DOI: 10.3901/JME.2020.02.121

基于运动学方法和运动几何方法融合的 质心侧偏角估计*

李小雨 许 男 郭孔辉

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130022)

摘要: 针对车辆质心侧偏角难以直接测量的问题, 提出一种基于运动学方法和运动几何方法融合的质心侧偏角估计方法。基于三自由度车辆运动学模型构建一个扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman filter, EKF), 用于质心侧偏角的动态值估计。设计出一种基于车辆运动几何关系的估计方法, 利用质心侧偏角与前后轮侧偏角之间的运动几何关系, 以及 UniTire 轮胎模型实现质心侧偏角稳态值的估计。然后根据两种估计方法的特点, 设计出一种基于质心侧偏角动态特性的数据融合方法, 提高了质心侧偏角估计结果的精度。基于 CarSim 软件的仿真结果表明, 该融合估计方法对传感器信号噪声和误差具有较好的鲁棒性, 能够在各种路面条件和驾驶操作条件下实现对车辆质心侧偏角的准确估计。

关键词: 质心侧偏角估计; 融合估计方法; 运动学方法; 运动几何方法

中图分类号: U461

Vehicle Sideslip Angle Estimation Based on Fusion of Kinematic Method and Kinematic-geometry Method

LI Xiaoyu XU Nan GUO Konghui

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: Considering the vehicle sideslip angle is difficult to measure directly, a fusion estimation method based on kinematic method and kinematic-geometry method is proposed. An extended Kalman filter(EKF) is constructed based on a 3-DoF vehicle kinematics model to estimate the dynamic value of vehicle sideslip angle. And an estimation method based on kinematic-geometry relationship of vehicle is proposed, which utilizes the geometric relationship between vehicle sideslip angle and tire slip angles, as well as UniTire model to estimate the steady-state value of vehicle sideslip angle. Then, according to the applicable domain of the two estimation results, a data fusion method based on the dynamic characteristic of vehicle sideslip angle is designed to improve the accuracy of the final estimation result. The simulation results with CarSim software show that the proposed method is robust to sensor signal noise and errors, and can accurately estimate vehicle sideslip angle under various road conditions and driving maneuvers.

Key words: sideslip angle estimation; fusion estimation method; kinematic method; kinematic-geometry method

0 前言

质心侧偏角是表征车辆稳定状态以及驾驶方向感的主要信息, 是车辆主动安全控制系统如电子稳定程序(Electronic stabilization program, ESP)、自适应巡航系统(Adaptive cruise control, ACC)以及车道保持系统(Lane keeping assist, LKA)的重要输入变量^[1]。实际车辆中质心侧偏角直接测量成本较高,

不适用于量产车, 所以一般通过状态估计的方法获得^[2]。

当前, 已经有很多关于车辆质心侧偏角估计方法的研究, 包括直接积分法^[3]、基于车辆动力学模型的状态观测法^[4-6]、神经网络法^[7-8]、基于 GPS/INS 信息的估计方法^[9-11]、基于视觉信息的估计方法^[12-13]等。由于成本和适用范围等原因, 运动学方法(直接积分法)与基于车辆动力学模型的状态观测法是应用较多的两类方法。运动学方法主要通过车辆运动方程, 如式(1)所示

$$\dot{\beta} = \frac{a_y}{V_x} - \frac{a_x}{V_x} \beta - r \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(61790561, 51875236)和中国汽车产业创新发展联合基金(U1564213, U1664257)资助项目。20181211 收到初稿, 20190522 收到修改稿

通过直接积分或者状态观测方法对质心侧偏角进行估计。其中 a_y 表示侧向加速度; a_x 表示纵向加速度; V_x 表示纵向车速; β 表示质心侧偏角; r 表示横摆角速度。由式(1)可知, 运动学方法主要利用纵向加速度、侧向加速度、纵向车速和横摆角速度等传感器信号, 对车辆参数、路面附着系数以及驾驶操作具有较好的鲁棒性, 在传感器信号准确的情况下, 对处于线性区和非线性区的质心侧偏角都具有较高的估计精度^[4]。但是基于运动学的方法严重依赖于传感器的信号精度, 在没有其他校正方法的情况下很容易出现结果漂移^[14]。因而在实际使用中该方法一般通过添加反馈对结果进行校正^[15], 或者结合其他方法使用。

动力学方法是在车辆动力学模型与轮胎模型的基础上通过现代观测器技术实现质心侧偏角估计的方法。文献[4]介绍了一种变结构扩展卡尔曼滤波器(Variable structure extended Kalman filter, VSEKF)用于克服传感器噪声和误差以及路面摩擦系数不确定的影响; 文献[5]提出了一种混合卡尔曼滤波方法(Hybrid Kalman filter, HKF)用于提高质心侧偏角估计结果的收敛速度; 文献[6]提出了一种非线性质心侧偏角估计方法, 采用受约束的无味卡尔曼滤波器(Constrained unscented Kalman filter, CUKF)用于提高估计结果的鲁棒性。由于动力学方法需要建立精确的车辆模型、轮胎模型以及制动系统模型, 会导致估计算法结构复杂, 同时估计结果也会受到参数不确定性和模型误差的影响。

为了克服单一的质心侧偏角估计方法存在的局限性, 基于多元信息融合质心侧偏角估计方法当前也有较多的研究^[16-20]。文献[16]采用了一种模糊逻辑融合方法对直接积分法与动力学观测器得到的质心侧偏角进行了融合; 文献[17]基于融合的思想, 设计了运动学观测器和动力学观测器, 并设计了相应的融合策略; 文献[18]在运动学方法和动力学方法的基础上添加了 GPS 传感器信息进行融合, 用以提高了质心侧偏角的估计精度。

由当前的研究可知, 融合估计方法多采用运动学与动力学的融合, 主要是因为运动学方法具有较好的动态估计效果, 但是容易受到传感器噪声和误差的影响而发生结果漂移, 因而利用动力学方法对结果进行校正。然而动力学方法虽然引入了力学模型, 但是其估计器的设计仍然是基于微分方程, 模型误差、参数不确定性以及信号误差和噪声同样会对估计结果产生影响, 并且估计器结构往往较为复杂。

针对上述问题, 本文提出了一种结构更加简单、

稳定的融合估计方法, 由一个运动学估计器和一个运动几何估计器组成。运动学估计器采用一个基于车辆运动学方程的扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman filter, EKF)作为观测器, 用于提高质心侧偏角动态估计的准确性。运动几何估计器利用单轨车辆模型中质心侧偏角与前后轴侧偏角之间的运动几何关系以及 UniTire 轮胎模型对质心侧偏角的稳态值进行估计, 由于该方法是基于普通代数方程而非微分方程, 因而相比于动力学方法, 结构更加简单, 对参数不确定性和信号误差具有更好的鲁棒性。然后, 根据上述两种估计器的特点, 设计了一种基于质心侧偏角动态特性强度的融合方法将两种估计器的优点融合到一起, 实现了动态和稳态全工况下的质心侧偏角准确估计。最后, 通过 CarSim 仿真软件对提出的融合估计算法的有效性进行了验证。

1 车辆模型和轮胎模型

1.1 车辆模型

本文采用三自由度单轨车辆模型, 用于描述车辆运动特性。

图 1 为典型的单轨车辆模型结构简图, 图中 l_f 、 l_r 分别为前轴和后轴到质心(c.o.g.)的距离, δ 表示前轮转角。 V 表示质心(c.o.g.)处的速度, V_x 、 V_y 分别表示 V 沿 x 轴和 y 轴的分量。 V_F 、 V_R 分别表示前后轴处速度, β 表示质心侧偏角, r 表示横摆角速度, 前轴侧偏角以及后轴侧偏角分别用 α_f 和 α_r 表示。

图 1 单轨车辆模型

由图 1 可得纵向和侧向的运动方程式(2)、(3)以及前后轴侧偏角与质心侧偏角之间的运动几何关系(式(4)、(5))分别为

$$a_y = \dot{V}_y + V_x r \quad (2)$$

$$a_x = \dot{V}_x - V_y r \quad (3)$$

$$\alpha_f = \beta + \frac{l_f r}{V_x} - \delta \quad (4)$$

$$\alpha_r = \beta - \frac{l_r r}{V_x} \quad (5)$$

1.2 轮胎模型

前后轴垂向载荷分布可表示为

$$F_{zf} = \frac{M_t(g l_r - a_x h_g)}{l_f + l_r} \quad (6)$$

$$F_{zr} = \frac{M_t(g l_f + a_x h_g)}{l_f + l_r} \quad (7)$$

式中, F_{zf} 、 F_{zr} 分别表示前后轴垂向载荷, M_t 为整车质量, g 为重力加速度, h_g 为质心高度。

为了描述轮胎的非线性侧偏特性, 且同时降低模型复杂度, 提高滤波器运算速率, 考虑到车辆极少进入到轮胎特性饱和区后段的下降区, 而且控制系统需要在进入该不稳定区域前发挥作用, 本文采用常摩擦因数 UniTire 轮胎模型设计质心侧偏角估计器, UniTire 轮胎模型是非线性半经验轮胎模型, 在获得轮胎辨识参数后, 能够准确地描述轮胎的非线性侧偏特性。模型描述如下。

轮胎侧向滑移率表示为

$$S_y = -\tan \alpha \quad (8)$$

式中, α 表示轮胎侧偏角。

相对纵向、侧向和综合滑移率 ϕ_x 、 ϕ_y 和 ϕ 的定义如式(9)所示

$$\phi_x = \frac{K_x S_x}{\mu_x F_z} \quad \phi_y = \frac{K_y S_y}{\mu_y F_z} \quad \phi = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} \quad (9)$$

式中, K_x 和 K_y 分别是轮胎的纵滑和侧偏刚度; μ_x 和 μ_y 分别是轮胎与路面间的纵向和侧向摩擦因数, F_z 表示垂向载荷。由于此处不考虑轮胎纵滑特性, 式中 ϕ_x 的值取 0。

然后, UniTire 轮胎模型可以描述为

$$\bar{F} = 1 - \exp \left[-\phi - E\phi^2 - \left(E^2 + \frac{1}{12} \right) \phi^3 \right] \quad (10)$$

$$F_y = \mu_y F_z \sin(\phi_y) \bar{F} \quad (11)$$

式中, E 为曲率因数, 模型中参数的具体表达式可参考文献[21], 此处不再赘述。

本文的研究对象是 CarSim 中的车辆模型, 因而基于 CarSim 中自带的轮胎 CS Touring Tires-215/55 R17 的轮胎数据进行了参数辨识, 从而建立了能够描述该轮胎侧偏特性的 UniTire 轮胎模型。

图 2 为 UniTire 轮胎模型与 CarSim 中轮胎数据的对比。可以看到当侧偏角较小时, 该轮胎模型对 CarSim 轮胎线性区和非线性区的侧偏特性都能够准确描述。当侧偏角大于 10° 时, 由于橡胶动态摩擦特性的影响, 实际轮胎侧向力会随着侧偏角的增大而衰减, 而本文轮胎模型采用常摩擦因数, 输出

的结果保持不变, 既保留了 UniTire 模型对轮胎非线性特性的精确描述, 又简化了模型表达, 便于估计器设计和工程应用。

图 2 CarSim 轮胎数据与 UniTire 轮胎模型侧向力对比

2 质心侧偏角融合估计器设计

图 3 为本文提出的质心侧偏角估计系统结构图。该系统由三个模块组成, 第一个模块为运动学估计器, 采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)作为状态观测器, 得到标记为 $\hat{\beta}_k$ 的估计结果, 主要利用的信息为纵向加速度 a_x 、侧向加速度 a_y 、横摆角速度 r 、纵向车速 V_x 。第二个模块为运动几何估计器, 根据车辆运动时前后轴侧偏角与质心侧偏角之间的几何关系实现对质心侧偏角的估计, 得到标记为 $\hat{\beta}_g$ 的估计结果, 该方法通过 UniTire 轮胎模型建立质心侧偏角与侧向力之间的联系, 然后根据轮胎模型计算的侧向力与 $M_t a_y$ 之差对估计结果进行校正。由于基于运动微分方程的运动学估计方法具有较好的动态估计效果, 但是存在稳态漂移; 而基于运动几何关系的估计方法具有较好的稳态估计效果, 但是难以反映动态特性。因而第三个模块——数据融合模块会分别利用上述两种估计方法的优点, 根据质心侧偏角的动态特性强度对上述两种估计结果进行权重分配, 得到最终的适用于全工况的融合估计结果, 标记为 $\hat{\beta}_f$ 。接下来介绍这三个模块的具体结构。

2.1 运动学估计器设计

本小结介绍基于运动学方程的扩展卡尔曼滤波器(EKF)的实现。根据方程式(2)、(3)及传感器信息, EKF 观测器可以被构造为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{W} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) + \mathbf{V} \end{cases} \quad (12)$$

式中, 状态矢量 $\mathbf{X}$ 与测量矢量 $\mathbf{Y}$ 为

$$\mathbf{X} = (\beta \ V_x)^T \quad \mathbf{Y} = (a_x \ V_x)^T \quad (13)$$

非线性状态方程 $f(\mathbf{X})$ 与测量方程 $h(\mathbf{X})$ 分别为

$$f(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} -\frac{a_x}{V_x} \beta + \frac{a_y}{V_x} - r \\ V_x r \beta + a_x \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$h(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} -V_x r \beta + \dot{V}_x \\ V_x \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{W}$ 为过程噪声矢量, $\mathbf{V}$ 为测量噪声矢量, 这两种噪声被认为是高斯白噪声, 它们的误差协方差分别用 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 表示。

图3 质心侧偏角估计系统结构

应用泰勒展开可以得到方程式(12)的离散化形式如(16)所示

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_{k+1,k} \mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Y}_{k+1} = h_k(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (16)$$

$$\mathbf{A}_{k+1,k} = \mathbf{I} + \frac{\partial f(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}_k} T \quad (17)$$

$$h_k(\mathbf{X}_k) = \begin{pmatrix} -V_{x,k} \beta_k r + \left(\frac{V_{x,k} - V_{x,k-1}}{T} \right) \\ V_{x,k} \end{pmatrix} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, T 是采样时间, 设置为 5 ms, 系统方程的雅可比矩阵 $\mathbf{F}_k$ 、 $\mathbf{H}_k$ 如式(19)、(20)所示

$$\mathbf{F}_k = \frac{\partial f_k(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}} \bigg|_{\mathbf{X}_k} = \begin{pmatrix} -\frac{a_x}{V_{x,k}} & \frac{a_x \beta_k - a_y}{V_{x,k}^2} \\ V_{x,k} r & \beta_k r \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{H}_k = \frac{\partial h_k(\mathbf{X}_k)}{\partial \mathbf{X}} \bigg|_{\mathbf{X}_k} = \begin{pmatrix} -V_{x,k} r & -\beta_k r + \frac{1}{T} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

然后按照图4所示的扩展卡尔曼滤波器工作流程进行状态估计^[22], 不同于传统 EKF 估计器在 k 时刻的初始状态是 $k-1$ 时刻的后验状态值, 此处 k 时刻的初始状态是 $k-1$ 时刻的融合结果 $\hat{\beta}_{F,k-1}$ 。

图4 扩展卡尔曼滤波器(EKF)工作原理

2.2 运动几何估计器设计

对式(4)、(5)进行变形, 可得新的表达式如(21)、

(22)所示

$$\beta_f = \alpha_f - \frac{l_f r}{V_x} + \delta \quad (21)$$

$$\beta_r = \alpha_r + \frac{l_r r}{V_x} \quad (22)$$

式中, β_f 、 β_r 分别为通过前轴侧偏角计算得到的质心侧偏角以及通过后轴侧偏角计算得到的质心侧偏角。通过仿真可知当 α_f 、 α_r 的值准确时, 式(21)、(22)计算得到的质心侧偏角也是准确的。然而实车上的轮胎侧偏角很难通过测量手段直接获得, 因此, 构造了式(23)

$$2\beta_g = \beta_f + \beta_r = \alpha_f + \alpha_r + \frac{(l_r - l_f)r}{V_x} + \delta \quad (23)$$

由于 $\alpha_f = F_{yf}/K_f$, $\alpha_r = F_{yr}/K_r$ (F_{yf} 为前轴侧向力, K_f 为前轴侧偏刚度, F_{yr} 为后轴侧向力, K_r 为后轴侧偏刚度), 可得式(24)

$$\alpha_f + \alpha_r = \frac{F_{yf}}{K_f} + \frac{F_{yr}}{K_r} \quad (24)$$

前、后轴侧偏刚度和侧向力会受到轮胎特性以及载荷等因素的影响, 令 $K_f = c_k K_r$, $F_{yf} = c_y F_{yr}$, 并代入式(24)可得式(25)

$$\alpha_f + \alpha_r = \frac{F_{yr}}{K_r} \left[1 + c_y \left(\frac{1}{c_k} - 1 \right) \right] \quad (25)$$

式中, 侧向合力 $F_y = M_t a_y$, 再将式(25)代入式(23)可得最终的质心侧偏角表达式(26)

$$\beta_g = \frac{1}{2} \left[\frac{M_t a_y}{K_r} \left(1 + c_y \left(\frac{1}{c_k} - 1 \right) \right) + \frac{(l_r - l_f)r}{V_x} + \delta \right] \quad (26)$$

式中, 车辆结构参数 M_t 、 l_f 、 l_r 为已知量, 运动信息 a_y 、 r 、 V_x 、 δ 可通过传感器获得, 参数 c_k 可以通过轮胎试验辨识后设置为常数, 参数 c_y 根据前后轴垂向载荷进行比例分配。后轴侧偏刚度 K_r 受轮胎特性、车辆状态以及路面附着条件的影响, 需要实时调节。

根据上述分析, 设计了如图 5 所示的基于运动几何关系的质心侧偏角估计器结构, 其工作原理为: 首先由式(26)计算得到 $\hat{\beta}_g$, 代入二自由度车辆模型计算得到 $\hat{\alpha}_f$ 、 $\hat{\alpha}_r$, 然后 UniTire 模型根据轮胎侧偏角信息、垂向载荷、路面附着系数计算侧向力 F_{yi} , 并根据 $M_t a_y$ 与 $\sum F_{yi}$ 之间的差值, 通过 PI 调节器对侧偏刚度 K_r 进行调节, 形成一个闭环系统, 实现对质心侧偏角的估计。

2.3 数据融合

根据上述两种估计方法的工作原理可知, 基于

图 5 运动几何估计器结构

运动微分方程的运动学估计方法能够较好地反映质心侧偏角的动态特性, 而基于运动几何关系的估计方法由于需要通过 PI 调节器对 K_r 进行调节, 因此对于质心侧偏角的动态跟随会有一定的滞后, 但该方法由于受信号噪声和误差的影响较小, 因而具有更准确的稳态估计效果。通过图 6 可以看到两种估计方法各自的特点。在质心侧偏角急剧变化的区域①, 运动学方法准确地描述了质心侧偏的动态变化过程, 区域③由于积累误差的影响, 导致运动学估计结果相对参考值出现了偏移, 但是动态特性仍然被较好地呈现。在区域②和区域④, 运动几何估计方法发挥了它的优点, 虽然有一定的估计偏差, 但偏差是静态的, 不会随时间的推移而积累。同时可以看到在零点 p 附近, 运动几何方法估计值与参考值有很好的 consistency, 此外在区域⑤方向盘转角回零时, 运动学方法估计结果出现了漂移, 而运动几何方法的估计结果与参考值重合。上述结果清晰地说明了运动学方法比较适合于质心侧偏角动态特性强的情况, 如①③处。而运动几何方法适用于动态特性弱的情况, 如区域②④⑤, 以及零点 p 附近。

图 6 运动学方法与运动几何方法估计效果对比图,

$V_x=100 \text{ km/h}$, $\mu=0.75$, 梯形转向工况

为了获得最优的质心侧偏角估计结果,提出了一种数据融合方法,基于运动学方法具有较好的动态估计效果以及运动几何方法具有明显的稳态估计优势的特点,该方法以融合估计结果 $\hat{\beta}_F$ 的动态特性强度 ds (主要用于表征质心侧偏角的变化速率)作为融合指标,对权重系数 w 进行分配, $\hat{\beta}_F$ 的动态特性较强时, $w=1$, 此时主要是运动学方法估计结果有效;当 $\hat{\beta}_F$ 处于稳态时, $w=0.05$, 此时主要是运动几何方法估计结果有效;当 $\hat{\beta}_F$ 动态特性较弱时,则两种估计结果分别分配一定的比例。数据融合过程如图 7 所示。

图 7 数据融合流程

第一步是动态特性强度 ds 的获取,首先由传递函数 $\frac{s}{\tau_1 s + 1}$ 获取 $\hat{\beta}_F$ 的动态信息,再通过 $\frac{1}{\tau_2 s + 1}$ 降噪及平滑处理后得到 $\hat{\beta}_F$ 的动态特性强度 ds 。第二步根据 ds 的值进行权重系数分配,输出权重系数 w 。 w 具体的分配过程如图 8 所示,首先对 ds 进行预处理

图 8 权重系数分配逻辑

理(其中 C_s 为缩放系数)和范围约束,得到中间变量 D_s , 然后判断当前的质心侧偏角估计值 $\hat{\beta}_F$ 是否在零点附近,如果不在零点附近,则权重系数 $w=D_s$, 该表达式适用于图 6 中的①②③④处的情况。当 $\hat{\beta}_F$ 满足零点附近条件时,则通过令 $w=2|\hat{\beta}_F|D_s$, 适当的降低 w 的值,以增加运动几何方法估计结果的权重,该表达式适用于图 6 中零点 p 附近以及区域⑤处的情况。

当 $\tau_1=0.5$, $\tau_2=1.5$ 以及 $C_s=85$ 时,融合算法的权重分配效果如图 9 所示,可以看到权重系数 w 准确的反映了质心侧偏角的动态特性变化的过程。

图 9 权重系数分配验证

最后由式(27)计算得到融合后的质心侧偏角估计结果 $\hat{\beta}_F$

$$\hat{\beta}_F = w\hat{\beta}_K + (1-w)\hat{\beta}_g \quad (27)$$

3 仿真分析

本节对质心侧偏角融合估计方法进行了仿真验证,并对仿真结果进行了分析,仿真平台采用 CarSim 车辆模型,车辆参数如表 1 所示。

表 1 车辆仿真参数

参数	值
簧载质量 M_s/kg	1 440
前轴距质心距离 l_f/m	1.016
后轴距质心距离 l_r/m	1.524
轮距 d/m	1.5
质心高度 h/m	0.75
前轴非簧载质量 m_{uf}/kg	80
后轴非簧载质量 m_{ur}/kg	80
前轴侧倾中心高度 h_{rcf}/m	0.65
后轴侧倾中心高度 h_{rcr}/m	0.6

由于 CarSim 是理想车辆模型,输出信号不包含噪声信息,为了更加真实地模拟实车传感器反馈的信号,对源于 CarSim 的估计器输入信号添加适当的噪声,噪声信息如表 2 所示。

表 2 噪声列表

信号	噪声上限	噪声下限	均值误差
纵向加速度 a_x/g	0.01	-0.01	0.003
侧向加速度 a_y/g	0.015	-0.015	0.05
横摆角速度 $r/(\text{rad/s})$	0.001	-0.001	0.000 5
纵向速度 $V_x/(\text{m/s})$	1	-1	0.5

3.1 典型工况仿真

本小结对高附着路面和低附着路面条件下的典型工况进行了仿真验证, 选择了双移线和角阶跃作为仿真工况, 双移线工况能够激发车辆的动态特性, 可以用于验证融合方法的动态估计效果, 角阶跃工况时车辆在瞬态响应后会进入非零稳态, 主要用于验证融合方法的稳态估计效果。

(1) 高附着路面仿真, 路面摩擦因数 $\mu=0.85$, 仿真结果如图 10、11 所示。

图 10 高附着路面双移线工况, $V_x=100 \text{ km/h}$ 图 11 高附着路面角阶跃工况, $V_x=100 \text{ km/h}$

由图 10、11 可知, 高附着条件下, 融合结果 $\hat{\beta}_F$ 具有最佳的估计效果。由于此时轮胎模型对轮胎侧向力的描述比较准确, 运动几何方法得到的 $\hat{\beta}_g$ 也较为准确。运动学方法估计的结果 $\hat{\beta}_k$ 在动态时与 $\hat{\beta}_F$ 效果相同, 但是由于受到信号噪声和误差影响, 在稳态时出现了漂移。

(2) 低附着路面仿真, 路面摩擦因数 $\mu=0.35$,

仿真结果如图 12、13 所示。由图可知, 低附着条件下, 无论是运动学方法得到的结果 $\hat{\beta}_k$, 还是运动几何方法得到的结果 $\hat{\beta}_g$ 都与参考值出现了明显的偏差。信号噪声和误差导致 $\hat{\beta}_k$ 出现了漂移; 轮胎模型在低附着和强侧偏工况下不能准确计算侧向力导致 $\hat{\beta}_g$ 不能反映质心侧偏角的动态趋势。然而融合后的结果 $\hat{\beta}_F$ 对动态区和稳态区的跟随效果都较为准确, 这是因为尽管 $\hat{\beta}_g$ 此时不能准确地描述动态值, 但是在零点附近以及稳态区估计结果是准确的, 由融合逻辑可知, 此时 $\hat{\beta}_g$ 的权重较大, 因此, 对融合结果起到了很好的校正作用。

图 12 低附着路面双移线工况, $V_x=80 \text{ km/h}$ 图 13 低附着路面角阶跃工况, $V_x=70 \text{ km/h}$

3.2 长时间多工况仿真

车辆在实际行驶过程中会遇到各种不同的工况, 为模拟实际道路行驶过程, 设计了一组多工况仿真输入, 分别包括① 双移线工况、② 小转角连续调整工况、③ 持续转弯工况。用于进一步验证该融合估计方法在长时间实际道路行驶过程中的估计效果。分别进行了高附着和低附着路面仿真, 仿真结果如图 14、15 所示。

图14 长时间多工况仿真1, $\mu=0.85$, $V_x=90$ km/h 图15 长时间多工况仿真2, $\mu=0.35$, $V_x=75$ km/h

从图14、15中可以看到运动学方法的估计结果 $\hat{\beta}_k$ 随着时间的增长出现了严重的漂移问题,很明显这是由于传感器噪声和误差造成的。而融合结果 $\hat{\beta}_F$ 始终能够准确的跟随参考值,即使车辆长时间稳态转向时,最大估计误差也不超过 0.2° ,这主要是因为融合方法会在容易发生漂移的零点附近区域以及稳态区对结果进行有效的校正,防止漂移现象的发生,从而保证了估计结果的准确性。

由上述仿真结果可知,本文提出的质心侧偏角融合估计方法,能够结合运动学方法动态估计的优点和运动几何方法稳态估计的优点,实现全工况下的质心侧偏角准确估计,相比于单独的运动学方法或运动几何方法具有更广的适用范围和更准确的估计结果。上述仿真都是在对信号添加了噪声和误差的情况下进行的,更加接近实车环境,由此证明了该融合估计方法能够有效地用于实车的质心侧偏角估计。

4 结论

本文提出了一种基于运动学方法和运动几何方法的质心侧偏角融合估计方法。首先基于车辆运动学方程构建了用于质心侧偏角动态值估计扩展卡尔

曼滤波器(EKF);然后基于车辆质心侧偏角与前后轮侧偏角之间的运动几何关系构建了用于质心侧偏角稳态值估计的运动几何估计器;最后根据两种估计器的适用范围设计了融合器对估计结果进行融合。仿真结果表明融合估计方法具有较好的质心侧偏角估计效果,并且主要有如下特点。

(1) 具有较高的估计精度,能够实现各种路面附着条件下的全工况的质心侧偏角准确估计。

(2) 对传感器信号噪声和误差具有较好的鲁棒性,估计结果不会随时间出现稳态漂移。

(3) 估计器结构简单,不需要复杂的车辆模型,有利于提高算法的实时性。

参考文献

- [1] GUSTAFSSON F. Automotive safety systems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(4): 32-47.
- [2] JOANNY S, ALI C, DOMINIQUE M. Evaluation of sliding mode observer for vehicle sideslip angle[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2005, 38(1): 150-155.
- [3] FUKADA, YOSHIKI. Slip-angle estimation for vehicle stability control[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 32(4-5): 375-388.
- [4] LI Liang, JIA Gang, RAN Xu, et al. A variable structure extended Kalman filter for vehicle sideslip angle

- estimation on a low friction road[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(2): 280-308.
- [5] LI Jing, ZHANG Jiaxu. Vehicle sideslip angle estimation based on hybrid Kalman filter[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, doi: 10.1155/2016/3269142.
- [6] STRANO S, TERZO M. Constrained nonlinear filter for vehicle sideslip angle estimation with no a priori knowledge of tyre characteristics[J]. *Control Engineering Practice*, 2018, 71: 10-17.
- [7] HIDEAKI S, TAKATOSHI N. A side-slip angle estimation using neural network for a wheeled vehicle[C]// *SAE 2000 World Congress*, March 6-9, 2000, Detroit, Michigan.
- [8] MIAO Penghu, LIU Guohai. Sideslip angle soft-sensor based on neural network left inversion for multi-wheel independently driven electric vehicles[C]// *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, July 6-11, 2014, Beijing, China.
- [9] DAI Yifan, LUO Yugong, CHU Wenbo, et al. Vehicle state estimation based on the integration of low-cost GPS and INS[C]// *Proceedings of the International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration*, July, 2012, Changchun, China.
- [10] BEVLY D, RYU J, GERDES J. Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll, and tire cornering stiffness[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(4): 483-493.
- [11] NGUYEN B, WANG Yafei, OH S, et al. GPS based estimation of vehicle sideslip angle using multi-rate Kalman filter with prediction of course angle measurement residual[C]// *Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 597-609.
- [12] HSU J, TOMIZUKA M. Analyses of vision-based lateral control for automated highway system[J]. *Vehicle system dynamics*, 1998, 30(5): 345-373.
- [13] WANG Yafei, NGUYEN B, FUJIMOTO H, et al. Vision based multi-rate estimation and control of body slip angle for electric vehicles[C]// *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2012: 4278-4283.
- [14] Klier W, REIM A, STAPEL D. Robust estimation of vehicle sideslip angle-an approach w/o vehicle and tire models[R]. *SAE Technical Paper*, 2008.
- [15] ZHAO Linhui, LIU Zhiyuan, CHEN Hong. Design of a nonlinear observer for vehicle velocity estimation and experiments[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 19(3): 664-672.
- [16] CHELI F, SABBIONI E, PESCE M, et al. A methodology for vehicle sideslip angle identification: comparison with experimental data[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(6): 549-563.
- [17] CHEN Te, CHEN Long, XU Xing, et al. Reliable sideslip angle estimation of four-wheel independent drive electric vehicle by information iteration and fusion[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, doi: 10.1155/2018/9075372.
- [18] LI Xu, CHAN Chingyao, WANG Yu. A reliable fusion methodology for simultaneous estimation of vehicle sideslip and yaw angles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 65(6): 4440-4458.
- [19] 高博麟, 谢书港, 龚进峰. 基于运动学—动力学方法融合的汽车质心侧偏角估计[J]. *汽车安全与节能学报*, 2015, 6(1): 72-78.
- GAO Bolin, XIE Shugang, GONG Jinfeng. Vehicle sideslip angle estimation based on fusion of kinematics-dynamics methods[J]. *Automotive Safety and Energy*, 2015, 6(1): 72-78.
- [20] 高博麟. 分布式驱动电动汽车质心侧偏角估计方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2013.
- GAO Bolin. Sideslip angle estimation of electric vehicle with 4 in-wheel motors[D]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [21] 许男. 复合工况下轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- XU Nan. Study on the steady state tire model under combined conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [22] SIMON D. Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.

作者简介: 李小雨, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆动力学与稳定性控制, 车辆电子控制技术。

E-mail: lixiaoyuhy@foxmail.com

许男(通信作者), 男, 1988 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轮胎力学、车辆动力学与控制。

E-mail: xunan@jlu.edu.cn