

汽车质心侧偏角估计的研究现状及发展

林 菜 黄 超

南京航空航天大学,南京,210016

摘要:阐述了汽车质心侧偏角估计对于汽车稳定性控制的重要意义。从量测仪器、估计算法、物理模型、轮胎模型四个方面对国内外的质心侧偏角估计的研究进行了归纳、分析,重点列举比较了各类估计算法的优缺点,最后指出了建模的准确性、不同传感器信号的融合问题、传感器误差的处理、参数的自适应四个方面存在的问题以及发展趋势,并着重指出了参数自适应将是算法研究的重点。

关键词:汽车;质心侧偏角;状态估计;参数自适应

中图分类号:U461.6

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2013.01.026

State-of-the-Art of Vehicle Side Slip Angle Estimation

Lin Fen Huang Chao

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

Abstract: The significance of the side slip angle estimation for vehicle stability control was discussed. The research of vehicle side slip angle estimation was divided into four aspects: measuring instrument, estimation algorithm, physical model and tire model. Then research progresses on vehicle side slip angle estimation were summarized and analyzed both at home and abroad. The emphasis was put on the comparison of advantages and disadvantages for each estimation algorithm. Finally, the problems and development were presented, which contained model accuracy, signal fusion, error elimination of sensors and parameter adaptation. The parameter adaptation will be the key for research of estimation algorithm.

Key words: vehicle; side slip angle; state estimation; parameter adaptation

0 引言

对于汽车稳定性控制系统而言,质心侧偏角是重要的控制逻辑。许多汽车电子稳定性控制系统需要准确掌握汽车质心侧偏角,并根据其确定汽车当前所处的状态,以判断是否需要汽车进行主动干预来保证汽车的安全行驶^[1]。国外一些汽车及零部件制造公司开发的汽车动态控制系统主要由估计器和控制器两部分组成。其中估计器的功能就在于实时估计汽车的质心侧偏角。在此基础上,控制器通过在某个车轮上增加制动力或驱动力,产生一定的横摆力矩,使侧偏角保持在特

征值以下^[2]。目前质心侧偏角的测量仍十分困难,且测量成本很高,因此对其进行估计具有重要的工程意义。

1 国内外研究现状

质心侧偏角估计问题的研究具有很广阔的应用前景,国外研究已较为成熟,国内起步晚,但近几年的研究步伐已经加快。本文总结大量国内外文献,以文献[3]的大类为基础,从量测仪器、估计算法、物理模型、轮胎模型四方面对质心侧偏角估计问题的最新研究进展进行论述。

1.1 量测仪器

量测仪器的选择受到成本与质心侧偏角估计精度两方面的制约。在保证估计精度的前提下尽

收稿日期:2011—10—28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10902049);中国博士后科学基金资助项目(2012M521073)

[80] Larsen T J, Madsen H A, Thomsen K. Active Load Reduction Using Individual Pitch, Based on Local Blade Flow Measurements[J]. Wind Energy, 2005, 8 (1): 67-80.

[81] 郭洪澈. 兆瓦级风电发电机组变桨距系统控制技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.

[82] 林勇刚. 大型风力机变桨距控制技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

(编辑 郭伟)

作者简介:刘德顺,男,1962年生。湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室教授、博士研究生导师。主要研究方向为机械动力学、风电技术与装备等。戴巨川,男,1979年生。湖南科技大学机电工程学院讲师。胡燕平,男,1957年生。湖南科技大学机电工程学院教授。沈祥兵,男,1974年生。海上风力发电技术与检测国家重点实验室(湘电风能有限公司)工程师。

量降低测量成本是研究的目标。下面从三个方面论述国内外研究现状。

1.1.1 基于惯性传感器的方案

(1) 惯性传感器直接估计。Hac 等^[4]利用侧向加速度积分获得汽车侧向速度,然后结合横摆角速度计算质心侧偏角。这种方法在对有效信号进行积分时,也将噪声进行积分,因此随着时间的增加,累积误差不断增大。

(2) 惯性传感器和车辆模型相结合进行估计。文献[5-6]均利用横摆角速度和侧向加速度传感器,得到了较高的质心侧偏角估计精度。文献[7-8]在文献[5-6]的基础上加入四轮角速度传感器,不仅可以提高质心侧偏角的估计精度,还可以估计轮胎侧偏角等。文献[9-10]又在文献[7-8]的基础上加入了纵向加速度传感器,除了可以提高估计精度之外,还可以进行多状态估计。文献[11-12]利用纵向和侧向加速度传感器,先估算出汽车的质心处侧向、纵向速度,通过两者比值的反正切来估计质心侧偏角,传感器精度对估计效果有较大影响。文献[13-14]中采用了 EPS 标配的转向盘力矩传感器,用非线性观测器估计了轮胎的侧偏角,可以进一步求得质心侧偏角。

(3) 惯性传感器和动态估计器联合估计。Chen 等^[15]设计了一个基于运动学模型的闭环估计器,运用 EKF 处理横摆角速度传感器以及系统过程噪声,结果表明该算法还有提升的空间。

1.1.2 基于 GPS 的方案

近几年来,随着 GPS 成本的降低,利用 GPS 作为辅助工具来估计质心侧偏角的方法越来越多。

(1) 纯 GPS 速度测量估计。文献[16]在原有常规传感器的基础上,利用 GPS 准确估计了质心侧偏角,即使汽车处于中性转向或横摆角速度传感器失灵的时候,该方案仍能奏效。

(2) GPS 与惯导仪器相结合。文献[17]利用采样频率高的惯性测量单元来补偿两个单天线的 GPS 低采样频率的缺点,为了提高测量精度,采用卡尔曼滤波(KF)来估算惯性测量单元的偏差。为了克服路面的坡度对测量的影响,文献[18]将 INS 与双天线的 GPS 结合,通过实车试验验证了其高精度性。

(3) GPS 用于传感器误差校正。文献[19]提出低成本的 GPS 辅助测量法,结合自适应扩展卡尔曼滤波确保了惯性传感器漂移的快速收敛,最终可以提高估计精度。

1.1.3 其他非常规的方案

(1) 行驶记录仪+横摆角速度传感器+侧向加速度传感器+四轮角速度传感器。文献[20]利用行驶记录仪结合其他传感器对质心侧偏角进行估算,而估算值又作为行驶记录仪是否存储当前行驶数据的阈值。

(2) 摄像机+横摆角速度传感器。文献[21]将机器人领域的摄像机测量姿态技术应用到汽车上,通过横摆角速度传感器的辅助,能比较精确地估算出质心侧偏角,但由于摄像机对于环境的影响比较敏感,所以这项技术还有待于改进。

(3) 四个侧向加速度传感器。文献[22]考虑到车辆侧向加速度较易测量,且其包含了所要估计的车辆非线性状态,因此选择四个侧向加速度传感器分别安装于车辆不同位置,采用基于多传感器信息融合技术的扩展卡尔曼滤波(EKF)和 STF 理论对质心侧偏角进行了估计。

综上所述可以看出,虽然目前惯性传感器在汽车侧偏角估计方面仍是主流,但综合低成本的 GPS 辅助姿态测量具有很好的应用前景。而非常规测量方案更多地用于学术研究,推广起来难度较大。

1.2 估计算法

质心侧偏角的估计算法从最初的积分法、简单的卡尔曼滤波到现在的神经网络、模糊逻辑等算法,其估计精度、计算效率、算法的鲁棒性都有很大的提高。下面对不同的估计算法进行归类总结,并阐述其优缺点。

1.2.1 直接积分法

直接积分法的优点是简单易行,计算量小,实时性好;缺点是随着时间的增加,误差累积增大,使得估算值大大偏离真实值。

目前,纯粹应用直接积分法进行侧偏角估算的算法基本上没有。文献[23]提出将直接积分法与卡尔曼滤波方法结合使用,分工况研究,在瞬态工况用直接积分法,而在稳态工况用卡尔曼滤波方法。

1.2.2 卡尔曼滤波算法

(1) 扩展卡尔曼滤波。非线性问题的线性化是研究非线性滤波问题的重要途径之一。考虑到车辆行驶过程中的非线性因素(轮胎、转向等),文献[24]利用 EKF,在轮胎非线性范围采用自适应参数的轮胎模型来估计质心侧偏角。文献[25]首先将基于 KF 理论的四个估计算法进行了比较,得出了合理的动力学模型,表明了采用参数自适应的轮胎模型的优越性。文献[12]将 EKF 与信息融合技术相结合,利用少量的易测车辆状态信

息(如纵、侧向加速度)融合得到质心侧偏角。文献[26]采用EKF与广义龙贝格观测器相结合设计了质心侧偏角估计算法,并通过分析表明,采用反正切轮胎模型相对于魔术公式在运算效率和精度上能更胜一筹。

(2)自适应卡尔曼滤波(AKF)。为了解决模型参数和噪声统计特性的不准确导致估计误差偏大甚至发散的问题,文献[27]将EKF与AKF相结合提出了扩展自适应卡尔曼滤波,仿真证明算法估计效果较好。文献[28]提出了双重扩展自适应卡尔曼滤波的方法,进行了汽车状态与参数的并行估计,实验表明该算法的状态估计精度高于EKF和DEKF方法。

(3)Unscented卡尔曼滤波(UKF)。与EKF不同,UKF不对非线性模型做近似计算,而对状态的概率密度函数做近似计算。文献[10]指出在同等条件下UKF算法的估计精度略高于常用的EKF算法,而所花费的运算时间大约只有EKF算法的50%。文献[29]在一般的UKF方法的基础上,考虑了轮胎的垂直刚度等因素,提高了估计的精度。

1.2.3 基于状态观测器算法

(1)常规状态观测器。文献[30]对四个轮胎的法向力进行了估算,将其作为输入,在EKF和UKF理论的基础上设计了状态观测器来估计质心侧偏角。文献[31]在简化的轮胎模型的基础上设计了非线性状态观测器,并阐明了含误差的动力学模型具有渐进稳定性的根源。

(2)龙贝格观测器。文献[32]设计了龙贝格非线性观测器,在已经估计出汽车纵向速度的前提下,用该非线性状态观测器估计了质心侧偏角。

(3)滑模观测器。文献[33]在线性二自由度车辆模型的基础上,建立了滑模观测器估算车辆的质心侧偏角。通过与卡尔曼滤波方法对比,显示了滑模观测器在估计精度上的优越性。文献[34]基于分层超扭曲算法设计了滑模观测器来估算质心侧偏角,通过仿真可以看出该算法鲁棒性和实时性很好。

1.2.4 计算智能

(1)神经网络。文献[35]利用改进径向基神经网络技术对车身和轮胎侧偏角进行估计。文献[36]所使用的神经网络对载荷转移、路况变化具有适应性,并进行了改进,降低了估计误差。

(2)模糊逻辑。文献[37]通过模糊逻辑和汽车运动学模型相结合进行车辆侧偏角估计。试验结果显示,该方法的鲁棒性和精确性较好,而且响

应频率较高,可以满足ESP的控制需要。

1.2.5 间接估计算法

以上方法均基于汽车的物理模型,直接推导出质心侧偏角的关系式,然后用相应的方法对其进行估算。也有利用间接几何关系进行估算的研究。文献[38]根据车载传感器的测量值及其变化率求得前后轴侧向力从而估算出前后轴中心处侧偏角,进而求得质心侧偏角。

1.2.6 其他新颖的估计算法

文献[39]验证了粒子滤波(PF)算法在汽车状态估计之中的可行性,基于当前时刻的量测值实现对预测粒子权重的评估,最后通过重采样完成对汽车关键状态量估计。

文献[40]提出用直接虚拟传感器(DVS)来估算质心侧偏角,该方法以已经拥有的汽车行驶的各种经验数据来进行设计。文献[41]提出了质心侧偏角的滚动时域估计器。时隔不久,文献[42]在文献[41]的基础上设计了非线性有限脉冲响应滤波器(NFIR),并将NFIR与文献[40]的DVS进行了比较,仿真结果表明,相对NFIR来说,DVS的优点在于不受模型参数的影响,但其缺点是需要更大的计算机存储空间。

以上所述的算法中,考虑实时性、鲁棒性及精度等原因,基于卡尔曼滤波的算法在实际的工程中应用的比较多。其他算法的研究虽比较深入,但目前大部分还处于理论仿真阶段,在实际应用中的效果还有待于进一步验证。

1.3 物理模型

1.3.1 基于动力学模型

物体的动力学模型是描述作用于物体的力与物体运动的关系的数学模型。文献[10,43]建立了汽车侧向、纵向、横摆和四个车轮回转运动的七自由度模型。这个模型应用较为广泛,可以较为准确全面地描述汽车动力学特性,并且在估计质心侧偏角的同时对汽车其他状态参数进行软测量。

文献[5,44]采用的是线性二自由度模型,仅可以进行线性阶段的侧偏角估计。文献[12,45-46]在简单的线性二自由度模型基础上,引入了纵向车速;文献[23]考虑了汽车纵向、侧向平移、侧倾和横摆运动自由度。这两类模型对于算法的实施比较容易,但在变附着系数路面的极限工况下对质心侧偏角的估计精度不高。

文献[38]中的模型包括车身的六自由度、四个车轮的旋转和垂向运动以及前轮转角共15个自由度。该模型更为全面地反映了汽车动力学特

性,有助于提高侧偏角估计精度,但考虑的因素过多,模型相对较复杂。

1.3.2 基于运动学模型

物体的运动学模型是从几何角度描述和研究物体位置随时间变化规律的数学模型。文献[9,47]利用模糊逻辑将汽车状态分为瞬态和稳态,在瞬态的时候利用运动学公式估计质心侧偏角。

文献[48]基于运动学模型和 EKF 设计了质心侧偏角估计算法,将汽车在失稳前短暂时间内的纵向和侧向速度的变化考虑进去,效果比较好。

文献[49-50]都是先利用动力学模型结合相应的估计算法比较精确地得出汽车的纵向和侧向速度,然后通过运动学关系式 $\beta = \arctan(v/u)$ 来计算质心侧偏角,其中 β 为质心侧偏角, v 为质心处侧向速度, u 为质心处纵向速度。

文献[51]结合 ESP 标配传感器与 GPS,通过运动学模型对汽车质心侧偏角进行了估计。由于有 GPS 的辅助,估计的精度排除了路面坡度的影响。

1.3.3 不依赖于侧偏角估计模型的动态估计法

动态估计法不需要建立与汽车质心侧偏角直接相关的动力学或运动学模型,而直接对传感器的信号进行处理,实现了基于信号的估计方法。

文献[21]将基于摄像机的图像处理技术与运动学模型相结合,给出了质心侧偏角的比较精确的估计。文献[52]设计一款松耦合的 GF-INS/GPS 组合系统,利用该系统实时给出车辆的运动状态信息,并利用该系统提高车辆主要状态参数的估计精度。

综上,基于运动学模型的算法从刚体运动关系出发,不涉及模型参数,对模型参数变化不敏感,具有较好的普适性,但该方法对传感器安装位置和精度都有很高的要求。基于动力学模型的算法如果模型参数准确可以对传感器信号起到修正作用,但其缺点也显而易见,模型参数的不确定性会使得此类估计方法在实际当中鲁棒性较差。动态估计法尚处于尝试阶段,对环境的影响比较敏感。

1.4 轮胎模型

轮胎模型是轮胎力学特性的数学描述。不同算法的估计精度,不同计算效率,对轮胎模型的选择也各不相同。

文献[10,39]对质心侧偏角的估计仿真中用到了 Fiala 轮胎模型,该模型的计算效率较高,估计效果良好。

UniTire 模型表达式统一、拟合方便、计算量

小;在联合工况下,其优势更加明显。文献[46,53]采用其进行动力学仿真,结果表明该模型具有良好适应性、实时性及高精度的特点。

魔术公式模型可以用一套完整的公式充分表达出作用在轮胎上的力和力矩,精度很高。文献[27-28,54]采用该模型,提高了质心侧偏角估计算法的仿真精度,但是计算效率低,特别是利用 EKF 进行雅可比矩阵求解的时候,计算量很大。

Dugoff 模型在不同工况下都能比较好地贴近于 Magic Formula 模型,且计算效率提高。文献[43,50]采用 Dugoff 模型首先估计了纵向速度、侧向速度,随后估计了质心侧偏角,仿真结果表明能在不降低估计精度的条件下提高计算效率。

HSRI 模型无回正力矩表达式,文献[49]基于该模型建立了汽车质心侧向速度观测器,计算效率和估计精度较好。但该模型不适用于需要用到轮胎回正力矩的多自由度非线性动力学模型。

综上所述,侧偏角估计的准确性很大程度上取决于轮胎模型的精度。但不同的轮胎模型计算效率不同,所以在保证算法估计精度的前提下要尽量选择计算效率高的模型。

2 存在的问题和发展趋势

2.1 建模的准确性

目前,对质心侧偏角估计的研究大多数还是基于模型的算法,所以建模的准确性将直接影响算法的估计精度,建立一个能够较为准确反映各种工况下过程噪声、量测噪声的时变统计特性和非线性特性的汽车动力学模型将是研究的首要任务。

2.2 不同传感器信号的融合问题

质心侧偏角的估算目前正向着低成本测量的方向发展,低成本的 GPS 势必越来越多地用于估计当中,因此低频的 GPS 信号和高频的车载惯性传感器信号之间的信息融合技术是今后亟待解决的另一个关键技术问题。

2.3 传感器误差的处理

考虑传感器设计、制造与安装的原因,传感器所测得的信号也将存在一定的误差,这将直接影响到估计结果的准确性。

针对传感器的误差问题,要想提高控制系统(如 ESP)的精度,对传感器误差进行补偿将是不可避免的。目前的研究有的将传感器的量测量也作为状态估计的待估量,将估计的结果与传感器的实际值进行实时的对比,这样可以跟踪传感器

的误差,并有故障检测与报警的作用。对于不同类型的传感器,查找其误差源,并制定相应的补偿措施将是解决该问题最有效的办法。

2.4 参数的自适应

在传统卡尔曼滤波器中,系统噪声和观测噪声的协方差假设为固定值,但是在实际情况中不可能满足这样的条件,所以需要实时的计算系统噪声和观测噪声的协方差以实现自适应才能增加估计算法的准确性。同样地,对于汽车结构参数,如汽车的总质量、质心位置也是随工况变化的。因此在今后的发展中自适应滤波、模糊逻辑等方法也将越来越多地应用到质心侧偏角的估计当中。

参考文献:

- [1] 李亮,宋健,祁雪乐. 汽车动力学稳定性控制系统研究现状及发展趋势[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 141-144.
Li Liang, Song Jian, Qi Xuele. Investigation and Development of Vehicle Dynamics Stability Control System[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 141-144.
- [2] Sabbioni E, Cheli F, D'Alessandro V. Analysis of ABS/ESP Control Logics Using a HIL Test Bench [C]//Detroit, MI, United states; SAE International, 2011.
- [3] 余卓平,高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 20-33.
Yu Zhuoping, Gao Xiaojie. Review of Vehicle State Estimation Problem under Driving Situation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 20-33.
- [4] Hac A, Simpson M. Estimation of Vehicle Side Slip Angle and Yaw Rate [C]//SAE 2000 World Congress, Detroit; SAE, 2000-01-0696.
- [5] 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): 1-3.
Guo Konghui, Fu Hao, Ding Haitao. Estimation of CG Sideslip Angle Based on Extended Kalman Filter [J]. Automobile Technology, 2009(4): 1-3.
- [6] You S, Hahn J, Lee H. New Adaptive Approaches to Real-time Estimation of Vehicle Sideslip Angle [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(12): 1367-1379.
- [7] Melzi S, Sabbioni E. On the Vehicle Sideslip Angle Estimation Through Neural Networks: Numerical and Experimental Results [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2005-2019.
- [8] Melzi S, Resta F, Sabbioni E. Vehicle Sideslip An-

gle Estimation Through Neural Networks: Application to Numerical Data [C]//8th Biennial ASME Conference on Engineering System Design and Analysis. Torino: ASME, 2006:167-172.

- [9] Cheli F, Melzi S, Sabbioni E. An Adaptive Observer for Sideslip Angle Estimation: Comparison with Experimental Results [C]//Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Nevada: ASME, 2007: 1193-1199.
- [10] 赵又群,林菜. 基于 UKF 算法的汽车状态估计 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(5): 615-619.
Zhao Youqun, Lin Fen. Vehicle State Estimation Based on Unscented Kalman Filter algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(5): 615-619.
- [11] Panzani G, Corno M, Tanelli M, et al. Control-Oriented Vehicle Attitude Estimation With Online Sensors Bias Compensation [C]//Proceedings of the ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference. California: ASME, 2009: 819-826.
- [12] 宗长富,潘润,胡丹,等. 基于扩展卡尔曼滤波的信息融合技术在车辆状态估计中的应用 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 272-277.
Zong Changfu, Pan Zhao, Hu Dan, et al. Information Fusion Algorithm for Vehicle State Estimation Based on Extended Kalman Filtering [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 272-277.
- [13] Hsu Y J, Laws S, Gadda C D, et al. A Method to Estimate the Friction Coefficient and Tire Slip Angle Using Steering Torque [C]//2006 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Chicago: ASME, 2006: 515-524.
- [14] Yih P, Ryu J, Gerdes J C. Vehicle State Estimation Using Steering Torque [C]//Proceedings of the 2004 American Control Conference. Boston: 2004: 2116-2121.
- [15] Chen B C, Hsieh F C. Sideslip Angle Estimation Using Extended Kalman Filter [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(S): 353-364.
- [16] Anderson R, Bevely D M. Using GPS with a Model-based Estimator to Estimate Critical Vehicle States [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(12): 1413-1438.
- [17] Yoon J, Peng H. Vehicle Sideslip Angle Estimation Using Two Single-Antenna GPS Receivers [C]//Proceedings of the ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference. Cambridge, MA: ASME, 2010: 863-870.

- [18] Bevely D M, Ryu J, Gerdes J C. 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.
- [19] Hrgetic M, Deur J, Pavkovic D, et al. Adaptive EKF - Based Estimator of Sideslip Angle Using Fusion of Inertial Sensors and GPS[J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2011, 4(1): 700-712.
- [20] Iijima T, Raksincharoensak P, Michitsuji Y, et al. Vehicle Side Slip Angle Estimation Methodology Using a Drive Recorder[J]. JVC/Journal of Vibration and Control, 2010, 16(4): 571-583.
- [21] Harchut F, Mueller - Bessler B. Camera Based Measurement of Side Slip Angle in an Automobile [C]//Proceedings of the ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference. California: ASME, 2009:835-840.
- [22] 李以农, 赵树恩, 米林, 等. 基于强跟踪滤波的车辆非线性状态估计[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009(6): 564-568.
Li Yinong, Zhao Shuen, Mi Lin, et al. Vehicle Nonlinear State Estimation Based on Strong Tracking Filter[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2009, 30(6): 564-568.
- [23] 黄程程. 基于自适应卡尔曼滤波的汽车质心侧偏角估算研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [24] Baffet G, Charara A, Lechner D. Estimation Process for Tire - road Forces and Vehicle Sideslip Angle[C]//4th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Angers: INSTICC Press, 2007:5-10.
- [25] Baffet G, Charara A, Stephant J. Sideslip Angle, Lateral Tire Force and Road Friction Estimation in Simulations and Experiments [C]//Joint 2006 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Computer - Aided Control Systems Design Symposium (CACSD) and International Symposium on Intelligent Control (ISIC). Munich: IEEE, 2007: 903-908.
- [26] 朱绍中, 高晓杰, 余卓平. 极限行驶条件下车辆质心侧偏角观测器设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 1070-1074.
Zhu Shaozhong, Gao Xiaojie, Yu Zhuoping. Vehicle Sideslip Angle Estimation Under Extreme Driving Condition[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(8): 1070-1074.
- [27] 陆丹. 基于卡尔曼滤波的汽车行驶姿态的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2005.
- [28] 林菜, 赵又群. 基于双重扩展自适应卡尔曼滤波的汽车状态和参数估计[J]. 中国机械工程, 2009, 20(6): 750-755.
Lin Fen, Zhao Youqun. Vehicle State and Parameter Estimation based on Dual Extended Adaptive Kalman Filter[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(6): 750-755.
- [29] Antonov S, Fehn A, Kugi A. Unscented Kalman filter for vehicle state estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(9): 1497-1520.
- [30] Doumiati M, Victorino A C, Charara A, et al. Onboard Real-time Estimation of Vehicle Lateral Tire - road Forces and Sideslip Angle[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4): 601-614.
- [31] Solmaz S, Baslamisli S C. A Nonlinear Sideslip Observer Design Methodology for Automotive Vehicles Based on a Rational Tire Model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(5/8): 765-775.
- [32] Cherouat H, Braci M, Diop S. Vehicle Velocity, Side Slip Angles and Yaw Rate Estimation[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2005. Dubrovnik: IEEE, 2005:349-354.
- [33] 王健, 余贵珍, 张为, 等. 基于滑模观测理论的车辆质心侧偏角估算[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(3): 335-341.
Wang Jian, Yu Guizhen, Zhang Wei, et al. Vehicle Sideslip Angle Estimation Based on Principles of Sliding Mode[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(3): 335-341.
- [34] Ouladsine M, Shraim H, Fridman L, et al. Vehicle Parameter Estimation and Stability Enhancement Using the Principles of Sliding Mode[C]//2007 American Control Conference. New York: IEEE, 2007:5224-5229.
- [35] 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 基于改进 RBF 网的汽车侧偏角估计方法试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 105-110.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Experimental Research on Vehicle Sideslip Angle Estimation Based on Improved RBF Neural Networks [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 105-110.
- [36] Broderick D J, Bevely D M, Hung J Y. An Adaptive Non-linear State Estimator for Vehicle Lateral Dynamics[C]//35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Porto: IEEE Computer Society, 2009:1450-1455.
- [37] 施树明, Lupker Henk, Bremmer Paul, 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 Side Slip Angle Based on Fuzzy Logic[J]. *Automotive Engineering*, 2005, 27(4): 426-430.
- [38] 杨财, 宋健, 黄全安, 等. 车身侧偏角实用算法仿真[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(6): 482-485.
- Yang Cai, Song Jian, Huang Quanan, et al. Practical Algorithm Simulation for Vehicle Side Slip Angle[J]. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 2008, 29(6): 482-485.
- [39] 林菜, 赵又群, 徐朔南. 基于粒子滤波算法的汽车状态估计技术[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 23-27.
- Lin Fen, Zhao Youqun, Xu Shuonan. Vehicle States Estimation Technology Based on Particle Filter Algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2011, 42(2): 23-27.
- [40] Milanese M, Regruto D, Fortina A. Direct Virtual Sensor (DVS) Design in Vehicle Sideslip Angle Estimation[C]//2007 American Control Conference. New York: IEEE, 2007: 3654-3658.
- [41] Canale M, Fagiano L, Novara C. Vehicle Side-slip Angle Estimation Using a Direct MH Estimator[C]//2010 IEEE International Conference on Control Applications. Yokohama: IEEE, 2010: 167-172.
- [42] Canale M, Fagiano L, Novara C. A Direct Moving Horizon Approach to Vehicle Side-slip Angle Estimation[C]//2010 49th IEEE Conference on Decision and Control. Atlanta: IEEE, 2010: 2898-2903.
- [43] 时艳茹. 基于 UKF 滤波的汽车纵向和侧向速度估计算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [44] 耿师导, 张春熹, 杨功流. 惯性信息状态观测器在车辆稳定系统中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(4): 138-140.
- Geng Shidao, Zhang Chunxi, Yang Gongliu. Application of State Observer on Inertia information in The Vehicle Stability System[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(4): 138-140.
- [45] 宗长富, 胡丹, 杨肖, 等. 基于扩展 Kalman 滤波的汽车行驶状态估计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2009, 39(1): 7-11.
- Zong Changfu, Hu Dan, Yang Xiao, et al. Vehicle Driving State Estimation Based on Extended Kalman Filter[J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2009, 39(1): 7-11.
- [46] 郭洪艳, 陈虹, 丁海涛, 等. 基于 Uni-Tire 轮胎模型的车辆质心侧偏角估计[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(9): 1131-1139.
- Guo Hongyan, Chen Hong, Ding Haitao, et al. Vehicle Sideslip Angle Estimation Based on Uni-Tire Model[J]. *Control Theory and Applications*, 2010, 27(9): 1131-1139.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 郑智忠, 李亮, 杨财, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的汽车质心侧向速度观测器[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(5): 1-5.
- Zheng Zhizhong, Li Liang, Yang Cai, et al. Vehicle Lateral Velocity Observer Using Extended Kalman Filter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(5): 1-5.
- [50] 陈无畏, 刘翔宇, 黄鹤, 等. 车辆转向工况下的路面附着系数估计算法[J]. *汽车工程*, 2011, 33(6): 521-526.
- Chen Wuwei, Liu Xiangyu, Huang He, et al. An Algorithm for Estimating Road Adhesion Coefficient in Vehicle Steering Condition[J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(6): 521-526.
- [51] Ryan J, Lu J, Bevely D. State Estimation for Vehicle Stability Control: A Kinematic Approach Using Only GPS and VSC Sensors[C]//ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference. Cambridge: ASME, 2010: 773-780.
- [52] 张素民. 基于 GF-INS 和 GPS 的汽车状态信息测试系统算法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [53] 毕春光. 极限工况下汽车质心侧偏角的估计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [54] 武建勇, 唐厚君, 欧阳涛, 等. 基于 AFS 与 DYC 集成控制提高车辆操纵稳定性的研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(5): 1227-1232.
- Wu Jianyong, Tang Houjun, Ou Yangtao, et al. Improving Vehicle Handling Performance and Stability by Integrated Control of Active Front Steering and Direct Yaw Moment[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(5): 1227-1232.

(编辑 郭伟)

作者简介: 林 菜, 男, 1980 年生。南京航空航天大学车辆工程系副教授。主要研究方向为汽车动力学与控制。发表论文 10 余篇。黄 超, 男, 1988 年生。南京航空航天大学车辆工程系硕士研究生。