

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.07.027

# 无迹卡尔曼滤波观测下轮毂电机电动车 横摆稳定性控制

孟祥明<sup>1</sup>, 周志刚<sup>\*1,2</sup>, 杨文豪<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学 车辆与交通工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 宁波圣龙有限公司, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 针对轮毂电机驱动电动汽车在不同附着系数的路面行驶容易导致横摆稳定性下降的问题, 设计了轮毂电机驱动电动汽车横向稳定性控制系统, 并提出了基于无迹卡尔曼滤波状态观测的制动力矩分配控制策略。首先, 基于无迹卡尔曼滤波算法搭建了无迹卡尔曼滤波观测器, 通过无迹变换确定采样点, 以提高在非线性状态下均值以及协方差的计算精度, 并简化计算, 实现快速准确地识别和采集轮胎与路面间的附着系数参数, 进而提高控制系统的响应速度和响应精度; 其次, 提出了控制策略采用分层控制结构, 上层将车辆的横摆角速度和质心侧偏角作为控制目标, 通过搭建的模糊神经网络控制器, 用来计算汽车稳定行驶所需要的期望横摆力矩。下层则结合观测到的路面附着系数制定差动制动逻辑控制规则, 并提出了单轮/单侧差动制动控制策略, 控制各驱动电机将驱动力矩进行合理分配。最后, 利用 Simulink 和 Carsim 软件搭建联合仿真平台进行了仿真实验。结果表明: 在高、低附着系数情况下, 横摆稳定性控制策略能够实现汽车横摆角速度和质心侧偏角对理想值的精确跟随, 汽车横摆角速度和质心侧偏角的控制效果分别提高了 28% 和 27%, 使车辆具有较好的路径跟踪能力, 提高了轮毂电机驱动电动车的横摆稳定性以及主动安全性。

**关键词:** 汽车工程; 电动汽车; 状态观测; 稳定性控制; 轮毂电机; 路面附着系数

中图分类号: U270.1+1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 07-0207-09

## Controlling Yaw Stability of Hub Motor Electric Vehicle Based on Unscented Kalman Filtering

MENG Xiang-ming<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-gang<sup>\*1,2</sup>, YANG Wen-hao<sup>1</sup>

(1. School of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;

2. Ningbo Shenglong Co., Ltd., Ningbo Zhejiang 315100, China)

**Abstract:** In view of the problem of reduced yaw stability caused by electric vehicles driven by in-wheel motor driving on roads with different adhesion coefficients, a lateral stability control system for in-wheel motor driven electric vehicles is designed, and a braking torque distribution control strategy based on unscented Kalman filtering state observation is proposed. First, an unscented Kalman filtering observer based on the unscented Kalman filter algorithm is built. The sampling points are determined through unscented transformation to improve the calculation accuracy of mean and covariance in nonlinear states, simplify the calculation, and achieve fast and accurate identification and collection of adhesion coefficient parameters between tires and the road surface, thereby improving the response speed and accuracy of the control system. Second, a hierarchical control structure for the control strategy is proposed. The upper layer takes the

收稿日期: 2021-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51805149); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2017GGJS063)

作者简介: 孟祥明 (1997-), 男, 河南濮阳人, 硕士. (MENG18300675634@163.com)

\* 通讯作者: 周志刚 (1978-), 男, 河南浚池人, 博士, 副教授. (zhigangzhou@haust.edu.cn)

vehicle's yaw rate and centroid sideslip angle as the control objectives. The expected yaw torque required for stable driving is calculated by the constructed fuzzy neural network control controller. The lower layer formulates differential braking logic control rules based on the observed road adhesion coefficient, and proposes a single-wheel/single-side differential braking control strategy to control each driving motor and distribute the driving torque reasonably. Finally, a joint simulation platform is built by using Simulink and Carsim softwares for simulation verification. The result shows that with high and low adhesion coefficients, the yaw stability control strategy can achieve accurate tracking of the ideal values of vehicle's yaw rate and centroid sideslip angle, whose control effects are improved by 28% and 27% respectively. This enables the vehicle to have good path tracking ability, thus improved the yaw stability and active safety of in-wheel motor driven electric vehicles.

**Key words:** automobile engineering; electric vehicle; state observation; stability control; in-wheel motor; road adhesion coefficient

## 0 引言

车辆稳定性控制要求汽车行驶在理想轨迹的同时,车辆始终保持稳定行驶的状态。轮毂电机驱动电动汽车具有良好的节能环保优势,其4个车轮的力矩独立可控,并且只需要根据汽车当前行驶的状态来协调电机的转矩,便可将转矩快速和精确地分配至4个车轮上,因此在车辆稳定性控制的研究中具有良好的前景。

车身电子稳定系统(electronic stability program, ESP)是汽车主动安全技术的重要部分之一,其中差动制动是稳定性控制系统的主要组成部分。由于电机的力矩响应速度相较于液压制动系统的响应速度快,所以在轮毂电机驱动电动汽车中,电机差动制动能够极大地提高汽车的稳定性控制效果。车辆在低附着路面上加速或者转向行驶时,车轮与路面之间的附着状态容易产生失稳,致使附着力不足并导致汽车产生侧滑等失稳现象,易发生交通事故。文献[1]考虑驱动力与附着力传递特性,提出了附着状态的识别方法以及主动降低力矩的控制策略;文献[2]考虑制动能量回收和路面附着系数,并制定了差动制动的控制策略,既提高了经济性又提高了制动稳定性;文献[3]将差速制动控制与主动悬架控制相结合,优化差动制动,使汽车产生不足转向的特征,提高了汽车的防侧翻能力;文献[4]利用相平面判定汽车稳定性,设计了主动差动制动的控制策略,有效提高车辆非线性稳定性;文献[5]建立了单轮制动和单侧车轮制动两种制动车轮控制策略,但没有表现两种控制策略的具体切换逻辑。由于质心侧偏角和路面附着系数的观测成本较高,通常根据汽车模型,将易测得的状态量作为观测变

量对其进行估算,方法有常用变结构控制观测法、模糊逻辑观测法以及卡尔曼滤波观测法等<sup>[6-9]</sup>。但是由于变结构控制观测法易产生抖振,模糊逻辑观测法需要大量的专家经验,所以目前大多采用卡尔曼滤波估计法,其中扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filtering, EKF)被广泛使用<sup>[10-11]</sup>。但是由于EKF通过泰勒展开,把非线性的系统近似线性化,引入了截断误差,导致估计精度较低或者最终估算结果发散。针对EKF的不足,Julier等<sup>[12]</sup>提出了无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filtering, UKF)观测算法,提高了观测精度。并且UKF中使用确定性采样的方法估计变量,在非线性的系统中观测效果优于EKF<sup>[13-14]</sup>。

本研究采用UKF算法设计状态观测器,对车辆的质心侧偏角和路面附着系数等状态参数进行估计。为控制轮毂电机电动车行驶过程中质心侧偏角和横摆角速度的大小,实现车辆稳定行驶,设计了基于不同路面附着系数工况下的车辆力矩分配控制策略,通过仿真分析,验证控制策略对轮毂电机电动车行驶稳定性的有效性。

## 1 车辆动力学模型

本研究中轮毂电机电动车的车辆模型为前轮转向并且4轮均为轮毂电机驱动。

### 1.1 整车模型

汽车在路况良好道路行驶时,车辆悬架对横向稳定性的作用不明显,所以忽略汽车的俯仰、垂向以及侧倾的运动,分析轮毂电机电动车的纵向、侧向与横摆方向的运动,以及4个车轮的转动,并设定汽车前后轮轮距相等,搭建了七自由度车辆动力学模型,如图1所示。

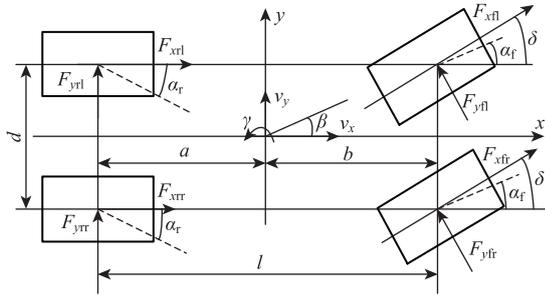


图 1 车辆动力模型

Fig. 1 Vehicle kinetic model

整车纵向、横向和横摆运动方程如式 (1) ~ (3) 所示:

纵向运动:

$$m(\dot{v}_x - v_y \gamma) = (F_{xfl} + F_{yfl}) \cos \delta - (F_{yfl} + F_{yfr}) \cdot \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr}; \quad (1)$$

横向运动:

$$m(\dot{v}_y + v_x \gamma) = (F_{xfl} + F_{yfr}) \cos \delta - (F_{yfl} + F_{yfr}) \cdot \sin \delta + F_{xrl} + F_{xrr}; \quad (2)$$

横摆运动:

$$I_z \dot{\gamma} = (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta + a(F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta + \frac{d}{2}(F_{yfl} - F_{yfr}) \sin \delta + \frac{d}{2}(F_{xfr} - F_{xfl}) \cos \delta - b(F_{yrl} + F_{yrr}) - \frac{d}{2}(F_{xrr} - F_{xrl}). \quad (3)$$

4 个车轮的旋转运动, 如式 (4) 所示:

$$J \dot{\omega}_{ij} = T_{dij} - T_{bij} - F_{xij} R, \quad (4)$$

式中,  $F_{xij}$  为各个车轮的纵向力;  $F_{yij}$  为各个车轮的侧向力;  $v_y, v_x$  为轮毂电机电动车质心横向和纵向速度;  $\dot{v}_x$  为纵向加速度;  $\dot{v}_y$  为侧向加速度;  $R$  为车轮的滚动半径;  $d$  为前轴与后轴的距离;  $\delta$  为轮毂电机电动车的前轮转向角;  $a, b$  为质心到前后轴的距离;  $J$  为车轮滚动惯量;  $\gamma$  为轮毂电机电动车的横摆角速度;  $\dot{\gamma}$  为横摆加速度;  $I_z$  为车辆绕  $z$  轴的转动惯量;  $\omega_{ij}$  为车轮角速度 ( $i=f, r$ , 为前后轮,  $j=l, r$ , 为左右轮);  $T_{dij}, T_{bij}$  分别为车轮的驱动转矩和制动转矩。

### 1.2 轮胎模型

轮胎模型中广泛使用的是基于半经验公式的 Pacejka 模型和 Duogff 模型<sup>[15]</sup>, 由于 Pacejka 公式的参数太多, 为了提高计算的效率, 本研究使用参数较少的 Duogff 轮胎模型计算车辆纵向力和横向力。

其中单个车轮的纵向轮胎力  $F_x$  以及横向轮胎力  $F_y$  分别如式 (5)~(7) 所示:

$$\begin{cases} F_x = \mu F_z C_x \frac{\lambda}{1 - \lambda} f(L) \\ F_y = \mu F_z C_y \frac{\tan \alpha}{1 - \lambda} f(L) \end{cases}, \quad (5)$$

$$f(L) = \begin{cases} L(2 - L), & L < 1 \\ 1, & L \geq 1 \end{cases}, \quad (6)$$

$$L = \frac{(1 - \lambda)(1 - \varepsilon v_x \sqrt{C_x^2 \lambda^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha})}{2\sqrt{C_x^2 \lambda^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha}}, \quad (7)$$

式中,  $F_z$  为轮毂电机电动车的轮胎垂直载荷;  $\mu$  为路面附着系数;  $\lambda$  为轮胎滑移率;  $C_x, C_y$  为轮胎纵向和侧向刚度;  $\varepsilon$  为轮毂电机电动车的车速影响系数;  $\alpha$  为轮毂电机电动车侧偏角。

4 个车轮的垂直载荷如式 (8) 所示:

$$\begin{cases} F_{zfl, zfr} = \left( \frac{1}{2} mg \pm m \frac{a_y h}{d} \right) \frac{a}{l} - \frac{1}{2} m a_x \frac{h}{l} \\ F_{zrl, zrr} = \left( \frac{1}{2} mg \pm m \frac{a_y h}{d} \right) \frac{b}{l} - \frac{1}{2} m a_x \frac{h}{l} \end{cases}, \quad (8)$$

式中,  $m$  为整车质量;  $g$  为重力加速度;  $h$  为汽车质心高度;  $l$  为前后轴的间距,  $l=a+b$ 。

### 1.3 车辆稳定性控制参考模型

本研究参考模型是在线性二自由的基础上考虑纵向运动, 使参考模型具有纵向、横向以及横摆 3 个自由度。根据牛顿力学定律得到  $x, y, z$  这 3 个方向的线性方程如式 (9) 所示:

$$\begin{cases} \dot{v}_y = -v_x \gamma + \frac{aC_x - bC_y}{mv_x} \gamma + \frac{(C_x + C_y)v_x}{mv_x} - \frac{C_x}{m} \delta, \\ \dot{v}_x = v_y \gamma + a_x, \\ \dot{\gamma} = \frac{a^2 C_x + b^2 C_y}{I_z v_x} \gamma + \frac{aC_x - bC_y}{I_z} \beta - \frac{aC_x}{I_z} \delta, \\ \beta = \arctan\left(\frac{v_x}{v_y}\right), \\ a\dot{y} = \frac{aC_x - bC_y}{mv_x} \gamma + \frac{C_x + C_y}{m} \beta - \frac{C_x}{m} \delta, \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $a_x$  为纵向加速度;  $a_y$  为侧向加速度;  $\beta$  为轮毂电机电动车的质心侧偏角。

### 1.4 电机模型

由于本研究主要考虑的是轮毂电机电动汽车的行驶稳定性, 对轮毂电机的性能和模型无过多要求, 故采用直接控制转矩的方法建模, 轮毂电机的输入与输出力矩的关系  $G(s)$  可以用传递函数表达<sup>[16]</sup> 如式 (10) 所示:

$$G(s) = \frac{T_m}{T_d} = \frac{1}{1 + 2\xi s + 2\xi^2 s^2}, \quad (10)$$

式中,  $T_m$  为轮毂电机实际输出转矩;  $T_d$  为轮毂电机理想转矩;  $\xi$  为轮毂电机特性常数。

## 2 UKF 滤波观测器设计

UKF 是一种新型非线性滤波算法, 采用 Kalman 线性滤波框架。同时 UKF 使用无迹变换 (Unscented Transform, UT) 确定采样点, 以提高在非线性状态下均值以及协方差的精度, 更好地表示概率密度, 并简化计算。

非线性系统的状态空间方程可由如式 (11) 所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = f[\mathbf{x}(k)] + w(k) \\ \mathbf{z}(k) = h[\mathbf{x}(k)] + v(k) \end{cases}, \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{z}(k)$  为输出矢量;  $\mathbf{x}(k+1)$  为下一时刻的状态矢量;  $w(k)$ ,  $v(k)$  分别为过程噪声和测量噪声。

无迹变换得到 Sigma 样本点  $\mathbf{x}_i$ :

$$\mathbf{X}_i = \begin{cases} \bar{\mathbf{X}} & i = 0 \\ \bar{\mathbf{X}} + (\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_x})_i & i = 1, 2, \dots, n \\ \bar{\mathbf{X}} - (\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_x})_i & i = n+1, n+2, \dots, 2n \end{cases}. \quad (12)$$

Sigma 点的权值  $\mathbf{W}_i^{(m)}$  为

$$\mathbf{W}_i^{(m)} = \begin{cases} \frac{\lambda}{n+\lambda} & i = 0 \\ \frac{1}{2(n+\lambda)} & i = 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $n$  为状态矢量维数;  $\mathbf{P}_x$  为对应的斜方差矩阵;  $\bar{\mathbf{X}}$  为预测值。

对前一时刻的状态估计设为  $\bar{\mathbf{X}}(k-1)$ , 方差阵设为  $\mathbf{P}_x(k-1)$ 。针对非线性离散系统, UKF 进行滤波的过程如下:

(1) 初始值

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}(0) = E[\mathbf{x}(0)] \\ \mathbf{P}(0) = E\{[\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0)][\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0)]^T\} \end{cases}. \quad (14)$$

(2) 时间更新

如果时间  $k > 1$ ,

$$\begin{aligned} & \mathbf{X}(k-1) = \\ & \left\{ \begin{aligned} & \hat{\mathbf{x}}(k-1), \hat{\mathbf{x}}(k-1) + (\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_x(k-1)})_i, \\ & \hat{\mathbf{x}}(k-1) - (\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_x(k-1)})_i, \end{aligned} \right\}. \quad (15) \end{aligned}$$

样本点  $\mathbf{x}_i$  如式 (16) 所示:

$$\mathbf{X}_i^-(k) = f[\mathbf{X}_i^-(k-1)], \quad i = 0, 1, \dots, 2n. \quad (16)$$

计算  $\mathbf{X}_i^-$  的均值和方差:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}^-(k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(m)} \mathbf{X}_i^-(k), \\ \mathbf{P}_x^-(k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(m)} [\mathbf{X}_i^-(k) - \hat{\mathbf{x}}^-(k)] \cdot \\ \quad [\mathbf{X}_i^-(k) - \hat{\mathbf{x}}^-(k)]^T + \mathbf{Q}(k). \end{cases} \quad (17)$$

(3) 测量更新

更新测量值后得到  $\mathbf{z}(k)$ , 然后更新状态均值与方差, 得到:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(k) = \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{K}[\mathbf{z}(k) - \hat{\mathbf{z}}^-(k)], \\ \mathbf{P}_x(k) = \mathbf{P}_x^-(k) - \mathbf{K}\mathbf{P}_z(k)\mathbf{K}^T, \\ \mathbf{K} = \mathbf{P}_{xz}(k)\mathbf{P}_z^{-1}(k), \\ \hat{\mathbf{z}}^-(k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(m)} h[\mathbf{X}_i^-(k)], \\ \mathbf{P}_z(k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(m)} \{h[\mathbf{X}_i^-(k)] - \hat{\mathbf{z}}^-(k)\} \cdot \\ \quad \{h[\mathbf{X}_i^-(k)] - \hat{\mathbf{z}}^-(k)\}^T + \mathbf{R}(k), \\ \mathbf{P}_{xz}(k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i^{(m)} [\mathbf{X}_i^-(k) - \hat{\mathbf{x}}^-(k)] \cdot \\ \quad \{h[\mathbf{X}_i^-(k)] - \hat{\mathbf{z}}^-(k)\}^T, \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $\mathbf{K}$  为滤波器的增益矩阵;  $\hat{\mathbf{x}}$  为斜方差;  $\hat{\mathbf{z}}$  为观测预测值。

根据以上流程, 进行不断的迭代和更新, 以得到最优的车辆行驶状态和路面附着系数观测值。

### 2.1 UKF 滤波车辆状态观测

本研究将汽车纵向车速、横摆角速度和质心侧偏角设为状态变量, 有  $\mathbf{x} = [v_x, \gamma, \beta]$ ; 将侧向加速度  $a_y$  作为测量变量, 有  $y = a_y$ ; 将前轮转角  $\delta$  和纵向加速度作为输入控制变量, 有  $\mathbf{u} = [\delta, a_x]$ 。将 Simulink 与 Carsim 进行联合仿真, Carsim 仿真车速设置为 80 km/h, 路面附着系数  $\mu = 0.7$ 。故基于 UKF 的质心侧偏角观测器估计结果如图 2 (a)~(b) 所示。UKF 观测器平均估计误差不超过 0.002 rad, 观测结果理想, 满足下一步路面附着系数估计使用条件。

### 2.2 UKF 滤波路面附着系数估计

依据已经建立的七自由度动力学模型, 采用横向加速度  $a_y$  和横摆角速度  $\gamma$  作为量测方程, 以 4 个车轮的路面附着系数作为状态方程, 有  $\mathbf{x} = [\mu_{fl}, \mu_{fr}, \mu_{rl}, \mu_{rr}]$ , 输入量有  $\mathbf{u} = \delta$ , 输出值  $\mathbf{y} = [a_x, a_y, \gamma]$ , 其中  $\mu_{fl}, \mu_{fr}, \mu_{rl}, \mu_{rr}$  分别为车轮的路面附着系数。

其中, 滑移率  $\lambda$  以及轮胎侧偏角  $\alpha$ , 由式 (19) 所示:

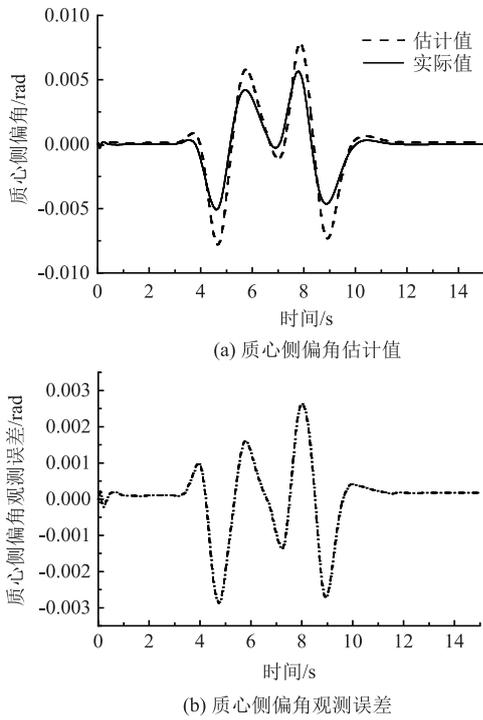


图 2 UKF 质心侧偏角观测结果

Fig. 2 Observation result of centroid sideslip angle by UKF

$$\begin{cases} \lambda_{ij} = \frac{v_{ij} - \omega_{ij}R}{v_{ij}} \\ \alpha_{fl,fr} = \delta - \arctan\left(\frac{v_y + a\gamma}{v_x \pm t_f\gamma/2}\right) \\ \alpha_{rl,rr} = \arctan\left(\frac{-v_y + b\gamma}{v_x \pm t_r\gamma/2}\right) \\ v_{fl,fr} = \sqrt{(v_x \mp t_f\gamma/2)^2 + (v_y + a\gamma)^2} \\ v_{rl,rr} = \sqrt{(v_x \mp t_r\gamma/2)^2 + (v_y - b\gamma)^2} \end{cases}, \quad (19)$$

式中,  $\alpha_{ij}$ ,  $\lambda_{ij}$ ,  $\omega_{ij}$ ,  $v_{ij}$  ( $ij=fl, fr, rl, rr$ ) 分别为 4 个车轮的侧偏角、滑移率、车轮转速以及速度;  $t_f$ ,  $t_r$  分别为前轮轮距和后轮轮距。

基于得到的质心侧偏角估计结果和 Dugoff 轮胎模型, 采用 Simulink 与 Carsim 进行联合仿真, Carsim 车速为 80 km/h, 路面附着系数为 0.8。UKF 估计的路面附着系数结果, 如图 3 (a)。

由图 3 (b) 可知, 本研究使用的 UKF 算法对 4 个车轮的路面附着系数进行估算, 估算结果与实际值的误差均值在 0.07, 估算精度较高, 满足力矩分配控制的使用。

### 3 分层控制策略

#### 3.1 车辆稳定性控制器设计

搭建分层结构以改善汽车的稳定性控制, 上层

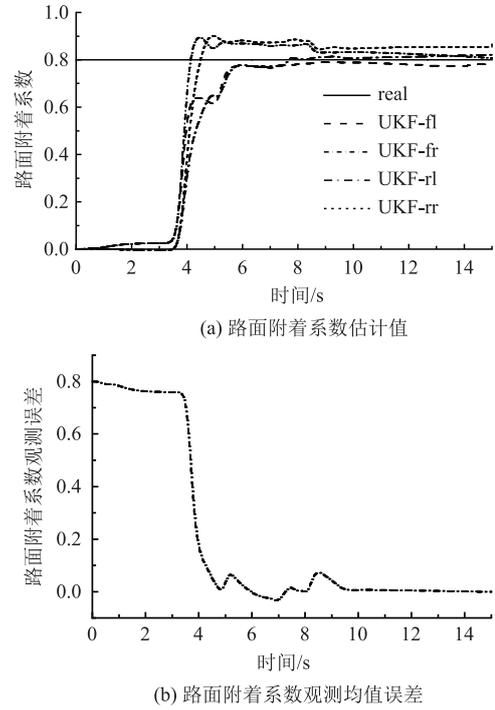


图 3 UKF 路面附着系数观测结果

Fig. 3 Observation result of pavement adhesion coefficient by UKF

为运动跟踪层, 用来确定控制变量的实际值与理想值之间的误差, 并使用模糊神经网络 (Fuzzy Neural Network, FNN) 控制算法设计了上层控制器, 计算为使车辆保持稳定行驶所需要的期望横摆力矩。FNN 控制器, 通过控制汽车质心侧偏角  $\beta$  和横摆角速度  $\gamma$ , 使其能够更好地跟随驾驶员的需求, 跟随理想的目标值。下层控制为力矩分配层, 根据 UKF 观测出来的路面附着系数, 将上层控制器决策出来的期望横摆力矩采用电机差动制动的方法, 分配到 4 个车轮上。车辆稳定性控制器结构如图 4 所示。

#### 3.1.1 模糊神经网络控制器设计

运动跟踪层由模糊神经网络方法计算汽车横摆力矩, FNN 网络结构图分为 5 层, 如图 5 所示, 具体的结构划分如下:

第 1 层: 输入层, 有两个输入量  $x_1, x_2$ , 为简化往后的计算, 分别把输入值横摆角速度和质心侧偏角的实际值和理论值的偏差  $\Delta\gamma, \Delta\beta$  利用双曲正切函数将其控制在  $[-1, 1]$  内。

$$x_1 = \frac{1 - e^{-\Delta\gamma \cdot \rho_1}}{1 + e^{-\Delta\gamma \cdot \rho_1}}, \quad (20)$$

$$x_2 = \frac{1 - e^{-\Delta\beta \cdot \rho_2}}{1 + e^{-\Delta\beta \cdot \rho_2}}, \quad (21)$$

式中  $\rho_1, \rho_2$  为比例因子。

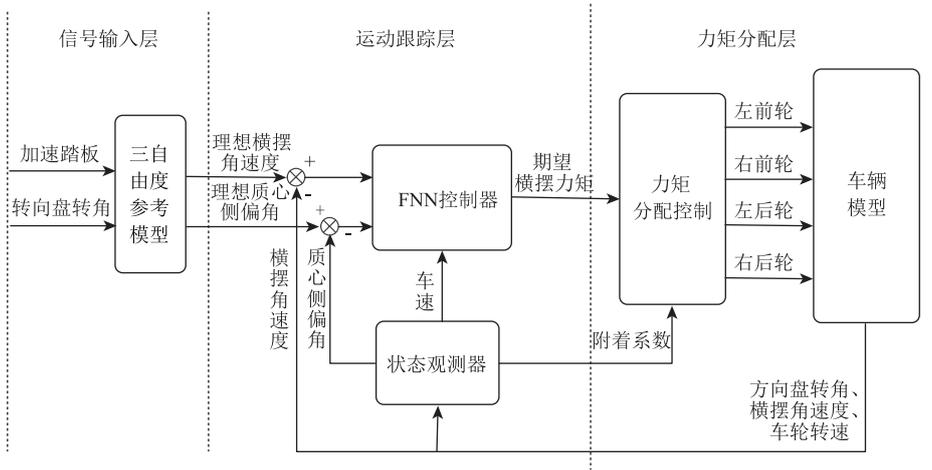


图4 车辆稳定性控制器结构  
Fig. 4 Vehicle stability controller structure

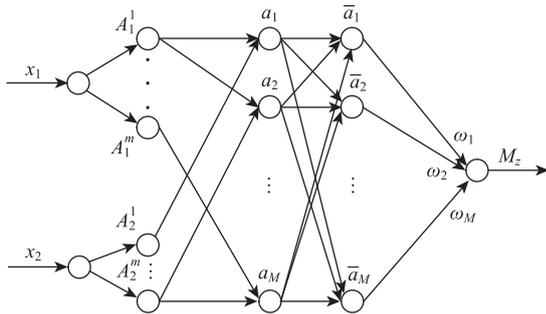


图5 FNN网络结构  
Fig. 5 FNN network structure

第2层：隶属函数层，设置输入量  $\Delta\gamma$ ,  $\Delta\beta$  的模糊集合为  $PB, PS, ZO, NS, NB$ ，并使用  $\text{gaussmf}$  函数作为其隶属函数类型：

$$A_i^j = e^{-\left(\frac{x_i - b_{ij}}{\delta_{ij}}\right)^2}, \quad i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 5. \quad (22)$$

第3层：规则层，模糊规则的数量为  $5 \times 5 = 25$ ，如表1所示，规则层输出的是隶属度，用来计算每一条规则的归一化权重，即

$$a_M = A_1^m \cdot A_2^k, \quad m, k = 1, 2, \dots, 5, \quad M = 1, 2, \dots, 25. \quad (23)$$

第4层：结论层，得到规则的归一化激励强度  $\bar{a}_M$  如式(24)所示：

$$\bar{a}_M = \frac{a_M}{\sum_{n=1}^{25} a_n}. \quad (24)$$

第5层：反模糊化，及模糊判决层，输出清晰的模糊变量，得到横摆力矩  $M_z$  如式(25)所示：

$$M_z = \bar{a}_M \times \omega_M, \quad M = 1, 2, \dots, 25, \quad (25)$$

式中  $\omega_M$  为输出的连接权值。

表1 模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy rule table

$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$				
	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>ZO</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>PB</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>
<i>NS</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>
<i>ZO</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>ZO</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>
<i>PS</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>
<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>

### 3.2 下层制动力矩控制器设计

将上层控制器计算出的期望横摆力矩合理地分配到各个车轮，使汽车能在理想的行驶轨迹下保持稳定行驶，根据电机的制动特性并考虑各制动轮制动效果，制订了高、低附着路面工况时电机差动制动控制策略。

#### 3.2.1 电机差动制动控制策略设计

根据文献[17]对汽车单轮和单侧制动的效果分析及前面UKF算法估算出的路面附着系数，制订了考虑在不同附着系数路面条件下车辆行驶的差动制动控制策略。当处于低附着系数路面工况时，为了得到更快的横摆角响应速度，采用单侧制动控制策略。在高附着系数的路况时，在车辆稳定行驶的前提下，确保乘车人员的舒适性，采用单轮差动制动的控制策略。表2为车辆差动制动控制逻辑，其中  $\Delta\gamma_r$  为实际横摆角速度与理想横摆角速度的差。

在对力矩分配时，设汽车两前轮间距离与两后轮间距离相同，即  $t_r = t_l = t_0$ 。此时车轮的制动力矩为

表 2 车辆差动制动控制逻辑

Tab. 2 Vehicle differential braking control logic

汽车转向	横摆角速度偏差 $\Delta\gamma_r$	转向特性	附着系数	制动轮
左转	$\Delta\gamma_r > 0$	转向过度	高附着	右前轮
			低附着	右前+右后
	$\Delta\gamma_r < 0$	转向不足	高附着	左后轮
			低附着	左前+左后
右转	$\Delta\gamma_r > 0$	转向不足	高附着	右后轮
			低附着	右前+右后
	$\Delta\gamma_r < 0$	转向过度	高附着	左前轮
			低附着	左前+左后

$$T_{bij} = \frac{T_{xd}}{4} - \frac{M_z}{2t_0} R, \quad (26)$$

式中,  $T_{xd}$  为车辆总的纵向力;  $T_{bij}$  为车辆 4 个轮胎的制动力矩。

### 3.2.2 高低附着系数路面判定

根据 ABS 控制的研究可知, 最佳滑移率一般在 15%~20% 之间<sup>[18]</sup>。因此, 可以根据滑移率得到轮胎力的取值, 进一步计算出理想的轮胎摩擦力, 即:

$$F_f = \mu \cdot F_z \cdot \xi, \quad (27)$$

式中,  $F_f$  为期望轮胎摩擦力;  $F_z$  为轮胎垂向载荷;  $\xi$  为标定系数, 由最佳滑移率的取值确定。

同时, 汽车期望纵向制动力  $F_\lambda$  可由横摆角速度偏差  $\Delta\gamma_r$  推算得出, 即:

$$F_\lambda = \frac{2I_z \cdot \Delta\dot{\gamma}_r}{t_0}. \quad (28)$$

根据前面对于  $\mu$  的估计, 对比期望轮胎摩擦力和期望纵向制动力, 当轮毂电机电动车在低附着系数路面上行驶时,  $F_f \leq F_\lambda$ ; 反之, 当  $F_f > F_\lambda$  时, 属于高附着系数路面。

## 4 仿真验证

为确定本研究提出控制策略的效果, 采用 Simulink 与 Carsim 进行联合仿真, 由于轮毂电机驱动电动汽车的动力传输系统与单电机和双电机驱动汽车有所区别, 所以在 Carsim 参数设计中, 将动力传输系统修改为外部模型输入到车轮, 仿真的整车参数如表 3 所示。

### 4.1 低附着系数工况仿真

采用双移线路线轨迹, 并以左转工况为例, 轮毂电机电动车以 60 km/h 的速度行驶、轮胎与路面间的附着系数为 0.4, 方向盘转角如图 6 所示。

表 3 仿真整车参数

Tab. 3 Simulation vehicle parameters

名称	数值	名称	数值
整车质量/kg	1 429	绕 z 轴转动惯量/kg	1 765
汽车质心高度/m	0.67	前后轴间距/m	2.619
前轮间距/m	1.565	轮胎滚动半径/m	0.357
后轮间距/m	1.565	前轮侧偏刚度/kN	-40 000
质心到前轴距离/m	1.05	后轮侧偏刚度/kN	-50 000
质心到后轴距离/m	1.569	重力加速度/( $m \cdot s^{-2}$ )	9.8

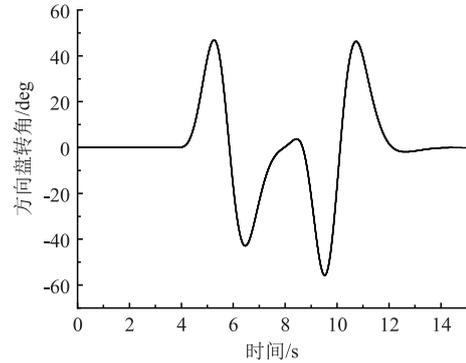


图 6 方向盘转角

Fig. 6 Steering wheel angle

根据 UKF 观测器观测和对路面附着系数判定, 基于  $\mu$  附着系数辨识的控制器控制电机进行双轮制动, 无  $\mu$  辨识的控制器则采用单轮差动制动。图 7 (a)~(b) 分别为低附着系数路面情况下, 汽车横摆角速度  $\gamma$  和质心侧偏角  $\beta$  的响应。图中, 无  $\mu$  辨识下轮毂电机电动车的横摆角速度响应速度和质心侧偏角的响应速度较慢, 并且超调量较大, 对比理想质心侧偏角最大偏差值达到 2.6 rad/s, 导致汽车失稳现象发生, 不利于安全行驶。而考虑  $\mu$  辨识的控制, 汽车横摆角速度和质心侧偏角波动被控制在理想的范围内, 可以较好地跟随理想值, 其质心侧偏角超调量比无  $\mu$  控制减小了 35%, 调节时间加快了 21%, 确保汽车行驶稳定性的同时, 保障了行驶安全。

### 4.2 高附着系数工况仿真

设定工况条件: 轮毂电机电动车的车速为 80 km/h, 路面附着系数为 0.8。

如图 8 (a)~(b) 所示, 在高附着系数路面时, 相比于无  $\mu$  辨识中双轮差动制动, 质心侧偏角响应幅度最大达到了 1.65 rad/s; 基于  $\mu$  辨识的车辆稳定性控制控制器控制单轮电机施加制动力, 使横摆角速度与理想值的均差不超过 0.3 rad/s, 并且质心侧偏角的超调量比双轮制动减少了 27%, 有更好的循迹能力。

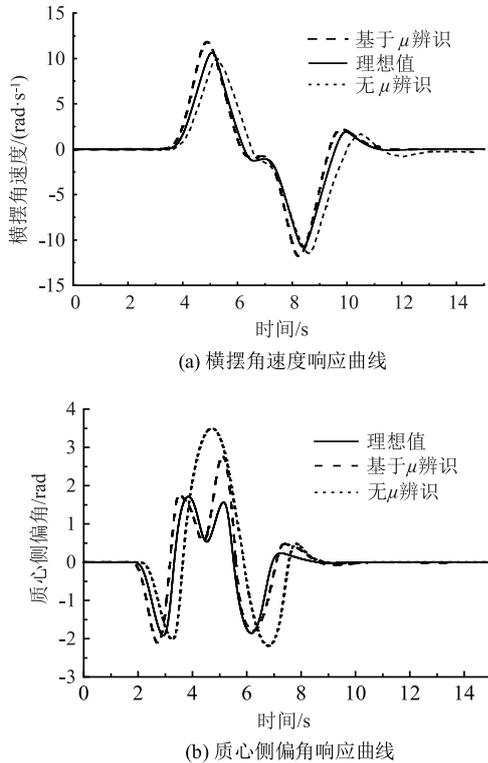


图7 低附着系数工况仿真结果

Fig. 7 Simulation result of low adhesion coefficient conditions

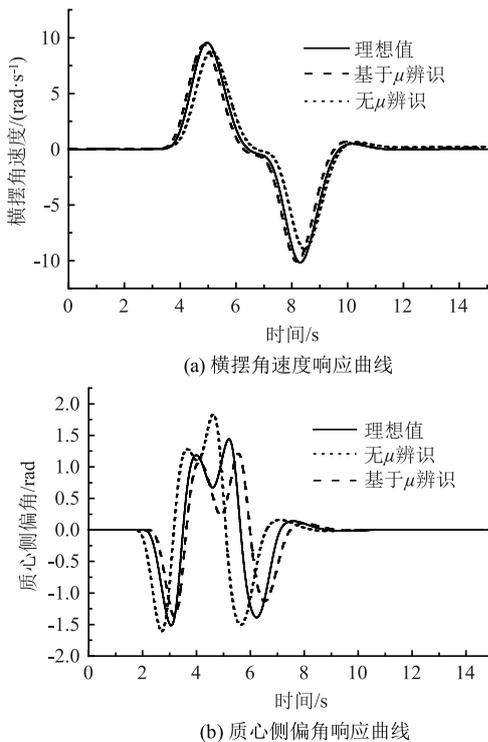


图8 高附着系数工况仿真结果

Fig. 8 Simulation result of high adhesion coefficient conditions

## 5 结论

(1) 建立 UKF 汽车状态与路面附着系数观测器,对汽车的行驶状态和路面信息进行实时观测,并搭建了轮毂电机驱动电动汽车稳定性控制系统。

(2) 控制轮毂电机电动车的横摆角速度和质心侧偏角的大小,根据分层控制结构建立了基于模糊逻辑控制的车辆上层横摆力矩决策系统,计算出汽车稳定行驶所需要的理想横摆力矩。由计算得到的路面附着系数和期望横摆力矩,建立在不同路面附着系数条件下,汽车行驶稳定性和安全性的制动力矩控制策略,通过控制电机的制动力矩,使车辆产生能够稳定行驶的主动横摆力矩。

(3) 通过仿真验证了所建立的轮毂电机驱动电动汽车行驶稳定性控制系统在低附着系数和高附着系数情况下其横摆角速度均能够得到有效控制,尤其质心侧偏角的控制效果分别提高了 28% 和 27%,提升了汽车行驶的稳定性和安全性。但是,通过 UKF 观测器观测得到的汽车行驶状态值依然有一定的误差,后续应对观测器进行优化,得到更加精确的观测值。

### 参考文献:

### References:

- [1] 徐国卿,王玉琴,杨影,等. 复杂动态路面的电动轮附着状态识别与稳定控制策略研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55 (22): 113-122.  
XU Guo-qing, WANG Yu-qin, YANG Ying, et al. Study on Identification of Adhesion State and Stability Control Strategy of Electric Drive Wheel on Complex Dynamic Road [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (22): 113-122.
- [2] PAUL D, VELENIS E, CAO D. Tire Road Friction Estimation Based Braking Force Distribution for AWD Electrified Vehicles with a Single Electric Machine [C] // International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application. Bandung: IEEE, 2016: 82-87.
- [3] YIM S. Design of a Robust Controller for Rollover Prevention with Active Suspension and Differential Braking [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26 (1): 213-222.
- [4] SNN T, LEE E, HE Y. Non-linear Bifurcation Stability Analysis for Articulated Vehicles with Active Trailer Differential Braking Systems [J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2016, 9 (3): 688-698.

- [5] 李海辉. 基于差动制动的客车电子稳定系统控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.  
LI Hai-hui. Research on Control Strategy of Differential-braking-based Bus Electronic Stability System [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [6] LI B Y, DU H P, LI W H, et al. Nonlinear Tyre Model-based Non-singular Terminal Sliding Model Observer for Vehicle Velocity and Slide-slip Angle Estimation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233 (1): 38-54.
- [7] LI L, SONG J, LI H Z. A Variable Structure Adaptive Extended Kalman Filter for Vehicle Slip Angle Estimation [J]. International Journal of Vehicle Design, 2011, 56 (1/2/3/4): 161-185.
- [8] 李刚, 宗长富, 张强, 等. 基于模糊路面识别的4WID电动车驱动防滑控制 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (12): 99-104.  
LI Gang, ZONG Chang-fu, ZHANG Qiang, et al. Acceleration Slip Regulation Control of 4WID Electric Vehicles Based on Fuzzy Road Identification [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 40 (12): 99-104.
- [9] 李刚, 解瑞春, 李宁, 等. 基于卡尔曼滤波的车辆状态与路面附着估计 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2014, 42 (8): 129-135.  
LI Gang, XIE Rui-chun, LI Ling, et al. Estimation of Vehicle State and Road Adhesion Coefficient Based on Kalman Filter [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 42 (8): 129-135.
- [10] ENISZ K, SZALAY I, KOHLRUSZ G, et al. Tyre-road Friction Coefficient Estimation Based on the Discrete-time Extended Kalman Filter [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 299 (9): 1158-1168.
- [11] LIU Y H, LI T, YANG Y Y, et al. Estimation of Tyre-road Friction Coefficient Based on Combined APF-IEKF and Iteration Algorithm [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 25-35.
- [12] JULIER S J, UHLMANN J K. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems [C] // Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Orlando: [s. n.], 1997: 182-193.
- [13] JIN X J, YIN G D. Estimation of Lateral Tire-road Forces and Sideslip Angle for Electric Vehicles Using Interacting Multiple Model Filter Approach [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352 (2): 686-707.
- [14] CHEN J, SONG J, LI L, et al. UKF-based Adaptive Variable Structure Observer for Vehicle Sideslip with Dynamic Correction [J]. IET Control Theory and Applications, 2016, 10 (14): 1641-1652.
- [15] 宋传学, 肖锋, 刘思含, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的轮毂电机驱动车辆状态观测 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2016, 46 (2): 333-339.  
SONG Chuan-xue, XIAO Feng, LIU Si-han, et al. State Estimation of Electric Vehicle with In-wheel Motors Based on UKF [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46 (2): 333-339.
- [16] 葛平淑, 张涛, 赵秀春, 等. 四轮轮毂电机驱动电动汽车建模与联合仿真 [J]. 大连民族大学学报, 2017, 19 (5): 451-455.  
GE Ping-shu, ZHANG Tao, ZHAO Xiu-chun, et al. Modeling and Co-simulation for Four-in-wheel-motor-driven Electric Vehicle [J]. Journal of Dalian Minzu University, 2017, 19 (5): 451-455.
- [17] 肖佩, 龙祥, 胡剑, 等. 考虑路面附着系数的车辆差动制动控制策略 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2018, 37 (11): 133-138.  
XIAO Pei, LONG Xiang, HU Jian, et al. Analysis of Braking Force Compensation Strategy Based on Coefficient of Friction Identification [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37 (11): 133-138.
- [18] 陈炯, 王会议, 宋健. 基于滑移率和减速度的ABS模糊控制仿真研究 [J]. 汽车工程, 2006, 28 (2): 148-151, 180.  
CHEN Jiong, WANG Hui-yi, SONG Jian. A Study on ABS Fuzzy Control Based on Wheel Slip Rate and Deceleration [J]. Automotive Engineering, 2006, 28 (2): 148-151, 180.