

DOI: 10.3901/JME.2015.04.096

# 四驱混合动力轿车驱动工况无迹卡尔曼车速估计\*

赵治国<sup>1,2</sup> 杨杰<sup>2</sup> 陈海军<sup>2</sup> 吴泉威<sup>2</sup>

(1. 同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804;

2. 同济大学汽车学院 上海 201804)

**摘要:** 针对驱动模式复杂多变的四驱混合动力轿车,考虑其后轮毂电机驱动转矩的准确可测以及既定模式下前驱动轮转矩的可推算性,结合电子稳定程序(Electronic stability program, ESP)系统传感器信号,提出无迹卡尔曼车速估计算法。搭建四驱混合动力轿车仿真平台,其集成了驱动系统模型、非线性7自由度车辆动力学模型和统一轮胎模型。基于车辆动力学模型和轮胎模型,设计融合驱动轮转矩信息和传感器信息的车速估计算法,并将估计结果与仿真车速进行比较分析。在样车上加装转向盘转角、横摆角速度和质心加速度等传感器,采集轮转、驱动轮转矩信息,在后轮纯电驱动模式低速双扭线试验、四轮混合驱动模式双移线和蛇行试验工况下,对所设计算法进行实车道路试验。仿真和实车试验结果表明,无迹卡尔曼车速估计算法精度较高,且具有较强的工况适应性。

**关键词:** 四驱混合动力轿车;车速估计;7自由度车辆动力学模型;无迹卡尔曼滤波

中图分类号:U461

## Vehicle Speed Estimation in Driving Mode for Hybrid Electric Car Using Unscented Kalman Filter

ZHAO Zhiguo<sup>1,2</sup> YANG Jie<sup>2</sup> CHEN Haijun<sup>2</sup> WU Xiaowei<sup>2</sup>

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804;

2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804)

**Abstract:** As for the four-wheel drive hybrid electric car with complex and changeable driving modes, unscented Kalman filter(UKF) is proposed for vehicle speed estimation in consideration of obtainable driving torque and electronic stability program(ESP) sensor signals. Simulation platform is established according to the four-wheel drive hybrid electric car, which integrates power-train system model, nonlinear seven degree of freedom vehicle dynamics model and the dynamic union tire model. The estimation result of UKF algorithm is compared with the simulated real car's velocity. After steering wheel angle sensor, yaw angular velocity sensor and acceleration sensors are all mounted in the prototype car and the signals of two front wheel angular speed are acquired as well as the torque information of driving wheel are introduced, UKF algorithm is tested on the real vehicle road experiments, which include 8-shape route driving case on pure electric drive mode, double-lane change driving case and S-shape route driving case on four wheel hybrid drive mode. Simulation and test results show that the proposed algorithm has not only high precision, but also strong adaptability.

**Key words:** four-wheel drive hybrid electric car; vehicle speed estimation; seven degree of freedom nonlinear vehicle dynamics model; unscented Kalman filter

## 0 前言

利用车载传感器信号,基于车辆动力学,采用最优估计理论,能够有效提高车速估计精度。其中,卡尔曼算法应用最广泛<sup>[1-2]</sup>。王仁广等<sup>[3-4]</sup>以轮速为输入,设计自适应卡尔曼算法估计ABS参考车速。KOBAYASHI等<sup>[5]</sup>以轮速和车辆加速度为输入,提

出基于模糊规则的卡尔曼算法,并在车轮打滑情况下进行试验验证。宗长富等<sup>[6-7]</sup>利用车辆纵、侧向加速度和转向盘转角信息,基于扩展卡尔曼算法,估计横摆角速度和质心侧偏角,并利用实车场地试验数据进行离线仿真。

车辆状态之间存在非线性耦合,扩展卡尔曼算法通过泰勒展开对系统线性化,但误差较大。JULIER等<sup>[8]</sup>提出的无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman filter, UKF),由于没有高阶项误差,因此状态均值和协方差估计更加精确<sup>[9-11]</sup>。ANTONOVA等<sup>[12]</sup>利用常规电子稳定程序(Electronic stability

\* 国家重点基础研究发展计划(973计划, 2011CB711200)、国家高技术研究发展计划(863计划, 2012AA111201)和国家自然科学基金(51275355)资助项目。20140312收到初稿,20140728收到修改稿

program, ESP)传感器,基于双轨车辆模型和“魔术公式”轮胎模型,考虑轮胎垂向载荷转移,使用 UKF 算法对车速等状态进行了仿真估计和实车验证。

近年来针对电驱车辆全轮转矩精确可知的特点,褚文博等<sup>[13]</sup>融合车载普通传感器和驱动电机反馈信号,提出基于稳态工况轮速信号卡尔曼滤波和瞬态工况加速度积分的车速估计算法。ZONG 等<sup>[14]</sup>基于 3 自由度车辆模型和 HSRI 轮胎模型,使用 UKF 算法对其车速进行了初步仿真估计。

四驱混合动力轿车存在前轮驱动、后轮驱动和四轮驱动,且驱动模式复杂多变。后轮毂电机驱动转矩准确可测,既定模式下前驱动轮转矩可推算。并在样车上加装 ESP 传感器,测量轮速、转向盘转角、横摆角速度、纵向和侧向加速度信号。针对四驱混合动力轿车多驱动模式、多信息源的特点,基于 7 自由度车辆模型和统一轮胎模型,设计 UKF 算法进行驱动工况车速估计。对所设计 UKF 算法进行低、中速行驶工况仿真验证和实车道路试验验证。

## 1 动力系统及车辆动力学集成建模

### 1.1 四驱混合动力轿车动力系统模型

四驱混合动力轿车动力系统如图 1 所示<sup>[15]</sup>。发动机和起动发电一体电机(Integrated starter generator, ISG)通过自动变速器(Automated mechanical transmission, AMT)实施前轮驱动,轮毂电机实施后轮驱动,通过整车控制器协调,可使车辆分时工作在后轮纯电驱动、前轮驱动(含发动机驱动、发动机驱动+ISG 驱动、发动机驱动+ISG 发电)和四轮驱动(含发动机驱动+轮毂电机驱动、发动机驱动+ISG 驱动+轮毂电机驱动)多种驱动模式。

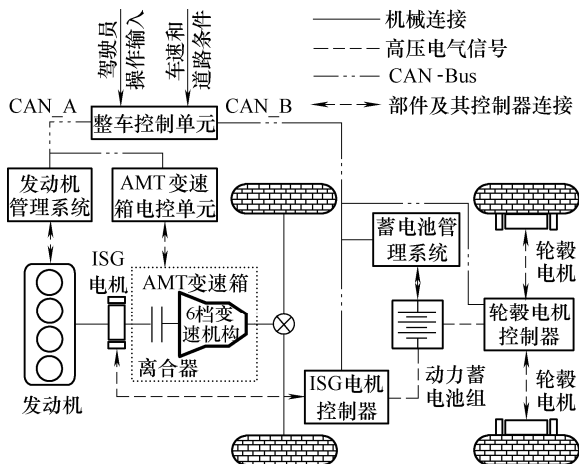


图 1 四驱混合动力轿车动力系统

限于篇幅,动力系统各部件模型详见文献[15]。不考虑换挡过程的车速估计,忽略了换挡过程的瞬

态响应和换挡时间,根据当前档位、发动机和 ISG 电机输出转矩便可推算前驱动轮转矩,后驱动轮转矩则为轮毂电机输出转矩。为考察轮毂电机转矩引入对车速估计的影响,下文将重点关注轮毂电机作用时有、无非驱动轮的车速估计问题。

### 1.2 非线性 7 自由度车辆模型

#### 1.2.1 车辆动力学模型

根据样车结构特点和车速估计的研究需要,建立如图 2 所示的平面 7 自由度车辆动力学模型,其包括车辆纵向、横向及横摆运动 3 自由度和四个车轮转动自由度。

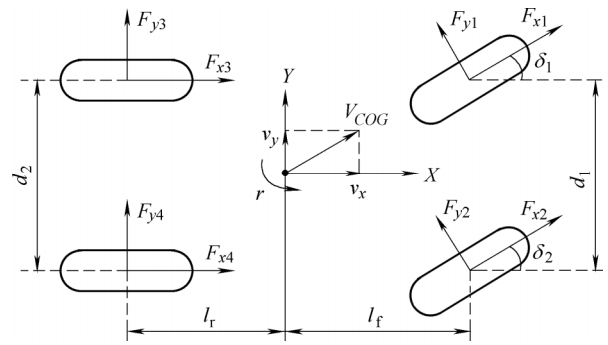


图 2 7 自由度车辆模型

车辆坐标系(原点 \$O\$ 在车辆质心处)中,车辆纵向、侧向及横摆运动运动微分方程可描述为

$$\begin{cases} \dot{v}_x - rv_y = \frac{1}{m} \sum F_x \\ \dot{v}_y + rv_x = \frac{1}{m} \sum F_y \\ \dot{r} = \frac{1}{I_z} \sum M_z \end{cases} \quad (1)$$

其中合力(矩)为

$$\begin{aligned} \sum F_x &= \sum_{i=1}^4 (F_{xi} \cos \delta_i - F_{yi} \sin \delta_i) - \frac{1}{2} C_D A \rho_a v^2 \\ \sum F_y &= \sum_{i=1}^4 (F_{yi} \cos \delta_i + F_{xi} \sin \delta_i) \\ \sum M_z &= [(F_{x1} + F_{x2}) \sin \delta + (F_{y1} + F_{y2}) \cos \delta] l_f - \\ &\quad [(F_{x1} - F_{x2}) \cos \delta - (F_{y1} - F_{y2}) \sin \delta] \frac{d_1}{2} + M_1 + \\ &\quad M_2 - (F_{y3} + F_{y4}) l_r - (F_{x3} - F_{x4}) \frac{d_2}{2} + M_3 + M_4 \end{aligned}$$

式中 \$v\_x, v\_y\$ ——车辆纵向速度、侧向速度;

\$r\$ ——车辆横摆角速度;

\$\delta\_i\$ ——各轮转向角, \$\delta\_1 = \delta\_2, \delta\_3 = \delta\_4 = 0\$;

\$m\$ ——整车质量;

\$I\_z\$ ——车辆绕 \$z\$ 轴转动惯量;

\$d\_1, d\_2\$ ——前、后轮轮距;

\$l\_f, l\_r\$ ——车辆质心到前、后轴距离;

$h$  ——车辆质心离地高度；  
 $F_{xi}$ ,  $F_{yi}$  ——各车轮纵向力、侧向力；  
 $M_i$  ——各车轮回正力矩；  
 $C_D$  ——风阻系数；  
 $A$  ——迎风面积；  
 $\rho_a$  ——空气密度。

### 1.2.2 轮胎运动状态及垂向载荷计算

轮胎运动状态在车辆坐标系和轮胎坐标系之间的转换关系可表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} v_{xi} = \bar{v}_{xi} \cos \delta_i + \bar{v}_{yi} \sin \delta_i & i=1,2,3,4 \\ v_{yi} = \bar{v}_{yi} \cos \delta_i - \bar{v}_{xi} \sin \delta_i & i=1,2,3,4 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $v_{xi}$ ,  $v_{yi}$  ——车轮坐标系中轮心纵、侧向速度；

$\bar{v}_{xi}$ ,  $\bar{v}_{yi}$  ——车辆坐标系中轮心纵、侧向速度。

轮胎垂直载荷  $F_{zi}$  由三部分组成：静载荷  $F_{z0i}$ 、纵向加速度引起的载荷转移  $\Delta F_{z1i}$ 、侧向加速度引起的载荷转移  $\Delta F_{z2i}$ ，各轮胎垂向载荷可表示为<sup>[15]</sup>

$$F_{zi} = F_{z0i} + \Delta F_{z1i} + \Delta F_{z2i} \quad i=1,2,3,4 \quad (3)$$

忽略轮胎滚动阻力，各车轮运动平衡方程为

$$\dot{\omega}_i = \frac{T_{di} - T_{bi} - F_{xi} R_{ei}}{I_{wi}} \quad i=1,2,3,4 \quad (4)$$

式中  $T_{di}$  ——各车轮驱动力矩；

$T_{bi}$  ——各车轮制动力矩；

$R_{ei}$  ——各车轮有效滚动半径；

$I_{wi}$  ——各车轮转动惯量。

### 1.3 UniTire 轮胎模型

UniTire 轮胎模型是由郭孔辉院士等<sup>[16-17]</sup>提出并发展的半经验轮胎模型，由于其模型参数少且获取容易、理论边界好和全工况仿真精度高，已在车辆操纵稳定性仿真领域得到了广泛应用。纵滑-侧偏联合工况下，轮胎纵向力  $F_x$ 、侧向力  $F_y$  和回正力矩  $M_z$  可用以下形式表达

$$\begin{cases} F_x = \bar{F} \frac{\lambda \Phi_x}{\sqrt{(\lambda \Phi_x)^2 + \Phi_y^2}} \mu_x F_z \\ F_y = \bar{F} \frac{\lambda \Phi_y}{\sqrt{(\lambda \Phi_x)^2 + \Phi_y^2}} \mu_y F_z \\ M_z = F_y (X_c + D_x) - F_x Y_c \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{F} = 1 - \exp \left( -\Phi - E_1 \Phi^2 - \left( E_1^2 + \frac{1}{12} \right) \Phi^3 \right)$$

$$D_x = (D_{x0} - D_e) \exp(-D_1 \Phi - D_2 \Phi^2) + D_e$$

$$\Phi = \sqrt{\Phi_x^2 + \Phi_y^2} \quad \Phi_x = \frac{K_x S_x}{\mu_{x0} F_z} \quad \Phi_y = \frac{K_y S_y}{\mu_{y0} F_z}$$

$$X_c = \frac{F_x}{K_{xc}} \quad Y_c = \frac{F_y}{K_{yc}} \quad \lambda = 1 + \left( \frac{K_y}{K_x} - 1 \right) \bar{F}^n$$

$$n = 1.5 + 3E_1$$

式中  $K_x$ ,  $\mu_{x0}$ ,  $K_{xc}$  ——纵向特性参数；

$K_1$ ,  $K_y$ ,  $\mu_{y0}$ ,  $K_{yc}$  ——侧向特性参数；

$D_{x0}$ ,  $D_e$ ,  $D_1$ ,  $D_2$  ——回正力矩特性参数；

$\mu_x$ ,  $\mu_y$  ——接触印迹纵向及侧向摩擦因数；

$S_x$ ,  $S_y$  ——轮胎纵向及侧向滑移率；

$F_z$  ——轮胎垂直载荷。

轮胎模型输入量为摩擦因数、滑移率和垂直载荷，输出量为轮胎纵向力、侧向力和回正力矩，纵向、侧向和回正力矩特性参数通过数据拟合得到。

## 2 车速估计 UKF 设计

### 2.1 车辆动力学状态空间模型及离散化

式(5)所示的轮胎模型可表示为

$$\begin{cases} F_{xi} = f_1(v_x, v_y, r, \delta, \omega_i, \mu) \\ F_{yi} = f_2(v_x, v_y, r, \delta, \omega_i, \mu) \\ M_i = f_3(v_x, v_y, r, \delta, \omega_i, \mu) \end{cases} \quad (6)$$

非线性函数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  由 UniTire 轮胎模型确定。令系统状态矢量  $\mathbf{x} = (v_x, v_y, r, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)^T$ ，控制输入  $\mathbf{u} = (\delta, T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}, T_{d4})^T$ ，矢量  $\mathbf{w}$  为系统过程噪声，并且假定路面附着系数  $\mu$  已知。综合式(6)和式(1)，可得系统状态方程为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{w} \quad (7)$$

传感器获得车辆纵向加速度  $a_{xm}$ 、侧向加速度  $a_{ym}$ 、横摆角速度  $r_m$  和四轮轮速  $\omega_i$ ，取系统测量信号  $\mathbf{z} = (a_{xm}, a_{ym}, r_m, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4)^T$ ，矢量  $\mathbf{v}$  为量测噪声，则量测方程可表示为

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{v} \quad (8)$$

进一步对式(7)和式(8)离散化，可得

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k-1), \mathbf{u}(k-1)) + \mathbf{w}(k-1) \quad (9)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k-1), \mathbf{u}(k-1)) + \mathbf{v}(k-1) \quad (10)$$

式中  $k$  ——采样时刻， $k=1,2,3,\dots$ 。

### 2.2 车速估计 UKF 设计步骤

UKF 算法是基于无迹变换进行状态后验均值和协方差传播的，理论上对任何非线性高斯系统都具有三阶泰勒精度。根据式(9)、(10)所示的系统，车速估计 UKF 设计步骤如下。

#### 2.2.1 构造 Sigma 采样点

设定初始状态均值  $\hat{\mathbf{x}}_{(0)}$  和协方差  $\mathbf{P}_{(0)}$ ，根据比例修正对称采样策略<sup>[10]</sup>构造  $2n+1$  个 Sigma 点  $\mathbf{X}_{(k-1)}$ ，及其相应的均值加权系数  $W_i^m$  和方差加权系数  $W_i^c$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(0)} = E(\mathbf{x}_{(0)}) \quad \mathbf{P}_{(0)} = E[(\mathbf{x}_{(0)} - \hat{\mathbf{x}}_{(0)})(\mathbf{x}_{(0)} - \hat{\mathbf{x}}_{(0)})^T] \quad (11)$$

$$\chi_{(k-1)} = \left( \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)}, \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} \pm \left( \sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}} \right)_1, \dots, \hat{\mathbf{x}}_{(k-1)} \pm \left( \sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}} \right)_n \right) \quad (12)$$

$$W_i^m = \begin{cases} \lambda/(n+\lambda) & i=0 \\ 1/[2(n+\lambda)] & i \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$W_i^c = \begin{cases} \lambda/(n+\lambda) + 1 + \beta - \alpha^2 & i=0 \\ 1/[2(n+\lambda)] & i \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\lambda = \alpha^2(n+\kappa) - n \quad (15)$$

式中  $\left( \sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}} \right)_i$  ——  $(n+\lambda)\mathbf{P}$  平方根矩阵  $i$  列；

$\alpha$  —— 决定 Sigma 点分布状态，取  $0 < \alpha \leq 1$ ；

$\beta$  —— 系统状态先验分布信息，是一个非负权系数，对于高斯分布， $\beta = 2$ ；

$\kappa$  —— 比例参数，取 0 和  $3-n$  中较大者。

## 2.2.2 时间更新(预测)

利用 Sigma 点  $\chi_{(k-1)}$  进行非线性计算，得到预测 Sigma 点  $\chi_{(k)}$ ，结合对应加权系数计算预测值的均值和方差

$$\chi_{i(k)} = f(\chi_{i(k-1)}, \mathbf{u}(k-1)) \quad i=0,1,\dots,2n \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k/k-1)} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m \chi_{i(k)} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{(k/k-1)} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c (\chi_{i(k)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k/k-1)})(\chi_{i(k)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k/k-1)})^T + \mathbf{Q} \quad (18)$$

## 2.2.3 测量更新(校正)

计算预测观测均值  $\hat{z}_{(k/k-1)}$ 、协方差  $\mathbf{P}_{zz(k)}$  以及状态预测值的协方差  $\mathbf{P}_{xz(k)}$

$$\hat{z}_{(k/k-1)} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^m h(\chi_{i(k)}) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_{zz(k)} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c \left[ \hat{z}_{(k/k-1)} - h(\chi_{i(k)}) \right] \left[ \hat{z}_{(k/k-1)} - h(\chi_{i(k)}) \right]^T + \mathbf{R} \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_{xz(k)} = \sum_{i=0}^{2n} W_i^c \left[ \hat{\mathbf{x}}_{(k/k-1)} - \chi_{i(k)} \right] \left[ \hat{z}_{(k/k-1)} - h(\chi_{i(k)}) \right]^T \quad (21)$$

计算卡尔曼增益  $\mathbf{K}_{(k)}$ ，利用观测量  $z_{(k)}$  对状态预测值修正，得到状态滤波更新值  $\hat{\mathbf{x}}_{(k)}$ ，最后计算更新值的误差协方差  $\mathbf{P}_{(k)}$

$$\mathbf{K}_{(k)} = \mathbf{P}_{xz(k)} \mathbf{P}_{zz(k)}^{-1} \quad (22)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k)} = \hat{\mathbf{x}}_{(k/k-1)} + \mathbf{K}_{(k)} (z_{(k)} - \hat{z}_{(k/k-1)}) \quad (23)$$

$$\mathbf{P}_{(k)} = \mathbf{P}_{(k/k-1)} - \mathbf{K}_{(k)} \mathbf{P}_{zz(k)} \mathbf{K}_{(k)}^T \quad (24)$$

UKF 算法在处理非线性滤波时没有进行泰勒展开，因此无须计算雅可比矩阵，没有高阶项误差，是一种精度更高的高斯非线性滤波器。

车速估计 UKF 算法设计流程及离线仿真原理如图 3 所示。

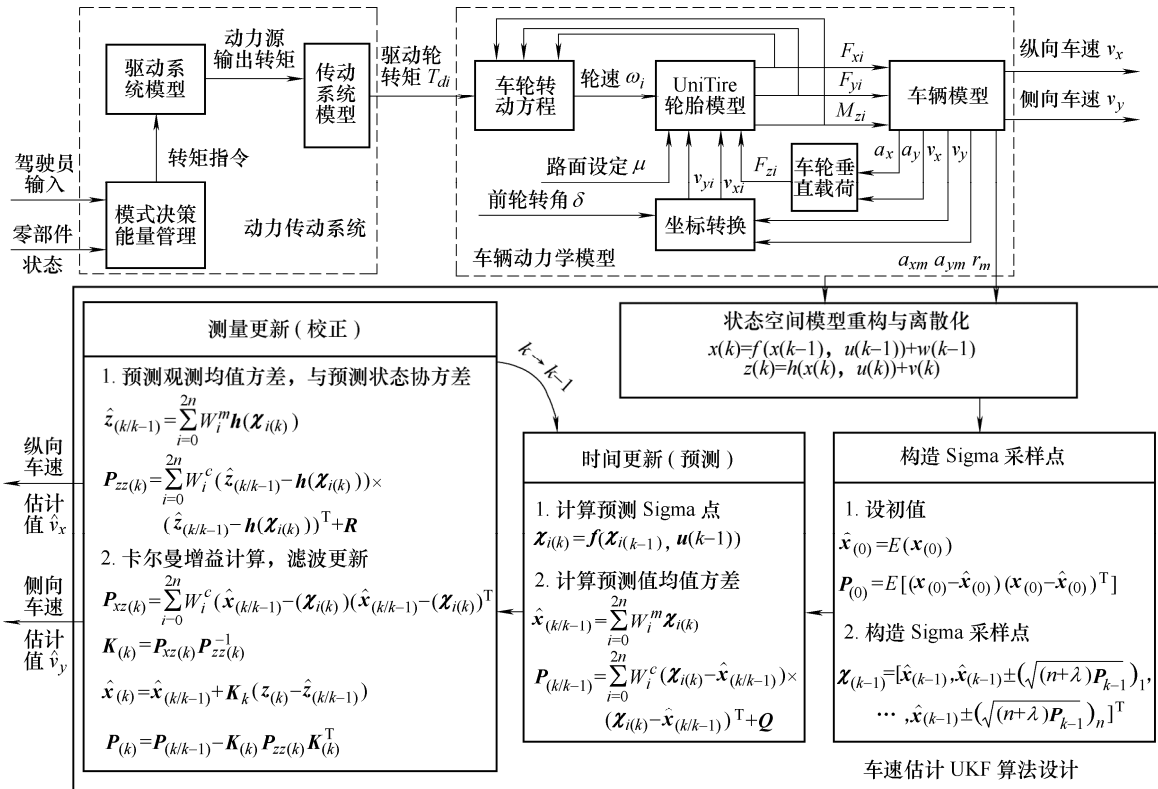


图3 车速估计 UKF 算法设计流程及离线仿真平台

### 3 UKF 车速估计性能仿真

为初步验证 UKF 车速估计算法的有效性, 基于图 3 所示的离线仿真平台, 分别在高、低附着路面进行双移线工况仿真, 在高附着路面进行蛇形工况仿真, 将估计车速与模型运行结果进行比较分析。

车速估计误差均值和方差分别按式(25)、(26)计算

$$E_{error} = \sum_{k=1}^n |v_e(k) - v_t(k)| / n \quad (25)$$

$$D_{error} = \sum_{k=1}^n (|v_e(k) - v_t(k)| - E_{error}) / n \quad (26)$$

式中  $v_e(k)$  ——  $k$  时刻的车速估计值;

$v_t(k)$  ——  $k$  时刻的车速真实值。

#### 3.1 双移线工况

双移线转向可以模拟汽车躲避路障的操作, 是评价车辆操纵稳定性性能的标准工况。ISO 3888-1-1999 规定了双移线试验的相关参数<sup>[18]</sup>, 如图 4 所示。

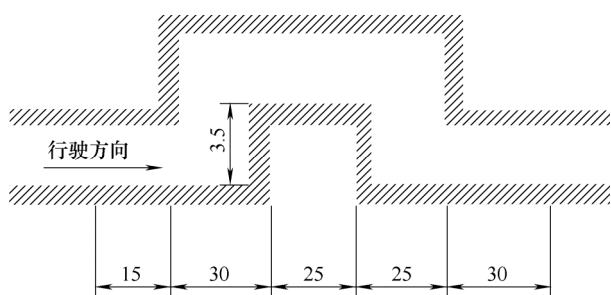


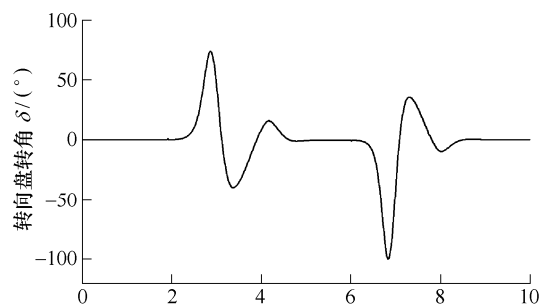
图 4 双移线通道(m)

仿真时采取路径跟踪闭环控制方式以使车辆尽量接近目标行驶路线。设定车辆在附着系数为 0.8 的良好路面上以 75 km/h 的速度行驶, 按照标准路径完成双移线操作。车速估计结果如图 5 所示, 由图 5 可见, 对于高附着系数路面双移线工况, UKF 算法对纵向车速的估计效果明显优于侧向车速。车速估计误差均值与方差见表 1 中工况 1。

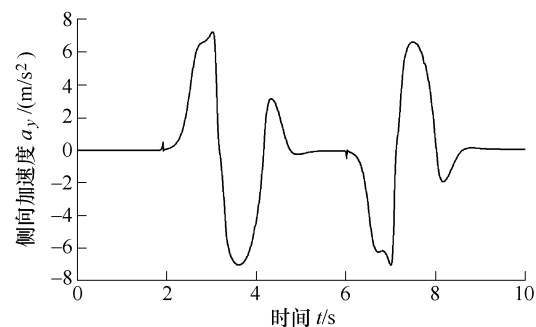
表 1 UKF 算法车速估计误差的均值与方差 m/s

统计特性	行驶工况		
	1	2	3
纵向车速误差均值	0.069 9	0.065 6	0.013 0
纵向车速误差方差	0.035 1	0.048 7	0.000 9
侧向车速误差均值	0.094 4	0.291 6	0.111 8
侧向车速误差方差	0.025 6	0.169 9	0.096 3

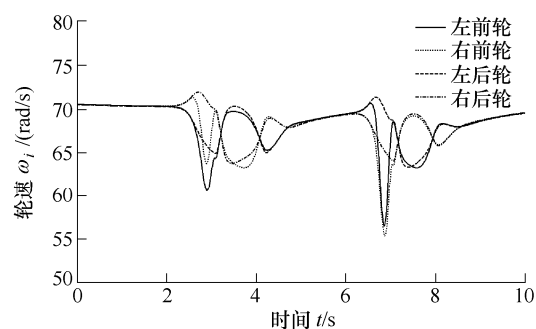
车辆在低附着系数路面行驶时, 由于路面难以提供足够的切向力, 车轮极易发生侧滑, 导致车辆横摆失稳。为此进行了路面附着系数为 0.3 的双移线工况仿真, 车速为 35 km/h, 仿真结果如图 6 所示,



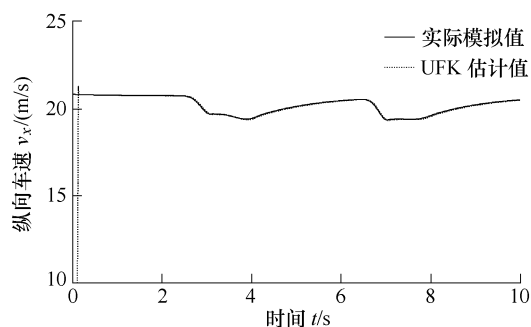
(a) 转向盘转角



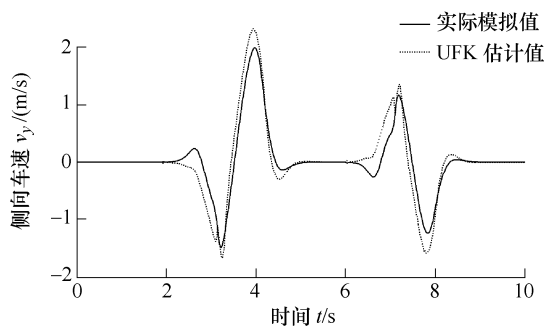
(b) 侧向加速度



(c) 四轮轮速

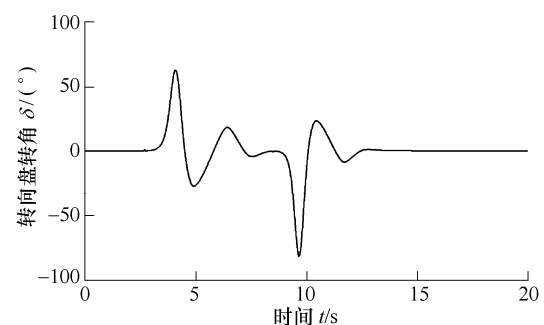


(d) 纵向车速

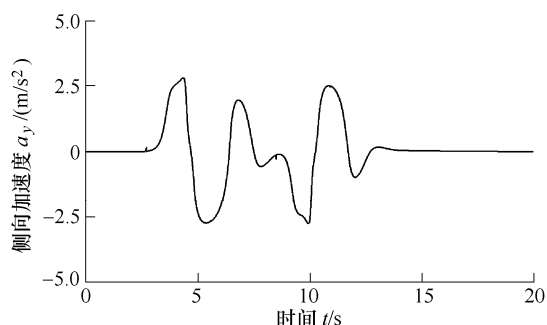


(e) 侧向车速

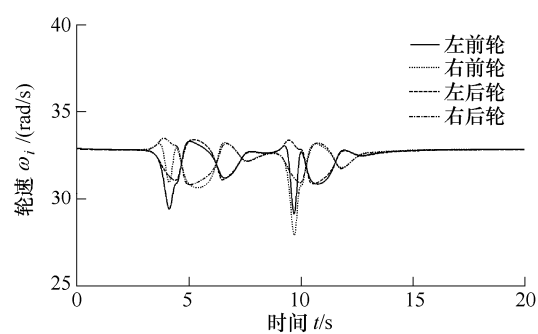
图 5 高附着系数路面双移线工况车速估计



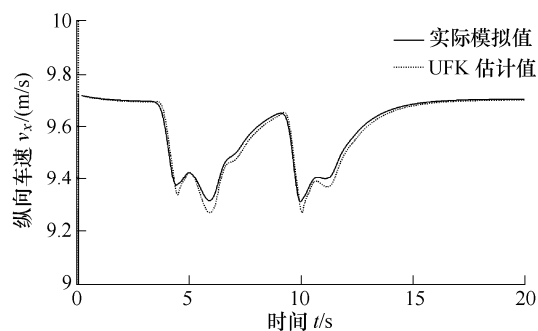
(a) 转向盘转角



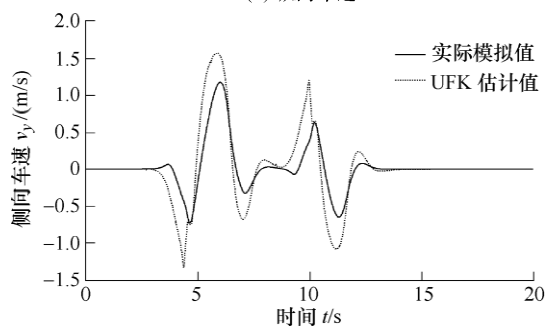
(b) 侧向加速度



(c) 四轮轮速



(d) 纵向车速



(e) 侧向车速

图 6 低附着系数路面双移线工况车速估计

误差均值与方差见表 1 中工况 2。车速估计效果比高附着路面有所下降,且车辆产生一定程度的侧滑,导致侧向车速估计产生较大的误差(图 6f)。

### 3.2 蛇行工况

蛇行工况用来模拟车辆的连续绕障运动,其规定行驶路径如图 7 所示,标间距  $L$  为 30 m。取路面附着系数为 0.6,车速 40 km/h,车速估计结果如图 8 所示,误差均值与方差见表 1 中工况 3。

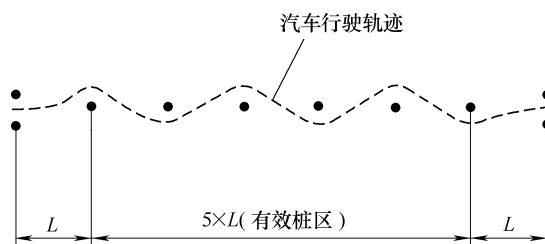
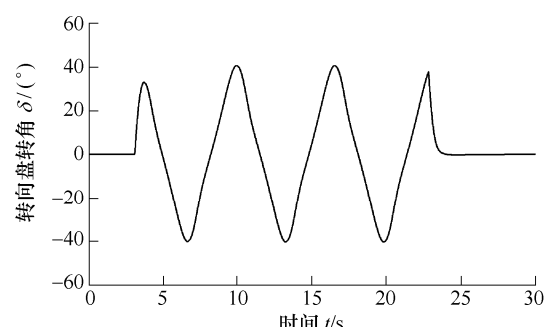
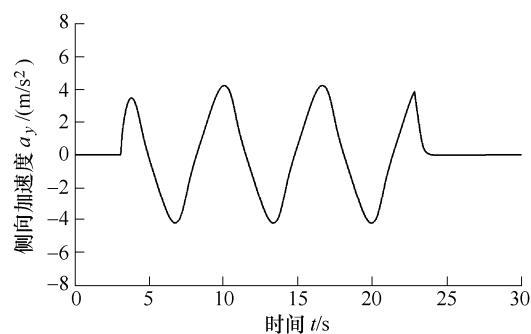


图 7 蛇行工况路径

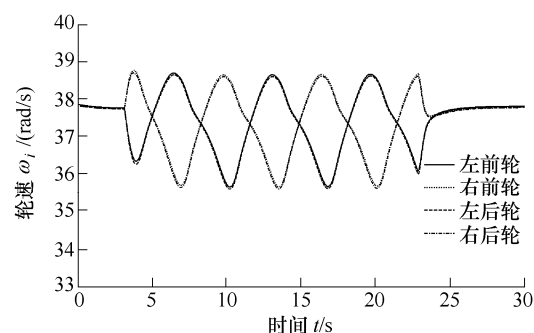
从图 8 可见,UKF 算法估计的车速与模型输出值吻合良好,精度较高。



(a) 转向盘转角



(b) 侧向加速度



(c) 四轮轮速

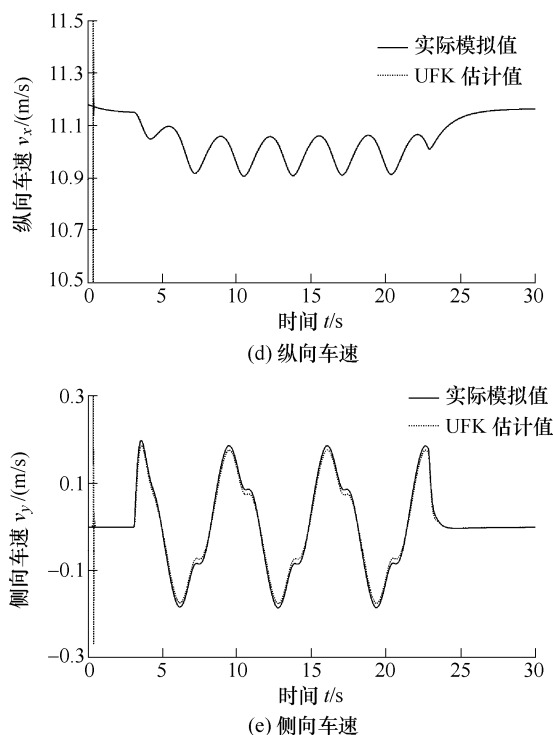


图 8 蛇行工况车速估计

## 4 实车试验验证

为进一步验证所设计的 UKF 车速观测器的有

效性,下文以四轮驱动混合动力轿车为载体,进行实车道路试验,在不同的行驶工况下,通过与实际车速的比较,验证了 UKF 车速观测器的性能。

### 4.1 实车试验总体方案

实车试验的总体方案如图 9 所示。计算机中建立了 UKF 车速观测器模型,通过 dSPACE 的实时接口模块(Real time interface, RTI)建立 AutoBox 模型,利用 Matlab 的实时工作间(Real time workshop, RTW)将其转化为 C 代码格式,并下载到 Micro AutoBox 原型控制器中。车速估计算法所需的传感器输入信号,经 Micro AutoBox 原型控制器的 I/O 口采集并处理,作为 UKF 车速观测器的一部分输入,车速估计算法所需要的其他车辆状态信息,经 Micro AutoBox 的 CAN 接收模块从整车通信网络总线获取。

Micro AutoBox 中车速观测器实时算法模型的变量和参数,可通过相应的上位机软件 ControlDesk 进行测量与标定, ControlDesk 采用基于 Micro AutoBox 特定协议的串口通信方式,可以在计算机中建立相应的图形化显示界面以方便直观地观测变量和标定对应的参数。利用上位机软件 ControlDesk 可以监控整个实车试验的运行,判断并分析试验结果。

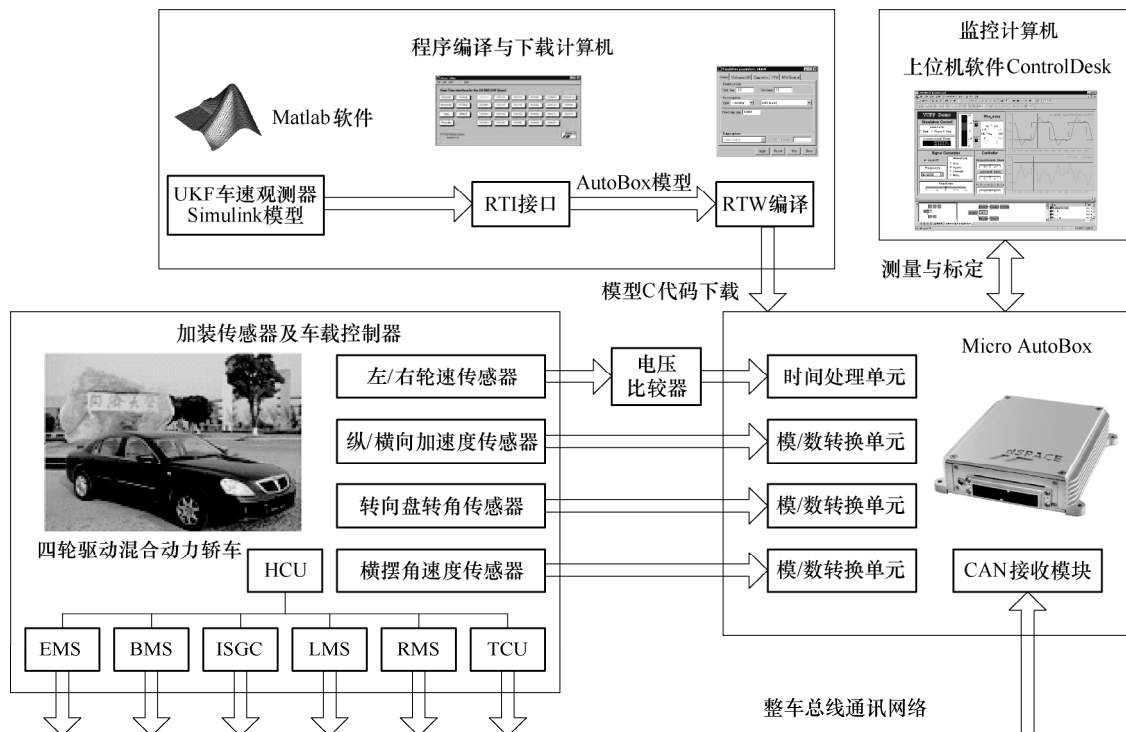


图 9 实车试验总体方案

#### 4.1.1 加装传感器及其信号采集

为了获取部分车辆行驶状态信号,共在四驱混合动力轿车上加装了 3 种共 4 个传感器,分别是纵

向加速度传感器、横向加速度传感器、转向盘转角传感器及横摆角速度传感器。加上原车的左、右前轮轮速传感器,共需要采集 6 个传感器信号。加速

度传感器采用美国 MEAS 公司 4001A-002-060，转向盘转角传感器采用 SX-4300，横摆角速度传感器采用 CRS03-02S，轮速传感器采用磁电式。

4.1.2 整车通信网络及 CAN 信号获取

车速观测器所需的其它车辆状态信息，从整车 CAN 通信网络获取。四驱混合动力轿车整车通信网络由按照 CAN 总线协议的 C 类网标准构建，主要节点包括 BMS、EMS、ISGC、LMC、RMC、TCU、HCU 等。具体的网络拓扑结构如图 9 所示，各节点的名称如表 2 所示。

表 2 整车 CAN 总线通信网络节点定义

节点号	中文名称	英文全称	英文简称
1	整车控制器	Hybrid control unit	HCU
2	发动机控制器	Engine management system	EMS
3	蓄电池管理系统	Battery management system	BMS
4	ISG 电机控制器	ISG motor controller	ISGC
5	左轮毂电机控制器	Left wheel motor controller	LMC
6	右轮毂电机控制器	Right wheel motor controller	RMC
7	机械式自动变速器 控制器	Transmission control unit	TCU

试验时，将 AutoBox 接入整车通信网络总线，通过 CAN 接收模块接收所需的各控制器发出信号。所需的具体信号如表 3 所示。

表 3 车速估计所需的 CAN 信号列表

所需信号	作用	信号发出节点
发动机转矩信号	结合 ISG 电机转矩计算变速器 输入力矩	EMS
ISG 电机转矩信号	结合发动机转矩计算变速器 输入力矩	ISGC
离合器状态	判断变速器是否有力矩输出	TCU
档位信号	计算变速器输出轴力矩	TCU
左轮毂电机转速	计算左后轮轮速	LMC
左轮毂电机转转矩	计算左后轮转矩	LMC
右轮毂电机转速	计算右后轮轮速	RMC
右轮毂电机转转矩	计算右后轮转矩	RMC

4.1.3 实车试验软件

按照图 9 所示的实车试验总体方案以及 RTW 自动代码生成方法，将已建立的 UKF 车速估计状态观测器与传感器信号采集处理程序下载到 Micro AutoBox 原型控制器中。为了测量、标定以及保存模型中的变量数据，利用上位机软件 ControlDesk 对整个实车试验过程进行实时监测，ControlDesk 的监控界面如图 10 所示。

界面中主要包括车速观察、零部件状态监测、传感器信号监测、参数标定和数据记录几个部分。

4.2 实车试验结果与分析

按照实车试验总体方案，在搭建的试验的平台上，选取典型的 8 字形转向、双移线和蛇行运动作

为试验工况，对所设计 UKF 车速观测器进行实车道路试验。由于侧向车速没有实际测量，下文将不再给出估计结果。

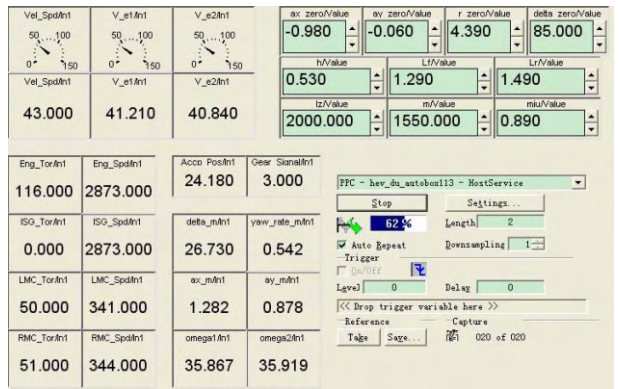


图 10 ControlDesk 监控界面

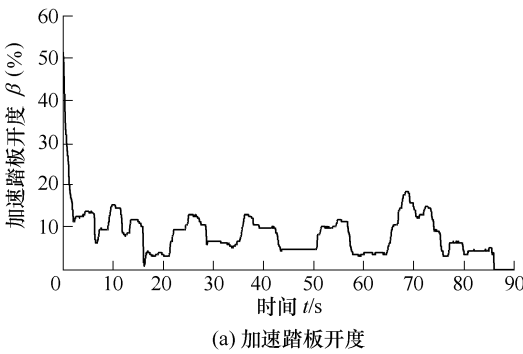
4.2.1 8 字形转向试验

8 字形转向路径为双纽线，最小曲率半径为 6 m，在双纽线最宽处，顶点和中点(即结点)的路径两侧各放置两个标桩，共计放置 16 个标桩，如图 11 所示。试验过程中记录的车辆状态和车速估计结果如图 12 所示。



图 11 8 字形转向试验

试验在后轮毂电机纯电动驱动模式下进行，电机驱动力矩如图 12c 所示。通过加速踏板将车速保持在 15 km/h 左右，前轮轮速由传感器采集，后轮轮速通过整车通信网络从轮毂电机控制器获取。从图 12f 可以看出，UKF 观测器纵向车速的估计结果能较好地接近实际值，在转向过程中误差有所波动，但范围不大，整体估计效果不错。同时，估计精度明显优于 ABS 控制器所给出的参考车速。



(a) 加速踏板开度



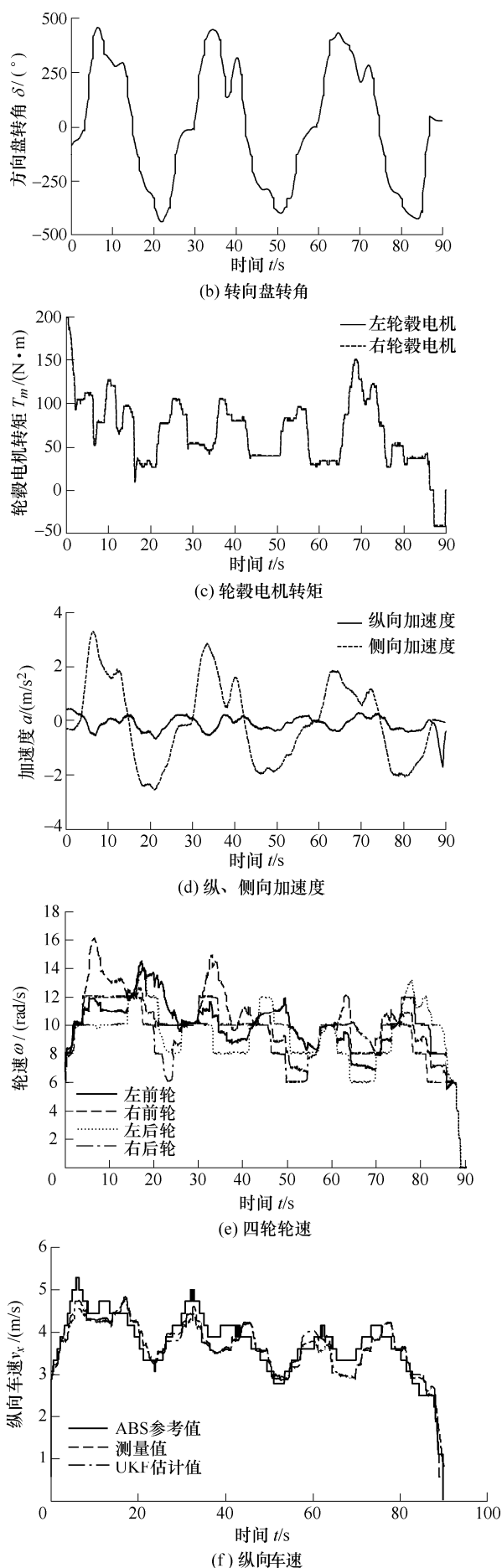
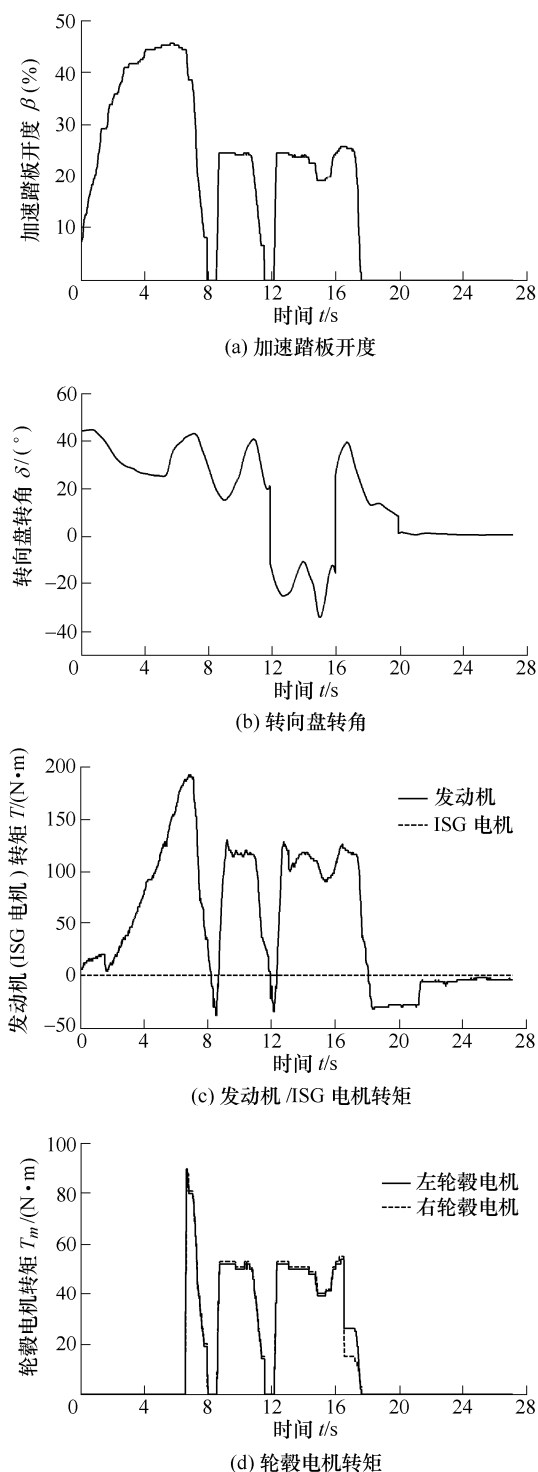


图12 8字形转向试验结果

## 4.2.2 双移线试验

双移线试验路径设置遵照 ISO 3888-1:1999 标准(图 4),在试车场长直路段进行,车辆采用发动机+后轮毂电机四轮驱动模式,试验中车辆状态和车速估计结果如图 13 所示。试验中最高车速达到 60 km/h,从各个动力源的状态信息可以看出 ISG 电机未参与工作,前轮单独由发动机驱动,后轮由轮毂电机驱动。UKF 算法纵向车速估计效果最大误差在 5%以内。



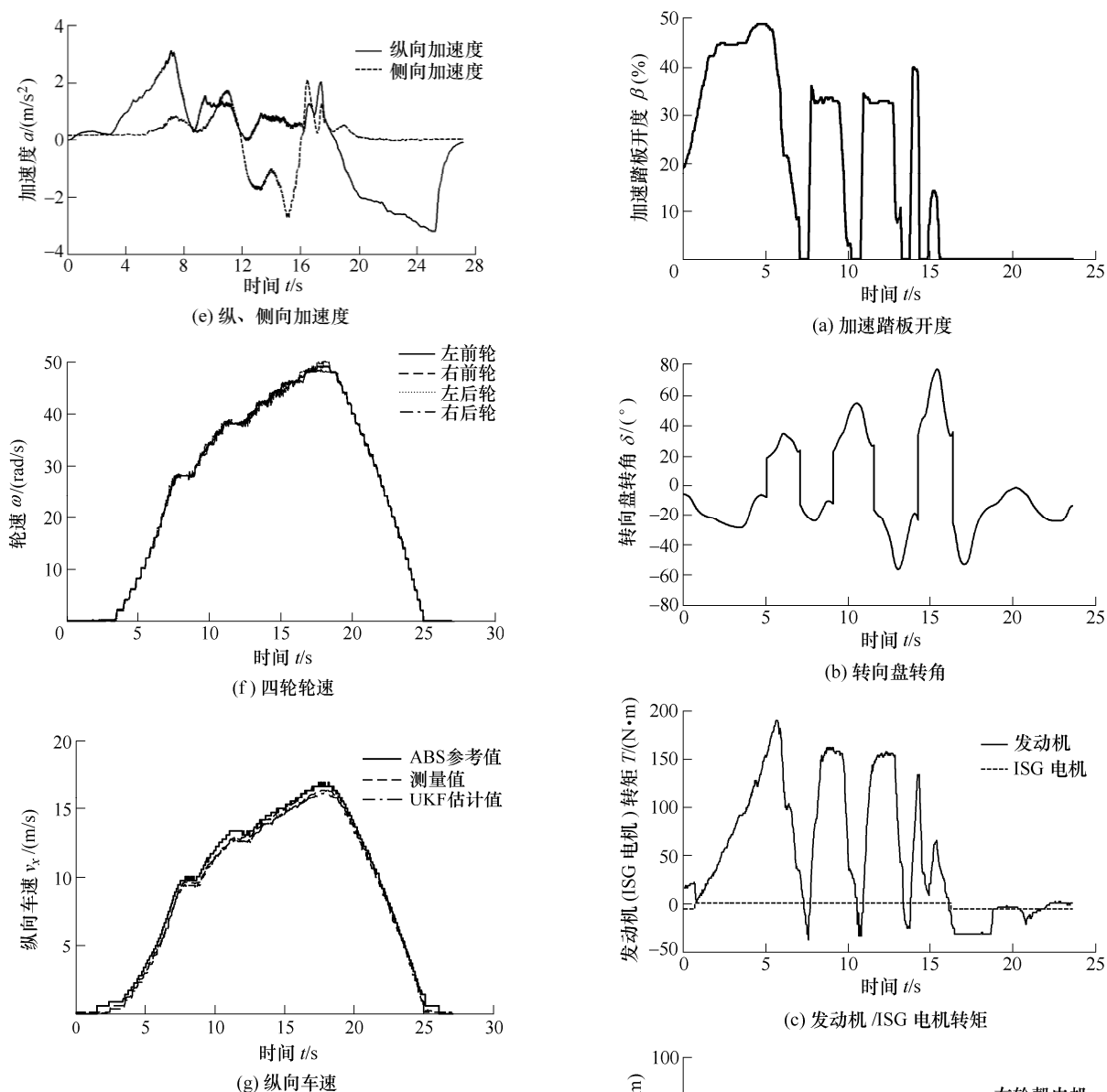


图 13 双移线试验结果

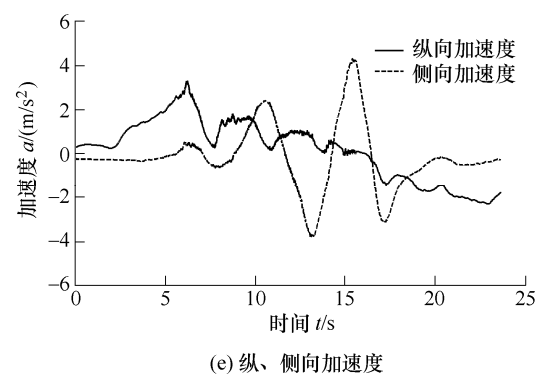
#### 4.2.3 蛇行试验

蛇行试验路径与第 3 节对应的仿真工况相同，受试验道路长度限制，减少了两根标桩，试验场地与双移线相同，如图 14 所示。



图 14 蛇行试验

试验过程中记录的车辆状态和车速估计结果如图 15 所示。



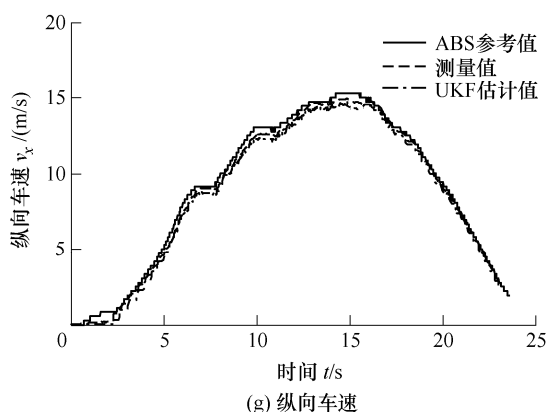
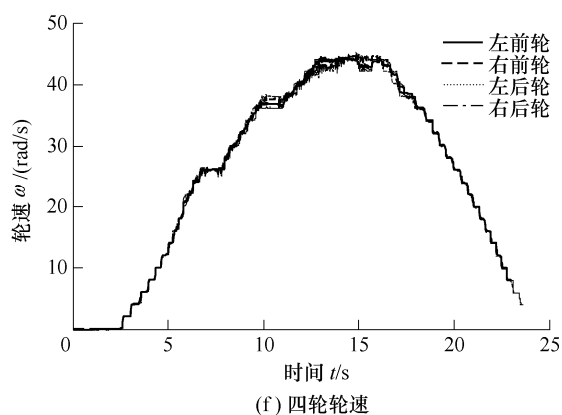


图 15 蛇行试验结果

蛇行试验同样在四轮驱动模式下进行,最高车速 55 km/h 左右。蛇形工况是一种比较恶劣的工况,从试验结果可以看出,随着绕桩数量的增加,横摆角速度逐渐加大,侧向加速度达到了  $4 \text{ m/s}^2$ ,接近车辆的非线性区。相对双移线工况,蛇行下的车速估计误差有所增大,但车速估计效果还是比较令人满意。

## 5 结论

(1) 针对四轮驱动混合动力轿车,考虑到其驱动轮转矩实时可测,基于 7 自由度非线性车辆动力学模型,采用无迹卡尔曼滤波算法,在典型行驶工况下,对其车速进行了观测和估计,通过离线仿真和实车试验进行了验证。结果表明,所设计的 UKF 车速估计算法精度较高。

(2) 搭建了四轮驱动混合动力轿车车速估计离线仿真平台,其集成了动力系统模型、非线性 7 自由度车辆动力学模型和 UniTire 轮胎模型,可用于模拟不同驱动工况的实际车速和探讨不同的车速估计算法。

(3) 构建了车速估计实车试验平台,以典型的 8 字形、双移线和蛇行道路为试验工况,分别在纯电动和四轮驱动模式下对所设计的 UKF 车速估计算

法进行了实车道路试验验证,为后续的深入研究奠定了良好的基础。

后续将进一步考虑车辆侧倾及悬架作用,建立高精度车辆动力学模型,探讨路面附着系数与车速估计的联合算法,并研究参数自适应车速估计算法。

## 参 考 文 献

- [1] 余卓平,高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 20-33.  
YU Zhuoping, GAO Xiaojie. Review of vehicle state estimation problem under driving situation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33.
- [2] 郭洪艳,陈虹,赵海艳,等. 汽车行驶状态参数估计研究进展与展望[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(6): 661-672.  
GUO Hongyan, CHEN Hong, ZHAO Haiyan, et al. State and parameter estimation for running vehicle: Recent developments and perspective[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(6): 661-672.
- [3] 王仁广,刘昭度,齐志权,等. 基于自适应卡尔曼滤波算法确定汽车参考车速[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 9-11.  
WANG Renguang, LIU Zhaodu, QI Zhiqian, et al. Vehicle reference speed determination using adaptive kalman filter algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 9-11.
- [4] 丁能根,李丹华,余贵珍. 基于卡尔曼滤波和 ABS 控制输入的车速估计[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(1): 67-71.  
DING Nenggen, LI Danhua, YU Guizhen. Estimation of vehicle speed based on Kalman filter and ABS control inputs[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(1): 67-71.
- [5] KOBAYASHI K, CHEOK K C, WATANABE K. Estimation of absolute vehicle speed using fuzzy logic rule-based Kalman filter[C]//American Automatic Control Council, International Federation of Automatic Control. Proceedings of the 1995 American Control Conference Volume: 5, June 21-23, 1995, Seattle, Washington. Evanston, IL, USA: AACC, 1995: 3086-3090.
- [6] 宗长富,潘钊,胡丹,等. 基于扩展卡尔曼滤波的信息融合技术在车辆状态估计中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 272-277.  
ZONG Changfu, PAN Zhao, HU Dan, et al. Information fusion algorithm for vehicle state estimation based on extended Kalman filtering[J]. Journal of Mechanical

- Engineering, 2009, 45(10): 272-277.
- [7] 宗长富, 胡丹, 杨肖, 等. 基于扩展 Kalman 滤波的汽车行驶状态估计[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(1): 7-11. ZONG Changfu, HU Dan, YANG Xiao, et al. Vehicle driving state estimation based on extended Kalman filter [J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(1): 7-11.
- [8] JULIER S J, UHLMANN J K. A new approach for filtering nonlinear systems[C]//Proceedings of the 1995 American Control Conference, June 21-23, 1995, Seattle, WA, USA. Evanston, IL: American Automatic Control Council (AACC), 1995, 3: 1628-1632.
- [9] 程水英. 无味变换与无味卡尔曼滤波[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(24): 25-35. CHENG Shuiying. Unscented transformation and unscented Kalman filtering[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(24): 25-35.
- [10] 潘泉, 杨峰, 叶亮, 等. 一类非线性滤波器—UKF 综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 481-489. PAN Quan, YANG Feng, YE Liang, et al. Survey of a kind of nonlinear filters-UKF[J]. Control and Decision, 2005, 20(5): 481-489.
- [11] 李恒, 张静远, 罗轩, 等. 无味卡尔曼滤波算法形式及性能研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(3): 189-196. LI Heng, ZHANG Jingyuan, LUO Xuan, et al. The study on form and performance of unscented Kalman filtering algorithm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(3): 189-196.
- [12] ANTONOVA S, FEHNB A, KUGIC A. Unscented Kalman filter for vehicle state estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(9): 1496-1520.
- [13] 褚文博, 李深, 江青云, 等. 基于多信息融合的全轮独立电驱车辆车速估计[J]. 汽车工程, 2011, 33(11): 962-966. CHU Wenbo, LI Shen, JIANG Qingyun, et al. Speed estimation for all-wheel drive vehicles based on multi-information fusion[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(11): 962-966.
- [14] ZONG Xinyi, DENG Weiwen. Study on velocity estimation for four-wheel independent drive electric vehicle by UKF[C]//Proceedings of 5th Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, January 16-17, 2013, Hong Kong, China. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2013: 1111-1114.
- [15] 赵治国, 顾君, 余卓平. 四轮驱动混合动力轿车驱动防滑控制研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(14): 83-98. ZHAO Zhiguo, GU Jun, YU Zhuoping. Study of acceleration slip regulation strategy for four wheel drive hybrid electric car[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14): 83-98.
- [16] 郭孔辉, 袁忠诚, 卢荡. UniTire 轮胎稳态模型的联合工况预测能力研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(6): 565-568. GUO Konghui, YUAN Zhongcheng, LU Dang. A study on the prediction capability of UniTire model for combined slips mode[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(6): 565-568.
- [17] 郭孔辉, 金凌鸽, 卢荡. 统一轮胎模型在车辆动力学仿真中的应用[J]. 吉林大学学报, 2009, 39(2): 241-245. GUO Konghui, JIN Lingge, LU Dang. Application of UniTire in vehicle dynamics simulation[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(2): 241-245.
- [18] British Standards Institution. ISO 3888-1-1999 Passenger car test track for a severe lane-change manoeuvre-Part1 double-lane change[S]. London: BSI, 1999.

作者简介: 赵治国(通信作者), 男, 1971 年出生, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学控制、混合动力汽车系统集成控制及新型传动系统控制, 发表论文 80 余篇。

E-mail: zhiguo.zhao@tongji.edu.cn