

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.024

# 基于路面识别的电动汽车驱动 防滑控制策略研究\*

段 敏<sup>1</sup>, 郭文涛<sup>1</sup>, 李 刚<sup>1</sup>, 于 倩<sup>2</sup>

- (1. 辽宁工业大学 汽车与交通工程学院, 辽宁 锦州 121001;  
2. 大连装备制造职业技术学院 汽车工程系, 辽宁 大连 116110)

**摘要:**针对电动汽车在低附着路面行驶时驱动轮滑转问题,对后轮独立驱动电动汽车进行了驱动防滑控制研究,提出了基于模糊路面识别的自适应模糊 PID 控制方法,提高汽车在极限工况下车辆的稳定性。首先根据轮毂电机转矩、转速易于测得的优势,设计了基于 Burckhardt  $\mu$ -S 模型的模糊路面识别算法。根据车辆运动状态,路面识别算法对当前路面和最优滑转率进行辨识。然后采用自适应模糊 PID 控制器将驱动轮滑转率实时控制在最优滑转率附近。最后选择典型工况,基于 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验对控制方法进行了验证。仿真结果表明,该模糊路面识别算法能够较好识别路面附着系数和其最优滑转率;基于路面识别的驱动防滑控制具有良好的控制效果,提高了极限工况下车辆的稳定性与动力性。

**关键词:**电动汽车;驱动防滑控制;路面识别;最优滑转率

中图分类号:TP2;U461

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1257-06

## Study on acceleration slip regulation control of electric vehicle based on road identification

DUAN Min<sup>1</sup>, GUO Wen-tao<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, YU Qian<sup>2</sup>

- (1. Automobile & Transportation Engineering College, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;  
2. Dalian Equipment Technical College, Dalian 116110, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the slip on driving wheel for EV ( Electric Vehicle ) under the condition of low adhesion road, The acceleration slip regulation ( ASR ) technology was researched for the rear-wheel independent drive ( RWID ) EV. A adaptive fuzzy-PID control method based on fuzzy road identification was proposed to improve vehicle stability under ultimate driving condition. Firstly, according to the advantages that the rotational speed and torque of the driving wheels were measured easily, the fuzzy road identification was designed based on the Burckhardt  $\mu$ -S model. According to the vehicle state, road adhesion and optimal slip ratio can be confirmed by the arithmetic of fuzzy road identification. Then, controlled by the adaptive fuzzy-PID controller, the drive wheels will working in the vicinity of the optimal slip ratio. At the last, the ASR control method was verified based on the CarSim and Matlab/Simulink co-simulation in typical working condition. The results indicate that the fuzzy road identification can identified the road adhesion coefficient and the optimal slip ratio accurately, and the ASR control method based on the fuzzy road identification has a good control effect, which improves vehicle stability and power under extreme condition obviously.

**Key words:** EV ( electric vehicle ); acceleration slip regulation control; road identification; the optimal slip ratio

## 0 引 言

汽车驱动防滑控制的主要目的是使车辆能在各种路况下驱动行驶时不出现驱动轮过度滑转的现象<sup>[1-2]</sup>,

其原理是在驱动轮打滑时将滑转率控制在最优滑转率附近<sup>[3-5]</sup>,从而充分利用地面附着,提高车辆行驶的稳定性。两轮独立驱动电动车由于每个驱动轮驱动力矩独立可控,转矩、转速易于测得,在驱动防滑控制方面

收稿日期:2015-04-07

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(E51305190);辽宁省教育厅科学技术研究资助项目(L2012217)

作者简介:段 敏(1963-),女,辽宁锦州人,教授,硕士生导师,主要从事电动汽车关键技术方面的研究. E-mail:68113940@qq.com.

相对于传统汽车具有明显的控制优势。识别当前路面附着系数及其最优滑转率是实现驱动防滑控制的良好前提,关于路面识别方法,国内外已展开了相应的研究,目前主要分为 Cause-based 和 Effect-based 两种识别方法<sup>[6]</sup>。Cause-based 法的主要依据经大量实验分析基础获得的经验模型,通过测量主要的路面物理因素变化来识别路面<sup>[7]</sup>。文献[8]通过激光束辨识路面,采用 200 W 的激光束照射路面,对冰雪路面、湿路面及干路面的识别正确率高达 98%。Cause-based 法的优点是识别精确度高、适应性强、外界影响小,但需要加装昂贵的硬件设备,限制了量产。Effect-based 法主要是通过分析路面变化对车体运动的影响来识别路面。例如文献[9-10]利用纵向运动中驱动或制动的路面利用情况进行识别。文献[11]利用侧向运动中动力参数变化进行识别。Effect-based 法的优点是不需要额外传感器,并且大多数识别的精确度在合理的范围内,因此受到多数科研人员的青睐。鉴于此,本研究将采用 Effect-based 法进行路面附着系数估计。

本研究首先确定两轮独立驱动电动汽车驱动防滑控制策略,然后根据两轮独立驱动电动汽车的特点设

计基于 Burckhardt  $\mu$ -S 模型的模糊路面识别算法,以 5 条典型路面的  $\mu$ -S 曲线为识别基础,将当前路面与典型路面进行比较,并得出相似权重。利用模糊逻辑推理,估计路面的最优滑转率和路面附着系数。每个驱动轮采用自适应模糊 PID 控制器进行驱动防滑控制,最后基于 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验对驱动防滑控制方法进行验证。

## 1 驱动防滑控制策略

两轮独立驱动纯电动汽车驱动防滑的控制策略如图 1 所示。驾驶员踩踏油门踏板给出目标转矩,控制电动汽车起步或加速。车辆加速度传感器、轮速传感器等将信号分别输送给滑移率计算模块和附着系数计算模块进行计算。路面识别模块针对输入的实际滑转率和实际利用附着系数进行路面识别,识别出当前路面并计算出最优滑转率和路面峰值附着系数。笔者采用自适应模糊 PID 控制器,根据输入的实际滑转率和最优滑转率的差值对驱动力矩进行控制,将驱动轮滑转率控制在最优滑转率附近。

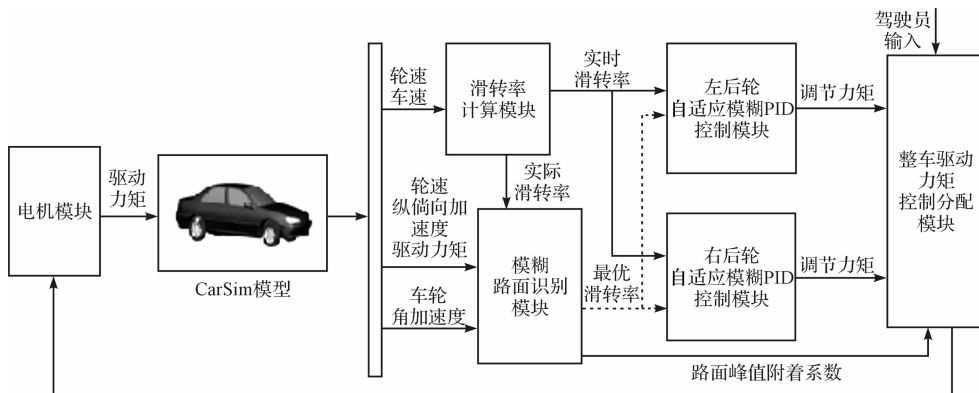


图 1 基于路面识别的驱动防滑控制策略

## 2 路面识别算法

### 2.1 路面识别原理

路况不同,其最优滑转率也各异,驱动防滑系统就是基于最优滑转率进行实时最优控制的,因而必须实时对路面进行识别。汽车运行时,根据来自于车辆各个传感器测得的纵向加速度、侧向加速度、车轮转速、角加速度、电机转矩等信息实时估算出该路面的滑移率及实际利用附着系数。然后笔者将该滑转率及实际利用附着系数输入含有 5 条标准路面的路面数据库进行比较,得到相应的权重系数,最后根据典型路面的相关信息计算出当前路面的峰值附着系数和最优滑转率。

### 2.2 算法设计

#### 2.2.1 驱动轮滑转率的计算

车速  $v$  由非驱动的前轮速度的均值获得,其两后驱动轮的滑转率为:

$$v = \frac{\omega_1 R + \omega_2 R}{2} \tag{1}$$

$$S_i = \frac{\omega_i R - v}{\omega_i R} \tag{2}$$

式中: $v$ —车辆质心处纵向车速; $\omega_1, \omega_2$ —车辆非驱动的两前轮角速度; $R$ —车轮滚动半径; $S_i$ —驱动轮的滑转率; $\omega_i$ —两驱动轮角速度,其中: $i$ —(3,4)代表两后轮。

其整车动力学模型如图 2 所示。

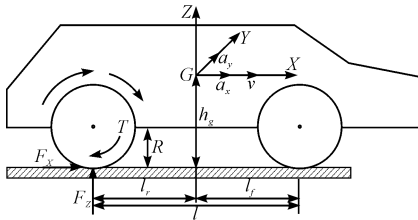


图2 整车动力学模型

2.2.2 垂向力计算

考虑到车辆有纵向和侧向加速度对垂向力的影响,利用式(3)即可计算两后轮的垂向力:

$$F_{z,i} = \left( \frac{1}{2}mg \pm ma_y \right) \frac{h_g}{d_r} + \frac{1}{2}ma_x \frac{h_g}{l} \quad (3)$$

式中: $F_{z,i}$ —两驱动轮的垂向力; $d_r$ —后轮轮距; $a_x$ —车辆质心处纵向加速度; $a_y$ —车辆质心处横向加速度; $m$ —整车质量; $l_f$ —汽车质心至前轴的距离; $h_g$ —质心高度; $l$ —前、后轴距。

2.2.3 纵向力计算

车辆在加速时的轮胎与路面间的纵向力即驱动力,可求得:

$$J\alpha_i = T_i - F_{x,i} \quad (4)$$

式中: $J$ —两驱动轮的转动惯量; $\alpha_i$ —两驱动轮的角加速度; $T_i$ —两驱动轮的驱动力矩; $F_{x,i}$ —两驱动轮的纵向力,也即驱动力。

2.2.4 附着系数计算

两后轮利用附着系数:

$$\mu_i = \frac{F_{x,i}}{F_{z,i}} \quad (5)$$

上式中,由于车身加速度、车轮角加速度及轮毂电机转速、转矩易于获得,便于估算驱动轮的纵向力及垂向力。

2.2.5 轮胎模型

为了准确地描述出不同路面的轮胎滑移率  $S$  和轮胎与路面间的利用附着系数  $\mu$  之间的函数关系,本研究在经过大量比较计算后选用由 Burckhardt 等提出的  $\mu$ - $S$  函数曲线<sup>[12]</sup>,其表达式如下:

$$\mu(S) = C_1(1 - e^{-C_2S}) - C_3S \quad (6)$$

式中: $C_1, C_2, C_3$ —拟合系数,不同路面的拟合系数如表1所示。通过式(7,8)可求得  $S_{opt}$  和最大路面利用附着系数  $\mu_{max}$ :

$$S_{opt} = \frac{1}{C_2} \ln \frac{C_1 C_2}{C_3} \quad (7)$$

$$\mu_{max} = C_1 \frac{C_3}{C_2} \left( 1 + \ln \frac{C_1 C_2}{C_3} \right) \quad (8)$$

本研究选取了具有代表性的干沥青、湿沥青、湿鹅卵石、冰、雪5条标准路面,其路面参数如表1所示<sup>[13]</sup>, $\mu$ - $S$ 曲线如图3所示。

表1 路面峰值附着系数和最优滑移率

路面	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$S_{opt}$	$\mu_{max}$
干沥青	1.28	23.99	0.52	0.17	1.17
湿沥青	0.86	33.82	0.35	0.13	0.80
湿鹅卵石	0.40	33.71	0.12	0.14	0.34
积雪	0.19	94.13	0.06	0.06	0.19
冰	0.05	306.4	0.001	0.03	0.05

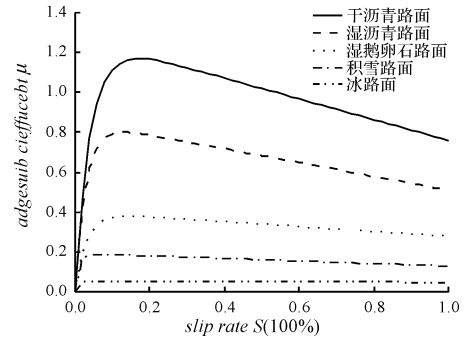


图3 标准路面  $\mu$ - $S$  曲线

3 模糊路面识别器设计

路面识别采用的 T-S 模糊控制器是由日本学者 Takagi 与 Sugeno 于 1985 年共同提出的。T-S 型模糊控制器的输入为路面实际利用附着系数和实时滑转率,经过模糊化和逻辑推理后输出与路面数据库各典型路面的相似程度,以此计算出当前路面的最优滑转率和峰值附着系数。

(1)模糊化

当滑转率小于 0.15 时,附着系数的变化幅度较大,为能够较好地地区分该变化,本研究选定了 3 个涵盖模糊论域的子集来实现对滑转率的模糊化,将滑转率模糊化为大滑转率、中滑转率和小滑转率,选三角函数为其隶属度函数,纵向利用附着系数隶属度函数如图 4 所示。纵向利用附着系数的模糊化也分了 3 种情况:大滑转率、中滑转率、小滑转率。当车辆滑转率较小(小于 3%)时,无法准确地估算出当前的路面附着系数;因为小滑转率时,5 条标准路面的  $\mu$ - $S$  曲线区分不明显,单凭输入的车轮滑转率和纵向利用附着系数无法明显准确地区分出  $(\mu, S)$  点与 5 条曲线的相似程度。因此此处将纵向利用附着系数曲线模糊化为直线,默认当前路面为干水泥的良好路面,从而不进行路面识别。当驱动力控制模块增加驱动力使驱动轮加速滑转,路面识别模块随即会准确地识别出当前路面的最优滑转率和峰值附着系数,驱动力矩控制系统能迅速将车轮滑转率控制在最优滑转率附近。

(2)模糊逻辑推理

本研究将输入的清晰量进行了模糊化,输出为当

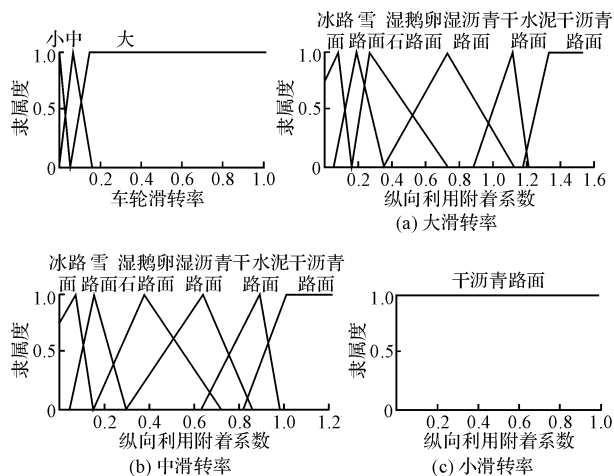


图 4 纵向利用附着系数隶属度函数

前路面与 5 种标准路面的相似程度,并制定了 11 条模糊逻辑规则如表 2 所示。

表 2 模糊逻辑规则

规则	输入		输出				
	<i>S</i>	<i>u</i>	冰	雪	湿鹅卵石	湿沥青	干沥青
1	小	干沥青	TD	TD	TD	TD	ES
2	中	冰	ES	D	TD	TD	TD
3	中	雪	GD	ES	D	TD	TD
4	中	湿鹅卵石	D	S	ES	D	TD
5	中	湿沥青	TD	TD	D	ES	GS
6	中	干沥青	TD	TD	D	GS	ES
7	大	冰	ES	D	TD	TD	TD
8	大	雪	GS	ES	D	TD	TD
9	大	湿鹅卵石	D	S	ES	D	TD
10	大	湿沥青	TD	TD	D	ES	GS
11	大	干沥青	TD	TD	D	GS	ES

注:TD—完全不相似;D—不相似;GS—一般相似;S—相似;ES—非常相似

(3) 输出

相较于 Mamdani 型模糊控制器,T-S 型不需要“清晰化”模块,只需要对 TD、D、GS、S、ES 5 个模糊子集用一个数代替即可。本研究经过多次仿真验证后确定 5 个值分别为 0、0.3、0.5、0.8、1。而计算系统的输出时,采用加权平均法(wtaver)。

笔者再根据最优滑转率加权平均式(9)峰值附着系数加权平均式(10)计算出该滑转率下路面的最优滑移率  $S_{opt}$  以及峰值附着系数  $\mu_{max}$ :

$$S_{opt} = \frac{x_2 S_{opt1} + x_3 S_{opt2} + x_4 S_{opt3} + x_5 S_{opt4} + x_6 S_{opt5}}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5} \quad (9)$$

$$\mu_{max} = \frac{x_1 \mu_{max1} + x_2 \mu_{max2} + x_3 \mu_{max3} + x_4 \mu_{max4} + x_5 \mu_{max5}}{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5} \quad (10)$$

式中:  $(\mu_{maxi}, S_{opti})$ —路面数据库 5 条标准路面的最佳滑移率点信息,其中:  $x_i$ —标准路面与当前路面的相似

程度;  $(\mu_{max}, S_{opt})$ —路面识别器识别出的当前路面的峰值附着系数  $\mu_{max}$  和最优滑转率  $S_{opt}$ 。

### 4 自适应模糊 PID 控制器设计

电动汽车 ASR 控制方法有很多,其中比较成熟的有 PID 控制和模糊控制。PID 控制结构简单,参数调整相对来说较容易,精度较高,易于接受。但是其系统参数均为固定值,对于非线性、大时滞性对象效果较差。模糊控制不基于准确的数学模型,仅仅模拟人的思维和方法,所以外界参数的变化对其控制效果影响比较小,稳定性强,能够很好地适应非线性和具有时滞性的控制系统。模糊控制能较好地适用车辆状况和路况的变化等干扰条件,但是单纯的模糊控制往往具有稳态误差。因此本研究设计了自适应模糊 PID 控制器,以使车辆能更好地适用各种复杂的路况条件。

自适应模糊 PID 控制器以实际滑转率和最优滑转率的差值  $e$  及差值的变化率  $ec$  作为控制器输入,根据差值  $e$  和  $ec$  的大小实时的调整 PID 的控制参数。控制器通常由两部分组成:PID 控制和能进行调节参数的模糊控制。其原理如图 5 所示。

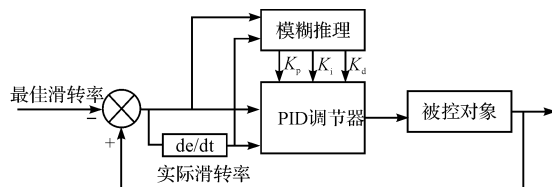


图 5 自适应模糊 PID 控制原理图

本研究经过多次仿真验证基础上确定了输入量  $e$  和  $ec$  均分为 7 个等级并且隶属度为三角形函数,输出量  $K_p, K_i, K_d$  均分为 4 个等级且其隶属度函数也为三角形函数。其等级分别表示为 {负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)}, {零(Z)、小(S)、中(M)、大(B)}。

根据隶属度函数制定模糊规则如表 3 所示。

表 3 模糊控制器的模糊推理规则

$K_p/K_i/K_d$	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	BZZ	BZS	BZM	BZB	BZB	BZS	BZZ
NM	BSM	MSM	MZB	SZB	SZB	ZSM	ZSM
NS	MMZ	MBS	SMS	ZBS	SBS	SMS	SZS
ZO	MBZ	SBZ	ZBS	ZBZ	ZBS	SBZ	MBZ
PS	SMZ	SBS	SMS	ZBS	SBS	MMS	MMZ
PM	SSM	ZSM	SZB	SZB	MZB	MSM	BSM
PB	BZZ	BZS	BZB	BSM	BZS	BZS	BZZ
NB	BZZ	BZS	BZM	BZB	BZB	BZS	BZZ

## 5 仿真试验

本研究应用 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验对控制方法进行验证。电动汽车模型参数如表 4 所示。

表 4 车辆模型参数

名称	符号	数值	单位
车辆质量	$m$	1 111	kg
重心至前轴距离	$l_f$	1.250	m
轴距	$l$	2.600	m
车轮滚动半径	$R$	0.304	m
重心高度	$h_g$	0.540	m
车轮转动惯量	$J$	0.700	kg · m

(1) 对接路面仿真验证。车辆以初始车速 15 km/h 驶入附着系数为 0.4 的路面, 驾驶员踩动踏板使轮毂电机转矩从 0 迅速增加到 500 N · m, 20 m 后驶入附着系数为 0.2 的路面, 60 m 后驶入附着系数为 0.6 的路面。为对比控制效果, 笔者给出无路面识别控制、PID 控制和模糊控制结果作为对比。

(2) 仿真结果与分析。仿真结果如图 6(a~h) 所示。模糊路面识别器识别的路面附着系数如图 6(a) 所示。起始时滑转率为零, 驱动力分配模块增加驱动力使车轮滑转, 从而使识别模块迅速准确估计出路面的峰值附着系数。当车辆驶入附着系数为 0.6 的路面后, 滑转率降低(小于 3%), 当驱动力增大到最大也不能使车轮加大滑转时, 识别模块对路面附着系数进行了默认估计。路面识别模块对路面最优滑转率进行的识别, 总体上对不同的路面的最优滑转率进行了较好的区分, 路面识别的最优滑转率如图 6(b) 所示。在无路面识别的驱动防滑控制下车速在 10 s 末达到 80 km/h 的仿真结果如图 6(c) 所示, 在有路面识别的控制下达到 87 km/h 的仿真结果如图 6(d) 所示。在 PID 控制下的驱动轮实际滑转率如图 6(e) 所示, 虽然精度较高, 但相比模糊控制超调量较大。模糊控制下滑转率如图 6(f) 所示, 模糊控制具有较高的鲁棒性, 但其控制的实际滑转率与最优滑转率具有稳态误差, 精度稍差。自适应模糊 PID 控制下的滑转率如图 6(g) 所示, 结果表明自适应模糊 PID 控制能使滑转率基本维持在最优滑转率附近, 误差小, 超调量小。驱动力矩变化图如图 6(h) 所示, 由图所示, 不管起步还是路面变化, 电机振荡较小, 因此对电机损坏小, 提高了轮毂电机使用寿命。由图 6(a~h) 表明, 路面识别器能够比较准确地识别出中低附着路面并给出最优滑转率; 自适应模糊 PID 控制兼有模糊控制和 PID 控制优点, 控制效果较好。基于路面识别的驱动防滑控制能明显改

善动力性并且低附着时滑转率更小, 从而提高车辆的横向稳定性。

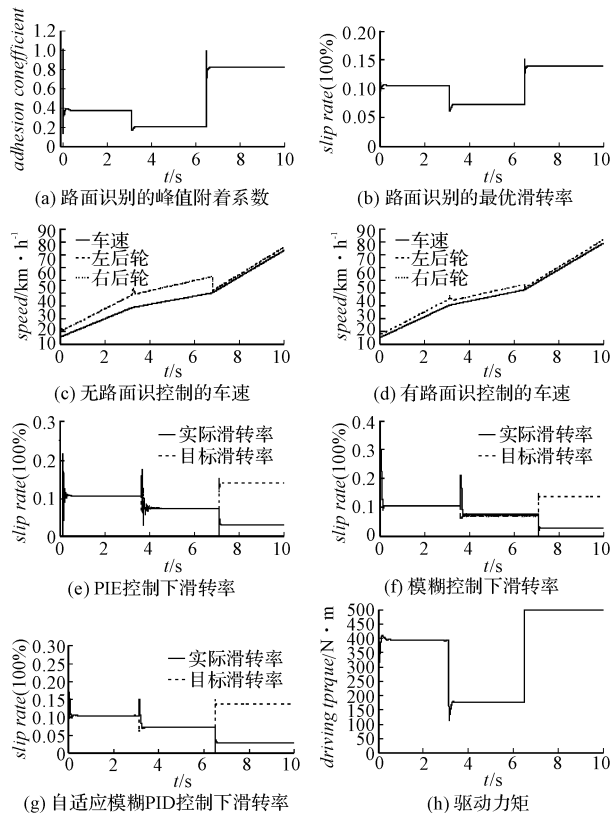


图 6 对接路面仿真结果

## 6 结束语

本研究针对电动汽车在低附着路面行驶时驱动轮滑转问题, 提出了基于模糊路面识别的自适应模糊 PID 控制方法, 根据对其的研究与分析得出以下结论:

(1) 本研究确定了整车驱动防滑的控制策略, 设计了模糊路面识别算法, 并对算法的原理进行了详细阐述。模糊识别器把当前路面跟路面数据库各典型路面进行比较, 得出相似度权重系数。由加权平均式对路面附着系数和最优滑转率进行估算。

(2) 基于模糊路面识别, 本研究设计了同时兼有 PID 控制和模糊控制优点的自适应模糊 PID 控制策略, 实现了以最优滑转率为目标的对驱动力矩较好的控制。

(3) 基于 CarSim 与 Matlab/Simulink 联合仿真实验, 本研究选择典型工况对所研究的控制方法进行验证。验证结果表明所研究的模糊路面方法能够实现对路面的准确辨识, 基于路面识别的自适应模糊控制器能实现良好地驱动防滑控制。

## 参考文献 (References):

- [1] AMDITIS A, ANDREONE L, PAGLE K, et al. Towards

- the automotive HMI of the future: overview of the AIDE-integrated project results[J]. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions**, 2010, 11(3):567-578.
- [2] GUAN HSIN, WANG BO, LIU PINGPING, et al. Identification of maximum road friction coefficient and optimal slip ratio based on road type recognition[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2014, 27(5):1018-1026.
- [3] PENG SL, YAN YB. Steady-State Model Research of Nine Degrees of Freedom for Electric Vehicle with Motorized Wheels[C]. International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Changsha, China, 2010:415-418.
- [4] 宋 健, 杨 财, 李红志, 等. AYC 系统基于多传感器数据融合的路面附着系数估算算法[J]. 清华大学学报, 2009, 49(5):101-104.
- [5] 张利鹏, 李 亮, 祁炳楠, 等. 分布式驱动电动汽车转矩自适应驱动防滑控制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14):106-112.
- [6] 王 博, 卢萍萍, 管 欣, 等. 路面附着系数识别方法发展现状综述[J]. 汽车技术, 2014(8):1-7.
- [7] 漆 燕. 汽车防撞预警相关路面状态识别的研究[D]. 武汉:华中科技大学光学与信息学院, 2013.
- [8] 余卓平, 左建令, 陈 慧. 基于四轮轮边驱动电动车的路面附着系数估算方法[J]. 汽车工程, 2007, 29(2):141-145.
- [9] 尹安东, 刘闪闪, 阎耀权. 基于路面识别的汽车 ABS 模糊控制仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(1):48-50.
- [10] 蒋振江, 陈 旭, 李大伟. 基于路面识别的四轮驱动电动汽车驱动防滑控制[J]. 重庆理工大学学报, 2012, 26(7):17-21.
- [11] 李 亮, 朱宏军, 陈 杰, 等. 用于汽车稳定性控制的路面附着识别算法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2):132-138.
- [12] 卜未奇. 全线控纯电动汽车行驶状态估算与路面识别[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院, 2014.
- [13] 张 强. 全线控电动汽车状态估计与牵引力控制[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院, 2012.

[编辑:张 豪]

#### 本文引用格式:

段 敏, 郭文涛, 李 刚, 等. 基于路面识别的电动汽车驱动防滑控制策略研究[J]. 机电工程, 2015, 32(9):1257-1262.

DUAN Min, GUO Wen-tao, LI Gang, et al. Study on acceleration slip regulation control of electric vehicle based on road identification[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(9):1257-1262.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1249 页)

外再加一个温度趋势报警, 即温升速率超过允许值时触发报警(此时温度值可能还在正常范围内), 如此, 再遇到类似事件时便可及时发现温升异常而趁早干预。

## 5 结束语

该次循环水泵电机烧瓦事件的分析过程与处理结果表明, 应用故障树分析法可以找出引起故障的关键环节并结合实际发生情况来确定事件的主要原因, 根据分析结果采取的处理措施具有针对性; 基于故障树的分析还能对这类事件的预防进行整体把控, 重点预防结构重要度较高的基本事件。

#### 参考文献 (References):

- [1] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.

- [2] 仇宝云. 泵站电机巴氏合金推力瓦烧损分析[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2000, 3(1):62-65.
- [3] 滕晓艳. 大型泵站立式同步电动机烧瓦原因分析[J]. 排灌机械, 2004, 22(2):27-28.
- [4] 莫乾凯, 陈瑞龙. 给水泵电机烧瓦事故分析及防范措施[J]. 电力安全技术, 2004, 6(4):25.
- [5] 高建强, 孙 鑫, 朱德勇. 1 000 MW 超超临界机组循环水泵导瓦超温原因分析[J]. 汽轮机技术, 2013, 55(3):202-204.
- [6] 阳江核电站 1、2 号机组循环水泵设备运行与维护手册[Z]. 沈阳透平机械股份有限公司, 2013.
- [7] 曾声奎. 系统可靠性设计分析教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [8] 刘云海, 赵国军, 陈乐玲, 等. 电梯智能故障处理系统[J]. 轻工机械, 2013, 31(2):60-63.
- [9] 朱大奇, 于盛林. 基于故障树最小割集的故障诊断方法研究[J]. 数据采集与处理, 2002, 17(3):341-344.

[编辑:张 豪]