

# 汽车线控转向系统研究进展综述\*

陈俐<sup>1</sup> 李雄<sup>2</sup> 程小宣<sup>1</sup> 罗来军<sup>3</sup> 喻凡<sup>2</sup>

(1.上海交通大学,汽车电子控制技术国家工程实验室,上海 200240;2.上海交通大学,机械系统与振动国家重点实验室,上海 200240;3.联创汽车电子有限公司,上海 201206)

**【摘要】**阐述了汽车线控转向系统对自动驾驶发展的重要意义,梳理了线控转向技术的发展概况以及典型的线控转向布置方案,聚焦核心控制策略,对路感反馈控制中上层反馈力矩估计和下层执行器控制,以及转向执行控制中上层变传动比控制、车辆稳定性控制和下层转向执行器控制的思路、方法进行了综述,分别阐述了两部分总成控制的关键技术以及面临的挑战,并提出线控转向系统控制技术的发展趋势。

**关键词:** 自动驾驶 线控转向 路感反馈控制 转向执行控制

**中图分类号:** U463.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20172458

## Review on Research Progress of Automobile Steer-By-Wire System

Chen Li<sup>1</sup>, Li Xiong<sup>2</sup>, Cheng Xiaoxuan<sup>1</sup>, Luo Laijun<sup>3</sup>, Yu Fan<sup>2</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Automotive Electronic Control Technology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 3. DIAS Automotive Electronic Systems Company, Shanghai 201206)

**【Abstract】** The significance of The Steer-By-Wire(SBW) system for automatic driving has been clarified. Summarizing the SBW development and its typical layout schemes firstly, then this paper focused on the core control strategy, which contained the ideas, methods of upper feedback torque estimation and lower actuator control for road sense feedback control. By contrast in the structure of steering control, variable drive ratio control, vehicle stability control and steering actuator control were also elaborated. The key technologies and challenges of road sense feedback control and steering control were explained respectively. Finally, the authors predicted development trend of the SBW control technology.

**Key words:** Automatic driving, Steer-by-wire, Road sense feedback control, Steering control

## 1 前言

线控转向是自动驾驶汽车实现路径跟踪与避障避险必要的关键技术,其性能直接影响主动安全与驾乘体验。在国际汽车工程师协会(Society of Automotive Engineers, SAE)发布的5级自动驾驶体系中:第1级为驾驶辅助,要求对转向或加、减速中单独一项进行自动控制;第2级为部分自动驾驶,要求对转向和加、减速中的2项进行自动控制;第3级及以上分别为有条件自动驾驶、高度无人驾驶和完全自动驾驶,要求转向逐步与其他子系统实现高度自主协同<sup>[1]</sup>。近几年,自动驾驶汽车的研发与推广发展迅速,根据国家工业和信息化部等发布的

《汽车产业中长期发展规划》,2025年,高度和完全自动驾驶汽车开始进入市场<sup>[2]</sup>,在此背景下,线控转向技术由于可实现驾驶员操作和车辆运动的解耦,可提高紧急情况下转向操作正确性和驾驶员安全性<sup>[3]</sup>,且采用电机控制直接驱动实现车辆转向,因此更容易与车辆其他主动安全控制子系统进行通讯和集成控制,为自动驾驶汽车实现自主转向提供了良好的硬件基础,且线控转向系统被认为是实现高级自动驾驶的关键部件之一<sup>[4]</sup>,因此,线控转向系统的研发进展成为关注的焦点。

随着高级驾驶辅助系统(Advanced Driver Assistant Systems, ADAS)如巡航跟踪、车道保持、自动泊车等技术的发展与应用,汽车转向控制系统已先后经历了5个

\*基金项目:上海汽车工业科技发展基金会项目(1722)。

通讯作者:喻凡(1961—),女,教授,博士生导师,研究方向为汽车系统动力学与控制,fanyu@sjtu.edu.cn。

阶段,即最原始的纯机械转向、通用汽车公司首推的液压助力转向、丰田汽车公司首推的电控液压助力转向、Koyo首推的新一代电动助力转向和线控转向<sup>[5]</sup>。与传统的转向系统不同,线控转向系统取消了从转向盘到转向执行器之间的机械连接,完全由电控系统实现转向,可以摆脱传统转向系统的各种限制,汽车转向的力传递特性和角度传递特性的设计空间更大,更方便与自动驾驶其他子系统(如感知、动力、底盘等)实现集成,在改善汽车主动安全性能、驾驶特性、操纵性以及驾驶员路感方面具有优势,同时也给线控转向核心控制策略提出了新的要求。

本文首先梳理了汽车线控转向技术的发展概况以及线控转向系统的典型布置方案,然后聚焦核心控制策略,总结了路感反馈控制和转向执行控制的思路、方法、关键技术以及面临的挑战,最后提出线控转向系统控制技术的发展趋势。

## 2 线控转向系统发展概况

线控转向的概念起源于20世纪50年代,其发展过程如图1所示。美国天合(TRW)公司最早提出用控制信号代替转向盘和转向轮之间的机械连接,之后德国Kasselmann和Keranen设计了早期的线控转向模型<sup>[6]</sup>。受制于电子控制技术,直到20世纪90年代,线控转向技术才有较大进展,美国、欧洲、日本在线控转向的研发与推广方面比较活跃,一些采用线控转向系统的概念车陆续展出。

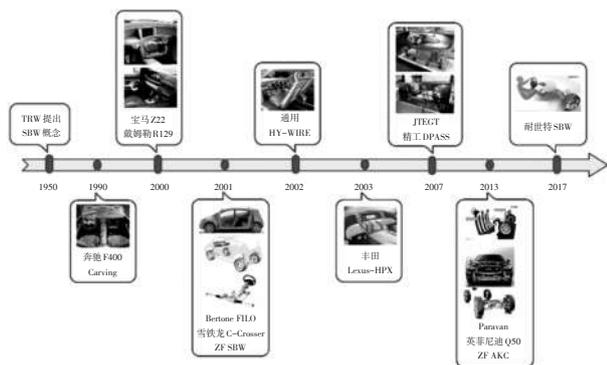


图1 线控转向技术发展史

2013年,英菲尼迪的“Q50”成为第1款应用线控转向技术的量产车型<sup>[7]</sup>。该线控转向系统由路感反馈总成、转向执行机构和3个电控单元组成,其中双转向电机的电控单元互相实现备份,可保证系统的冗余性能,转向柱与转向机间的离合器能够在线控转向系统出现故障时自动接合,保证紧急工况下依然可实现对车辆转向的机械操纵。2017年,耐世特(Nexteer)公司开发了

由“静默转向盘系统”和“按需转向系统”组成的线控转向系统<sup>[8]</sup>,该系统可随需转向,在自动驾驶时转向盘可以保持静止,并可收缩至组合仪表上,从而提供更大的车内空间。

## 3 线控转向系统的组成与布置方式

### 3.1 线控转向系统组成

线控转向系统最显著的特征为去掉了传统转向系统中从转向盘到转向执行器间的机械连接,由路感反馈总成、转向执行总成、控制器以及相关传感器组成,如图2所示。

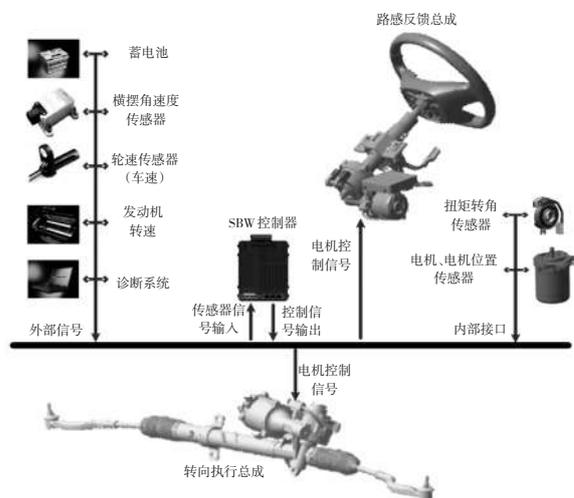


图2 线控转向系统的组成

路感反馈总成主要包括转向盘、路感电机、减速器和扭矩转角传感器,功能是驱动路感电机实现控制器给出的反馈力矩指令,对驾驶员施加合适的路感<sup>[9]</sup>。

转向执行总成主要由转向电机、转向器和转向拉杆等部件组成,转向电机一般为永磁同步直流电机,转向器多为齿轮齿条结构或者循环球式结构。该部分工作原理为驱动转向电机快速、准确地执行控制器给出的转向角指令,实现车辆的转向功能<sup>[10]</sup>。

线控转向控制器的功能包括路感反馈控制策略和线控转向执行控制策略。路感反馈控制策略根据驾驶意图、车辆状况与路况,过滤不必要的振动,实时输出路感反馈力矩指令。线控转向执行控制策略依据车辆运动控制准则,提供良好的操纵稳定性,实时输出车轮转向角指令。考虑到可靠性,保证车辆在任何工况下均不失去转向能力,线控转向执行控制的冗余防错功能至关重要。

### 3.2 线控转向系统的典型布置方式

根据转向电机的数量、布置位置与控制方式不同,目前线控转向系统的典型布置方式可分为5类,即单电

机前轮转向、双电机前轮转向、双电机独立前轮转向、后轮线控转向和四轮独立转向。每种布置方式的代表样机与优缺点如表1所示。

表1 线控转向系统布置方式比较

布置方式	代表产品	优点	缺点
单电机前轮转向	ZF 2001	结构简单,易于布置	单电机故障冗余性欠佳,电机功率较大
双电机前轮转向	Infiniti Q50、精工 DPASS	冗余性好,且对单个电机功率要求较小	冗余算法复杂,零部件成本增加
双电机独立前轮转向	斯坦福大学 X1, P1 <sup>[9]</sup>	去掉转向器部件,提高了控制自由度和空间利用率	无冗余功能,转向协同控制算法较复杂
后轮主动转向	ZF AKC <sup>[6]</sup>	控制自由度增加,转向能力增强	零部件数量增加,结构较复杂,控制算法较复杂
四轮独立转向	吉大 UFEV <sup>[6]</sup>	控制自由度最大,转向能力更强	系统结构复杂,可靠性降低,控制算法复杂

#### 4 路感反馈控制策略

路感反馈力矩估计一般有3种方法<sup>[11]</sup>。第1种为传感器测量方法,由于齿条处力矩包含有轮胎力和回正力矩等信息,故测量数据需经滤波才能作为反馈力矩;第2种为参数拟合方法,将反馈力矩设计成与其相关因素的函数形式;第3种是基于动力学模型的方法,依据车辆动态响应、驾驶员转向盘输入等状态,利用车辆动力学模型估算轮胎回正力矩和需要补偿的反馈力矩,进而计算期望的反馈力矩指令。该方法对车辆状态、驾驶风格具有自适应能力,是目前研究的主流,典型的基于动力学模型的路感反馈控制思路如图3所示。按照模块的功能,可以将路感反馈控制策略分为2个层次,上层控制策略计算期望的路感反馈力矩,下层控制策略准确、快速执行该反馈力矩。主要控制方法与特点总结如表2。

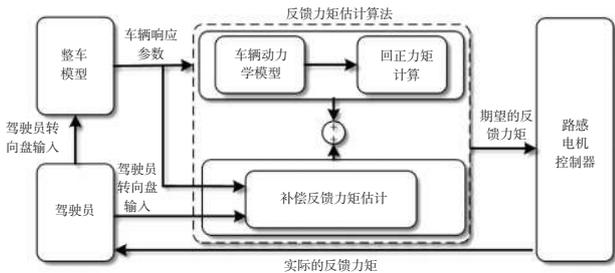


图3 路感反馈控制框图

##### 4.1 反馈力矩估计

在利用传感器进行反馈力矩相关测量的研究中,文献[12]、文献[13]利用扭矩传感器直接测量齿条力矩,

作为估算反馈力矩的参考,其中,文献[13]假设车辆在平滑路面行驶,未考虑路面干扰以及轮胎与路面之间的摩擦。

表2 路感反馈控制策略主要方法

控制内容	主要控制算法		特点
	传感器测量	扭矩传感器测齿条力矩 <sup>[12-13]</sup>	
上层:反馈力矩估计	参数拟合	1.函数曲线 <sup>[12-15]</sup> 2.模糊控制 <sup>[16]</sup>	控制器简单,但传感器精度和成本较高 控制器简单高效,但在不同工况下估计精度自适应较差
	动力学模型估计	车辆动力学估计 <sup>[17-19]</sup>	估计准确,对模型和控制器要求较高
	智能控制算法	1.神经网络 <sup>[20-21]</sup> 2.最优控制 <sup>[22]</sup>	控制器高效,但算法复杂
下层:路感电机控制	电机+电机+阻尼器	1.PID控制 <sup>[13,23-25]</sup> 2.前馈控制 <sup>[13,25]</sup> 3.基于磁流变液阻尼器 <sup>[13,26-27]</sup> 4.抗扰控制(ADRC) <sup>[28]</sup>	提供与路况和驾驶员输入相关的准确路感

参数拟合进行反馈力矩估计的研究中,大量文献通过不同的转向盘转角、车速和力矩,将反馈力矩分成回正力矩、摩擦力矩等部分,但不同文献对力矩的主要产生原因阐述不同,如文献[12]提出了较全面的反馈力矩估计算法,包括主要反馈力矩、摩擦力矩、阻尼力矩、惯性力矩和主动回正力矩,其力矩计算模块如图4所示。文献[14]则将反馈力矩的估算分成了4个部分,分别与转向盘转角、车辆横摆角速度、车辆侧向加速度和电机电流成比例,因此驾驶员能够在不同车况下获得相应的路感。文献[15]在计算力矩时考虑了阻尼力矩、惯性力矩、轮胎回正力矩和低速时的顶轴力矩,并由样车进行迂回试验验证了仿真计算结果。文献[16]考虑了反馈电机电流、车速、前轮转角和侧向加速度等变量,采用模糊算法得到了真实的路感反馈力矩,提高了驾驶舒适性。其中转角、侧向加速度和反馈力矩的关系同样由查图表得到。

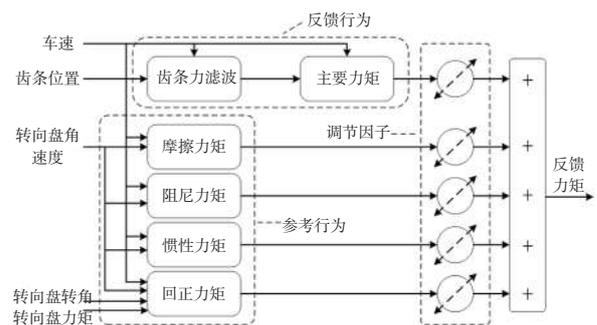


图4 反馈力矩估算框架<sup>[12]</sup>

国内外高校在仿真基础上,将线控转向系统装备到

实车上,利用车辆模型进行估算,进一步设计了反馈力矩估计算法。文献[17]利用整车动力学模型估计自回正力矩,考虑了转向侧偏角、正压力和轮胎属性等参数。文献[18]基于非线性车辆模型计算反馈力矩,考虑了轮胎的非线性及转向系统的摩擦和阻尼参数,以适应侧向加速度过大的情况,同时,利用加权函数补偿助力转向功能。该算法可适用于较大侧向加速度和转向轻便性等工况,但是由于摩擦模型的不准确导致蛇形试验出现了较大误差。文献[19]利用样车展开试验,发现由于左、右轮胎力和力矩存在明显差异,导致两模型不匹配,对估计摩擦因数造成很大误差,尤其是在侧向加速度由低逐渐增大的关键区域内。

近年来,智能算法也越来越多地被引入反馈力矩估计。文献[20]设计前馈神经网络(Feed-forward Neural Network, FNN)方法得到了路感反馈力矩。该文献提出,在推算反馈力矩时,隐藏层中的网络拓扑结构应该有至少10个神经元。文献[21]将前轴垂直位移、自回正力矩和前轮转角作为输入量,基于车辆动力学模型利用神经网络法计算了反馈电机电流,利用键合图理论建立了车辆前轮系统模型,在干、湿、冰路面分别进行了仿真验证。文献[22]提出基于迟滞的优化反馈力矩算法,通过迂回试验、双移线试验等跟踪性验证了算法有效性。

#### 4.2 路感电机控制

路感电机需要实施位移-力矩综合控制,将上层估计算法得到的力矩反馈给驾驶员以获得精准路感,常用的控制方法为PID反馈控制,并结合前馈控制用以提高响应速度和精度,同时在路感电机控制中也应该考虑复杂的干扰因素(如侧向风等)对驾驶员路感的影响。

文献[23]~文献[25]对线控转向系统中路感电机采取了PID控制,其中文献[23]提出了高速换道情况下的力矩控制,由侧向风测试进行了反馈力矩控制的调整。文献[24]基于阻尼控制和扰动观测器设计了控制器。文献[25]利用参考模型得到前馈控制环节,并结合反馈与前馈控制对轮胎力进行估计,反馈包括了线性与非线性的状态反馈,前馈为与横摆力矩、侧向力、纵向力相关的参考模型,在低摩擦表面进行了仿真验证。

由于磁流变液具有低成本和高可靠性等优势,一些文献提出了基于磁流变液的路感反馈控制。文献[13]利用电机和磁流变减振器作为产生反馈力矩的执行器,力矩跟踪控制包括前馈与反馈,前馈控制使用了系统动态特性来弥补由惯性力矩和粘性摩擦产生的力矩,反馈控制则使用PID控制来补偿参考力矩和反馈力矩之间

的误差,最后用正弦、摇摆试验验证了控制算法具有较好性能。文献[26]、文献[27]建立了基于磁流变液阻尼器的回正力矩和恢复力矩模型,随着阻尼器电流的变化实现反馈力矩的调节,试验证明了该反馈力矩系统可以应用于小角度的车辆线控转向。

考虑非线性摩擦和内外扰动因素,文献[28]采用的自抗扰控制包含跟踪微分器、扩展状态观测器和非线性状态反馈。仿真结果显示,对于非线性摩擦扰动,自抗扰控制较PID控制具有更强的鲁棒性。

#### 4.3 面临的挑战

路感反馈控制承担着将路面信息反馈给驾驶员的任务,因此需要同时满足准确性和舒适性要求,随着车辆转向系统的进一步发展,线控转向路感反馈控制面临的挑战为:

a. 复杂路况下路感力矩与人因工程的协调。路感反馈的评价很大程度上依赖于驾驶员主观评价,由于路面信息复杂多变、驾驶员对相同路面反馈要求不一,因此复杂路况下符合不同驾驶风格的路感反馈控制是一个难题。

b. 位移、力矩联合伺服控制的精度。路感反馈力矩的大小直接影响驾驶员对路感反馈的评价,一般路感电机的控制以力矩控制为主、转角控制为辅,而在准确的位置输出期望的反馈力矩,当外部干扰变化剧烈、部件老化时确保控制品质也是一个难题。

c. 随着自动驾驶的发展,在未来第5级全自动驾驶车上,车辆可完全交由控制器操纵,法规可能允许驾驶员不需要进行转向操控,路感反馈的功能和性能要求可能需要重新定义。

### 5 线控转向执行控制策略

线控转向执行控制根据当前路况、车辆行驶状态及性能要求,提出控制目标(如目标路径、期望的车辆运动响应、驾乘舒适性等)和约束条件,并对难以直接测量的状态或参数进行状态观测和参数辨识,综合控制目标和约束条件等信息计算出期望的车轮转角指令,由转向电机执行。典型的控制框图如图5所示,根据模块的功能,可以将线控转向控制执行分为2个层次:上层控制策略进行车辆运动状态控制,主要有变动传动比控制和车辆稳定性控制2种方法,以计算期望的车轮转角;下层控制策略准确、快速地实现该车轮转角。主要控制方法与特点总结如表3。

考虑到转向系统是汽车安全的关键部件,冗余与容错设计在前述的布置方式中已作为一个不可忽视的因

素,它们也是线控转向执行控制的重要主题。

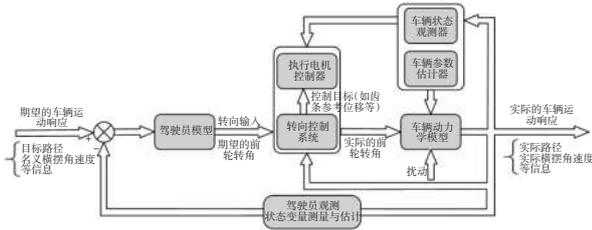


图5 线控转向执行控制框图

表3 线控转向执行控制策略主要算法

控制内容	控制算法	特点
上层:变传动比控制	1.随车速变化 <sup>[29]</sup> 2.横摆角速度增益不变 <sup>[30]</sup> 3.侧向加速度和横摆角速度增益不变 <sup>[31]</sup> 4.遗传算法、模糊控制 <sup>[32-33]</sup>	实现低速灵活、高速稳定
上层:车辆稳定性控制	1.分数阶PID、模糊PID <sup>[34-36]</sup> 2.LQR、LQG最优控制算法 <sup>[37-43]</sup> 3.前馈控制、反馈控制、前馈-反馈控制 <sup>[44-45]</sup> 4. $H_{\infty}$ 鲁棒控制 <sup>[46-50]</sup> 5.滑模控制、自适应滑模控制 <sup>[51-53]</sup> 6.自适应全局快速滑模控制 <sup>[54]</sup> 7.自适应终端滑模控制、快速终端滑模控制 <sup>[49,55]</sup> 8.自适应快速非奇异终端滑模控制 <sup>[56]</sup> 9.自适应神经网络滑模控制 <sup>[57-58]</sup> 10.模型预测控制 <sup>[59-62]</sup> 11.四轮转向和集成控制 <sup>[63-68]</sup>	基于车辆动力学模型,根据车辆运动控制目标,利用控制算法计算参考前轮转角
下层:转向电机控制	1.PID控制 <sup>[45,69-71]</sup> 2.前馈控制 <sup>[72]</sup> 3.模糊PID <sup>[73-74]</sup> 4.无电流传感器控制 <sup>[75]</sup> 5.双向控制 <sup>[76-81]</sup>	使转向电机准确快速跟踪目标前轮转角

### 5.1 车辆运动状态控制

以实现预期车辆运动状态为目标,线控转向控制策略主要有2种思路:变传动比控制和车辆稳定性控制。

#### 5.1.1 变传动比控制

变传动比控制的目标为高速时转向的稳定性和低速时转向的灵活性。一般而言,传动比在低速时取值较小,高速时取值较大。由于线控转向系统去除了传动轴机械结构的限制,因此传动比的设计空间更大。

文献[29]设计了随车速变化的函数关系变传动比特性,并基于变传动比设计了线性二次调节器主动转向系统。文献[30]根据期望横摆速度增益不变和期望侧向加速度增益不变分别设计了传动比控制策略,并将两者结合设计了第3种控制策略,合理分配两种控制策略的车速适应范围,可达到最佳的变动传动比控制效果。文献[31]设计了变增益的线控转向系统角传动比控制策略,高速段设计为侧向加速度增益不变,中速段设计

为横摆角速度增益不变,低速段根据主观评价试验来确定传动比。

除根据车辆运动响应增益来确定不同的传动比策略外,文献[32]文献[33]分别利用遗传算法和模糊控制理论设计了转向系统变传动比特性。奔驰公司<sup>[44]</sup>通过设计变模数齿条实现转向系统变传动比特性控制。

#### 5.1.2 车辆稳定性控制

以车辆动力学为基础的车辆稳定性控制已有丰富的研究成果,在线控转向执行控制中,由于车辆行驶工况复杂、车辆参数时变、状态动态变化以及驾驶员风格各异,对车辆稳定性控制的自适应性和鲁棒性提出了较高甚至极限需求,成为了国内外学者的研究重点。

PID方法在工业控制领域应用广泛,但是传统PID控制不能实现参数自整定,不能满足线控转向要求。文献[34]设计了基于分数阶PID控制理论的线控转向控制器,利用优化算法计算分数阶5个参数,并利用递归算法Oustaloup拟合了分数阶PID控制器,验证了分数阶PID控制的鲁棒性。文献[35]利用模糊PID对线控转向执行控制进行研究,建立二自由度车辆模型计算理想横摆角速度和质心侧偏角,将实际值与理想值的偏差作为控制器输入,设计自适应模糊PI控制器输出期望的前轮转角,实现基于线控转向的车辆稳定性控制。文献[36]设计模糊PI控制器对车身侧倾进行控制,利用车轮上方垂直载荷与车辆所有载荷比值的实际值和门限值偏差作为输入,计算期望转向角。

优化算法在线控转向执行控制中得到应用,文献[37]设计了全状态观测器和线性二次整定(LQR)控制器,利用灰箱辨识出线控转向模型参数,解决了电液执行系统的非线性带来的影响。文献[38]根据车辆转向跟随性和稳定性控制中产生的额外侧向力,提出了一种基于线性二次型调节器的主动前轮转向系统(AFS)最优控制策略,利用AFS补偿由于非对称制动力分配而产生的横摆和侧倾。文献[39]~文献[42]针对AFS设计了横摆角速度和质心侧偏角反馈的LQR最优控制算法,针对难测变量质心侧偏角设计了状态观测器,文献[43]利用线性二次高斯(LQG)和回路转换复原法设计了控制器。

针对车辆在行驶过程中可能出现的干扰,例如侧向风等,文献[44]设计了前馈控制器提前对系统受到的扰动进行补偿,以传递函数形式表达前轮转角与车辆横摆角速度之间的关系,控制策略在高速双移线和侧向风干扰工况下进行了验证。文献[45]利用横摆角速度和质心侧偏角偏差值分别设计了前馈控制器和反馈控制器,

用来计算期望的转向电机力矩。

针对线控转向系统建模和车辆动力学模型中的一些参数不确定性,国内外许多学者设计了鲁棒控制<sup>[46-49]</sup>。文献[48]考虑轮胎力不确定性,使用具有逆乘数不确定度的 $H_\infty$ 分析,结果表明,在高频干扰下,鲁棒稳定性的界限仅由前轮侧向力的标称梯度与最小梯度之间的比值定义,而在低频下,鲁棒稳定性的约束则表示为前向速度的函数。文献[49]则将车辆动力学模型中的一些不确定性参数,例如将车速、前后轮侧偏刚度视为不确定性参数,设计 $\mu$ 控制器。文献[50]考虑了主动转向系统的状态延迟对车辆设计了侧向动力学鲁棒控制。

滑模变结构控制可以根据系统当前状态表现(例如状态变量偏差及偏差导数等),按照既定规则发生变化,迫使系统按照预先设定的“滑模面”进行状态转移运动,该方法与被控对象参数摄动无关,且无需对系统进行辨识,文献[51]~文献[58]针对线控转向系统采取了不同形式的滑模变结构控制。文献[51]通过对不同的滑模面进行积分,运用李雅普洛夫直接法研究了滑模控制的稳定性,同时分析了线控转向系统的动力学模型和混沌运动,设计了车辆横摆角速度稳定的滑模控制器,仿真试验显示,该滑模控制器可以将响应延迟控制在1 s以内。文献[52]、文献[53]将自适应控制与滑模控制相结合,设计了自适应滑模控制器,将线控转向系统下层转向电机到前轮转角视为一个二阶系统,并将轮胎受到的回正力矩和地面摩擦视为转向控制中的外部扰动因素,利用自适应估计律估计了回正力矩,基于滑模控制的反馈控制器对线控转向系统转向角误差进行了跟踪控制。文献[54]利用自适应滑模控制器设计了车辆状态稳定性控制器,应用卡尔曼算法对车轮侧偏刚度进行估计,建立了自适应全局快速滑模控制。文献[55]指出在传统基于滑模控制的线性超平面中,跟踪误差渐进收敛到零且闭环控制系统中始终存在震颤问题,该文献终端滑模控制使误差在有限时间里收敛到零。文献[49]应用扩展卡尔曼滤波对车辆横摆角速度和质心侧偏角进行估计,对车辆参数不确定性进行了 $\mu$ 鲁棒控制,设计了快速终端滑模控制器。文献[52]设计了自适应终端滑模控制器,运用李亚普洛夫方法对参数不确定性边界和外部扰动进行了估计,通过实车双移线和斜坡转向试验表明,最大转向角误差为0.041 1 rad,均方根误差最小为0.012 3 rad。

针对终端滑模控制在提高收敛速度的同时带来的奇异性问题,文献[56]将快速奇异终端滑模控制(Fast Nonsingular Terminal Sliding Mode Control, FNTSMC)与

自适应估计相结合,设计了线控转向系统自适应快速非奇异终端滑模控制(Adaptive Fast Nonsingular Terminal Sliding Mode Control, AFNTSMC),将自适应估计得到的回正力矩同时用于路感反馈控制和转向角扰动补偿控制。

转向控制模型较复杂,一些不依赖于具体精确的物理模型同时又能保证控制器精确控制的智能控制算法近期得到研究。文献[57]、文献[58]分别利用神经网络、模糊控制与滑模控制相结合,设计了自适应径向基函数神经网络滑模控制和小波模糊神经网络滑模控制,对线控转向系统转向角跟踪进行了控制。文献[59]~文献[62]利用模型预测控制,同时针对车辆动力学模型中不确定性参数进行估计,设计了转向模型预测控制器。

针对车辆稳定性控制要求,采取线控转向技术能更易于实现四轮转向和集成控制。通过对后轮施加转角,文献[63]、文献[64]也证实了四轮转向可大大提高车辆转向时的稳定性,同时,文献[65]通过四轮转向和制动集成控制进一步增强了车辆的稳定性,文献[66]、文献[67]通过对主动转向和主动横摆力矩等进行集成控制增强了系统转向的稳定性。文献[68]通过鲁棒增益控制对主动转向和悬架系统进行了集成控制,增强了车辆的行驶稳定性。

## 5.2 转向执行控制

转向执行器接受上层控制的指令,通过对电机或者液压系统进行跟踪控制确保车轮转角控制的精确性。

文献[69]、文献[70]设计PID控制对线控液压转向系统下层液压缸进行了控制,控制精度较传统液压助力转向高。文献[45]、文献[71]将前轮转角误差作为输入变量,设计PID控制器。

文献[72]在控制转向电机时考虑了线控转向系统的不确定参数,设计了转向电机自适应前馈扭矩控制器,利用齿条速度误差设计了参数估计器。文献[73]、文献[74]利用模糊控制设计了电机模糊PID控制器,有效增强了电机控制的鲁棒性。文献[75]在对转向电机进行控制时,去掉电流传感器,通过在控制中注入高频电流实现了转向电机电流环的闭环控制。文献[76]围绕无人车底层控制,针对全线控车辆利用反馈线性化思想设计了横摆角速度跟踪算法,实现了目标车的遥控行驶。

由于线控转向系统存在相耦合车轮转向角控制和驾驶员手感力矩控制,为了协调这2类控制,文献[77]~文献[81]利用了双向控制的思想,即双向控制路感力矩和车轮转角。线控转向双向控制主要有力反馈-位置

差型双向控制和力差-位置反馈型双向控制以及两种综合形式的双向控制,可以实现很好的控制精度。

### 5.3 线控转向执行容错控制

在线控转向系统中,由于电子元件失效或者控制系统环境发生变化(例如存在较大侧向力<sup>[82]</sup>)时均可能导致线控转向系统失效,一旦发生,后果非常严重。为了提高线控转向系统的安全性,需要充分考虑转向执行系统的容错能力。在过去20年间,线控转向的容错控制也越来越吸引研究者的注意<sup>[83]</sup>,在被动容错和主动容错方面开展了一些研究。

线控转向系统被动容错方案主要是指采取额外装置,在系统失效时备份装置可以保证不失去转向能力,典型的有机械转向轴备份和作动器备份。英菲尼迪Q50采用安装了离合器装置的转向轴备份,在线控系统失效时离合器接合可实现转向功能,属于典型的被动容错方案,此外文献[84]还采取了备用电机备份,在转向电机出现失效时备用电机通过离合器接合可实现转向功能,与转向轴备份一起实现双备份容错控制。

由于被动容错控制需要额外的机械机构或者作动器部件,且额外部件仅在失效时工作,因此结构较为复杂,多为现阶段线控转向系统法规出现前的过渡方案,因此越来越多的线控转向系统采用主动容错方案。

状态观测器的引入,可以在不直接依赖于传感器的情况下获取所需变量,大大增强了系统的容错性能,如扰动观测器<sup>[85]</sup>、龙贝格观测器<sup>[86]</sup>和基于卡尔曼滤波的状态观测器<sup>[87]</sup>等,文献[88]设计了未知输入变量观测器,提高了系统的故障诊断性能。文献[89]针对线控转向控制器的CAN总线通讯,利用多核ECU实现冗余多线程控制,提高了快速误差检测的能力。文献[90]基于线性矩阵不等式设计了线控转向系统鲁棒 $H_{\infty}$ 滑模观测器,提高了传感器的冗余性能。文献[91]设计了非线性滑模观测器和长范围预测器,基于丢番图辨识的长范围预测器可以提高故障诊断的效率,台架试验结果表明该预测器对系统整体的鲁棒性没有造成影响。文献[92]设计了自适应诊断观测器,可以根据作动器的效率缺失自适应地改变控制策略。文献[93]、文献[94]利用卡尔曼滤波对前轮转角传感器和电机参数进行了估计,增强了传感器故障或者电机突变故障时线控转向系统的冗余防错控制。

除利用状态观测器实现冗余控制外,多电子元器件的主动容错控制方法也越来越多,文献[95]设计了线控转向系统双电机冗余控制,利用自适应衰减卡尔曼滤波设计故障诊断系统,分别对转矩和转角闭环控制进行故

障检测,双电机分别采用转角闭环控制和扭矩闭环控制。文献[96]、文献[97]采取多传感器冗余方式提高系统的容错性能。文献[98]设计了双控制同步备份,并分别利用CAN、CANFD和FlexRay进行通讯测试。

提高线控转向控制算法的鲁棒性和容错性实现容错控制依然是目前采用比较多的方式。文献[99]设计了基于 $\delta$ 因子的容错模型预测控制器,通过 $\delta$ 因子构建以线性矩阵不等式为基础的故障检测观测器,用以估计线控转向系统中的故障。文献[100]、文献[101]针对线控转向轮毂电机驱动电动车,在出现侧滑或者电机作动器失效时,利用线性变参数理论设计了上层重构容错控制器重新分配各轮力矩,确保了故障发生时的系统可控制性能。文献[102]将线控转向系统控制分为车辆运动的基本控制器和车辆舒适性的额外控制器2类,并将其隔离控制,通过限制额外控制器部分的输出范围,减少此部分传感器失效带给线控转向系统的影响。文献[103]基于多维高斯隐式马尔科夫模型对线控转向转角传感器设计了容错控制策略。文献[104]利用加权广义逆的直接横摆力矩控制,对线控转向和线控制动中的传感器容错进行了控制。文献[105]基于遗忘因子的递归最小二乘法对线控转向系统的永磁同步电机进行了容错控制。文献[106]在线控转向系统失效时,通过引入较高的滑移率抵抗车辆的横摆运动,使车辆保持接近稳定的操作状态,提高了线控转向系统的容错性能。文献[107]通过设计反馈加前馈双控制实现线控转向系统转角控制,利用修正卡尔曼滤波设计了前轮转角防错控制,提高了系统整体的冗余性能。

FlexRay总线具有高速率、支持多级别容错能力等优点,在线控转向容错控制中得到了大量的应用,如欧洲“SPARC”<sup>[108]</sup>、“HAVEit”<sup>[109]</sup>、“SafeCar”<sup>[110]</sup>等项目应用FlexRay总线技术开发了线控转向系统,GM公司“Sequel”实车<sup>[111]</sup>、韩国“HanilProTech”模拟器<sup>[112]</sup>、印度“ELVEEGO CIRCUITS”<sup>[113]</sup>等都采用了FlexRay技术实现线控转向中的信息通讯。

智能控制算法在容错控制中也得到一些应用,文献[114]首先建立粗糙集模型减少了线控转向系统的冗余信息,并应用粒子群优化算法优化后的径向基神经网络学习故障准则,提高了系统的容错性能。文献[115]利用MATLAB工具箱TrueTime,基于自适应的模糊推理系统设计了网络层面的故障诊断系统。文献[116]基于ISO 26262利用蚁群算法对包括线控转向系统在内的整车安全性进行了分级划分,提高了系统的容错性能。

## 5.4 面临的挑战

在自动驾驶条件下,特别是在复杂路况和行驶环境中,需要规划出安全路径,并且准确、快速实现路径跟踪,而现有的控制算法在环境适应性方面尚不足,因此,线控转向系统面临着一系列挑战:

a. 目前已有的较成熟的转向执行控制策略大多仅实现转向助力功能,不能满足自动驾驶环境下线控转向执行控制的要求。特别对于复杂的路况和交通环境下,需要研发自适应和鲁棒性强的线控转向执行算法。

b. 随着自动驾驶进程的进一步发展,线控转向系统需要与其他(感知、底盘、动力等)自动驾驶控制子系统进行高度融合与协同,复杂度和可靠性是挑战。

c. 在自动驾驶由第2级发展到第4级的过程中,线控转向系统需正确判别紧急状态、准确识别驾驶员意图,实现提前预判紧急工况、规划道路动态安全边界、辅助驾驶员进行自动紧急转向等驾驶行为,因此,需要解决驾驶员干预与自动驾驶控制策略间的融合与协同问题。

## 6 结论和展望

线控转向是自动驾驶的关键组成部分,随着自动驾驶汽车的智能化程度逐渐提高,线控转向控制策略在环境适应性、驾驶智能化以及可靠性方面遇到新的挑战。为了满足自动驾驶从当前驾驶辅助阶段逐渐发展至完全自动驾驶阶段对转向系统的要求,线控转向控制策略亟待在几方面进行研究:

a. 复杂路况、复杂交通环境条件下线控转向系统的自适应性和鲁棒性,驾驶风格各异的人因工程协同性;

b. 极端工况下的失效模式和冗余容错控制策略;

c. 线控转向系统样机的实车装载与实车性能验证,为市场推广与应用奠定基础;

d. 考虑复杂工况,满足良好的操纵稳定性与车辆驾乘人员舒适性感受的线控转向系统的操稳分析和评价指标;

e. 随着汽车电动化进程的发展,整车电器元件和功率进一步增加,整车电源电压易出现波动,影响线控转向作动器的伺服控制精度,因此需开展更高电压的车载电源(如48V车载电源)供电下的线控转向系统的设计与控制研发。

### 参 考 文 献

[1] Sauras P, Gil A, Gill J S, et al. VoGe: A Voice and Gesture System for Interacting with Autonomous Cars[R]. SAE Technical Paper, 2017.

[2] 彭斐. 力争十年实现汽车强国梦 解读《汽车产业中长期发展规划》[J]. 汽车与配件, 2017(14):60-61.

[3] Schneider N, Berg G, Paradies S, et al. Designing Emergency Steering and Evasion Assist to Enhance Safety in Use and Controllability[M]// Bengler K, Drüke J, Hoffmann S, et al. UR: BAN Human Factors in Traffic. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018: 479-494.

[4] Schwarz B, Eckstein L. Reduction of Driving Resistance by Means of Wheel-individual Steer-by-Wire Systems[J]. ATZ worldwide, 2018, 120(1): 44-49.

[5] 季学武, 刘亚辉, 杨恺明, 等. 乘用车电控转向系统的发展趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2015, 6(3):208-216.

[6] 宗长富, 李刚, 郑宏宇, 等. 线控汽车底盘控制技术的研究进展及展望[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2):160-176.

[7] 齐伟. 英菲尼迪线控主动转向系统(DAS)浅探[J]. 汽车维修, 2014(8):11-13.

[8] 《汽车与配件》编辑部. 耐世特:展示最新自动驾驶应用[J]. 汽车与配件, 2017(14):54.

[9] Yih P. Steer-by-Wire: Implications for Vehicle Handling and Safety[D]. Palo Alto: Stanford University, 2005.

[10] 王祥. 汽车线控转向系统双向控制及变传动比特性研究[D]. 长春:吉林大学, 2013.

[11] 郑宏宇, 宗长富, 王祥. 汽车线控转向系统路感模拟方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2):18-22.

[12] Müller S F S. A New Model to Compute the Desired Steering Torque for Steer-by-Wire Vehicles and Driving Simulators[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(sup1): 251-271.

[13] Lee J, Chang S, Kim K, et al. Steering Wheel Torque Control of Steer-by-Wire System for Steering Feel[R]. SAE Technical Paper, 2017.

[14] Ryouhei Hayama, Sadahiro Kawahara, Shirou Nakano, et al. Resistance Torque Control for Steer-by-Wire System to Improve Human - Machine Interface[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(9): 1065-1075.

[15] Balachandran A, Gerdes J C. Artificial Steering Feel Design for Steer-by-Wire Vehicles[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 404-409.

[16] Xiao Z, Xiao B. Research on Road Feeling Control Strategy for Electric Forklift Steer-by-Wire System[C]. Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2016: 1744-1749.

[17] Kim S H, Chu C N. A New Manual Steering Torque Estimation Model for Steer-by-Wire Systems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(7): 993-1008.

[18] Tao W, Gao B, Chu H, et al. Studies on Steering Feeling Feedback System Based on Nonlinear Vehicle Model[R].

- SAE Technical Paper, 2017.
- [19] Beal C E. Independent Wheel Effects in Real Time Estimation of Tire-Road Friction Coefficient from Steering Torque[J]. IFAC- Papersonline, 2016, 49(11): 319-326.
- [20] Ende K T R V, Schaare D, Kaste J, et al. Practicability Study on the Suitability of Artificial, Neural Networks for the Approximation of Unknown Steering Torques[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(10): 1362-1383.
- [21] Jayachandran J, Ashok D. Neural Network Based Approach for the Generation of Road Feel in a Steer-by-Wire System [J]. Engineering Journal, 2016, 20(5):50-66.
- [22] Kirli A, Arslan M S. Online Optimized Hysteresis-Based Steering Feel Model for Steer-by-Wire Systems[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(7): 1-14.
- [23] Takagi F, Shiiba T, Ishizaki R, et al. Evaluation of Handling Performance in Steer-by-Wire Vehicle[C]. Advanced Vehicle Control: Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16), CRC Press, 2016: 411.
- [24] Fang G, Chen H. An ADAS-Oriented Virtual EPS Platform Based on the Force Feedback Actuator of the Steer-by-Wire System[R]. SAE Technical Paper, 2016.
- [25] Russell H E B, Gerdes J C. Design of Variable Vehicle Handling Characteristics Using Four-Wheel Steer-by-Wire[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(5): 1529-1540.
- [26] Hu L Y, Yu Z H, Zheng D, et al. Steer-by-Wire Force Feedback System Based on Magnetorheological Fluid Damper[C]. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2014, 536: 1032-1036.
- [27] Huang C B, Zheng D, Yu Z H, et al. Design of MRF-Damper-Based Experimental System for Steer-by-Wire Force Feedback Study[C]. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2012, 101: 1177-1180.
- [28] Gao G, Chen H, Lou L, et al. Torque Feedback Control for the Hand-Wheel Actuator of SBW Based on Active Disturbance Rejection Controller[C]. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Springer, 2013: 391-403.
- [29] 董铸荣, 张欣, 胡松华, 等. 基于LQR变传动比控制的4 WIS电动车转向控制仿真研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(1):79-85.
- [30] 施国标, 赵万忠, 王成玲, 等. 线控转向变传动比控制对车辆操纵稳定性的影响[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(3):207-210.
- [31] 宗长富, 韩衍东, 何磊, 等. 汽车线控转向变角传动比特性研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9):115-120.
- [32] 于蕾艳, 林逸, 施国标. 遗传算法优化线控转向系统角传动比的研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(8):268-270.
- [33] 时间. 基于虚拟样机技术的线控转向研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [34] 田杰, 陈宁, 吴瑾. 基于分数阶PI<sup>λ</sup>D<sup>μ</sup>控制器的线控转向系统路感研究[J]. 机械设计, 2012, 28(10):25-28.
- [35] 王宁, 石晶, 李刚. 线控转向系统主动转向控制策略研究[J]. 汽车实用技术, 2016(1):72-73.
- [36] 刘军, 晏晓娟, 陶昌龄, 等. 基于线控转向的主动转向控制策略研究[J]. 汽车技术, 2016(6):5-10.
- [37] Aly M, Roman M, Rabie M, et al. Observer-Based Optimal Position Control for Electrohydraulic Steer-by-Wire System Using Gray-Box System Identified Model[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2017, 139(12): 121002-121010.
- [38] 陈德玲, 殷承良, 张建武. 基于参数不确定的主动前轮转向鲁棒性控制[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1329-1333.
- [39] Chen D, Yin C, Chen L. Vehicle Stability Improvement by Active Front Steering Control[C]. ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2007: 1185-1192.
- [40] Chen D, Chen L, Yin C, et al. Active Front Steering During Braking Process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(4): 64-70.
- [41] 陈德玲, 殷承良, 陈俐. 基于状态观测器的主动前轮转向研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(24):3019-3023.
- [42] 陈德玲, 陈俐, 殷承良. 制动过程的主动转向干预控制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10):2640-2645.
- [43] Zhang H, Zhao W Z. Stability Control Strategy of Steer-by-Wire System Based on LQG/LTR[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(6): 844-853.
- [44] Takagi F, Shiiba T, Ishizaki R, et al. Evaluation of Handling Performance in Steer-by-Wire Vehicle[C]. Advanced Vehicle Control: Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16), CRC Press, 2016: 411.
- [45] Li Y, Zhang J, Lv C, et al. Comprehensive Optimization of Dynamics Performance and Energy Consumption for an Electric Vehicle via Coordinated Control of SBW and FIWMA[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2016, 9(1): 90-98.
- [46] Wang C Y, Deng K, Zhao W Z, et al. Stability Control of Steer by Wire System Based on  $\mu$  Synthesis Robust Control [J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(1): 16-26.
- [47] van der Sande T, Zegelaar P, Besselink I, et al. Upperbounds on the Closed Loop Sensitivity for the Control of a Steer-by-Wire Vehicle[C]. Advanced Vehicle Control: Proceedings of the 13th International Symposium on

- Advanced Vehicle Control (AVEC'16), CRC Press, 2016: 405.
- [48] van der Sande T, Zegelaar P, Besselink I, et al. A Robust Control Analysis for a Steer-by-Wire Vehicle with Uncertainty on the Tyre Forces[J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(9): 1247-1268.
- [49] Hang P, Chen X, Fang S, et al. Robust Control for Four-Wheel-Independent-Steering Electric Vehicle with Steer-by-Wire System[J]. International Journal of Automotive Technology, 2017, 18(5): 785-797.
- [50] Jin X J, Yin G, Li Y, et al. Stabilizing Vehicle Lateral Dynamics with Considerations of State Delay of AFS for Electric Vehicles via Robust Gain-Scheduling Control[J]. Asian Journal of Control, 2016, 18(1): 89-97.
- [51] Keighobadi J, Yarmohammadi M J. New Chatter-Free Sliding Mode Synchronization of Steer-by-Wire Systems Under Chaotic Conditions[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(8): 3829-3834.
- [52] Sun Z, Zheng J, Man Z. Adaptive Sliding Mode Control for a Vehicle Steer-by-Wire System[C]. International Conference on Control Science and Systems Engineering. IEEE, 2016.
- [53] Sun Z, Zheng J, Man Z, et al. Robust Control of a Vehicle Steer-by-Wire System Using Adaptive Sliding Mode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2251-2262.
- [54] Iqbal J, Zuhail K, Han C, et al. Adaptive Global Fast Sliding Mode Control for Steer-by-Wire System Road Vehicles[J]. Applied Sciences, 2017, 7(7): 738.
- [55] Wang H, Man Z, Kong H, et al. Design and Implementation of Adaptive Terminal Sliding-Mode Control on a Steer-by-Wire Equipped Road Vehicle[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9): 5774-5785.
- [56] Sun Z, Zheng J, Wang H, et al. Adaptive Fast Non-Singular Terminal Sliding Mode Control for a Vehicle Steer-by-Wire System[J]. IET Control Theory & Applications, 2017, 11(8): 1245-1254.
- [57] Wang H, He P, Yu M, et al. Adaptive Neural Network Sliding Mode Control for Steer-by-Wire-Based Vehicle Stability Control[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 31(2): 885-902.
- [58] Lin F J, Hung Y C, Ruan K C. An Intelligent Second-Order Sliding-Mode Control for an Electric Power Steering System Using a Wavelet Fuzzy Neural Network[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(6): 1598-1611.
- [59] Li R, Li Y, Li S E, et al. Driver-automation indirect shared control of highly automated vehicles with intention-aware authority transition[C]. 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 2017: 26-32.
- [60] Massera C M, Terra M H, Wolf D F. Guaranteed Cost Model Predictive Control-Based Driver Assistance System for Vehicle Stabilization under Tire Parameters Uncertainties[C]. Intelligent Transportation Systems (ITSC), 19th International Conference on. IEEE, 2016: 322-327.
- [61] 李彬, 喻凡. 四轮主动转向的模型跟踪控制研究[J]. 上海交通大学学报, 2009(10): 1531-1535.
- [62] Lu H, Shi Y, He D, et al. Model-Based Vehicle Stability Control with Tyre Force and Instantaneous Cornering Stiffness Estimation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(6): 754-770.
- [63] Li B, Yu F. Optimal Model Following Control of Four-Wheel Active Steering Vehicle[C]. International Conference on Information and Automation. IEEE, 2009: 881-886.
- [64] Li B, Yu F. Design of a Vehicle Lateral Stability Control System via a Fuzzy Logic Control Approach[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2010, 224(3): 313-326.
- [65] 李彬, 喻凡. 四轮转向和差动制动联合控制的车辆横摆动力学[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 1-6.
- [66] Li D, Yu F. A Novel Integrated Vehicle Chassis Controller Coordinating Direct Yaw Moment Control and Active Steering[R]. SAE Technical Papers, 2007.
- [67] Li D, Du S, Yu F. Integrated Vehicle Chassis Control Based on Direct Yaw Moment, Active Steering and Active Stabilizer[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(sup1): 341-351.
- [68] Jin X, Yin G, Bian C, et al. Robust Gain-scheduled Vehicle Handling Stability Control via Integration of Active Front Steering and Suspension Systems[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 2016, 138(1): 1-12.
- [69] 房素素, 鲁植雄, 王增才, 等. 拖拉机线控液压转向系统设计及样车性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 86-93.
- [70] 鲁植雄, 龚佳慧, 鲁杨, 等. 拖拉机线控液压转向系统的双通道PID控制仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 101-106.
- [71] Zhang Z, Zhang X, Pan H, et al. A Novel Steering System for a Space-Saving 4WS4WD Electric Vehicle: Design, Modeling, and Road Tests[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(1): 114-127.
- [72] Wu X, Zhang M, Xu M, et al. Adaptive Feedforward Control of a Steer-by-Wire System by Online Parameter Estimator [J]. International Journal of Automotive Technology, 2018, 19(1): 159-166.

- [73] 肖峰. 汽车线控转向控制器的开发研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [74] Yang N, Liao Q. Design and Simulation for Steer-by-Wire System Based on Fuzzy-PID[C]. Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2015 International Conference. IEEE, 2015: 291-294.
- [75] Scicluna K, Staines C S, Raute R. Sensorless Position Control of a PMSM for Steer-by-Wire Applications[C]. Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2016 International Conference. IEEE, 2016: 46-51.
- [76] 熊璐, 付志强, 柏满飞, 等. 无人驾驶车辆的底层动力学控制研究[J]. 汽车技术, 2017(11):1-6.
- [77] Wu X, Ye C, Xu M, et al. Two-Port Network Based Bilateral Control of a Steer-by-Wire System[J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(6): 983-990.
- [78] Matsunaga N, Im J, Kawaji S. Control of Steering-by-Wire System of Electric Vehicle Using Bilateral Control Designed by Passivity Approach[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2010, 4(1): 50-60.
- [79] 王祥. 汽车线控转向系统双向控制及传动比特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [80] 郑宏宇, 王祥, 宗长富, 等. 力控和位置反馈型线控转向系统双向控制策略[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 14-19.
- [81] 杨莉, 吴晓东, 许敏, 等. 基于位置-力矩混合方法的线控转向系统双向控制[J]. 汽车技术, 2016(2):23-28.
- [82] Nah J, Kim W, Yi K, et al. Fault-Tolerant Driving Control of a Steer-by-Wire System for Six-Wheel-Driving - Six-Wheel-Steering Vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(4): 506-520.
- [83] Zheng B, Altemare C, Anwar S. Fault Tolerant Steer-by-Wire Road Wheel Control System[C]. American Control Conference, Proceedings of the IEEE, 2005: 1619-1624.
- [84] Yonghui Z, Dingyue C, Yue W, et al. Research on Steer-by-Wire System in Electric Vehicle[J]. Telkomnika, 2017, 15(1): 115-124.
- [85] Akira I T O, Hayakawa Y. Design of Fault Tolerant Control System for Electric Vehicles with Steer-by-Wire and In-Wheel Motors[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(21): 556-561.
- [86] Yuan Z, Wang R. Coordinated Control for Vehicle Handling and Stability: A Fuzzy Robust Approach[C]. 2017 29th Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2017: 6325-6330.
- [87] Iqbal J, Zuhair K M, Han C, et al. Adaptive Global Fast Sliding Mode Control for Steer-by-Wire System Road Vehicles[J]. Applied Sciences, 2017, 7(7): 738-763.
- [88] Dos Santos B, Araújo R E, Lopes A. Fault Detection Scheme for a Road Vehicle with Four Independent Single-Wheel Electric Motors and Steer-by-Wire System[C]. Advanced Vehicle Control: Proceedings of the 13th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC'16), CRC Press, 2016: 417.
- [89] Munir A, Koushanfar F. Design and Performance Analysis of Secure and Dependable Cybercars: A Steer-by-Wire Case Study[C]. Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 13th IEEE Annual, 2016: 1066-1073.
- [90] Dhahri S, Sellami A, Hmida F B. Robust Sensor Fault Detection and Isolation for a Steer-by-Wire System Based on Sliding Mode Observer[C]. Electrotechnical Conference (MELECON), 16th IEEE Mediterranean, 2012: 450-454.
- [91] Anwar S, Niu W. A Nonlinear Observer Based Analytical Redundancy for Predictive Fault Tolerant Control of a Steer by Wire System[J]. Asian Journal of Control, 2014, 16(2): 321-334.
- [92] Fekih A, Devariste D. A Fault-Tolerant Steering Control Design for Automatic Path Tracking in Autonomous Vehicles[C]. American Control Conference, Proceedings of the IEEE, 2013: 5146-5151.
- [93] 熊璐, 付志强, 李增良, 等. 无人车的线控转向系统故障诊断[J]. 中国机械工程, 2017(22):2689-2694.
- [94] 章仁燮, 熊璐, 余卓平. 智能汽车转向轮转角主动控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 106-113.
- [95] He L, Chen G Y, Zheng H Y. Fault Tolerant Control Method of Dual Steering Actuator Motors for Steer-by-Wire System[J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(6): 977-987.
- [96] Suyama K. Functional Safety Analysis of Reliable Control Systems Using Decision by Majority[C]. American Control Conference, Proceedings of the IEEE, 1999, 1: 618-621.
- [97] Ciesiel D, Gaunt M C, Daugherty B. Development of a Steer-by-Wire System for the GM Sequel[R]. SAE Technical Paper, 2006.
- [98] Poudel B, Giri N K, Munir A. Design and Comparative Evaluation of GPGPU- and FPGA- based MPSoC ECU Architectures for Secure, Dependable, and Real-Time Automotive CPS[C]. Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP), IEEE 28th International Conference. IEEE, 2017: 29-36.
- [99] Huang C, Naghdy F, Du H. Delta Operator-Based Fault Estimation and Fault-Tolerant Model Predictive Control for Steer-by-Wire Systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017(99): 1-8.
- [100] Mihály A, Gáspár P. Robust and Fault-Tolerant Control of in-Wheel Vehicles with Cornering Resistance Minimization[C]. Control Conference (ECC), European.

- IEEE, 2016: 2590-2595.
- [101] Mihály A, Gáspár P, Németh B. Robust Fault-Tolerant Control of In-Wheel Driven Bus with Cornering Energy Minimization[J]. *Strojnikovski vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 63(1): 35-44.
- [102] Ito A, Hayakawa Y. Practical Fault-Tolerant Control to Protect Steer-by-Wire Systems Against Sensor Faults[C]. *Control Applications (CCA), IEEE Conference*. IEEE, 2015: 1895-1900.
- [103] 何磊, 马伯祥, 宗长富. 线控转向汽车转向盘转角传感器的容错控制策略[J]. *汽车工程*, 2015(3): 327-330.
- [104] Yim S. Fault-Tolerant Yaw Moment Control with Steer- and Brake-by-Wire Devices[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2014, 15(3): 463-468.
- [105] 王祥, 宗长富, 邢海涛, 等. 电控转向系统直流电机实时故障诊断方法[J]. *汽车工程*, 2013, 35(2): 179-183.
- [106] Nah J W, Kim W G, Yi K, et al. Fault-Tolerant Driving Control of Independent Steer-by-Wire System for 6WD/6WS Vehicles Using High Slip[J]. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 2013, 37(6): 731-738.
- [107] Zhang H, Zhao W. Two-Way  $H_{\infty}$  Control Method with a Fault-Tolerant Module for Steer-by-Wire System[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(1): 42-56.
- [108] SPARC-FlexRay Steer by Wire[EB/OL]. [2012-02-04]. <http://www.bylogix.it/progetti.php?l=en&i=2&pagina=Pro-jets&sezione=SPARC+-+FlexRay+Steer+by+Wire>.
- [109] The Future of Driving. Deliverable D22.1 Communication Specification[EB/OL]. [2009-05-03]. [http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/24/HAVEit\\_212154\\_D22.1\\_Public.pdf](http://www.haveit-eu.org/LH2Uploads/ItemsContent/24/HAVEit_212154_D22.1_Public.pdf).
- [110] Bruckmüller F, Krister E, Kubinger W. FlexRay Demonstrator for Certification[C]. *Safecomp 2013-Workshop DECS of the 32nd International Conference on Computer Safety, Reliability and Security*, 2013.
- [111] Wardsauto M. FlexRay Enables Sequel by-Wire Systems[EB/OL]. [2006-09-26]. <http://wardsauto.com/news-analysis/flexray-enables-sequel-wire-systems>.
- [112] X-by-Wire Demonstrator-HanilProTech[EB/OL]. [2015-05-12]. [http://www.hanilprotech.com/eng/product/product\\_view.asp?idx=83&category=80&page=1&stext=&sarea=0](http://www.hanilprotech.com/eng/product/product_view.asp?idx=83&category=80&page=1&stext=&sarea=0).
- [113] Automotive Domain - Elveego Circuits[EB/OL]. [2015-05-23]. <http://www.elveegocircuits.com/automotive.html>.
- [114] Wu F, Kong F, Yao J. Intelligent Fault Diagnosis of Steer-by-Wire Automobile[J]. *Journal of Computers*, 2012, 7(5): 1204-1211.
- [115] Su X, Li F, Liao C. Network Level Fault Diagnosis of Steer-by-Wire System Based on ANFIS[C]. *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), IEEE Conference and Expo*, 2014: 1-5.
- [116] Gheraibia Y, Djafri K, Krimou H. Ant Colony Algorithm for Automotive Safety Integrity Level Allocation[J]. *Applied Intelligence*, 2018, 48(3): 555-569.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2018年3月11日。

## 《汽车技术》专项征稿启事

《汽车技术》杂志是长春汽车研究所主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为中国科学引文数据库(CSCD)核心库来源期刊、中国科技核心期刊(ISTIC)、RCCSE中国核心学术期刊(A),被《中文核心期刊要目总览》、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录。

伴随以互联、大数据和人工智能为代表的新一轮科技革命的到来,汽车智能网联技术正成为全球发展的热点。为应对能源与环境的严峻挑战,实现汽车产业的可持续发展,《中国制造2025》明确将“节能与新能源汽车”列为重点发展突破领域。为此,《汽车技术》特面向智能网联汽车和新能源汽车领域的研究人员征集综述类稿件。对符合要求的稿件,本刊将优先处理,在同等条件下优先录用和安排发表,欢迎相关领域的专家、学者不吝赐稿。

稿件要求:

1. 征稿领域为人工智能与自动驾驶技术、环境感知与驾驶员行为感知技术、人机共驾技术、智能网联汽车数据传输与信息安全技术、智能交通系统交通流管理技术、电机及电驱动技术、燃料电池关键零部件技术,综述类论文;
2. 通讯作者须具有博士研究生导师资格,第一作者须具有副教授(副研究员)及以上职称或为在读博士研究生;
3. 论文须体现相应领域最新研究成果,对该领域的技术发展有独到见解,参考文献中2015~2018年国外发表的文献原则上不少于20篇,并请同时注意引用国内的最新研究成果;
4. 其他详细要求见本刊网站首页“下载中心”栏目《作者指南》。

本次征稿有效期为自征稿启事发布之日起至2018年12月31日。投稿时请在采编系统中论文标题前增加“【2018专项征稿】”字样以便区分,《汽车技术》网站是本刊的唯一投稿渠道,网址:qcjs.cbpt.cnki.net。

《汽车技术》编辑部  
2018年4月