

文章编号: 1005-0523(2025)01-0084-13



## 智能网联汽车线控制动技术发展现状综述

陈齐平<sup>1</sup>, 王博文<sup>1</sup>, 李志玉<sup>1,2</sup>, 舒强<sup>2</sup>, 吕宗宇<sup>1</sup>, 牛志<sup>1,2</sup>

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西南昌 330013; 2. 宜春同驭汽车科技有限公司, 江西宜春 336099)

**摘要:** 智能网联汽车的发展对汽车制动系统提出了更高的要求, 传统制动系统正逐步被线控制动系统所取代。线控制动系统以其卓越的响应速度和控制精度, 成为实现高级别自动驾驶乃至无人驾驶的核心执行基础。系统性地回顾和总结了智能网联汽车线控制动系统的发展历程、架构、分类、关键技术及其应用; 分析了不同类型线控制动系统的结构方案和优缺点, 梳理与分析了主缸液压力控制、轮缸液压力控制、轮缸液压力估计、电磁阀控制以及夹紧力控制等关键技术, 概述了基于线控制动系统的防抱死制动系统(ABS)和自动紧急制动系统(AEB)两种主动安全控制技术以及制动能量回收技术, 分析和总结了智能网联汽车线控制动技术当前所面临的挑战与未来发展趋势。智能网联汽车线控制动技术正从电子液压制动系统(EHB)向电子机械制动系统(EMB)发展, 但仍面临电机功率不足、电子元器件兼容性问题等诸多挑战, 亟需提升系统的集成度和冗余性, 以满足高级别自动驾驶的可靠性和安全性需求。

**关键词:** 智能网联汽车; 线控制动技术; 电子液压制动系统(EHB); 电子机械制动系统(EMB)

中图分类号: U463

文献标志码: A

**本文引用格式:** 陈齐平, 王博文, 李志玉, 等. 智能网联汽车线控制动技术发展现状综述[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 84-96.

## A Review of the Current Development Status of Brake-by-Wire Technology for Intelligent Networked Vehicles

Chen Qiping<sup>1</sup>, Wang Bowen<sup>1</sup>, Li Zhiyu<sup>1,2</sup>, Shu Qiang<sup>2</sup>, Lyu Zongyu<sup>1</sup>, Niu Zhi<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Yichun Tongyu Automotive Technology Co., Ltd., Yichun 336099, China)

**Abstract:** The development of intelligent connected vehicles has placed higher demands on automotive braking systems, and traditional braking systems are gradually being replaced by brake-by-wire systems. With their outstanding response speed and control precision, brake-by-wire systems have become the core execution foundation for achieving high-level autonomous driving and even unmanned driving. This paper systematically reviews and summarizes the development history, architecture, classification, key technologies, and applications of the brake-by-wire systems for intelligent connected vehicles; analyzes the structural schemes and advantages and disadvantages of different types of brake-by-wire systems, and combs and analyzes key technologies such as master cylinder hydraulic pressure control, wheel cylinder hydraulic pressure control, wheel cylinder hydraulic pressure estimation, solenoid valve control, and clamping force control. It also outlines two active safety control technolo-

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 江西省杰出青年基金项目(20242BAB23051); 江西省重点研发计划-重点项目(20243BBG71008); 江西省03专项及5G项目(20232ABC03A30)

gies based on brake-by-wire systems: ABS and AEB, as well as brake energy recovery technology. It analyzes and summarizes the current challenges faced by intelligent connected vehicle brake-by-wire technology and its future development trends. The brake-by-wire technology for intelligent connected vehicles is evolving from EHB to EMB, but it still faces many challenges such as insufficient motor power and compatibility issues of electronic components. There is an urgent need to improve the system's integration and redundancy to meet the reliability and safety requirements of high-level autonomous driving.

**Key words:** intelligent networked vehicle; brake-by-wire technology; EHB; EMB

**Citation format:** CHEN Q P, WANG B W, LI Z Y, et al. A review of the current development status of brake-by-wire technology for intelligent networked vehicles[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 84-96.

随着智能网联汽车的不断发展,汽车自动驾驶技术正稳步进阶,向更高级别迈进,高级别的智能驾驶功能要求执行器具备更快的响应速度和控制精度,从而实现上层控制与底层执行的协同。线控制动系统通过电信号取代传统机械或液压部件传递信息的方式,显著提升了系统响应速度和控制精度,成为智能网联汽车实现高级别自动驾驶甚至无人驾驶的核心执行基础<sup>[1]</sup>。

随着智能网联汽车线控制动技术的发展,出现了不同形式的线控制动系统(brake-by-wire, BBW)<sup>[2]</sup>。根据是否保留液压部分,线控制动系统可划分为电子液压制动系统(electro hydraulic brake, EHB)和电子机械制动系统(electro-mechanical brake, EMB)两大类<sup>[3-4]</sup>。EHB主要通过使用电子元件取代传统制动系统中的部分机械部件,同时保留原有的液压管路<sup>[5]</sup>。EMB是在EHB的基础上完全去掉制动液压管路,并将电机集成在制动器上,通过电信号控制电机直接进行制动动作,实现制动的完全线控。

近年来,国内外研究人员对线控制动系统的构型方案设计、系统建模、控制策略等方面进行了深入研究。周明岳等<sup>[6]</sup>对线控制动技术的执行器产品以及关键技术进行了总结和阐述,但缺乏对控制策略的分析。张奇祥等<sup>[7]</sup>对电子机械制动系统的研究进展进行了较为全面的总结,但不涉及电子液压制动系统。Gong等<sup>[8]</sup>总结了线控制动系统执行器的发展,并对制动力控制和分配进行了探讨,但介绍不够系统全面。

为更加系统反映智能网联汽车线控制动技术的发展态势,在调研大量国内外文献的基础上,首先,对线控制动系统发展历程和架构进行介绍;其次,对线控制动系统结构和分类进行了总结;随后,对线控制动系统关键技术进行分析;然后,对线控制动技术在智能网联汽车中的应用进行介绍;最后,对智能网联汽车线控制动技术所面临的挑战和发展趋势进行分析和总结。

## 1 线控制动系统发展历程

自从1900年威廉·迈巴赫发明鼓式制动器以来,制动系统的发展历程可分为四个阶段。

第一阶段是防抱死制动系统(anti-lock brake system, ABS)<sup>[9]</sup>。第二阶段是车身电子稳定系统(electronic stability program, ESP)<sup>[10]</sup>,ESP在ABS的基础上融合了电子制动分配系统(electrical brake distribution, EBD)<sup>[11]</sup>、牵引力控制系统(traction control system, TCS)<sup>[12]</sup>以及车辆动态控制系统(vehicle dynamic control, VDC)<sup>[13]</sup>等功能,进一步提升了车辆在复杂路况下的稳定性和操控性能。第三阶段是IPB+RBU(integrated power brake, IPB; redundant brake unit, RBU)。IPB本质上是将电子助力器(intelligent booster, iBooster)与ESP集成,实现了制动系统的解耦设计,更加适应智能驾驶的需求,可满足L3级和L4级自动驾驶的需求。第四阶段是电子机械制动系统。EMB通过彻底去除液压管路,完全实现线控化,并可与车辆的其他电子控制系统协同工作,支持制动、ABS、ESP、自动驾驶以及制动能量

回收等多项功能,它被视为线控制动系统的终极形态。

## 2 智能网联汽车线控制动系统架构

智能网联汽车线控制动系统架构主要由感知层、决策层和执行层组成,如图1所示。感知层是由车辆行驶外界环境信息感知、车辆运动状态信息和

车路云协同信息组成,是基于智能网联汽车的各种传感器等设备从外界实时获取信息<sup>[7]</sup>。决策层相当于人的大脑,是由电池管理系统(battery management system, BMS)<sup>[14]</sup>、线控制动系统控制器、电机控制器、网络 and 智能系统、车辆控制单元等组成。执行层相当于人的手和脚,由制动器、电池组、驱动电机和动力传动系统等组成。

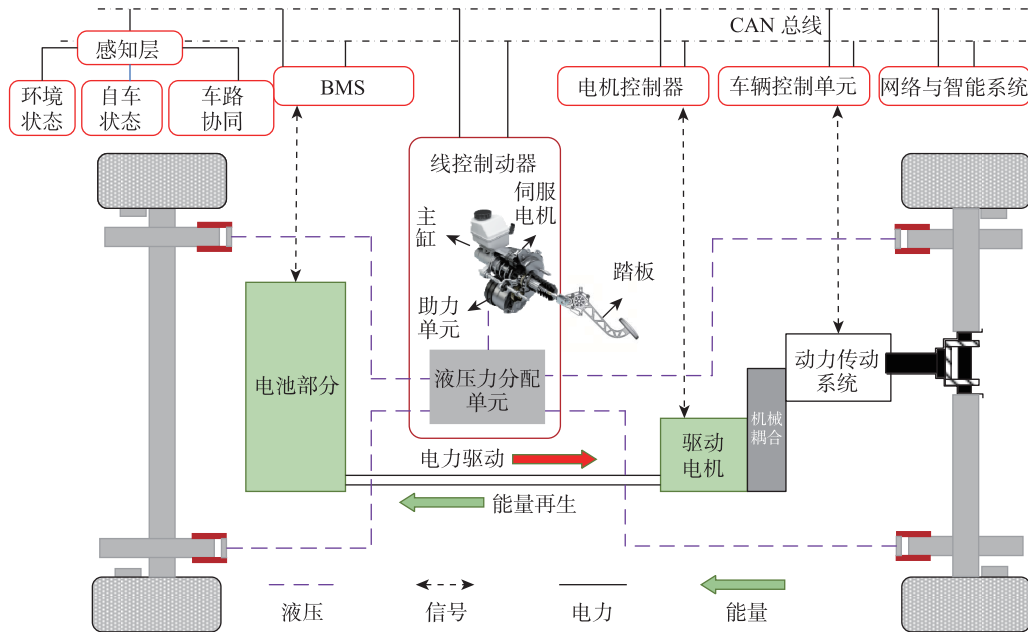


图1 智能网联汽车线控制动系统架构

Fig. 1 The architecture of the BBW system in intelligent connected vehicles

## 3 线控制动系统分类

### 3.1 电子液压制动系统

#### 3.1.1 电子液压制动系统组成与工作原理

电子液压制动系统由制动踏板单元、液压驱动单元、制动执行单元以及控制系统等关键组成部分构成<sup>[15]</sup>。制动踏板单元是驾驶员与制动系统的交互接口,用于接收驾驶员的制动意图。制动执行单元由主缸、液压管路和轮缸等传统结构组成,其作用是将推力转化为制动力矩,从而在制动盘上实现制动功能。控制系统由电控单元(electronic control unit, ECU)、液压控制单元(hydraulic control unit, HCU)以及液压力传感器、踏板力传感器和踏板位移传感器等多种传感器组成,用于实时监测和精确控制制动过程。

电子液压制动系统通过各部件的协同工作,能够精准地将驾驶员的制动意图转化为车辆的实际

制动效果,从而实现对制动力的高效控制。这不仅显著提升了制动系统的性能和效率,也为驾驶的安全性与舒适性提供了坚实的保障。

#### 3.1.2 电子液压制动系统分类

电子液压制动系统(EHB)按照加压驱动动力源形式可分为泵驱式EHB和电机驱动式EHB。泵驱式EHB主要由泵、蓄能器和电磁阀等元件组成;电机驱动式EHB由电动机和减速机构构成,通过摒弃传统的高压蓄能器和高速开关控制阀系,显著降低了液体泄漏风险,同时减轻了系统重量和体积,提升了系统的可靠性和控制连续性。电机驱动式EHB进一步按照制动踏板与制动主缸是否解耦分为电动助力式EHB和电动伺服式EHB。电动助力式EHB:制动踏板与主缸未完全解耦,在制动失效时可通过人力踩踏制动踏板提供制动力,具备失效备份功能。电动伺服式EHB:制动踏板与主缸完全解耦,液压力完全依赖电机驱动,制动脚感由踏板

模拟器提供。根据是否集成汽车电子稳定系统(ESP),电机驱动式EHB还可分为one-box方案和two-box方案。One-box方案:将电子助力器和ESP集成在一个模块中,具有更高的集成度和效率,其结构简单,仅需一个ECU和一个制动单元,降低了成本并提高了能量回收效率。然而,该方案由于集成化设计,冗余度较低,需要额外配备电子冗余制动模块以满足高级别智能驾驶的需求<sup>[16-17]</sup>。Two-box方案:电子助力器和ESP分离,分别完成各自功能,尽管结构复杂且成本更高,但系统可靠性更强,适合高级别智能驾驶功能的冗余需求。表1对比了one-box和two-box方案的优缺点。总体而言,one-box方案效率更高、成本更低,但two-box方案在成

熟性和可靠性方面更具优势。

### 3.2 电子机械制动系统

#### 3.2.1 电子机械制动系统组成与工作原理

电子机械制动系统的基本结构如图2所示,包括传感器、ECU、电机单元和制动执行单元。传感器负责采集各种与制动相关的数据,而ECU则负责数据处理和算法控制,电机单元则负责驱动制动执行单元以实现制动动作<sup>[18]</sup>。传感器感知制动踏板力度和车速等参数,并将数据传输到ECU,ECU根据信息实时调整制动力度,从而实现对车辆制动系统的精准控制。电机单元作为执行机构,通过对制动盘实现制动力的快速响应和调节。踏板及车辆信号首先传输至ECU,随后ECU进行决策处理,并

表1 乘用车线控制动one-box和two-box方案对比

Tab.1 Comparison of passenger car drive-by-wire one-box and two-box programs

方案	One-box	Two-box
定义	集成式:EHB集成了ABS/ESP	分立式:EHB与ABS/ESP独立
结构	1个ECU、1个制动单元(ECU集成了ESP等功能)	2个ECU、2个制动单元(需要协调两个ECU的关系)
成本	集成度高,成本相对较低	集成度低,成本相对较高
复杂度与安全性	高,需要改造踏板,踏板仅作用于输入信号,不作用于主缸,故踏板感觉需要软件调校	低,不需要改造踏板,驾驶员能直观地感受制动系统的变化,可由ABS回馈力来感受制动片的衰退情况等,能减少安全隐患
能量回收	回收效率较高,回馈制动减速度高达0.3g~0.5g	回收效率一般,回馈制动减速度在0.3g以下
自动驾驶	搭配RUB后满足自动驾驶对冗余的要求	满足自动驾驶对冗余的要求

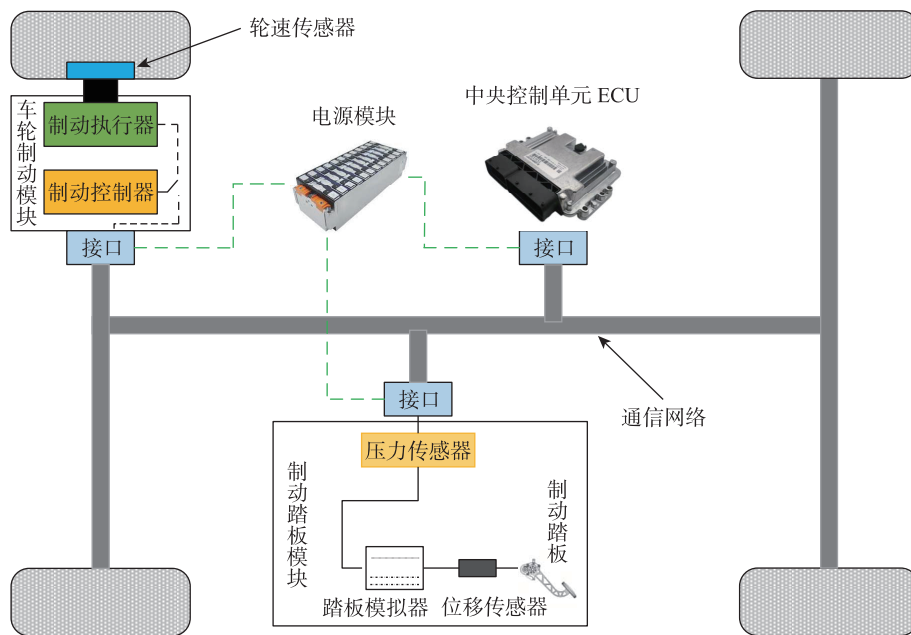


图2 电子机械制动系统基本结构

Fig. 2 Basic structure of electro-mechanical brake systems

向4个车轮制动模块下达制动指令<sup>[19]</sup>。

### 3.2.2 电子机械制动系统结构设计方案

目前,电子机械制动系统的结构设计方案提供商主要有博世、大陆和西门子等公司。

博世公司(Bosch)的EMB系统执行器设计方案,其特点是驱动电机布置方式采用电机外置,调整制动间隙需要手动的方式,并且具有两组电磁离合器<sup>[20]</sup>。该执行器设计方案的优点是可以改变行星齿轮的减速比,具有夹紧力保持功能;缺点是结构设计复杂和轴向尺寸较大,并且调整制动间隙的方式是手动调整,不具有较高的EMB系统可靠性。

德国大陆集团(Continental AG)研制的EMB系统执行器设计方案,采用内置驱动电机的布置方式,利用智能控制的方式调整制动间隙,该执行器设计方案的优点是结构紧凑、能够智能地调整制动间隙、具有夹紧力保持和驻车功能;缺点在于扭矩电机需安装于执行器外部,这种结构形式所占空间较大,若缺乏增力机构,对驱动电机的性能要求也相对较高<sup>[21]</sup>。

电子楔式制动系统(electronic wedge brake, EWB)作为一种先进的自增强电子机械楔式制动器,可在自增强的最佳工作点附近高效运作<sup>[9]</sup>。凭借其楔形块的自增力原理,实现驱动力的大幅降低,仅需12 V电压即可满足系统需求。

以德国西门子股份公司(Siemens AG)研发的EWB为例,该系统创新性地采用两台对置式电机作为动力源,通过引入楔形块作为自增力机构,显著提升了制动系统的增益系数,有效降低了对单个电机功率的依赖。但是,由于楔形机构具备较高的增益系数,为确保制动力矩的精确性与稳定性,对电机的控制精度提出了更高的要求<sup>[22]</sup>。

通过对比分析线性增力式电子机械制动系统与非线性增力式电子机械制动系统两种方案,可以

得出以下结论:第一种方案,其机械结构原理简洁明了,易于操控。然而,该方案在减速增扭方面的表现效果很大程度上受制于电机性能。通常情况下,为了满足夹紧力的需求,需要将电压提升至24 V或48 V。相较之下,第二种方案对于电机的性能要求较为宽松,与现有的整车12 V低压电气平台相兼容。但是,非线性增力式电子机械制动系统制造工艺的复杂性以及转矩控制的精确性成为该方案的短板。

### 3.3 EHB与EMB优劣对比

EMB摒弃了传统制动系统中的制动主缸、轮缸、液压控制单元及管路等液压部件,是一种电控纯机械制动系统<sup>[2]</sup>。将电机集成于制动器当中,通过电信号控制电机执行制动动作,从而实现制动的完全线控。

表2对EHB和EMB优缺点进行了汇总,由表可知,EMB相比EHB,主要优势体现在响应时间短,能显著减少制动距离,提升安全性;由于省去了液压管路,系统体积更小,也不会发生液体泄漏,维护成本较低。然而,EMB的主要劣势也不容忽视:首先,它缺乏备份系统,对系统的可靠性要求极高;其次,制动力可能不足;再者,在恶劣的工作环境,如高温条件下,制动器容易消磁,因此制动器需要具备耐高温、质量轻、成本低等特性;此外,它还需要具备更强的抗干扰能力,以抵御车辆运行过程中产生的各种信号干扰;最后,EHB还需要针对底盘开发所对应的系统,面临着实现模块化设计的巨大挑战,导致开发成本显著增加。

## 4 线控制动系统关键技术

### 4.1 主缸液压力控制

电子液压制动系统是一个机械、电子和液压相

表2 EHB和EMB优缺点对比

Tab.2 Comparison of the advantages and disadvantages of EHB and EMB

技术种类	EHB	EMB
原理	在传统液压制动系统的基础上,通过采用电子器件替代部分机械部件的功能。电子踏板配备有踏板感觉模拟器和电子传感器,确保了制动操作的精确性和稳定性。ECU能够根据传感器信号准确判断驾驶员的制动意图,并驱动液压缸进行制动	彻底摒弃了传统制动系统中所依赖的制动液及液压管路等组件,转而采用电机驱动制动器的方式,以产生所需的制动力。真正实现了制动系统的线控化
优点	具有备份制动系统,安全性较高	响应速度快、结构简单、便于装配和维护、易于功能扩展和集成
缺点	保留了液压制动部分,没有充分体现线控系统的优势;结构更复杂,容易发生液体泄漏,存在安全隐患	对可靠性要求极高(热稳定性、散热性)、抗干扰能力要求高、功耗更大、成本较高,无备份系统

互耦合的系统<sup>[23]</sup>。由于传动机构的摩擦扰动和液压系统的时变性等因素,在助力控制、主动制动和制动能量回收过程中,该系统被视为高度非线性的受控对象。目前,电子液压制动系统的控制理论主要包括PID控制<sup>[24]</sup>、滑模变结构控制<sup>[25]</sup>和模糊控制<sup>[26]</sup>等。下面主要对控制变量和控制算法进行介绍。

#### 4.1.1 控制变量

HAN等<sup>[27]</sup>利用无刷电动机内置的转角传感器,将电机转动角位置作为控制变量,从而间接地获取主缸活塞推杆的位移信息。此举有效地避免了以主缸液压力作为控制变量时所遇到的问题。余卓平和张祥琨等<sup>[28-29]</sup>认为,针对单控制变量控制系统,单独对主缸液压力或主缸活塞推杆位移进行控制,随着外界环境的变化,适应性和鲁棒性都会降低。对主缸液压力控制则确保了目标压力的精确跟踪控制,对主缸活塞推杆位移控制有助于迅速建立压力并有效解决“残留液压力”问题。因此,进行多变量共同控制成为必要手段。Zhao等<sup>[30]</sup>进一步提出了压力-位置-电流联级控制算法,为了解决主体机构中的动态摩擦、系统的惯性和液压系统的非线性特性对控制的影响,在位置闭环控制中引入了三步非线性控制方法,并将非线性控制问题分解为静态控制、基于参考动力学的前馈控制和状态依赖反馈控制。硬件在环实验表明,该控制算法能有效提高控制精度和响应速度。

#### 4.1.2 控制算法

PID控制算法以其简单、鲁棒性好被广泛应用于各种控制系统。Chen等<sup>[31]</sup>以误差和误差导数作为输入变量,设计了一种用于液压控制的模糊增量PID控制器。Jiang等<sup>[3]</sup>设计了一种滑模控制器,通过控制电动机扭矩来控制主缸压力,通过台架试验验证了该算法的有效性。龚佳鹏<sup>[32]</sup>在反步法理论的基础上,基于电子液压制动系统设计了防抱死制动控制算法。该算法考虑了低附着、高附着、低到高以及高到低4种不同的工作条件,能够实现滑移率的准确调控。高炳钊等<sup>[33]</sup>基于三步法理论,设计了离合器的位移控制算法。并将这一算法与传统的PID算法进行了对比分析,研究结果显示,采用三步法控制器的系统响应更为迅速,且误差控制更为精确。

虽然主缸液压力控制算法在过去10年中取得

了很大进步,各种控制策略和控制算法的创新对液压力的控制精度得到了提高,要实现EHB的最终量产,关键在于其控制策略和算法需具备实用性、鲁棒性以及可“植入”性,大多数研究结果依然是基于软件仿真,缺少台架实验验证。在设计控制策略时,应考虑算法与工程实际的结合,关注控制器在实车上应用的鲁棒性。

## 4.2 轮缸液压力控制

轮缸液压力控制的工作机制旨在确保精确接收由上层算法精确计算得出的目标轮缸压力值。基于当前车轮所处的特定工作区域,结合电磁阀的工作特性以及EHB系统(包含制动管路和制动轮缸)的整体压力特性,系统生成对EHB伺服电机及电磁阀的精准控制指令。

传统PID控制算法在轮缸液压力控制方面的表现并不尽如人意。因此,研究人员针对PID控制算法进行了相应的优化和改进,以提升其控制效果。刘曦东<sup>[34]</sup>提出了一种基于查表前馈的增量式PID控制算法,通过对溢流阀线圈电流的控制以达到对轮缸压力的控制,但对复杂的路面和工况,PID控制算法缺乏自适应性。此外,Wu等<sup>[35]</sup>设计了具有自适应性的PID控制器。

汪洋等<sup>[36]</sup>采用模糊PID控制算法对轮缸液压力进行控制,模糊PID在轮缸液压力控制方面展现出了较高的精确度。然而,在建立压力的快速性方面,其表现相较于传统PID控制算法略显不足。因此,为进一步优化控制效果,引入了分段模糊PI控制算法,以实现轮缸液压力的精细调控。当控制变量的偏差较小时,模糊PI控制算法精度更高;但当偏差较大时,PI控制算法响应速度更快。张海波<sup>[37]</sup>采用自抗扰控制算法对轮缸液压力控制,并完成了自抗扰控制器的设计以及参数优化工作,台架试验验证了该算法的有效性。王祥<sup>[38]</sup>介绍了通过BP神经网络对试验数据进行系统训练的具体过程,进而利用经过充分训练的神经网络模型精确计算控制电流。随后,结合反馈修正控制模块,确定了控制信号的占空比,保证了系统控制精度。经过试验验证,采用神经网络算法后,系统的各项关键性能指标均实现了显著的优化和提升。

对于轮缸液压力估计算法多采用单个轮缸控制,虽然在同一时刻主缸液压力是确定的,但是每个轮缸液压力需求可能不一致,因此在对轮缸液压力

力控制时要对各个轮缸液压力进行协调控制,同时也应考虑算法的实用性和可“植入”性,以实现轮缸液压力的精确控制。

### 4.3 液压力估计

轮缸液压力估计算法主要分为2大类:第1类是基于执行器动态特性估算方法,第2类是基于车轮旋转动力学估算方法。这2类方法均存在一定的局限性:基于执行器动态特性估算方法依赖于模型的精确度,在某些特定工况下,由于参数变动可能会导致累积误差产生;而基于车轮旋转动力学估算方法则仅适用于车辆的运动状态,同时,由于车轮减速信号与噪声比相对较低,这使得获取车轮动力学方程的准确输入变得较为困难<sup>[39]</sup>。

在研究轮缸液压力估计方面,基于执行器动态特性估算方法主要采取模型法与数表法两种。模型法是基于电磁阀模型精确性和实验数据拟合程度。Wei等<sup>[40]</sup>采用卡尔曼滤波器将液压模型和车辆动力学信息进行融合,并提出了一种交互式多模型滤波器来融合不同的液压模型,以适应各种控制输入。结果表明,与单一卡尔曼滤波器和基于纯液压模型的方法相比,所提出的滤波器具有更好的压力估计效果。

数表法<sup>[41-42]</sup>基于试验数据,通过查询三维数表的占空比、当前轮缸液压力和下一阶段轮缸液压力的形式进行轮缸压力估计。王猛等<sup>[43]</sup>设计了一种一体式制动主缸总成的电液复合制动系统,提出数表插值法和阶梯法并行的分段压力估算法,能准确控制轮缸制动压力。并提出改进的逻辑门限值控制策略,以较大梯度迅速减小再生制动力至零。通过AMESim&Simulink联合仿真验证了系统的功能和可行性。

针对上述问题,Jiang等<sup>[44]</sup>使用扩展卡尔曼滤波结合上述两种轮缸压力估算算法的优势,提出了组合轮缸压力估算方法,即通过车轮旋转动力学估算方法修正基于执行器动态特性估算的轮缸压力值。但是上述方法在研究的过程中,将路面附着系数简化为与滑移率呈线性关系,不可避免地削弱了算法适应不同路面条件的能力。

### 4.4 电磁阀控制

液压力控制单元(HCU)的关键元件是电磁阀,电磁阀控制属于液压力控制的底层控制,其控制效果直接决定了电子液压制动系统的工作效率。电磁阀控制分为开关阀、高速开关阀和线性阀3类。

#### 4.4.1 开关阀

开关阀是液压力控制单元(HCU)的核心构件。其工作机理为通过电流控制来调整电磁力,进而实现阀口的开闭。开关阀通过快速改变阀门的开闭状态,能够有效调节液体的流动方向和流量。Fey等<sup>[45]</sup>提出了一种基于电磁阀驱动电流的控制方法,为优化电磁阀性能提供了新方向。同时,冯涛<sup>[46]</sup>研究了通过控制电磁阀开关来实现制动防抱死功能的技术,这项研究在提升汽车行驶安全性方面具有重要意义,同时也为电磁阀在各领域的应用开辟了新的可能。

开关阀在现代流体控制系统中的应用正在不断深化和扩展,通过改良传统结构以及研究新的控制方法,开关阀的性能得到了显著提升。在此基础上,电磁阀在流量控制、制动防抱死等领域的研究与应用也将持续取得新进展,为我国流体控制领域发展作出贡献。

#### 4.4.2 高速开关阀

高速开关阀具有快速的响应机制和高频率的开关能力,在工业自动化、能源利用以及航空航天等诸多领域均得到了广泛的推广和深入的应用<sup>[47]</sup>。其工作原理与传统开关阀大体相同,均是通过在开启与关闭两种状态间的切换,实现对液体流动的通断控制。然而,在响应速度这一关键指标上,高速开关阀展现出了显著的优势。高速开关阀通过发送不同宽度的脉冲信号,对阀门的开关状态进行精确控制。

在提升高速开关阀响应频率的方法方面,国内外学者进行了广泛而深入的研究,在结构改进、材料优化以及控制策略等方面取得了一系列研究成果。

Zhao等<sup>[48]</sup>提出一种瞬态求解方法,通过对偶变换得到高速开关电磁阀阀芯运动模型,该方法显著提升了复杂瞬态变化过程的仿真与分析效率。Li等<sup>[49]</sup>对EHB系统中高速电磁阀的响应特性和参数优化进行了研究。该研究强调精确制动压力控制对车辆安全的重要性以及改进电磁阀设计的必要性。通过建立非线性数学模型并分析阀芯质量、弹簧刚度、弹簧预紧力和线圈圈数等因素,利用遗传算法对参数进行了优化,实验结果表明,优化参数极大地提高了EHB系统的响应特性和制动压力控制精度。

#### 4.4.3 线性阀

线性阀作为一种调节阀,其工作原理是通过调

整阀门的开度变化来实现对流量的精确控制。具体而言,阀门开度与流量变化之间呈现出一种线性比例关系,即阀门开度越大,相应的流量变化也越大。线性阀的制造成本较低,还具有降噪的作用。虽然伺服阀和比例阀都能对流量进行控制,但成本较高。

线性阀的控制系统通常包含两大核心模块:分别是控制电流生成模块与反馈修正控制模块<sup>[38]</sup>。其中,控制电流生成模块主要通过采集缸缸实际压力、预期压力以及阀口两端的压力差等参数,并结合特定的控制算法,计算出线性阀所需的控制电流;而反馈修正控制模块则依据目标控制电流、阀口两端的电源电压以及当前线圈电阻值等信息,计算出线性阀所需的PWM控制占空比,从而确保控制过程的稳定性与精确性。

#### 4.5 夹紧力控制

EMB驱动器的控制方法主要有间接夹紧力控制和直接夹紧力控制。间接夹紧力控制方法是通过对电机电流、转速等参数的测量和分析,结合车辆动力学模型,来估算EMB执行器产生的夹紧力,从而不断调整电机的电流和转速等参数,可以间接实现对夹紧力的控制。直接夹紧力控制方法是直接测量EMB执行器产生的夹紧力,并根据测量值来调整电机的参数,以实现夹紧力的精确控制。

Zhang等<sup>[50]</sup>提出了一种EMB间隙主动调整控制策略,该策略包括根据差分电流信号识别制动过程中的接触点和分离点。仿真结果表明,间隙调节策略可以有效调节制动间隙,降低制动盘磨损的不利影响,并显著减少制动盘的磨损,有效缩短制动力输出响应时间。此外,针对EMB系统参数变化和电机反转影响的问题,Eum等<sup>[51]</sup>提出了一种基于力-位置串级控制结构的夹紧力控制方法,并采用扰动观测器增强系统的鲁棒性。

上述研究虽然能够提高EMB控制系统的鲁棒性,但由于EMB夹紧力控制精度不高,为了进一步提高EMB夹紧力控制精度, Lee等<sup>[52]</sup>设计了一种新型的显式非线性模型预测控制(model predictive control, MPC)算法,通过最小化二次性方法得到显式控制律,并对显式MPC框架内模型参数自适应方法进行研究。此外,针对传感器的安装对EMB控制精度影响的问题,LI等<sup>[53]</sup>提出了一种新的滑模

控制策略,通过模拟干燥混凝土路面下的制动情况,验证了EMB制动系统的性能。

## 5 线控制动系统的应用

线控制动系统具备独立且精确控制单个车轮制动力的功能,这一特性使其能够充分满足车辆动力学控制的需求。因此,线控制动系统能够更容易实现车辆的ABS, ACC以及ESP等在内的多种车辆姿态控制功能。同时,还易于与电动汽车的再生制动系统集成,从而有效提升能量回收效率。

### 5.1 防抱死制动系统

目前,由于线控制动系统技术尚未成熟,在汽车领域还未得到广泛的应用。因此,在车辆制动过程的研究中,大多数研究仍聚焦于基于滑移率的防抱死制动控制。

在防抱死控制策略的研究中,刘晓辉等<sup>[54]</sup>以冗余ABS为目标,提出一种滑模控制算法。通过构建数学模型,建立仿真实验,并在哈弗H6上进行实车测试。测试结果表明,在常规ABS失效时,冗余ABS算法在保证制动强度和舒适性的前提下,能够有效实现冗余ABS功能,从而提高车辆安全性。

但是对于复杂的道路环境,上述防抱死控制策略显得束手无策。为此,Shiao等<sup>[55]</sup>设计了一种模糊逻辑控制器(fuzzy logic controller, FLC)和一种自组织模糊逻辑控制器(self organizing fuzzy logic controller, SOFLC)来比较防抱死制动的性能。结果表明,SOFLC结合路况估计器(road condition estimator, RCE),能够适应不同的路况,并能有效地提高制动性能,保证驾驶的稳定性。

模糊控制器可以与滑模控制器(sliding mode controller, SMC)一起形成模糊SMC,然后通过模糊校正器对开关控制规律进行调整。与PID控制器和通用SMC相比,模糊SMC具有优越的性能和对各种道路的适应性。因此,张帅<sup>[56]</sup>设计了一种基于EMB的制动防抱死模糊积分滑模控制算法,仿真结果表明,该控制算法在不同道路工况都能使得车轮滑移率保持在最佳状态,具有较好的适应性。

### 5.2 自动紧急制动

自动紧急制动(autonomous emergency braking, AEB)是一种汽车主动安全技术,由控制模块、测距模块和制动模块构成,能够通过预警和主动制动来



降低汽车行驶过程中由于驾驶员操作问题所造成的交通事故概率。

针对传统 AEB 控制模型无法兼顾安全性和舒适性的问题,赵会强等<sup>[57]</sup>提出了一种综合考虑安全性和舒适性模型,制定了预警控制策略,引入了二阶 TTC 模型,通过在不同道路环境下的测试验证了该控制策略的有效性。

上述研究虽然能够兼顾制动过程中的安全性和舒适性,但是只适应于单一路面环境,为此,黄会东<sup>[58]</sup>基于电子液压制动系统提出了一种考虑路面附着系数的自动紧急制动控制策略,通过扩展卡尔曼滤波算法对路面附着系数进行识别,对识别后的路面附着系数设定不同的制动减速度,通过硬件在环实验测试不同工况,实验结果表明所设计的分级制动控制策略具有较好的避撞效果。此外,Sevil 等<sup>[59]</sup>还提出了一种自适应 AEB 控制算法,该算法通过考虑轮胎与路面之间的摩擦系数来调整碰撞警告和紧急制动的的时间。仿真结果显示,路面之间的摩擦系数与车辆质量和道路坡度有关,该研究为后续学者对于主动安全控制策略提供了新的思路。

### 5.3 制动能量回收

再生制动技术 (regenerative braking control, RBS) 关键在于精确控制制动力分配与电机、摩擦制动协同,从而实现能量高效回收与平稳制动<sup>[60]</sup>。

为了兼顾驾驶员的制动意图和制动舒适性,Xu 等<sup>[61]</sup>提出了基于隐马尔可夫模型-动态补偿模糊神经网络算法的驾驶员制动意图识别方法,并设计电-气制动补偿的分层制动能量回收控制策略。吕毅恒等<sup>[62]</sup>考虑到后驱电动商用车的质量变化情况,在保留原有制动系统的前提下,根据加速行驶时的加速度和电机转矩参数估计出当前车辆载荷,设计了基于车辆载荷识别的制动能量回收控制策略。

上述研究虽然能够实现车辆在制动过程中的制动能量回收,但在不同路面特征变化情况下车轮对路面附着系数的利用情况不同,将显著影响制动时车辆方向的稳定性,为此,Shen 等<sup>[63]</sup>提出了一种卷积神经网络在线路面识别算法和最优滑移率跟踪积分滑模控制器相结合的 EMB 制动控制策略,利用 VGG-16 CNN 对路面图像数据集进行训练,实现视觉算法实时识别路面状况,在面对复杂的道路环境的同时,依然能够高效地回收制动能量,提高

车辆续航里程。

## 6 结束语

本文从线控制动系统的发展历程、智能网联汽车线控制动系统架构、线控制动系统的分类、线控制动系统关键技术及其应用等方面进行了阐述,分析了智能网联汽车线控制动技术当前所面临的挑战与未来发展趋势,得出以下结论。

1) 虽然 EHB 相对于传统制动系统具有响应速度快和控制精度高的优势,但是 EHB 保留了液压部分,仍然存在污染问题,且不属于完全线控制动,一般在 L3 及以下阶段满足制动系统需求。在 L4 或 L5 阶段,EMB 的完全线控特性配合中央计算平台及区域控制单元,可实现软件控制端冗余,满足更快反应速度要求,更适合智能网联汽车线控制动方案。

2) 目前车载电源电压多数为 12 V,无法满足 EMB 电动执行器的电机功率要求。如果使用 48 V 的车载电源,那么由此带来的“高压”以及电磁干扰问题,对于电子元件的影响又将如何解决,这需要电子零部件供应商生产能够满足 48 V 电源的车用电子元器件,需要可靠的传感器及其他电子元件,此外,还要做好容错控制,要有冗余备份,在传感器失效的时候可以进行机械制动等,以解决这方面的问题。

3) 线控制动系统作为智能网联汽车实现高级别自动驾驶的核心执行基础,能够满足高级别自动驾驶的响应需求和控制精度。目前的底盘各大子系统都是独立的,难以做到高效协同控制。未来,线控底盘的高度集成将加快主机厂开发新车型,将电池、电驱、悬架、制动转向等零部件集成为类似滑板的底盘结构,将使得车辆底盘与上车解耦,降低整车开发成本,同时给予驾驶员良好的驾驶体验。

4) 智能网联汽车线控制动技术目前正处于快速发展阶段,其产品主要以 EHB 为主,其中 one-box 研发模式逐渐成为主流,而 EMB 则是未来的发展方向,但 EMB 技术壁垒较高,需要冗余备份提高可靠性,故 EMB 的商业化之路还需时间。当前线控制动技术研发重点在于提高集成度同时增加系统冗余,以确保在高级别智能驾驶中的可靠性和安全性。智能网联汽车的发展将会对传统电子零部件

供应商产生重大影响,未来应着力研究高质量的线控制动系统,以满足高级别自动驾驶的可靠性和安全性需求。

#### 参考文献:

- [1] XIAO H H. Research on X-by-wire chassis technology for intelligent driving of new energy vehicles[J]. *Journal of Electronic Research and Application*, 2024, 8(2): 146-150.
- [2] 张奇祥,王金湘,张伊晗,等.智能电动汽车线控制动关键技术与研究进展[J].*机械工程学报*, 2024, 60(10): 339-365.  
ZHANG Q X, WANG J X, ZHANG Y H, et al. Key technologies and research progress of brake-by-wire system for intelligent electric vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(10): 339-365.
- [3] JIANG L G, SHI Q, WEI Y J, et al. Electro-hydraulic braking dynamics for pressure demand control of brake-by-wire system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2024, 238(4): 735-748.
- [4] LI J, JIANG Y Q. Variable universe fuzzy-proportional-integral-differential-based braking force control of electro-mechanical brakes for mine underground electric trackless rubber-tired vehicles[J]. *Sensors*, 2024, 24(9): 2739.
- [5] 雍健羽,王洪亮,董金聪,等.轻型车辆线控制动技术研究现状及发展趋势综述[J].*中国汽车*, 2022(11): 16-22.  
YONG J Y, WANG H L, DONG J C, et al. A comprehensive review of the current status and future development trends of line control braking technology for lightweight vehicles[J]. *China Automotive*, 2022(11): 16-22.
- [6] 周明岳,武振江,冯天骥.线控制动技术现状及趋势综述[J].*中国汽车*, 2020(7): 51-57.  
ZHOU M Y, WU Z J, FENG T J. Overview of current status and trends in line control technology[J]. *China Automotive*, 2020(7): 51-57.
- [7] 张奇祥,靳立强,靳博豪,等.EMB夹紧力控制与传感器故障诊断研究进展[J].*汽车工程*, 2022, 44(5): 736-746.  
ZHANG Q X, JIN L Q, JIN B H, et al. EMB clamping force control and sensor fault diagnosis research progress [J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(5): 736-746.
- [8] GONG X X, GE W G, YAN J, et al. Review on the development, control method and application prospect of brake-by-wire actuator[J]. *Actuators*, 2020, 9(1): 15.
- [9] ZHU S W, FAN X B, QI G X, et al. Review of control algorithms of vehicle anti-lock braking system[J]. *Recent Patents on Engineering*, 2023, 17(2): 30-45.
- [10] WU Z, KANG C F, LI B R, et al. Dynamic modeling, simulation, and optimization of vehicle electronic stability program algorithm based on back propagation neural network and pid algorithm[J]. *Actuators*, 2024, 13(3): 100.
- [11] LUTANTO A, FAJRI A, NUGROHO K C, et al. Advancements in automotive braking technology for enhanced safety: a review[J]. *Multidisciplinary Innovations and Research in Applied Engineering*, 2024, 1(1): 6-20.
- [12] YIN C C, MEI Z Y, FENG Y, et al. A novel traction control strategy for an electric bus[J]. *International Journal of Vehicle Performance*, 2024, 10(2): 215-237.
- [13] GAVASKAR J S, VENKATESWARI P. Research on vehicle dynamic control(vdc) system for designing hybrid electric vehicles using renewable energy resources[J]. *Technoarete Transactions on Electrical Vehicles and Automotive systems*, 2024, 3(1): 13-19.
- [14] KURUCAN M, ÖZBALTAN M, YETGIN Z, et al. Applications of artificial neural network based battery management systems: a literature review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 192: 114262.
- [15] 余卓平,韩伟,徐松云,等.电子液压制动系统液压力控制发展现状综述[J].*机械工程学报*, 2017, 53(14): 1-15.  
YU Z P, HAN W, XU S Y, et al. A Review of the current state of development of fluid pressure control for electro-hydraulic braking systems[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(14): 1-15.
- [16] 刘海超,刘红旗,冯明,等.智能汽车集成式线控制动系统传动机构优化设计[J].*机械工程学报*, 2022, 58(20): 399-409.  
LIU H C, LIU H Q, FENG M, et al. Optimized design of transmission mechanism of integrated wire-control powertrain for intelligent vehicles[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(20): 399-409.
- [17] ZHAO X, XIONG L Y, ZHUO G R, et al. A review of one-box electro-hydraulic braking system: architecture, control, and application[J]. *Sustainability*, 2024, 16(3): 1049.
- [18] 赵立金,杨世春,曲婧瑶.电子机械制动系统关键技术研究进展[J/OL].*北京航空航天大学学报*: 1-12[2024-05-17].<https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0210>.  
ZHAO L J, YANG S C, QU J Y. Research progress on key technologies of electro-mechanical braking system[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*: 1-12[2024-05-17]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0210>.
- [19] 刘亚欧,李睿申,李晶.电子机械制动系统应用及关键

- 技术分析[J]. 汽车工程师, 2020(2): 45-47.
- LIU Y O, LI R S, LI J. Electro-mechanical braking system application and key technology analysis[J]. Automotive Engineer, 2020(2): 45-47.
- [20] KELLER F. Electromagnetic wheel brake device: U.S. Patent 6, 536, 561[P]. 2003-3-25.
- [21] GEYER B, SCHADE K. Electronic braking system and method for operating an electronic braking system: U.S. Patent 8, 626, 415[P]. 2014-1-7.
- [22] 邓美俊, 孙仁云, 潘湘芸, 等. 汽车电子机械制动系统技术发展分析[J]. 汽车零部件, 2021(9): 103-109.
- DENG M J, SUN R Y, PAN, X Y, et al. Analysis of the development of automotive electro-mechanical braking system technology[J]. Automobile Parts, 2021(9): 103-109.
- [23] 焦宗夏, 吴帅, 李洋, 等. 液压元件及系统智能化发展现状及趋势思考[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20): 357-384.
- JIAO Z X, WU S, LI Y, et al. Hydraulic components and systems intelligent development status and trend of thinking[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(20): 357-384.
- [24] PATIL R S, JADHAV S P, PATIL M D. Review of intelligent and nature-inspired algorithms-based methods for tuning pid controllers in industrial applications[J]. Journal of Robotics and Control (JRC), 2024, 5(2): 336-358.
- [25] ZHU S W, FAN X B, QI G X, et al. Design of ABS sliding mode control system for in-wheel motor vehicle based on road identification[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2023, 45(3): 3915-3928.
- [26] LAI G Y, HUANG K, WANG Y H, et al. Iterative inverse-based adaptive fuzzy control with predetermined tracking accuracy for hysteretic nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2024, 32(4): 2509-2522.
- [27] HAN W, XIONG L, YU Z. Braking pressure control in electro-hydraulic brake system based on pressure estimation with nonlinearities and uncertainties[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 131: 703-727.
- [28] 余卓平, 史彪飞, 卓桂荣, 等. 集成式电子液压制动系统位移压力特性理论研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 294-303.
- YU Z P, SHI B F, ZHUO R G, et al. Theoretical study of displacement pressure characteristics of integrated electro-hydraulic braking system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 294-303.
- [29] 张祥琨, 季学武, 钟佩思, 等. 集成式电液制动系统建模仿真与压力控制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(13): 5539-5545.
- ZHANG X K, JI X W, ZHONG P S, et al. Modeling simulation and pressure control of integrated electrohydraulic brake systems[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(13): 5539-5545.
- [30] ZHAO J, CHEN Z C, ZHU B, et al. Precise active brake-pressure control for a novel electro-booster brakesystem [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(6): 4774-4784.
- [31] CHEN L, YU Y C, LUO J. Master cylinder oil pressure following control algorithm of electric power assisted braking system based on fuzzy pid controller[C]//2022 4th International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM), October 7- 9, 2022, Federation of Chinese Professional Associations in Europe (FCPAE), Hamburg, Germany. New York: IEEE, 2022: 273-277.
- [32] 龚佳鹏. 汽车电子液压制动系统特性测试与非线性控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- GONG J P. Characteristics testing and nonlinear control research of automotive electronic hydraulic brake systems[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [33] CHU H Q, GAO B Z, GU W L, et al. Low-speed control for permanent-magnet DC torque motor using observer-based nonlinear triple-step controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64(4): 3286-3296.
- [34] 刘曦东. 新能源汽车电液并行制动系统控制策略及匹配技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- LIU X D. Research on control strategy and matching technology of electro-hydraulic parallel braking system for new energy vehicles[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [35] WU D M, DINIG H T, GUO K H, et al. Experimental research on the pressure following control of electro-hydraulic braking system[R]. SAE Technical Paper, 2014-01-0848, 2014.
- [36] 汪洋, 魏民祥. 基于联合仿真的EHB系统轮缸压力模糊PID控制研究[J]. 公路与汽运, 2010(6): 12-15.
- WANG Y, WEI M X. Research on fuzzy PID control of wheel cylinder pressure in EHB system based on co-simulation[J]. Highways & Automotive Applications, 2010(6): 12-15.
- [37] 张海波. 电液制动系统(SBC)的研究与设计[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- ZHANG H B. Research and design of electro-hydraulic braking system (SBC) [D]. Jinan: Shandong University,

- 2012.
- [38] 王祥. 电动轿车制动能量回收系统制动压力线性控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
WANG X. Research on linear control algorithm of braking pressure for electric car regenerative braking energy recovery system[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [39] ZHAO X, LI L, SONG J, et al. Linear control of switching valve in vehicle hydraulic control unit based on sensorless solenoid position estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4073-4085.
- [40] WEI L T, WANG X Y, LI L. Wheel pressure estimation of hydraulic integrated braking system by fusion model [C]//2023 9th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), April 21-23, 2023, Beihang University, Beijing, China. NewYork: IEEE, 2023: 318-323.
- [41] 沙宏亮. 基于轮缸压力估算的轻型车 ESP 控制算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.  
SHA H L. Research on ESP control algorithm for light vehicle based on wheel cylinder pressure estimation[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [42] 朱冰, 赵健, 李静, 等. 面向底盘集成控制的液压制动压力估算方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2009 (S1): 22-26.  
ZHU B, ZHAO J, LI J, et al. Hydraulic Brake Pressure Estimation Method for Chassis Integrated Control[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2009 (S1): 22-26.
- [43] 王猛, 孙泽昌, 王士奇, 等. 基于一体式制动主缸的电液复合制动系统仿真[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(8): 1211-1215.  
WANG M, SUN Z C, WANG S Q, et al. Simulation of integrated electro-hydraulic compound brake system based on integrated brake master cylinder[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(8): 1211-1215.
- [44] JIANG G R, MIAO X L, WANG Y H, et al. Real-time estimation of the pressure in the wheel cylinder with a hydraulic control unit in the vehicle braking control system based on the extended Kalman filter[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(10): 1340-1352.
- [45] FEY W, ENGELMANN M, HEINZ M, et al. Method for determining the drive current for an actuator: U.S. Patent Application 10/566,782[P]. 2007-7-12.
- [46] 冯涛. 汽车可控制动系统的仿真与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
FENG T. Simulation and analysis of automotive controllable braking systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [47] 赵才虎, 陈誉, 朱天龙, 等. 不同结构参数对高速开关阀液压力的影响研究[J]. 机电工程, 2024, 41(1): 33-42.  
ZHAO C H, CHEN Y, ZHU T L, et al. Study on the influence of different structural parameters on liquid pressure of high-speed switching valve[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024, 41(1): 33-42.
- [48] ZHAO J, ZIRKA S E, Moroz Y I. Duality-derived models of high-speed electromagnetic valves[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(10): 9876-9884.
- [49] LI S T, GUO P C, JIANG W, et al. Research on response characteristics and parameters optimization of high-speed solenoid valve[C]//2015 34th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2015: 2327-2332.
- [50] ZHANG Y L, CHEN Z X, WU J L, et al. Gap adjustment strategy for electromechanical brake system based on critical point identification[R]. Pennsylvania: SAE Technical Paper, 2024-01-2320, 2024.
- [51] EUM S, CHOI J, PARK S S, et al. Robust clamping force control of an electro-mechanical brake system for application to commercial city buses[J]. Energies, 2017, 10(2):220.
- [52] FENG C L, MANZIE C L C. Explicit nonlinear mpc of an automotive electromechanical brake[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 10758-10763.
- [53] LI T Y, LI J Y, ZHANG Y F, et al. Clamping force control strategy of electromechanical brake system[C]//Fourth International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing, and Automation Technology (MEMAT 2023), December 1- 3, 2023, Guilin UniversityOf Electronic Technology, Guilin, China. Washington: SPIE, 2024, 13082: 780-787.
- [54] 刘晓辉, 于良耀, 郑晟, 等. 基于电子助力器的冗余防抱死制动算法研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 82-93.  
LIU X H, YU L Y, ZHENG S, et al. Research on redundant anti-lock braking algorithm based on electronic booster[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 82-93.
- [55] SHIAO Y J, NGUYEN Q A, LIN J W. A study of novel hybrid antilock braking system employing magnetorheological brake[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(6): 617584.
- [56] 张帅. 电子机械制动(EMB)控制策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.  
ZHANG S. Research on electronic mechanical brake

- (EMB) control strategy[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [57] 赵会强, 郭致远, 刘兆波. 考虑安全性和舒适性的AEB系统跟车控制策略研究[J/OL]. 汽车工程学报, 1-11 [2024-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1206.u.20240710.1930.002.html>.
- ZHAO H Q, GUO Z Y, LIU Z B. Research on AEB system following control strategy considering safety and comfort [J/OL]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 1- 11[2024-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1206.u.20240710.1930.002.html>.
- [58] 黄会东. 基于电液制动系统压力控制的AEB控制策略研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
- HUANG H D. Research on aeb control strategy based on pressure control of electro-hydraulic brake systems[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2024.
- [59] SEVIL A O, CANEVI M, SOYLEMEZ M T. Development of an adaptive autonomous emergency braking system based on road friction[C]//2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), November 28-30, 2019, Gazi University, Bursa, Turkey. NewYork: IEEE, 2019: 815-819.
- [60] ŠABANOVIĆ E, ŽURAUŠIS V, PRENTKOVIŠKIS O, et al. Identification of road-surface type using deep neural networks for friction coefficient estimation[J]. Sensors, 2020, 20(3): 612.
- [61] XU S W, ZHAO X, YANG N X, et al. Control strategy of braking energy recovery for range-extended electric commercial vehicles by considering braking intention recognition and electropneumatic braking compensation[J]. Energy Technology, 2020, 8(9): 2000407.
- [62] 吕毅恒, 王陶, 陈刚, 等. 引入载荷识别的电动后驱商用车制动能量回收策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版) 2023, 44(4): 379-385.
- LYU Y H, WANG T, CHEN G, et al. Braking energy recovery strategy for electric rear-drive commercial vehicles with load recognition[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(4): 379-385.
- [63] SHEN Y A, MAO J F, WU A H, et al. Optimal slip ratio tracking integral sliding mode control for an EMB system based on convolutional neural network online road surface identification[J]. Electronics, 2022, 11(12): 1826.



通信作者: 陈齐平(1984—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为汽车线控技术、新能源汽车电驱动系统及控制、智能汽车与智慧交通等。E-mail: qiping3846758@163.com。

(责任编辑: 李根)