

基于自动驾驶的汽车智能制动系统架构设计及功能分级

赵 燃, 李刚炎, 胥 军, 包汉伟

(武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070)

摘 要:随着车辆自动驾驶层级的不断提高,其对制动系统的要求也越来越高。本文通过总结和分析相关标准,设计基于自动驾驶的汽车智能制动系统总体功能架构和执行架构,并提出面向不同自动驾驶层级的智能制动系统功能分级及各级功能需求。

关键词:自动驾驶; 智能制动系统; 架构设计; 功能分级

中图分类号:U461.3

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)04-0001-07

Architecture Design and Classification Function of Vehicle Intelligent Braking System Based on Autonomous Driving

ZHAO Ran, LI Gangyan, XU Jun, BAO Hanwei

(School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: With the continuous improvement of the level of vehicle autonomous driving, the requirements of vehicle braking systems are becoming higher and higher. Through the summary and analysis of relevant standards, this paper designs the overall function architecture and execution architecture of vehicle intelligent braking systems based on autonomous driving and puts forward the function classification and each function requirement of intelligent braking system for different levels of autonomous driving.

Key words: autonomous driving; intelligent braking system; architecture design; function classification

制动系统是自动驾驶车辆安全行车的重要支撑,目前关于自动驾驶车辆的标准在不断地出台和完善,其制动系统的相关技术要求也处于探索中。本文从相关标准出发,分析各个层级驾驶自动化系统的功能,提出基于自动驾驶的汽车智能制动系统的总体功能需求,进而构建一种基于SAE自动驾驶系统参考功能架构的智能制动系统总体功能架构,设计一种能够实现其功能的汽车智能制动系统执行架构;并对不同层级自动驾驶系统中的智能制动系统进行分级和功能解释。本文设计的自动驾驶汽车智能制动系统功能架构和执行架构,主要面向有条件的智能制动和完全智能制动两个层级。该研究成果可为后续开发智能制动系统提供理论支撑,并为其他车载系统向自动驾驶的智能升级提供参考。

1 基于自动驾驶的汽车智能制动系统总体功能架构

1.1 基于自动驾驶的汽车智能制动系统的总体功能需求

基于GB/T 40429—2021《汽车驾驶自动化分级》^[1]中的定义,不同层级驾驶自动化系统的功能区别重点在于对动态驾驶任务中的目标和事件的探测与反应能力、对车辆运动控制功能的完整程度、对设计运行条件的检测能力、由人员或系统执行最小风险策略及设计运行范围。

SAE J3131^[2]描述了高等级(4级 High Driving Automation 和 5级 Full Driving Automation)自动驾驶系统的功能与输出的关系,如图1所示。4级和5级的运动控制功能与输出的关系是一致的,仅在自动驾

收稿日期:2023-12-25。

基金项目:湖北省重点研发计划项目(2022BAA077)。

第一作者:赵 燃(1990—),男,硕士;主要从事商用车电控气压制动系统研究工作。E-mail:Ran.zhao@whut.edu.cn。

驶系统的设计运行条件上有所区别。

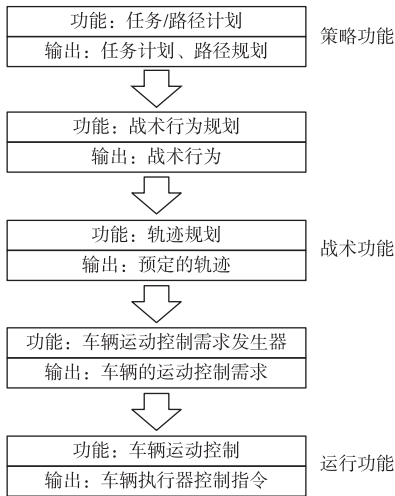


图 1 4 级和 5 级自动驾驶系统车辆运动控制功能与输出的关系

目前,面向自动驾驶系统的车辆运动控制功能,在《智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第 1 部分:单车道行驶控制》(征求意见稿)^[3]中规定了对于单一方向车辆运动控制系统的性能要求,与制动相关的内容详见表 1。

征求意见稿的编制说明中指出:

- 1) 对于横向控制既要保证横向稳定性,又要体现系统的控制能力,因此对最大横向加速度最大值和最小值作出要求。同时考虑在某些紧急情况下,允许系统短时间内控制的超调。
- 2) 对于加速度和减速度等要求,保证纵向控制的稳定性,避免给驾驶员带来不适感。在较短的时间内,为适应周边交通环境变化,系统的加速度以及减速度可超过上述限值要求。

表 1 智能网联汽车驾驶辅助系统单向车辆运动控制性能要求(制动相关)

运动控制的方向	性能要求
横向运动控制	对于 M ₁ 和 N ₁ 类车辆制造商声明的最小、最大横向加速度范围:[10,60] km/h;0~3 m/s ² ; (60,100] km/h;0.5~3 m/s ² ; (100,120] km/h;0.8~3 m/s ² ; 对于 M ₂ 、M ₃ 、N ₂ 和 N ₃ 类车辆制造商声明的最小、最大横向加速度范围:[10,30] km/h;0~2.5 m/s ² ; (30,60] km/h;0.3~2.5 m/s ² ; (60,120] km/h;0.5~2.5 m/s ² ; 且任意 0.5 s 内横向加速度变化率平均值不超过 5 m/s ³ 。
纵向运动控制	在进行无目标车辆试验和目标车辆试验时,系统的纵向减速度应满足以下要求: ①试验车辆行驶速度不低于 72 km/h 时,系统的平均减速度不应超过 3.5 m/s ² (时间区间为 2 s); ②试验车辆行驶速度高于 18 km/h,低于 72 km/h 时,系统的平均减速度不应超过标准中的曲线范围(时间区间为 2 s); ③试验车辆行驶速度不高于 18 km/h 时,则系统的平均减速度不应超过 5 m/s ² (时间区间为 2 s)。 系统的纵向减速度变化率应满足以下要求: ①试验车辆行驶速度不低于 72 km/h 时,系统的平均减速度变化率不应超过 2.5 m/s ³ (时间区间为 1 s); ②试验车辆行驶速度高于 18 km/h,低于 72 km/h 时,系统的平均减速度变化率不应超过标准中的曲线范围(时间区间为 1 s); ③试验车辆行驶速度不高于 18 km/h 时,系统的平均减速度变化率不应超过 5 m/s ³ (时间区间为 1 s)。

结合国标^[1]和 SAE 标准^[2]分析,高层级自动驾驶系统对车辆运动的控制功能主要在于:对车辆执行器发送基于预测轨迹的控制命令;车辆运动控制系统对之后较短时间段内的系统动作进行预测、规划,通过控制执行器执行既定的动作,与其他车载系统协同工作让车辆按照预设轨迹正确运动;车辆运动控制的执行系统需保证车辆运动的稳定和安全。

基于以上分析,自动驾驶车辆的智能制动系统应当具有以下功能:

- 1) 接收自动驾驶系统提供的车辆运动控制指令并执行,如汽车完全制动、减速或车辆运动稳定性控制等。自动驾驶系统通过对驾驶场景、外部环境的监测和分析,决策、规划后续一段时间内车辆的运动轨迹。由于这段时间一般较长,智能制动系统可通过施加较为平顺的制动减速度及较小减速度变化率来实现持续的、不激烈的车辆运动控制。当车辆遇到紧急工况时,智能制动系统控制执行器快速对制动力进行控制,以此对车辆运动姿态进行快速、有效的调整。

2) 智能制动系统需具备对系统本身状态和功能完整性、操作人员需求和状态、道路信息等设计运行条件的监测、诊断和预测功能。

3) 在不满足设计运行条件的情况下, 智能制动系统需利用剩余制动能力辅助自动驾驶系统执行最小风险策略, 或辅助介入的操作人员完成车辆运动控制任务。

1.2 自动驾驶汽车的智能制动系统总体功能架构

SAE J3131 标准将4级和5级自动驾驶系统的功能分为任务层、战术行为层、控制指令层和控制执行层, 说明了在车辆自动驾驶过程中各层级如何进行工作, 对其中涉及的相关名词进行了定义, 并构建了自动驾驶系统的参考功能架构。值得注意的是, 该标准主要对自动驾驶系统的功能进行了说明和定义, 但未详细提及其他车载系统的功能。

根据本文1.1节总结的自动驾驶汽车总体功能要求, 并参考SAE J3131^[2]中的汽车自动驾驶系统参考功能架构(如图2所示), 本文提出一种基于自动驾驶的汽车智能制动系统总体功能架构(如图3所示)。

在基于自动驾驶的汽车智能制动系统功能架构

中, 面向高层级自动驾驶的智能制动系统的具体功能如下:

1) 智能制动系统分析自动驾驶系统发出的、基于预期运行轨迹的控制命令, 将车辆预期运行轨迹转化为制动系统的预期运行工况, 通过对传感器信息的采集、分析、反馈, 控制执行器改变制动力, 实现智能制动系统运行的闭环控制, 从而保证车辆能够精确按照预设的轨迹运动。

2) 智能制动系统应急介入危险场景, 融合使用系统内的智能安全技术, 闭环控制制动力实现对车辆运动状态的修正, 保证车辆运动过程中的安全性和稳定性。

3) 智能制动系统自主检测当前车辆运行状态、道路环境状况和操作人员的制动需求, 与其他车载系统及操作人员协同工作, 保证车辆按照预定轨迹安全、稳定地运行。

4) 智能制动系统自主识别人工制动指令以检测和诊断驾驶员操作需求、状态, 通过车载传感器识别制动系统软硬件功能是否失效, 通过信息交通讯识别自动驾驶系统的状态及其车辆运动控制功能是否失效。

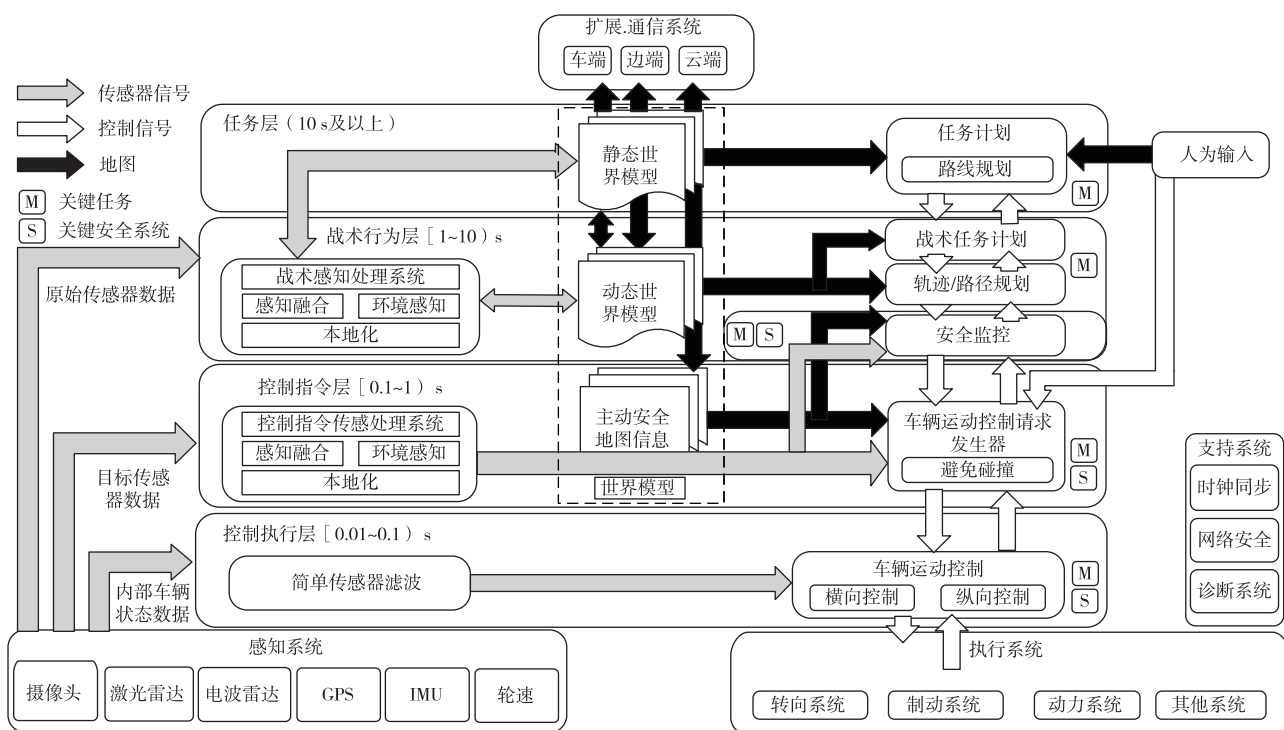


图2 SAE 汽车自动驾驶系统参考功能架构

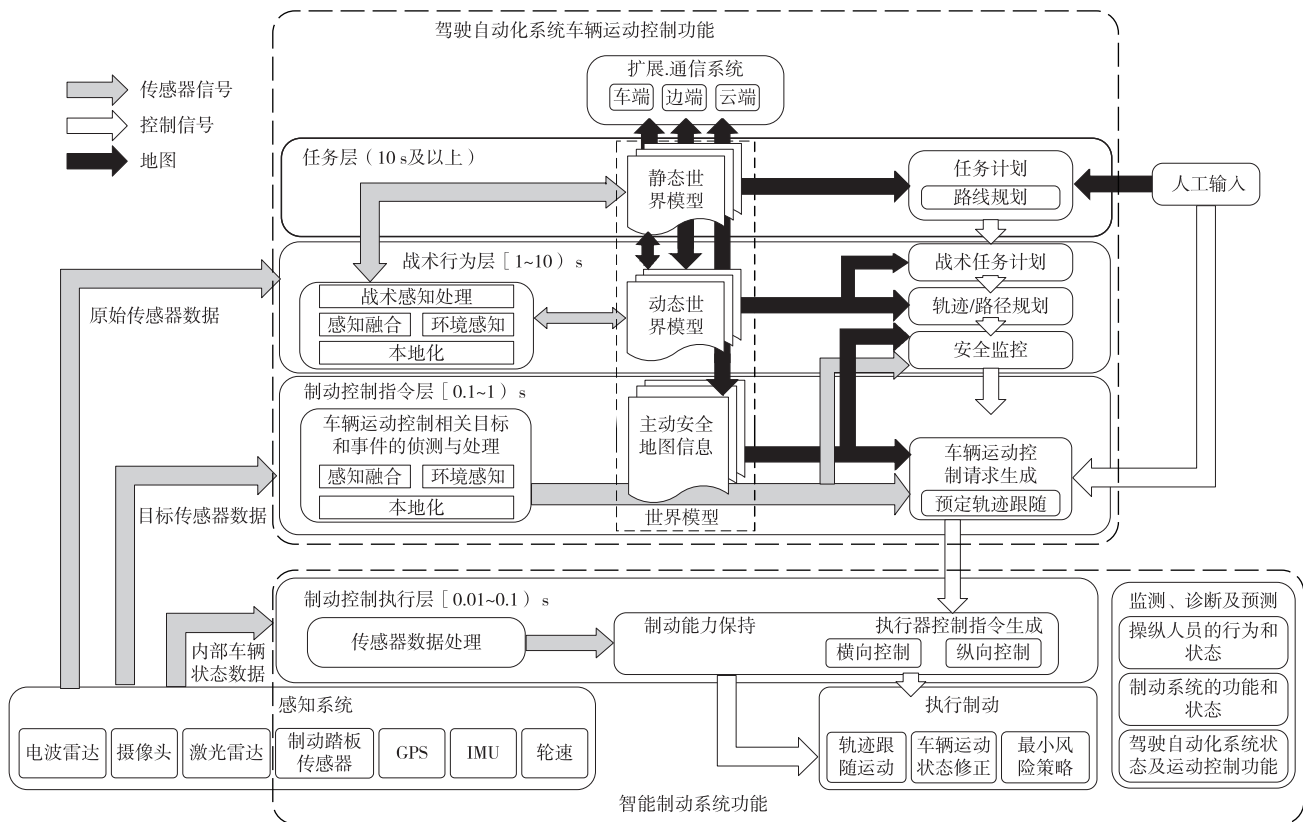


图3 基于SAE标准的自动驾驶汽车智能制动系统总体功能架构示意图

5) 当制动系统本身的软硬件出现功能失效、自动驾驶系统出现影响动态驾驶任务执行的故障,且无人工介入控制时,智能制动系统需使用制动系统本身的软、硬件剩余能力来保持一定的制动能力,以配合自动驾驶系统的最小风险策略。

2 基于自动驾驶的汽车智能制动系统执行架构及其分级与功能

2.1 基于自动驾驶的汽车智能制动系统的执行架构与组成

随着汽车自动驾驶层级不断提升,其他车载系统的功能和性能也在随之调整和增强。为让其他车载系统适应相应层级自动驾驶系统的功能和性能需求,国内外研究者进行了一系列研究。如与制动系统工作相关的车辆状态估计预测技术,有助于提升制动系统运行的精确化和智能化程度^[4-6];故障检测、识别与预测技术能有效帮助自动驾驶系统识别自身和其他车载系统存在的或即将产生的故障,从而更早、更

准确地采取应对措施^[7-8];将冗余设计方法应用于自动驾驶系统及其配套的车载系统中,能有效提升系统功能的完整性、稳定性和安全性^[9-10];"人类驾驶员-智能系统"双系统配合操纵车辆(即"人机共驾"),是实现高层级自动驾驶之前的必经阶段,面向"人机共驾"的汽车技术研究和开发具有重要的现实意义和广阔的商业前景^[11-13];当自动驾驶系统完成了策略性动态驾驶任务,生成了车辆的预期运行轨迹后,需要面向轨迹追踪的车载系统执行器控制方法来实现相应的车辆运动控制功能^[14-15]。

为实现基于自动驾驶的汽车智能制动系统功能,本文基于以上研究设计基于自动驾驶的汽车智能制动系统执行架构(如图4所示)。在该架构中,智能制动系统分为系统层、决策层、反馈层和物理层4个层次。

2.1.1 智能制动系统的系统层

系统层包含车辆运动控制系统、制动系统故障检测、诊断与预测系统和操作人员行为与状态检测系

统。车辆运动控制系统主要通过控制制动力对车辆纵向和横向运动进行控制,其功能包含两方面:①通过控制制动执行器施加制动力让控制车辆按照预定

运动轨迹运动;②根据车辆运动状态和路况信息判断是否进行应急介入,在介入后进行车辆运动修正。

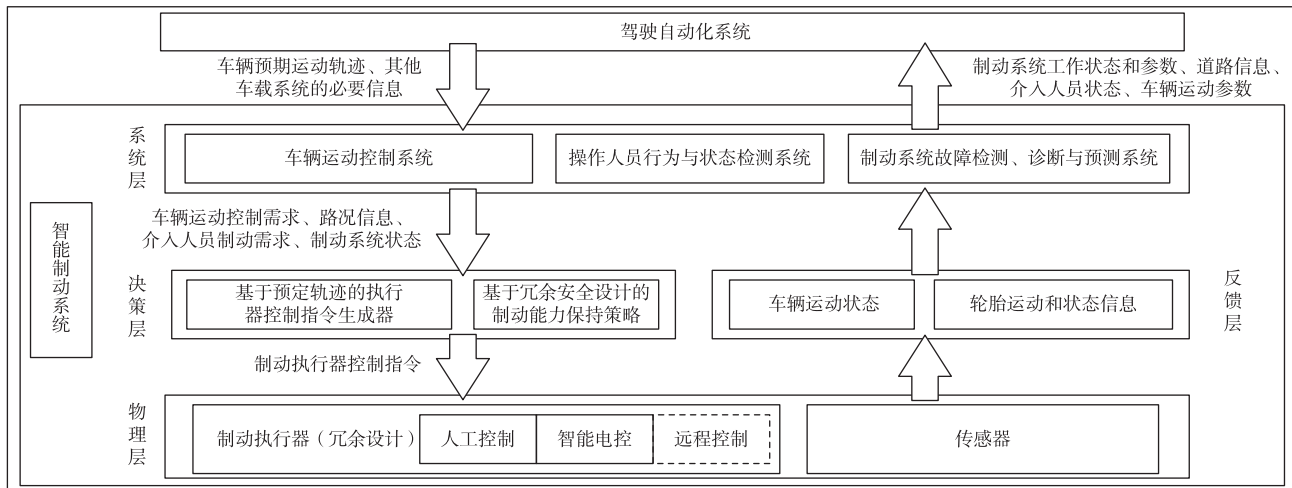


图4 基于自动驾驶的汽车智能制动系统执行架构

制动系统故障检测、诊断与预测系统主要用于实时监测系统内的软、硬件,对发生的异常情况进行识别与诊断,判断是否产生影响执行车辆运动控制任务的故障,或者根据传感器数据预测未来一段工作时间内的系统工作状态和故障发生概率,评估剩余制动能力以及是否需要人工介入控制,最终决定是否执行智能制动系统的制动能力保持策略以辅助最小风险策略执行。

操作人员行为与状态检测系统中的操作人员指对自动驾驶车辆进行人工控制的人员。在智能制动系统中,主要通过制动踏板的信号来判断操作人员的制动需求和人员状态,这将决定3级自动驾驶系统是否自动执行最小风险策略。而面向4、5级自动驾驶系统,当需要人工驾驶时(即出现自动驾驶系统无法执行动态驾驶任务和最小风险策略的情况),对介入人员行为与状态的检测可用于保证智能制动系统的协同运行,并以此保证车辆的行驶安全。

2.1.2 智能制动系统的决策层

决策层包含基于预定轨迹的执行器控制指令生成器和基于冗余安全设计的制动能力保持策略。

基于预定轨迹的执行器控制指令生成器的功能是分析自动驾驶系统规划的车辆预定运动轨迹,结合

当前车辆状态、制动系统状态和道路信息,规划、决策出较短时间段内制动器的预期工况,并进一步转化为制动执行器的控制指令。

基于冗余安全设计的制动能力保持策略的主要功能为:当智能制动系统出现影响自身系统和车辆运行的软硬件故障时,运用基于智能制动系统冗余安全设计产生的剩余制动能力,支持自动驾驶系统完成其预定的最小风险策略,在过程中控制车辆的运动状态并保证其安全性。这种冗余安全设计与常规的应急制动系统存在区别,前者不仅是一种硬件上的备份,还是一种系统层面的、软硬件并行的、功能上的冗余设计。

2.1.3 智能制动系统的反馈层

智能制动系统反馈层包含运用车载传感器采集的车辆运动状态信息、轮胎运动和状态信息,用于道路信息辨识和车辆运动控制。

2.1.4 智能制动系统的物理层

智能制动系统的物理层包含智能制动系统的执行器硬件及必要传感器。执行器应包含人工控制、智能电控及可能的远程控制模式,既能根据需求自主完成制动动作,又能请求人工介入控制;智能制动系统的执行器应有冗余安全设计,当智能制动系统出现影

响制动功能的软、硬件故障时,能使用智能制动系统执行器的剩余制动能力执行最小风险策略;智能制动系统包含必要的传感器,能采集必要的信号,转化为必要的数据。

2.2 基于自动驾驶的汽车智能制动系统分级及其功能

不同层级的自动驾驶系统存在不同的功能和技

术要求,这意味着面向各层级自动驾驶系统的制动系统具有各自对应的功能要求。

本文提出的面向不同驾驶自动化层级的智能制动层级和汽车智能制动系统功能需求详见表 2。表 2 中面向不同驾驶自动化层级,智能制动分为人工制动、组合制动、条件性智能制动和完全智能制动 4 个层级。

表 2 智能制动分级及功能需求

对应驾驶自动化层级	智能制动层级	人工控制	系统功能
0 级(应急辅助)	人工制动	完全控制	监测、提示与应急辅助。
1~2 级(部分和组合驾驶辅助)	组合制动	部分控制车辆运动,应急介入	监测、识别、预测与提示;部分控制车辆运动。
3 级(有条件自动驾驶)	条件性智能制动	DDT 回退后援	监测、识别、预测与请求;完全控制车辆运动;被动应对系统故障。
4~5 级(高度或完全自动驾驶)	完全智能制动	无控制	监测、识别、预测;完全控制车辆运动;自动应对系统故障。

1) 人工制动。对应 0 级驾驶自动化,此层级智能制动系统持续执行对驾驶员意图、车辆行驶状态、制动系统状态和路况的探测任务,并对制动系统的故障进行检测、识别和预测,最终将上述信息反馈给驾驶员,由驾驶员执行制动动作的操作,智能制动系统仅在紧急状态下瞬时紧急介入,修正车辆的不良运动状态。

2) 组合制动。对应 1 级和 2 级驾驶自动化,此层级下的智能制动系统除上一层级的功能外,需对其部分应用于车辆运动控制的事件和目标进行反应。根据自动驾驶系统识别的场景信息,在预先规划的路径和车辆轨迹的基础上,智能制动系统规划、决策出未来较短时间内段的制动系统工况,并对制动执行器施加制动力进行持续的、不激烈的车辆运动控制;检测、识别和预测智能制动系统的故障,并将故障信息反馈给驾驶员,由驾驶员判断是否介入智能制动系统进行人工控制;驾驶员接管车辆控制权并进行人工操控时,智能制动系统通过判断驾驶员的驾驶意图来辅助驾驶员进行车辆运动控制,即“人机共驾”场景。

3) 条件性智能制动。对应 3 级的有条件自动驾驶,此层级下的智能制动系统与上一级智能制动功能的区别是前者具有更高层级的场景应对能力和故障应对能力。智能制动系统可应对相关车辆运动控制任务下的所有场景,无需人工操作;通过检测、识别和

预测智能制动系统的故障,在智能制动系统中出现影响制动功能的故障或不满足设计运行条件的情况下请求人工介入控制;当人工介入控制时,智能制动系统通过识别控制需求,辅助人工进行车辆运动控制;在提出接入请求但无人工介入的情况下,自动执行基于智能制动系统冗余安全设计的制动能力保持策略,支持自动驾驶系统完成其预定的最小风险策略,并在此过程中控制车辆的运动状态并保证其安全性。

4) 完全智能制动。对应 4 级和 5 级的高度或完全自动驾驶,此层级下的智能制动系统可在上一级智能制动功能的基础上实现完全自主的车辆运动控制及故障应对。智能制动系统可应对车辆运动控制任务下的所有场景,无需人工操作;在智能制动系统存在影响制动功能的故障或不满足设计运行条件的情况下,自动执行基于智能制动系统冗余安全设计的制动能力保持策略,支持自动驾驶系统完成其预定的最小风险策略,并在此过程中控制车辆的运动状态并保证其安全性。

3 结束语

本文从相关标准研究和分析出发,通过总结、分析各个层级自动驾驶系统的功能要求,结合 SAE 高等级自动驾驶系统参考架构,提出了一种基于自动驾驶的汽车智能制动系统总体功能架构;并基于此功能

架构,设计了一种基于自动驾驶的汽车智能制动系统执行架构;面向不同层级驾驶自动化系统,将智能制动进行分级,并解释了不同层级智能制动的功能要求,最终通过不同的智能制动系统功能分级对应不同等级的自动驾驶系统,将自动驾驶系统功能需求与制动系统的功能设计进行了对应,为制动系统在自动驾驶背景下的功能升级和产品开发提供具有实用性的参考。对于场地内自动驾驶车辆(如自动驾驶矿车、码头物流车及园区旅游车等),采用本文提出的智能制动系统架构能够满足车辆的制动需求,从而为这些车辆的制动系统及其相关软、硬件产品的设计开发提供了原理和技术支持。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国工业和信息化部. 汽车驾驶自动化分级: GB/T 40429—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-10.
- [2] SAE. Definitions for Terms Related to Automated Driving Systems Reference Architecture: J3131 _ 202203 [S]. United States: SAE International, 2022: 1-17.
- [3] 全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分会. 《智能网联汽车 组合驾驶辅助系统技术要求及试验方法 第1部分: 单车道行驶控制》等两项汽车推荐性国家标准征求意见的函[EB/OL]. (2022-08-23) [2023-12-12]. <http://www.catarc.org.cn:8088/zxd/portal/detail/zqyj/265>.
- [4] 李静, 石求军, 刘鹏, 等. 基于纵向车速估算的商用车 ABS 神经网络滑模控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1017-1025.
- [5] 周兵, 李涛, 吴晓建, 等. 基于双自适应无迹卡尔曼滤波的半挂车状态估计[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 63-73.
- [6] LI Zhaojian, R M H, XIA Xin, et al. 基于云和高斯过程的网联车辆协同式道路参数估计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 489-496.
- [7] FANG Yukun, MIN Haigen, WANG Wuqi, et al. A fault detection and diagnosis system for autonomous vehicles based on hybrid approaches[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16): 9359-9371.
- [8] 贾爱芹, 陈建军, 蒋志强, 等. 基于灰色支持向量机的汽车制动系统故障诊断与预测[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(1): 149-152.
- [9] LI Chao, ZHANG Junzhi, HOU Xiaohui, et al. A novel double redundant brake-by-wire system for high automation driving safety: design, optimization and experimental validation[J]. Actuators, 2021, 10(11): 287.
- [10] GRANDESSO G, BRAVO-PALACIOS G, WENSING M P, et al. Exploring the limits of a redundant actuation system through co-design[J]. IEEE Access, 2021(9): 56802-56811.
- [11] 胡杰瑞. 面向人机共驾的人机冲突量化与控制策略评价研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- [12] 高镇海, 蔡荣贵, 孙天骏, 等. 人机共驾下的驾驶行为数据滤波方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(3): 589-599.
- [13] 景荣荣. 人机共驾环境下的车辆轨迹预测与测试方法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- [14] WU Haidong, SI Zhenli, LI Zihan. Trajectory Tracking control for four-wheel independent drive intelligent vehicle based on model predictive control[J]. IEEE Access, 2020(8): 73071-73081.
- [15] CHENG Shuo, LI Liang, CHEN Xiang, et al. Model-predictive-control-based path tracking controller of autonomous vehicle considering parametric uncertainties and velocity-varying[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8698-8707.