

# 基于粒子滤波算法的汽车状态估计技术\*

林 棻 赵又群 徐朔南

(南京航空航天大学车辆工程系,南京 210016)

**【摘要】** 将粒子滤波(particle filter, PF)算法应用到汽车的状态估计之中,建立了包含定常统计特性噪声和非线性轮胎的汽车动力学模型,根据汽车非线性状态转移函数完成对粒子的预测,基于当前时刻的测量值实现对预测粒子权重的评估,最后通过重采样完成对汽车关键状态量估计。将PF估计器与常见的EKF、UKF估计器进行了比较分析,基于ADAMS/Car的虚拟试验和实车试验验证了PF在汽车状态估计中的可行性。

**关键词:** 汽车动力学 状态估计 粒子滤波算法 虚拟试验

**中图分类号:** U461.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)02-0023-05

## Vehicle States Estimation Technology Based on Particle Filter Algorithm

Lin Fen Zhao Youqun Xu Shuonan

(Department of Automotive Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

### Abstract

Particle filter (PF) algorithm was used in vehicle states estimation. A vehicle dynamics system containing constant noise and non-linear tire model was established. First, the particles were predicted through non-linear state transition function; then the weights of the predicted particles were evaluated based on current measurements. Finally, the key states were estimated through resample step. The PF estimator was compared with other estimators based on extended Kalman filter (EKF) and unscented Kalman filter (UKF). The results of virtual experiment based on ADAMS/Car and real vehicle experiment demonstrated that PF was available in vehicle states estimation.

**Key words** Vehicle dynamics, States estimation, Particle filter algorithm, Virtual experiment

## 引言

准确、实时地获取汽车行驶过程中的状态信息是汽车动态控制系统研究的关键问题,由此而衍生出的“汽车状态估计器”的设计逐渐成为近年来研究的热点<sup>[1]</sup>。

目前较为常用的汽车状态估计器大多基于卡尔曼滤波算法。其中常规卡尔曼滤波<sup>[2]</sup>采用线性汽车动力学模型进行状态估计。扩展卡尔曼滤波(EKF)<sup>[3]</sup>及其改进算法<sup>[4-5]</sup>可以对包含非线性因素的汽车模型进行状态估计。但是EKF算法在运算时需要求解繁琐的Jacobian矩阵,容易导致出错及估计器实时性降低。非追踪卡尔曼滤波(UKF)<sup>[6]</sup>以UT变换为基础,对状态的概率密度函数做近似,

运算精度高于EKF算法,但是UKF的高斯逼近方法在强非线性问题时已不能满足汽车动态控制器的精度要求。

本文将目标跟踪领域新兴的粒子滤波(PF)算法应用在汽车状态估计中,针对各种汽车动态控制系统的不同控制逻辑要求,对汽车进行多状态估计。

## 1 非线性汽车动力学模型

### 1.1 整车模型

假定汽车只有沿 $y$ 轴的侧向运动与绕 $z$ 轴的横摆运动两个自由度<sup>[7]</sup>,令固结于汽车上的动坐标系原点与汽车重心重合。假设驱动力不大,不考虑地面切向力对轮胎侧偏特性的影响,忽略左右轮胎特性变化。实际汽车便简化成Bicycle模型,如图1。

收稿日期:2010-09-13 修回日期:2010-11-11

\*国家自然科学基金资助项目(10902049)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2008AA11A140)和南航引进人才科研基金资助项目(S0915-022)

作者简介:林棻,博士,讲师,主要从事汽车动力学与控制研究,E-mail:nhlf2008@yahoo.com.cn

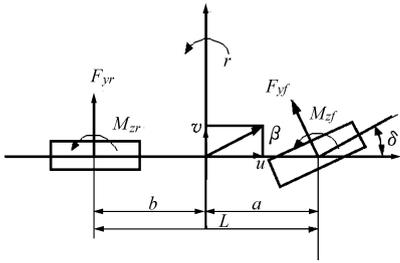


图1 二自由度汽车动力学模型

Fig.1 Vehicle dynamic model (2DOF)

汽车的运动微分方程为：

$$\text{侧向} \quad a_y = \frac{2F_{yf}\cos\delta + 2F_{yr}}{m} \quad (1)$$

$$\dot{v} = a_y - ur \quad (2)$$

$$\text{横摆} \quad \dot{r} = \frac{2aF_{yf}\cos\delta - 2bF_{yr} + 2M_{zf} + 2M_{zr}}{I_z} \quad (3)$$

前、后轮的侧偏角为

$$\alpha_f = -\left(\delta - \arctan \frac{v + ar}{u}\right) \quad (4)$$

$$\alpha_r = \arctan \frac{v - br}{u} \quad (5)$$

整车质心侧偏角为

$$\beta = \arctan \frac{v}{u} \quad (6)$$

式中  $v$ ——汽车的侧向速度

$u$ ——汽车的纵向速度

$r$ ——横摆角速度

$a_y$ ——侧向加速度

$\beta$ ——整车质心侧偏角

$m$ ——整车质量

$I_z$ ——整车绕铅垂轴转动惯量

$a$ 、 $b$ ——整车质心至前、后轴的距离

$\delta$ ——前轮转角

$F_{yf}$ 、 $F_{yr}$ ——前、后轮侧向力

$M_{zf}$ 、 $M_{zr}$ ——前、后轮回正力矩

$\alpha$ ——轮胎侧偏角

## 1.2 轮胎模型

对于轮胎的非线性侧偏特性的描述,采用日本桥石轮胎厂发布的修正 Fiala 模型<sup>[7]</sup>。修正 Fiala 模型的拟合公式为

$$F_y = \begin{cases} -\mu F_z (\theta - 0.0668\theta^2 - 0.1032\theta^3) & (\theta < 1.54) \\ -1.0063\mu F_z & (\theta \geq 1.54) \end{cases} \quad (7)$$

$$M_z = \begin{cases} \mu F_z L_r (0.2749\theta - 0.0950\theta^2 - 0.0872\theta^3 + 0.0353\theta^4) & (\theta \leq 2) \\ 0.2258\mu F_z e / (\theta - 0.32) & (\theta > 2) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{其中} \quad \theta = \frac{C_\alpha \tan\alpha}{\mu |F_z|} \quad C_\alpha = \left| \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}$$

式中  $F_y$ ——侧偏力  $M_z$ ——回正力矩

$\mu$ ——路面附着系数

$F_z$ ——轮胎垂向载荷

$L_r$ ——轮胎印迹长度(假设印迹为长方形)

$e$ ——轮胎拖距

$\theta$ ——无量纲侧偏角

$C_\alpha$ ——线性域下轮胎的侧偏刚度

$C_\alpha$  物理意义为沿侧向作用于整个接地面的单位侧偏角的力总和。需要注意的是轮胎侧偏角与侧偏力符号相反,因此本文  $\theta$  与  $\alpha$  同号,且与  $F_y$  符号相反。本文取  $C_\alpha = 600\text{N}/(\text{°})$ ,  $\mu = 1.0$ ,  $L_r = 70\text{mm}$ ,  $e = 31.7\text{mm}$ 。

## 1.3 包含噪声的非线性汽车系统

非线性汽车系统的状态向量设为

$$\mathbf{X} = [v, a_y, r, \beta]^T \quad (9)$$

系统输入  $u$  为前轮转角  $\delta$ , 观测向量为

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} r \\ a_y \end{bmatrix} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} \quad (10)$$

状态估计的过程噪声设为均值为零的定常平稳随机白噪声序列, 方差阵为

$$\mathbf{Q} = 0.01 \max(\text{state}(i)) - \min(\text{state}(i)) \quad (i = 1, 2, 3, 4; 0 \leq t \leq 10) \quad (11)$$

其中  $\max(\text{state}(i))$  和  $\min(\text{state}(i))$  分别是第  $i$  个状态量在整个时间历程中的最大值和最小值。

量测噪声协方差矩阵设为均值为零的定常的平稳随机白噪声序列, 方差阵为

$$\mathbf{R} = 0.05 \max(y(i)) - \min(y(i)) \quad (i = 1, 2; 0 \leq t \leq 10) \quad (12)$$

其中  $\max(y(i))$  和  $\min(y(i))$  分别是第  $i$  个观测量在整个时间历程中的最大值和最小值。

## 2 粒子滤波(PF)算法

粒子滤波是不同于各种基于卡尔曼滤波算法的另外一类非线性估计方法, 对处理强非线性问题具有明显的优越性<sup>[8]</sup>。粒子滤波的核心思想是利用一系列随机样本的加权和表示所需的后验概率密度, 得到状态的估计值。本文将 PF 算法运用到行驶汽车的状态估计中, 推导 PF 算法的具体步骤。

本文采用经典 SIR(序列重要性重采样)算法, 该算法由于引入重采样, 可以有效解决粒子退化问题。采用较少的粒子数就能达到较好的估计效果, 也缩短了软件计算时间, 有利于提高汽车动态估计器的实时性能。整个滤波算法步骤如下<sup>[9]</sup>:

### (1) 初始化滤波器

从先验分布  $p(x_0)$  中抽取  $N$  个粒子  $x_0(i)$  ( $i=1,2,\dots,N$ )。随着粒子数的增加,标准粒子滤波产生的状态近似分布收敛于状态后验分布<sup>[10]</sup>。修正 Fiala 模型中关于轮胎力和力矩对于轮胎侧偏角的传递关系是正切函数和指数函数相互耦合的情况,表现出很强的非线性,非线性汽车系统的滤波粒子数设置为  $N=80$ 。

初始误差方差阵设为对角元素为  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-5}$ 、 $10^{-5}$  的四阶稀疏矩阵。方差设置较小可避免因对滤波值造成过大的扰动而导致失真。

### (2) 重要性采样(SIS)

抽取  $x_k(i) \sim q(x_k | x_{0:k-1}(i), y_{1:k})$  ( $i=1,2,\dots,N$ )。选取具有先验性质的系统状态转移概率密度作为重要性概率密度<sup>[11]</sup>,即

$$q(x_k | x_{0:k-1}, y_{1:k}) = p(x_k | x_{k-1}(i)) \quad (13)$$

计算各新样本的权值

$$w_k^*(i) = w_{k-1}^*(i) \frac{p(y_k | x_k(i)) p(x_k | x_{k-1}(i))}{q(x_k(i) | x_{0:k-1}(i), y_{1:k})} \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (14)$$

归一化权值

$$w_k(i) = \frac{w_k^*(i)}{\sum_{i=1}^N w_k^*(i)} \quad (15)$$

### (3) 重采样

为了解决粒子退化问题,即避免将过多的运算时间耗费在权值很低的粒子上,需要引入重采样步骤。本文采用多项式重采样算法:每次从  $[0,1]$  上的均匀分布中随机抽取一个样本  $u \sim U[0,1]$ ,满足

$$\sum_{j=1}^{i-1} w_k(j) \leq u \leq \sum_{j=1}^i w_k(j) \quad (16)$$

的粒子  $x_k(i)$  被选出并复制到新的粒子集合中并将所有粒子的权值置为  $1/N$ 。

### (4) 滤波输出

$x_k$  的最小均方误差估计值为

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^N w_k(i) x_k(i) \quad (17)$$

## 3 基于 ADAMS 的虚拟试验验证

为了验证算法在估计时的正确性,在虚拟样机软件 ADAMS 上对某型轿车进行了仿真试验验证。该车的参数为:  $m=1\,528\text{ kg}$ ,  $a=1.48\text{ m}$ ,  $b=1.08\text{ m}$ ,  $h=0.432\text{ m}$ ,  $I_z=2\,440\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $t_f=1.52\text{ m}$ ,  $t_r=1.594\text{ m}$ ,  $r_e=0.33\text{ m}$ 。

为了模拟极限工况下汽车操纵响应,在整车仿真中采用驱动样机产生所需要的汽车行驶路径,使

汽车沿图 2 所示的蛇行线路径行驶。整个操纵历时 10 s,采样时间 0.01 s。

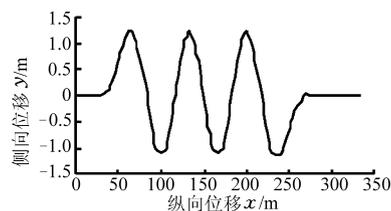


图 2 蛇行线路径

Fig. 2 Snake path

为了考察 PF 算法对含噪声非线性汽车系统的估计性能,本文对 PF 算法、扩展卡尔曼滤波(EKF)算法和非追踪卡尔曼滤波(UKF)算法进行了比较,结果见图 3。

从图 3 可以看出,3 种算法的估计值非常接近,较为明显的是侧向加速度、横摆角速度峰值处的估计,EKF 与 UKF 算法的精度均不如 PF 算法。各个状态量的估计值在波峰和波谷处虚拟试验值的误差较其他地方大一些,这是由于轮胎侧偏特性已进入较为明显的非线性区域。提高轮胎力学模型精度可以改善估计时状态量的跟随性能。

总体来说 4 个状态量的估计值与虚拟试验值的吻合程度较好。为了定量比较两种算法的估计精度,给出了估计值相对于实际值的平均绝对误差和均方根误差,如表 1 所示。

表 1 3 种算法的误差分析结果

Tab. 1 Error analysis of three algorithms

状态量	平均绝对误差			均方根误差		
	PF	UKF	EKF	PF	UKF	EKF
$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.060 5	0.072 3	0.077 9	0.083 9	0.119 0	0.123 0
$a_y/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	0.342	0.472	0.513	0.456	0.736	0.756
$r/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	0.007 12	0.015 90	0.020 30	0.008 98	0.025 90	0.028 70
$\beta/\text{rad}$	0.001 91	0.002 1	0.002 39	0.002 63	0.003 51	0.003 58

从表 1 可以看出在同等条件下,PF 算法的估计精度要略高于 EKF 及 UKF 算法,这也佐证了文献[9]中粒子滤波是目前最适合于强非线性系统状态的估计方法的结论。

这里需要说明,粒子数过少有可能发生粒子匮乏现象而导致滤波发散。图 4 给出了粒子数  $N=30$  时侧向速度的估计情况。

由图 4 可以看出,第 5 秒左右时滤波发生了严重的发散现象。 $N \geq 40$  时,该现象基本消除。

粒子滤波算法在个人计算机(主频 2.4 GHz,内存 1 GB)和 Matlab 软件环境下的运行时间为 4.26 s,运算速度与同等条件下 UKF 方法<sup>[6]</sup>十分接近,完全能够胜任汽车状态估计的实时性要求。

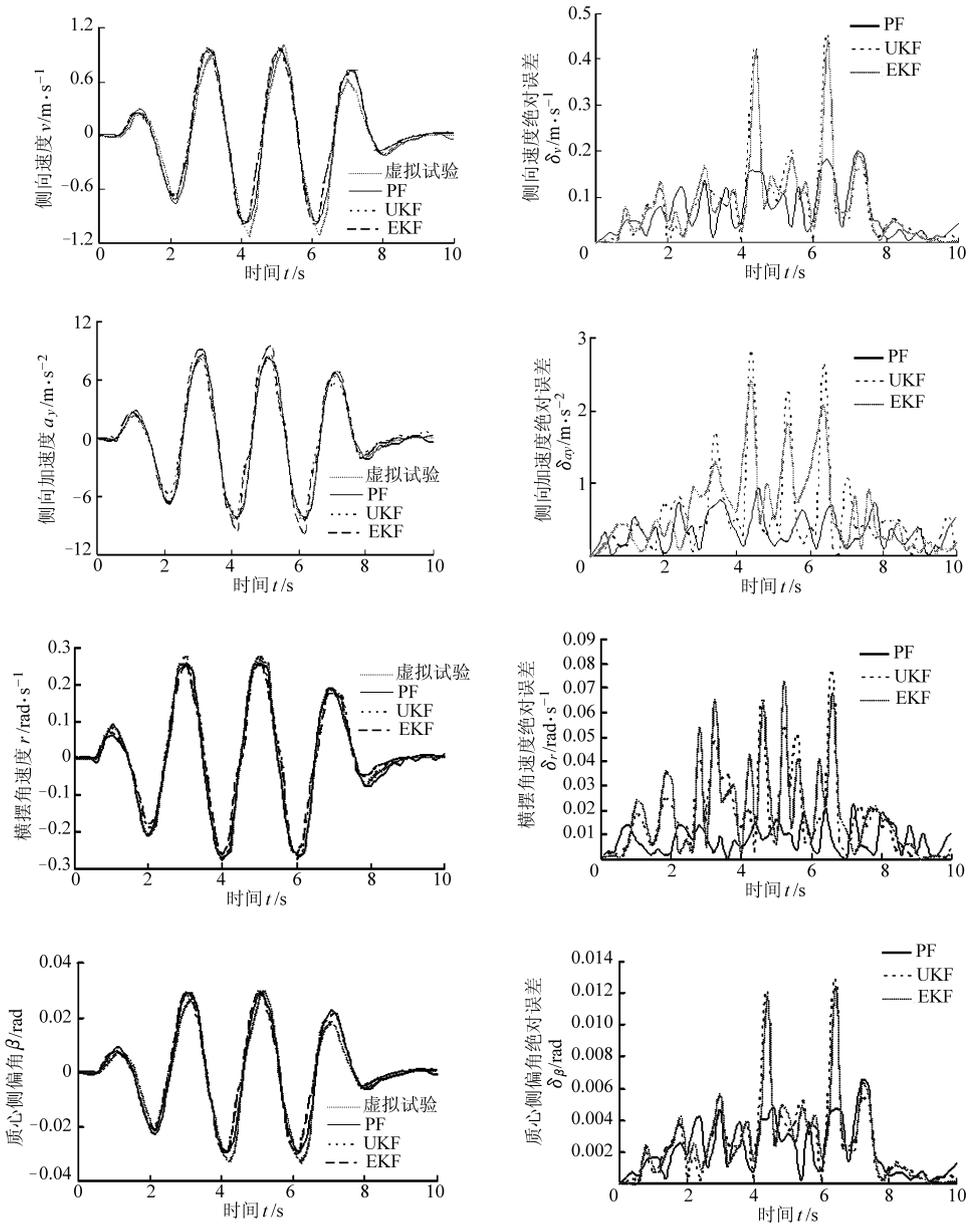
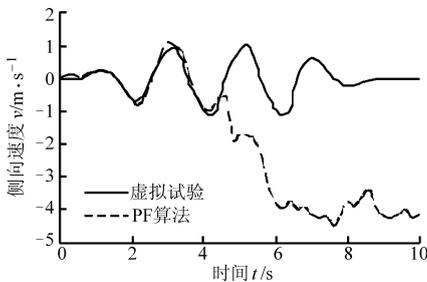


图3 各种算法的估计与虚拟试验结果

Fig. 3 Estimation and virtual experiment curves of different algorithms

图4  $N=30$  时侧向加速度的估计结果Fig. 4 Estimation of lateral acceleration ( $N=30$ )

当汽车进入低附着条件下,轮胎将会更快进入非线性区域,为了验证此时状态估计算法的有效性,给出了在路面附着系数为0.6时的侧向加速度和横摆角速度的估计,如图5所示。

由图5可以看出,在附着系数为0.6的低附着

条件下,基于PF的估计算法仍然能够较好地对关键状态量进行估计,估计误差控制在较小的范围内。

综上,在满足实时性要求的前提下,在估计精度方面PF算法相比于目前广泛使用的EKF及UKF算法具有优势。

#### 4 实车试验验证

进行某轻型越野汽车的蛇形线实车试验,试验按照GB/T 6323.1—1997标准执行。车上安装了陀螺仪用来实时采集汽车的横摆角速度、侧向加速度,非接触式速度传感器用来实测汽车的纵向速度和侧向速度,另外ABS轮速传感器采集4个车轮的角速度,方向盘转角测试仪测量方向盘转角。试验车速为 $(65 \pm 3)$  km/h。图6是状态量的UKF方法估计

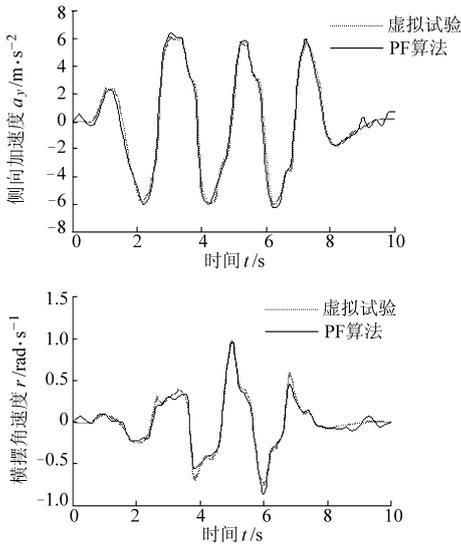


图 5 低附着条件下估计与虚拟试验结果比较  
Fig. 5 Comparison between estimation and virtual experiments under low adhesion condition

值和实车试验值的比较。

从以上的比较可以看出,虽然估计值与虚拟实验值存在一定的误差,但估计值在趋势上基本与试验值相符合。本文采用的 Fiala 轮胎模型在模拟实车轮胎力学特性时存在一定的偏差,另外传感器的测量误差及安装位置也是造成估计值与试验值有一定偏差的重要原因。

## 5 结论

(1) 采用的 PF 算法对于包含纯加性噪声的非

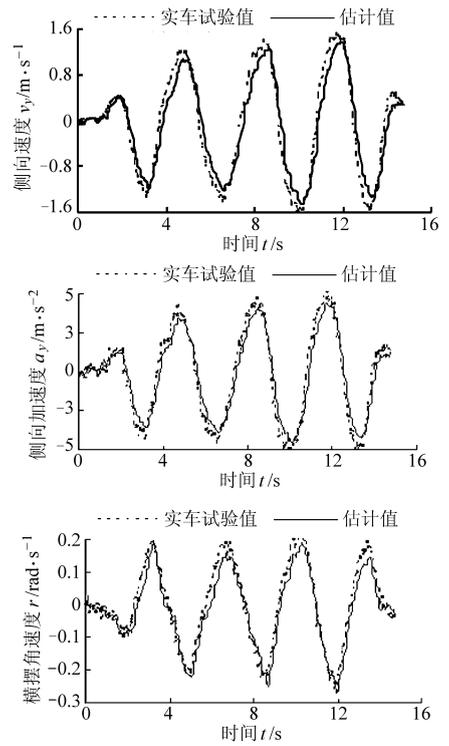


图 6 状态量估计与实车试验结果  
Fig. 6 Estimation and real vehicle experiments

线性汽车系统具有良好的状态估计精度,在 ADAMS 虚拟试验的快速蛇行极限工况下,状态估计的平均绝对误差都在状态幅值的 10% 以内。

(2) 在同等条件下 PF 算法的估计精度高于传统的 EKF 算法和 UKF 算法。

## 参 考 文 献

- 1 Venhovens P J, Naab K. Vehicle dynamics estimation using Kalman filters[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 32(2): 171 ~ 184.
- 2 林菜,赵又群. 汽车侧偏角估计方法比较[J]. 南京理工大学学报:自然科学版,2009,33(1):122 ~ 126.  
Lin Fen, Zhao Youqun. Comparison of methods for estimating vehicle side slip angle[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2009,33(1):122 ~ 126. (in Chinese)
- 3 Wenzel T A, Burnham K J, Blundell M V, et al. Kalman filter as a virtual sensor: applied to automotive stability systems [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2007, 29(2):95 ~ 115.
- 4 Best M C, Gordon T J, Dixon P J. An extended adaptive Kalman filter for real-time state estimation of vehicle handling dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 34(1): 57 ~ 75.
- 5 林菜,赵又群. 基于双重扩展自适应卡尔曼滤波的汽车状态和参数估计[J]. 中国机械工程,2009,20(6):750 ~ 755.  
Lin Fen, Zhao Youqun. Vehicle state and parameter estimation based on dual extended adaptive Kalman filter [J]. China Mechanical Engineering,2009, 20(6):750 ~ 755. (in Chinese)
- 6 赵又群,林菜. 基于 UKF 算法的汽车状态估计[J]. 中国机械工程,2010,21(5):615 ~ 619.  
Zhao Youqun, Lin Fen. Vehicle state estimation based on unscented Kalman filter algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2010,21(5):615 ~ 619. (in Chinese)
- 7 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科技出版社,1991.
- 8 Arulampulam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2002, 50(2):174 ~ 188.

## 5 结束语

SBW 系统由于取消了方向盘到转向车轮直接的机械连接,导致路感无法直接反馈给驾驶员而需要模拟生成。本文从复制传统 EPS 系统路感反馈信息的角度出发,采用 KF 方法估计机械转向系统齿条力并结合 EPS 系统的助力转向特性,设计了

SBW 系统路感模拟方法。通过硬件在环试验结果表明,该方法可以保证汽车高速转向的平稳性,与 EPS 系统路感反馈效果基本一致。同时利用 SBW 系统不受摩擦力矩的影响,使 SBW 系统路感的低速转向轻便性好于 EPS 系统,在保证汽车操纵性的同时,提高了驾驶舒适性。

### 参 考 文 献

- 1 Sanket Amberkar, Farhad Bolouchi, Jon Demerly, et al. A control system methodology for steer by systems[C]. SAE Paper 2004-01-1106, 2004.
- 2 Manasina Rath, Morrel Kelly, Kurt Kober, et al. Optimum design of a steer by wire system using systematic system engineering approach[C]. SAE Paper 2008-01-1452, 2008.
- 3 于蕾艳,林逸,施国标. 线控转向系统的主动转向控制策略[J]. 农业机械学报,2008, 39(1): 4~6.  
Yu Leiyan, Lin Yi, Shi Guobiao. Active steering control strategy of steer-by-wire system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 4~6. (in Chinese)
- 4 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京:机械工业出版社,2009.
- 5 Andrea Morgando, Mauro Velardocchia. Steering feedback torque definition and generation in a steer by wire system[C]. SAE Paper 2008-01-0498, 2008.
- 6 罗石,商高高,苏清祖. 线控转向系统转向盘力回馈控制模型的研究[J]. 汽车工程,2006,28(10):914~917.  
Luo Shi, Shang Gaogao, Su Qingzu. A research on steering wheel force feedback control model for steer by wire system[J]. Automobile Engineering, 2006, 28(10): 914~917. (in Chinese)
- 7 Se-Wook Oh, Ho-Chol Chen, Seok-Chan Yun, et al. The design of a controller for the steer-by-wire system[J]. JSME International Series C, 2004, 47(3): 896~907.
- 8 Yang Shengbing, Den Chunan, Ji Xuewu, et al. Research on road feeling control strategy of steer-by-wire[C]. SAE Paper 2007-01-3652, 2007.
- 9 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 2版. 北京:国防工业出版社,2006.

(上接第 27 页)

- 9 Wan E A, Nelson A T. Kalman filtering and neural networks[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- 10 Crisan D, Doucet A. A survey of convergence results on particle filtering methods for practitioners[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(3): 736~746.
- 11 Pierre D M, Arnaud D, Ajay J. Sequential Monte Carlo samplers[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 2006, 68(3):411~436.