

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.02.015

基于模糊滑模控制的再生制动系统稳定性分析*

宋士刚¹, 李小平²

(1. 浙江工业大学之江学院, 浙江 杭州 310024; 2. 浙江南都电源动力股份有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要:针对电动汽车再生制动系统稳定性问题,将模糊滑模控制技术应用于再生制动过程的稳定性研究。分析了再生制动过程中3种制动模式之间的相互关联以及动态演化,并综合考虑车辆制动稳定性及制动能量回收率,提出了电机再生制动力和前后轮液压制动力协调控制的最大化制动力分配策略;以滑移率为控制目标,将模糊控制与变结构控制相结合,建立了基于电机再生制动的稳定性模糊滑模控制策略;依据实车参数,对控制策略模型进行了仿真分析。研究表明,模糊滑模控制实现了电动汽车制动模式的合理切换,并验证了控制策略的有效性。

关键词:再生制动;滑模变结构控制;模糊控制;稳定性

中图分类号:U463.5;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)02-0197-05

Analysis of regenerative braking system stability based on fuzzy sliding mode control

SONG Shi-gang¹, LI Xiao-ping²

(1. Zhijiang College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310024, China;

2. Narada Power Source Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: Aiming at the problems of electric vehicle regenerative braking system stability, the fuzzy sliding mode control technique was investigated to regenerative braking process stability. After the analysis of the mutual relation and dynamic evolution of three kinds of braking modes during regenerative braking, and consideration the vehicle braking stability and braking energy recovery rate, the maximum braking force distribution strategy was presented to braking force loaded on motor regenerative force and front-rear axle hydraulic braking force. With slip rate as the control object, the fuzzy sliding mode control strategy based on motor regenerative braking was established by combining the fuzzy control and variable structure control. The simulation analysis of the control strategy model was carried out on the actual vehicle parameters. The results indicate that fuzzy sliding mode control can achieve the reasonable switch of electric vehicle braking mode, and verify the effectiveness of the control strategy.

Key words: regenerative braking; sliding mode variable structure control; fuzzy control; stability

0 引言

电动汽车在保证制动安全性能的前提下,将减速或制动过程中的惯性能量通过电机发电的方式给电池进行充电,实现制动能量的回馈。同时,电机制动产生

的制动力矩又可对驱动轮施加制动,产生制动力^[1]。电动汽车通过电机产生的再生制动力一般没有传统制动系统提供的制动力矩大,因此电动汽车为了提供足够的制动力,在设置电机制动系统的基础上,也保留了传统的液压制动系统,从而产生了电液复合的多种制动模式。

收稿日期:2015-08-31

基金项目:浙江省公益性技术应用研究计划项目(2014C31017);浙江工业大学校级自然科学基金资助项目(2013XZ008)

作者简介:宋士刚(1978-),男,湖北当阳人,工学博士,副教授,主要从事电动汽车再生制动系统方面的研究。E-mail:shongsg@163.com

电动汽车在进行制动时,选择及切换不同的制动模式将会引起制动系统稳定性的变化^[2]。电动汽车再生制动系统作为一种由连续非线性子系统和离散子系统组成的切换系统,其稳定性比由连续子系统或离散子系统构成的切换系统要复杂的多。

本研究针对电动汽车再生制动系统的稳定性问题,将模糊滑模控制技术应用于再生制动过程的稳定性研究。

1 再生制动切换系统

切换系统是指由许多相对独立的模型所组成的系统,每个区域由一个模型控制,这个模型是系统运行轨迹的一部分或者系统运行时间的子区间。当系统处于不同的区域时,该区域的子系统模型就代替了系统的模型,由此整个系统模型随着所处区域的不同而变化。

电动汽车的制动系统包括再生制动系统、复合制动系统和液压制动系统,这 3 个子系统在一定的条件下相互切换,因此称为切换系统。一个切换混合系统由一个四元组 $MHS = (F, D, S_C, S_D)$ 构成,其中: $F = \{f_i: R^{n_i} \times R^{m_i} \rightarrow R^{n_i}; n_i, m_i \in Z_+, i \in I\}$, f_i —描述第 i 个子系统的向量域, $i \in I$; D —一个简单有向图, $D = \{I, E\}$; I —离散状态集; E —一族离散事件, $E \subset I \times I$; 函数 $S_C: X \times I \times I \times U \times V \rightarrow X$, $S_D: X \times I \times U \times V \rightarrow I$ —系统离散事件发生时系统连续状态和离散状态的变化规律^[3]。

再生制动系统实质上是由 3 个不同的制动子系统和它们之间转换逻辑构成的。在每个子系统空间上 $X_i, i \in I$, 状态 x 是连续的, 当在 t 时刻发生离散事件 $e = (i, j)$ 时, 则系统从离散状态 i 转移到 j , 同时系统的连续动态行为由第 i 个子系统转移到第 j 个子系统, 系统从状态 $x(t^-) \in X_i$ 转移到 $x(t^+) \in X_j$, 此时系统发生了不连续的跃变, 具体制动状态的切换过程如图 1 所示。

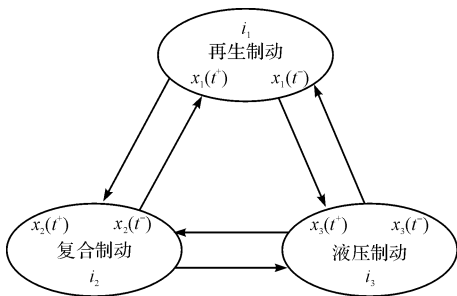


图 1 再生制动状态的切换过程示意图

2 制动过程分析

电动汽车处于再生制动或电液复合制动时,在保证制动安全的前提下,由电机产生一部分制动力,并对制动能量进行回馈储存在电池中。

再生制动过程中,只有驱动轮上的能量才能够进行回馈利用,因此,为了增大能量回收效率,就需要将尽量多的制动力分配给驱动轮;但是为了保证汽车方向的稳定性,绝对不能出现只有后轮抱死或后轮比前轮先抱死的情况,而且要尽量避免前轮先抱死或前、后轮同时抱死的情况^[4]。为了维持汽车制动稳定性和良好的制动效能,要求前、后轮的制动力分配必须满足一定的要求。对前轮驱动的电动汽车,可采用的制动力分配控制线如图 2 所示。

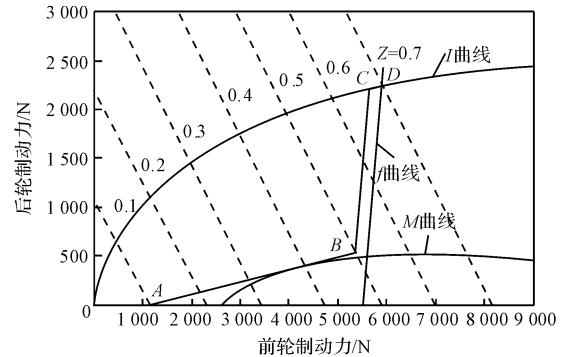


图 2 前、后轮制动力分配控制线

图 2 中:粗折线 $OABCD$ 为前、后轮制动力分配限值控制线。当制动强度较小时,由前轮提供全部的制动力(OA 段);当制动强度较大时,可由前轮和后轮共同提供制动力(AB 段和 BC 段),其中 AB 段为 M 曲线的切线, BC 段为与 f 线平行且制动力为 f 线的 90%;当制动强度大于 C 点时,制动力分配按 CD 段进行直至 f 线与 I 曲线交点。此时,前轮最大制动力表示为:

$$F_{bfmax} = \begin{cases} Gz & z \leq z_A \\ \frac{z + 0.07}{0.85} \frac{G}{L} (L_b + zh_g) & z_A < z \leq z_B \\ \varphi \frac{G}{L} (L_b + zh_g) \times 0.9 & z_B < z \leq z_C \\ \frac{G}{L} z (L_b + zh_g) & z_C < z \leq z_D \\ 0 & z > z_D \end{cases} \quad (1)$$

式中: G —汽车整车重力; z —制动强度; z_A, z_B, z_C, z_D —各点制动强度; φ —地面附着系数; L_b —汽车质心到后轴的距离; h_g —汽车质心高度。

3 模糊滑模控制策略

滑模控制是一种在理论上非常优秀的控制设计方法,在系统模型不确定和扰动上界可得条件下,滑模控制能获得安全的鲁棒稳定性。另一方面,在滑模控制中同时引入模糊逻辑控制的功能,将有助于滑模抖振问题在一定程度上地解决。因此,本研究通过将模糊控制与滑模控制有效地结合,分析再生制动系统的稳定性^[5-6]。

3.1 制动切换系统模型

汽车制动时,滚动阻力和空气阻力的数值较小,因此,不考虑车轮滚动阻力和车辆空气阻力,汽车运动方程以及车辆运动状态的动力学方程分别为^[7]:

$$\dot{v}_x = -\frac{1}{m} \sum (\mu_i(\lambda_i) F_{z_i}) \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_i = -\frac{1}{J_{\omega_i}} [-T_{b_i} + \mu_i(\lambda_i) F_{z_i} R] \quad (3)$$

式中: m —整车质量, $\mu_i(\lambda_i)$ —车轮*i*滑移率为 λ_i 时的附着系数, F_{z_i} —车轮*i*的垂直载荷, J_{ω_i} —车轮*i*的转动惯量, T_{b_i} —制动力矩, R —车轮滚动半径。

根据滑移率的公式:

$$\lambda_i = \frac{v_x - \omega_i R}{v_x} \quad (4)$$

对式(4)取导数,并将式(2,3)代入,可得:

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}_i = & -\frac{R}{v_x} \left(\mu_i(\lambda_i) F_{z_i} \frac{R}{J_{\omega_i}} - \frac{1}{J_{\omega_i}} T_{b_i} \right) - \\ & \frac{R \omega_i}{v_x^2} \frac{1}{m} \sum (\mu_i(\lambda_i) F_{z_i}) \end{aligned} \quad (5)$$

制动时,为了使车轮滑移率 λ_i 跟踪理想滑移率 λ_{opt} ,定义滑模面为 $s = (\lambda_{opt} - \lambda_i)$ 。依据滑模变结构的原理,为了改善滑模运动中趋近运动的动态品质,可以采用趋近律的方法。在不同的趋近律方法中,由于指数趋近律不但趋近时间短,而且运动点到达切换面时的速度也小,因此,采用指数趋近律,可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} = & \dot{\lambda}_{opt} + \frac{R}{v_x} (\mu_i(\lambda_i) F_{z_i} \frac{R}{J_{\omega_i}} - \frac{1}{J_{\omega_i}} T_{b_i}) + \\ & \frac{R \omega_i}{v_x^2} \frac{1}{m} \sum (\mu_i(\lambda_i) F_{z_i}) = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \end{aligned} \quad (6)$$

如果最优滑移率 λ_{opt} 是常数,则由式(6)可得制动力矩控制规律为:

$$\begin{aligned} T_{b_i} = & R \mu_i(\lambda_i) F_{z_i} + \frac{J_{\omega_i} \omega_x}{m v_x} \sum (\mu_i(\lambda_i) F_{z_i}) + \\ & \frac{J_{\omega_i} v_x}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{opt} - \lambda_i) + k(\lambda_{opt} - \lambda_i)] \end{aligned} \quad (7)$$

通过设定能量函数 $V = [\lambda_{opt} - \lambda_i]^2$,则显然 $V > 0$,对其求导得:

$$\dot{V} = 2(\lambda_{opt} - \lambda_i)(\dot{\lambda}_{opt} - \dot{\lambda}_i) \quad (8)$$

把式(6)代入到式(8)可得进一步简化式:

$$\dot{V} = -2(\lambda_{opt} - \lambda_i) [\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{opt} - \lambda_i) + k(\lambda_{opt} - \lambda_i)] \quad (9)$$

由于当 $(\lambda_{opt} - \lambda_i)$ 变号,则符号函数 $\operatorname{sgn}(\lambda_{opt} - \lambda_i)$ 也变号,从而始终满足 $\dot{V} < 0$ 。根据李雅普诺夫稳定性定理,可知式(7)所描述的控制规律作用下,系统是渐近稳定的,从而表明控制模型有效。因此车辆制动切换系统稳定性控制就是要保证控制车轮滑移率在 λ_{opt} 附近,以保证车辆具有较好的制动稳定性。

制动过程中,如果保持前轮不出现抱死,并尽可能利用电机再生制动,只在为满足制动需求及法规要求下才使用液压制动,就可以实现最大化的能量回收。由此,电机制动控制规律为:

$$\begin{aligned} I_d = & \frac{R \mu_i(\lambda_i) F_{z_i} + \frac{J_{\omega_i} \omega_x}{m v_x} \sum (\mu_i(\lambda_i) F_{z_i})}{K_g K_t} + \\ & \frac{\frac{J_{\omega_i} v_x}{R} [\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{opt} - \lambda_i) + k(\lambda_{opt} - \lambda_i)] - T_{b_i}}{K_g K_t} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: I_d —电机电枢电流, K_g —电机到驱动轮的传动比, K_t —电机转矩系数, T_{b_i} —液压制动力矩。

3.2 变结构控制的模糊化

在采用滑模结构控制时,必然产生抖振,借助趋近律方法,不但可以有效减少抖振,而且可以改善正常运动段的动态品质。由式(6)可知,当 $s \rightarrow 0$ 时, $ks \rightarrow 0$,但 $\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 并不趋近于零,所以 $\dot{s}$ 也不趋近于零,系统状态将会反复穿越滑模面而造成抖振,抖振的强度主要由 ε 的大小来决定。因此,如果能较好地调节 ε ,使其在接近滑模面时取较小值,而离滑模面较远时采用较大值,则可很好地减轻抖振。

模糊控制作为一种智能控制方法,不依赖于对象的数学模型,特别适于无法或很难建立数学模型的系统^[8-10]。本研究设计双输入单输出的二维模糊控制器,

模糊控制器的输入为切换函数 s 及其变化率 $\dot{s}$,模糊控制器输出的绝对值为趋近律的参数 ε 取值。由此,滑模控制的模糊趋近率可以通过实时调节趋近率的参数值进行设计,以此达到削减抖振的目的。模糊变结构控制器系统如图 3 所示。

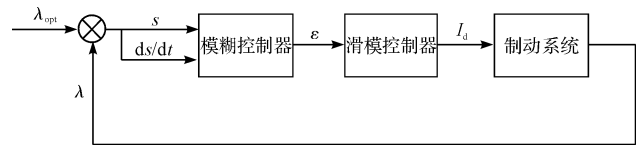


图 3 模糊滑模变结构控制方框图

定义语言模糊集:NB = 负大,NM = 负中,NS = 负小,ZO = 零,PS = 正小,PM = 正中,PB = 正大,采用 Mamdani 模糊推理方法,规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

ε		S						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$\dot{s}$	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

为更加合理的选取控制量,本研究对输入量进行模糊划分时,采用变化的量化方法。由于 s 及 $\dot{s}$ 在 0 附近的变化频率较高,则在 0 值附近使模糊集的划分密度较大。而在离 0 值较远处其变化频率相对较低,其模糊集的划分密度相对较小。各隶属度函数均采用三角形,如图 4 所示,其中图 4(a) 为对 s 的划分,图 4(b) 为对 $\dot{s}$ 的划分。

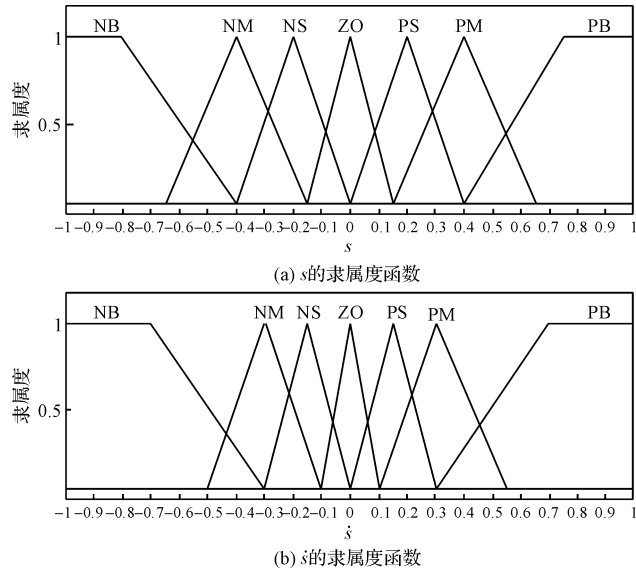


图 4 模糊滑模控制器隶属度函数

4 仿真与结果分析

为了验证模糊滑模控制策略的有效性,本研究以某电机前置采用前驱动,并保留液压制动系统的纯电动汽车为例,其整车参数如表 2 所示。

表 2 某纯电动汽车主要技术参数表

技术参数名称		技术指标
整车参数	满载质量 /kg	1 159
	质心距前轴距离 /m	1.04
	轴距 /m	2.6
	质心高度 /m	0.5
	车轮半径 /m	0.28

本研究取中等附着系数路面 $\mu = 0.7$, $\lambda_{opt} = 0.18$,仿真初速度 $v_0 = 60 \text{ km/h}$,制动强度 $z = 0.2$ 时,电动汽车从初始车速制动至车速为零。本研究利用 Matlab/Simulink 软件建立系统模型并进行仿真,具体仿真结果如图 5 所示。

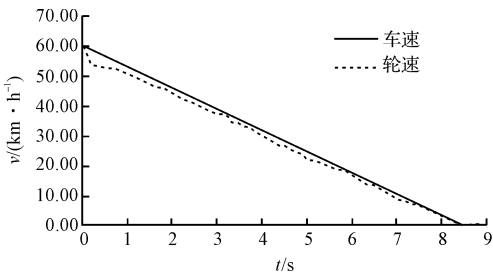


图 5 车速与轮速

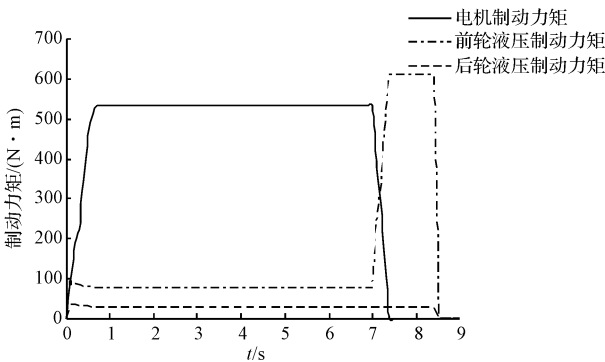


图 6 电机和前、后轮液压制动力矩

车辆制动过程中轮速与车速的变化情况如图 5 所示,从图 5 中可以看出,车速和轮速吻合较好。车辆制动过程中电机和前、后轮液压制动器提供的制动力矩大小如图 6 所示。车辆制动过程中,系统根据图 2 所示的前、后轮制动力分配控制线分配制动力,由电机产生再生制动力,剩余的制动力由前、后轮液压制动力予以补充,由此最大化制动能量回馈。

滑移率变化曲线如图 7 所示,图 7 中可以看出采

用符号函数的控制使得滑移率对最优滑移率的跟踪会发生显著的高频振荡,而采用模糊滑模控制,其滑移率跟踪迅速、准确,滑移率曲线抖动小、平滑,其控制效果明显优于采用符号函数的效果。

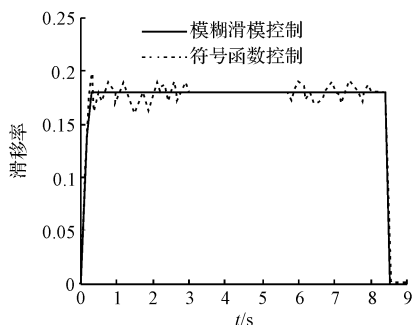


图7 滑移率变化曲线

5 结束语

电动汽车进行制动时,选择及切换不同的制动模式将会引起系统的变化,对于再生制动系统而言,切换过程中系统的稳定性显得非常重要。本研究基于切换系统的定义分析了再生制动过程的动态切换行为,将滑模变结构控制应用于再生制动过程的稳定性分析,建立了基于指数趋近律的滑模控制器。针对滑模变结构控制的固有缺陷抖振,笔者将模糊控制与变结构控制相结合,设计了模糊滑模变结构控制器。通过 Matlab/Simulink 环境下的仿真分析,将车辆制动滑移率控制在一定范围内,实现了不同制动模式的合理切换,验证了控制策略的有效性。

参考文献(References):

- [1] PETER C, TARIQ M, KEVIN C. Cutting vehicle emissions with regenerative braking [J]. **Transportation Research Part D**, 2010, 15(3): 160-167.
- [2] 赵 韩,胡金芳,叶先军. 混合动力汽车制动稳定性分层协调控制策略[J]. **汽车工程**, 2014, 36(1): 93-100.
- [3] 崔文燕. 基于混杂系统理论的汽车再生制动稳定性分析[D]. 镇江:江苏大学汽车与交通工程学院, 2010.
- [4] 刘 杨,孙泽昌,王 猛,等. 非解耦式与解耦式电液复合制动系统及其评价[J]. **华南理工大学学报:自然科学版**, 2014, 42(4): 131-136.
- [5] HUA Jing, AN Li-xia, LI Yi-ming. Bionic fuzzy sliding mode control and robustness analysis [J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2015, 39(15): 4482-4493.
- [6] 付主木,卢亚博,宋书中. 基于模糊滑模控制的 HEV 再生制动控制策略[J]. **计算机仿真**, 2015, 32(5): 166-170.
- [7] 叶 敏,郭金刚. 电动汽车再生制动及其控制技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2013.
- [8] MAIA R, SILVA M, ARAUJO R, et al. Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking [J]. **Expert Systems With Applications**, 2015, 42(22): 8504-8519.
- [9] 任彦恒,王金宝,张连发,等. 液压制动能量再生系统研究及仿真[J]. **兵工自动化**, 2014, 33(1): 9-11, 15.
- [10] 刘 辉,王伟达,何 娇,等. 基于模糊控制的混合动力电动车再生制动系统的建模与仿真[J]. **汽车工程**, 2012, 34(1): 51-56.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

宋士刚,李小平. 基于模糊滑模控制的再生制动系统稳定性分析[J]. **机电工程**, 2016, 33(2): 197-201.

SONG Shi-gang, LI Xiao-ping. Analysis of regenerative braking system stability based on fuzzy sliding mode control [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016, 33(2): 197-201.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>