元催化器前, 因此, 相对真实值, 间接测量得到的 m_{fe} 有一定的延迟, 应充分考虑这部分延迟对测量精度的影响^[20]。令 $z(k) = \dot{m}_{fe}(k)$, $h(k) = [\dot{m}_{fe}(k - 1) \quad \dot{m}_{fi}(k) \quad \dot{m}_{fi}(k - 1)]$, 视延迟造成的误差为测量误差, 并考虑模型误差及其他干扰, 引入随机误差项 $v(k)$, 式(4)可写成

$$z(k) = h(k) \theta + v(k) \tag{5}$$

其中 $\theta = [a \quad b \quad c]^T$

式中 θ ——待估计参数

令 $k = 1, 2, \cdots, n$, 则

$$H_n = \begin{bmatrix} h(1) \\ h(2) \\ \vdots \\ h(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{m}_{fe}(0) & \dot{m}_{fi}(1) & \dot{m}_{fi}(0) \\ \dot{m}_{fe}(1) & \dot{m}_{fi}(2) & \dot{m}_{fi}(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{m}_{fe}(k-1) & \dot{m}_{fi}(k) & \dot{m}_{fi}(k-1) \end{bmatrix}$$
$$V_n = [v(1) \quad v(2) \quad \cdots \quad v(k)]^T$$
$$Z_n = \begin{bmatrix} z(1) \\ z(2) \\ \vdots \\ z(k) \end{bmatrix}$$

则式(5)的矩阵形式可表示为

$$Z_n = H_n \theta + V_n \tag{6}$$

2 递推最小二乘的马尔可夫估计

一般最小二乘法的基本准则为

$$\min J(\hat{\theta}) = (Z_n - H_n \hat{\theta})^T (Z_n - H_n \hat{\theta}) \tag{7}$$

式中 $\hat{\theta}$ ——待估计参数 θ 的估计值

为使式(7)达到最小,即

$$\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{\theta}} \Big|_{\boldsymbol{\theta}=\hat{\boldsymbol{\theta}}} = -2\mathbf{H}_n^T(\mathbf{Z}_n - \mathbf{H}_n\boldsymbol{\theta}) = 0 \tag{8}$$

则 $\boldsymbol{\theta}$ 的最小二乘估计值为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}_n^T \mathbf{H}_n)^{-1} \mathbf{H}_n^T \mathbf{Z}_n = [\hat{a} \quad \hat{b} \quad \hat{c}]^T \tag{9}$$

$\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}$ 为 a, b, c 的最小二乘估计值。

根据最小二乘法的基本思想,递推最小二乘在每取得一个新的数据之后,就利用新数据对前一次估计的结果进行修正,得到新的估计结果,可以概括为:当前估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 等于上次估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ 加上修正项。

在计算过程中,上次估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ 与修正项占有同等比重,而事实上,可采用加权的办法分别对待上次估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ 与修正项,将修正项权重取得大些,将上次估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ 权重取得小些,能使递推最小二乘算法的精度更高。

加权最小二乘法的准则为

$$\min J(\hat{\boldsymbol{\theta}}) = (\mathbf{Z}_n - \mathbf{H}_n \hat{\boldsymbol{\theta}})^T \mathbf{W}_n (\mathbf{Z}_n - \mathbf{H}_n \hat{\boldsymbol{\theta}}) \tag{10}$$

其中, $\mathbf{W}_n = \text{diag}[w(1), w(2), \dots, w(n)]$ 为加权矩阵。与普通最小二乘法同理,由式(10)可得

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{H}_n)^{-1} \mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{Z}_n = [\hat{a} \quad \hat{b} \quad \hat{c}]^T \tag{11}$$

在发动机附壁油膜模型中,设误差 $\mathbf{V}_n = [v(1) \quad v(2) \quad \dots \quad v(n)]^T$ 中的 $v(i) (i=1, 2, \dots, n)$ 是同分布、零均值、独立随机变量,方差为 δ^2 。

令 $\mathbf{G} = \delta^2 \mathbf{I}$, 根据式(11)求得加权最小二乘算法的估计误差为

$$\mathbf{F} = (\mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{H}_n)^{-1} \mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{G} \mathbf{W}_n (\mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{H}_n)^{-1} \tag{12}$$

当式(12)中 $\mathbf{W}_n = \mathbf{G}^{-1}$ 时,加权最小二乘算法的估计误差最小,为

$$\mathbf{F} = (\mathbf{H}_n^T \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}_n)^{-1} \tag{13}$$

$\boldsymbol{\theta}$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}_n^T \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}_n)^{-1} \mathbf{H}_n^T \mathbf{G}^{-1} \mathbf{Z}_n \tag{14}$$

故将 $\mathbf{W}_n = \mathbf{G}^{-1}$ 时的加权最小二乘估计称为马尔可夫估计,它的均方误差能达到最小,优于其他的加权最小二乘法。因此本文将由马尔可夫估计得到的加权矩阵 $\mathbf{W}_n$ 应用于递推最小二乘算法中。

由式(5)可得

$$\mathbf{z}(n+1) = \mathbf{h}(n+1)\boldsymbol{\theta} + v(n+1) \tag{15}$$

因此,对于有 $n+1$ 个数据的油膜系统来说,油膜参数辨识方程为

$$\mathbf{Z}_{n+1} = \mathbf{H}_{n+1}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{V}_{n+1} \tag{16}$$

根据式(11)可得

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{n+1} = (\mathbf{H}_{n+1}^T \mathbf{W}_{n+1} \mathbf{H}_{n+1})^{-1} \mathbf{H}_{n+1}^T \mathbf{W}_{n+1} \mathbf{Z}_{n+1} \tag{17}$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{W}_{n+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_n & 0 \\ 0 & \mathbf{w}(n+1) \end{bmatrix}$$

$$\text{令} \quad \mathbf{Q}_n = (\mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{H}_n)^{-1} \tag{18}$$

$$\mathbf{Q}_{n+1} = (\mathbf{H}_{n+1}^T \mathbf{W}_{n+1} \mathbf{H}_{n+1})^{-1} \tag{19}$$

有

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{n+1} &= \left(\begin{bmatrix} \mathbf{H}_n^T & \mathbf{h}^T(n+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_n & 0 \\ 0 & \mathbf{w}(n+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_n \\ \mathbf{h}(n+1) \end{bmatrix} \right)^{-1} = \\ &= \left[\mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{H}_n + \mathbf{h}^T(n+1) \mathbf{w}(n+1) \mathbf{h}(n+1) \right]^{-1} = \\ &= \left[\mathbf{Q}_n^{-1} + \mathbf{h}^T(n+1) \mathbf{w}(n+1) \mathbf{h}(n+1) \right]^{-1} = \\ &= \mathbf{Q}_n - \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1) [\mathbf{w}^{-1}(n+1) + \mathbf{h}(n+1) \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1)]^{-1} \mathbf{h}(n+1) \mathbf{Q}_n \tag{20} \end{aligned}$$

$$\mathbf{Q}_n^{-1} = \mathbf{Q}_{n+1}^{-1} - \mathbf{h}^T(n+1) \mathbf{w}(n+1) \mathbf{h}(n+1) \tag{21}$$

由式(11)、(17)可得

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}_n &= \mathbf{Q}_n \mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{Z}_n \tag{22} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}_{n+1} &= \mathbf{Q}_{n+1} \mathbf{H}_{n+1}^T \mathbf{W}_{n+1} \mathbf{Z}_{n+1} = \\ &= \mathbf{Q}_{n+1} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_n^T & \mathbf{h}^T(n+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_n & 0 \\ 0 & \mathbf{w}(n+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_n \\ \mathbf{z}(n+1) \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{Q}_{n+1} \mathbf{H}_n^T \mathbf{W}_n \mathbf{Z}_n + \mathbf{Q}_{n+1} \mathbf{h}^T(n+1) \mathbf{w}(n+1) \mathbf{z}(n+1) \tag{23} \end{aligned}$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} \mathbf{h}^T(n+1) \mathbf{w}(n+1) \mathbf{z}(n+1) \mathbf{Q}_{n+1}^{-1} \hat{\boldsymbol{\theta}}_n \tag{24}$$

将式(21)代入式(24)中可得

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{n+1} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_n + \mathbf{Q}_{n+1} \mathbf{h}^T(n+1) \mathbf{w}(n+1) [\mathbf{z}(n+1) - \mathbf{h}(n+1) \hat{\boldsymbol{\theta}}_n] \tag{25}$$

令 $\mathbf{R}_{n+1} = \mathbf{Q}_{n+1} \mathbf{h}^T(n+1) \mathbf{w}(n+1)$, 由式(20)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{n+1} &= \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1) [\mathbf{w}^{-1}(n+1) + \\ &+ \mathbf{h}(n+1) \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1)]^{-1} \tag{26} \end{aligned}$$

由以上推导过程可以推出递推最小二乘的马尔可夫估计为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{n+1} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_n + \mathbf{R}_{n+1} [\mathbf{z}(n+1) - \mathbf{h}(n+1) \hat{\boldsymbol{\theta}}_n] \tag{27}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{n+1} &= \mathbf{Q}_n - \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1) [\mathbf{w}^{-1}(n+1) + \\ &+ \mathbf{h}(n+1) \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1)]^{-1} \mathbf{h}(n+1) \mathbf{Q}_n \tag{28} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{n+1} &= \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1) [\mathbf{w}^{-1}(n+1) + \\ &+ \mathbf{h}(n+1) \mathbf{Q}_n \mathbf{h}^T(n+1)]^{-1} \tag{29} \end{aligned}$$

将油膜辨识方程的喷油器喷射的燃油质量流量 $\dot{m}_{f_s}$ 作为输入项,实际进入气缸的燃油质量流量 $\dot{m}_{f_e}$ 作为输出项。由以上递推最小二乘的马尔可夫估计算法估算出油膜辨识方程的参数 $\hat{a}, \hat{b}, \hat{c}$, 根据 $a = e^{-\frac{1}{\tau}T}, b = 1 - X, c = X - e^{-\frac{1}{\tau}T}$ 可以计算出油膜参数 X 和 τ 的最小二乘估计值 $\hat{X}$ 和 $\hat{\tau}$ 。

3 仿真结果与分析

首先利用 GT-power 对发动机进行建模,发动机基本参数如表 1 所示。

由于燃油油膜附着在进气道壁面及进气门背面,因此保持进气道壁温 450 K 为温度参考点,节气

门开度在 5% ~ 75% 内变化,转速分别为 1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、3 500 r/min 时,在单缸模型中对 X 的值进行标定,并根据 X 的标定值计算出 τ 的标定值。具体标定方法见文献[15], X 和 τ 的标定结果如图 1 和图 2 所示。

表 1 发动机基本配置参数

Tab.1 Basic configuration parameters of engine

参数	数值
进气方式	自然进气
缸数	1
进气管壁温/K	450
进气管长度/mm	80
进气管半径/mm	20
氧传感器自身响应延迟/s	0.13

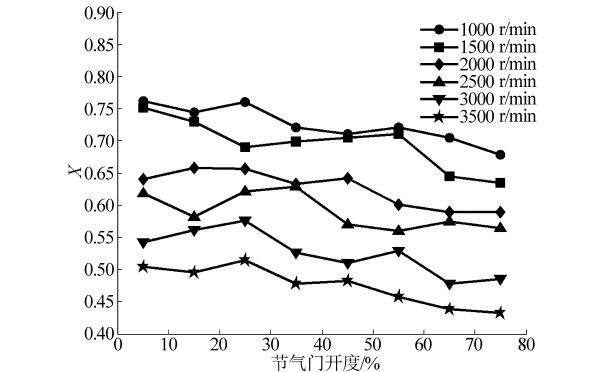


图 1 X 标定结果

Fig.1 Calibration results of X

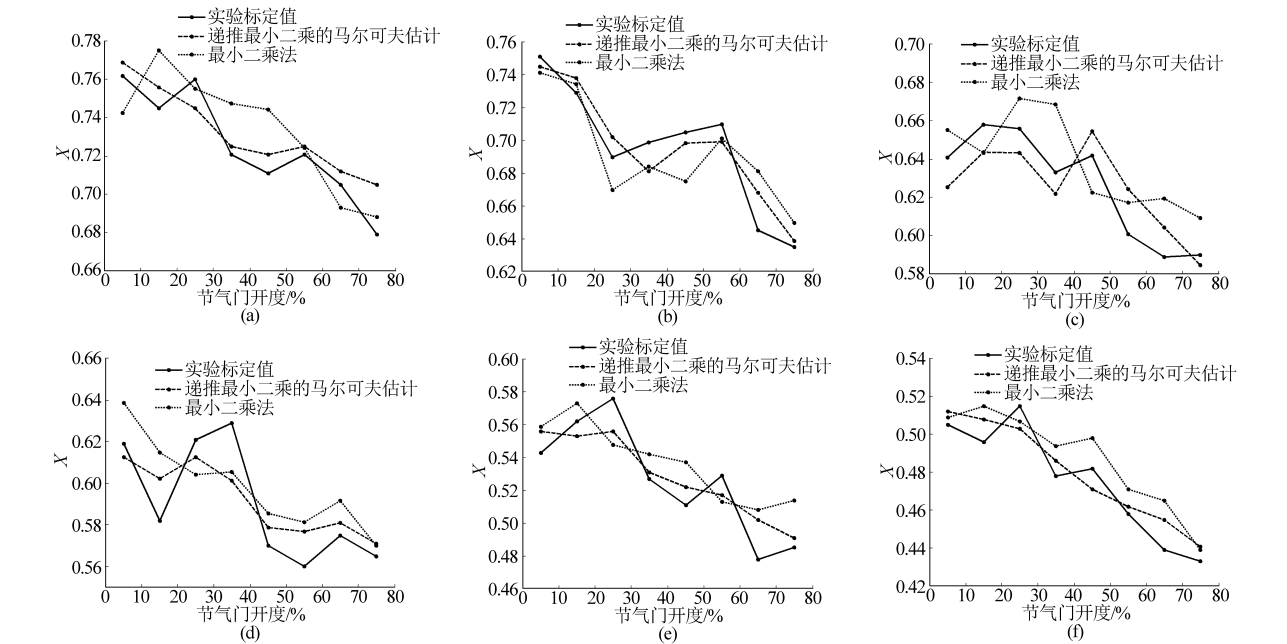


图 3 X 的辨识结果

Fig.3 Identification results of X

(a) 1 000 r/min (b) 1 500 r/min (c) 2 000 r/min (d) 2 500 r/min (e) 3 000 r/min (f) 3 500 r/min

结果表明:递推最小二乘马尔可夫估计的辨识结果误差更小,更接近标定值,优于最小二乘法的辨

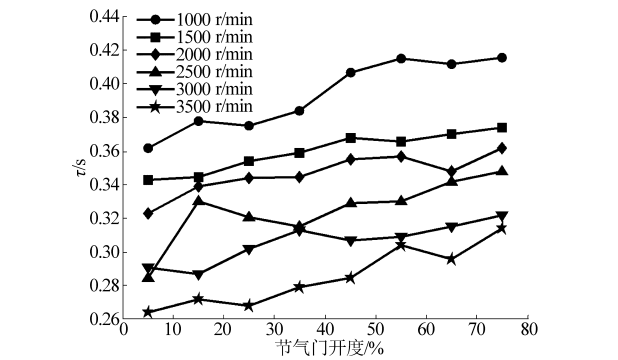


图 2 τ 标定结果

Fig.2 Calibration results of τ

在参数辨识的过程中,选取几个具有代表性的工况点:保持进气道壁温 450 K,分别将节气门开度从 5% 调节到 75%,转速从 1 000 r/min 调节到 3 500 r/min。

采用递推最小二乘马尔可夫估计算法及最小二乘算法分别对 X 的值进行辨识,并与其标定值相比较,如图 3 所示。

由图 3 可知,燃油沉积系数 X 随着发动机转速增加而减小,在同一转速时,随着节气门开度的增大而减小;在同一节气门开度时,随着转速的增加而减小。图中最小二乘法 and 递推最小二乘马尔可夫估计对 X 的辨识结果与标定结果大致相同。为了更清晰地分析 2 种辨识方法的精度,2 种方法的辨识结果相对于标定结果的误差如表 2 所示。

油膜参数 τ 的辨识结果如图 4 所示。

表 2 相对标定值的 X 辨识结果误差比较

Tab.2 Identification results error of X		
发动机转速 /($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	最小二 乘法/%	递推最小二乘 马尔可夫估计/%
1 000	4.68	3.83
1 500	5.59	3.59
2 000	5.62	3.89
2 500	5.65	4.39
3 000	6.27	5.02
3 500	5.92	3.64

由图 4 可以看出,油膜参数 τ (油膜质量蒸发时间常数)随发动机转速的增加而减小,当转速一定时,随节气门开度的增大而呈递增的趋势,这是因为负荷的增加,进气压力会随之增加,抑制油膜蒸发。为了更清晰的分析 2 种辨识方法的精度,2 种方法的辨识结果相对于标定结果的误差如表 3 所示。

表 3 相对标定值的 τ 辨识结果误差比较

Tab.3 Identification results error of τ		
发动机转速 /($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	最小二 乘法/%	递推最小二乘 马尔可夫估计/%
1 000	5.63	3.15
1 500	7.89	3.55
2 000	7.00	5.66
2 500	9.39	5.45
3 000	5.57	4.13
3 500	7.43	3.72

结果表明:采用最小二乘法辨识的 τ 值最大偏差接近 0.1 s,而采用递推最小二乘的马尔可夫估计算法辨识的 τ 值最大偏差小于 0.06 s。递推最小二乘马尔可夫估计的辨识结果更接近标定值,优于最小二乘法的辨识结果。

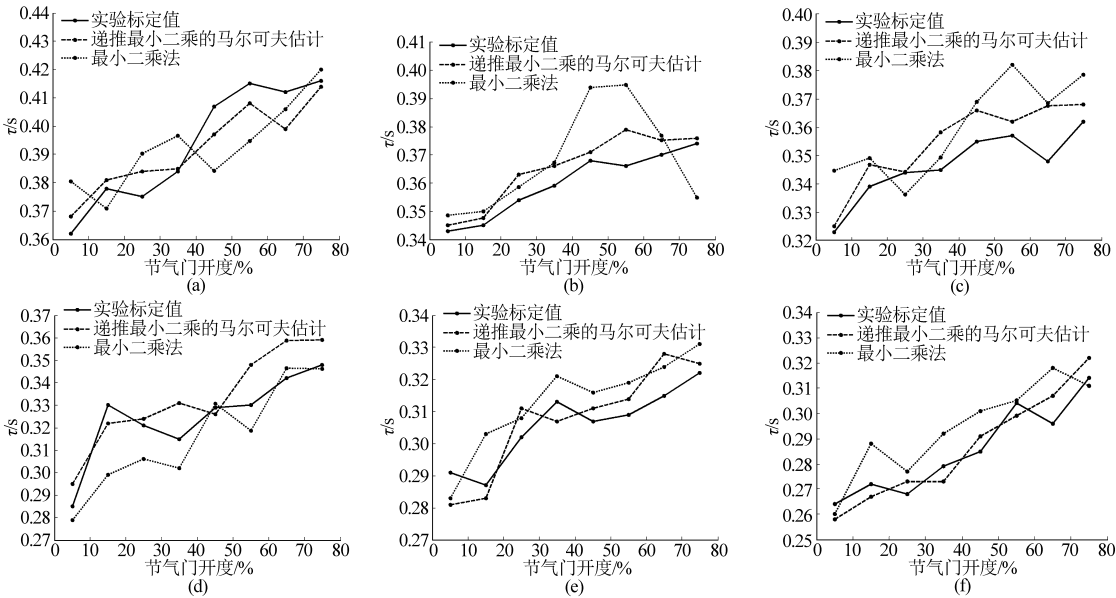


图 4 τ 的辨识结果

Fig.4 Identification results of τ

(a) 1 000 r/min (b) 1 500 r/min (c) 2 000 r/min (d) 2 500 r/min (e) 3 000 r/min (f) 3 500 r/min

4 结束语

在油膜模型的基础上,应用递推最小二乘马尔可夫估计对发动机油膜模型参数(X 和 τ)进行参数

辨识,并以实验标定值作为参考,与一般最小二乘法辨识结果进行了对比。仿真结果表明,递推最小二乘的马尔可夫估计算法在辨识附壁油膜参数上具有更高的精度。

参 考 文 献

1 Elbert Hendricks. Mean value modeling of spark ignition engines [C]. SAE Paper 682 – 690, 1996.

2 Stanglmaier R S, Matthew J, Matthews R D. In-cylinder fuel transport during the first cranking cycles in a port injected 4-valve engine[C]. SAE Paper 970043, 1997.

3 马宗正,程勇,纪少波,等. 进气流动对 PFI 汽油机燃油喷雾碰壁过程的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 10 – 15. Ma Zongzheng, Cheng Yong, Ji Shaobo, et al. Influences of intake flow on spray and wall-film for port fuel injection gasoline engine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 10 – 15. (in Chinese)

4 Johnen T,Haug M. Spray formation observation and fuel film development measurements in the intake of a spark ignition engine [C]. SAE Paper 950511, 1995.

5 Almkvist G. Measurement of fuel film thickness in the inlet port of an SI engine by laser induced fluo rescence [C]. SAE Paper

952483, 1995.

6 纪少波, 程勇, 马宗正, 等. 汽油机进气过程燃油喷射挥发速率影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 25 – 30.
Ji Shaobo, Cheng Yong, Ma Zongzheng, et al. Influence factor analysis of fuel evaporation in intake stroke[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 25 – 30. (in Chinese)

7 李顶根, 舒咏强. 汽油机进气道油膜模型参数辨识算法的研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(4): 363 – 369.
Li Dinggen, Shu Yongqiang. Research of parameter identification algorithm of intake port fuel film model for gasoline engine [J]. Transactions of CSICE, 2009, 27(4): 363 – 369. (in Chinese)

8 陈林林, 魏民祥, 杨海青. 汽油发动机瞬态工况油膜参数辨识的研究[J]. 电子科技大学学报: 自然科学版, 2009, 38(4): 636 – 640.
Chen Linlin, Wei Minxiang, Yang Haiqing. Parameter identification of fuel film model transient condition for gasoline engine [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China: Natural Science Edition, 2009, 38(4): 636 – 640. (in Chinese)

9 Wu Yihu, Hou Zhixiang, Kuang Biao, et al. A compensate method for air fuel ratio in gasoline engine start process based on dynamic fuel film model [C]//2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2010, 1: 40 – 45.

10 Manzie C, Palaniswami M, Watson H. Model predictive control of a fuel injection system with a radial basis function network observer [J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2002, 124(4): 648 – 659.

11 Elbert Hedricks. Engine modeling for control applications: a critical survey [J]. Meccanica, 1997, 32(5): 387 – 396.

12 孟嗣宗, 郭少平, 张文海. 发动机精确空燃比控制方法的研究[J]. 内燃机工程, 1999, 20(2): 70 – 75.
Meng Sizong, Guo Shaoping, Zhang Wenhai. Research on accurate air-fuel ratio control strategy of SI engines [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1999, 20(2): 70 – 75. (in Chinese)

13 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 engine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 26 – 30. (in Chinese)

14 邹博文, 吴锋, 杨志家. 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 – 429.
Zou Bowen, Wu Feng, Yang Zhijia. 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 – 429. (in Chinese)

15 朱航, 王绍航. 电控汽油机进气道油膜特性参数的标定[J]. 汽车工程, 2004, 26(2): 127 – 130.
Zhu Hang, Wang Shaoguang. Calibration for characteristic parameters of fuel film in intake duct of EFI gasoline engine [J]. Automotive Engineering, 2004, 26(2): 127 – 130. (in Chinese)

16 Gangopadhyay A, Meckl P H. Extracting physical parameters from system identification of a natural gas engine [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(3): 425 – 434.

17 Aquino C F. Transient A/F ratio control characteristic of the 5 liter central fuel injection engine [C]. SAE Paper 682 – 694, 1981.

18 李顶根, 李小中. 电喷汽油机油膜效应动态参数辨识精度的研究[J]. 内燃机学报, 2010, 28(5): 453 – 458.
Li Dinggen, Li Xiaozhong. Study on accuracy identification of fuel film dynamic parameters in an electronically controlled gasoline engine [J]. Transactions of CSICE, 2010, 28(5): 453 – 458. (in Chinese)

19 Qadeer Ahmed. Estimating SI engine efficiencies and parameters in second-order sliding modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(10): 4837 – 4846

20 Wu Yihu, Hou Zhixiang, Gong Huanchun. Modeling and simulating of intake pipe fuel film dynamic characteristic in gasoline engine start process [C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010(2): 700 – 704.

(上接第 288 页)

16 Melzi S, Sabbioni E. On the vehicle sideslip angle estimation through neural networks: numerical and experimental results[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2005 – 2019.

17 候代文, 殷福亮. 非线性系统中状态和参数联合估计的双重粒子滤波方法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2128 – 2133.

18 Dormand J R, Prince P J. A family of embedded Runge – Kutta formulae [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1980, 6(1): 19 – 26.

19 Ascher U M, Steven J R, Raymond J S. Implicit-explicit Runge – Kutta methods for time-dependent partial differential equations [J]. Applied Numerical Mathematics, 1997, 25(2): 151 – 167.