

## 汽车行驶状态参数估计研究进展与展望

郭洪艳<sup>1,2</sup>, 陈虹<sup>1,2†</sup>, 赵海艳<sup>2</sup>, 杨斯琦<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春吉林 130025; 2. 吉林大学控制科学与工程系, 长春吉林 130025)

**摘要:** 准确而实时地获得汽车的行驶状态参数信息是实现汽车主动安全控制的关键问题, 也是车载故障诊断的重要技术之一. 随着估计理论的发展, 利用车辆上已装备的传感器获得汽车行驶状态信息, 进行汽车行驶状态参数估计是近年来的研究热点. 本文首先给出汽车系统中需要进行估计的状态参数的分类及现有估计方案; 然后对现有的各种汽车行驶状态参数估计方法加以综述, 并分析了各种方法在汽车行驶状态参数估计方面的优缺点; 最后对汽车行驶状态参数估计的进一步研究提出几点展望.

**关键词:** 状态参数估计; 车速估计; 扩展卡尔曼滤波; 估计方案; 滚动时域估计

中图分类号: TP29 文献标识码: A

## State and parameter estimation for running vehicle: recent developments and perspective

GUO Hong-yan<sup>1,2</sup>, CHEN Hong<sup>1,2†</sup>, ZHAO Hai-yan<sup>2</sup>, YANG Si-qi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China;  
2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China)

**Abstract:** In the active safety control and fault diagnosis for a running vehicle, it is critical to accurately estimate its operation state and parameter information in real-time from the equipped sensors. We list the required states and parameters of a running vehicle and review the existing schemes for their estimation. Some of the schemes are investigated on their advantages and disadvantages. Some perspective researches in this respect are pointed out.

**Key words:** states and parameters estimation; vehicle velocity estimation; extended Kalman filter; estimation schemes; moving horizon estimation

### 1 引言(Introduction)

自20世纪90年代开始, 随着信息技术在汽车行业广泛深入的应用, 人们对汽车的操纵稳定性和主动安全性要求越来越高. 特别是近年来, 伴随着汽车动力学仿真与控制技术、计算机技术及智能化信息处理技术的发展, 研究人员相继开发出基于汽车纵向控制的制动防抱死系统(anti-lock brake system, ABS)<sup>[1-2]</sup>和牵引力控制系统(traction control system, TCS)<sup>[3-4]</sup>; 基于侧向控制的侧向稳定性控制系统(electric stability program, ESP)<sup>[5-6]</sup>和电动助力转向系统(electric power steering, EPS)<sup>[7]</sup>; 基于汽车垂向控制的主动悬挂阻尼控制系统(active damping control, ADC)<sup>[8]</sup>和主动车身控制系统(active body control, ABC)<sup>[9]</sup>等能有效提高主动安全性能的汽车底盘稳定性电控系统. 汽车电控系统大多根据汽车行驶状态来实施相应的控制逻辑. 通常汽车的行驶状态是通过车载传感器直接测量得到的, 但由于汽

车行驶工况十分复杂, 车载传感器的测量精度、生产成本因素等多方面的原因, 很多汽车行驶状态信息都无法通过带有标准配置的车载传感器直接测量得到. 同时车载传感器也存在着标定误差和温度漂移误差, 这些问题限制了汽车主动安全控制技术的发展. 目前实现精确控制汽车的状态信息的不完全性已成为制约汽车控制系统发展的瓶颈问题. 因此, 准确而实时地获取汽车行驶过程中的状态信息是汽车电子控制系统研究的关键问题, 也是实现闭环控制的前提和必要条件. 不仅如此, 准确地获得汽车行驶状态, 也可为车载故障诊断系统的实时监控和预警提供快速准确的信息<sup>[10]</sup>.

在研究初期, 很多学者通过在汽车中配置特殊传感器来获得汽车行驶状态信息. 例如: 使用光学传感器测量路面对光的吸收和散射情况以识别路面上的水和其他降低轮胎/路面摩擦系数的物质, 从而得出轮胎/路面摩擦系数的变化<sup>[11-12]</sup>; 通过特殊装置向地

收稿日期: 2012-11-23; 收修稿日期: 2013-05-17.

†通信作者. E-mail: chenh@jlu.edu.cn; Tel.: +86-430-850954831.

基金项目: 国家“973”课题资助项目(2012CB821202); 教育部创新团队资助项目(IRT1017); 国家“863”计划资助项目(2012AA11071); 吉林大学基本科研业务费资助项目; 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室开放基金重点项目.

面发射波束,由相应传感器接收路面的反射波,并对反射波做频谱分析,根据频谱分析差异识别路面的种类<sup>[13]</sup>.这些方法在一定条件下能够较为准确的获得汽车状态信息.但是,由于传感器对工作环境要求十分苛刻,而且受外部的影响因素较多,加之生产成本过高等原因,使得这些传感器不能在汽车中得到推广使用.随着估计理论的发展,研究人员更倾向于利用车辆上已装备的传感器获得汽车行驶状态信息,进行汽车状态参数估计,这是汽车主动安全控制的关键技术之一.

本文介绍近年来汽车行驶状态参数估计的研究进展,明确汽车中需要进行估计的状态参数及现有估计方案.讨论各种汽车行驶状态参数的估计方法,分析各种方法在汽车行驶状态参数估计方面的优缺点,并对今后汽车行驶状态参数估计有待研究的问题提出几点展望.

## 2 汽车行驶状态参数估计分类及方案 (Classification and schemes of vehicle states and parameters estimation)

### 2.1 状态参数估计分类(Classification of states and parameters estimation)

汽车行驶状态参数估计可以理解为通过量产汽车中配置的车载传感器测量得到的车辆信息,通过多传感器数据融合技术,得到不可直接测量或直接测量成本昂贵的目标信号的估计值.它是智能化信息处理技术在汽车工程领域的具体应用,属于机械系统动力学、信息处理技术、自动控制系统与仿真技术及状态估计以及系统辨识技术等交叉学科研究问题.汽车行驶状态参数估计包括汽车自身的状态估计、汽车自身参数估计和道路参数估计,其中汽车自身状态的估计分为车体状态估计和轮胎状态估计两个部分.车体状态估计包括:汽车纵向和侧向速度估计、横摆角速度估计、车体质心侧偏角估计、侧倾角估计、俯仰角估计;轮胎状态估计包括:轮胎力估计、轮胎侧偏角估计、轮胎法向力估计;汽车自身参数估计包括:汽车的质量、轮胎的侧偏刚度估计;道路参数估计包括:轮胎/地面摩擦系数估计、路面倾斜角和路面坡度估计.

虽然为保证汽车的稳定性需要估计的状态参数较多,但并不是所有的汽车稳定性控制系统中都需要这些状态参数.汽车行驶状态参数估计强烈依赖于汽车系统中的车载传感器配置情况以及汽车稳定性控制系统中对汽车行驶状态的控制需求<sup>[14]</sup>.也就是说对于安装了不同稳定性控制系统的车辆,需要估计的汽车行驶状态参数是不同的<sup>[15]</sup>.例如在安装了ABS系统的A级车中,安装了标准配置的轮速

传感器、方向盘转角传感器、发动机转速传感器,另外有一些A级车中还配置了轮缸压力传感器和发动机转矩传感器<sup>[16]</sup>,此时汽车行驶状态参数的估计是为了满足ABS系统的纵向控制需求,在ABS控制算法中一个非常重要的要素就是对汽车纵向速度的测量或估计,因此根据上述传感器测量信息,只要能够精确地估算汽车的纵向速度即可满足ABS系统控制设计需要;在安装了ESP系统的B级车中,除上述传感器以外,还配置了侧向加速度传感器和横摆角速度传感器.此时汽车行驶状态参数的估计主要是为ESP系统的设计提供控制变量.因此需要根据带有标准配置的传感器信息,得到汽车的纵向和侧向速度、横摆角速度以及车体质心侧偏角的精确估计.对于C级车中装备的主动车身控制系统,它使得汽车对侧倾、俯仰、横摆、跳动的控制更加迅速准确,此时为了满足主动车身控制系统的设计需求,除了需要获得汽车纵向和侧向速度、横摆角速度、车体质心侧偏角的精确估计值外,还需要为每个车轮增加位置传感器和弹簧绕度传感器,从而准确的估计出汽车俯仰角、侧倾角以及路面倾斜角等状态参数,从而为主动车身控制系统的设计提供控制变量<sup>[15]</sup>.

### 2.2 状态参数估计方案(Existing schemes of states and parameters estimation)

从车辆动力学分析可以看出,各个汽车行驶状态之间耦合现象较为严重.图1给出了各个行驶状态间的相互关系.从图中可以看出,汽车行驶过程中,各个状态变量之间互相影响.以汽车的纵向运动为例,将前轮转角 $\delta$ 、路面倾斜角 $\theta_r$ 和路面坡度 $\theta_q$ 作为汽车纵向运动的输入,同时,各个轮胎的纵向力 $F_{x_i}$ 、侧向力 $F_{y_i}$ 对于汽车的纵向运动来说也是输入信息.另外,汽车的纵向运动受到侧向运动 $v_y$ 、垂向运动 $v_z$ 、横摆运动 $r$ 、侧倾运动 $p$ 和俯仰运动 $q$ 的影响,不仅如此,车体的侧向运动、垂向运动、横摆运动、侧倾运动和俯仰运动也受到纵向运动的影响.因此,它们之间存在动力学上耦合关系.再分析轮胎的力学特性,它与汽车的纵向运动 $v_x$ 、侧向运动 $v_y$ 、垂向运动 $v_z$ 、横摆运动 $r$ 、侧倾运动 $p$ 、俯仰运动 $q$ 存在动力学耦合关系,同时受最大轮胎/路面附着系数 $\mu_p$ 、路面倾斜角 $\theta_r$ 和路面坡度 $\theta_q$ 的影响.同时,车辆的质量 $m$ ,轮胎前后轮的侧偏刚度 $C_f$ 、 $C_r$ 以及汽车质心变化引起的汽车距离前、后轴的距离 $a$ 、 $b$ 等参数的变化都会引起轮胎力的变化.由于汽车行驶状态之间存在严重的耦合,这使得汽车各个方向的运动非线性较强.同时,汽车的行驶状态又受到参数变化的影响,这使得对于一个行驶状态或参数的估计往往涉及其他几个行驶状态和路面参数的估计.

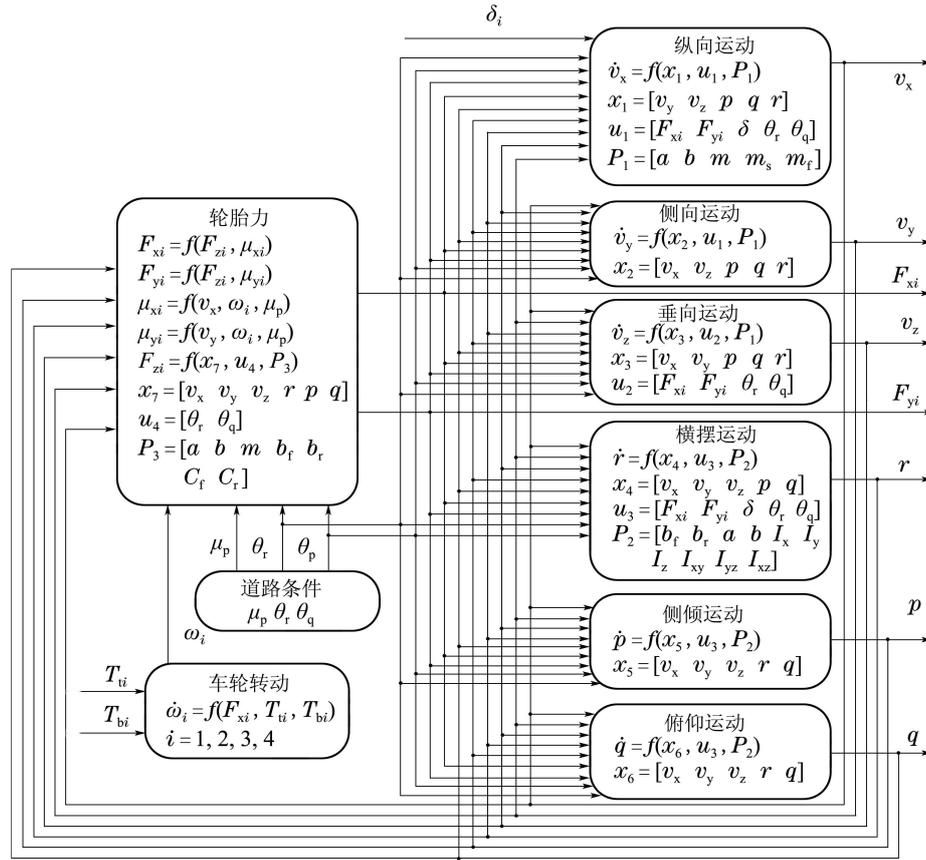


图 1 汽车行驶状态参数间的耦合关系

Fig. 1 The coupled relationship between vehicle states and parameters

虽然汽车行驶状态间的耦合使得汽车行驶状态参数估计变得困难,但是制定合理的估计方案对于估计问题简化,得到准确的估计结果具有重要意义.对于汽车行驶状态参数估计,目前主要存在两种方案:整体估计和模块化估计.

汽车行驶状态参数整体估计方案首先根据汽车操纵稳定性和主动安全控制需求,对车辆模型进行必要简化.在此基础上,同时考虑车体运动、轮胎力学特性及路面条件,然后采用各种不同的估计方法同时得到汽车操纵稳定性和主动安全控制所需的行驶状态参数的估计值.图2为文献[17]中采用的汽车行驶状态参数整体估计方案,该方案考虑汽车的纵向运动、侧向运动、横摆运动、侧倾运动以及4个车轮的转动,以此建立8自由度车辆动力学模型,同时采用随机游走模型将轮胎力扩展到8自由度汽车动力学模型中,通过传感器测量得到的横摆角速度、纵向加速度、侧向加速度以及各个车轮的轮速作为测量输出,通过扩展卡尔曼滤波方法得到车辆纵向速度 $v_x$ 、侧向速度 $v_y$ 、横摆角速度 $r$ 、侧倾角速度 $p$ 及轮胎纵向力 $F_{xi}$ 和侧向力 $F_{yi}$ 的估计值,并通过辨识得到轮胎/路面附着系数.

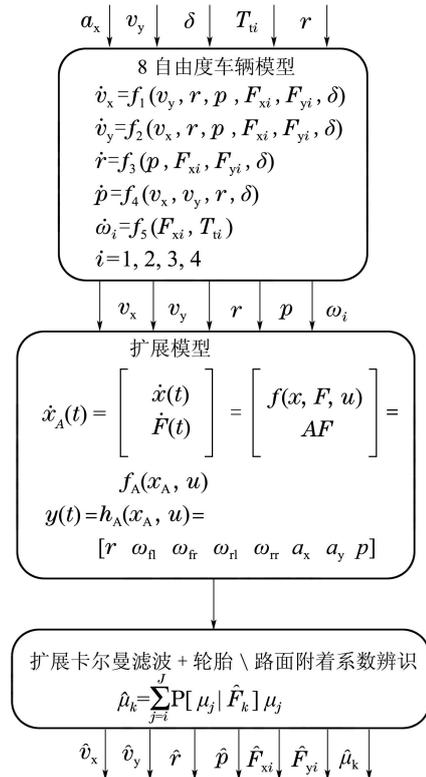


图 2 汽车行驶状态参数整体估计方案示例

Fig. 2 The example of overall schemes of vehicle states and parameters estimation

文献[18]考虑汽车的纵向运动,侧向运动及横摆运动3个自由度,同时将路面附着系数扩展到汽车动力学方程中,采用非线性估计方法在轮胎/路面附着系数自适应的基础上对汽车纵向速度、侧向速度、横摆角速度及轮胎/路面附着系数进行整体估计.文献[19]也对车辆的纵向速度、侧向速度和横摆角速度进行了整体估计.汽车行驶状态参数整体估计方案,可以通过设计一个观测器或估计器同时估计出需要的估计量,观测器或估计器的结构较为简单.但是由于需要同时考虑与操纵稳定性和主动安全控制相关的所有状态变量,因此这种估计方案所使用的模型一般阶次较高.另外,道路参数如路面倾斜角、路面坡度等作为汽车动力学方程的未知输入信息,对其估计往往需要将其扩展到动力学方程中<sup>[17,20]</sup>,这使得用于设计估计器或观测器的模型阶次更高.较高的模型阶次不利于估计器或观测器的实时计算,也使得实车应用面临一定的挑战.

汽车行驶状态参数模块化估计方案首先根据汽车稳定性控制的控制需求,确定汽车稳定性控制中需要考虑的汽车行驶状态参数.然后,分析汽车行驶状态之间的动力学关系,将耦合较弱或无耦合的行驶状态从动力学方程中分离出来,从而形成各个汽车动力学模块.在分析车载传感器的安装位置及估计器的节点位置基础上,根据每个模块不同的估计目标,分别设计观测器或估计器.在得到一个状态参数的估计值后,将其作为下一模块的输入,设计下一模块的观测器或估计器.使用模块化估计方案各个模块所使用的估计方法可以不同,并且各个模块之间可以有估计值的交替使用.图3为文献[19]中采用的模块化估计方案.该方案考虑由横摆运动和侧向运动产生的科氏加速度对于纵向运动的影响较小,所以将其作为扰动以此实现纵向动力学和侧向动力学的解耦.然后采用模块化估计方案,根据车载传感器测量得到的纵向加速度、侧向加速度、横摆角速度以及各个车轮的轮速信息,分别设计纵向车速观测器和侧向车速及横摆角速度观测器,从而实现对纵向车速、侧向车速以及横摆角速度的估计.为分析整个车速观测器的稳定性,首先以科氏加速度作为扰动输入,通过输入-状态稳定理论(input-to-state stability, ISS)对纵向车速观测器的稳定性进行了分析,然后以纵向车速估计误差作为侧向车速估计误差系统的输入,通过ISS理论分析得到侧向车速估计误差系统是输入-状态稳定的.接下来,将科氏加速度作为整个级联观测器的输入,将纵向

车速的估计值作为侧向车速观测器的输入,从而构成级联观测器.并通过理论分析,得出在幅值有界的科氏加速度作为级联观测器扰动输入的情况下,整个级联观测器是输入-状态稳定的结论.

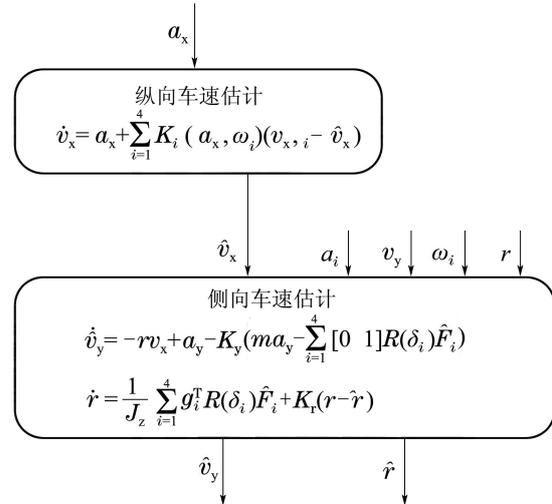


图3 汽车行驶状态参数模块化估计方案示例

Fig. 3 The example of modular schemes of vehicle states and parameters estimation

汽车行驶状态参数模块化估计方案,可以根据各个动力学模块的不同估计需求,设计不同的观测器或估计器,设计方法较为灵活多样.然而模块化估计方案的具体制定,取决于待估计的状态参数,车载传感器的安装位置以及通过分析车载网络架构系统确定的估计器的节点位置.另外,模块化估计的整体稳定性问题需要详细讨论.

无论采用整体估计方案还是模块化估计方案,在对道路参数进行估计时,由于道路信息作为汽车动力学的未知输入,采用参数辨识或自适应方法对道路参数估计时,只有在较大的转向操作、加速及制动操作并且持续较长时间时,即对观测器持续激励足够长时间,才能得到较为准确的道路参数.这也是在进行汽车行驶状态参数估计时需要注意的问题.

### 3 汽车行驶状态参数估计方法(Methods of vehicle states and parameters estimation)

汽车作为运动体的一种,其行驶状态参数估计存在较多方法,从所使用的车辆模型上来说,与飞行器运动体类似,可分为基于运动学模型的估计方法和基于动力学的估计方法.作为飞行器的一种,汽车的运动学及动力学建模机理与飞行器等类似,均是基于牛顿第二定律及转矩平衡方程建立的.但是由于飞行器与地面不接触,地面对飞行器没有任何影响;同时飞行器的速度较高,空气

阻力对其运动状态有着重要影响. 所以在飞行器的建模过程中, 需要重点考虑空气动力学的影响. 而汽车通过轮胎与地面接触, 轮胎与路面的摩擦作用是汽车前进的主要动力. 同时汽车的速度较低, 空气阻力对其影响较小, 大多情况下(出隧道口情况除外)可以忽略. 所以, 汽车和飞行器在建模时的主要考虑的因素是不同的. 其次与飞行器相比, 汽车状态参数估计过程中, 需要对轮胎力、与轮胎相关的参数和路面输入信息进行估计, 而飞行器不需要对这些信息进行估计. 再次, 由于测量精度与测量范围的不同, 汽车和飞行器中所使用的传感器类型是不同的. 下面对基于运动学模型和基于动力学模型的汽车行驶状态参数估计方法做以介绍.

### 3.1 基于运动学模型的估计方法(Estimation method based on kinematics model)

基于运动学模型的估算方法, 其实质是利用传感器得到的测量数据, 通过运动学关系得到汽车状态参数的估计. 文献[21-23]利用侧向加速度 $a_y$ 、横摆角速度 $r$ 与侧向速度变化率 $\dot{v}_y$ 之间的关系:

$$\dot{v}_y = -v_x r + a_y. \quad (1)$$

通过对侧向速度变化率积分

$$v_y = \int \dot{v}_y = \int (-v_x r + a_y) dt, \quad (2)$$

获得车辆侧向速度; 文献[24-25]在考虑到车辆的纵向加速度的动态变化比较缓慢的情况下, 忽略了纵向加速度的作用, 利用质心侧偏角速度 $\dot{\beta}$ 、横摆角速度 $r$ 、侧向加速度 $a_y$ 、纵向速度 $v_x$ 和路面倾角 $\theta_r$ 之间的关系

$$a_y = (\dot{\beta} + r)v_x - g \sin \theta_r. \quad (3)$$

通过对质心侧偏角速度的积分可直接得到车辆的质心侧偏角的估计值

$$\hat{\beta}_{\text{kin}} = \int \dot{\beta}_{\text{kin}} dt = \int \left( \frac{a_y + g \theta_r}{v_x} - r \right) dt. \quad (4)$$

基于运动学的估计方法是对汽车状态参数的直接积分方法, 对车辆模型要求很低, 但是需要额外的积分操作, 同时对传感器信号要求较高. 由于这种方法中包含的汽车参数较少, 所以这种方法对于车辆参数、轮胎路面条件和驱动操作等变化具有较强的鲁棒性. 但这种方法不适合较长时间使用, 因为它不但将有用的传感器信号进行了积分, 而且将噪声信号也进行了积分, 因此随时间增加, 累积误差将不断增大, 特别是在路况较差的行驶条件下, 由于车载传感器给出的测量信号信噪比很

低, 无法获得准确的估计值.

### 3.2 基于动力学模型的估计方法(Estimation method based on dynamics model)

#### 3.2.1 Kalman滤波方法(Kalman filter method)

卡尔曼滤波方法是汽车行驶状态参数估计的一种基本方法. 该估计算法是一种具有数值解的预估-校正算法, 整个滤波器由预估方程(时间更新方程)和校正方程(测量更新方程)构成.

预估方程与车辆动力学模型相结合, 向前推算当前时刻的汽车行驶状态参数和误差协方差的先验估计值, 并及时地投射到校正方程. 利用车辆系统中新测量得到的输出变量, 通过校正方程构造改进的后验估计, 得到当前时刻的状态估计值. 文献[26]基于二自由度车辆动力学模型, 利用自适应Kalman滤波方法实现了横摆角速度的线性最小均方误差估计. 文献[27]利用车辆的轮速信号, 基于自适应卡尔曼滤波算法对ABS控制中的参考车速进行估计. 该方法具有较高的自适应性, 在逻辑门限值选取合适的情况下, 可以达到较高的精度. 类似地, 文献[28-30]利用Kalman滤波方法对常规工况下车辆侧向速度进行估计. 文献[31]利用重型车辆中安装的传感器测量得到车辆速度、路面高度和GPS定位信息, 将发动机输出扭矩作为输入信号, 基于Kalman滤波方法讨论了路面坡度估计问题. 通过以上文献的研究可以得出: Kalman滤波方法适合于车辆在常规工况(线性区)下运行时的汽车行驶状态参数估计.

但是, 车辆的运行工况极其复杂, 当车辆运行于极限工况(非线性区)下时, 车辆表现出较强的非线性, 此时采用线性模型描述车辆动态变化, 与实际运行状况存在较大偏差. 因此, Kalman滤波器的性能极大地降低, 甚至出现发散现象. 此时可以采用非线性车辆模型描述车辆系统, 相应地, 可以采用扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)方法进行汽车行驶状态参数的估计<sup>[32-42]</sup>. 该方法围绕状态估计值对非线性模型进行一阶Taylor展开, 然后应用线性卡尔曼滤波方法对汽车行驶状态参数进行估计. 文献[32-33]采用扩展卡尔曼滤波方法对车辆的纵向速度、侧向速度和横摆角速度进行估计, 由此得到了车辆纵向轮胎力和轮胎/路面摩擦系数的估计值, 在此基础上分别得到了路面坡度和车辆质心侧偏角的估计值. 文献[34]基于两自由度非线性动力学车辆模型, 采用扩展卡尔曼滤波方法讨论了质心侧向速度的实时估计问

题. 文献[35]采用变结构自适应卡尔曼滤波方法讨论了车体质心侧偏角估计问题. 文献[36-38]将轮胎力的状态矢量增广到车辆状态方程中, 然后对增广后的状态方程和观测器方程进行扩展卡尔曼滤波估计, 递推滤波计算过程实现了对轮胎力做最小均方误差估计. 文献[39]在得到轮胎力最小均方误差估计的基础上, 进一步得到了汽车的质心侧偏角和轮胎侧偏刚度的有效估计. 对于采用EKF方法进行汽车状态估计时参数变化的情况, 文献[40]引入交互式多模型算法(interacting multiple model, IMM)处理轮胎/路面摩擦系数和摩擦力的变化. 文献[41]利用两个扩展卡尔曼滤波器并行运行的方法, 解决了估计过程中汽车参数发生变化对估计结果的影响. 文献[42]也采用参数(侧偏刚度)自适应EKF方法, 降低了在轮胎力估计过程中轮胎非线性特性对估计精度的影响. 利用扩展卡尔曼滤波进行汽车状态参数估计时, 可采用与实际车辆系统更加接近的非线性车辆动力学模型, 同时滤波器的实现过程采用递推解的形式, 使得计算简化, 容易实现, 因而能得到比较精确的估计效果. 由于以上原因EKF已经成为研究人员广泛采用的汽车状态参数估计方法. 但是扩展卡尔曼滤波方法也存在一些缺点. 首先, 扩展卡尔曼滤波的估计精度依赖于轮胎与路面附着情况, 如果路面的附着系数发生变化, 就需要重新整定EKF的参数<sup>[43]</sup>. 此工作需要的计算量较大, 不利于实时应用. 其次, 由于EKF是使用当前估计值对非线性模型进行线性化后应用Kalman滤波进行估计, 因此该方法适合于弱非线性系统的状态估计. 对于个别非线性极强的极限工况, EKF的性能极不稳定, 滤波器性能还有待进一步提高, 这也是采用EKF方法进行汽车行驶状态参数估计, 在实车应用中有待解决的关键问题.

### 3.2.2 智能估计方法(Artificial intelligent estimation method)

基于智能技术的汽车行驶状态估计方法是在常规估计的基础上, 结合智能的方法产生的. 它的产生、发展始终以常规估计方法的成果为基础和动力. 常规方法与智能方法结合, 极大地推动了汽车行驶状态参数估计技术的发展. 在众多的智能方法中, 神经网络和模糊逻辑是最受关注的两种方法.

神经网络是对人的神经系统智能活动过程研究和模拟的结果. 文献[44]采用神经网络方法将车辆的质心侧偏角看作横摆角速度和侧向加速

度时间序列的映射, 根据神经网络的逼近理论, 任一个非线性函数可由一个带有理想权值和充分多作用函数的神经网络充分逼近. 因此, 选取三层神经网络建立质心侧偏角和横摆角速度、侧向加速度的映射关系, 其中前两层选用对数双弯曲函数, 输出层选用线性函数, 权重值根据试验数据计算得到. 该方法用神经网络代替了未知的非线性函数, 网络的权值能够基于稳定的要求自适应学习, 因此可以得到较好的估计效果. 但是, 应用该方法时对试验数据的完整性要求较高, 即用于训练神经网络的试验数据应包含车辆运行的各种工况. 文献[45]利用神经网络的自适应特性, 基于单轮模型, 采用两层径向基函数(radial basis function, RBF)网络逼近系统中的未知部分, 然后设计如下的神经网络观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bf_n(y, u)D\hat{x} + B\hat{\beta}f_{\omega n}(y)D\hat{x} + \\ \quad B\hat{W}_2\phi(y, u)D\hat{x} + Ru + Ey + K(y - \hat{y}), \\ \hat{y} = C\hat{x}, \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $A, B, C, E, R$ 为常数矩阵,  $K$ 为反馈矫正增益,  $W_2$ 为神经网络增益权值,  $\beta$ 表示参数变化的向量因子. 类似于广义Luenberger观测器的稳定性分析, 文献[45]基于状态估计误差 $\tilde{x}$ 和权值误差 $\tilde{W}$ , 设计Lyapunov函数, 给出神经网络权值调整的自适应律 $\dot{\hat{W}}, \dot{\hat{\beta}}$ , 以补偿摩擦力模型不确定性对估计器精度的影响.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{W}}_2 &= P_W^{-1}\hat{y}\hat{x}^T\phi^T(y, u), \\ \dot{\hat{\beta}} &= \gamma^{-1}\hat{y}f_{\omega n}(y)D\hat{x}, \end{aligned}$$

其中:  $P_W$ 是正定对称矩阵,  $\gamma$ 是正向量系数. 文献[46]以方向盘转角作为输入, 以横摆角速度、侧向加速度和4个车轮的轮速为状态变量, 建立车辆动力学模型, 然后采用神经网络方法对车辆的质心侧偏角进行估计. 神经网络方法具有较强的自学习能力、自适应能力、复杂的关系映射能力等智能处理能力, 适合处理只知道输入输出数据的非线性对象. 应用该方法在汽车行驶状态参数估计方面获得了较好的试验结果, 尤其是在汽车运行的非线性区域. 但是, 神经网络估计方法很难对映射关系进行机理性解释, 而且映射关系对试验数据具有很强的依赖性. 另外, 该方法收敛速度慢、数值稳定性差、工程实现困难, 而且估计精度不甚理想.

模糊逻辑模仿人脑的不确定性概念判断, 运用无穷连续值的模糊集合研究模糊对象. 文献[46]将方向盘转角、车轮转速、侧向加速度和横摆角速

度等信息融合,利用模糊逻辑描述系统状态,通过具体的模糊逻辑规则计算状态的权重值.进而得到了车辆的速度和质心侧偏角的估计.文献[47]采用模糊逻辑方法对车轮侧偏角进行估计,并与Kalman滤波方法进行比较,同时讨论了应用此方法估计路面坡度的可行性.文献[48]应用非线性T-S模糊模型设计车辆质心侧偏角和横摆角速度的观测器.文献[49]根据带有ESP配置的车辆上安装的标准车载传感器,首先采用模糊逻辑方法估计车辆的纵向速度及纵向加速度,然后应用卡尔曼滤波方法估计车辆速度.模糊逻辑方法不需要对输入信号进行任何特殊假设,对车辆动力学参数和噪声信号具有鲁棒性和精确性好、响应频率高的优点,适合估计非线性对象的状态参数<sup>[50]</sup>.同时,该方法实时性好,而且易于融入工程师的经验.但是,该方法对参数权重值的选择在很大程度上依赖于经验,没有定性的规则可供参考.由于汽车的运行工况多种多样,非常复杂,因此,建立完备的模糊规则通常是非常困难的.由于模糊规则的缺失,不能满足主控制逻辑的完备性要求,因而该方法在工程应用上还有一定的困难.

### 3.2.3 观测器方法(Observers method)

对于确定性车辆系统,状态参数估计问题可转化为状态观测器的设计问题.状态观测器的设计和算法不同于EKF,一般没有状态一步预测和输出一步预报过程,但同样是基于系统测量得到的输入和输出信号估计其状态.基于观测器的估计方法常采用线性Luenberger观测器对汽车行驶状态参数进行估计.如文献[51]基于二自由度线性模型设计车辆质心侧偏角和横摆角速度观测器.该方法在车辆运行的线性区域得到了较好的试验结果,但是随着车辆速度的增加,观测器的精度逐渐降低.这主要是由于汽车行驶状态参数估计的效果与所采用的车辆模型有很大关系,所以研究人员逐渐采用非线性车辆动力学模型,运用非线性观测器进行汽车行驶状态参数估计.相应地,这方面的文献不断涌现.文献[15, 19, 51–52]基于非线性观测器的估计方法,把车辆模型与真实车辆并行运行,将真实车辆的输入作为模型输入,设计了非线性汽车行驶速度以及横摆角速度观测器.

为了补偿模型误差对估计结果的影响,状态观测器对已知车辆行驶状态进行估算,将估算结果与测量结果之差作为反馈,用来修正估计结果.并将其应用于实车试验得到了令人满意的效果.文献[18]在路面附着系数自适应变化的情况

下,采用非线性观测器讨论了质心侧偏角的估计问题.文献[53–56]用类似的方法最终得到了汽车的质心侧偏角的估计.非线性观测器方法使用非常灵活,可以基于不同的汽车模型设计各种不同的观测器,对于常规工况和极限工况下汽车行驶状态参数估计均取得了较好的试验结果,因此该方法具有进一步研究的价值.同时该方法计算量小,可满足实时性要求,非常适合实车应用.但是观测器反馈增益的选择依赖于大量的试验数据;对于模型参数的变化问题,观测器的鲁棒性有待提高.文献[57]使用在非线性系统控制和估计问题中广泛采用的T-S模糊模型,基于经典的凸插值Luenberger观测器,采用对于参数不确定性和外部扰动具有鲁棒性的滑模观测器技术克服车辆动力学模型中不确定性的影响,并使用二次Lyapunov函数对滑模观测器的稳定性进行分析,最后以LMI形式给出了观测器渐近稳定的充分条件.文献[58–59]以估计输出和测量输出的误差为输入,采用三阶滑模观测器估计车轮转速和轮胎纵向力,同时采用超螺旋算法设计了车辆质心侧偏角、车辆速度、横摆角速度的滑模观测器,并应用车辆仿真软件veDyna进行了验证,实验表明该方法能够快速收敛到车辆状态真值.文献[60]使用汽车横摆角速度传感器和车速传感器,采用滑模观测器方法对车体质心侧偏角进行估计,并采用实车试验进行了验证,取得了较好的效果.文献[61]采用滑模观测器对道路倾斜角进行了估计,在此基础上,对汽车的侧倾稳定性进行了讨论.文献[62–63]采用滑模观测器分别对汽车的侧向速度和轮胎力进行了估计.滑模观测器的计算量较小,设计和实现简单,可以通过强制系统状态进入滑动模态来重构系统状态.同时,滑模观测器也继承了变结构控制固有的对参数不确定性、模型误差和干扰具有鲁棒性的优点.但是,滑模观测器中滤波时间常数的选择既要足够小以尽可能保留系统中的慢变部分,又要充分大来滤除高频噪声对系统的影响.因此,滤波时间常数的选择比较困难;同时,与非线性观测器方法类似,观测器增益的选择需要反复进行大量的试验,以满足车辆在不同运行工况下对状态参数估计的准确性要求.

### 3.2.4 最优化估计方法(Optimal estimation method)

最小二乘估计(least-square estimation, LES)通过最小化误差的平方和找到一组数据的最佳函数匹配.递推最小二乘(recursive least squares,

RLS)是最小二乘的递推形式,最适合用于参数的在线估计.为克服较长时间计算后带来的数据饱和问题,一般引入遗忘因子降低前面数据的影响.文献[64]采用带多重遗忘因子的自回归递推最小二乘算法,讨论了车辆质量和路面坡度的在线辨识问题.文献[65]以侧向加速度、转向盘转角、横摆角速度和车速作为输入,给出轮胎的前后侧偏刚度的递推最小二乘算法.文献[66]分别对车辆的轮胎力和滑移率进行估计,从而得到滑移率与归一化的轮胎纵向力之间的关系.在此基础上,采用递推最小二乘方法,对路面附着系数进行辨识.最小二乘估计结构简单,通过引入遗忘因子或采用辅助变量等方法可以较好的克服汽车参数估计中数据饱和的影响.但是由于实际发动机的燃烧及路面的质量问题,使得车辆系统中往往存在高频振动.并且由于噪声信号为有色噪声时最小二乘估计不是无偏、一致估计,该方法在实车应用时还需充分考虑噪声的影响.

近年来,随着模型预测控制(model predictive control, MPC)研究的不断深入以及应用于汽车主动安全控制系统研究成果的不断取得<sup>[67-71]</sup>,同样是基于滚动优化原理的滚动时域估计(moving horizon estimation, MHE)方法逐渐得到人们的关注,并开始应用于汽车系统的状态参数估计问题中.滚动时域估计方法基于汽车动力学模型,使用当前和过去的 $N+1$ 个测量数据 $Y_k^N := [y^T(k-N) \cdots y^T(k-1) y(k)]$ ,将带有状态约束的汽车系统的估计问题转化为滚动时域优化问题:

$$V(\bar{x}(k-N), Y_k^N) := \min_{W_k^N, z_0} J(W_k^N, z_0), \quad (6)$$

其中

$$J(W_k^N, z_0) = \sum_{i=k-N}^k \|y(i) - h(\hat{x}(i))\|_R^2 + \sum_{i=k-N}^{k-1} \|w(i)\|_Q^2 + \|z_0 - \bar{x}(k-N)\|_P^2 \quad (7)$$

满足约束条件

$$\hat{x}(i+1) = f(\hat{x}(i)) + Sw(i), \quad \hat{x}(k-N) = z_0, \quad (8)$$

$$x_{\min} \leq \hat{x}(i) \leq x_{\max}, \quad i \in [k-N, k]. \quad (9)$$

通过求解式(6)代表的目标函数,可以得到优化问题的独立变量 $(\hat{W}_k^N, \hat{z}_0)$ ,其中 $\hat{W}_k^N := [w^T(k-N) \cdots w^T(k-2) w^T(k-1)]$ ,则汽车状态参数的估计值可以通过下式计算:

$$\hat{x}(k+1) = f(\hat{x}(k)) + S\hat{w}(k) \quad \hat{x}(k-N) = \hat{z}_0. \quad (10)$$

文献[72-73]基于线性化车辆模型,分别讨论了车辆速度、轮胎/路面摩擦力以及车辆横摆角速度和车身侧倾角的MHE估计方法.MHE方法可以显式并优化处理估计过程中的状态约束,使得估计结果更加符合实际情况并且具有较好的估计性能.由于车辆系统本身的非线性特性,文献[74]将路面附着系数的实际变化范围作为约束,基于非线性车辆动力学和Dugoff轮胎模型,采用滚动时域估计方法讨论了路面附着系数和车辆侧向速度估计问题,并在veDYNA中给出了车辆动力学仿真测试结果.针对带有约束的汽车动态系统,滚动时域估计方法将汽车行驶状态参数估计问题转化为固定时域长度的优化问题,这种估计方法充分利用了那些以约束形式出现的关于系统状态和干扰的已知信息,提高了估计的合理性和准确性.同时将系统的约束直接表述在优化问题中,并通过在线滚动优化使之得到满足,这是解决约束系统状态估计的一种有效方法.但是,文献[72-74]只是基于汽车动力学模型进行了离线仿真研究,并没有进行实车试验验证.这主要是由于车辆系统的状态参数估计问题对估计结果的实时性要求较高,而滚动时域估计方法在每一个采样时刻都要对表征期望估计性能的目标函数进行在线优化,所以该方法的实时性有待提高.滚动时域估计的实时性问题已经成为限制该方法在车辆系统状态参数估计中应用的瓶颈问题.针对MHE方法处理数据多,计算时间长的这种缺点,文献[75]采用查表方法和函数赋值的方法对MHE方法存在的实时性问题进行了补偿处理,使得实时性有一定程度的提高.随着滚动时域估计的进一步发展以及可充分考虑汽车中的各种约束,滚动时域估计方法有望在车辆系统状态参数估计方面得到应用并推广.

#### 4 需要进一步研究的几个问题(Some problems need for further research)

1) 汽车行驶状态参数严重耦合问题.车辆系统是一个非常复杂的系统,由于各个物理部件之间都有信号进行传递,这使得车辆系统状态变量之间耦合现象十分严重.同时道路特征及轮胎力变化情况与汽车行驶状态之间又存在相互影响,这使得估计状态与参数紧密关联,给状态参数估计带来了巨大的设计负担.同时车辆上传感器分布在车辆上不同位置,传感器信号涉及车辆多个动力学系统,这使得汽车的状态参数估计问题变得极其复杂,针对一个状态或参数的估计往往需要事先已知其他状态参数信息.分析汽车行驶状态估计系统的总体结构,采用分布式模块化的估计

策略, 根据各个模块被估计状态的不同需求和动力学特性分别设计估计器, 是解决汽车行驶状态参数严重耦合问题的有效手段。

2) 基于切换系统模型讨论汽车状态参数估计问题。由于汽车状态参数估计的效果与车辆模型的精度有密切关系, 汽车在不同工况下运行时, 是否可以采用不同的车辆模型进行描述, 在不同的车辆模型间设计汽车状态参数估计器, 这样能够更加准确地描述在不同运行工况下的汽车系统动态, 同样可以使汽车状态参数的估计效果得到提高。文献 [76-77] 采用 T-S 模糊模型对此问题进行了初步探索, 为进一步研究奠定了基础。但是, 由于汽车是多参数非线性系统, 切换变量以及切换条件选取具有一定的难度, 这需要对车辆模型做较深入的分析后才能确定。

3) 具有未知输入的汽车状态参数估计问题。在待估计的汽车行驶状态参数中, 道路参数如路面倾斜角、轮胎/路面附着系数及路面坡度等是汽车动力学系统的输入信息。要获得汽车行驶状态参数估计信息, 首先需要获得道路输入信息。这使得汽车状态参数估计问题成为具有未知输入的估计问题。由于行车环境复杂多变, 道路信息无法预知, 同时在估计问题中, 道路信息作为输入又无法通过模型进行描述, 这给汽车行驶状态参数的估计带来了巨大困难。现有的估计方案中, 大多通过假设路面信息已知作为状态参数估计的前提, 人为回避未知的道路信息。随着估计理论的发展, 扩张观测器与自适应观测器在解决该问题中的优势逐渐显现<sup>[15, 17]</sup>。这两种方法将成为解决带有未知道路信息输入的状态参数估计的有效方法。

4) 校正项及观测器增益的合理选取问题。汽车行驶状态参数估计的效果与校正项的选取密切相关。汽车行驶状态参数估计时校正项应在汽车上实际安装的传感器测量获得的信号中选取。校正量既要与待估计量存在一定的动力学关系, 又要使校正通道不宜太长, 从而避免校正滞后的问题。但是, 量产汽车中传感器的配置是由主动安全控制需求和配置成本共同决定的。如何应用有限的传感器信息源, 合理的选取校正项是汽车行驶状态估计时所要讨论的重要问题。另外, 由于非线性以及未建模动态的存在, 常值的观测器增益很难同时满足各种不同工况的需求。到目前为止还没有得到满足全工况的观测器增益选取原则。如何在理论上给出满足汽车各种不同运行工况的观测器增益的选取原则并通过试验验证其合理性,

这对于估计算法在汽车上具体应用具有重要意义。随着自适应理论在车辆系统中的应用<sup>[18, 37-38]</sup>, 考虑状态参数估计算法本身观测器增益对不同行驶工况的自适应, 这对于估计算法可应用于不同的行驶工况将是一条可行之路。

5) 汽车行驶状态参数估计的稳定性及鲁棒性问题。采用分布式模块化估计策略得到各状态参数的估计值, 对于单一模块估计的稳定性问题可采用李雅普诺夫稳定性理论进行分析。如何保证汽车行驶状态参数估计系统整体的稳定性, 这是模块化估计中面临的具有挑战性的问题。同时, 汽车系统在建模过程中存在一定的模型误差, 汽车在不同工况下运行时, 车辆参数会发生一定变化, 从而引起车辆模型存在一定的不确定性。另外, 路面以及侧向风等因素又构成了车辆模型的外部扰动, 汽车行驶状态参数估计器如何克服车辆模型不确定性和外部扰动的影响, 使得汽车在不同工况和不同外界条件下都能得到状态参数有效而准确的估计效果, 这是一个有价值的研究方向。随着输入-状态稳定性理论的广泛应用<sup>[19]</sup>, 它将是讨论模块化估计的整体稳定性与鲁棒性问题的必要工具。

6) 汽车行驶状态参数估计的实时性与小型化问题。汽车系统在运行过程中状态变化较为迅速, 同时汽车电子控制单元的控制周期一般为 20 ms 左右<sup>[15]</sup>, 这就对汽车行驶状态参数估计算法的实时性提出了具体要求。另外, 采用各种方法设计的汽车行驶状态参数估计器, 最终都要在汽车的电子控制单元中实现, 由于现代汽车的发展, 使得车载电子元件向着小型化的方向发展, 这就要求汽车行驶状态参数估计器的功能都要在芯片上实现, 这使得汽车行驶状态参数估计面临小型化的挑战。由于上述问题的存在, 使得能够满足实时性及小型化要求的汽车行驶状态参数估计方法具有一定的研究价值, 也是汽车行驶状态参数估计亟待解决的问题。由于非线性观测器方法计算量小, 同时计算速度较快, 采用非线性观测器方法讨论汽车行驶状态参数估计问题是解决小型化与实时性问题的可行之路。另外, 随着现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)硬件技术的进步<sup>[20, 78-80]</sup>, 采用现场可编程门阵列/片上可编程系统(FPGA/system on programmable chip, FPGA/SoPC)实现方案解决汽车行驶状态参数估计的实时性与小型化问题也是一条可探索之路。

7) 汽车行驶状态参数估计的评价问题。目前, 很多研究人员采用试验方法进行汽车行驶状态参

数估计效果的评价<sup>[81-82]</sup>,但是这种方法只能适用于常规线性工况的验证,对于汽车运行的极限工况将很难通过实车试验进行验证.在这种情况下,只能借助于车辆动力学软件进行仿真验证.但是动力学软件中的车辆参数与实际研究的汽车参数不匹配,使得验证估计效果的真值不可信.即使进行了参数匹配工作,由于车辆在建模时做了不同程度的简化,又使得真值发生了一些变化.从而使得汽车行驶状态参数估计效果的评价面临严峻的问题.如何找到一种合适的评价方法,使得在采用各种不同的估计方法设计了汽车行驶状态参数估计器后,从理论和试验上确切的评价汽车行驶状态参数估计的优劣,这是在今后汽车行驶状态参数估计方面亟待解决的一个问题.随着汽车理论研究的不断深入和随机方法的广泛应用,采用实车试验数据,通过数据拟合及处理,建立高保真的汽车动力学模型并进行参数匹配,在此基础上,采用随机方法根据选定参数取值的样本空间,通过随机试验采用统计方法对估计结果给出评价,这将是汽车行驶状态参数估计性能评价的有效途径.

### 参考文献(References):

- [1] JING H H, LIU Z Y, CHEN H. A switched control strategy for antilock braking system with on/off valves [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1470 – 1484.
- [2] DING N G, YU G Z, WANG W D. Estimation of brake pressure and tyre-road friction during ABS activation [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2012, 58(1): 33 – 45.
- [3] PAVKOVIĆ D, DEUR J, HROVAT D, et al. A switching traction control strategy based on tire force feedback [C] // *Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control*. Saint Petersburg: IEEE, 2009: 588 – 593.
- [4] AMODEL M, FERRARA A, TERZAGHI R, et al. Wheel slip control via second-order sliding-mode generation [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, 11(1): 122 – 131.
- [5] CHO W, CHOI J, KIM C, et al. Unified chassis control for the improvement of agility, maneuverability, and lateral stability [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(3): 1008 – 1020.
- [6] DAILY R, BEVLY D M. The use of GPS for vehicle stability control systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(2): 270 – 277.
- [7] DING J B. Intelligent optimization on test bench of electric power steering device in automobile [C] // *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*. Singapore: IEEE, 2010, 4: 367 – 370.
- [8] CHEN E L, SI C D, LIU J. Experimental study of magnetorheological materials and its damper dynamic characteristics [C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Natural Computation (ICNC)*. Yantai, Shandong: IEEE, 2010, 1: 278 – 281.
- [9] SOUSSAN D, MAJCHERCZAK S, VALENTIAN A, et al. A low jitter active body-biasing control-based output buffer in 65nm PD-SOI [C] // *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on IC Design & Technology (ICICDT)*. Kaohsiung: IEEE, 2011: 1 – 4.
- [10] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J, et al. Hand-wheel steering signal estimation and diagnosis approaches for ground vehicles [J]. *Control Engineering Practice*, 2012, 20(7): 654 – 662.
- [11] BREUER B, EICHHORN U, ROTH J. Measurement of tyre/road friction ahead of the car and inside the tyre [C] // *Proceedings of International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*. Japan: JSAE, 1992: 347 – 353.
- [12] EICHHORN U, ROTH J. Prediction and monitoring of tyre/road friction [C] // *Proceedings FISITA 24th Congress*. London: Professional Engineering Publishing, 1992: 67 – 74.
- [13] 边明远. 汽车防滑控制系统(ABS/ASR)道路识别技术及车速速度算法研究 [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.)
- [14] 余卓平, 高晓杰. 车辆行驶过程中的状态估计问题综述 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 20 – 33.  
(YU Zhuoping, GAO Xiaojie. Review of vehicle state estimation problem under driving situation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5): 22 – 33.)
- [15] GRIP H F, IMSLAND L, JOHANSEN, T A. et al. Nonlinear observer for vehicle velocity with friction and road bank angle adaptation – validation and comparison with an extended Kalman filter [C] // *Proceedings of Society of Automotive Engineers(SAE)*. Michigan: SAE International, Warrendale Pennsylvan, 2007: 1 – 13.
- [16] DaimlerChrysler, SINTEF, Glasgow University, et al. Vehicle state observer activity report [R] // *Public Draft Activity Report Workpart 4 Deliverable D4*. Stuttgart: DaimlerChrysler, 2005: 1 – 12.
- [17] RAY L R. Nonlinear tire force estimation and road friction identification: simulation and experiments [J]. *Automatica*, 1997, 33(10): 1819 – 1833.
- [18] 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.
- [19] IMSLAND L, JOHANSEN T A, FOSSEN T I, et al. Vehicle velocity estimation using nonlinear observers [J]. *Automatica*, 2006, 42(12): 2091 – 2103.
- [20] GUO H Y, CHEN H, XU F, et al. Implementation of EKF for vehicle velocities estimation on FPGA [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(9): 3823 – 3835.
- [21] SONG C K, CHANSKI M U, HEDRICK J K. Vehicle speed estimation using accelerometer and wheel speed measurements [C] // *Proceedings of Society of Automotive Engineers (SAE)*. Michigan: SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 2002: 1 – 8.
- [22] BRACH R M. Modeling combined braking and steering tire forces [C] // *Proceedings of Society of Automotive Engineers (SAE)*. Michigan: SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 2000: 1 – 9.
- [23] WATNABE K, KOBAYASHI K, CHEOL K C. Absolute speed measurement of automobile from noisy acceleration and erroneous wheel speed information [C] // *Proceedings of SAE International Congress and Exposition*. Michigan: SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 1992:1 – 5.
- [24] ZANTEN A T V. Bosch ESP systems: 5 years of experience [C] // *Proceedings of Society of Automotive Engineers (SAE)*. Michigan: SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 2000: 1 – 9.
- [25] LIU C, PENG H. A state and parameter identification scheme for linearly parameterized systems [J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1998, 12(4): 524 – 528.
- [26] 高越, 高振海, 李向瑜. 基于自适应Kalman滤波的汽车横摆角速度软测量算法 [J]. 江苏大学学报, 2005, 25(1): 24 – 27.

- (GAO Yue, GAO Zhenhai, LI Xiangyu. Soft measurement method for vehicle yaw rate based on adaptive Kalman filter [J]. *Journal of Jiangsu University*, 2005, 25(1): 24 – 27.)
- [27] 王仁广, 刘昭度, 齐志权. 基于自适应卡尔曼滤波算法确定汽车参考车速 [J]. *农业机械学报*, 2006, 37(4): 8 – 11.  
(WANG Renguang, LIU Zhaodu, QI Zhiquan. Vehicle reference speed determination using adaptive Kalman filter algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(4): 8 – 11.)
- [28] ZUURBIER J, BREMMER P. State estimation for integrated vehicle dynamics control [C] // *Proceedings of the 6th Int Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*. USA: JSAE, 2000, 371 – 375.
- [29] VENHOVENS T P J, NAAD K. Vehicle dynamics estimation using Kalman filters [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1999, 32(2/3): 171 – 184.
- [30] UNGOREN A Y, PENG H, TSENG H E. A study on lateral speed estimation methods [J]. *International Journal on Vehicle Autonomous Systems*, 2002, 2(1): 126 – 144.
- [31] SAHLHOLM P, JOHANSSON K H. Road grade estimation for look-ahead vehicle control using multiple measurement runs [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 18(11): 1328 – 1341.
- [32] SEBSADJI Y, GLASER S, MAMMAR S, et al. Road slope and vehicle dynamics estimation [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Seattle, WA: IEEE, 2008: 4603 – 4608.
- [33] DAKHLALLAH J, GLASER S, MAMMAR S, et al. Tire-road forces estimation using extended Kalman filter and sideslip angle evaluation [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Seattle, WA: IEEE, 2008: 4597 – 4602.
- [34] 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.)
- [35] LI L, SONG J, LI H Z, et al. 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.
- [36] WILKIN M A, MANNING W J, CROLLA D A, et al. Estimation of non-linear friction force between tyre and road applied to a performance vehicle [C] // *Proceedings of the 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)*. Netherlands: JSAE, 2004: 387 – 392.
- [37] WILKIN M A, CROLLA D C, LEVESLEY M C, et al. Estimation of non-linear tyre forces for a performance vehicle using an extended Kalman filter [C] // *Proceedings of Society of Automotive Engineers(SAE)*. Michigan: SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 2004: 1 – 6.
- [38] WILKIN M A, MANNING W J, CROLLA D C, et al. Use of an extended Kalman filter as a robust tyre force estimator [J]. *Vehicle System Dynamics, Supplement*, 2006, 44(1): 50 – 59.
- [39] BAFFET G, CHARARA A, LECHNER D, et al. Experimental evaluation of observers for tire-road force, sideslip angle and wheel cornering stiffness [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46(6): 501 – 520.
- [40] TSUNASHIMA H, MURAKAMI M, MIATA J. Vehicle and road state estimation using interacting multiple model approach [J]. *Vehicle System Dynamics, Supplement*, 2006, 44: 750 – 758.
- [41] WENZEL T A, BURNHAM M V, BLUNDELL R A, et al. Dual extended Kalman filter for vehicle state and parameter estimation [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2006, 44(2): 153 – 171.
- [42] 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 System Dynamics*, 2000, 34(1): 57 – 75.
- [43] RAY L R. Nonlinear state and tire force estimation for advanced vehicle control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1995, 3(1): 117 – 124.
- [44] SASAKI H, NISHIMAKI T. A side-slip angle estimation using neural network for a wheeled vehicle [C] // *Proceedings of Society of Automotive Engineers(SAE)*. Michigan: SAE International, Warrendale, Pennsylvania, 2000: 1 – 6.
- [45] MATUSKO J, PETROIĆ I, PERIĆ N. Neural network based tire/road friction force estimation [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2008, 21(3): 442 – 456.
- [46] DU X P, SUN H M, QIAN K, et al. A prediction model for vehicle sideslip angle based on neural network [C] // *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Information and Financial Engineering (ICIFE)*. Chongqing: IEEE, 2010: 451 – 455.
- [47] 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 side slip angle based on fuzzy logic [J]. *Automotive Engineering*, 2005, 27(4): 426 – 430.)
- [48] HAJJAJI A E, CHADLI M, OUDGHIRI M, et al. Observer-based robust fuzzy control for vehicle lateral dynamics [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Minneapolis, MN: IEEE, 2006: 4664 – 4669.
- [49] CHU L, CHAO L B, ZHANG Y S, et al. Design of longitudinal vehicle velocity observer using fuzzy logic and Kalman filter [C] // *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*. Harbin: IEEE, 2011: 3225 – 3228.
- [50] SIVANADAM S N, SUMATHI S, DEEPA S N. Introduction to fuzzy logic using MATLAB [M] // *Antilock-Braking System and Vehicle Speed Estimation Using Fuzzy Logic*. German: Springer-Verlag, 2001.
- [51] STPHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Linear observers for vehicle sideslip angle: experimental validation [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*. Parma: IEEE, 2004, 1(1): 341 – 346.
- [52] ZHAO L H, LIU Z Y, CHEN H. Design of nonlinear observer for vehicle velocity estimation and experiments [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2011, 19(3): 664 – 672.
- [53] WADA M, YOON K S, HASHIMOTO H. Nonlinear filter road vehicle model development [C] // *Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems*. Oakland, CA: IEEE, 2001: 734 – 739.
- [54] VON VIETINGHOFF A, HIEMER M, KIENCKE U. Nonlinear observer design for lateral vehicle dynamics [C] // *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*. Prague: IEEE, 2005: 988 – 993.
- [55] 郭洪艳, 陈虹, 丁海涛, 等. 基于车辆动力学和非线性观测器的车辆质心侧偏角估计 [C] // 第27届中国控制会议. 昆明: IEEE, 2008, 2: 449 – 453.  
(GUO Hongyan, CHEN Hong, DING Haitao, et al. Vehicle side-slip angle estimation based on the vehicle dynamics and nonlinear observers [C] // *Proceedings of the 27th Chinese Control Conference*. Kunming: IEEE, 2008, 2: 449 – 453.)
- [56] 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 side-slip angle estimation based on Uni-Tire model [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(9): 1131 – 1139.)
- [57] OUDGHIRI M, CHADLI M, HAJJAJI A E. Lateral vehicle velocity estimation using fuzzy sliding mode observer [C] // *Proceedings of Mediterranean Conference on Control and Automation*. Athens: IEEE, 2007: 1 – 6.

- [58] OUALDSINE M, SHRAIM H, FRIDMAN L, et al. Vehicle parameter estimation and stability enhancement using the principles of sliding mode [C] // *Proceedings of American Control Conference*. New York: IEEE, 2007: 5224 – 5229.
- [59] SHRAIM H, OULADSINE M, FRIDMAN L. Vehicle parameters and states estimation via sliding mode observers [M] // BARTOLINI G, FRIDMAN L, PISANO A, et al. *Modern Sliding Mode Control Theory*. German: Springer-Verlag, 2008, 375: 345 – 362.
- [60] STPHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Evaluation of a sliding mode observer for vehicle sideslip angle [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 7(15): 803 – 812.
- [61] WANG J, WANG W D, ZHANG W, et al. Roll stability analysis for coaches incorporating road bank disturbance [C] // *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS)*. Yamagata: IEEE, 2010, 1: 625 – 629.
- [62] TSENG H E, XU L, HROVAT D. Estimation of land vehicle roll and pitch angles [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(5): 433 – 443.
- [63] BAFFET G, CHARARA A, LECHNER D. Experimental evaluation of a sliding mode observer for tire-road forces and an extended Kalman filter for vehicle sideslip angle [C] // *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA: IEEE, 2007: 3877 – 3882.
- [64] 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*, 2005, 43(1): 31 – 55.
- [65] ARNDT M, DING E, MASSEL T. Observer based diagnosis of roll rate sensor [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Massachusetts: IEEE, 2004: 1540 – 1545.
- [66] RAJAMANI N, PIYABONGKARN R, LEW J, et al. Tire-road friction coefficient estimation [J]. *IEEE Control System Magazine*, 2010, 30(4): 54 – 69.
- [67] CHEN H, ALLGÖWER F. A quasi-infinite horizon nonlinear predictive control scheme with guaranteed stability [J]. *Automatica*, 1998, 34(10): 1205 – 1217.
- [68] MAYNE D Q, RAWLINGS C V, RAO C V, et al. Constrained model predictive control: stability and optimality [J]. *Automatica*, 2000, 36: 789 – 814.
- [69] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J, et al. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(3): 566 – 579.
- [70] BORRELLI F, FALCONE P, KEVICZKY T, et al. MPC-based approach to active steering for autonomous vehicle systems [J]. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, 2005, 3(2/3/4): 265 – 291.
- [71] PARK J M, KIM D W, YOON Y S, et al. Obstacle avoidance of autonomous vehicles based on model predictive control [C] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2009, 223: 1499 – 1516.
- [72] WANG Z, LIU Z Y, PEI R. Estimation of vehicle speed and friction force using moving horizon strategy [C] // *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou: IEEE, 2004, 2: 1547 – 1550.
- [73] ZHAO H Y, CHEN H. Estimation of vehicle yaw rate and side slip angle using moving horizon strategy [C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation*. Dalian: IEEE, 2006: 1828 – 1832.
- [74] 赵林辉, 刘志远, 陈虹. 基于滚动时域估计策略的地面摩擦系数和车辆横向速度估计 [J]. *仪器仪表学报(增刊)*, 2008, 29(4): 62 – 65. (ZHAO Linhui, LIU Zhiyuan, CHEN Hong. Estimation of road friction coefficient and vehicle lateral velocity based on moving horizon strategy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument (Suppl)*, 2008, 29(4): 62 – 65.)
- [75] DARBY M L, NIKOLAOU M. A parametric programming approach to moving horizon state estimation [J]. *Automatica*, 2007, 43(5): 885 – 891.
- [76] SAMADI B, KAZEMI R, NIKRAVESH K Y, et al. Real-time estimation of vehicle state and tire-road friction forces [C] // *Proceedings of American Control Conference*. Arlington, VA: IEEE, 2001, 5: 3318 – 3323.
- [77] DAVILA J, FRIDMAN L, LEVANT A. Second-order sliding-mode observer for mechanical systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(11): 1785 – 1789.
- [78] HAMBLEN J O, HALL T S, FURMAN M D. *Rapid Prototyping of Digital Systems SOPC Edition* [M]. German: Springer-Verlag, 2008.
- [79] SALIH M H, ARSHAD M R. Embedded processor for array of hydrophone sensors to construct real time images for AUV using FPGA [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications*. Kuala Lumpur: IEEE, 2009: 167 – 172.
- [80] CHEN H, XU F, XI Y. Field programmable gate array/system on a programmable chip based implementation of model predictive controller [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(8): 1055 – 1063.
- [81] PIYABONGKAN 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.
- [82] CHELI F C, SABBIONI E, PESCE M, et al. Methodology for vehicle sideslip angle identification: comparison with experimental data [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2007, 45(6): 549 – 563.

#### 作者简介:

郭洪艳 (1980-), 女, 讲师, 博士, 目前研究方向为车辆状态参数估计, E-mail: guohy11@jlu.edu.cn;

陈虹 (1963-), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为预测控制、鲁棒控制、汽车电子控制, E-mail: chen@jlu.edu.cn;

赵海艳 (1976-), 女, 讲师, 博士, 目前研究方向为车辆状态参数估计、汽车电子控制, E-mail: zhaohy@jlu.edu.cn;

杨斯琦 (1990-), 女, 硕士研究生, 目前研究方向是车辆状态估计, E-mail: sqyang12@mails.jlu.edu.cn.