

DOI: 10.3901/JME.2009.05.020

车辆行驶过程中的状态估计问题综述

余卓平¹ 高晓杰^{1,2}

- (1. 同济大学汽车学院 上海 201804;
2. 上海汽车股份有限公司技术中心 上海 201804)

摘要: 从传感器配置、估计用物理模型、状态估计算法和估计过程中的模型参数自适应4个方面回顾车辆行驶过程中的状态估计问题。对比分析以纵向车速、横摆角速度、质心侧偏角为估计目标时传感器的常见配置,给出合理的传感器配置方案;比较在不同估计目标下运动学模型和动力学模型的优缺点,提出纵向车速和横摆角速度适合采用运动学模型、质心侧偏角估计适合采用动力学模型的观点;列举并比较车辆状态估计中常用的估计算法,给出各算法在实际应用中所需注意的因素。指出实现估计过程中的参数自适应是提高不同行驶工况下观测器估计精度的有效手段,并介绍递推最小二乘、联合卡尔曼滤波等实现参数自适应的典型方法。

关键词: 车辆状态估计 观测器 车速估计 横摆角速度估计 质心侧偏角估计 参数自适应

中图分类号: U270.1

Review of Vehicle State Estimation Problem under Driving Situation

YU Zhuoping¹ GAO Xiaojie^{1,2}

- (1. School of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai 201804;
2. Technical Center, SAIC Motor, Shanghai 201804)

Abstract: Vehicle state estimation problem is divided into four aspects: sensor configuration, physical model, estimation algorithm and parameter adaption. The key technologies are later in details discussed. Through comparison of typical sensor configuration for vehicle longitudinal speed, yaw velocity and side-slip angle estimation, an ideal sensor configuration is given. Furthermore, the advantage and disadvantage of kinematic model and dynamic model are analyzed, then the viewpoint is put forward that kinematic model is more suitable for longitudinal speed and yaw velocity estimation, in contrast dynamic model is better for vehicle side-slip angle estimation. The typical estimation algorithms are listed and important issues to be regarded in practical utilization are discussed. It is pointed out that the realization of parameter adaption is an effective method to enhance the estimation precision under different driving situation. Recursive least square, combined kalman filter and other parameter observation methods are given.

Key words: Vehicle state estimation Observer Longitudinal speed estimation Yaw velocity estimation

Side-slip angle estimation Parameter adaptation

0 前言

汽车行驶过程中的状态估计,是汽车动力学中的重要问题,旨在确定汽车行驶状态下纵向车速、横摆角速度、质心侧偏角等重要的状态变量,是实现汽车底盘主动控制系统的关键技术之一^[1-9]。汽车

的纵向动力学控制,包括驱动防滑控制、制动防抱死控制(Anti-lock braking system, ABS),均依赖于对纵向车速的准确估计;汽车的侧向动力学控制,包括电子稳定程序、四轮转向控制、主动前轮/后轮转向技术、主动抗侧倾控制,依赖于对横摆角速度或质心侧偏角的准确估计。这些待估计的状态变量,虽然均可用传感器直接测量,但必须依赖价格昂贵的特殊试验设备,且需要特定的安装固定方式,不适于配置在量产车上,只适合于开发试验阶段。因

此，从节约成本和实际应用的角度来看，必须根据量产车上的传感器配置，通过车辆状态估计技术(也称状态观测器、软测量技术)，准确计算得到其他所需、但不可测的状态信息。

另一方面，车辆状态估计也是车载故障诊断系统中的关键技术之一。底盘电子化是现代汽车底盘技术的主要发展方向，且有从单一系统的主动控制，向多个系统的联合控制、底盘一体化控制方向发展的趋势^[10-24]。大量底盘主动控制系统的应用，一方面提高了车辆的行驶性能，另一方面对系统可靠性提出了更高的要求。根据不同系统的传感器信号，通过多传感信息融合方法，在物理传感器测量实际信号的同时，采用状态估计技术对这些信号同步进行计算，可以有效、及时地发现传感器的故障，从而提高汽车主动控制系统的可靠性和鲁棒性。

车辆状态估计问题具有重大的实际应用价值和理论研究价值，国外学者在这方面作了大量的研究，国内的研究基本处于起步阶段。通过大量国外文献的阅读，车辆状态估计问题，无论估计目标是纵向车速还是横摆角速度、质心侧偏角，研究的主要内容大致可分为以下的 4 个方面：传感器配置、估计用物理学模型、估计算法和观测器模型的参数自适应估计。下面依次对这 4 个方面进行论述。

1 传感器配置

传感器配置，简而言之就是用什么传感器信号来估算目标信号。状态估计器的估计效果是和所能支配的传感器信号密切相关的。传感器信息源的确定是在估计效果和传感器配置成本两者之间进行综合考虑，作出一个比较合理的传感器配置方案，在不降低估计效果的前提下尽可能采用简单廉价的传感器配置。另一方面，估计算法的选择也和传感器配置有关，可用的传感器信号越少所需要的估计算法相对也更加复杂、考虑的修正因素也更多。同时即便采用更加复杂的算法，估计的效果也不一定会有很大程度的改善。因此，传感器必须考虑算法可行性的因素(包括实时性、易调试性)，挑选一个较优的传感器配置—估算算法组合。下面针对不同的估计目标，列举参考文献中所采用的传感器配置。

1.1 纵向车速估计用传感器配置

1.1.1 配置方案

纵向车速估计用传感器配置的方案介绍如表 1 所示。

表 1 纵向车速估计用传感器配置方案

| 序号 | 传感器配置方案 | 参考文献 |
|----|------------------------|---------|
| 1 | 四轮轮速+纵向加速度 | [25-31] |
| 2 | 非驱动轮轮速+纵向加速度 | [32] |
| 3 | 转向盘转角+横摆角速度+侧向加速度+方案 1 | [33] |
| 4 | 仅四轮轮速信号 | [34] |
| 5 | 制动踏板+油门踏板+方案 1 | [35] |

方案 1、2 采用轮速信号和纵向加速度信号来估计车辆纵向车速是最典型的传感器配置方案，主要思路为根据车辆当前行驶状态来判断哪一个信号更可信，然后通过权重系数的调整来进行综合计算。最终的车速为

$$v_f(n) = \frac{\sum_{i=1}^4 k_i \omega_i(n) r_w + k_a [(a_x(n) - a_{Cor}(n)) T_s + v_f(n-1)]}{k_a + \sum_{i=1}^4 k_i} \quad (1)$$

- 式中
- v_f —— 估计出的车速
 - k —— 轮速权重系数
 - ω —— 车轮轮速
 - r_w —— 车轮滚动半径
 - k_a —— 加速度权重系数
 - T_s —— 采样时间
 - α_x —— 车辆的纵向加速度
 - $a_{Cor}(n)$ —— 车辆纵向加速度修正值

方案 3 在方案 1 的基础上，额外采用转向盘转角、横摆角速度、侧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获得车速，还是平均某两个车轮的轮速来获得车速。该方法逻辑简单，但必须通过大量试验来设置合理的模糊规则。方案 4 提出了仅采用四轮轮速来估计车速的方法，这种方法适合于 ABS 工作时的车速估计。采用自适应非线性滤波器以轮速作为输入、车速作为输出，滤波器参数时变；根据局部轮速峰值点和制动起始时的轮速间的斜率(即制动减速度)进行调整。该方法无须系统模型和车身加速度信号。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；同时需要捕捉轮速局部峰值点来计算调整滤波器参数，因而实时性要求较高。方案 5 通过油门踏板和制动踏板信号的测量，能够更加精确地知道车轮的运动状态(大驱动力下严重打滑，大制动力下抱死)，从而更有利于权重系数的决定。

1.1.2 纵向加速度信号的修正

当采用纵向加速度传感器来辅助车速估计时，必须考虑：在低速、低加速度情况下传感器的信噪

比不高、容易出现偏置,或者当车辆行驶于坡道上,纵向加速度由于重力的缘故产生一定偏置。文献[32]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车身加速度的偏置。该方法所用的轮速信号必须是车轮纯滚动状态下获得的。

文献[26]通过 200 个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该偏置

$$a_o = \frac{v_f(k+200) - v_f(k+1)}{200T_s} - \frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} a_x(k+i) \quad (2)$$

1.1.3 弯道行驶时轮速信号的修正

当车辆行驶于弯道时,内外车轮间会形成轮速差,如果直接使用这些轮速信号,会对车辆纵向车速估计会产生一定的误差。弯道行驶时的轮速需要通过横摆角速度、质心侧偏角进行修正

$$\begin{cases} v_{wfl} = v_{cog} - \dot{\psi} \left(\frac{b_f}{2} - l_f \beta \right) \\ v_{wfr} = v_{cog} + \dot{\psi} \left(\frac{b_f}{2} + l_f \beta \right) \\ v_{wrl} = v_{cog} - \dot{\psi} \left(\frac{b_r}{2} + l_r \beta \right) \\ v_{wrr} = v_{cog} + \dot{\psi} \left(\frac{b_r}{2} - l_r \beta \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中 v_{wfl}, v_{wfr} ——左、右前轮车速
 v_{wrl}, v_{wrr} ——左、右后轮车速
 $v_{cog}, \dot{\psi}$ ——质心处车速和横摆角速度
 b_f, b_r ——前、后轮距
 l_f, l_r ——质心到前、后轴距离
 β ——质心侧偏角

1.2 横摆角速度估计用传感器配置

从公开发表的文献来看,单纯估计车辆横摆角速度的研究不多。这是因为半导体技术的发展,普通的横摆角速度传感器价格已降至可以接受的水平(相对于中高级轿车车价)。从另一个方面看,出于对横摆角速度传感器故障诊断的需要,也完全有必要估计横摆角速度。横摆角速度估计用传感器配置方案如表 2 所示。

表 2 横摆角速度估计用传感器配置方案

| 序号 | 配置方案 | 参考文献 |
|----|--------------------|-------------|
| 1 | 质心处安装一个侧向加速度传感器 | [36-37] |
| 2 | 前后轴分别安装一个侧向加速度传感器 | [36, 38-39] |
| 3 | 四轮轮速信号 | [40-42] |
| 4 | 四轮轮速信号+质心处侧向加速度传感器 | [31, 43] |

方案 1、2 分别采用一个和两个侧向加速度传感器配置作为自适应卡尔曼滤波器或龙贝格观测器的测量值来估计车辆的横摆角速度,估计效果一般。方案 3 给出了基于内外轮速差的运动学关系来计算

横摆角速度的方法,适合于弱制动/弱驱动工况。方案 4 给出了四轮轮速信号+质心处侧向加速度传感器的配置来估计横摆角速度,根据非驱动轮轮速和质心处的侧向加速度分别计算并按照行驶状态进行加权计算,比方案 3 能适应更多的行驶工况。

1.3 质心侧偏角估计用传感器配置

1.3.1 配置方案

质心侧偏角的估计依赖于纵向车速、横摆角速度和侧向加速度,而这些状态量有时又需要间接估计,因此质心侧偏角估计的可选配置方案是最为丰富的。质心侧偏角估计用传感器配置方案如表 3 所示。

表 3 质心侧偏角估计用传感器配置方案

| 序号 | 配置方案 | 参考文献 |
|----|------------------------|-----------------|
| 1 | 转向盘转角+质心处侧向加速度传感器 | [36-37, 44] |
| 2 | 转向盘转角+前后轴各一个侧向加速度传感器 | [36, 38] |
| 3 | 转向盘转角+四轮轮速信号 | [40-42] |
| 4 | 转向盘转角+四轮轮速+质心处侧向加速度传感器 | [43] |
| 5 | 转向盘转角+横摆角速度 | [44-54] |
| 6 | 转向盘转角+横摆角速度+质心处侧向加速度 | [41, 44, 55-65] |
| 7 | 轮胎力传感器 | [66] |
| 8 | 方案 5+GPS 传感器 | [67-70] |
| 9 | 方案 5+转向盘力矩 | [71-72] |

方案 1、2 采用不同的侧向加速度传感器配置来估计质心侧偏角,效果不甚理想,或存在一个固定的静态偏差,或结果严格依赖于侧向加速度信号;方案 3 先根据四轮轮速估计出横摆角速度,然后以此作为卡尔曼滤波器的测量值估计质心侧偏角,在轮胎不打滑的情况下效果尚可;方案 4 类似于方案 3,额外的侧向加速度传感器用于进一步提高横摆角速度的估计效果,同时作为估计质心侧偏角时的测量值;方案 5、6 是最为被广泛采用的配置,在质心侧偏角估计时,横摆角速度信号通常都是认为可测、已知的,作为测量值对模型预测出的质心侧偏角进行修正。方案 7 认为轮胎力已知的情况下来估计质心侧偏角,但要等到智能轮胎量产后才能实现。方案 8 采用全球定位系统和惯性制导系统来估计质心侧偏角的方案,成本很高,仅适用于科研。方案 9 是美国斯坦福大学在线控驾驶系统的基础上,通过转向系统来计算出前轴的侧向力,进而回归出前轴和质心的侧偏角。该方案需要额外加装转向盘力矩传感器,同时必须对转向系统进行精确建模,充分考虑轮胎拖距等影响,因而在实际应用中有一定困难。

1.3.2 侧向加速度信号的修正

当车辆行驶于具有一定侧向坡度的路面上时,由于重力的影响会产生一定的侧向加速度,因

此需要修正侧向加速度传感器获得的信号。文献[58]给出了安装位置、路面坡度及车辆侧倾对侧向加速度的影响关系

$$a_{y,s} = [a_y + \ddot{\psi}(l - l_f) + \ddot{\phi}h_g] + g\phi \quad (4)$$

式中 $a_{y,s}$ ——传感器测得侧向加速度

a_y ——质心处侧向加速度

l ——安装位置到质心距离

ϕ ——质心处车身侧倾角

h_g ——质心高度

φ ——路面侧向坡度

1.4 地面接触力估计用传感器配置

地面接触力估计主要分为轮胎纵向力的估计和轮胎侧向力的估计两大类。纵向力估计的传感器配置类似于车速估计配置，侧向力估计的传感器配置类似于质心侧偏角估计配置。地面接触力估计用传感器配置方案如表4所示。

表4 地面接触力估计用传感器配置方案

| 序号 | 传感器配置 | 参考文献 | 估计目标 |
|----|-----------------------|---------|------|
| 1 | 四轮轮速+前后轴侧向加速度+质心纵向加速度 | [73] | 纵+侧 |
| 2 | 质心处纵向加速度 | [74] | 纵 |
| 3 | 发动机转矩+四轮轮速 | [75] | 纵 |
| 4 | 车速和四轮转速 | [76] | 纵 |
| 5 | 质心处纵向、侧向加速度+横摆角速度 | [77-78] | 侧 |
| 6 | 方案5+四轮力矩+转向盘转角 | [79] | 侧 |
| 7 | 方案6+四轮轮速 | [80-81] | 纵+侧 |
| 8 | 四轮轮速+四轮力矩 | [82] | 纵 |

方案1认为路面附着力变化为一随机过程，通过广义卡尔曼滤波器对轮胎纵向、侧向力进行了估计，并不依赖轮胎模型。方案2仅通过质心纵向加速度对前后轴的纵向力进行估计，误差较大。方案3通过对动力系统的建模(包括发动机模型和变速箱模型)，估计了车轮上的纵向力。方案4通过计算轮胎滑移率，并根据BUCKHARDT^[83]的滑移率—附着系数公式和轮胎垂向力的估计来得到车轮上的纵向力。方案5~7适用于采用非线性观测器或卡尔曼滤波器来估计轮胎的侧向力，方法类似于方案1。方案8通过递归最小二乘算法对制动过程中的轮胎纵向力进行了估计。由上面的传感器配置可知，对轮胎的纵向力估计，必须依赖车轮的转速、转矩信息；而对轮胎的侧向力估计，必须依赖能反映车辆侧向运动的横摆角速度、侧向加速度、转向盘转角等信息。

综合以上分析，一种合理的传感器配置方案为：四轮轮速信号+质心处纵向、侧向加速度信号+

转向盘转角信号+横摆角速度信号。该配置能够满足纵向车速、横摆角速度、质心侧偏角估计的需要且能达到较高的估计精度。

2 状态估计用物理模型

汽车状态估计用物理模型大致可以分为两大类：基于运动学关系的物理模型(运动学模型)和基于动力学关系的物理模型(动力学模型)。基于运动学模型设计的观测器具有极佳的鲁棒性，模型参数(如质量)的变化对估计效果基本没有影响，但该方法严格依赖于传感器信息，对传感器的安装、标定和传感器的精度都有很高的要求，必要时须对传感器信号进行修正。基于动力学模型设计的观测器对传感器的要求不如前者高，但对模型本身的精度要求很高，模型要能尽可能准确地反映车辆的动力学特性，同时对模型参数的变化比较敏感，必须通过参数自适应或者鲁棒设计来改善观测器的估计效果。

2.1 运动学模型

2.1.1 纵向车速估计用运动学模型

文献[25]提出由轮速、车身加速度、轮胎滚动半径变化量作为状态变量的离散系统模型

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{w}(k) \\ \mathbf{z}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}(k) \\ \mathbf{x}(k) = (a_l(k) \ v_w(k) \ e(k))^T \\ \mathbf{z}(k) = (a_m(k) \ v_m(k))^T \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{A}(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ T_s & 1 & -T_s a_m \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

$\mathbf{B}(k) = \begin{pmatrix} T_s & 0 & 0 \\ 0.5T_s^2 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & T_s \end{pmatrix}$ $\mathbf{C}(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$

m, t ——下标，表示测量值和真实值

e ——轮胎滚动半径变化量

在文献[25]基础上，文献[26-27, 32, 35, 65]进行了一定的扩展。文献[26, 65]建立了以四轮轮速和车身加速度为变量的状态方程，但该模型维数较高，在计算卡尔曼反馈增益时需要求一个5×5的逆阵，不适合用于实时计算；文献[35]扩充了上述模型并将其拆解成3个卡尔曼滤波器，前两个卡尔曼滤波器用于数据滤波和预处理，第三个滤波器用于估计车速估计，一定程度上解决了高维状态方程实时求解卡尔曼反馈增益困难的问题。由上述模型根据卡尔曼滤波算法获得的车速估计的最终表达式为

$$v(k) = v(k-1) + T_s a_m(k) + K \left\{ \omega_r(k) - \frac{1}{r_w} [\widehat{V}(k-1) + T_s a_m(k)] \right\} \quad (6)$$

式中 K 为卡尔曼反馈增益。

2.1.2 横摆角速度估计用运动学模型

通过运动学模型来估计车辆的横摆角速度是最常用的方法, 主要途径是根据四轮轮速与横摆角速度的运动学关系进行估计^[65]。

文献[40]给出了车辆弯道行驶时通过非驱动轮内外轮速差来估计横摆角速度的方法。该方法需要准确的轮速信号和车轮侧偏角估计值, 且在弯道制动工况下由于较高的制动滑移率, 估计效果不佳。

具体模型如下

$$\begin{cases} v_{wfl} = \frac{\omega_{fl} r_w}{\cos \alpha_f} & v_{wfr} = \frac{\omega_{fr} r_w}{\cos \alpha_f} \\ \dot{\psi} = \frac{v_{fr} - v_{fl}}{2b_f} \cos \left(\frac{\delta_s}{i_s} - \alpha_f \right) + \frac{(v_{fr} - v_{fl}) r_w}{2b_f} \end{cases} \quad (7)$$

式中 α_f ——前后轮侧偏角

δ_s ——转向盘转角

i_s ——转向系统传动比

文献[43]在文献[40]的基础上, 考虑载荷转移对车轮滚动半径的影响, 最终的横摆角速度估计值由两种算法加权平均得到。由非驱动轮轮速估算得出的横摆角速度, 在制动和低附着系数路面上会使得车轮滑移率上升, 轮速信号失真; 车速较低时, 轮速也较低, 轮速信号分辨率不高, 得出的横摆角速度信号也不可信。对于由侧向加速度估算出来的横摆角速度, 当车辆处于非稳态条件下, 可信度是不高的。判断车辆是否处于稳态的标准是, 比较理想侧向加速度和实际侧向加速度的变化率, 当它们同号且量值超过某一门限值时, 认为处于非稳态状态。最后的计算公式为

$$\dot{\psi} = \frac{k_a \dot{\psi}_a + k_w \dot{\psi}_w}{k_a + k_w} \quad (8)$$

式中 k_a ——根据侧向加速度估计的权重系数

k_w ——根据轮速估计的权重系数

$\dot{\psi}_a$ ——根据侧向加速度计算的横摆角速度

$\dot{\psi}_w$ ——根据四轮轮速计算的横摆角速度

2.1.3 质心侧偏角估计用运动学模型

通过质心侧偏角与横摆角速度、侧向加速度、车速间的运动学关系直接进行计算, 会存在较大的误差, 且对传感器信号的要求很高。

文献[62, 64]给出了如下的估计方程, 并指出该方法只适用于不制动、不驱动的一般行驶工况。紧急工况时, 采用基于动力学模型的质心侧偏角估计算法, 并通过一个静态的参考模型来决定最终选取

哪种方法的估计值作为最终的输出。

$$\dot{\beta} = \frac{1}{1 + \beta^2} \left(\frac{\dot{v}_y}{v_x} - \dot{\psi} - \beta \frac{\dot{v}_x}{v_x} - \beta^2 \dot{\psi} \right) \quad (9)$$

当车速一定、质心侧偏角较小时, 可以简化为

$$\beta(t) = \beta_0 + \int_0^t \dot{\beta} dt = \beta_0 + \int_0^t \left(\frac{\dot{v}_y}{v_x} - \dot{\psi} \right) dt \quad (10)$$

文献[45, 55]给出了适用于卡尔曼滤波器的运动学模型, 该模型将车辆的横摆角速度作为已知的条件, 将纵向车速作为观测量。该模型的问题在于当车辆直线行驶时, 横摆角速度为 0, 系统不可观。

$$\begin{cases} \dot{v}_x = v_y \dot{\psi} + a_x \\ \dot{v}_y = -v_x \dot{\psi} + a_y \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \dot{\psi}(t) \\ -\dot{\psi}(t) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} \quad (11)$$

文献[48]给出了稳态条件下质心侧偏角的估计方程

$$\beta = \frac{1 - m l_f v^2 / (2 l_f k_r l)}{1 - m (l_f k_f - l_f k_r) v^2 / (2 l^2 k_f k_r)} \frac{l_f}{l} \delta_f \quad (12)$$

式中 δ_f 为前轮转角。

文献[68-70]采用 GPS(双天线型)+惯性导航系统的测量方式, 建立了基于运动学模型的卡尔曼滤波器, 对俯仰角、侧倾角、质心侧偏角等状态变量进行了估计。采用惯性导航系统, 对横摆角速度进行积分得到横摆角, 并通过对加速度信号积分得到车速, 从而得到车速和横摆角之间的夹角—质心侧偏角, 但积分会带来累计误差(漂移现象), 因此必须引入 GPS 系统, 这样的组合可以提高更新率、避免在没有 GPS 信号的地方系统不能正常工作, 又能对静态偏差进行估计和补偿, 并且降低对 INS 系统的精度等级要求。基于运动学卡尔曼滤波器的算法, 优点在于不受到参数变化的影响。

2.2 动力学模型

通过车辆动力学模型估计车速、横摆角速度和质心侧偏角是目前较为普遍的方法, 以文献[46, 83]中采用的包括纵向、侧向、横摆自由度并考虑载荷转移现象的 3 自由度整车动力学模型最具典型性。

该 3 自由度非线性动力学模型以四个车轮上的纵向力、前轮转角作为输入。如果能够实现前、后侧偏刚度的自适应计算, 那么该模型也能用于大侧向加速度条件下的车辆状态估计。同时模型计算的精度依赖于参数的准确程度。

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方式: 第一种是先根据轮速、车身纵向加速度等信息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，在这种情况下不需要知道4个车轮上的纵向力，因此前述3自由模型就简化为2自由度模型。该方式能够降低观测器的复杂度，不需要知道路面附着条件，但对车速估计的精度要求很高。第二种方式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、质心侧偏角一起联合估计，但必须知道4个车轮上的纵向力。

除了通过整车动力学模型外，文献[71-72]以线控转向系统为平台，给出了基于转向动力学的质心侧偏角估计方法，该方法以横摆角速度作为测量值。其思路为：首先通过转向盘力矩估计出轮胎回正力矩，然后依次再估计出轮胎侧向力、车轮侧偏角，最终得到车辆质心侧偏角。

2.3 轮胎力计算模型

这里所说的计算模型，是指适合于实时计算的模型，因而不包括魔术公式等复杂的轮胎模型。在实时计算中，轮胎力可以通过下面的两种方法来计算得到：通过简化的轮胎模型计算获得；以横摆角速度、侧向加速度等测量值作为输入，通过一定的动力学方程计算得到轮胎的纵向、侧向力。

2.3.1 基于轮胎模型的计算方法

文献[64]给出了德国 Bosch 公司推出的 ESP 系统上所采用的轮胎纵向、侧向力估计用 HSRI 轮胎模型

$$\begin{cases} H = \left[\left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \frac{k_\lambda}{\mu F_z} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \frac{k_\alpha}{\mu F_z} \tan \alpha \right)^2 \right]^{1/2} \\ F_b = \frac{\lambda}{1-\lambda} k_\lambda \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{4H^2} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中 λ —— 车轮纵向滑移率
 k_λ —— 车轮纵向刚度
 μ —— 路面附着系数
 F_z —— 车轮垂向载荷
 k_α —— 车轮侧偏刚度
 F_b —— 地面制动力

文献[48]给出了日本学者提出的简易轮胎侧向力计算模型

$$F_y = \begin{cases} - \left(k_\alpha \alpha - \frac{k_\alpha^2}{4\mu F_z} \alpha^2 \operatorname{sgn} \alpha \right) \sqrt{1 - \left(\frac{F_x}{\mu F} \right)^2} & |\alpha| < \frac{2\mu F_z}{k_\alpha} \\ -\mu F_z \sqrt{1 - \left(\frac{F_x}{\mu F} \right)^2} \operatorname{sgn} \alpha & |\alpha| \geq \frac{2\mu F_z}{k_\alpha} \end{cases} \quad (14)$$

文献[49]给出了一种简单易用，同时考虑纵向力、侧向力联合作用下的轮胎模型。但同前述两个模型一样，也必须已知路面附着系数

$$\begin{cases} F_y = \mu_s F_z [1 - \exp(-k_\alpha |\alpha|)] \operatorname{sgn} \alpha \\ \mu_s = \mu \frac{\sqrt{F_z^2 - \left(\frac{F_x}{\mu} \right)^2}}{F_z} \end{cases} \quad (15)$$

文献[82]给出了考虑轮胎垂向力影响的侧向力估计模型

$$F_y(\alpha, F_z, \xi) = k_{\text{red}} \left(1 - \frac{F_z}{\xi_1} \right) F_z \arctan(\xi_2 \alpha) \quad (16)$$

式中 $\xi_1, \xi_2, k_{\text{red}}$ 为模型参数。

2.3.2 基于动力学模型的计算方法

基于动力学模型计算轮胎力，就是通过纵向、侧向加速度、横摆角速度等直接测量的信号，通过动力学关系近似估算出地面附着力的大小。一般来说在轮胎线性范围内这种估算结果还是有一定精度的。通过这种方式估算出的轮胎力，通常不是用于车辆状态估计，而是用于轮胎侧偏刚度的自适应计算，或者是估计轮胎模型中的参数，如式(16)中的 ξ_1, ξ_2 。

文献[81]首先给出了由单轨模型推导出的前、后轴侧向力估算算法

$$\begin{cases} F_{yf} = \frac{J_z \ddot{\psi} + l_r m a_y \cos \beta + l_r m \dot{v} \sin \beta}{(l_f + l_r) \cos \delta_f} \\ F_{yr} = \frac{-J_z \ddot{\psi} + l_f m a_y \cos \beta + l_f m \dot{v} \sin \beta}{(l_f + l_r) \cos \delta_f} \end{cases} \quad (17)$$

式中 J_z 为质心处绕 z 轴转动惯量。

在小质心侧偏角和转向盘转角的情况下，式(17)还可以进行简化。当扩展至双轨模型时，认为左右轮上的侧向力正比于它们的垂向力，可以进一步推得4个车轮上的侧向力，这里不再详述。

3 估计算法

在车辆状态估计算法的研究中，大多数算法可由式(18)统一描述，而滑模算法可以由式(19)描述

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \Lambda(z - \hat{z}) \quad (18)$$

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, u) + \Lambda \cdot \operatorname{sgn}(z - \hat{z}) \quad (19)$$

式中 $f(\hat{x}, u)$ —— 系统模型

Λ —— 反馈增益

z, \hat{z} —— 测量值和预测的测量值

由于模型不能完全精确的描述车辆的特性，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。滑模算法的不同在于用符号函数 $\operatorname{sgn}(z - \hat{z})$ 代替了 $z - \hat{z}$ 。

观测器算法的核心内容就是如何计算获得反馈增益 A ，以使得测量值能更好地修正预测带来的误差，使估计更加准确。最常用的估计算法有卡尔曼滤波算法、龙贝格观测器、鲁棒观测器、滑模观测器、模糊观测器以及基于利亚普诺夫理论推导的非线性观测器，此外神经网络算法也得到了应用。下面的表 5 对参考文献中应用的算法作了分类。

表 5 不同估计算法在车辆状态估计中的应用

| 算法名称 | 估计目标 | 参考文献 |
|---------|-------------|--|
| 卡尔曼滤波器 | 纵向车速 | [25-27, 30-32, 35] |
| | 横摆角速度和质心侧偏角 | [35-36, 40-41, 43, 49-51, 53, 55, 58, 61, 64, 68-70] |
| | 轮胎力 | [71, 75-79] |
| 龙贝格观测器 | 横摆角速度和质心侧偏角 | [39, 44, 46, 51, 59, 65, 77, 83] |
| 鲁棒观测器 | 横摆角速度和质心侧偏角 | [45, 53, 55-57, 61-62, 67] |
| 滑模观测器 | 横摆角速度和质心侧偏角 | [51, 54, 84-85] |
| | 轮胎力 | [86] |
| 非线性观测器 | 纵向车速 | [28-29, 34] |
| | 横摆角速度和质心侧偏角 | [28-29, 37, 52, 60, 71-72] |
| 神经网络观测器 | 横摆角速度和质心侧偏角 | [63] |
| 模糊观测器 | 纵向车速 | [26, 30, 33] |

由表 5，在车辆状态估计问题的研究中，卡尔曼滤波算法是应用最为广泛的算法，涵盖了从纵向车速、横摆角速度、质心侧偏角到轮胎力估计的各个方面；龙贝格观测器、鲁棒观测器、滑模观测器和非线性观测器也得到了较深入的研究。但除了卡尔曼滤波器和龙贝格观测器算法外，其他绝大多数算法仅仅是通过仿真数据进行了验证，在实际使用过程中的效果有待进一步的确认。下面将分节依次介绍上述估计算法。

3.1 卡尔曼滤波算法

3.1.1 卡尔曼滤波算法以及广义卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法假设系统噪声和测量噪声均为高斯白噪声，整个估计过程由时间更新(完成预测)和测量更新(完成校正)两大部分组成。卡尔曼滤波器的设计，重点在于卡尔曼反馈增益的求解。卡尔曼增益决定了模型预测值和测量值在估计值中所占的比例关系。卡尔曼反馈增益反比于测量噪声的协方差。当测量噪声的协方差越大，也即测量值越来越不准时，卡尔曼反馈增益会越来越小，估计值越来越多地依赖模型的预测。另一方面，当先验误差协方差趋向于 0 时，也即模型的预测没有误差，卡

尔曼增益趋向于 0，这意味着估计值不再依赖测量值，完全由模型的预测决定。

因此，要提高卡尔曼滤波器的估计效果，必须从模型和测量两个角度同时着手。卡尔曼滤波器设计的难点在于，噪声协方差矩阵初值的确定，以及系统噪声、测量噪声协方差矩阵的确定。

上述卡尔曼滤波器只适用于线性系统，但在实际应用过程中一般都很难满足这一条件。广义卡尔曼滤波器通过将非线性函数在当前状态点处用泰勒展开加以线性化处理，那么认为在该时间点上系统是线性的。在算法流程上与普通卡尔曼滤波器相同，但首先求解雅可比矩阵，以确定系统矩阵和观测矩阵。

3.1.2 自适应卡尔曼滤波和模糊卡尔曼滤波

在传统卡尔曼滤波器中，假设系统噪声和观测噪声的协方差是固定的，但是在实际情况中不可能满足这样的条件，因此自适应卡尔曼滤波和模糊卡尔曼滤波的本质都是通过实时调整或计算系统噪声和观测噪声的协方差，使得估计更加准确，实现所谓的自适应。

文献[25-27, 30]通过基于规则的模糊卡尔曼滤波，对车速进行了估计。当某一车轮的滑移率很高时，增大该轮轮速测量噪声协方差值，使之在整个车速估计中的权重下降；当车速较低时，增大纵向加速度信号的测量噪声协方差，因为此时信号的信噪比不高，同时存在静态偏置的问题，因而是不太可信的。模糊规则的设计对估计效果影响很大。

文献[35]采用可靠性指数函数的解决了卡尔曼滤波器中如何实时估计噪声协方差矩阵的问题，进一步提高了估计的精度。采用指数函数来实时计算协方差，函数的输入为制动踏板位移和节气门开度，指数函数的各系数需要离线仿真计算得到。

3.2 龙贝格观测器

龙贝格观测器是建立在现代控制理论基础上的，通过系统的极点配置来达到状态估计目的一种方法。定义动力矩阵 F

$$F(\tilde{x}, u) = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} - L(\tilde{x}, u) \frac{\partial h(x, u)}{\partial x} \quad (20)$$

要使估计收敛、稳定，必须通过合理配置反馈矩阵 L ，使得动力矩阵的特征根均为负。除此之外， L 的配置还要尽可能的满足以下两点要求^[81]： F 尽可能的简单；动力矩阵的特征根尽可能恒定。

3.3 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，以测量值和估计的测量值之间的误差作为滑模平面进行观测器的设计。文献[84]给出了以横

摆角速度和车速作为测量值来估计质心侧偏角的方法。

为了避免符号函数带来的颤振现象, 可采用下面的函数作为饱和函数

$$\operatorname{sgn} \varepsilon_x = \frac{2}{\pi} \arctan(\lambda \varepsilon_x) \quad (21)$$

式中 λ 为设计参数。

文献[84]还采用了能观性矩阵的条件数作为判断估计误差的依据, 当估计误差越大, 条件数也越大。

目前应用滑模观测器来估计车辆状态的研究, 均为通过仿真数据进行离线验证^[54, 84-86], 该观测器的实时性、易用性有待进一步的试验验证。

3.4 鲁棒观测器

鲁棒观测器是考虑在参数变动的条件下, 设计合理的鲁棒反馈增益, 使得估计结果尽可能少的受到模型参数波动的影响。

文献[55-57, 62]均分别考虑了当前后侧偏刚度或侧向力发生波动时, 通过合理的反馈增益设计, 使扰动项前面的系数为 0, 从而抑制该负效应。

文献[53]给出了另一种鲁棒观测器的设计方法, 即基于 H_∞ 鲁棒控制理论的观测器, 并给出了选取观测器参数的原则。

同滑模控制器一样, 鲁棒观测器的估计效果也有待进一步试验验证。

3.5 其他非线性观测器

文献[37, 60]以里亚普诺夫稳定理论为出发点, 推导了使得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[63]用神经网络进行车辆状态估计。车辆侧偏角被看作横摆角速度和侧向加速度时间序列的映射。权重值根据试验数据计算。该方法获得了较好的试验结果, 但是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。同时很难获得大量而又精确的训练样本数据, 特别是在高速、复杂转向工况下。

4 估计过程中的参数自适应

实现估计过程中的参数自适应估计, 是提高估计精度、使估计算法能够适应不同行驶工况的有效方法。这里的参数自适应包括两大类: 第一类是状态估计算法本身控制参数的自适应, 如卡尔曼滤波算法中的系统、观测噪声协方差等。第二类是模型本身参数的自适应, 包括质量、侧偏刚度等车辆参

数以及路面纵向、侧向坡度等环境参数。本节主要讨论的是第二类参数自适应估计方法, 最常用的有递归最小二乘算法、联合卡尔曼滤波算法和基于观测器的算法。

4.1 递推最小二乘算法

递推最小二乘算法是最小二乘算法的递推形式, 最适合用于参数的在线估计。为了克服长时间后的数据饱和问题, 一般引入遗忘因子。此外一般采用 UD 分解或方根滤波来增强算法的数值计算能力。

文献[87]给出了带多重遗忘因子的自回归递推最小二乘算法, 对车辆的质量和路面坡度进行了在线辨识。由于质量和坡度这两个参数在行驶过程中各自的变化速率不同, 该文在传统的最小二乘算法上作了一定的改进。

文献[88]也采用递推最小二乘算法, 以侧向加速度、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, 采用的模型为

$$\left(\frac{J_z \dot{\psi}}{l_f} + \frac{l_r m a_y}{l_f + l_r} \right) \frac{1}{k_{af}} - \frac{l_r m a_y}{l_f + l_r} \frac{1}{k_{ar}} = \delta_f - \frac{l \dot{\psi}}{v} \quad (22)$$

4.2 联合卡尔曼滤波算法

文献[58, 89]给出了基于广义卡尔曼滤波的状态—参数联合估计算法, 并通过仿真数据进行了验证。但该方法由于状态变量过多, 矩阵维数过高, 不适用于在线辨识。以文献[58]提出的双卡尔曼滤波算法为例, 通过两个卡尔曼滤波器分别估计车辆的状态和参数。该算法分 4 步依次完成, 分别是参数预测、状态预测、状态校正和参数校正。

4.3 其他估计算法

文献[90]在车辆的质心侧偏角和横摆角速度已知的条件下, 通过龙贝格观测器来估计道路的侧向坡度。文中首先通过观测器观测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路面坡度引起的扰动从总的扰动中提取出来。文献[91]给出了一种自适应观测器, 以使得参数和状态同时更新。

文献[92]给出了一种在车速不变的条件下, 根据定义获得侧偏刚度的实时估计方法, 并考虑了直线行驶时计算式分母为 0 的问题

$$k_{f,i} = \begin{cases} m \frac{l_r}{l_f + l_r} \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{\delta_{f,i} - \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{v_i} + \dot{\psi}_i} & \left| \dot{\delta}_{f,i} - \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{v_i} + \dot{\psi}_i \right| > \varepsilon \\ k_{f,i-1} & \left| \dot{\delta}_{f,i} - \frac{\dot{\alpha}_{f,i}}{v_i} + \dot{\psi}_i \right| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (23)$$

文献[93]在假设前后侧偏刚度已知的条件下,对行驶过程中的质心位置进行了估计

$$\frac{l_f}{l} = \frac{1 + \frac{k_{af}}{ma_y} \left(\frac{lJ_z}{v} - \delta_f \right)}{\frac{k_{af}}{k_{ar}} + 1} \quad (24)$$

文献[94]给出了侧偏刚度实时估计算法的一般流程。首先通过观测器设计估计出车辆质心侧偏角,然后依次计算轮胎侧偏角和轮胎侧向力,最后通过递归最小二乘算法实时计算出轮胎侧偏刚度,并用于下一时刻质心侧偏角的估计,形成闭环。

5 国内研究现状

国内在车辆状态估计问题方面的研究处于起步阶段。研究的重点在于通过卡尔曼滤波器来估计车辆的横摆角速度、车速等,且大多停留在仿真研究阶段。关于车辆参数辨识问题的研究,进行的也不是很深入。

5.1 纵向车速估计

文献[95]首先分析了最大轮速法、斜率法、综合法等传统的纵向车速估计方法,然后提出采用递推法来估计纵向车速,并通过最大轮速法和测速雷达采集的与前车的相对车速来修正估计出的车速,以免估计发散。

文献[96]利用轮速信号和车身加速度信号,考虑制动过程中车轮半径的变化和加速度传感器的偏移误差,应用递推最小二乘算法实现了车速的实时估计。

文献[97]假设车速是 4 个轮速信号和车身加速度信号的线性叠加,4 个时变的轮速信号加权系数与相应车轮的滑移率大小有关,另一个时变的加速度加权系数与加速度大小有关。在实际使用中,车速估计分两步来完成:首先通过试验用直接测量车速的方法得到车速,然后通过递推最小二乘算法,离线计算出各系数,最后才能进行车速的实时估计。参数的标定需要大量的试验才能得到。

5.2 横摆角速度和质心侧偏角的估计

文献[98]基于线性二自由度模型,以侧向加速度作为测量值,通过卡尔曼滤波算法对车辆的横摆角速度进行了估计。在此基础上,文献[99]提出了一种自适应的卡尔曼滤波算法,对行驶过程中系统噪声和观测噪声的统计特性进行了在线估计,进一步提高了横摆角速度的估计精度。

文献[100-101]也采用卡尔曼滤波算法对车辆的横摆角速度、质心侧偏角进行了估计。文献[101]

除了给出自适应卡尔曼滤波算法外,还给出了基于广义卡尔曼滤波的估算算法,并通过仿真数据验证了算法的有效性。

文献[102]给出了一种基于模糊逻辑的质心侧偏角估计方法,有效解决了运动学模型中计算质心侧偏角的小分母求解问题,使得该模型得以发挥鲁棒性强的优点。该方法对输入信号不需要进行任何特殊假设(如白噪声假设)、对路面条件是鲁棒的。模糊逻辑以所估计的侧向速度估计偏差和四轮纵向滑移率偏差作为输入。

5.3 参数辨识

文献[103]将汽车转向系统看作一缓慢变化的非线性系统,在较短的时间间隔内,可用一参数时变的二阶线性系统对其动力学特性进行描述,然后通过最小二乘法对该二阶系统的各个系数进行了辨识。为了克服“数据饱和”现象,文中引入了带遗忘因子的最小二乘算法。同时为了避免小转向盘转角或者转向盘转角变化缓慢时最小二乘算法的发散问题,在试验中对转向盘转角加入了小幅的白噪声信号。

文献[104]通过车载 CAN 总线读取发动机转速、挡位等信息,设计了一种路面纵向坡度的估计算法,该算法核心思想如下:首先比较由汽车模型得到的加速度估计值和车速微分得到的实际加速度值,当两者存在差值时,将此差值作为误差再反馈给汽车模型,改变倾斜度参数,直至估计值收敛到真实值,此时对应的倾斜度参数即为路面纵向坡度的估计值。

文献[105]对非稳态侧偏理论模型的平移特征比、弯曲特征比等参数进行了辨识。首先通过轮胎非稳态侧偏试验,得到空间域内轮胎非稳态侧偏试验数据,然后经过数学处理和变化求得试验频率特性。以理论频率特性(数学模型)和试验频率特性(试验数据)为基础,运用约束非线性优化方法来辨识出模型的参数。

文献[106]采用最小二乘支持向量机算法,应用网络搜索和交叉验证的方法选择支持向量机参数,并将其应用于汽车转向时的非线性动态系统辨识,取得了良好的辨识效果,建立的参考模型能充分地描述汽车动力学行为。

6 结论

(1) 将车辆行驶过程中的状态估计问题归纳为传感器配置、估计用物理模型、状态估计算法和估计过程中的模型参数自适应等四个方面,依次对每

一方面进行了深入而详细的介绍。

(2) 由于状态估计是由模型预测和测量修正两大部分组成, 因此精确的建模和合理的反馈增益设计是保证估计准确的重要前提。

(3) 为了使状态观测器能够适应于各种不同的行驶工况, 必须实现关键参数的自适应。

参 考 文 献

- [1] ZANTEN V. Evolution of electronic control system for improving the vehicle dynamic behavior[C]// The 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2002, Hiroshima, Japan, 2002: 7-15.
- [2] SCHWARZ R. ESP II fahrdynamik der naechsten generation: Teil 1[J]. Automobile Technische Zeitschrift, 2003, 105(11): 1 062-1 069.
- SCHWARZ R. Vehicle dynamic of the next generation: Part 1[J]. Automobile Technical Magazine, 2003, 105 (11): 1 062-1 069.
- [3] ZANTEN V. VDC systems development and perspective [G]. SAE Paper 980235.
- [4] KLIAR W, REINELT W. Active front steering (Part 1): Mathematical modeling and parameter estimation[G]. SAE Paper 2004-01-1102.
- [5] KOEHN P, ECKRICH M. Active steering—The BMW approach towards modern steering technology[G]. SAE Paper 2004-01-1105.
- [6] SCHWARZ R. ESP II Fahrdynamik der naechsten generation : Teil 2[J]. Automobile Technische Zeitschrift, 2003, 105(12): 1 178-1 182.
- SCHWARZ R. Vehicle dynamic of the next generation: Part 2[J]. Automobile Technical Magazine, 2003, 105(12): 1 178-1 182.
- [7] KOEHN P. Die Aktivlenkung: Das fahrdynamische lenksystem des neuen 5er[J]. Sonderausgabe von ATZ und MTZ: BMW 5er, 2003: 96-104.
- KOEHN P. The active steering: The vehicle dynamic steering system of new 5er[J]. Special Edition of ATZ and MTZ: BMW 5er, 2003: 96-104.
- [8] SCHUSTER M. Die Aktivlenkung des neuen BMW 3er: Einfach besser fahren[J]. Sonderausgabe von ATZ und MTZ : BMW 3er, 2003: 132-137.
- SCHUSTER M. The acitve steering of new BMW 3er: For better driving[J]. Special Edition of ATZ and MTZ: BMW 3er, 2003: 132-137.
- [9] BAUMGARTEN G. Die entwicklung der stabilisierungsfunktion fuer die aktivlenkung[J]. Automobile Technische Zeitschrift, 2004, 106(9): 792-799.
- BAUMGARTEN G. Development of stabilization function for the active steering[J]. Automobile Technical Magazine, 2004, 106(9): 792-799.
- [10] HAC A, BODIE M. Improvements in vehicle handling through integrated control of chassis systems[J]. International Journal of Vehicle Design, 2002, 29(2): 23-49.
- [11] LEFFLER H, FOAG W. Prospects and aspects of and integrated chassis management ICM[G]. SAE Paper 2000-01-0105.
- [12] TRAECHTLER A. Integrated vehicle dynamics control using active brake, steering and suspension systems[J]. International Journal of Vehicle Design, 2004, 36(1): 1-11.
- [13] BEIKER, MITSCHKE. Verbesserungsmoeglichkeiten des fahrverhaltens von pkw durch zusammenwirkende regelsysteme[J]. Automobile Technische Zeitschrift, 2001, 103(1): 38-43.
- BEIKER, MITSCHKE. Improvement possibility of vehicle driving performance through integrated control system[J]. Automobile Technical Magazine, 2001, 103(1): 38-43.
- [14] WALLENTOWITZ H. Integration of chassis and traction control systems. what is possible-what makes sense-what is under development[C]// 2nd International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen, German, 1992: 1-7.
- [15] SHINO M, NAGAI M. Vehicle handling stability control by integrated control of direct yaw moment and active steering[C]// 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Hiroshima, Janpan, 2002: 25-38.
- [16] SATO S. Integrated chassis control system for improved vehicle dynamics[C]// 2nd International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen, German, 1992: 413-418.
- [17] MANNING W, SELBY M. IVMC: Intelligent vehicle motion control[G]. SAE Paper 2002-01-0821.
- [18] HIRANO Y. Integrated control system of 4WS and 4WD by H-infinity control[C]// 2nd International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen, German, 1992: 419-423.
- [19] HARADA A, HARADA H. Analysis of lateral stability with integrated control of suspension and steering systems[J]. JSAE Review, 1999, 20(2): 465-470.

- [20] KIM H, YOUNG P. Hybrid attitude control in steering maneuver using ARC Hil setup[J]. *Control Engineering Practice*, 2002, 10(12): 1 339-1 345.
- [21] HORIUCHI S, OKADA K, NOHTOMI S. Improvement of vehicle handling by nonlinear integrated control of four wheel steering and four wheel torque[J]. *JSAE Review*, 1999, 20(2): 459-464.
- [22] KITAJIMA K, PENG H. H_{∞} control for integrated side-slip, roll, and yaw controls for ground vehicles[C]// 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, Michigan, 2000: 1-8.
- [23] NAGAI M, SHINO M, GAO F. Study on integrated control of active front steer angle and direct yaw moment[J]. *JSAE Review*, 1999, 20(2): 309-315.
- [24] MOKHIAMAR O, ABE M. Effect of model response on model following type of combined lateral force and yaw moment control performance for active vehicle handling safety[J]. *JSAE Review*, 1999, 20(3): 473-480.
- [25] WATANABE K, KOBAYASHI K, CHEOK K. Absolute speed measurement of automobile from noisy acceleration and erroneous wheel speed information[G]. SAE Paper 920644.
- [26] 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.
- [27] 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: 3 086-3 090.
- [28] IMSLAND L, JOHANSEN T, FOSSEN T, et al. Vehicle velocity estimation using modular nonlinear observer [C]// Proceeding of 4th IEEE Conference on Decision Control, Hawaii, 2005: 6 728-6 733.
- [29] IMSLAND L, JOHANSEN T, FOSSEN T, et al. Vehicle velocity estimation using nonlinear observer[J]. *Automatica*, 2006, 42 (6): 2 091-2 103.
- [30] DAISS A. Beobachtung fahrdynamischer zustaende und verbesserung einer ABS-und fahrdynamik regelung[D]. Stuttgart: Universitaet Stuttgart, 1996.
- DAISS A. Observation of vehicle dynamic states and the improvement of an ABS control system[D]. Stuttgart: Univeristy of Stuttgart, 1996.
- [31] GUSTAFSSON F, AHLQVIST S, FORSSELL U. Sensor fusion for accurate computation of yaw rate and absolute velocity[G]. SAE Paper 2001-01-1064.
- [32] CHUL K, UCHANSKI M, HEDRICK J. Vehicle speed estimation using accelerometer and wheel speed measurements[G]. SAE Paper 2002-01-2229.
- [33] ZIMMER C, MASSET M, LEON G. Fuzzy approach for real time longitudinal velocity estimation of a road vehicle in critical situation[C]// 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen, 1996: 1 393-1 400.
- [34] JIANG F, GAO Z. An adaptive nonlinear filter approach to the vehicle velocity estimation for ABS[C]// Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications, Athens, USA, 2000: 490-495.
- [35] LEE H. Reliability indexed sensor fusion and its application to vehicle velocity estimation[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2006, 128(2): 236-243.
- [36] BEST M, GORDON T. Real-time state estimation of vehicle handling dynamics using an adaptive kalman filter[C]// 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Japan, 1998: 183-188.
- [37] 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.
- [38] AMMON D. Modellbildung und systementwicklung in der fahrzeugdynamik[M]. Stuttgart: B.G.Ruebner Verlag, 1997.
- AMMON D. Model building and system development in the vehicle dynamics[M]. Stuttgart: B.G.Ruebner Verlag, 1997.
- [39] CHEE W. Yaw rate estimation using two 1-Axis accelerometers[C]// American Control Conference, SanDiego, 2005: 423-429.
- [40] PAUL, VENHOVENSI, NAAB K. Vehicle dynamics estimation using kalman filters[J]. *Vehicle System Dynamics*, 1999, 32(2): 171-184.
- [41] UNGER I, ISERMANN R. Fault tolerant sensors for vehicle dynamics control[C]// American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, June 14-16, 2006: 3 948-3 953.
- [42] PAUL, VENHOVENSI, NAAB K. Vehicle dynamics estimation using kalman filters[C]// 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Japan, 1998: 195-200.
- [43] HAC A, SIMPSON M. Estimation of vehicle side slip

- angle and yaw rate[G]. SAE Paper 2000-01-0696.
- [44] STEPHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Virtual sensor : application to vehicle sideslip angle and transversal forces[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(2): 278-289.
- [45] UNGOREN A, PENG H, TSENG H. Experimental verification of lateral speed estimation methods[R/OL] (2002-10-1)[2007-9-23].
- [46] HIEMER M, VIETINGHOFF A, KIENCKE U. Determination of the vehicle body side slip angle with non-linear observer strategies[G]. SAE Paper 2005-01-0400.
- [47] RAMSBOTTOM M, BAKER H. Kalman filtering for monitoring and control driveline in application[G]. SAE Paper 2003-01-1280.
- [48] 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.
- [49] ZUURBIER J, BREMMER P. State estimation for integrated vehicle dynamics control[C]//6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, Michigan, 2000: 371: 375.
- [50] BEST M, GORDON T, DIXON P. An extended adaptive kalman filter for real-time state estimation of vehicle handling dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2000, 34(1): 57-75.
- [51] STEPHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Linear observer for vehicle sideslip angle : experimental validation[C]// IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Ajaccio, France, May 4-7, 2004: 341-346.
- [52] GRIP H, IMSLAND L, JOHANSEN. Nonlinear vehicle velocity observer with road-tire friction adaptation[C]// 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, CA, USA, December, 2007: 1 080-1 085.
- [53] O'BRIEN R, KIRIAKIDIS K. A comparison of H_{∞} with kalman filtering in vehicle state and parameter identification[C]// American Control Conference, Minneapolis, Minnesota, June 14-16, 2006: 3 954-3 959.
- [54] ZHANG J, XU S, RACHID A. Robust sliding mode observer for automatic steering of vehicles[C]// IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Dearborn, USA, 2000: 85-90.
- [55] FARRELY J, WELLSTEAD P. Estimation of vehicle lateral velocity[C]// Proceeding of the 1996 IEEE International Conference on Control Application, 1996: 552-558.
- [56] FUKADA Y. Estimation of vehicle slip-angle with combination method of model observer and direct integration[C]// 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Nagoya, Japan, 1998 : 201-205.
- [57] FUKADA Y. Slip-angle estimation for vehicle stability control[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 32(3): 375-388.
- [58] WENZEL T, BURNHAM K, BLUNDELL M. Dual extended kalman filter for vehicle state and parameter estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(2): 153-171.
- [59] KIENCKE U, DAISS A. Observation of lateral vehicle dynamics[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(8): 1 145-1 150.
- [60] KAMINAGA M, NAITO G. Vehicle body slip angle estimation using an adaptive observer[C]// 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Nagoya, Japan, 1998: 207-212.
- [61] SATRIA M, BEST M. Comparison between kalman filter and robust filter for vehicle handling dynamics state estimation[G]. SAE Paper 2002-01-1185.
- [62] AOKI Y, UCHIDA T, HORI Y. Experimental demonstration of body slip angle control based on a novel linear observer for electric vehicle[C]// 32nd Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics Society, IECON, 2005: 2 620-2 625.
- [63] SASAKI H, NISHIMAKI T. A side-slip angle estimation using neural network for a wheeled vehicle[G]. SAE Papers 2000-01-0695.
- [64] ZANTEN A V. Bosch ESP systems : 5 years of experience[G]. SAE Paper 2000-01-1633.
- [65] HALFMANN C. Adaptive semiphysikalische echtzeitsimulation der kraftfahrzeugdynamik im bewegten fahrzeug[D]. Darmstadt: VDI Verlag, 2001.
- HALFMANN C. Adaptive semi-physical realtime simulation of vehicle dynamics in driving vehicle[D]. Darmstadt: VDI Verlag, 2001.
- [66] KRANTZ W, NEUBECK J, WIEDEMANN J. Estimation of side slip angle using measured tire forces[G]. SAE Paper 2002-01-0969.
- [67] LI Li, WANG Feiyue, ZHOU Qunzhi. A robust observer designed for vehicle lateral motion estimation[C]// IEEE Proceedings on Intelligent Vehicles Symposium, 2005:

- 417-422.
- [68] BEVLY D, SHERIDAN R, CHRISTIAN J. Integrating INS sensors with GPS velocity measurements for continuous estimation of vehicle sideslip and tire cornering stiffness[C]// American Control Conference, Arlington, VA, June 25-27, 2001: 25-31.
- [69] RYU J, GERDES J. Integrating inertial sensors with GPS for vehicle dynamics control[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2004, 126(6): 1-26.
- [70] BEVLY D, GERDES J, WILSON C. The use of GPS based velocity measurements for improved vehicle state estimation[C]// American Control Conference, Chicago, Illinois, June, 2000: 2 538-2 542.
- [71] YIH P, RYU J, GERDES C. Vehicle state estimation using steering torque[C]// American Control Conference, Boston, Massachusetts, June, 2004: 2 116-2 121.
- [72] YIH P. Steer-by-wire: Implication for vehicle handling and safety[D]. Poston: Standford University, 2004.
- [73] HONG H. Prediction of friction between tire and road using powertrain model[C]// 5th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Nagoya, Japan, 1998: 135-139.
- [74] BURCKHARDT M. Radschlupf-Regel systeme[M]. Stuttgart: Vogel Buchverlag, 1993.
- BURCKHARDT M. Vehicle anti-skid control system[M]. Stuttgart: Vogel Buchverlag, 1993.
- [75] WILKIN M, CROLLA D, LEVESLEY M. Estimation of non-linear tyre forces for a performance vehicle using an extended kalman filter[G]. SAE Paper 2004-01-3529.
- [76] WILKIN M, CROLLA D, LEVESLEY M. Design of a robust tyre force estimator using an extended kalman filter[G]. SAE Paper 2005-01-0402.
- [77] HUH K, KIM J, YI K. Monitoring system design for estimating the lateral tyre force[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D(Journal of Automobile Engineering)*, 2003, 217(D8): 247-256.
- [78] RAY L. Nonlinear state and tire force estimation for advanced vehicle control[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1995, 3(1): 117-125.
- [79] RAY L. Nonlinear tire force estimation and road friction identification: Simulation and experiments[J]. *Automatica*, 1997, 33(10): 1 819-1 833.
- [80] ONOA E, ASANOVA K, SUGAIA M. Estimation of automotive tire force characteristics using wheel velocity[J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 13(11): 1 361-1 370.
- [81] KIENCKE U, NIELSEN L. Automotive control systems[M]. Berlin: Springer Verlag, 2001.
- [82] HIEMER M. Model based detection and reconstruction of road traffic accidents[D]. Karlsruhe : Karlsruhe University of Technology, 2004.
- [83] BOENER M. Adaptive querdynamikmodelle fur PKW fahrzustanderkennung und sensorfehlertoleranz[D]. Darmstadt: VDI Verlag, 2004.
- BOENER M. Adaptive lateral dynamic model for vehicle state observation and sensor fault tolerance[D]. Darmstadt, VDI Verlag, 2004.
- [84] STEPHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Evaluation of a sliding mode observer for vehicle sideslip angle[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 15(7): 900-910.
- [85] MSIRDI N, RABHI A, ZBIRI N. Vehicle-road interaction modelling for estimation of contact forces[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2005, 43 (Supp.): 403-411.
- [86] EDWARDS C, HEBDEN R, SPURGEON. Sliding mode observers for vehicle mode detection[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2005, 43(11): 823-843.
- [87] 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.
- [88] ARNDT M, DING E, MASSEL T. Observer based diagnosis of roll rate sensor[C]// American Control Conference, Boston, Massachusetts, June, 2004: 1 540-1 545.
- [89] BEST M, GORDON T. Combined state and parameter estimation of vehicle handling dynamics[C]// 6th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Ann Arbor, Michigan, 2000: 555-560.
- [90] HAHN J, RAJAMANI R, SEUNG H. Road bank angle estimation using disturbance observer[C]// 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Hiroshima, Japan, 2002: 455-460.
- [91] LIU C, 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.
- [92] 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, San Diego, California, 1997: 4 744-4 749.
- [93] MASSEL T, DING E, ARNDT M. Estimation of vehicle loading state[C]// Proceedings of the 2004 IEEE

- International Conference on Control Applications, 2004: 1 260-1 265.
- [94] MARCUS Boerner, ROLF Isermann. Adaptive one-track model for critical lateral driving situations[C]// 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Hiroshima, Japan, 2002: 1 195-1 200.
- [95] 齐志权, 刘昭度, 时开斌, 等. 基于汽车 ABS/ASR/ACC 集成化系统的 ABS 参考车速确定方法的研究[J]. 汽车工程, 2003, 25(6): 617-620.
- QI Zhiquan, LIU Zhaodu, SHI Kaibin, et al. Determination of vehicle reference speed for ABS based on an ABS/ASR/ACC integrated system[J]. Automotive Engineering, 2003, 25(6): 617-620.
- [96] 刘国福, 张屹, 王跃科, 等. ABS 系统基于数据融合技术的车速估计方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(增刊): 91-93.
- LIU Guofu, ZHANG Qi, WANG Yueke, et al. Sensor fusion based estimation technology of vehicle velocity in ABS system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(Supp.): 91-93.
- [97] 刘国福, 张屹, 王跃科. 汽车防抱制动系统车速估计方法的初步研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(6): 723-728.
- LIU Guofu, ZHANG Qi, WANG Yueke. A preliminary study on the estimation of vehicle speed in the anti-lock braking system[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(6): 723-728.
- [98] 高振海, 郑南宁, 程洪. 基于车辆动力学和 Kalman 滤波的汽车状态软测量[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 22-24.
- GAO Zhenhai, ZHENG Nanning, CHENG Hong. Soft sensor of vehicle state based on vehicle dynamics and Kalman filter[J]. Chinese Journal of System Simulation, 2004, 16(1): 22-24.
- [99] 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, 26(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, 26(1): 24-27.
- [100] 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.
- LU Dan. The research of vehicle steering attitude based on Kalman filter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2005.
- [101] 乔涛. 汽车状态的非线性估计及软测量[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- QIAO Tao. Vehicle state non-linear estimation and soft measurement[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [102] 施树明, LUPKER H, BREMMER P. 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. Estimation of vehicle side slip angle based on fuzzy logic[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(4): 426-430.
- [103] 管欣, 李谦. 车辆转向系统动力学模型的车载辨识算法[J]. 中国机械工程, 2002, 13(13): 1 095-1 097.
- GUAN Xin, LI Qian. Vehicle-bed identification method for the vehicle steering dynamics model[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(13): 1 095-1 097.
- [104] 王吉红, 隋青美, 张承进, 等. 基于汽车控制总线 (CAN-BUS) 的路面纵向坡度估计方法[J]. 山东大学学报, 2002, 35(增刊): 50-54.
- WANG Jihong, SUI Qingmei, ZHANG Chengjin, et al. CAN bus based road slope estimation[J]. Journal of Shandong University, 2002, 35(Supp.): 50-54.
- [105] 刘青, 郭孔辉, 陈秉聪. 轮胎非稳态侧偏理论模型的参数辨识[J]. 农业机械学报, 1998, 29(2): 55-60.
- LIU Qing, GUO Konghui, CHEN Bingcong. Parameter identification of the non steady-state tire cornering theoretical model[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1998, 29(2): 55-60.
- [106] 郑水波, 韩正之, 唐厚君, 等. 最小二乘支持向量机在汽车动态系统辨识中的应用[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(3): 392-396.
- ZHENG Shuibao, HAN Zhengzhi, TANG Houjun. Application of LS-SVMs in the automobile dynamical system identification[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(3): 392-396.

作者简介: 余卓平, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 同济大学汽车学院院长。主要研究方向为汽车系统动力学与控制、新能源汽车。发表论文近 70 篇, 获省部级科技进步奖 2 项。

E-mail: yuzhuoping@fcv-sh.com

高晓杰, 男, 1981 年出生, 博士研究生。主要研究方向为汽车系统动力学与控制, 发表论文近 10 篇。

E-mail: mondgaoh@hotmail.com