



引用格式:彭能岭,聂红朋,王乾乾,等. 自动驾驶车辆故障诊断系统研究与应用[J]. 轻工学报,2020,35(5):87-95.

中图分类号:U463 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.05.012

文章编号:2096-1553(2020)05-0087-09

# 自动驾驶车辆故障诊断系统研究与应用

## Study on the fault diagnosis system of autonomous vehicle and its application

彭能岭,聂红朋,王乾乾,朱敏,刘振楠

PENG Nengling, NIE Hongpeng, WANG Qianqian, ZHU Min, LIU Zhennan

郑州宇通客车股份有限公司,河南 郑州 450061

Zhengzhou Yutong Bus Co., Ltd., Zhengzhou 450061, China

### 关键词:

自动驾驶车辆;故障诊断;故障分级;故障处理;人工接管

### Key words:

autonomous vehicle;  
fault diagnosis; fault  
level; fault handling;  
manual takeover

**摘要:**为了减少自动驾驶车辆行驶过程中由于故障导致的车辆失控、碰撞等安全问题,设计了一种自动驾驶车辆故障诊断系统.该系统采用萤火虫算法对车辆故障进行预判,实时诊断车辆发生的故障信息,按照故障对自动驾驶车辆安全行驶影响的严重程度进行分级,并按照安全防护等级,结合责任敏感安全(RSS)防碰撞模型下发不同的控制指令进行车辆控制,以达到安全行车的目的.实车应用结果表明,该系统可有效应对由于自动驾驶车辆故障导致的车辆失控、碰撞等安全问题,保证了自动驾驶车辆的安全运行.

收稿日期:2020-07-15

基金项目:国家自然科学基金项目(U1664264)

作者简介:彭能岭(1977—),男,河南省新乡市人,郑州宇通客车股份有限公司高级工程师,博士,主要研究方向为客车自动驾驶技术、新能源电控技术.

**Abstract:** In order to reduce the safety problems such as out of control and collision caused by vehicle faults during the driving of autonomous vehicle, a fault diagnosis system for autonomous vehicle was developed. The system used the firefly algorithm to predict vehicle faults, and diagnosed the faults all the time. It divided the faults into five levels according to the severity of the impact of faults on the safe driving of autonomous vehicle. Different control commands were issued according to the safety protection level and the responsibility sensitive safety (RSS) to ensure the safe operation of the vehicle. The results showed that the system could effectively deal with some safety problems such as out of control and collision caused by the vehicle faults and could ensure the safe operation of autonomous vehicle.

## 0 引言

随着全球汽车保有量的快速增长,能源短缺、环境污染、交通拥堵、事故频发等现象日益突出,限制了汽车产业的可持续健康发展<sup>[1-2]</sup>. 进入新世纪以来,人们对安全、节能省时、环境友好和舒适性交通服务的需求与日俱增,汽车及其相关工业随之面临更多的挑战<sup>[3]</sup>. 随着汽车电子及互联网技术的发展,自动驾驶汽车受到越来越多的关注,全球各大传统车企、科研部门都相继开始了自动驾驶的研究工作.

车辆驾驶的自动化需通过自动驾驶系统根据接收到的感知系统信息、车辆系统信息进行决策,下发控制指令,控制执行机构动作. 因此,自动驾驶系统、感知系统、车辆系统的安全稳定运行非常重要. 2011年,何亮<sup>[4]</sup>基于故障码设计并实现了故障读取与分析相结合的汽车故障诊断专家系统. 之后,李小敏等<sup>[5-8]</sup>基于智能终端设备分别对车辆故障检测系统进行了研究. 然而,以上研究主要用于故障发生后分析、掌握车辆的故障信息,并不能在发生故障后继续保证车辆的安全运行. 2016年,S. Kim等<sup>[9]</sup>提出一种具有轮毂电机和电子机械制动器(EMB)的四轮分布式制动容错控制系统. 2019年,周洪亮等<sup>[10]</sup>设计了一种基于李雅普诺夫函数的容错控制方法,可实时诊断车辆驱动系统电机故障. 同年,曾贵苓等<sup>[11]</sup>研究了一种线性转向汽车容错控制策略. 以上研究均是针对车辆局

部系统的故障展开的,不能应对车辆运行时发生的其他系统故障. 目前对于非自动驾驶车辆故障诊断系统研究成果颇丰,但鲜见自动驾驶车辆故障诊断系统的研究. 鉴于此,本文拟设计一种自动驾驶车辆故障诊断系统,用于诊断自动驾驶车辆运行过程中发生的故障,并对故障进行分级处理,针对不同故障进行必要的车辆控制,以提高自动驾驶车辆运行的安全性,为新一代汽车主动安全系统的产业化提供理论和技术参考.

## 1 系统架构设计

自动驾驶车辆故障诊断系统架构如图1所示. 该系统所需要的信息主要通过感知系统、车辆系统、自动驾驶功能模块获得.

自动驾驶车辆故障诊断系统从感知系统获得激光雷达、超声波雷达、毫米波雷达、感知相机的故障信息;从车辆系统获得车辆的制动、驱动、转向、车速、档位、电子驻车(EPB)状态、制动灯状态、双闪灯状态、车门状态等车辆信息,同时获得车辆各零部件和系统的故障信息;从自动驾驶功能模块获得轨迹规划信息、速度规划信息、底层控制信息、地图信息、定位信息、V2X信息、CAN服务信息、数据记录服务等模块信息,同时获得自动驾驶功能模块的故障信息. 自动驾驶车辆故障诊断系统通过故障处理输出相应的控制指令给VCU控制器,VCU控制器按照接收到的指令进行车辆控制.

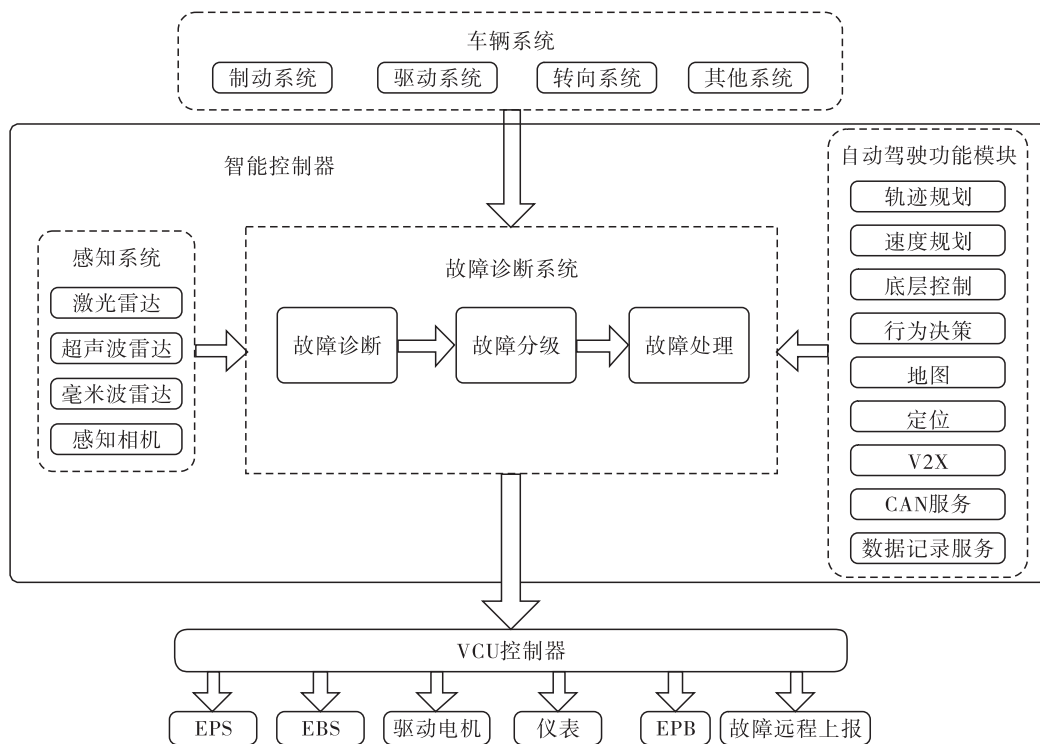


图1 自动驾驶车辆故障诊断系统架构

Fig. 1 Architecture for fault diagnosis system of autonomous vehicle

## 2 故障诊断系统构建与实现

### 2.1 故障诊断

自动驾驶车辆故障诊断系统的故障信息根据获取方式可分为4种:直接获得的故障信息、通信故障信息、功能故障信息、系统预判故障信息.

**2.1.1 直接获得的故障信息** 自动驾驶车辆故障诊断系统直接获得的故障信息主要来自各传感器、各系统内部判断,包括以下3个来源.

1) 感知系统:感知系统传递的故障信息主要包括激光雷达故障、超声波雷达故障、毫米波雷达故障、感知相机故障、感知融合故障等.

2) 车辆系统:车辆系统传递的故障信息主要包括制动系统故障、驱动系统故障、转向系统故障、车身控制模块(BCM)故障、空调系统故障、车门控制故障、胎压异常故障等.

3) 自动驾驶功能模块:自动驾驶功能模块传递的故障信息主要包括轨迹规划失败、速度

规划失败、行为决策失败、底层控制失败、地图数据不可用、定位失败、V2X不可用、CAN服务故障、数据记录失败等.

**2.1.2 通信故障信息** 通信故障信息是由自动驾驶车辆故障诊断系统通过判断感知系统、车辆系统、自动驾驶功能模块的心跳信息,以及通信数据长度获得.若自动驾驶车辆故障诊断系统接收到某模块的心跳信息不再变化,或者未接收到某模块的通信数据,则判定该模块出现通信故障.

**2.1.3 功能故障信息** 功能故障信息指自动驾驶车辆故障诊断系统判断的可能会对自动驾驶车辆安全运行产生影响的各系统的功能异常信息,主要包括制动响应超调、制动响应不到位、转向系统响应不到位、转向电机电流过大、档位不响应、EPB不响应、转向灯不响应、双闪灯不响应、制动灯不响应、车门异常开启、EPB异常拉起等.故障诊断系统对相关部件的性能

进行分析,当不满足要求时,则判断该部件功能故障.

**2.1.4 系统预判故障信息** 系统预判故障信息指故障发生之前故障诊断系统预判的可能会影响自动驾驶车辆安全运行的故障信息. 本文基于萤火虫算法原理,开发出一种用于车辆故障预判的多域萤火虫算法<sup>[12]</sup>. 该算法可以根据车辆信号的变化率、大小、同步异步等信息,对车辆的故障进行预判,提前发现故障.

多域萤火虫算法首先基于自动驾驶系统功能、架构、涉及的系统部件等元素,将不同的故障分配在不同的控制域;然后根据导致故障的直接或间接原因梳理出多种关键故障因素;最后通过关键故障因素的故障严重程度和组合严重度,预判发生某一故障的可能性.

假设某故障的故障因素  $i$  会影响故障因素  $j$ ,根据萤火虫算法原理,可认为  $j$  向  $i$  移动,那么  $i$  相对于  $j$  的影响称为关键故障因素的故障严重程度,表示为

$$T = T_0 e^{-\sigma r_{ij}}$$

其中,  $T_0$  为故障因素  $i$  的最大故障严重程度,与关键故障因素判断机制的目标函数相关;  $\sigma$  为关键故障因素关联系数,表示不同关键故障因素之间的相互影响程度;  $r_{ij}$  为故障关键因素  $i$  与  $j$  之间的控制域差值.

根据关键故障因素的严重程度可得关键故障因素的组合严重度为

$$\rho = \rho_0 e^{-\sigma r_{ij}^2}$$

其中,  $\rho_0$  为故障因素  $i$  与  $j$  的最大组合严重度,由故障因素  $i$  和  $j$  的故障严重程度获得.

故障因素  $i$  与  $j$  之间产生的影响会导致故障因素  $i$  的状态信息发生改变,因此故障因素  $i$  的状态信息改变可表示为

$$x_i(t+1) =$$

$$x_i(t) + \rho(x_j(t) - x_i(t)) + \varphi(RAND - 1/2)$$

其中,  $x_i$  和  $x_j$  分别为故障因素  $i$  和  $j$  的状态信

息,  $\varphi$  为步长因子,  $RAND$  为  $[0, 1]$  上均匀分布的随机因子.

通过不同关键故障因素的故障严重程度和组合严重度获取搜索移动方向,通过搜索得到每个关键故障因素的状态信息. 当遍历完所有组合后,输出故障全局极值点,再与预判故障的判断阈值比较,从而确定某一预判故障是否会

## 2.2 故障分级

为了划分不同故障产生最终影响的严重程度,需要对故障进行定性安全分析,进而对各故障按其对于自动驾驶产生影响的严重程度进行分级.

本文采用故障模式、影响和危害性分析(FMECA)方法进行自动驾驶车辆故障定性安全分析,其实施步骤如图2所示. FMECA 包含故障模式及影响分析(FMEA)和危害分析(CA),可确定自动驾驶车辆所有可能的故障对车辆运行的影响,找出单点故障,并按照故障的严重程度及其发生的概率确定其危害性<sup>[12-13]</sup>.

FMECA 的评价标准包括故障严重程度、故障发生频度、故障检测度 3 个指标. 故障严重程度指故障发生时对整个系统或参与者的影响程度,同时应考虑故障所造成的最坏潜在结果,并根据最终可能出现的人员伤亡、系统损坏、经济损失等的程度进行评价;故障发生频度指故障发生的频率;故障检测度指故障可能被检测出来的能力. 故障严重程度等级、故障频度等级和故障检测度等级分别如表 1—3 所示. 自动驾驶车辆典型故障的 FMECA 如表 4 所示.

## 2.3 故障处理

**2.3.1 故障处理方式** 当自动驾驶车辆发生故障时,故障诊断系统需要根据故障严重程度判断是否需要

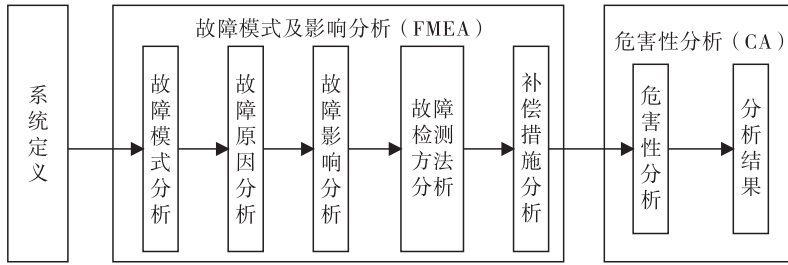


图2 自动驾驶车辆系统 FMECA 实施步骤

Fig.2 Implementation steps of FMECA for autonomous vehicle

表1 故障严重程度等级

Table 1 Level of fault severity

等级	描述
1级	会引起人员伤亡或车辆损坏
2级	会引起人员严重伤害、重大经济损失或导致自动驾驶失败
3级	可能引起人员轻度伤害和一定经济损失
4级	对自动驾驶功能有轻微影响
5级	对自动驾驶功能不产生影响,可正常自动驾驶

表2 故障频度等级

Table 2 Level of fault frequency

等级	描述
A	经常发生(>20%)
B	有时发生(10%~20%)
C	偶然发生(1%~10%)
D	很少发生(0.1%~1%)
E	极少发生(<0.1%)

表3 故障检测度等级

Table 3 Level of fault detection

等级	描述
I	故障很容易被检测出
II	故障比较容易被检测出
III	故障不容易被检测出
IV	故障不能够被检测出

为5个等级,具体故障处理措施如表5所示。

**2.3.2 车辆减速控制** 为了避免故障模式下发生碰撞事故,本文根据责任敏感安全 RSS (responsibility sensitive safety) 模型采取减速控制<sup>[14]</sup>。

当两车同向行驶时,假设前车以最大减速

度  $a_{\max, \text{brake}}$  减速,自车反应时间内以最大加速度  $a_{\max, \text{acc}}$  加速行驶,然后开始以减速度  $a_{\min, \text{brake}}$  减速行驶,安全距离  $d_{\min}$  的计算公式如下:

$$d_{\min} = v_r t + \frac{1}{2} a_{\max, \text{acc}} t^2 + \frac{(v_r + a_{\max, \text{acc}} t)^2}{2 a_{\min, \text{brake}}} - \frac{v_f^2}{2 a_{\max, \text{brake}}}$$

其中,  $v_r$  为自车纵向速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $v_f$  为前车纵向速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $t$  为反应时间/s。

当两车相向行驶时,假设自车反应时间内两车均以最大加速度  $a_{\max, \text{acc}}$  加速行驶,然后两车均以减速度  $a_{\min, \text{brake}}$  减速行驶,安全距离  $d_{\min}$  的计算公式如下:

$$d_{\min} = \frac{v_r + v_{r,t}}{2} t + \frac{v_{r,t}^2}{2 a_{\min, \text{brake}}} + \frac{|v_f| + v_{f,t}}{2} t + \frac{v_{f,t}^2}{2 a_{\min, \text{brake}}}$$

其中,  $v_{r,t}$  为自车经过反应时间  $t$  后的纵向速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $v_{f,t}$  为经过反应时间  $t$  后对向车辆的纵向速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

当自动驾驶车辆运行过程中发生故障,若两车之间的距离  $< d_{\min}$ , 则必须以不小于  $a_{\min, \text{brake}}$  的减速度进行减速。

### 3 实际应用结果分析

将本文提出的自动驾驶车辆故障诊断系统应用于 12 m 纯电动 L3 级自动驾驶 BRT 公交车,并进行  $5 \times 10^4$  km 以上的道路行驶验证,系统对 1—5 级故障的实际处理结果如图 3—7 所示。

由图 3 可以看出,非自动驾驶情况下车辆发生 1 级故障时,故障诊断系统仅上报故障和下

表4 自动驾驶车辆典型故障的FMECA

Table 4 FMECA for typical faults of autonomous vehicle

故障场景	故障原因	故障影响		故障检测方法	改进补偿措施	危害度分析		
		初影响	终影响			严重程度	频度	检测度
定位丢失	数据过载或网络中断	定位数据不准确	车辆偏航	实车测试	诊断超时,进行故障安全处理	1级	D	I
激光雷达故障	激光雷达内部故障	无法获取障碍物信息	车辆安全	激光雷达数据检测	进行故障安全处理	2级	E	I
网口网速异常	数据过载	影响自动驾驶控制精度	不能自动驾驶	实车测试	进行故障安全处理	3级	D	II
驱动力受限	驱动系统内部故障	无法达到预期车速	自动驾驶功能受限	实车测试	限制巡航时速	4级	C	II
远光灯故障	远光灯内部故障	无影响	无影响	远光灯状态检测	上报故障	5级	D	II

表5 故障诊断系统故障处理

Table 5 Fault handling of fault diagnosis system

安全防护等级	故障处理措施
1	点亮双闪灯、请求人工接管、不允许换道、进行紧急制动停车、停车后请求拉起EPB、上报故障
2	点亮双闪灯、请求人工接管、不允许换道、舒适制动进行停车、停车后请求拉起EPB、上报故障
3	点亮双闪灯、请求人工接管、靠边停车、停车请求后拉起EPB、上报故障
4	点亮双闪灯、下发限速值指令、下发限速激活指令、上报故障
5	仅上报故障,不进行处理

发不允许进入自动驾驶指令;自动驾驶情况下车辆发生1级故障时,故障诊断系统下发不允许左换道指令、不允许右换道指令、紧急制动减速度指令、双闪灯请求指令、人工接管请求指令和不允许进入自动驾驶指令,车辆停止后下发EPB请求指令,EPB拉起后取消下发紧急制动减速度指令。

由图4可以看出,非自动驾驶情况下车辆发生2级故障时,故障诊断系统仅上报故障和下发不允许进入自动驾驶指令;自动驾驶情况下

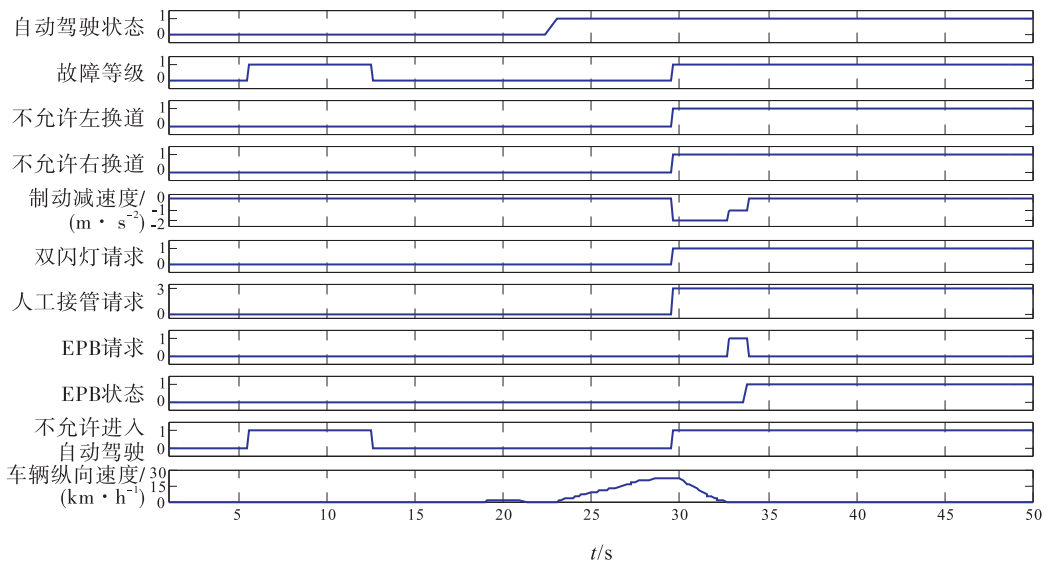


图3 自动驾驶车辆故障诊断系统对1级故障处理结果

Fig.3 Response result of fault diagnosis system of autonomous vehicle to level 1 fault

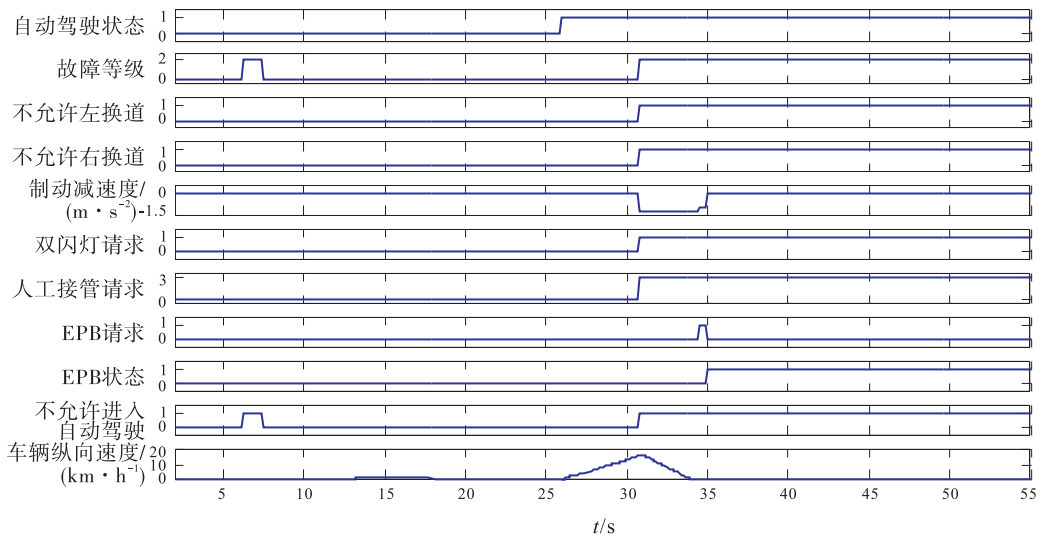


图4 自动驾驶车辆故障诊断系统对2级故障处理结果

Fig. 4 Response result of fault diagnosis system of autonomous vehicle to level 2 fault

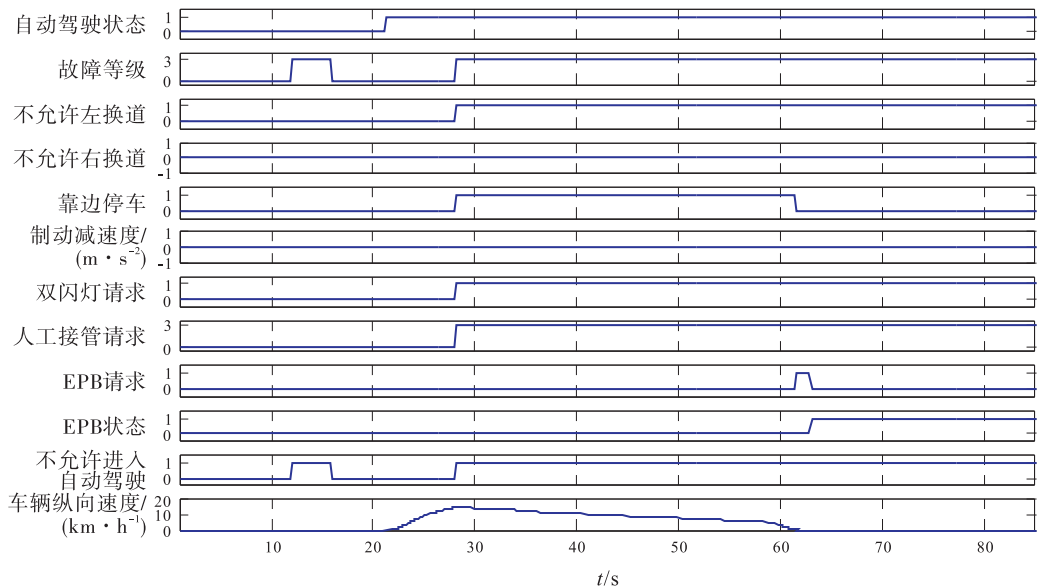


图5 自动驾驶车辆故障诊断系统对3级故障处理结果

Fig. 5 Response result of fault diagnosis system of autonomous vehicle to level 3 fault

车辆发生2级故障时,故障诊断系统下发不允许左换道指令、不允许右换道指令、舒适制动减速度指令、双闪灯请求指令、人工接管请求指令和不允许进入自动驾驶指令,车辆停止后下发EPB请求指令,EPB拉起后取消下发舒适制动减速度指令。

由图5可以看出,非自动驾驶情况下车辆发生3级故障时,故障诊断系统仅上报故障和

下发不允许进入自动驾驶指令;自动驾驶情况下车辆发生3级故障时,故障诊断系统下发不允许左换道指令、不允许右换道指令、靠边停车指令、双闪灯请求指令、人工接管请求指令和不允许进入自动驾驶指令,车辆停止后下发EPB请求指令。

由图6可以看出,非自动驾驶情况下车辆发生4级故障时,故障诊断系统仅上报故障;自动



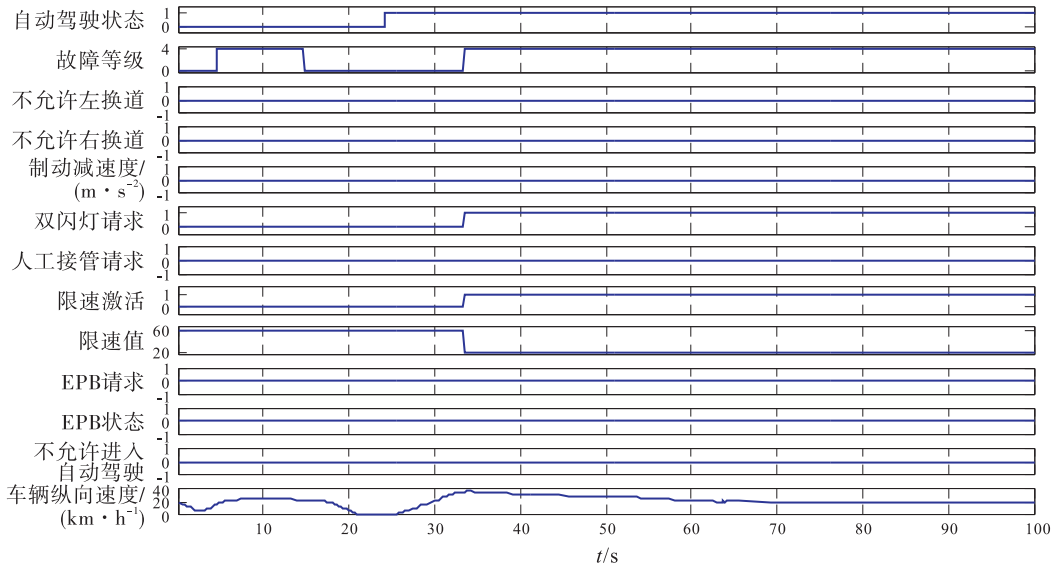


图6 自动驾驶车辆故障诊断系统对4级故障处理结果

Fig. 6 Response result of fault diagnosis system of autonomous vehicle to level 4 fault

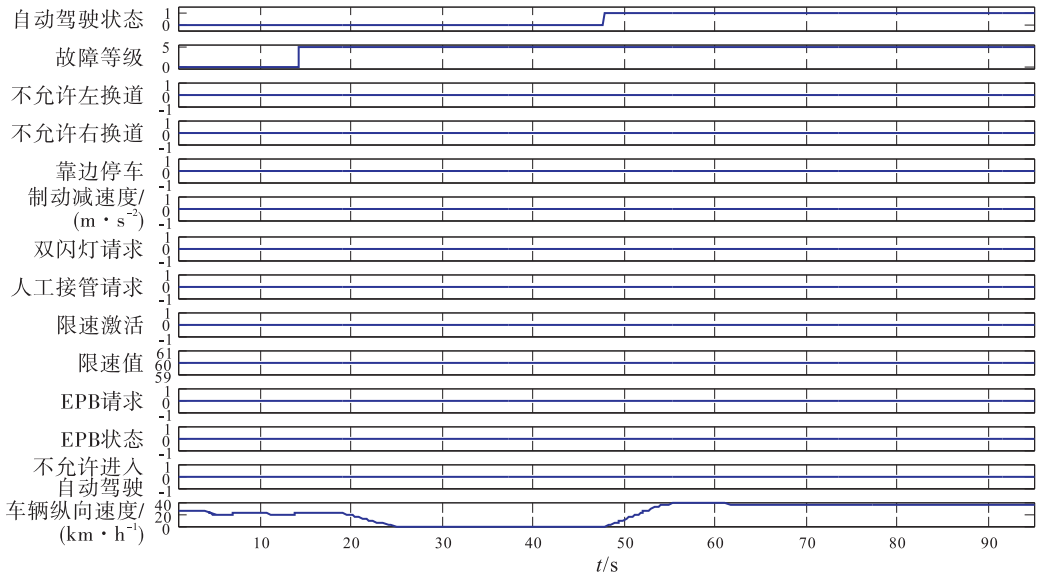


图7 自动驾驶车辆故障诊断系统5级故障处理结果

Fig. 7 Response result of fault diagnosis system of autonomous vehicle to level 5 fault

驾驶情况下车辆发生4级故障时,故障诊断系统下发双闪灯请求指令、限速激活指令和限速值。

由图7可以看出,车辆无论是否处于自动驾驶状态,在车辆发生5级故障时,故障诊断系统均只上报故障,不进行车辆控制。

### 4 结语

本文设计了一种应用于自动驾驶车辆的故

障诊断系统,按照故障对自动驾驶安全行驶影响的严重程度将所获得的故障信息划分为1—5级,并按照此等级下发不同的控制指令进行车辆控制,达到安全行车的目的.通过在12 m纯电动L3级自动驾驶BRT公交车上的应用结果可知,该自动驾驶车辆故障诊断系统可有效处理车辆故障导致的车辆失控、碰撞等安全问题,为自动驾驶车辆的安全运行提供保障.本文



研究可为自动驾驶车辆智能诊断系统的进一步研究提供借鉴,并可促进自动驾驶车辆的研发。

### 参考文献:

- [1] 崔胜民. 智能网联汽车新技术[M]. 北京:化学工业出版社,2017.
- [2] 郭烈,葛平淑,张明恒,等. 汽车安全辅助驾驶技术[M]. 北京:北京大学出版社,2014.
- [3] 李力,王飞跃. 智能汽车先进传感器与控制[M]. 北京:机械工业出版社,2018.
- [4] 何亮. 基于故障码的汽车故障诊断专家系统的研究[D]. 锦州:辽宁工业大学,2011.
- [5] 李小敏. 基于 Android 智能手机的汽车诊断系统的研究与实现[D]. 青海:中国海洋大学,2015.
- [6] 孟焱. 基于 Android 的车辆实时监测与故障救援系统移动应用的设计与实现[D]. 南京:南京大学,2015.
- [7] 刘昌鑫,叶桦,仰燕兰,等. 基于智能手机的车辆远程监测与诊断系统的设计[J]. 机械设计与制造工程,2017,46(11):128.
- [8] 安晓峰. 基于车联网的车载智能安全系统[J]. 客车技术与研究,2017,39(1):33.
- [9] KIM S, HUH K. Fault-tolerant braking control with integrated EMBs and regenerative in-wheel motors[J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(5):923.
- [10] 周洪亮,贾凤娇,刘志远,等. 四轮独立驱动汽车驱动系统故障诊断与容错控制[J]. 机械工程学报,2019,55(22):174.
- [11] 曾贵苓,王莘,马书香. 基于线控转向的汽车容错控制策略研究[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2019(4):49.
- [12] 谢承旺,肖池,丁立新,等. HMOFA:一种混合型多目标萤火虫算法[J]. 软件学报,2018,29(4):251.
- [13] 周海京,遇金. 故障模式、影响及危害分析与故障树分析[M]. 北京:航空工业出版社,2003.
- [14] CHAI C, ZENG X M, WU X B, et al. Safety evaluation of responsibility-sensitive safety (RSS) on autonomous car-following maneuvers based on surrogate safety measurements[C] // 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Piscataway: IEEE, 2019:175.