

汽油机非线性卡尔曼滤波暂态进气量估计及空燃比控制

冯煜, 焦晓红[†]

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 暂态工况下缸进气量的准确估计是提高发动机空燃比控制精度的有效措施之一, 为此本文提出一种基于无迹卡尔曼滤波的暂态缸进气量估计算法, 并利用估计的缸进气量设计了一种前馈-反馈空燃比控制器. MATLAB环境下的仿真实验给出了所提出的算法与现有进气量估计算法的比较, 同时基于暂态进气量估计的空燃比控制仿真实验验证了估计的有效性. 论文与现有成果的区别在于: 一是暂态进气量估计模型不仅包含了歧管压力动态还考虑了曲轴角速度动态, 并采用了基于非线性辨识的均值模型; 二是考虑了泵气波动的影响, 采用了移动平均值法的数字滤波器对泵气波动进行滤波; 三是采用无迹卡尔曼滤波算法对歧管压力和曲轴角速度进行估计.

关键词: 汽车发动机; 缸进气量; 空燃比控制; 卡尔曼滤波; 进气量估计

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Transient cylinder air charge estimation with nonlinear Kalman filter for air-fuel ratio control of gasoline engines

FENG Yu, JIAO Xiao-hong[†]

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: Since accurate estimation for transient cylinder air charge is an effective method for improving the accuracy of transient air-fuel ratio control of engine, an estimation algorithm based on unscented Kalman filter is proposed for the transient cylinder air charge. Furthermore, a feedforward-feedback controller of the air-fuel ratio is designed by utilizing the estimated cylinder air charge. Simulation comparison in MATLAB is given with the existing estimation algorithm for the cylinder air charge. Meanwhile, the effectiveness of the proposed estimation algorithm is validated by simulation illustration of air-fuel ratio control based on the estimated transient cylinder air charge. The difference from the existing results lies in three aspects: firstly, the estimation model for transient cylinder air charge, which includes the crankshaft rotation velocity dynamic besides the intake manifold pressure dynamic and also is described as the mean-value model obtained by nonlinear identification, secondly, the utilization of digital filter with moving average for dealing with the pumping fluctuations, and finally, the adoption of unscented Kalman filter for estimating the intake manifold pressure and crankshaft rotation velocity.

Key words: automobile engines; cylinder air charge; air-fuel ratio control; Kalman filters; air-charge estimation

1 引言(Introduction)

发动机空燃比是影响燃油经济性和尾气排放的重要因素. 发动机喷油量基准值的多少是通过感知缸进气量来决定的, 因而准确的缸进气量是影响空燃比的重要因素, 然而发动机进入各个气缸的空气流量不易直接通过缸内传感器测得, 需要对气缸进气量进行估计. 这就导致缸进气量估计成为近些年研究的热点. 稳态工况下, 气缸的进气量可通过安装在节气门附近的空气流量计(mass air flow sensor, MAF)近似测得; 但是在诸如加、减速过程和加、减载过程的暂态工况下, 由于进气歧管的动态效应造成MAF测量值与实际

进气量存在较大误差. 因而暂态工况下的进气量估计具有很大挑战, 也是暂态空燃比控制问题的关键.

在研究暂态进气量估计算法的文献中, 研究者为了得到进气量的准确值采用了各种估计方法. 文献[1]针对MAF测量引起较大的暂态估计误差问题, 考虑了歧管压力和空气流量计动态, 提出了T-S形式的周期观测器对进气量进行估计; 文献[2]避免了MAF的使用, 选用进气歧管压力传感器, 设计了非线性离散观测器估计进气量. 文献[3]除了歧管压力, 还考虑了由充气效率的改变导致的进气量的偏移问题设计了闭环观测器. 在文献[4-5]中, 一种输入估计算法和自适应观

收稿日期: 2014-07-24; 录用日期: 2015-01-06.

[†]通信作者. E-mail: jiaoxh@ysu.edu.cn; Tel.: +86 13933505082.

高等学校博士学科点博导类科研基金(20111333110007)资助.

Supported by the Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20111333110007).

测器也用于估计进气量问题. 文献[6]考虑到多气缸发动机气缸进气冲程的耦合问题, 在曲轴转角域内设计了基于多采样速率的进气量估计算法, 并在实验平台上验证了算法的可行性. 另外, 文献[7-9]针对歧管压力受泵气波动、随机噪声以及测量噪声的影响问题, 考虑发动机非线性特性, 均采用了基于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)的状态观测器实现进气量估计. 其中文献[9]对泵气波动进行分析, 将其建模为一个二阶振荡环节, 联立歧管压力均值模型通过扩展卡尔曼观测器进行全局估计. 但是泵气波动建模需要大量试验进行标定, 且模型维数的增多加大了算法的复杂度. 另外, 扩展卡尔曼滤波是对非线性函数的Taylor展开式进行一阶线性化截断, 这必定会产生高阶项截断误差, 且非线性函数的雅可比矩阵的求解计算量也很大, 增加了计算的复杂度.

鉴于以上分析, 本文采用无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)算法^[10-11]进行暂态缸进气量观测器设计. UKF算法与EKF算法相比, 不需要计算模型的雅可比矩阵, 而且对非线性分布统计量的计算精度至少能达到二阶, 性能优于EKF. 在设计观测器之前, 首先建立了进气量估计的非线性均值模型, 并采用连续时间辨识方法对模型参数进行辨识; 针对存在的泵气波动噪声的问题, 避免了对泵气波动的建模, 对歧管压力信号进行了基于曲轴转角域的预处理, 采用移动平均值法的数字滤波器对泵气波动进行滤波; 然后对UKF和EKF算法进行分析比较, 提出采用UKF的进气量估计算法, 设计了基于进气量估计的空燃比控制器, 并进行仿真验证.

2 进气量估计模型与辨识(In-cylinder air charge estimation model and identification)

2.1 非线性均值模型(Nonlinear mean-value model)

发动机的数学模型是设计控制系统的基础. 在发动机控制研究中, 常用的发动机模型是均值模型^[12], 它表达式简单且能满足仿真和控制的需求. 为了实现暂态下的空燃比控制, 本文在均值模型的基础上构造了发动机暂态进气量估计的非线性平均值模型, 包括进气歧管动态模型和曲轴转速动态模型两部分. 图1为发动机系统简图.

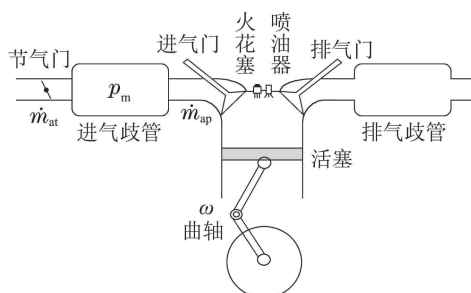


图1 发动机系统简图

Fig. 1 The sketch of engine system

进气歧管动态模型可根据理想气体方程式两边取微分来描述. 由于歧管热传导很小, 忽略歧管温度变化, 则得到下式:

$$\dot{p}_m = \dot{m}_a RT_m / V_m, \quad (1)$$

其中: p_m 是进气管绝对压力, R 是气体常数, T_m , V_m 分别表示进气歧管的温度和体积, \dot{m}_a 为进气歧管的空气流量. 再根据质量守恒定理可得

$$\dot{m}_a = \dot{m}_{at} - \dot{m}_{ap}, \quad (2)$$

其中: \dot{m}_{at} 为流经节气门的空气流量, 随节气门开度变化而变化, 其可以通过空气流量传感器直接测得; \dot{m}_{ap} 是进入气缸的空气流量, 可由速度密度法描述为

$$\dot{m}_{ap} = \frac{V_d \eta_v p_m n}{120 RT_m}, \quad (3)$$

其中: V_d 为发动机排量, n 为发动机转速, η_v 为充气效率. 进一步, 采用文献[12]给出的近似表示:

$$\eta_v p_m = s p_m - y, \quad (4)$$

其中 s 和 y 是正常数. 并且将发动机转速 n 变换为角速度 ω , 则歧管动态模型描述为

$$\dot{p}_m = c_1 \omega p_m + c_2 \omega + c_3 \dot{m}_{at}, \quad (5)$$

其中: $c_1 = -\frac{V_d s}{4\pi V_m}$, $c_2 = \frac{V_d y}{4\pi V_m}$, $c_3 = \frac{RT_m}{V_m}$.

曲轴转速的动态模型可根据牛顿第2定律建立为

$$J \dot{\omega} = T_i - T_f - T_l, \quad (6)$$

其中: J 是曲轴转动惯量, T_l 为负载扭矩. T_i 和 T_f 分别为发动机指示扭矩和摩擦扭矩, 且分别描述为

$$T_i = g_1(\omega) p_m + g_2(\omega), \quad (7)$$

$$T_f = d \omega, \quad (8)$$

其中:

$$g_1(\omega) = \frac{H_u V_d s \eta_i(\omega)}{4\pi L_{th} RT_m}, \quad g_2(\omega) = -\frac{H_u V_d y \eta_i(\omega)}{4\pi L_{th} RT_m},$$

d 为摩擦系数. H_u 为燃油热值, η_i 为指示效率, L_{th} 为化学计量比约为14.7.

因此, 综合式(5)-(6)得到用于缸进气量估计的系统模型如下:

$$\begin{cases} \dot{p}_m = c_1 \omega p_m + c_2 \omega + c_3 \dot{m}_{at}, \\ J \dot{\omega} = g_1(\omega) p_m + g_2(\omega) - d \omega - T_l. \end{cases} \quad (9)$$

2.2 模型参数辨识(Identification for model parameters)

用于进气量估计的模型(9)中参数需要辨识. 用于辨识的实验数据采自某一3.5L-V6发动机实验台架^[13], 包括164组稳态工况运行时的数据和4组暂态工况运行下的数据. 每组包含5个信号: 节气门开度 ϕ , 空气流量传感器测得的进气量 \dot{m}_{at} , 歧管压力 p_m , 负载扭矩 T_l , 发动机转速 ω . 参数辨识分为静态函数拟合和动态参数辨识两部分.

2.2.1 静态函数拟合(Static functions fitting)

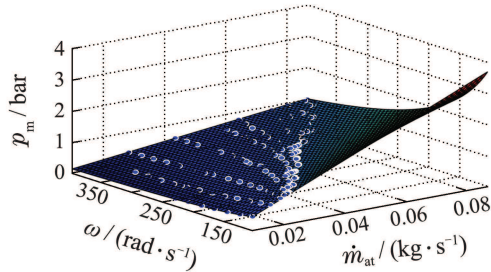
先对进气歧管方程的静态参数拟合. 令式(9)中 $\dot{p}_m = 0$, 得到不含动态过程的下式:

$$p_m = -\frac{c_2\omega + c_3\dot{m}_{at}}{c_1\omega} = k_1 + k_2\frac{\dot{m}_{at}}{\omega}, \quad (10)$$

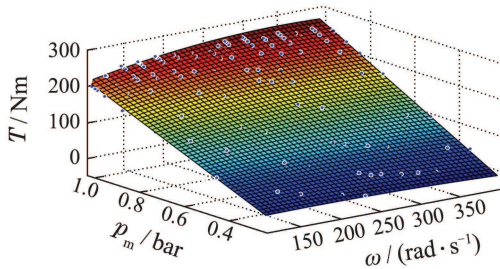
则式(5)可改写为

$$\dot{p}_m = c_1(\omega p_m - k_1\omega - k_2\dot{m}_{at}), \quad (11)$$

其中: $k_1 = -c_2/c_1$, $k_2 = -c_3/c_1$. 由 c_1, c_2, c_3 的定义可知, $k_1 = y/s$, $k_2 = 4\pi RT_m/sV_d$, 它们与气缸的充气效率和排量密切相关, 受 p_m 的动态变换影响不大, 因此, 通过静态拟合得到 k_1, k_2 , 而 c_1 将采用动态辨识获得. 根据采得的稳态工况下的数据, 采用 MATLAB 工具箱进行曲面拟合, 其拟合的MAP图如图2(a)所示, 并且用最小二乘辨识方法得到 $k_1 = 4.142 \times 10^{-2}$, $k_2 = 4.307 \times 10^3$.



(a) 进气歧管方程静态拟合MAP图



(b) 曲轴转速方程静态拟合MAP图

图2 静态函数拟合的MAP

Fig. 2 Static functions fitting MAP

再对曲轴转速方程的静态函数拟合. 同样地, 令式(9)中 $\dot{\omega} = 0$, 得到不含动态过程下式:

$$g_1(\omega)p_m + g_2(\omega) - d\omega = T_1. \quad (12)$$

考虑到指示效率等参数的不确定性, 这里的 $g_1(\omega), g_2(\omega)$ 采用随机模型, 用下列表达式描述:

$$g_1(\omega) = c_4\omega^2 + c_5\omega + c_6,$$

$$g_2(\omega) - d\omega = c_7\omega^2 + c_8\omega + c_9.$$

通过曲面拟合如图2(b)所示, 并用最小二乘辨识方法解得 $c_4 \sim c_9$ 的值. 其中 $c_4 = -8.81 \times 10^{-4}$, $c_5 = 0.708$, $c_6 = 200$, $c_7 = -1.893 \times 10^{-5}$, $c_8 = 9.213 \times 10^{-2}$, $c_9 = -48.84$. 则式(6)转换为

$$J\dot{\omega} = (c_4\omega^2 + c_5\omega + c_6)p_m + c_7\omega^2 + c_8\omega + c_9 - T_1, \quad (13)$$

其中未知参数 J 是需要动态辨识的.

2.2.2 动态参数辨识(Dynamical parameters identification)

动态参数 J 和 c_1 的辨识采用了文献[14]提出的连续系统辨识法—线性积分滤波法(LIF). 它可以避免连续系统模型离散化间接辨识导致的辨识模型的较大误差, 提高了辨识精度.

首先, 对动态方程(13)两边求导, 且式中的 \dot{p}_m 用式(11)替换, 可以得到

$$J\dot{\omega} = \dot{\omega} \frac{\partial g_1(\omega)}{\partial \omega} p_m + g_1(\omega) \dot{p}_m + \frac{\partial g_2(\omega)}{\partial \omega} \dot{\omega} - \dot{T}_1 = \dot{\omega} [(2c_4\omega + c_5)p_m + (2c_7\omega + c_8)] - \dot{T}_1 + c_1(c_4\omega^2 + c_5\omega + c_6)(\omega p_m - k_1\omega - k_2\dot{m}_{at}). \quad (14)$$

对上式在有限区间 $[t - lT, t]$ (l 是积分长度因子) 内用数值积分的方式来避免对信号的求导, 原模型转换成离散系统模型, 最终采用最小二乘进行辨识. 图3显示了一组实验数据进行辨识响应的曲线.

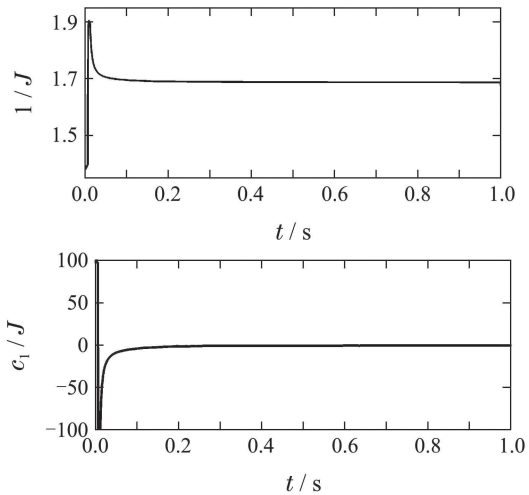


图3 辨识参数 $1/J$ 和 c_1/J 的响应过程曲线

Fig. 3 Response of the identified parameters $1/J$ and c_1/J

3 进气量估计算法 (Air charge estimation algorithm)

根据速度密度方程(3)可知影响发动机进气量的主要因素是歧管压力和发动机转速. 如图4所示的歧管压力测量值曲线, 由于泵气波动、随机噪声以及量测噪声的存在, 会导致进气量估计的偏差.

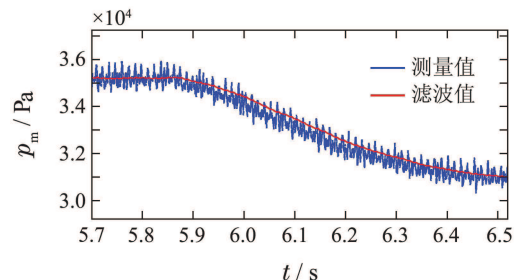


图4 滤波前后歧管压力曲线

Fig. 4 Manifold pressure before and after filter

对于噪声的去除, 最简单的方法是采用一阶惯性环节进行滤波处理. 但从图4给出的滤波值可知, 这种处理方法却容易造成暂态工况下信号时延的产生, 造成不必要的误差.

3.1 歧管压力信号的预处理(Manifold pressure signal preprocessing)

进气歧管压力的泵气波动周期变化主要是由于气门及活塞的周期运动造成的. 图5为发动机在转速为1600 r/min的稳态运行下, 一个发动机循环内的歧管压力曲线. 从图5中可以看出泵气波动在一个发动机循环内震荡6次, 在曲轴转角域内, 震荡周期为120°.

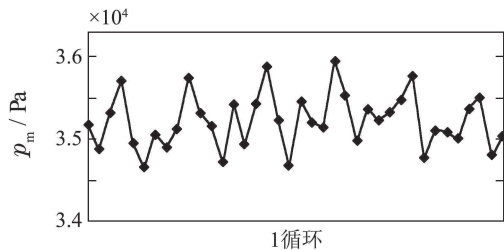


图5 一个发动机循环的歧管压力曲线
Fig. 5 Manifold pressure in one cycle

泵气波动的处理方法一般有两种: 一种是对泵气波动进行分析, 将其描述为一个二阶震荡环节模型, 加入均值模型中从而进行全局估计^[9]. 但泵波建模需要大量试验进行标定, 且模型维数的增多加大了算法的复杂度. 另一种方法是在一个泵气波动震荡周期中进行多次采样并求其平均值的方法, 这是一种基于曲轴转角域的平均采样算法.

本文是在后一种方法的基础上进行改进, 采用移动平均值法的数字滤波器对泵气波动进行滤波. 在每120°曲轴转角内4次采样, 且每个采样时刻都采取当前时刻和当前时刻前3个采样时刻的输出, 去掉最大最小值, 并求均值作为输出. 滤波前后歧管压力曲线比较如图6所示.

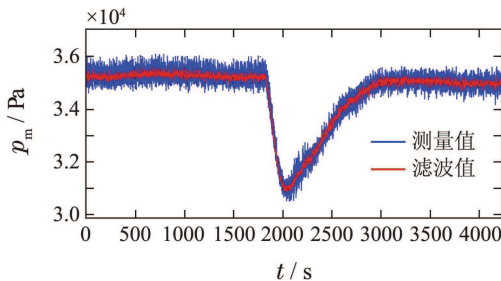


图6 滤波前后歧管压力曲线
Fig. 6 Manifold pressure before and after filter

3.2 观测器设计(Observer design)

通过歧管压力信号预处理, 发动机泵气波动可以基本滤除. 但是由随机噪声造成的状态误差, 以及由传感器测量造成的歧管压力和发动机转速的量测误差仍不容忽视. 要使用卡尔曼滤波建立状态观测器,

对歧管压力和发动机转速进行重构, 从而实现进气量的准确估计. 针对发动机模型的非线性特征, 需要使用非线性卡尔曼滤波技术, 例如EKF和UKF, 去估计系统状态.

3.2.1 EKF和UKF算法(EKF and UKF)

卡尔曼滤波器的目的是求出对状态 x 的线性最小方差的估值 \hat{x} . 其极小化性能指标 J 和线性最小方差估值 \hat{x} 分别为

$$J = E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T], \quad (15)$$

$$\hat{x} = E(x) + P_{xy}P_{yy}^{-1}[y - E(y)], \quad (16)$$

其中: y 代表输出量, E 代表求均值, P 代表求协方差. 由此可知, 要得到状态的最优估计, 需已知状态量和输出量的均值与协方差等分布统计量. 对于线性系统, 这些统计量易通过线性传递得到. 而非线性系统中非线性函数的均值与方差的传递则不易获得. EKF和UKF两种非线性卡尔曼滤波算法分别采用了不同的方法实现非线性函数统计量的传递, 使得系统适用于如表1所示的线性假设下的Kalman框架.

表1 Kalman框架

Table 1 Kalman frame

预测	$\hat{x}_{k k-1} = A\hat{x}_{k-1 k-1} + Bu_{k-1}$ $P_{k k-1} = AP_{k-1 k-1}A^T + Q$
更新	$K_k = P_{k k-1}C^T(CP_{k k-1}C^T + R)^{-1}$ $\hat{x}_{k k} = \hat{x}_{k k-1} + K_k(y_k - C\hat{x}_{k k-1})$ $P_{k k} = (I - K_kC)P_{k k-1}$

考虑一个 n 维随机变量 X , 由非线性函数变成 Y :

$$Y = g(X), \quad (17)$$

给定 X 的均值 \bar{X} 和方差 P_X , 目的是求出 Y 的统计量(均值 \bar{Y} 与方差 P_Y). 卡尔曼框架中的预测与更新表达式都可以写成式(17)的形式.

EKF是围绕状态量将非线性函数 $g(X)$ 的泰勒展开式略去二阶及以上项, 求解Jacobian矩阵 A , 实现非线性系统线性化, Y 的统计量可以用下式得到:

$$\bar{Y} = g(\bar{X}),$$

$$P_Y = \frac{\partial g}{\partial X} P_X \frac{\partial g^T}{\partial X} = A P_X A^T.$$

UKF则是采用了无迹变换(UT)的方法计算 Y 的统计量^[10]. UT变换的原理是采用确定采样策略, 选取 $2n + 1$ 个加权sigma点, 这些点能捕获随机变量 X 的均值与方差, 用多粒子逼近非线性函数的概率分布, 得到 Y 的统计量. UT变换具体步骤为:

a) sigma点的选取方案为

$$\chi_0 = \bar{X},$$

$$\chi_i = \bar{X} + \sqrt{(n + \lambda)P_i},$$

$$\mathbf{x}_{i+n} = \bar{\mathbf{X}} - \sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_i}, i = 1, 2, \dots, n,$$

其中: $\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n$ 为尺度因子, α 表示sigma点到 $\bar{\mathbf{X}}$ 的距离, 一般 $10^{-4} \leq \alpha \leq 1$, κ 为常数, 设置为0或 $3 - m$; \mathbf{P}_i 代表矩阵 \mathbf{P} 的第 i 列。

b) 对应的sigma点权值为

$$W_0^m = \lambda/(n+\lambda),$$

$$W_0^c = \lambda/(n+\lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta),$$

$$W_i^m = W_i^c = 0.5/(n+\lambda), i = 1, 2, \dots, 2n,$$

\mathbf{W}^m 为用于状态预测的一阶统计权值, \mathbf{W}^c 为用于协方差预测的二阶统计权值, β 为高阶项偏差补偿系数。

c) 对sigma点进行非线性变换: $\mathbf{Y}_i = \mathbf{g}(\mathbf{x}_i)$, 得到变换后的均值和方差:

$$\bar{\mathbf{Y}} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \mathbf{Y}_i,$$

$$\mathbf{P}_Y = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c [(\mathbf{Y}_i - \bar{\mathbf{Y}})(\mathbf{Y}_i - \bar{\mathbf{Y}})^T].$$

经典的EKF采用非线性函数线性化的方法, 因此存在较大的近似误差. UKF采用UT变换, 无需求解Jacobian矩阵, 且对非线性分布统计量的计算精度至少能达到二阶, 性能优于EKF. 因此, 本文选用UKF进行进气量估计。

3.2.2 基于UKF的进气量估计策略(Air charge estimation based on UKF)

为了使模型适用于无迹卡尔曼估计算法, 首先对式(9)离散化, 得到相应的离散化模型:

$$\begin{cases} p_m(k+1) = p_m(k) + T_s c_3 [\dot{m}_{at}(k) - (\dot{m}_{ap}(k) + \delta_m(k))] + w_{p_m}(k) \\ \omega(k+1) = \omega(k) + T_s / J [g_1(\omega) p_m(k) + g_2(\omega) - d\omega(k) - T_1] + w_\omega(k) \\ \delta_m(k+1) = \delta_m(k) + w_{\delta_m}(k). \end{cases} \quad (18a)$$

输出方程为

$$\mathbf{y}(k) = [p_m(k) + \nu_{p_m}(k) \quad \omega(k) + \nu_\omega(k)]^T, \quad (18b)$$

其中: δ_m 是为补偿由建模误差导致进气量偏差引入的状态量. $w_{p_m}(k)$, $w_\omega(k)$, $w_{\delta_m}(k)$ 为系统的状态噪声, $\nu_{p_m}(k)$, $\nu_\omega(k)$ 为量测噪声, T_s 为采样周期。

记 $\mathbf{x}_k = [p_m(k) \quad \omega(k) \quad \delta_m(k)]^T$, $u_k = \dot{m}_{at}(k)$, $\mathbf{w}_k = [w_{p_m}(k) \quad w_\omega(k) \quad w_{\delta_m}(k)]^T$, $\mathbf{v}_k = [\nu_{p_m}(k) \quad \nu_\omega(k)]^T$, 并假设 \mathbf{w}_k 和 \mathbf{v}_k 是均值为0, 方差分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 的互不相关的白噪声, 式(18)可以重新表示为

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, u_k) + \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \end{cases} \quad (19)$$

其中输出矩阵 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

采用UKF算法对各状态量进行观测, 具体步骤为:

a) 初始化: $\hat{\mathbf{X}}_0 = \hat{\mathbf{X}}(0)$, $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}(0)$.

b) 参照上节选取sigma点 $\mathbf{x}_{i,k-1}$, 并计算对应权值 \mathbf{W}^m 和 \mathbf{W}^c .

c) 预测: 对选取的sigma点进行非线性变换

$$\mathbf{x}_{i,k|k-1}^* = \mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,k-1}, u_{k-1}).$$

状态量均值和方差的预测值:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \mathbf{x}_{i,k|k-1}^*,$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c [(\mathbf{x}_{i,k|k-1}^* - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})(\mathbf{x}_{i,k|k-1}^* - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})^T] + \mathbf{Q}.$$

量测函数进行sigma点传递

$$\mathbf{Y}_{i,k|k-1} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_{i,k|k-1}^*).$$

预测观测值及其方差、协方差可计算得

$$\hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \mathbf{Y}_{i,k|k-1},$$

$$\mathbf{P}_{Y_k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c [(\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1})(\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1})^T] + \mathbf{R},$$

$$\mathbf{P}_{X_k, Y_k} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c [(\mathbf{x}_{i,k|k-1}^* - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})(\mathbf{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1})^T].$$

d) 更新:

$$\mathbf{K}_{k|k} = \mathbf{P}_{X_k, Y_k} \mathbf{P}_{Y_k}^{-1},$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_{k|k}(\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_{k|k-1}),$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_{k|k} \mathbf{P}_{Y_k} \mathbf{K}_{k|k}^T,$$

其中 $\mathbf{K}_{k|k}$ 为Kalman增益。

估计得到歧管压力与发动机转速后, 代入速度密度公式(3), 并考虑建模误差 δ_m , 可计算得到进气量的值为 $\dot{M}_{ap} = \hat{m}_{ap} + \delta_m$ 。

4 空燃比控制器(Air-fuel ratio controller)

基于提出的进气量估计算法, 设计暂态工况下的空燃比控制器. 空燃比控制算法采用前馈控制与反馈控制相结合, 前馈控制是基于进气量估计计算基本喷油量; 反馈控制以宽域氧传感器(universal exhaust gas Oxygen sensor, UEGO)信号作为反馈信号进行PID控制, 对基本喷油量进行修正. 空燃比控制系统结构图如图7所示. 喷油命令表达式为

$$u_f(k) = \frac{\dot{M}_{ap}}{L_{th}} + K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{K_d}{T_s} (e(k) - e(k-1)), \quad (20)$$

其中: $e = \lambda_d - \lambda$, $\lambda_d = 1$.

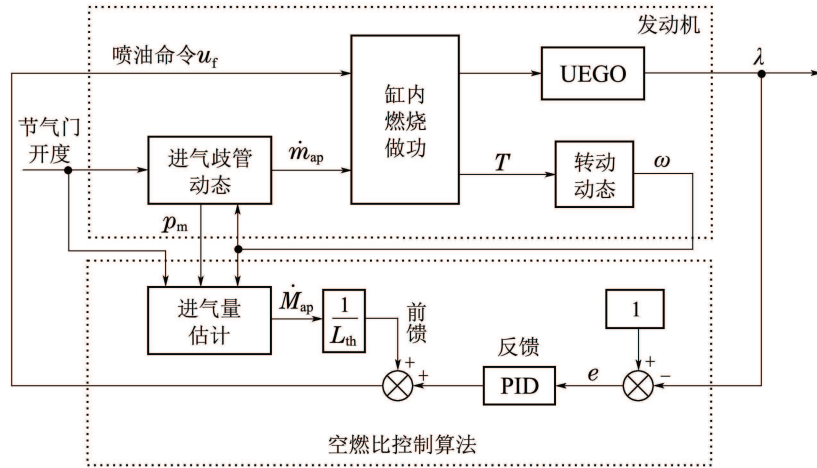


图 7 空燃比控制系统结构图

Fig. 7 Schematic of air-fuel ratio control system

5 仿真验证(Simulation validation)

为了验证基于无迹卡尔曼滤波的暂态缸进气量估计算法性能, 考虑如表2所示的两种暂态工况下的仿真实验. 并且进行进气量估计性能的直接验证与基于进气量估计的空燃比控制性能的间接验证.

表 2 两种运行工况

Table 2 Two operation modes

工况	发动机转速/(r·min ⁻¹)	负载/(N·m)
1	1300 ~ 1920	60
2	1600 ~ 2200	65 ~ 25

5.1 进气量估计算法的仿真验证(Simulation of air-charge estimation algorithm)

分别对基于EKF与基于UKF的缸进气量估计进行仿真实验, 给出它们之间及与实际实验测量的缸进气量之间的比较.

具体仿真参数设置如下: 状态量的初值根据工况进行选择, 令 $\hat{X}_0^T = [0.36 \ 163]$, 误差协方差阵的初始值选取较大数值, 本文中 $P_0 = 10^6 I$. 噪声方差的选取考虑了传感器噪声、 Q 与 R 的权重关系及物理含义, 在仿真实验中选取

$$Q = \text{diag}\{6 \times 10^{-6}, 10^{-2}, 10^{-5}\},$$

$$R = \text{diag}\{10^{-4}, 6 \times 10^{-3}\}.$$

图8和图9为两种暂态工况下分别采用EKF和UKF算法滤波的发动机各状态量的曲线. 各状态量的平均误差值的比较如表3所示. 对比UKF与EKF滤波曲线以及平均误差值, 可以发现: 采用UKF的滤波平均误差值比EKF小, 它能有效地对状态和量测噪声进行抑制, 能够较好地估计歧管压力, 且不产生时延.

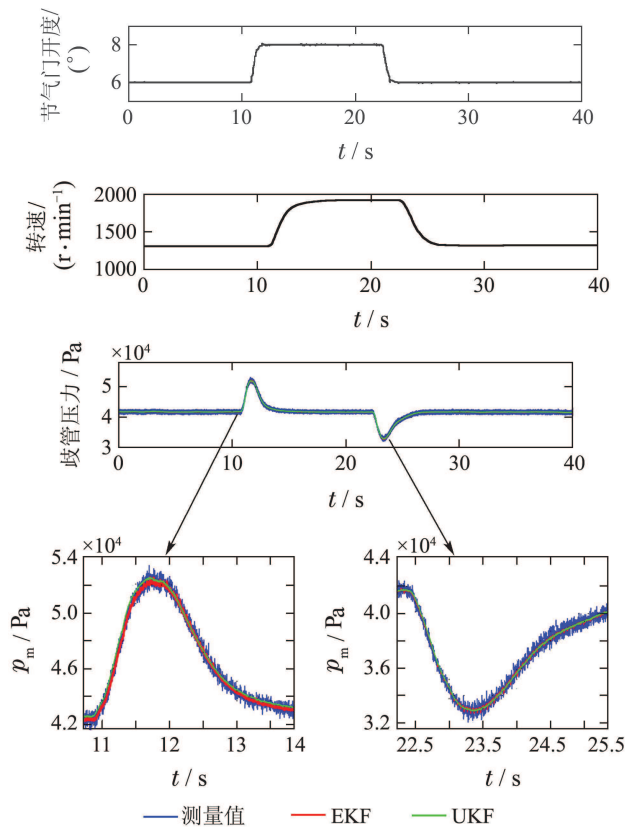
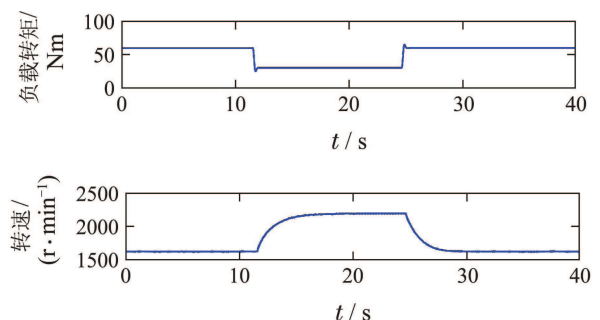


图 8 工况1下各状态量曲线

Fig. 8 Engine states in operating mode 1



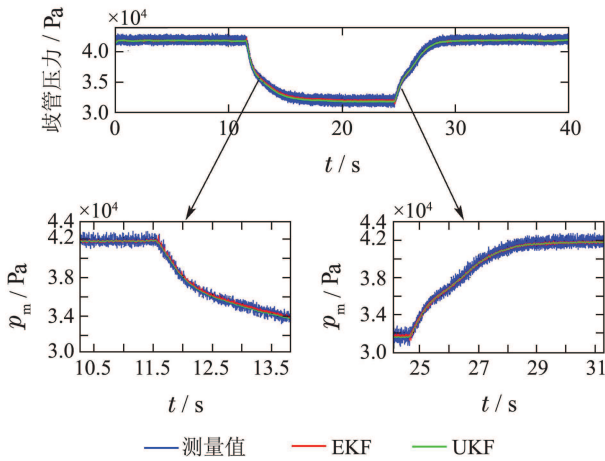


图9 工况2下各状态量曲线

Fig. 9 Engine states in operating mode 2

表3 平均误差值比较

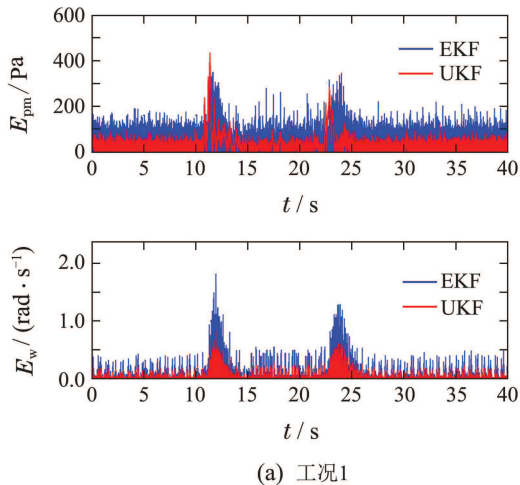
Table 3 Comparison of mean errors

算法	p_m/Pa		$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	
	工况1	工况2	工况1	工况2
EKF	2.2954	8.0723	0.0059	0.0039
UKF	1.979	2.0924	0.0036	0.0028

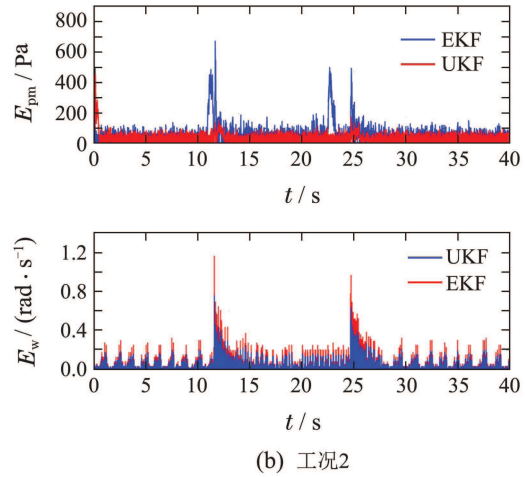
为了验证基于无迹卡尔曼滤波算法的估计精度,进行了100次Monte Carlo仿真实验. 仿真比较了基于该算法和EKF算法的滤波效果. 评价指标为歧管压力和发动机转速的均方根误差(root-mean-square error, RMSE). 定义状态估计的均方根误差为

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{x}_k^i - x_k^i)^2},$$

其中N为Monte Carlo仿真次数. 状态量的RMSE仿真曲线如图10所示, 并给出RMSE指标的均值, 如表4所示.



(a) 工况1



(b) 工况2

图10 基于EKF和UKF的均方根误差曲线

Fig. 10 Root-mean-square error based on EKF and UKF

表4 估计状态RMSE的均值

Table 4 The mean for RMSE of estimated state

算法	p_m/Pa		$\omega/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	
	工况1	工况2	工况1	工况2
EKF	49.8983	50.4012	0.0256	0.0210
UKF	32.3574	30.0341	0.0145	0.0076

由表4可以看出, 在同等条件下, UKF滤波算法的估计精度要略高于EKF滤波算法的估计精度, 这正是由于UKF采用UT变换得到状态的均值和方差, 避免了EKF算法中线性化引起的误差的影响.

估计得到的进气量 \dot{M}_{ap} 与空气流量计实际测得值的比较如图11所示. 可以看出, 基于UKF的进气量估计算法较测量值而言, 更为平稳, 且考虑到了进气的充排效应, 得到更精确的进气量估计.

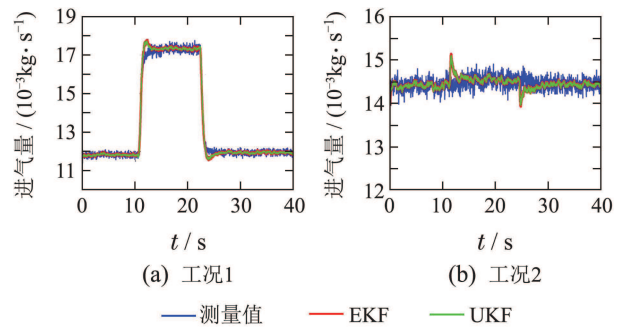


图11 进气量估计值与测量值比较

Fig. 11 Estimated and measured air mass flow

5.2 空燃比控制的仿真实验(Simulation of air-fuel ratio control)

为了验证前述进气量算法的有效性, 采用基于UKF进气量估计的空燃比直接前馈控制加反馈PID控制策略, 控制器形式如式(20)所示, 控制系统仿真

结果如图12所示. 由图12可知, 提出的进气量估计算法能够准确估计进气量, 使发动机暂态空燃比的控制偏差不超过3%.

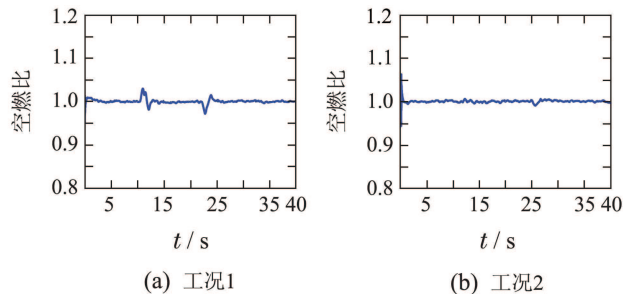


图12 前馈-反馈控制下的空燃比

Fig. 12 Air-fuel ratio under feedforward-feedback control

6 结论(Conclusions)

本文提出了一种基于UKF的进气量估计算法. 通过对基于EKF和UKF两种算法的进气量估计比较, 表明基于UKF进气估计算法滤波精度优于EKF算法, 仿真验证了算法的准确性. 另外, 基于提出的进气量估计算法设计了简单的前馈-反馈空燃比控制器, 暂态工况下的空燃比控制在3%之内, 达到很好的暂态空燃比控制精度.

参考文献(References):

- [1] KERKENI H, LAUBER J, GUERRA T M. Estimation of individual in-cylinder air mass flow via periodic observer in Takagi-Sugeno form [C] // *The 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. Lille, France: IEEE, 2010: 1 – 6.
- [2] MORAAL P E, GRIZZLE J W, COOK J A. An observer design for single-sensor individual cylinder pressure control [C] // *Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control*. San Antonio: IEEE, 1993: 2955 – 2961.
- [3] ANDERSSON P, ERIKSSON L. Air-to-cylinder observer on a turbocharged SI-engine with wastegate [R]. *SAE Technical Paper*, 2001-01-0262.
- [4] STORSKY A, KOLMANOVSKY I. Application of input estimation techniques to charge estimation and control in automotive engines [J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(12): 1371 – 1383.
- [5] STOTSKY A, KOLMANOVSKY I, ERIKSSON S. Composite adaptive and input observer-based approaches to the cylinder flow estimation in spark ignition automotive engines [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2004, 18(2): 125 – 144.
- [6] ZHAO Y, SHEN T, JIAO X. *Air-fuel ratio transient control design for gasoline engines based on individual cylinder air charge estimation* [R]. Bangkok, Thailand: Asia Pacific Automotive Engineering Conference, 2013.
- [7] 邹博文, 李静波, 陈本林, 等. 基于状态观测器的天然气发动机控制策略研究 [J]. *汽车技术*, 2009, 39(11): 5 – 8. (ZOU Bowen, LI Jingbo, CHEN Benlin, et al. Research of natural gas engine control strategy based on state observer [J]. *Automobile Technology*, 2009, 39(11): 5 – 8.)
- [8] QU D, FAN L, TIAN Y, et al. LPG engine inlet manifold pressure measurement based on state prediction [C] // *The 3rd Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. Wuhan, China: IEEE, 2011: 1 – 4.
- [9] ALAIN C, CHRISTIAN W V, ELBERT H. *Predicting the port air mass flow of SI engine in air/fuel ratio control application* [R]. Detroit, Michigan, USA: World Congress, 2000.
- [10] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(3): 401 – 422.
- [11] 乔相伟, 周卫东, 吉宇人. 用四元数状态切换无迹卡尔曼滤波器的飞行器姿态 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(1): 97 – 103. (QIAO Xiangwei, ZHOU Weidong, JI Yuren. Aircraft attitude estimation based on quaternion state-switching unscented Kalman filter [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(1): 97 – 103.)
- [12] HENDRICKS E, CHEVALIER A, JENSEN M. *Modelling of the intake manifold filling dynamics* [R]. Denmark: Technical University of Denmark, 1996.
- [13] LI F, SHEN T, JIAO X. Model-based design approach for gasoline engine control Part I: Modeling and validation [C] // *The 32nd Chinese Control Conference*. Xi'an, China: IEEE, 2013: 7774 – 7779.
- [14] KOWALCZUK Z, KOZLOWSKI J. Continuous-time approaches to identification of continuous-time systems [J]. *Automatica*, 2000, 36(8): 1229 – 1236.

作者简介:

冯煜 (1990–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为基于模型的汽油机进气量估计, E-mail: aafengyua@hotmail.com;

焦晓红 (1966–), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性系统、时滞系统的鲁棒自适应控制理论研究及其在电力系统、混合动力汽车控制系统的基础应用, E-mail: jiaoxh@ysu.edu.cn.