

DOI: 10.3901/JME.2013.24.076

## 车辆质心侧偏角估计综述\*

陈 慧<sup>1,2</sup> 高博麟<sup>1,2</sup> 徐 帆<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学汽车学院 上海 201804; 2. 同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804)

**摘要:** 车辆质心侧偏角是车辆稳定性控制系统中至关重要的状态变量。分别从横向车速估计方法、纵向车速估计方法和估计过程中的模型参数自适应估计三个方面回顾车辆行驶过程中的质心侧偏角估计问题。通过对比分析质心侧偏角估计中运动学估计方法和动力学估计方法的各自优缺点,指出多方法融合估计质心侧偏角的优势。比较分析不同种类的观测器技术对质心侧偏角估计效果的影响。分析指出参数自适应估计是提高质心侧偏角估计精度的有效手段,并分别介绍路面峰值附着系数、轮胎侧偏刚度、路面坡度角等参数的自适应估计方法。分析分布式驱动电动汽车结构特点对质心侧偏角估计问题带来的影响,指出充分利用电动机转矩信息是提高质心侧偏角估计的重要措施。针对分布式驱动电动汽车,先后分别列举分析横向车速、纵向车速和参数自适应估计方法的特殊之处和优势所在。

**关键词:** 车辆状态估计 质心侧偏角估计 车速估计 参数自适应估计 观测器技术

**中图分类号:** U270

## Review on Vehicle Sideslip Angle Estimation

CHEN Hui<sup>1,2</sup> GAO Bolin<sup>1,2</sup> XU Fan<sup>1,2</sup>

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804;

2. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804)

**Abstract:** Vehicle sideslip angle is an important state variable in vehicle stability control system. The sideslip angle estimation problem can be divided into three aspects: Lateral velocity estimation, longitudinal velocity estimation and model parameter adaptive estimation. Then the three aspects are reviewed respectively. The advantages and disadvantages of kinematic estimation method and dynamic estimation method are compared and analysed, leading to the viewpoint that the fusion multiple estimation methods has obvious benefits and is more suitable for sideslip angle estimation. Furthermore, the performances of the typical observer techniques applied to sideslip angle estimation are compared and analysed. From analysis, it is pointed out that model parameter adaptive estimation is an effective method to improve the accuracy of sideslip angle estimation. Therefore, the parameter adaptive estimation methods that are adaptive to changes of road peak friction coefficient, tire sideslip stiffness, road slope and bank angle etc. are introduced respectively. Through analysis of the new structural characteristics of the distributed electric drive vehicle, the impacts on sideslip angle estimation issues are summarized. Then, it is pointed out that the full use of in-wheel motor torque information is one of the most important measures to improve the sideslip angle estimation performance. Based upon distributed electric drive vehicle, the key technologies and advantages of each state and parameter estimation aspects are discussed in details.

**Key words:** Vehicle state estimation Sideslip angle estimation Longitudinal speed estimation Parameter adaptation estimation Observer Technique

## 0 前言

安全是汽车发展永恒的主题,随着高速电动汽车产品化和商品化进程的不断推进,高性能分布

式驱动电动汽车的车辆稳定性控制已经成为国际汽车动力学控制领域的热点问题。

目前车辆稳定性控制系统中所使用的关键动力学参数包括横摆角速度,纵向、横向加速度,纵向车速,质心侧偏角和路面峰值附着系数等<sup>[1]</sup>。其中,车辆质心侧偏角和横摆角速度对车辆稳定性控制系统而言至关重要。

\* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划, 2011CB711200)。  
20130407 收到初稿, 20130920 收到修改稿

如图 1 所示<sup>[2]</sup>, 车辆质心侧偏角被定义为车辆行驶速度方向与车辆纵轴之间的夹角, 数值上可以表达为横向车速与纵向车速比值的反正切值。

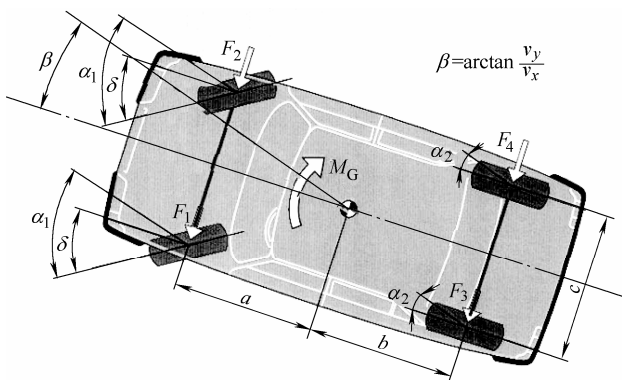


图 1 车辆质心侧偏角定义

根据定义, 对质心侧偏角的估计, 不可避免地要首先估计车辆横向车速和纵向车速, 而其中横向车速的估计又依赖于对横摆角速度、横向加速度、轮胎横向力等车辆状态的实时估计或测量, 因此对车辆质心侧偏角的估计技术, 实际上涵盖了大部分车辆行驶状态参数的估计技术, 是车辆动力学里最重要、也是难度最大的估计技术之一。

分布式驱动电动汽车是由集成在轮边或轮毂内的电动机驱动的, 因此, 较传统汽车而言, 分布式驱动电动汽车具有以下特点<sup>[3]</sup>: ① 电动机转矩大小可以直接观测, 响应速度快, 观测精度高, 每个车轮都可以进行独立的驱动转矩控制; ② 分布式驱动电动汽车没有从动车轮, 极限工况下, 当四个驱动轮都存在较大滑移时, 增加了准确估计纵向车速和轮胎纵向滑移率等状态参数的难度。

因此, 分布式驱动电动汽车对车辆状态估计, 尤其是对车辆质心侧偏角估计的影响体现在以下三个方面: ① 由四轮纵向力引起的车辆横摆力矩可以实时准确估计, 在左右车轮驱动力不相等的工况下, 这对提高车辆质心侧偏角的估计精度具有直接意义; ② 相比于非全轮驱动车辆, 尽管车辆在极限驱动工况时, 纵向车速和纵向滑移率的估计难度增加了, 但车辆纵向驱动力可以准确估计, 这就为准确估计纵向车速提供了可能, 因此有利于提高极限工况下的质心侧偏角估计精度; ③ 四轮纵向力的实时准确估计, 有利于提高路面峰值附着系数估计的精度和适用工况范围, 因此, 对扩大质心侧偏角估计的适用工况范围和提高对路面附着条件的鲁棒性具有实际意义。

因此, 本文将分布式驱动电动汽车质心侧偏角估计内容分为以下的三个方面分别进行考虑: 横向车速估计方法、纵向车速估计方法和模型参数的

自适应估计方法, 如图 2 所示, 并依次从这几方面进行文献综述。

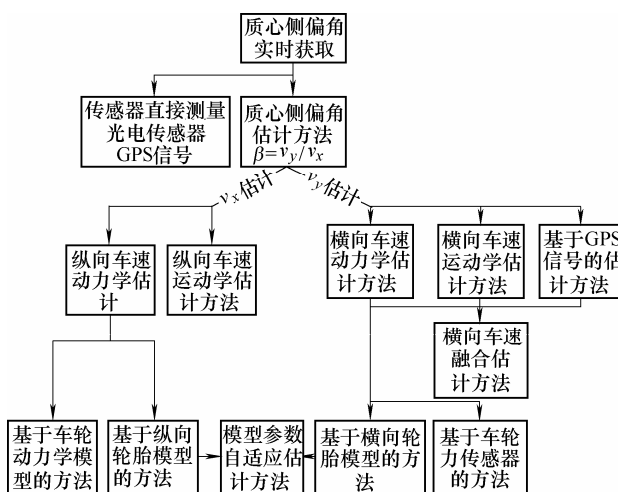


图 2 车辆质心侧偏角估计问题概图

## 1 横向车速估计方法

当假设纵向车速已知或变化缓慢的情况下, 对质心侧偏角的估计可以等效为对横向车速的估计。因此, 下面将二者合并在一起统称为质心侧偏角的估计方法进行综述。

光学传感器利用光束照到地面的反射光信号来确定车辆相对于地面的纵向车速和横向车速, 从而可以计算获得车辆的质心侧偏角, 但由于价格高, 对安装位置精度要求高, 且镜头易受雨水、油及泥土污染等原因, 仍然未得到广泛应用<sup>[4]</sup>。因此, 构建车辆状态观测器是目前获取车辆质心侧偏角信息的主要措施。

综合所参考到的文献, 目前质心侧偏角的方法主要可以分为两大类: 基于运动学的估计方法和基于动力学的估计方法。

### 1.1 运动学估计方法

运动学估计方法, 主要是根据横向加速度和横摆角速度传感器信号的直接积分法(简称运动学估计方法)估计质心侧偏角<sup>[5]</sup>, 对车辆参数、路面附着条件和驾驶操纵方式的变化都具有非常好的鲁棒性。在传感器信号准确的情况下, 其估计结果不论在车辆的线性操纵区域还是非线性操纵区域, 对实际车辆质心侧偏角的变化趋势都具有较高的估计精度<sup>[6-7]</sup>。

文献[8]给出了适用于卡尔曼滤波器的车辆运动学估计模型, 该模型将车辆的横摆角速度作为已知条件, 将纵横向车速作为观测量。但运动学估计方法严格依赖于传感器信息, 对传感器的安装、标

定和传感器的测量精度都有很高的要求。因此,为了增加估计方法的实用性,有必要对传感器信号进行修正。

### 1.1.1 对车身侧倾角的自适应估计补偿

横向加速度传感器信号的偏置,往往是由于车身侧倾、道路侧向坡度角、温度变化或标定误差引起的,不论多么小的传感器偏置,都最终会随着时间增长导致运动学估计结果漂移<sup>[9]</sup>。针对这一问题,文献[10]先估计出车身侧倾角,消除了横向加速度信号中由于车身侧倾角引起的成分。在此基础上,再采用直接积分法估计出车辆质心侧偏角。

### 1.1.2 采用传感器对侧倾角的估计补偿

文献[9]则提出了一种更全面的解决方法,基于一个三轴6自由度的惯性传感器集成模块,采用运动学方程,建立 Kalman 滤波器,对横向加速度传感器中由于车身侧倾角和路面横向坡度角引起的加速度分量进行补偿,再估计出车辆的横向车速。Kalman 滤波器中的量测变量是通过轮速法获得的车辆纵向车速。但是这种方法中,需要使用车辆三个方向上的加速度和旋转角速度传感器,并且算法较为复杂,尽管能够消除由于俯仰角或侧倾角引起的传感器偏差,但是对未知的、如由于温度引起的传感器漂移或标定误差等仍然较为敏感,且无法消除。

大量的研究证明,单纯依赖运动学模型无法做到质心侧偏角的准确估计,积分累积误差是影响上述这些运动学方法的最主要因素。

## 1.2 动力学估计方法

动力学估计方法是目前质心侧偏角估计的主要方式<sup>[2]</sup>,与光学传感器测量或运动学估计方法相比,动力学估计方法对传感器的要求不高,是一种基于低成本传感器配置方案的估计方法。目前动力学估计方法主要还是基于 ESC 的标准传感器配置方案,通常包括纵、横向加速度传感器、横摆角速度传感器、转向盘转角传感器和轮速传感器。为了能够在车辆稳定控制的过程中准确获取各车轮的轮胎力,保持对车辆状态的准确估计的能力,通常还需要提供其他额外的传感器信号,例如制动主缸压力和轮缸压力<sup>[2]</sup>等。此外,虽然安装集成有传感器技术的车辆轮胎<sup>[11-12]</sup>或轮毂轴承<sup>[13]</sup>,能够直接测量轮胎力,但对于量产车而言,不论从装备成本,还是使用方式考虑,目前都还不是最好的解决方案。

动力学方法的基本原理是在车辆动力学模型和轮胎模型的基础上,通过现代控制理论中的观测器技术估计质心侧偏角,因此采用不同的车辆或轮胎模型对估计结果会产生重要影响。

### 1.2.1 车辆模型

经典的单轨2自由度车辆模型,也即自行车模型,是车辆横向动力学中最常使用的模型之一<sup>[14]</sup>。模型只有前后两个车轮,轮胎载荷即为前后轴荷,并且假设车辆纵向车速不变,因此,前后轴荷是固定的,在高附着系数的路面上,这样的单轨车辆模型对横向加速度0.4g以内的转弯工况具有足够好的描述精度<sup>[15]</sup>。因此,很多动力学估计方法都是基于这种单轨2自由度车辆模型的,例如,文献[16]基于单轨车辆模型估计了质心侧偏角和横摆角速度,文献[17-18]也利用该模型估计了横向加速度、横摆角速度和轮胎侧偏角。

然而,由于轮胎的侧偏刚度随轮胎载荷成非线性变化,车辆在激烈转向工况下,轴荷会在左右车轮上重新分配,使得各车轮的侧偏刚度出现不同程度的增大或减小,从而直接影响车辆的操纵稳定性。同时,由于车辆状态估计算法需要在 ESC 系统激活的工况下工作,即当 ESC 对某一车轮单独进行制动控制时,估计系统需要能够准确描述由这一控制引起的车辆状态的变化,这就要求估计用的车辆模型至少应该是四轮模型。因此,激烈转向工况下,单轨2自由度车辆模型不再能够满足估计要求,双轨四轮2自由度车辆模型得到了大量的应用。例如,文献[19]基于双轨车辆动力学模型,并采用了非线性的观测器技术,对车辆的侧偏刚度进行自适应估计。在同一横向操纵工况下,作者对比了双轨车辆模型和单轨车辆模型的准确性,指出在强非线性的转弯工况下,双轨模型已经可以相当准确地描述车辆的横向动力学响应,而单轨模型却无法达到这一要求。

在双轨2自由度模型的基础上,如果考虑车辆纵向运动及其引起的轴荷转移,就转化为一个包括纵向、侧向和横摆运动3自由度的车辆动力学模型,该模型也得到了较为广泛的应用,如文献[20-21]即采用了该模型,以各车轮上的纵向力、前轮转角作为输入,估计车辆的横向状态参数。

在双轨2自由度模型的基础上,如果考虑了车身的侧倾运动及其引起的轴荷转移,就转化成为一个包括横向、横摆、侧倾运动3自由度的横向动力学模型。文献[22]即给出了这样的横向动力学模型,它可以相当准确地描述车辆转弯行驶时各车轮载荷的瞬态变化,这对后面使用复杂的非线性轮胎模型提供了一个良好的基础。

也有一些研究者使用了更加复杂的4自由度车辆模型,即在双轨2自由度模型的基础上,同时考虑了车身的侧倾和纵向运动。例如文献[23]中,使

用了这样的 4 自由度车辆模型估计了车辆纵、横向车速、横摆角速度和车身侧倾角等, 但该模型会大大增加估计算法的运算量。

### 1.2.2 轮胎模型

估计模型中不同的轮胎模型也会对车辆状态估计产生重要影响。目前用于车辆状态估计用的轮胎模型主要包括两大类: 一类是线性轮胎模型, 使用线性函数来描述轮胎横向力和侧偏角的变化关系, 也即轮胎的侧偏刚度是一个定值, 不随侧偏角和轮胎载荷变化而变化; 另一类是非线性轮胎模型, 其侧偏特性是一个非线性的函数关系, 典型的模型包括魔术轮胎公式<sup>[24]</sup>、HSRI 轮胎模型<sup>[25]</sup>、Uni-Tire 轮胎模型<sup>[26]</sup>和反正切函数轮胎模型<sup>[27]</sup>等。

线性轮胎模型的优势在于结构简单, 观测器算法运算量小, 并且在车辆横向运动并不激烈的情况下, 具有较高的描述精度。例如, 文献[17]在单轨 2 自由度车辆模型和线性轮胎模型的基础上, 使用卡尔曼滤波器估计车辆的质心侧偏角。文献[20]在线性轮胎模型的基础上, 给出了稳态条件下通过前轮转角计算质心侧偏角的估计方法

$$\beta = \frac{1 - ml_f v^2 (2l_r k_r l)^{-1}}{1 - m(l_f k_f - l_r k_r) v^2 (2l^2 k_f k_r)^{-1}} \frac{l_r}{l} \delta_f \quad (1)$$

文献[28]则根据后轮的侧偏特性, 给出了稳态条件下通过横摆角速度和横向加速度来计算质心侧偏角的方法

$$\beta = \frac{l_r}{v_x} \dot{\psi} - \frac{ml_f}{2lk_r} a_y \quad (2)$$

式中,  $m$  为整车质量,  $l$  为轴距,  $l_f$  和  $l_r$  为质心到前后轴距离,  $k_f$  和  $k_r$  为前后轴的侧偏刚度,  $\delta_f$  为前轮转角,  $v$  为车速。

尽管线性动力学估计方法可以通过设计不同的观测器反馈矩阵, 来降低对某些模型参数的敏感性, 然而由于线性轮胎模型本身的局限性, 基于线性轮胎模型的动力学估计方法, 只能够在车辆的线性操纵区域内提供较为可靠的估计结果, 这对于只有在极限工况下才会触发工作的车辆稳定性控制系统, 显然是不够的。针对该问题, 文献[7, 29]采用了线性轮胎模型配合侧偏刚度自适应的解决方案, 在估计车辆状态的同时, 自适应计算当前时刻的轮胎侧偏刚度, 然后将该值再代入线性轮胎模型, 并通过观测器来估计质心侧偏角, 这种方法本质上是路面附着和轮胎载荷等因素对轮胎本身非线性特性的影响, 直接通过轮胎侧偏刚度的变化结果体现出来。因此其有效性很大程度上依赖侧偏刚度自适应估计的准确性, 同时这种方法描述轮胎非线性特

性的能力也是有限的。

针对线性轮胎模型在质心侧偏角估计中存在的不足, 更多的学者采用了基于非线性轮胎模型的估计方法, 例如文献[30]使用复杂的非线性轮胎模型, 通过同时估计车速、路面峰值附着系数和轮胎力的方法, 达到提高车辆状态估计精度的目的。文献[31]采用了魔术公式来描述非线性的轮胎附着特性。魔术公式是通过三角函数的组合, 并基于大量试验数据, 来模拟轮胎非线性特性的, 由于拟合参数较多, 因此可以获得相当高的拟合精度, 但也由此带来了模型结构复杂, 计算量大等劣势。魔术公式的基本形式及其参数配置如式(3)所示

$$\begin{cases} y(x) = D \sin \{ C \arctan [ Bx - E ( Bx - \arctan Bx ) ] \} \\ Y(X) = y(x) + S_v \\ x = X + S_H \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $Y$  表示轮胎纵向力或横向力,  $X$  表示轮胎的纵向滑移率或横向滑移率,  $B$  为魔术轮胎公式的刚度系数,  $C$  为形状系数,  $D$  为峰值系数,  $E$  为曲率系数。

文献[2]给出了德国 Bosch 公司的 ESP 系统上所采用的 HSRI 轮胎模型形式。HSRI 轮胎模型是美国密执安大学公路安全研究所 (Highway Safety Research Institute) 通过大量轮胎试验, 研究得到半经验轮胎模型, 其最大优势在于所需拟合参数较少, 且计算量较小, 尽管其拟合精度不如魔术公式高, 但能够满足 ESP 系统中对状态估计的精度要求。

HSRI 轮胎模型的标准结构为

$$\begin{cases} H = \left[ \left( \frac{\lambda}{1-\lambda} \frac{k_\lambda}{\mu F_z} \right)^2 + \left( \frac{\lambda}{1-\lambda} \frac{k_\alpha}{\mu F_z} \tan \alpha \right)^2 \right]^{1/2} \\ F_b = \frac{\lambda}{1-\lambda} k_\lambda \left( \frac{1}{H} - \frac{1}{4H^2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为轮胎纵向滑移率,  $k_\lambda$  为轮胎纵向滑移刚度,  $\mu$  为路面峰值附着系数,  $F_z$  为车轮垂向载荷,  $k_\alpha$  为轮胎侧偏刚度,  $F_b$  为地面制动力,  $\alpha$  为轮胎侧偏角。

文献[20]采用了日本学者提出的简易轮胎横向力计算模型, 如式(5)所示

$$\begin{aligned} F_y = & \begin{cases} - \left( k_\alpha \alpha - \frac{k_\alpha^2}{4\mu F_z} \alpha^2 \operatorname{sgn}(\alpha) \right) \sqrt{1 - \left( \frac{F_x}{\mu F_z} \right)^2} & |\alpha| < \frac{2\mu F_z}{k_\alpha} \\ -\mu F_z \sqrt{1 - \left( \frac{F_x}{\mu F_z} \right)^2} \operatorname{sgn}(\alpha) & |\alpha| \geq \frac{2\mu F_z}{k_\alpha} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\text{sgn}$  为符号函数。该模型借助分段函数和符号函数近似描述了轮胎在联合工况下的非线性特性。

文献[32]使用了一种较为简单, 并且考虑了联合工况下纵、横向力关系的轮胎模型, 如式(6)所示

$$\begin{cases} F_y = \mu_s F_z [1 - \exp(-k_\alpha |\alpha|)] \text{sgn}(\alpha) \\ \mu_s = \mu \frac{\sqrt{F_z^2 - \left(\frac{F_x}{\mu}\right)^2}}{F_z} \end{cases} \quad (6)$$

其本质上是通过指数函数和符号函数来模拟轮胎的非线性特性, 估计结果显示, 该轮胎模型具有较好的拟合精度。

文献[33-34]使用了考虑轮胎垂向力影响的反正切函数轮胎侧偏模型, 如式(7)所示

$$F_y(\alpha, F_z, \xi) = k_{\text{red}} \left( 1 - \frac{F_z}{\xi_1} \right) F_z \arctan(\xi_2 \alpha) \quad (7)$$

式中,  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $k_{\text{red}}$  为轮胎模型参数。

该模型的结构简单, 拟合参数较少, 便于使用, 但其拟合精度较低, 难以准确反映轮胎的非线性特性。

大量的研究表明, 在极限转弯工况下, 基于非线性轮胎模型的估计方法, 比线性估计方法具有更高的估计精度<sup>[35-36]</sup>。然而, 基于非线性轮胎模型的估计方法也存在难以克服的问题, 其依赖于大量精确的轮胎模型参数, 算法结构复杂, 运算量较大, 并且需要对路面峰值附着系数进行自适应估计。

### 1.2.3 转向系统模型

此外, 文献[37-38]以线控转向系统为平台, 除了采用传统车辆和轮胎模型之外, 还采用了转向系统动力学模型, 对质心侧偏角进行估计。该方法以横摆角速度作为测量值, 首先通过转向盘力矩估计出轮胎回正力矩, 然后依次再估计出前轮轮胎横向力、车轮侧偏角, 最终得到车辆质心侧偏角。

动力学估计方法的弊端在于: 该方法严重依赖于估计模型及参数的精度, 当有些模型参数难以准确获得, 或随着时间变化时, 估计结果就会与实际值产生偏差。另一方面, 由于车载处理器性能和成本因素, 要求估计模型应尽量简单, 因此模型结构和精度就会受到限制, 一些建模时未考虑的实际因素, 也会导致估计结果与实际值产生偏差<sup>[42]</sup>, 例如侧风引起的横向力和横摆力矩、悬架、轮胎和转向系统的迟滞、超调和振荡等高频瞬态响应对质心侧偏角的影响。

## 1.3 多方法融合

总结以上质心侧偏角运动学估计方法和非线性动力学估计方法(简称非线性动力学估计方法)的

优缺点, 如下表所示。

表 各方法性能对比

工况	运动学估计方法 (直接积分法)	非线性动力学 估计方法
正常行驶工况适用性	○	○
激烈转弯工况适用性	○	○
对传感器偏差的鲁棒性	×	○
长时间计算稳定性	×	○
对路面附着变化的鲁棒性	○	×
对车辆参数不确定性的鲁棒性	○	×
反映高频瞬态响应的能力	○	×

注: 优点用○表示, 缺点用×表示。

从上表中可以看出, 单纯使用运动学估计方法或动力学估计方法, 都存在着各自难以克服的缺陷, 无法满足所有的估计性能要求<sup>[39]</sup>。因此, 为了能够避免由单一方法带来的不足, 有学者开始尝试使用运动学和动力学联合估计的方法, 也有学者尝试引入全球定位系统和数字摄像头信号来矫正由于运动学或动力学估计带来的问题。

### 1.3.1 动力学结合运动学的估计方法

针对上表中运动学估计方法和非线性动力学估计方法的缺陷, 文献[40]提出了一种将动力学和运动学融合的估计方法。算法利用路面峰值附着系数、路面横向坡度角等作为判断条件, 采用开关逻辑的形式, 从两种方法中选择一个来估计质心侧偏角。

文献[41]基于运动学估计方法和动力学估计方法, 采用了卡尔曼滤波技术进行车辆状态估计, 选择各卡尔曼滤波器的噪声协方差作为权重, 对两者的估计结果进行数据融合, 试验结果显示, 融合估计结果对传感器偏差和模型参数变化具有更好的鲁棒性。

文献[40, 42-43]提出了一种基于伪积分技术(Pseudo-Integration technique, PIT)的融合方法, 采用一阶滤波器, 对运动学估计方法和动力估计学方法的质心侧偏角估计结果进行融合, 使得两种方法的优势互补。在低频范围内, 基于动力学方法的估计结果对最终估计结果起主要作用, 此时, 估计结果对传感器偏置误差和路面横向坡度角具有较强的鲁棒性。在高频响应阶段, 运动学方法的估计结果起主要作用, 此时, 估计结果对模型误差具有较强的鲁棒性, 并且对质心侧偏角的动态变化估计得更准确。因此, 融合估计方法对传感器偏差和模型误差的鲁棒性都有所加强, 同时, 由于该融合估计方法使用到了信号所有的频率, 因此, 其估计结果的相位滞后也是最小的<sup>[42]</sup>。

尽管伪积分技术从一定程度上提高了运动学

估计方法对传感器偏差和噪声敏感性, 同时又加强了非线性动力学估计方法对车辆的高频动态响应能力, 但它并没有完全消除横向加速度传感器偏差的影响<sup>[42]</sup>。

### 1.3.2 基于全球定位系统(Global positioning system, GPS)信号的多方法融合

近年来, 也有学者基于低成本的 GPS 信号, 结合车载惯性传感器信息, 利用运动学方法估计车辆运动状态<sup>[44]</sup>。基于运动学卡尔曼滤波器的算法, 优点在于不受车辆参数变化的影响, 但由于低成本的惯性传感器, 会导致质心侧偏角的估计结果出现严重的积分漂移现象, 因此引入 GPS 信号后, 不仅可以提高 GPS 的更新率, 同时又能对惯性传感器的静态偏差进行估计和补偿, 降低估计算法对惯性传感器精度等级的要求。类似地, 文献[45]也使用低成本 GPS 信号对直接积分法引起的车辆质心侧偏角估计误差进行了实时校正。

文献[46-47]则采用 GPS 信号结合动力学估计的方法, 对车辆质心侧偏角和侧倾角进行了估计, 与此同时, 通过获得 GPS 信号, 对车辆模型中的线性轮胎侧偏刚度进行了自适应估计, 以进一步提高车辆状态的估计精度。RYU 等<sup>[48-50]</sup>使用 GPS 和 INS 传感器相结合来估计质心侧偏角, 这种方法通常也需要同时对路面的横向和纵向坡度角进行估计。文献[51]首先基于 GPS 接收器获取车辆的航向角, 再将航向角连同横摆角速度一起作为车辆质心侧偏角观测器的校正量, 以提高质心侧偏角的估计精度。

近年来, 随着 GPS 技术的进步和普及, 利用多基站网络, 建立的连续运行卫星定位服务综合系统(Continuous operational reference system, CORS), 已经能够显著提高车载导航定位系统的精度和可靠性<sup>[52-53]</sup>, 可以在大部分工况下, 克服由于不开阔地形或天气等原因影响 GPS 信号的问题, 这就为基于 GPS 信号的车辆位姿和状态估计方法的实际应用提供了重要的技术支持和有利的就业前景。

但尽管如此, 当车辆长时间处于没有 GPS 信号或 GPS 信号极弱的环境下, 如地下隧道或室内停车场等, 基于 GPS 信号的车辆状态估计方法, 其估计结果的准确性和稳定性仍然会受到影响。

### 1.3.3 基于摄像头信号的多方法融合

此外, 也有文献采用基于低成本的摄像头信号, 结合车辆动力学估计方法来估计车辆的质心侧偏角<sup>[54-55]</sup>。利用安装在车辆前端的低成本数码相机, 采集车辆前端的道路图像, 通过计算机视觉处理技术, 提取出当前车辆的车身姿态和道路线信

息, 包括车辆纵轴线与道路线的夹角、横向位移等信息, 再结合传统的车辆动力学估计方法对车辆质心侧偏角进行联合估计。仿真和试验结果显示, 由于摄像头获取的车辆状态信息, 是基于运动几何学模型的, 其模型的不确定性小, 因此, 提取信息的准确性高, 与动力学估计方法结合后, 能够有效提高动力学方法的估计精度。然而, 由于摄像头信息会受到大雾、沙尘或夜晚等能见度因素的影响, 部分道路或雨雪后的道路上并不具有清晰的道路线, 因此, 该方法的工况范围受时间和地点的局限性较大。

## 1.4 观测器技术

车辆状态估计中较为常用的观测器技术有卡尔曼滤波器、龙贝格观测器、鲁棒观测器、滑模观测器、模糊观测器等, 此外神经网络算法也得到了<sup>[56]</sup>。

根据现代控制理论, 状态观测器技术可由式(8)统一抽象描述

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \Lambda(z - \hat{z}) \quad (8)$$

式中,  $f(\hat{x}, u)$  为系统模型,  $\Lambda$  为反馈增益,  $z$ 、 $\hat{z}$  为测量值和预测的测量值。

由于模型不能完全精确地描述车辆的特性, 因此需要后面的项  $\Lambda(z - \hat{z})$  通过实际测量来修正模型的预测, 因此, 观测器算法的核心内容就是如何计算获得反馈增益  $\Lambda$ , 以确保测量值能更好地修正预测带来的误差, 使估计更加准确。

### 1.4.1 卡尔曼滤波器

卡尔曼滤波器(Kalman filter, KF)根据估计系统噪声和传感器噪声的协方差, 实时计算观测器的反馈矩阵, 从而达到对传感器噪声和系统噪声的有效抑制, 整个估计过程由时间更新和量测更新两部分组成。由于卡尔曼滤波器对传感器噪声具有明显的抑制能力, 具有较强的实用性, 因此在实际工程中得到了大量应用。例如文献[17]中, 基于四轮轮速信号, 采用卡尔曼滤波器对车辆横向加速度和横摆角速度进行了估计。文献[57]中也使用了 KF 来估计轮胎胎压和路面峰值附着系数。

但卡尔曼滤波器需要假设系统噪声和测量噪声均为高斯白噪声, 如果噪声为有色噪声, 则滤波算法对噪声的抑制能力会有所减弱。此外, 卡尔曼滤波器中, 量测噪声协方差矩阵初值和系统估计噪声协方差矩阵的初值难以匹配, 需要通过大量的试验和在线调试来获得。

### 1.4.2 龙贝格观测器

与卡尔曼滤波器不同, 龙贝格观测器是通过

制定不同的设计目标,来配置不同的观测器反馈矩阵的,进而使估计算法在及时性、准确性和对参数鲁棒性等方面获得不同的性能。ZEITZ<sup>[58]</sup>通过雅可比线性化方法将龙贝格观测器的应用推广到非线性系统。类似地,文献[59]中也采用了将非线性动力学误差线性化的非线性状态观测器对车辆状态进行估计。

#### 1.4.3 滑模观测器

滑模观测器是基于变结构控制理论的非线性观测器,与普通观测器结构不同之处在于,其直接使用了符号函数  $\text{sgn}(z - \hat{z})$  来代替  $(z - \hat{z})$ ,也即以测量值和估计的测量值之间的误差直接作为滑模平面进行观测器的设计。文献[60]中,将轮胎的侧偏刚度作为车辆模型中的不确定参数,设计了滑模观测器,使其对轮胎侧偏刚度鲁棒,其仿真结果证明,设计的滑模观测器对车辆横向运动的估计结果误差是可以渐进收敛的。文献[61]也使用了滑模观测器来估计车辆横向车速。文献[62]为了避免符号函数带来的颤振现象,采用了下面的函数作为饱和函数

$$\text{sgn}(\varepsilon_x) = \frac{2}{\pi} \arctan(\lambda \varepsilon_x) \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  为设计参数。

文献[63-64]对卡尔曼滤波器,龙贝格观测器以及滑模观测器进行了对比研究,通过采用简单的非线性车辆模型,以横摆角速度信号和车速信号作为测量信号,来估计质心侧偏角,仿真和试验的对比结果显示,如果基于相同的传感器信号,以及相同的估计用车辆动力学模型和轮胎模型,不同类型的观测器技术得到的状态估计精度是在同一数量级水平的。

#### 1.4.4 鲁棒观测器

鲁棒观测器是考虑在参数变动的情况下,设计合理的鲁棒观测器反馈增益,使估计结果尽可能不受模型参数变动的影 响。例如,文献[21, 65]分别通过合理的反馈增益设计,使得当车辆前后轴侧偏刚度发生变化或横向力出现扰动时,观测器中扰动项前面的系数为 0,从而抑制了扰动项对观测器结果的影响。文献[66]基于  $H_\infty$  鲁棒控制理论设计了观测器,并给出了选取观测器参数的原则。文献[67]基于非线性动力学模型,分别建立了 EKF 和鲁棒观测器,通过仿真结果进行了对比,对比结果表明:鲁棒观测器对时变的模型参数比 EKF 具有更好的鲁棒性,而 EKF 对传感器噪声比鲁棒观测器具有更好的抑制作用。

#### 1.4.5 无味卡尔曼滤波器

由于扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman

filter, EKF)和非线性龙贝格观测器的基本原理是在估计点附近将非线性函数局部线性化,例如借助 Taylor 级数展开,并忽略级数中二阶以上各项的影响,再对变量进行估计,但这样存在以下两点主要问题:① 在严重的非线性区域时,局部线性化带来的误差变大,甚至导致估计结果发散;② 由于估计过程中涉及 Jacobian 矩阵的计算,因此,对于结构复杂的非线性系统,其算法的运算量会明显增大。

基于此,有学者提出采用无味变换的无味卡尔曼滤波器<sup>[68-69]</sup>,对于强非线性系统,UKF 由于选用有限个采样点获取系统的近似分布,无须计算非线性方程的 Jacobian 矩阵,显示出对非线性系统估计的优越性,因此在许多领域中得到了成功应用。例如,文献[70]中,采用 UKF,对四轮轮毂电动机独立驱动的车辆进行了纵向车速、横向车速和质心侧偏角的估计,估计模型采用了 3 自由度的车辆模型和 HSRI 非线性轮胎模型,仿真结果显示,在强非线性工况下 UKF 估计算法能够准确估计车辆的运动状态。此外,文献[71]对车辆状态参数进行了实时估计,在采用相同传感器配置的情况下,对比了 EKF 和 UKF 的估计效果,仿真和试验结果显示,在估计精度方面,UKF 相比于 EKF 具有一定的优势。因此,UKF 未来会广泛地应用到非线性估计领域及系统辨识与参数估计领域,UKF 算法目前仍然存在计算量大、稳定性和收敛性需要深入研究等问题。

#### 1.4.6 粒子滤波器

不论是 EKF 还是 UKF,都是基于估计过程中随机信号满足高斯白噪声的理想假设,但这在实际工程应用中是不可能实现的。针对这一问题,粒子滤波器(Particle filter, PF)<sup>[72-73]</sup>技术得到了重视和发展,其通过寻找一组在状态空间中传播的随机样本对概率密度函数进行近似,以样本均值代替积分运算,从而获得状态最小方差估计<sup>[74]</sup>,这些样本即被称为“粒子”,随着粒子数目的增加,粒子的概率密度函数逐渐逼近状态的概率密度函数,从而达到了最优贝叶斯估计的效果。例如,文献[75]中,基于非线性的四轮车辆模型,使用 EKF 和 PF,分别对车辆质心侧偏角和轮胎力进行了估计,并对估计结果进行了仿真和实车试验数据对比。结果表明,相比于 EKF,PF 具有更高的估计精度,但由于计算量较大,不适于处理器的实时运算。文献[76]通过估计车辆纵横向车速、横摆角速度和轮胎侧向力,对比了无味粒子滤波器(Unscented particle filter, UPF)、UKF、EKF

的估计性能,发现相比于其他种类的滤波器,无味粒子滤波器在强非线性环境下的具有更高的估计精度,但仍然需要克服计算量的问题。

粒子滤波器摆脱了解决非线性滤波问题时随机量必须满足高斯分布的制约条件,并在一定程度上解决了粒子数样本匮乏问题。从分析算法的思想可以看出,只要针对非线性状态估计系统建立起相应的模型,在采用 Kalman 滤波效果不理想的情况下,便可尝试采用粒子滤波算法<sup>[74]</sup>。因此粒子滤波器是一种值得深入研究的观测器技术,但粒子滤波器目前同样也存在算法计算量大、稳定性和收敛性尚需要深入研究的问题。

#### 1.4.7 其他非线性观测器

此外,其他非线性观测器也得到了一定的应用。例如,文献[77-79]以里亚普诺夫稳定理论为出发点,推导出使估计收敛的反馈增益。文中选取里亚普诺夫函数为横摆角速度和质心侧偏角的估计误差的平方和。文献[80]采用模糊逻辑对质心侧偏角估计问题进行了研究,并得到了试验数据的验证。验证结果显示,相比于 EKF 观测器,该方法在估计精度不降低的情况下,对输入信号的噪声和路面附着条件具有鲁棒性,但该方法需要大量的试验来归纳出经验规则,当算法应用于另一车型时,需要进行大量的匹配工作。文献[81]采用神经网络对车辆的质心侧偏角进行估计,质心侧偏角被看做横向加速度和横摆角速度时间序列的映射,并获得了较好的试验结果,但该方法事先需要大量精确的训练样本数据,特别是在极限的转向工况下的数据。还有很多学者对不同观测器在车辆状态估计中的性能进行了多方面的对比研究,如文献[82]等。

#### 1.5 针对分布式驱动电动汽车的估计方法

总体来讲,目前针对分布式驱动电动汽车的质心侧偏角估计方法与传统车辆的估计方法相比,最直接的不同之处体现在:由于各轮胎纵向力可以准确实时地估计出来,因此由轮胎纵向力引起的车辆横摆力矩,以及由该横摆力矩引起的车辆质心侧偏角的变化量可以准确获得,如文献[34, 83]在单轨 2 自由度车辆模型中即引入了该横摆力矩部分,用以车辆状态估计,见式(10)

$$\begin{cases} ma_y = F_{yf} \sin \delta + F_{yf} \cos \delta + F_{yr} \\ I_z \dot{\gamma} = F_{yf} \sin \delta \cdot l_f + F_{yf} \cos \delta \cdot l_f - F_{yr} l_r + T \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $F_{yf}$  为前轴纵向驱制动力,  $T$  为由四轮纵向驱制动力引起的车辆横摆力矩。

## 2 纵向车速估计方法

根据估计模型的不同,纵向车速的估计方法也可以分为运动学估计方法和动力学估计方法<sup>[84]</sup>。

在车辆质心侧偏角的估计中,按照车辆纵向车速是否已知,大致可分为下面的两种情况:第一种情况是先根据轮速、车身纵向加速度等信息,采用运动学方法估计车辆的纵向车速,然后以此作为已知量,进一步估计质心侧偏角,此时质心侧偏角估计问题可以等效为横向车速估计问题,但这是建立在纵向车速变化缓慢,且纵向车速估计结果准确的前提下的。如果在激烈的转向运动过程中,纵向车速也发生剧烈变化,或纵向车速估计误差较大时,质心侧偏角的估计结果仍会受到较大的影响<sup>[85]</sup>。第二种是将纵向车速也作为一个待估计的状态变量,同横摆角速度、横向车速或质心侧偏角一起联合估计。这种情况下,既可以采用运动学方法,也可以采用动力学方法来估计纵向车速。

### 2.1 运动学方法

运动学估计方法可以分为基于车轮轮速信号的轮速法估计,和基于纵向加速度信号的直接积分法估计。轮速法又可以进一步分为最大(小)轮速法、斜率法和综合法等<sup>[86]</sup>。对于非全轮驱动车辆而言,在紧急加速工况时,轮速法通过采集非驱动轮轮速信号,可以提供较高的纵向车速估计精度。但是,对于紧急制动工况,或全轮驱动车辆的驱制制动工况而言,由于所有车轮都存在滑移,且轮胎滚动半径的变化,使得由轮速信号得到的车速估计误差较大。

针对该问题,文献[19]提出了针对装备有防抱死制动系统(Anti-lock braking system, ABS)车辆的轮速估计方法,适用于车辆 ABS 紧急制动工作时的车速估计。该方法无须估计模型和车身加速度信号,采用自适应非线性滤波器,根据局部轮速峰值点和制动起始时的轮速的斜率(即制动减速度)进行调整。但是在估计的初始时刻,车速估计的准确性严重依赖于参数初值的选取;同时由于车速估计结果输入给 ABS 控制器,来计算车轮滑移率并实施控制,估计算法需要捕捉控制后的轮速局部峰值点,用于下一循环的车速估计。因而,估计算法和控制算法构成的运算闭环是否收敛有待论证。类似地,文献[87]也针对轮速信号,在制动过程中进行了纵向车速的估计的研究,但估计精度仍然不够理想。

另一方面,加速度信号的引入,从一定程度上可以矫正单纯基于轮速法的估计结果,但是由于

各种干扰及加速度传感器本身的偏置误差,由加速度信号经积分后得到的车速与实际车速相差较大。基于上述问题,部分学者对纵向加速度信号偏置进行了校正方法的研究。文献[88]对轮速信号微分并通过卡尔曼滤波器进行滤波,采用车轮角加速度来修正由于车辆行驶于坡道上或温度因素引起的车身加速度传感器的偏置,该方法所用的轮速信号必须是车轮纯滚动状态下获得的。类似地,文献[89]通过一定采样时间内的平均车速变化率和平均加速度的差值来计算纵向加速度传感器的静态偏置。

在轮速法和直接积分法的基础上,文献[90-92]采用轮速信号和纵向加速度信号,并根据车辆当前行驶状态来判断哪一个信号更可信,然后通过调整权重系数的大小,对车辆的纵向车速进行融合计算。在此基础上,文献[93]额外采用转向盘转角、横摆角速度、横向加速度信号来辅助估计,通过模糊逻辑将车辆行驶的不稳定状态分为 4 种情况,然后再决定是进行加速度积分、还是平均轮速来获得车速,该方法的模糊逻辑规则需要通过实车试验数据来调试。

## 2.2 动力学方法

基于动力学的纵向车速估计方法,其核心在于对轮胎纵向驱制动力的估计,而针对轮胎纵向力的估计主要分为两大类:一类是基于半经验轮胎模型的纵向力估计,其形式类似于第 1.2.2 节的轮胎模型中所述,此处不再重复;另一类是基于车轮动力学模型的纵向力估计,该方法需要已知车轮的驱动转矩或制动转矩,对于传统车辆的稳定性控制系统而言,也即需要知道发动机输出转矩和制动器制动转矩<sup>[2, 94]</sup>,其采用的动力学模型如式(11)所示

$$F_x = c_p \frac{p_{whl}}{R} - \frac{M_{CaHalf}}{R} + \frac{J_{whl}}{R^2} \frac{dv_{whl}}{dt} \quad (11)$$

式中,  $F_x$  表示轮胎-路面驱制动力;  $c_p$  是轮缸制动模型的参数,通常是一个常数;  $p_{whl}$  表示轮缸的制动压力;  $M_{CaHalf}$  表示半轴上的驱动转矩;  $J_{whl}$  表示车轮的转动惯量;  $v_{whl}$  为轮速;  $R$  是车轮的滚动半径。

文献[95]也采用了类似的车轮动力学模型,并根据制动压力和加速踏板角度等传感器信号,来估计各车轮的轮胎纵向作用力。

## 2.3 针对分布式驱动电动汽车的估计方法

基于车轮动力学模型,对轮胎纵向力进行估计,需要已知 4 个车轮上的驱制动转矩信息,而这正是分布式驱动电动汽车相对于传统汽车的优势所在,轮毂电动机的驱制动转矩可以通过测量电动

机控制器的电流计算获取,对轮胎纵向驱、制动力的估计更加简单、准确,这对提高纵向车速和轮胎纵向滑移率的估计精度具有直接意义。

例如,在文献[34, 83]中,对电动车驱动车轮的轮胎-路面纵向作用力的估计,采用了如式(12)所示的车轮动力学模型

$$T_m = F_x R + I \dot{\omega}_r \quad (12)$$

式中,  $T_m$  表示轮毂或轮边电动机的转矩,  $F_x$  代表轮胎-路面纵向作用力,  $\dot{\omega}_r$  表示轮胎的转角加速度,通过轮速信号计算获取,  $R$  表示车轮滚动半径,  $I$  表示车轮的转动惯量。

此外,文献[96]也采用类似的动力学模型,估计了车轮滑移率,用于车轮防滑的驱制动控制。

## 3 参数估计方法

### 3.1 参数自适应估计现状

关于车辆质心侧偏角、纵向车速等车辆状态的动力学估计方法,通常首先假设许多车辆参数,如整车质量、横摆转动惯量、质心位置、轮胎侧偏刚度等都是固定不变的,同时环境参数,如路面峰值附着系数、坡度角等也是固定不变的。但实际上,这些参数在使用的过程中都是时变的,且有可能变化较大。例如,一个整备质量约为 1 200 kg 的车辆,其空载质量和满载质量往往会相差 300~400 kg,或者车辆从干燥平整的沥青路面进入带有大量积水的低洼路面,路面的峰值附着系数、坡度角也都会发生变化。

因此,为了提高质心侧偏角、纵向车速等车辆状态估计的估计精度,扩大车辆状态估计的适用工况范围,就需要实时获取车辆模型和环境参数的变化信息。研究显示,实现状态估计过程中的参数自适应估计,是提高状态估计精度、使估计算法能够适应不同行驶工况和行驶环境的有效方法。最常用的自适应估计方法包括递归最小二乘算法、联合卡尔曼滤波算法和基于扩张状态观测器的方法等。

#### 3.1.1 自适应估计器的类型

从自适应估计器的形式上讲,可以分为状态和参数集中式估计器、状态和参数分散式估计器两种。

##### 3.1.1.1 状态和参数集中式估计器

状态和参数集中式估计器,是指将模型中的参数扩张为状态,车辆状态量和估计模型参数在同一个观测器中,二者的估计运算是同步进行的。许多学者在这种形式的基础上,利用不同的观测器技

术, 对车辆或环境模型参数进行在线自适应估计。例如, 文献[79]设计了横向车速观测器, 并通过对路面峰值附着系数进行自适应估计, 来满足不同路面条件下的估计要求。进一步地, 文献[97]将车辆纵向车速和横摆角速度也扩展为估计状态, 以提高车辆的质心侧偏角的估计精度, 并对观测器进行了稳定性分析。

文献[98]采用无味卡尔曼滤波器, 对车辆的质心侧偏角、轮胎横向力和路面峰值附着系数同时进行了观测。文献[99]使用 EKF 对这些状态参数量进行了估计。类似地, 文献[100]基于轮胎附着模型和路面峰值附着系数的缓变模型, 采用 EKF 估计路面峰值附着系数、路面纵向坡度角、路面横向坡度角。

文献[101]基于刷子轮胎模型, 分别采用了不同的方法来设计非线性状态观测器的反馈增益, 通过稳定性分析, 指出当前轮侧偏角非常大、后轮侧偏角非常小, 以及前轮侧偏角和横向加速度都非常小时, 观测器是不稳定的。因此, 利用非线性最小二乘法对非线性状态器进行了补充, 形成了如图 3 所示的融合观测器结构<sup>[101]</sup>, 使最终路面峰值附着系数的估计结果能够平滑稳定。

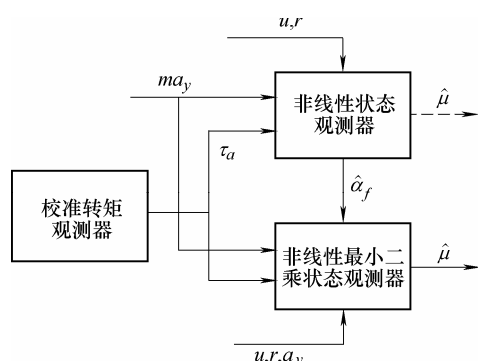


图3 路面峰值附着系数融合观测器结构

状态和参数集中式估计器的弊端在于估计器阶数较高, 而且估计模型往往都是非线性的, 导致估计器在计算雅可比矩阵时运算量过大; 且由于状态和参数估计同步进行, 整个估计器的闭环稳定性会受到参数自适应估计结果不确定性的影响。

### 3.1.1.2 状态和参数分散式估计器

针对集中式估计器的这些弊端, WAN 等<sup>[102]</sup>提出了一种状态和参数分散的式估计器——双卡尔曼滤波器(Dual extended Kalman filter, DEKF), 这是一种类似于解靴带式“Boot-Strapping”的数据处理结构, 采用两个 EKF 对车辆状态及模型参数并行估计, 在估计的过程中, 进行数据交互, 具体可以分4步: 参数预测、状态预测、状态校正和参数校正。相对于

集中式估计器而言, 这种结构最大的优势在于, 一旦参数的辨识结果良好, 就可以关闭参数估计的滤波器, 从而使得参数不确定性对车辆状态估计的影响降到最小, 而且每个估计器的阶数都不会太高, 有利于雅可比矩阵的计算。文献[103-104]应用双卡尔曼滤波器技术, 对车辆的横纵向车速、横向加速度、横摆角速度、车身侧倾角及侧倾角速度、俯仰角及俯仰角速度、四轮轮胎侧偏角、四轮纵向滑移率、四轮轮胎载荷、整车质量和质心位置同时进行了观测。

### 3.1.2 自适应估计参数

从自适应估计参数的重要性讲, 对车辆质心侧偏角估计结果影响最大的参数是路面峰值附着系数、路面坡度角、轮胎侧偏角刚度、车辆质心位置、整车质量等。下面分别对这些参数的自适应估计方法进行综述。

#### 3.1.2.1 路面峰值附着系数

基于动力学的车速(横向车速和纵向车速)估计方法通常都是基于轮胎-路面摩擦力模型的, 而轮胎-路面的摩擦特性通常取决于轮胎和路面的类型, 其中, 路面峰值附着系数作为最能反映轮胎和路面类型的参数, 直接影响着轮胎的非线性特性和轮胎最大附着力的工作点位置, 因此, 路面峰值附着系数是质心侧偏角估计问题研究中最受关注和最需要自适应估计的模型参数。

文献[105-106]对路面峰值附着系数估计方法做了梳理, 总的来说, 可以分为基于路面特征的估计方法和基于轮胎效果的估计方法, 如图4所示。

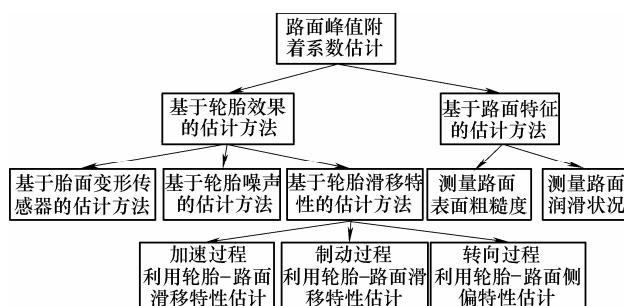


图4 路面峰值附着系数的估计方法

基于路面特征的估计方法, 是指通过额外的传感器, 如光学传感器, 激光发生器或超声波传感器<sup>[107-109]</sup>直接检测路面特征, 以此来确定路面类型, 从而估计出对应的路面峰值附着系数。这种方法在经过大量的测试标定之后, 可以获得较高的估计精度, 但存在问题也较为明显, 额外的传感器增加了估计系统的成本, 并且在使用的过程中, 对传感器的安装精度和光学环境的要求较高, 可靠性受



以通过对式(14)建立观测器, 实时估计路面峰值附着系数的数值。如文献[118]中, 将路面峰值附着系数表达成为一个具有自适应参数的函数关系, 以驱动轮的驱动转矩、轮速和非驱动轮的轮速作为输入, 建立具有自适应规则的观测器, 估计路面峰值附着系数。类似地, 文献[119]也使用了车轮轮速和转矩信息, 来估计车轮的滑移率, 进一步地, 估计轮胎模型中的路面峰值附着系数等多个的自适应参数。

#### 3.1.2.1.4 基于 $\dot{\mu}=0$ 的估计方法

第四类是基于  $\dot{\mu}=0$  的缓变模型, 将路面峰值附着系数扩张为观测器的状态量来进行估计, 最常采用估计器形式既有状态和参数集中式估计器<sup>[79, 99-100]</sup>, 也有状态和参数分散式估计器<sup>[103-104]</sup>。

#### 3.1.2.2 轮胎侧偏刚度

轮胎侧偏刚度在质心侧偏角估计中也起着重要作用。轮胎侧偏刚度的变化, 是由于路面峰值附着系数、轮胎纵向滑移率和轮胎载荷等多种因素引起的, 因此在非线性动力学模型中, 一般对路面峰值附着系数、轮胎载荷进行自适应估计后, 就同时起到了对侧偏刚度自适应估计的效果。但在采用线性轮胎模型的质心侧偏角估计方法中, 轮胎侧偏刚度一般是一个固定值, 因此对轮胎侧偏刚度的自适应估计可以有效提高极限工况下质心侧偏角的估计精度<sup>[7, 29]</sup>。

文献[120]给出了侧偏刚度实时估计算法的一般流程。首先建立状态观测器, 对质心侧偏角进行估计, 然后依次计算出轮胎侧偏角和轮胎横向力, 并将计算结果, 通过递归最小二乘算法实时计算出当前时刻的轮胎侧偏刚度, 并用于下一时刻质心侧偏角的估计。如式(15)所示, 根据单轨模型推导出的动力学关系, 通过纵向横向加速度、横摆角速度等直接测量信号, 近似估算出轮胎横向力的大小, 进而用于轮胎侧偏刚度和轮胎模型中其他参数的自适应计算。

$$\begin{cases} F_{yf} = \frac{J_z \ddot{\psi} + l_r m a_y \cos \beta + l_r m \dot{v} \sin \beta}{(l_f + l_r) \cos \delta_f} \\ F_{yr} = \frac{-J_z \ddot{\psi} + l_f m a_y \cos \beta + l_f m \dot{v} \sin \beta}{(l_f + l_r) \cos \delta_f} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $J_z$  为质心处绕  $z$  轴转动惯量。

文献[33, 121]也采用递推最小二乘算法, 以横向加速度、转向盘转角、横摆角速度和车速作为输入量, 对轮胎的前后侧偏刚度进行了在线估计。

文献[122]给出了一种在车速不变的条件下,

根据侧偏刚度的定义进行实时估计的方法, 并考虑了直线行驶时计算式分母为 0 的问题

$$k_{f,i} = \begin{cases} m \frac{l_r}{l_f + l_r} \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{\dot{\delta}_{f,i} - \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{v_i} + \dot{\psi}_i} & \left| \dot{\delta}_{f,i} - \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{v_i} + \dot{\psi}_i \right| > \varepsilon \\ k_{f,i-1} & \left| \dot{\delta}_{f,i} - \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{v_i} + \dot{\psi}_i \right| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (16)$$

此外, 也有学者通过额外的 GPS 信号, 对车辆模型中的线性轮胎刚度进行自适应估计, 以提高车辆状态估计的准确性<sup>[46-47]</sup>。

#### 3.1.2.3 路面坡度角

除了路面峰值附着系数和侧偏刚度外, 路面的纵向和横向坡度角也是影响估计结果的重要因素<sup>[123-124]</sup>。路面纵向坡度角是指沿着车辆纵轴线方向的路面起伏角度, 路面横向坡度角是指垂直于车辆纵轴线方向的路面倾斜角度。

对路面坡度角的估计, 有学者将坡度角作为一个扰动输入, 并通过扩张状态观测器的方法来获取。例如, 文献[125]在已知横摆角速度和质心侧偏角的前提下, 首先通过观测器估计出由于系统参数变化而带来的扰动, 然后通过正交投影算法, 将由于路面坡度引起的扰动部分, 从总的扰动中提取出来, 从而估计路面横向坡度角。文献[126]在使用 EKF 估计质心侧偏角的同时, 使用了一个线性的扰动观测器来估计路面横向坡度角。

也有学者采用递推形式的最小二乘算法在线估计路面坡度角, 为了克服长时间后的数据饱和问题, 通常会引入遗忘因子。例如, 文献[127]采用带多重遗忘因子的递推最小二乘算法, 对路面坡度角和整车质量进行了辨识, 由于在行驶过程中, 质量和坡度这两个参数各自的变化速率不同, 因此作者在传统的最小二乘算法的基础上又做了进一步改进, 以确保估计系统的稳定性和收敛性。

与前述方法不同, 针对纵向坡度角的估计, 文献[128]在使用基于动力学估计方法的基础上, 增加了基于 GPS 信号的估计方法, 将采集到的车辆纵向车速和垂向速度信号作为观测器的校正量, 最后在不同工况下, 将两种方法的估计结果进行融合, 以提高最终路面纵向坡度角的估计精度和平滑程度。

#### 3.1.2.4 其他参数

此外, 也有学者对车辆模型的其他参数进行了自适应估计, 如车身质量、质心位置和车身横摆

转动惯量的变化等。

例如,文献[129]采用 IEKF(Identifying extended Kalman filter)对车辆模型参数的辨识进行了仿真研究,这里的 IEKF 是一种扩张状态的扩展卡尔曼滤波器,将估计模型的参数通过扩张状态的方法,设计成状态估计量,与原车辆状态一起进行估计。在此基础上,文献[130]通过实车试验数据对车辆的参数进行了辨识;随后,文献[131-132]进一步地使用实车试验数据,将轮胎模型参数和车辆模型参数一起,通过 IEKF 进行了辨识,在设计 IEKF 时,作者通过调节参数量的估计误差协方差,使得其估计值的变化速度略“慢”于车辆状态量的变化速度,以确保估计系统的稳定性。

文献[133]则是在假设前后侧偏刚度已知的条件下,对转向行驶过程中的质心到前轴的距离进行了估计

$$\frac{l_f}{l} = \frac{1 + \frac{k_f}{ma_y} \left( \frac{l\gamma}{v} + \delta_f \right)}{\frac{k_f}{k_r} + 1} \quad (17)$$

式中,  $l_f$  为质心距前轴的距离,  $k_f$ 、 $k_r$  分别为前后轴的侧偏刚度,  $\gamma$  为车辆横摆角速度,  $l$  为轴距。

由于同时估计车辆状态及参数,会使得观测器的运算量增加,因此,文献[134-135]在稳定性控制系统标准传感器配置下,设计了车辆状态及参数估计器,并通过简化模型等方法来降低估计算法的运算量。

### 3.2 针对分布式驱动电动汽车的估计方法

针对分布式驱动电动汽车,由于四轮驱制动力矩可以通过电动机电流计算获取,因此,四轮的纵向力能够根据式(12)实时准确估计,结合轮胎纵向滑移率的估计结果,就可以对轮胎-路面的摩擦特性曲线进行重构,从而有利于提高路面峰值附着系数的估计精度和估计速度,因此扩大了质心侧偏角估计的适用工况,提高了估计算法对路面附着条件的鲁棒性<sup>[136]</sup>。

例如,文献[3, 137]通过式(12)估计了轮胎纵向驱动力,再根据式(18)计算轮胎的利用附着系数,在此基础上,结合轮胎纵向滑移率,重构了轮胎-路面的摩擦特性曲线,如图 6 所示。

$$\mu_i = \frac{F_{xi}}{F_{zi}} \quad i=1,2,\dots,4 \quad (18)$$

从图 6 可以看出,曲线在达到峰值附着系数点之前,斜率为正,超过峰值附着系数点之后,曲线斜率变为负值,因此,定义曲线斜率  $k_A$  如式(19)所

示,最终,根据斜率  $k_A$  的变化判断轮胎是否处于最佳的峰值附着系数工作点。

$$k_A = \frac{d\mu}{d\lambda} = \frac{d\mu/dt}{d\lambda/dt} \quad (19)$$

式中,  $\lambda$  为轮胎滑移率。

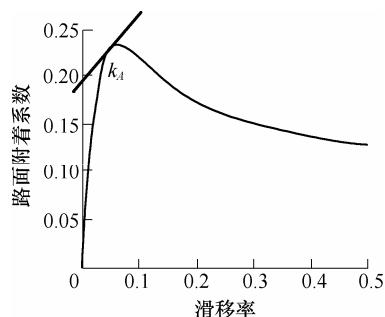


图 6 轮胎-路面的摩擦特性曲线

类似地,文献[138]通过建立 EKF 构建了车辆状态观测器,对纵横向车速、车轮驱制动力进行了估计,在此基础上,计算轮胎的利用附着系数和轮胎纵向滑移率,并利用最小二乘法重构了轮胎-路面的摩擦特性曲线,从而估计得到路面的峰值附着系数。

## 4 结论

(1) 分析了分布式驱动电动汽车结构特点对质心侧偏角估计问题带来的影响,指出充分利用电动机转矩信息是提高质心侧偏角估计的重要措施。

(2) 将车辆质心侧偏角估计问题分为横向车速估计、纵向车速估计和参数自适应估计三个方面,分别对每一个方面进行总结分析。

(3) 对运动学估计和动力学估计两种常用的估计方法进行了比较分析,归纳二者各自的优缺点,总结了多方法融合估计质心侧偏角的优势之处。

(4) 分析指出,实现估计过程中的参数自适应估计是提高质心侧偏角估计精度的有效手段,并介绍了针对路面附着、路面坡度角、轮胎侧偏刚度等参数的自适应估计方法。

## 参 考 文 献

- [1] MAMMAR S, KOENIG D. Vehicle handling improvement by active steering[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 38: 211-242.
- [2] ZANTEN A V. Bosch ESP systems: 5 years of experience[R]. SAE, 2000-01-1633, 2000.
- [3] HORI Y, TOYODA Y, TSURUOKA Y. Traction control of electric vehicle based on the estimation of road

- surface condition-basic experimental results using the test EV "UOT Electric March"[C]//Power Conversion Conference, Nagoya 1997: 1-8.
- [4] WATANABE K, KOBAYASHI K, CHEOK K. Absolute speed measurement of automobile from noisy acceleration and erroneous wheel speed information[R]. SAE, 920644, 1992.
- [5] KOIBUCHI K, YAMAMOTO M, FUKUDA Y, et al. Vehicle stability control in limit cornering by active brake[R]. SAE, 960487, 1996.
- [6] TSENG H E, MADAU D, ASHRAFI B, et al. Technical challenges in the development of vehicle stability control system[C]//Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl., 1999: 1660-1666.
- [7] VIETINGHOFF A V, HIEMER M, KIENCKE U. Nonlinear observer design for lateral vehicle dynamics[C]//Proc. IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005: 988-993.
- [8] HAC A, SIMPSON M. Estimation of vehicle side slip angle and yaw rate[R]. SAE, 2000-01-0696, 2000.
- [9] Klier W, REIM A, STAPEL D. Robust estimation of vehicle sideslip angle - An approach w/o vehicle and tire models[R]. SAE, 2008-01-0582, 2008.
- [10] HAC A, NICHOLS D, SYGNAROWICZ D. Estimation of vehicle roll angle and side slip for crash sensing[R]. SAE, 2010-01-0529, 2010.
- [11] GOBBI M, MASTINU G. Wheels with integrated sensors for measuring tyre forces and moments[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC'04, HAN University, Arnhem, 23-27 August, 2004: 519-524.
- [12] TUONONEN A J. Vehicle lateral state estimation based on measured tyre forces[J]. Sensors, 2009, 9: 8761-8775.
- [13] NAM K, OH S, FUJIMOTO H, et al. Vehicle state estimation for advanced vehicle motion control using novel lateral tire force sensors[C]//2011 American Control Conference. O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA. June 29 - July 01, 2011.
- [14] KIENCKE U, NIELSEN L. Automotive control system[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [15] MITSCHKE M. DYNAMIK der K, BAND C. Fahrverhalten[M]. Berlin: Springer Verlag, 1990.
- [16] BOLZERN P, CHELI F, FALCIOLA G, et al. Estimation of the non-linear suspension tyre cornering forces from experimental road test data[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 31(1): 23-34.
- [17] VENHOVEN P J TH, NAAB K. Vehicle dynamics estimation using Kalman filters[J]. Vehicle Syst. Dyn., 1999, 32(2): 171-184.
- [18] ZUURBIER J, BREMMER P. State estimation for integrated vehicle dynamics control[C]//Proc. AVEC 6th Int. Symp. Adv. Vehicle Control, Hiroshima, Japan, 2002: 379-384.
- [19] HIEMER M, VIETINGHOFF A V, KIENCKE U, et al. Determination of the vehicle body slip angle with non-linear observer strategies[C]//Proc. SAE World Congress, Detroit, MI, 2005: 2005-01-0400.
- [20] CHUMSAMUTR R, FUJIOKA T, ABE M. Sensitivity analysis of side-slip angle observer based on a tire model[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(7): 513-527.
- [21] FUKADA Y. Slip-angle estimation for vehicle stability control[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 32(4): 375-388.
- [22] SEGEL M. Theoretical prediction and experimental substantiation of the response of the automobile to steering control[C]//Proceedings of the Automobile Division of the Institute of Mechanical Engineers, 1956: 310-330.
- [23] HUH K, KIM J, YI K. Monitoring system design for estimating the lateral tyre force[J]. Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(D8): 247-256.
- [24] PACEJKA H B, BAKKER E. The magic formula tyre model[C/CD]Proc. 1st International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, DELFT, Netherlands, Oct. 21-22, 1991.
- [25] TIELKING J T, MITAL N K. A comparative evaluation of five traction tire models[C/CD]//Highway Safety Research Institute, University of Michigan Interim Document 6, Jan. 1974.
- [26] GUO K H, LEI R. A unified semi-empirical tire model with higher accuracy and less parameters[R]. SAE, 1999-01-0785, 1999.
- [27] NAGAI M, YAMANAKA S, HIRANO Y. Integrated control law of active rear steering control[C]//Proc. 3rd International Symposium on Advanced Vehicle Control, 1996: 451-469.
- [28] NAGAI M. The perspectives of research for enhancing active safety based on advanced control technology[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(5): 413-431.
- [29] 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 Syst. Dyn.*, 2000, 34(1): 57-75.
- [30] RAY L R. Nonlinear tire force estimation and road friction identification[J]. *Simulation and Experiments Automatica*, 1997, 33(10): 1819-1833.
- [31] 郭孔辉, 付皓, 丁海涛. 基于扩展卡尔曼滤波的汽车质心侧偏角估计[J]. *汽车技术*, 2009(4): 4-6, 47.
- GUO Konghui, FU Hao, DING Haitao. Estimation of CG slideslip angle based on extended Kalman filter[J]. *Automobile Technology*, 2008(4): 4-6, 47.
- [32] ZUURBIER J, BREMMER P. State estimation for integrated vehicle dynamics control[C]//6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2000: 371-375.
- [33] HIEMER M. Model based detection and reconstruction of road traffic accidents[D]. Kalsruhe: Kalsruhe University, 2005.
- [34] GENG Cong, MOSTEFAI L, HORI Y. Body slip angle observer for electric vehicle stability control based on empirical tire model with fuzzy logic approach[C]//IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE, 10-13 Nov., 2008: 108-113.
- [35] STE'PHANT J, CHARARA A. Observability matrix and parameter identification: Application to vehicle tire cornering stiffness[C/CD]//Proceedings of the ECC-CDC 2005, Sevilla, Spain, 2005.
- [36] STE'PHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Vehicle sideslip angle observers[C/CD]//Proceedings of the European Control Conference (ECC2003), Cambridge, UK, 2003.
- [37] YIH P, RYU J, GERDES J C. Vehicle state estimation using steering torque[C]//American Control Conference, 2004: 2116-2121.
- [38] YIH P. Steer-by-wire: Implication for vehicle handling and safety[D]. Boston: Standford University, 2004.
- [39] FARRELY J, WELLSTEAD P. Estimation of vehicle lateral velocity[C]//Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Control Application, 1996: 552-558.
- [40] NISHIO A, TOZU K, YAMAGUCHI H, et al. Development of vehicle stability control system based on vehicle sideslip angle estimation[R]. SAE, 2001-01-0137, 2001.
- [41] LEE H. Reliability indexed sensor fusion and its application to vehicle velocity estimation[J]. *Dyn. Syst. Meas. Contr.*, 2006, 128(2): 236-243.
- [42] PIYABONGKARN D, RAJAMANI R, GROGG J A, et al. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17(1): 78-88.
- [43] PIYABONGKARN D, RAJAMANI R, GROGG J A, et al. Development and experimental evaluation of a slip angle estimator for vehicle stability control[C/CD]//Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis, Minnesota, USA, June 14-16, 2006.
- [44] BEVLY D M. Global positioning system(GPS): A low-cost velocity sensor for correcting inertial sensor errors on ground vehicles[J]. *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, 2004, 126(2): 255-264.
- [45] DAI Yifan, LUO Yugong, CHU Wenbo, et al. Vehicle state estimation based on the integration of low-cost GPS and INS[C/CD]//Proceedings of the International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration, Changchun, China, July, 2012.
- [46] BEVLY D M, RYU J, GERDES J C. Integrating INS sensors with GPS measurements for continuous estimation of vehicle sideslip, roll, tire cornering stiffness[J]. *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, 2006, 7(6): 483-493.
- [47] BEVLY D M, SHERIDAN R, GERDES J C. Integrating INS sensors with GPS velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness[C]//American Control Conference, 2001, 25-31.
- [48] RYU J, GERDES J C. Integrating inertial sensors with global positioning system (GPS) for vehicle dynamics control[J]. *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, 2004, 126(2): 243-254.
- [49] BEVLY D M, GERDES J C, WILSON C. The use of GPS based velocity measurements for measurement of sideslip and wheel slip[J]. *Vehicle Syst. Dyn.*, 2002, 38(2): 127-147.
- [50] BEVLY D M, GERDES J C, WILSON C, et al. The use of GPS based velocity measurements for improved vehicle state estimation[C]//American Control Conference, 2000: 2538-2542.
- [51] NGUYEN B M, 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, Lecture Notes in

- Electrical Engineering, 2013: 597-609.
- [52] WEINSTEIN A J, MOORE K L. Pose estimation of Ackerman steering vehicles for outdoors autonomous navigation[C]//Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference, 14-17, March, 2010: 579-584.
- [53] 孙海鹏, 崔传润, 战兴群, 等. 基于 CORS 车辆导航定位系统的方案设计[J]. 测绘工程, 2007, 16(2): 58-60.
- SUN Haipeng, ZHAI Chuanrun, ZHAN Xingqun, et al. Solution design of vehicle navigation and position system based on CORS[J]. Engineering of Surveying Mapping, 2007, 16(2): 58-60.
- [54] HSU J, TOMIZUKA M. Analyses of vision-based lateral control for automated highway system[J]. Vehicle System Dynamics, 1998, 30(5): 345-373.
- [55] WANG Yafei, NGUYEN B M, 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, 25-28 Oct., 2012: 4278-4283.
- [56] 高晓杰. 行驶极限工况下汽车质心侧偏角的非线性估计[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- GAO Xiaojie. Nonlinear estimation of vehicle slide slip angle under limit conditions[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [57] GUSTAFSSON F, DREVO M, FORSSELL U, et al. Virtual sensors of tire pressure and road friction[R]. SAE, 2001-01-0796, 2001.
- [58] ZEITZ M. Nichtlineare Beobachter fuer chemische Reaktoren. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr.27, 1977.
- [59] KIENCKE U, DAIß A. Observation of lateral vehicle dynamics[J]. Contr. Eng. Pract., 1997, 5(8): 1145-1150.
- [60] ZHANG J R, XU S J, RACHID A. Robust sliding mode observer for automatic steering of vehicles[C]//IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2000: 85-90.
- [61] TSENG H E. A sliding mode lateral velocity observer[C/CD]//Proceedings of the 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC) 2002, Hiroshima.
- [62] STEPHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Evaluation of a sliding mode observer for vehicle sideslip angle[J]. J. Control Engineering Practice, 2005, 15(7): 900-910.
- [63] STE'PHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Virtual sensor: Application to vehicle sideslip angle and transversal forces[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2004(51): 278-89.
- [64] STE'PHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Evaluation of a sliding mode observer for vehicle sideslip angle[J]. Control Engineering Practice, 2007(15): 803-812.
- [65] FUKADA Y. Estimation of vehicle slip-angle with combination method of model observer and direct integration[C]//Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control, 1998: 201-206.
- [66] O'BRIEN R T JR, KIRIAKIDIS K. A comparison of  $H_{\infty}$  with Kalman filtering in vehicle state and parameter identification[C]//American Control Conference, 2006: 3954-3959.
- [67] SATRIA M, BEST M C. Comparison between Kalman filter and robust filter for vehicle handling dynamics state estimation[R]. SAE, 2002-01-1185, 2002.
- [68] JULIER S J, UHLMANN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proc. IEEE, 2004, 92(3): 401-422.
- [69] JULIER S J, UHLMANN J K. A new extension of the Kalman filter tononlinear systems[C]//Proceeding of the 11th Int Symp Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls, 1997: 182-193.
- [70] LI Gang, ZONG ChangFu, ZHANG Qiang, et al. 4WID in-wheel motor EV driving state estimation based on UKF[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 246-247: 712-717.
- [71] 赵又群, 林棐. 基于 UKF 算法的汽车状态估计[J]. 中国机械工程, 2010, 21(5): 615-619, 629.
- ZHAO Yongqun, LIN Fen. Vehicle state estimation based on unscented Kalman algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(5): 615-619, 629.
- [72] GORDON N, SALMOND D. Novel approach to non-linear and non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. Proc. of Institute Electric Engineering, 1993, 140(2): 107-113.
- [73] DOUCET A, GORDON N. Sequential monte-Carlo methods in practice[M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [74] 胡士强, 敬忠良. 粒子滤波算法综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(4): 361-365.
- HU Shiqiang, JING Zhongliang. Overview of particle filter algorithm[J]. Control and Decision, 2005, 20(4): 361-365.
- [75] WANG Bin, CHENG Qi, VICTORINO A C, et al.

- Nonlinear observers of tire forces and sideslip angle estimation applied to road safety: Simulation and experimental validation[C/CD]//The 2012 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, États-Unis, 2012.
- [76] CHU Wenbo, LUO Yugong, DAI Yifan, et al. Vehicle state estimation for in-wheel Motor Electric Vehicle using unscented particle filter[C/CD]Proceedings of the International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration, Changchun, China, July, 2012.
- [77] KAMINAGA M, NAITO G. Vehicle body slip angle estimation using an adaptive observer[C]//5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 1998: 207-212.
- [78] CHEROUAT H, BRACI M, DIOP S. Vehicle velocity, side slip angles and yaw rate estimation[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005: 349-355.
- [79] GRIP H F, IMSLAND L, JOHANSEN T A, et al. Nonlinear vehicle velocity observer with road-tire friction adaptation[C]//Proc. 45th IEEE Conf. Dec. Contr. San Diego, CA, 2006.
- [80] 施树明, LUPKER H, BREMMER P, 等. 基于模糊逻辑的车辆侧偏角估计方法[J]. 汽车工程, 2005, 27(4): 426-430.
- SHI Shuming, LUPKER H, BREMMER P, et al. Estimation of vehicle slide slip angle based on fuzzy logic[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(4): 426-430.
- [81] SASAKI H, NISHIMAKI T. A side-slip angle estimation using neural network for a wheeled vehicle[R]. SAE, 2000-01-0695, 2000.
- [82] UNGOREN A Y, PENG H, TSENG H E. A study on lateral speed estimation methods[J]. Int. J. Veh. Auton. Syst., 2004, 2(1/2): 126-144.
- [83] AOKI Y, UCHIDA T, HORI Y. Experimental demonstration of body slip angle control based on a novel linear observer for electric vehicle[C]//IECON2005 Proc (The 31st Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society Proceedings), 2005: 2620-2625.
- [84] YU Zhuoping, GAO Xiaojie. Review of vehicle state estimation problem under driving situation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33.
- [85] KIM H H, RYU J. Sideslip angle estimation considering short-duration longitudinal velocity variation[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(4): 545-553.
- [86] 吴伟先. 国产 ESP 开发技术研究—基于压力函数的控制逻辑分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2003.
- WU Weixian. Study on development technology of ABS-controllogic analysis based on pressure function[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003.
- [87] 刘训忠, 王一玲, 夏群生. 汽车防抱死制动系统(ABS)轮速算法研究[J]. 汽车电器, 2000(1): 7-10.
- LIU Xunzhong, WANG Yiling, XIA Qunsheng. Wheel speed algorithm analysis of anti-lock system(ABS)[J]. Auto Electric Parts, 2000(1): 7-10.
- [88] CHUL K, UCHANSKI M, HEDRICK J. Vehicle speed estimation using accelerometer and wheel speed measurements[R]. SAE, 2002-01-2229, 2002.
- [89] DAISS A, KNIECKE U. Estimation of vehicle speed fuzzy-estimation in comparison with Kalman-filtering[C]//Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications, Albany, New York. September 28-29, 1995: 281-284.
- [90] GUSTAFSSON F, AHLQVIST S, FORSSELL U, et al. Sensor fusion for accurate computation of yaw rate and absolute velocity[R]. SAE, 2001-01-1064, 2001.
- [91] KOBAYASHI K, CHEOK K, WATANABE K. Estimation of absolute vehicle speed using fuzzy logic rule-based Kalman filter[C]//Proceeding of the American Control Conference, Seattle, 1995: 3086-3090.
- [92] DAIB A, KIENCKE U. Estimation of vehicle speed: Fuzzy estimation in comparison with Kalman filtering[C/CD]//4th IEEE CCA, New York, 1995.
- [93] ZIMMER C, MASSET M, LEON G. Fuzzy approach for real time longitudinal velocity estimation of a road vehicle in critical situation[C]//The 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen, 1996: 1393-1400.
- [94] ZANTEN A T V, ERHARDT R. Control aspects of the Bosch-VDC[C]//Proceedings of AVEC 1996, Aachen, Germany, 1996: 573-608.
- [95] VIETINGHOFF A V, OLBRICH S, KIENCKE U. Extended Kalman filter for vehicle dynamics determination based on a nonlinear model combining longitudinal and lateral dynamics[R]. SAE, 2007-01-0834, 2007.
- [96] FUJII K, FUJIMOTO H. Traction control based on slip ratio estimation without detecting vehicle speed for electric vehicle[C]//Proc. Power Conversion Conference

- (PCC2007), Nagoya, 2007: 688-693.
- [97] GRIP H F, IMSLAND L, JOHANSEN T A, et al. Nonlinear vehicle side-slip estimation with friction adaptation[J]. *Automatica*, 2008, 44(3): 611-622.
- [98] CHENG Qi, VICTORINO A C, CHARARA A. A new nonlinear observer using unscented Kalman filter to estimate sideslip angle, lateral tire road forces and tire road friction coefficient[C]//2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) Baden-Baden, Germany, June 5-9, 2011: 709-714.
- [99] 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: 95-115.
- [100] SUISSA A, ZOMOTOR Z, BÖTTIGER F. Method for determining variables characterizing vehicle handling: US, 5557520A[P]. 1994-07-29.
- [101] AHN C S, PENG H, TSENG H E. Estimation of road friction for enhanced active safety systems: Dynamic approach[C]//2009 American Control Conference Hyatt Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA June 10-12, 2009: 1110-1115.
- [102] WAN E, NELSON A. Neural dual extended Kalman filtering: Applications in speech enhancement and monaural blind signal separation[C/CD]//Proceedings of Neural Networks for Signal Processing Workshop, IEEE, 1997.
- [103] WENZEL T A, BURNHAM K J, BLUNDELL M V, et al. Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2006, 44(2): 153-171.
- [104] 胡丹. 基于双扩展卡尔曼滤波的汽车状态及路面附着系数估计算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- HU Dan. Research on the vehicle state and road tire friction coefficient estimation based on dual extended Kalman filter[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [105] MTIUER S, UCHANSKI M, HEDRICK K. Estimation of the maximum tire-road friction coefficient[J]. *Journal of Dynamic System, Measurement, Control*, 2003, 125: 607-617.
- [106] 余卓平, 左建令, 张立军. 路面附着系数估算技术发展现状综述[J]. *汽车工程*, 2006(28): 546-552.
- YU Zhuoping, ZUO Jianling, ZHANG Lijun. A summary on the development status quo of tire-Road friction coefficient estimation techniques[J]. *Automotive Engineering*, 2006(28): 546-552.
- [107] EIEHHORN U, ROTH J. Prediction and monitoring of tyre/road friction[C]//The 24th FISITA Congress, London, June 7-11, 1992: 67-74.
- [108] BREUER B, EIEHHORO U. Measurement of tyre/road friction ahead of the car and inside the tyre[C]//Proceedings of AVEC 1992: 347-353.
- [109] 边明远. 汽车防滑控制系统(ABS/ASR)道路识别技术及车身速度算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
- BIAN Mingyuan. Research on road condition recognition and vehicular velocity calculating algorithm for automotive anti-skid control system (ABS/ASR)[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2003.
- [110] BACHMANN T. The importance of the integration of road, tyre, vehicle technologies[C/CD]//FISITA XXth World Congress, Montreal, Canada, September.
- [111] ERDOGAN G, LEE A, RAJAMANI R. Estimation of tire-road friction coefficient using a novel wireless piezoelectric tire sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(2): 267-279.
- [112] ONO E, ASANO K, SUGAI M, et al. Estimation of automotive tire force characteristics using wheel velocity[J]. *Contr. Eng. Pract.*, 2003, 11: 1361-1370.
- [113] 杨财, 李亮, 宋健, 等. 基于轮胎力观测器的路面附着系数识别算法[J]. *中国机械工程*, 2009(7): 873-876.
- YANG Cai, LI Liang, SONG Jian, et al. Road friction coefficient estimation algorithm based on tire force observer[J]. *China Mechanical Engineering*, 2009(7): 873-876.
- [114] RAJAMANI R, PIYABONGKARN D, LEW J Y, et al. Algorithms for real-time estimation of individual wheel tire-road friction coefficients[C]//American Control Conference, 2006, 14-16 June, 2006: 6.
- [115] RAJAMANI R, PIYABONGKARN D, LEW J Y, et al. Tire-road friction-coefficient estimation[J]. *Control Systems, IEEE*, 2010, 30(4): 54-69.
- [116] GUSTAFSSON F. Slip-based tire-road friction estimation[J]. *Automatica*, 1997, 33(6): 1087-1099.
- [117] KEIYU K, OSAMU Y, HIROYUKI U. Enhancements in vehicle stability and steerability with slip control[J]. *JSAE Review*, 2003, 24: 71-79.
- [118] NISHIRA H, KAWABE T, SHIN S. Road friction estimation using adaptive observer with periodical  $\sigma$ -modification[C/CD]//Proc. IEEE Int. Conf. Contr. Appl. Kohala Coast, HI, 1999.
- [119] CANUDAS-DE-WIT C, PETERSEN M L, SHIRIAEV A. A new nonlinear observer for tire/road distributed

- contact friction[C/CD]//Proc. 42nd IEEE Conf. Dec. Contr. Maui, HI, 2003.
- [120] BOERNER M, ISERMANN R. Adaptive one-track model for critical lateral driving situations[C]//7th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2002: 1195-1200.
- [121] ARNDT M, DING E L, MASSEL T. Identification of cornering stiffness during lane change maneuvers[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, 2004: 344-349.
- [122] SIENEL W. Estimation of the tire cornering stiffness and its application to active car steering[C]//Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control, 1997: 4744-4749.
- [123] TSENG H E. Dynamic estimation of road bank angle. Vehicle Syst. Dyn., 2001, 36(4): 307-328.
- [124] LINGMAN P, SCHMIDTBAUER B. Road slope and vehicle mass estimation using Kalman filtering[C/CD]//Proceedings of the 17th IAVSD Symposium in The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, Lyngby, Denmark, 2004.
- [125] HAHN J O, RAJAMANI R, YOU S H. Road bank angle estimation using disturbance observer[C]//7th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2002: 455-460.
- [126] SENTOUH C, SEBSADJI Y, MAMMAR S, et al. Road bank angle and faults estimation using unknown input proportional-integral observer[C]//Proc. Eur. Contr. Conf., Kos, Greece, 2007: 5131-5138.
- [127] VAHIDI A, STEFANOPOULOU A, PENG H. Recursive least squares with forgetting for online estimation of vehicle mass and road grade-Theory and experiments[J]. Vehicle System Dynamics, 43(1): 31-55.
- [128] SAHLHOLM P, JOHANSSON K H. Road grade estimation for look-ahead vehicle control[C/CD]//17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008.
- [129] BEST M C. Parametric identification of vehicle handling using an extended Kalman filter[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2007, 5(3-4): 256-273.
- [130] BEST M C, NEWTON A P, TUPLIN S. The identifying extended Kalman filter: Parametric system identification of a vehicle handling model[J]. Instn Mech. Engrs, Part K: J. Multi-body Dynamics, 2007, 221(1): 87-98.
- [131] BEST M C, NEWTON A P. Vehicle tyre and handling model identification using an extended Kalman filter[C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC), Kobe, Japan, 6th-9th October, 2008: 69-74.
- [132] BEST M C. Identifying tyre models directly from vehicle test data using an extended Kalman filter[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(2): 171-187.
- [133] MASSEL T, DING E L, ARNDT M. Estimation of vehicle loading state[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Control Applications, 2004: 1260-1265.
- [134] LIU C SH, PENG H. A state and parameter identification scheme for linearly parameterized systems[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1998, 120(4): 524-528.
- [135] IMSLAND L, JOHANSEN T A, FOSSEN T I, et al. Vehicle velocity estimation using nonlinear observers[J]. Automatica, 2006, 42(12): 2091-2103.
- [136] FURUKAWA K, HORI Y. Advanced estimation techniques of road surface condition and their experimental evaluation using test electric vehicle[C/CD]//UOT March I and II. Proc. EVS-20, 2003.
- [137] GEAMANU M S, CELAA, LESOLLIEC G, et al. Road condition estimation and longitudinal control for electric vehicles. Control, Automation and Systems (ICCAS)[C]//2011 11th International Conference, 26-29 Oct., 2011: 599-604.
- [138] LIN Cheng, WANG Gang, CAO Wanke, et al. Estimation of vehicle state and road coefficient for electric vehicle through extended Kalman filter and RLS approaches[C]//2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT-2012), 2012: 2216-2220.

作者简介: 陈慧(通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车底盘电子控制技术。

E-mail: hui-chen@tongji.edu.cn

高博麟, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆状态估计和车辆操纵稳定性的主客观评价。

E-mail: goblin1021@126.com