

基于 DDEV 自适应巡航行驶稳定性研究

张国苗,王艳华,王富富,孟永凯

(中北大学 能源与动力工程学院,山西 太原 030051)

摘要:为研究分布式驱动电动车(DDEV)自适应巡航行驶稳定性,基于 CarSim 和 Simulink 联合仿真搭建了 DDEV 自适应巡航控制算法模型和车辆稳定性控制策略模型。搭建车辆动力学模型得到附加横摆力矩;根据自适应巡航控制原理搭建自适应巡航控制算法模型,得到纵向行驶分布式驱动电机期望力矩,通过差动驱动方式对 DDEV 的期望力矩进行分配;基于 Simulink 和 CarSim 联合仿真,在柏油路面和对开直线路面上对稳定性控制策略进行模型在环验证。结果表明:所提出的控制策略可以有效地控制 DDEV 的横摆运动,提高了整车的行驶稳定性。

关键词:分布式驱动电动车;自适应巡航系统;车辆稳定性;差动驱动

中图分类号:U461 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0190-04

Research on Stability of Adaptive Cruise Based on DDEV

ZHANG Guomiao, WANG Yanhua, WANG Fufu, MENG Yongkai

(School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to study the adaptive cruise vehicle driving stability of distributed drive electric vehicle (DDEV), this paper builds the DDEV adaptive cruise algorithm model and vehicle stability control strategy model based on the joint simulation of CarSim and Simulink. The vehicle dynamics model is first built to obtain the additional transverse moment. Building the adaptive cruise control algorithm model according to the adaptive cruise control principle is followed to gain the longitudinal driving distributed drive motor desired torque. And the desired torque of the DDEV is distributed through the differential drive method. Based on the joint simulation of Simulink and CarSim, the stability control strategy is verified in the loop on the tarmac and the opposing straight road. The results show that the proposed control strategy can effectively control the cross-swing motion of the DDEV, thus improving the driving stability of the vehicle.

Keywords: DDEV; adaptive cruise system; vehicle stability; differential drives

0 引言

为了解决传统燃油车造成的环境污染、能源消耗、交通事故等社会问题,电动汽车技术的发展受到社会的广泛关注。分布式驱动电动车(DDEV)作为新兴的电动汽车具有独特的优势,拥有4个独立可控的轮毂电机,为保持车辆的横摆稳定增加了更多控制选择。但在高速转弯、变道及附着系数低的路面上转向行驶时,车辆会发生侧滑、急转、侧翻等失稳状况。为解决车辆稳定性问题,本文将分布式驱动与自适应巡航进行集成,重点研究DDEV在行驶过程中的稳定性。

国内外在DDEV稳定性控制和自适应巡航稳定性控制方面做了相关的研究。司明玉等^[1]设计一种经济自适应巡航控制器,用于降低道路车辆在跟随过程中的燃油消耗,提高行车安全。朱明^[2]采用分层控制结构设计横向稳定性控制器,验证了DDEV在极限工况下的行驶稳定性。沈子鉴^[3]提出毫米波雷达和视觉传感器目标级融合方案,结合分布式电动车ACC算法,有效改善了单一传感

器漏检和误检的情况。ZHU B等^[4]基于Matlab/Simulink搭建了基于二自由度汽车模型的主动转向与偏航稳定性控制系统集成控制算法,经验证降低了目标车辆的偏航和侧滑,提高了目标车辆的操纵性和稳定性。李然^[5]采用分层控制思想设计上、下层控制器,上层控制器以期望的横摆角速度和质心侧偏角为目标,采用模糊PID算法得到维持汽车稳定需要的横摆力矩,下层控制器根据需要的横摆力矩对单侧轮胎制动,增加乘用车极限工况下的稳定性,但只考虑了传统燃油汽车的情况。王进等^[6]针对DDEV在高速转弯和变道时失稳状况提出了横向稳定性模糊滑模控制策略,用平均分配原则实现附加横摆力矩的控制分配。

综上,前辈的研究是针对DDEV的稳定性或者自适应巡航控制的稳定性,但在分布式驱动与自适应巡航集成后车辆稳定性方面没有研究。本文结合行驶域开发的车辆稳定性控制,将分布式驱动与自适应巡航进行集成,对在不同附着系数路面上车辆失稳时4个车轮转矩如何分配

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275489);山西省自然科学研究面上项目(202103021224224)

第一作者简介:张国苗(1995—),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为智能汽车控制稳定性,1336620662@qq.com。

通信作者简介:王艳华(1978—),女,山西吕梁人,副教授,工学博士,发表学术论文20余篇,EI收录8篇,参编省部级规划教材1部,申请发明专利3项,研究方向为发动机缸内工作过程及缸内直喷发动机技术。

进行更深入研究。利用传感器探测周围车辆信息,计算车辆行驶时需要的期望转矩和减速度,并将转矩分配给 4 个电机。考虑到稳定性控制,采用差动驱动控制法设计了车轮转矩分配控制策略,保证车辆稳定行驶。由于当前没有足够条件进行实车验证,故采用模拟软件 CarSim 与 Simulink 联合进行仿真验证。

1 自适应巡航稳定性控制策略

1.1 二自由度车辆动力学模型建立

本文基于 CarSim 搭建车辆动力学模型,选用 C-class, hatchback 车作为主车车型; D-class, minivan 车为前车车型。将传统燃油车的动力传动改成四轮驱动;并把发动机、离合器、变速器、差速器设为外部模型;将原有的发动机的动力输入中断,改为通过 CarSim 接口导进的外部输入(CarSim 接口输入 4 个电机的驱动力矩),并将其所输出的转矩和制动压力加载到轮胎上。具体车辆动力学基本参数如表 1 所示。

表 1 车辆动力学基本参数表

参数名称	符号/单位	数值
整车质量	M/kg	1 412
质心到前轴距离	a/mm	1 015
质心到后轴距离	b/mm	1 895
滚动阻力系数	f	0.03
空气阻力系数	C_D	0.3
迎风面积	A/m^2	2.2
传动系数	η	0.95
变速器传动比	i_g	1
主减速器减速比	i_0	4.103
质心高度	H/mm	540
轮胎滚动半径	r/mm	325
汽车绕 z 轴转动惯量	$I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 536.7
前后轮距	L/mm	2 910

横摆角速度和质心侧滑角是最能反映车辆稳定性的两个参数^[7]。前者着重于对车辆稳定性的描述,反映车辆行驶过程中航向角变化的速度,决定了车辆的转向特性;后者着重于汽车轨迹保持问题的描述,反映汽车在转向过程中偏离预定轨迹的程度。

本模型的操控性和稳定性采用线性二自由度车辆模型来描述。忽略车辆的垂直运动和俯仰运动,只考虑车辆在车辆坐标系 z 轴方向横摆运动和沿 y 方向的横向运动,建立两个自由度的车辆模型,并假设车身为刚性,纵向速度相同,良好的附着条件,忽略空气阻力和摩擦阻力,轮胎在线性范围内。故线性二自由度汽车模型如图 1 所示。

线性二自由度汽车模型的状态方程为

$$\begin{cases} (k_1+k_2)\beta + \frac{ak_1+bk_2}{u} \cdot \omega_r - k_1\delta = m(\dot{v} + u\omega_r) \\ (ak_1-bk_2)\beta + \frac{a^2k_1+b^2k_2}{u} \cdot \omega_r - ak_1\delta = I_z \dot{\omega}_r \end{cases} \quad (1)$$

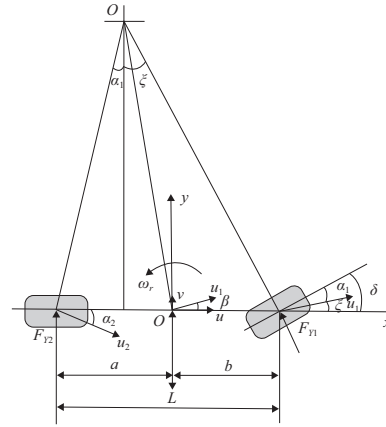


图 1 二自由度汽车模型

为了保证车辆在极限工况下的稳定行驶,且受路面附着系数的限制,得出理想的横摆角速度和理想的质心侧偏角为

$$\omega_d = \min \left[\left| \frac{u}{L(1+Ku^2)} \cdot \delta \right|, \left| \frac{\mu \cdot g}{u} \right| \right] \cdot \text{sgn}(\delta) \quad (2)$$

$$\beta_d = 0, K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_1} - \frac{b}{k_2} \right) \quad (3)$$

式中: ω_d 为理想横摆角速度; β_d 为理想质心侧偏角; k_1 、 k_2 为前、后轮侧偏刚度; u 为纵向车速; δ 为前轮转角; μ 为路面附着系数; K 为稳定性因素。

1.2 自适应巡航控制策略

自适应巡航控制算法主要包括环境感知模型与算法、速度与距离控制逻辑、驱动与制动控制策略三部分。

本文基于 CarSim 软件设置传感器感知信息,并通过雷达及其他传感器识别和跟踪周围目标,为 ACC 算法提供所需的有效目标状态信息,如本车与目标车车速、安全距离、两车相对速度、相对距离等。将获得的信息反馈给系统,系统根据反馈信息判断巡航模式是定速巡航模式还是跟随控制模式。当前方探测不到目标车辆或前方有车辆且安全距离小于探测到的距离时,系统进行定速巡航模式;否则进行跟随控制模式。定速巡航与跟随控制之间的切换逻辑为:当两车相对速度大于 0 且两车相对距离有增大趋势时,系统提前切换到定速巡航模式;当两车实际距离接近安全距离且两车相对速度小于 0 时,系统提前切换到跟随模式^[8]。

自适应巡航系统通过控制驱动和制动系统来实现车辆的纵向动态控制,根据车辆纵向动力学平衡方程得到期望驱动转矩 T_{iq} 。汽车在行驶时,驱动和制动切换过晚或过于频繁,不仅会影响汽车的经济性和稳定性,还会给驾驶员非常差的驾驶体验,故合理的驱动和刹车切换策略至关重要。驱动与制动控制切换策略为

$$\text{如果} \begin{cases} T_{iq} > 0, & \text{驱动控制} \\ T_{iq} \leq 0, & \text{制动控制} \end{cases} \quad \text{其他,怠速}$$

在制定驱动与制动控制切换策略时,为了保证汽车在任何情况下都不与前车相撞,需使制动控制优先。

1.3 驱动转矩分配策略设计

差动驱动控制是指将不同的驱动力加载到车辆的4个车轮上,以产生额外的横摆转矩,从而保持车辆的稳定性。差动驱动是在极限条件下调节车辆横摆运动最有效的方法^[9]。

在不同的行驶工况下,不同车轮通过差动驱动产生的横摆转矩对车辆的影响是不同的。图2中各个车轮施加驱动力时产生附加横摆转矩。对于外前轮和内后轮,施加驱动力附加横摆转矩虽然方向没有变化,但是数值变化较大,对车辆附加横摆转矩影响很大,控制效果理想。故本文选用差动驱动单个车轮控制模型里采用外前轮和内后轮驱动。

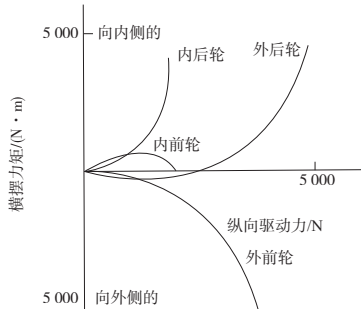


图2 各个车轮施加驱动力时产生的横摆力矩

从仿真软件 CarSim 的输入端口得到主车实际横摆角速度,将理想横摆角速度与实际横摆角速度的偏差值输入 PID 控制中,通过调参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,得到附加横摆转矩 M_z 。

车辆正常行驶时,各个车轮受力分析图及电机给予车轮的转矩图分别如图3、图4所示。 F_{ii} 为地面对车轮的力, B 为左右车轮之间的宽度, R 为轮胎半径。由于道路发生变化,车辆失稳,产生一个横摆转矩 M 。为了避免车辆发生偏移,地面对车轮施加一个作用力。假设车辆往右偏,给右侧前轮施加一个力为 F_{RF} ,其他轮受力不变,产生的转矩为 M_z ,来消除车辆失稳产生的横摆转矩 M 。(规定横摆转矩逆时针为正)。

$$M_z = -M = (-F_{RF}) / (B/2) \quad (4)$$

由式(4)得

$$F_{RF} = -M_z / (B/2) \quad (5)$$

电机给予车轮的转矩即 CarSim 输入接口处的轴端转矩 T_r 。

$$T_r = F_{RF} \cdot R \quad (6)$$

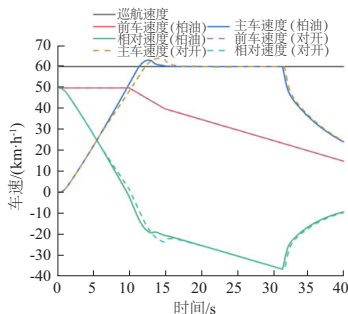


图6 速度变化情况

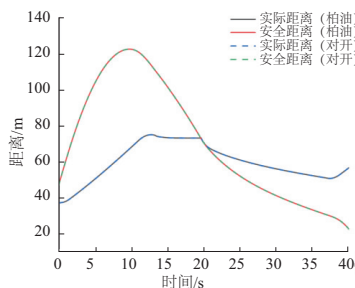


图7 距离变化情况

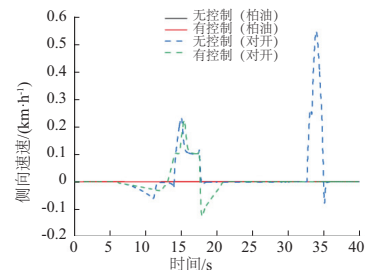


图8 侧向速度变化情况

图6为在不同路面上车辆整个行驶过程中速度变化图。由图可知,在柏油路与对开路面上行驶速度变化情况

相似,主车在柏油路面上行驶比在对开路面上行驶先达到巡航速度,由于PID控制中调参原因,主车速度曲线在

将式(5)代入式(6)得

$$T_r = F_{RF} \cdot R = [-M_z / (B/2)] \cdot R \quad (7)$$

当 $M_z > 0$ 时, $T_r < 0$,右前轮驱动转矩 $T_{r,F} = T_r$;当 $M_z < 0$ 时, $T_r > 0$,左后轮驱动转矩 $T_{r,R} = T_r$ 。模型图为图5所示。通过自适应巡航算法建模得到车辆期望的横摆转矩 T_d ,将其分给4个电机。当汽车直线行驶时,按1/4转矩分配,即每个车轮的转矩 = $1/4 T_d$;当汽车发生偏移失稳时,按1/4转矩+附加横摆转矩分配,即每个车轮的转矩 = $1/4 T_d + M_z$ 。

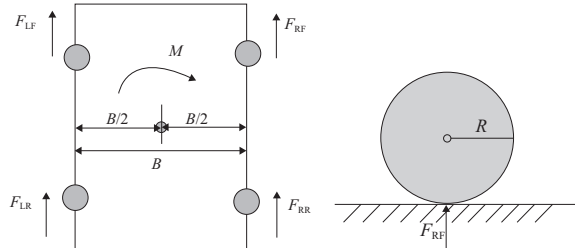


图3 各个车轮受力图 图4 右轮的轴端力矩图

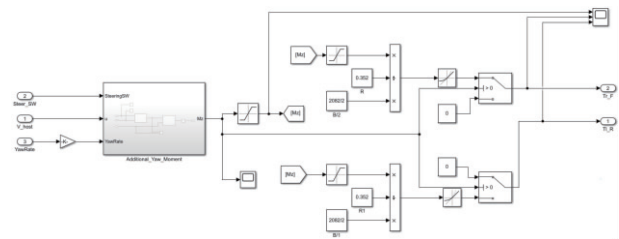


图5 力矩分配模型

2 仿真分析

为了抑制由于道路原因使车辆转向不足或转向过度情况的出现,本节通过分布式驱动方式来精准控制。主要针对车辆在柏油路面和对开路面上直线行驶稳定性仿真分析,规定无方向盘转角,对开路面左车道为冰路面、右车道为柏油路面,两侧路面附着系数不同,分别为0.2和0.7。设定仿真时长为40s,仿真步长为0.001s。给定巡航速度为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、前车开始以 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 匀速行驶后减速行驶。在此条件下,基于 CarSim 和 Simulink 联仿,分析车辆在两种不同路面上行驶不同附着系数对所开发的自适应巡航稳定性控制策略的影响。仿真结果如图6—图10所示(本刊黑白印刷,有疑问之处可向作者咨询)。

14.2~16.1 s之间出现轻微波动。9.8 s 时前车由匀速变为减速行驶,主车与前车的距离逐渐变小,当满足安全距离切换条件时,主车在 31.7 s 由速度跟随切换为距离跟随模

式。为了使车辆在安全距离内行驶,主车跟随前车减速,两车相对速度的绝对值逐渐变小。

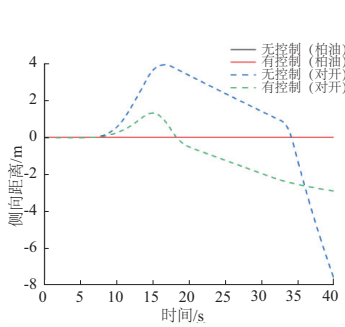


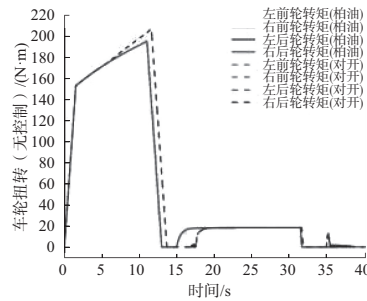
图9 侧向距离变化情况

图7为在不同路面上车辆整个行驶过程中两车距离变化图。由图可知,在柏油路面与对开路面上行驶时距离变化情况相似。开始前车距离主车 50 m,且前车速度大于主车速度,为速度控制。随着主车加速,到 19.6 s 时传感器探测到的两车之间距离达到安全距离,主车由速度控制切换为距离控制。31.7 s 时主车跟随前车减速,两车之间的距离、安全距离越来越小。

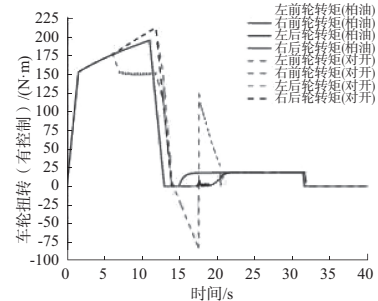
图8为在不同路面上有、无差动算法控制侧向速度变化图。由图可知,黑线和红线实线是车辆在正常路面上行驶的曲线,侧向速度有无差动算法控制都为0。蓝色和绿色点划线是车辆在对开路面上行驶的曲线,无差动算法控制时,由于左右车道路面附着系数不同,在 5.8 s 时车辆将开始左偏,行驶在冰路面,16 s 时车辆偏离至最远,侧向速度出现突变达到 $0.23 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 18.6 s 时车辆开始右偏,32.6 s 时开始制动车辆抱死,侧向速度有突变。加上差动算法控制,对车辆的左右车轮受力进行平衡,相对于没加差动算法的控制曲线变化平缓,在 32.6~35.6 s 之间主车制动,侧向速度保持为0,表明差动算法控制响应良好。

图9为在不同路面上有、无差动算法控制侧向距离变化图。由图可知,黑线和红线是车辆在正常路面上行驶的曲线,侧向距离有无差动算法控制都为0。蓝色和绿色点划线是车辆在对开路面上行驶的曲线,无差动算法控制时,由于左右车道路面附着系数不同,在 7.3 s 时车辆轨迹发生变化,侧向距离增大,16 s 时车辆偏离至最远为 3.9 m,此时侧向速度降低,车辆开始右偏,32.6 s 时由于主车制动,侧向距离逐渐减小。加上差动算法控制,对车辆的左右车轮受力进行平衡,相对于没加差动算法的控制曲线变化平缓,16 s 时车辆偏离至最远为 1.3 m,而后曲线越来越平缓,表明差动算法控制响应良好。

图10为在不同路面上有、无差动算法控制下4轮转矩变化图。由图10(a)可知,在未加差动算法的情况下,由于驱动转矩均匀分布到4个车轮,4轮转矩一样大,等于总转矩的1/4,左右路面附着系数不同,故车辆发生偏移。11.5 s 时车辆完全进入左侧车道,4个车轮转矩达到最大为 $207.1 \text{ N} \cdot \text{m}$,此时车辆横摆角速度减小,4轮转矩降为0。18.6~31.7 s 之间,车辆开始右偏且在冰路面上行



(a) 无差动算法控制时4轮转矩变化情况



(b) 有差动算法控制时4轮转矩变化情况

图10 4轮转矩变化情况

驶,车辆打滑,4轮转矩为 $18.3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。32.6~35.6 s 之间开始制动车辆抱死,转矩发生轻微波动。由图10(b)可知,在加差动算法控制的情况下,由于左右路面附着系数不同,5.8 s 时车辆发生偏移,左侧车轮转矩增大右侧车轮转矩减小,要使车辆稳定行驶需减小左侧车轮转矩或增大右侧车轮转矩。左车道路面附着系数低,减小左后车轮转矩会使车辆打滑,故 18.6 s 时增大右前轮转矩使得车辆趋于稳定行驶。

总体来看,通过分布式驱动方式,即使用差动算法控制可使车辆在对开路面上稳定行驶。

3 结语

本研究结合行驶域开发的稳定性控制,将分布式驱动与自适应巡航集成在一起,使用一个控制器来控制整车,简化整体架构。

1) 在 CarSim 中对整车建模并设置仿真工况,选取分布式驱动电动汽车为研究目标车型,将传统的燃油车的动力传动系统进行修改使其变成电动汽车,且对 ACC 系统组成结构进行了了解。

2) 对比分析了车辆在柏油路面和对开路面上直线行驶时有无差动算法控制对车辆行驶稳定性的影响。当车辆在对开路面上行驶时,在未加差动算法的情况下,由于驱动转矩均匀分布到4个车轮,4轮转矩一样大,但左右路面附着系数不同,故车辆发生偏移。当车辆左偏时,左侧车轮受力小,右侧车轮受力大,要使车辆稳定行驶需增大左侧车轮受力或减小右侧车轮受力。由于左车道路面附着系数低,增大左侧车轮受力会使车辆打滑,故要减小附着系数高的右车道的车轮受力,减小右前轮受力使得车辆趋于稳定行驶。结果表明,加差动算法控制更有助于提高车辆的稳定性。

3) 完成了自适应巡航控制策略和稳定性控制策略的开发,验证了所开发策略具有良好的自适应性和实时响应性。但一些客观原因以及个人能力有限,研究还未进行实车测试验证,后续工作需要对此部分进行完善。

参考文献:

[1] 司明玉,周金应,褚观耀,等. 基于在线学习的车辆经济自适应巡航控制[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6):211-215.

(下转第 221 页)

4 仿真结果

图9所示为系统整体仿真,整个系统由52单片机、复位电路、振荡电路、LCD1602显示屏、L298电机驱动模块、电机、数据采集电路、蜂鸣器组成。由于Proteus中没有MQ-2烟雾传感器和MQ-5气体传感器,使用滑动变阻器来模拟烟雾传感器和气体传感器并进行数据采集,TLC549将采集的模拟量转换成单片机能识别的数字量;单片机对数据进行处理并将温度、气体浓度、烟雾浓度、电机速度等数据信息显示在LCD1602显示屏上。

LCD1602显示屏调试,首先根据电路图将显示模块连接好,然后用万用表检查电路是否会出现短路现象。当传感器检测电路检测到电压信号变化时,由A/D将信号处理后送给单片机,单片机把数字信号通过P2口传送到LCD1602显示出来,仿真中各功能模块均能正常工作,电机转速能平滑调节。

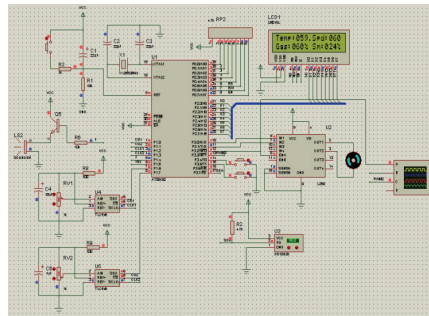


图9 整体仿真图

5 实物分析

在实验调试过程中分别模拟无报警状态时、气体泄漏时和出现火情时电机的转速情况如图10、图11、图12所示。实验结果表明当模拟厨房温度或气体浓度达到预设值时电机就会自动开启,随着气体浓度和温度升高,电机转速会越来越快。

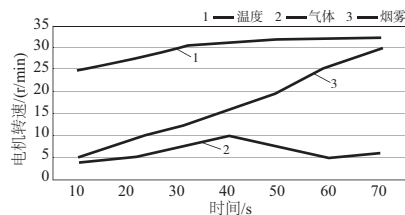


图10 无报警状态

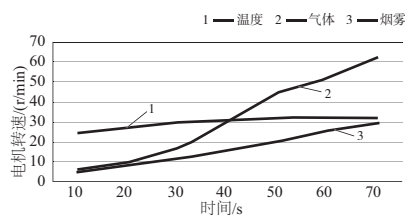


图11 气体泄漏状态

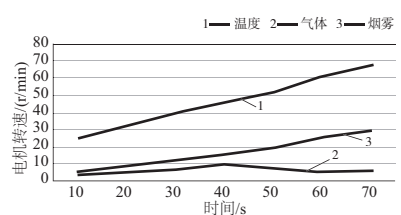


图12 出现火情状态

6 结语

本文设计了一种基于STC89C52单片机的智能油烟机无级变速系统,通过3个传感器检测厨房环境内的不同信息,然后将收集到的信息传递给中央控制器进行分析处理,从而实现油烟机的自动调控功能,同时还配备有报警模块,在发生煤气泄漏或者火灾时能够提前预警,更好地保障人身安全。通过仿真结果与实物分析,其各个模块均能正常工作,电机转速能够平滑调节。通过本文设计,提高了系统设计可靠性与准确性,优化了控制过程,提高了系统控制效率,不仅节省了成本与时间,而且提高了油烟机工作时的安全性,让用户体验更加舒适安全,符合如今厨电智能化发展的趋势。

参考文献:

- [1] 穆国振,孟广耀,李正,等.带除油装置的全自动吸油烟机[J].机电工程技术,2017,46(9):92-94.
- [2] 李秋萍.家用智能高效洁净吸油烟机的外形设计与研究[D].南京:东南大学,2018.
- [3] 凌硕.基于Android的智能抽油烟机控制APP的设计与实现[D].北京:北京交通大学,2017.
- [4] 商若云.大数据时代下智能厨电产品的发展前景[J].现代商业,2016(17):14-15.
- [5] 陈莉.西门子家电发布新款智能吸油烟机[J].电器,2019(4):33.
- [6] 司开波.自动抽油烟机控制系统设计[J].电脑知识与技术,2015,11(2):246-247.
- [7] 孙圣,卢慧芬,王群.吸油烟机燃气灶高效智能联动控制装置的设计[J].电气自动化,2013,35(6):71-73,76.
- [8] 官阔荣,谭朝辉.探讨吸油烟机的智能排烟及自动风速调节技术[J].家电科技,2016(10):78-81.

收稿日期:2022-01-20

(上接第193页)

- [2] 朱明.分布式驱动电动汽车横摆稳定性控制方法研究[D].西安:长安大学,2019.
- [3] 沈子鉴.基于视觉和雷达的分布式驱动电动车ACC研究[C].锦州:辽宁工业大学,2020.
- [4] ZHU B, CHEN Y Z, ZHAO J. Integrated chassis control of active front steering and yaw stability control based on improved inverse nyquist array method[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014:919847.
- [5] 李然然.基于模糊PID的车辆横向稳定系统研究[J].汽车实用技术,2019(3):107-109.
- [6] 王进,郭景华.分布式电动车辆横向稳定性模糊滑模控制[J].厦门大学学报(自然科学版),2018,57(2):279-284.

- [7] LI Z H, WANG P, LIU H H, et al. Coordinated longitudinal and lateral vehicle stability control based on the combined-slip tire model in the MPC framework[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 161:107947.
- [8] 成旺龙.轮毂电机驱动电动汽车自适应巡航控制算法的研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [9] HAJILOO R, ABROSHAN M, KHAJEPOUR A, et al. Integrated steering and differential braking for emergency collision avoidance in autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(5):3167-3178.

收稿日期:2022-03-31