

doi: 10.3969/j.issn.1674-8425(z).2020.06.005

本文引用格式:顾钰,何仁,王骏骋.轮毂电机电动汽车再生-液压复合制动系统协调控制策略[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(6):32-40.

Citation format:GU Yu, HE Ren, WANG Juncheng. Coordinated Control Strategy of Regenerative-Hydraulic Composite Braking System for an In-Wheel Motors Driven Electric Vehicle[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science),2020,34(6):32-40.

# 轮毂电机电动汽车再生-液压 复合制动系统协调控制策略

顾钰,何仁,王骏骋

(江苏大学汽车与交通工程学院,江苏镇江 212013)

**摘 要:**为保证制动过程中轮毂电机电动汽车的制动控制效果,充分利用电机再生制动控制精准高、响应迅速的优势,对再生-液压复合制动系统的制动性能进行了数学建模与仿真分析。首先,建立了包含再生-液压制动复合制动系统的单轮纵向动力学模型;其次,考虑驾驶员制动需求和路面条件,提出可用于3种典型制动工况(轻度、中度和重度制动工况)下的复合制动系统协调控制策略;最后,在 Matlab/Simulink 软件中模拟3种典型制动工况下采用所提出协调控制策略的汽车制动过程。仿真结果表明:所提出的控制策略能满足驾驶员制动意图,在充分利用电机控制精度高和响应时间短的优势的前提下,保证轮毂电机电动汽车的制动控制效果。

**关键词:**车辆工程;轮毂电机;再生制动;制动力矩分配

中图分类号:U461.3

文献标识码:A

文章编号:1674-8425(2020)06-0032-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Coordinated Control Strategy of Regenerative- Hydraulic Composite Braking System for an In-Wheel Motors Driven Electric Vehicle

GU Yu, HE Ren, WANG Juncheng

(School of Vehicle and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** To ensure the braking control effect of electric vehicle driven by in-wheel motors during braking and make full use of the advantages of accurate control and quick response of regenerative braking system, the mathematical model and simulation analysis of the braking performances based on the regenerative-hydraulic composite braking system were carried out. Firstly, the longitudinal dynamic model of single wheel based on regenerative-hydraulic composite braking system was

收稿日期:2019-04-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275212);江苏大学大学生实践创新训练计划项目(201810299048Z);江苏大学大学生科研项目(17A337)

作者简介:顾钰,女,主要从事车辆系统动力学及新能源汽车方面研究,E-mail:guyu19980816@163.com;通讯作者 何仁,男,博士,教授,主要从事汽车机电一体技术方面研究,E-mail:heren@mail.ujs.edu.cn。

established. Secondly, considering the braking demand of driver and road conditions, a coordinated control strategy was proposed for the composite braking system under three braking conditions (mild, moderate and severe braking conditions). Finally, the braking process of the proposed strategy for electric vehicle under different braking conditions was simulated by MATLAB/Simulink software. The simulation results showed that the proposed control strategy could meet the requirements of the driver's braking intention. Under the premise of making full use of the advantages of high control precision and short response time of in-wheel motors, the braking control effect of in-wheel motors driven electric vehicle was ensured.

**Key words:** vehicle engineering; in-wheel motor; regenerative braking; braking torque distribution

近年来,国内外专家学者在再生制动技术的研究领域取得了一系列研究成果,并成功用于新能源汽车的工程实践。然而,由于单纯的再生制动系统无法单独提供符合驾驶员制动需求的制动力矩,因而经常采用液压制动系统作为主制动系统、再生制动系统作为辅助制动系统的复合制动系统来实现混合动力汽车或者纯电动汽车的制动功能。然而,现阶段对于电-液复合制动系统的理论研究及技术开发条件还不够完善,仍需要进一步探索如何优化车辆的制动效果以及提高再生制动能量回收效率。

国外目前已经拥有成熟的理论系统可用于再生制动过程中的车辆系统建模和仿真、能量存储系统、能量转换系统和控制等方面研究。近年来,再生制动和液压制动系统的能量分配以及综合协调控制取得了突破性的进展。例如,用于前轮驱动电动车的集成制动控制器<sup>[1]</sup>;基于ECE R13H规范的乘用车实时制动力约束控制策略<sup>[2]</sup>;将超级电容和蓄电池结合,利用超级电容高功率密度的优势来提高动力电池的电流接受能力,减小对传统摩擦制动技术的依赖程度<sup>[3]</sup>等。国内汽车企业也在积极参与复合制动系统的研发与应用,研究出了基于混杂理论的电磁与摩擦制动启程系统<sup>[4]</sup>、面向全制动工况的液压制动双环预测控制策略<sup>[5]</sup>、基于混合动力系统理论使用串联的形式来实现再生制动的方法<sup>[6]</sup>等。但对于不同路面状况下的再生制动研究仍然不足,尤其是电-液复合制动系统及其控制技术在新兴的轮毂电机电动汽车底盘集成控制领域的研究仍不够成熟。

本文旨在研究轮毂电机电动汽车的再生-液压复合制动系统及其协调控制策略。首先,剖析了再生-液压复合制动系统的结构及其控制原理。然后,建立了包含轮毂电机再生制动系统和液压执行系统的数学模型,并提出了适用于复合制动系统的协调控制策略。最后,模拟和分析了3种典型制动(轻度,中度和重度制动)工况下协调控制策略的控制效果。

## 1 轮毂电机电动汽车制动系统

### 1.1 轮毂电机电动汽车制动系统结构

本文研究的轮毂电机电动汽车装有再生-液压复合制动系统,系统结构如图1所示<sup>[7-10]</sup>。

图1所示的复合制动系统由再生制动系统和液压制动系统及其各自的控制器组成,主要组成部分包括4个轮毂电机和电机控制器,再生控制器、液压调节机构、制动主缸、踏板位移传感器、DC/DC转换器及动力电池。制动系统的工作过程为:当汽车进行制动时,踏板位移传感器确认驾驶员制动意图并通过电子控制单元(ECU)计算出目标制动力矩。根据车辆的状态,动力电池的当前状态和制动强度计算出每个车轮上的再生-液压制动力矩的分配比,使相应的制动力矩信号以激励信号的形式发送到再生制动系统和液压制动系统。再生制动系统根据目标制动力矩和再生-液压制动力矩的分配比来确定4个嵌入式轮毂电机分别需要产生的再生制动力矩。液压制动系统中的液压调节机构根据目标制动力矩和再生-液压制动力矩的分配比,确定轮缸实时压力值并与采

集到的实际轮缸压力值进行比较,计算出补偿的液压制动力矩值,并通过液压调节机构调节各液压阀的开度来控制制动主缸的压力向制动轮缸进行补偿,进而实现实时调节前、后轮缸液压制动力的目的。

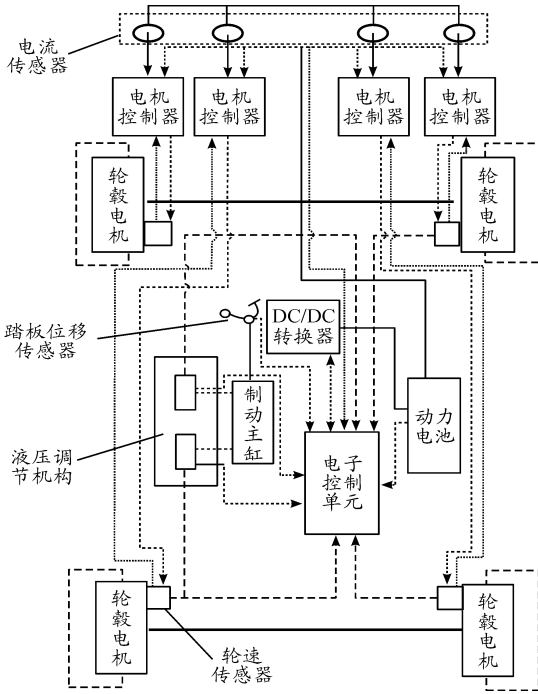


图1 轮毂电机电动汽车复合制动系统的结构

1.2 数学模型

为了表征电动汽车的纵向制动动力学特性,分别建立了单轮纵向动力学模型,电机模型和液压制动系统模型。

1.2.1 单轮模型

在对车辆进行性能分析时,建立如图2所示的单轮纵向动力学模型<sup>[11-12]</sup>。

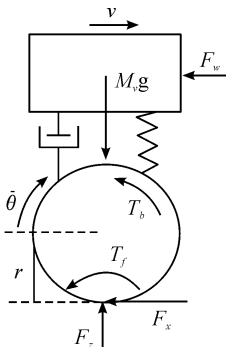


图2 单轮纵向动力学模型

单轮纵向动力学方程见式(1)所示。

$$\begin{cases} \delta M_v \dot{v} = -F_x - F_w - F_f \\ I \ddot{\theta} = rF_x - T_b - T_f \\ F_x = M_t g \mu(\lambda) \\ F_w = \frac{C_D A \rho_a v^2}{2} \\ F_f = F_s f = T_f / r \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M_v$ 为汽车质量; $\delta$ 为汽车旋转质量换算系数; $v$ 为车辆行驶加速度; $F_x$ 为车轮的地面切向反作用力; $F_w$ 为空气阻力; $F_f$ 为车轮的滚动阻力; $I$ 为车轮转动惯量; $\ddot{\theta}$ 为车轮角加速度; $r$ 为车轮有效半径; $T_f$ 为车轮滚动阻力偶距; $C_D$ 为空气阻力系数; $A$ 为迎风面积; $\rho_a$ 为空气密度; $F_z$ 为车轮的地面法向反作用力; $\mu(\lambda)$ 为路面附着系数; $f$ 为滚动阻力系数; $T_b$ 为制动力矩,满足

$$T_b = T_r + T_h \quad (2)$$

式中: $T_r$ 为再生制动力矩; $T_h$ 为液压制动力矩。

1.2.2 电机模型

选用永磁式无刷直流电机作为电动汽车的轮毂电机。建立用于表征轮毂电机再生制动的数学模型为

$$\begin{cases} k_e \dot{\theta} - Ri - (L - M) \frac{di}{dt} = u_b \\ T_m = k_t i \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_e$ 为反电动势系数; $k_t$ 为转矩系数; $\dot{\theta}$ 为轮毂电机转子速度; $R$ 为等效电阻; $i$ 为等效电流; $L - M$ 为等效电感; $u_b$ 为外接电压; $T_m$ 为再生制动力矩; $t$ 为车辆制动持续时间。

1.2.3 液压制动模型

在动力学仿真建模过程中,常将液压制动系统工作过程理想化,建立用于表征液压制动系统的数学模型<sup>[13]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{dP_w}{dt} = & \frac{1}{C_e R_{e1}} (P_m - P_w)^{k_1} u_1 (t - t_{vp1}) - \\ & \frac{1}{C_e R_{e2}} (P_w - P_r)^{k_2} u_2 (t - t_{vp2}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $P_w$ 为轮缸压力; $P_m$ 为主缸压力; $P_r$ 为低压蓄能器等效恒定液压力; $\tau_{vp1}$ ,  $\tau_{vp2}$ 分别为等效阀口

增压或减压和液压油路滞后时间;  $C_e$  为液压系统等效液容;  $R_{e1}, R_{e2}$  分别为增压和减压时的等效液阻;  $u_1, u_2$  分别为电磁阀控制指令信号;  $k_1, k_2$  均为常数。

等效阀口通过不同的控制信号实现通断来控制液压系统进行对应操作的执行,其控制信号作用结果如下:

1) 当  $u_1 = 1, u_2 = 0$  时,等效常开阀通路、等效常闭阀断路、系统处于增压状态,则制动轮缸压力变化率为

$$\frac{dP_w}{dt} = \frac{1}{C_e R_{e1}} (P_m - P_w)^{k_1} \quad (5)$$

式中  $1/C_e R_{e1}$  取值为 37.534 2。

2) 当  $u_1 = 0, u_2 = 1$  时,等效常开阀断路、等效常闭阀通路、系统处于减压状态,则制动轮缸压力变化率为

$$\frac{dP_w}{dt} = -\frac{1}{C_e R_{e2}} (P_w - P_r)^{k_2} \quad (6)$$

式中  $\frac{1}{C_e R_{e2}}$  取值为 38.312 8。

3) 当  $u_1 = 0, u_2 = 0$  时,等效常开阀断路、等效

常闭阀断路、系统处于保压状态,制动轮缸与制动主缸、低压蓄能器之间互不连通,使轮缸制动压力不发生变化,即:

$$\frac{dP_w}{dt} = 0 \quad (7)$$

## 2 轮毂电机电动汽车复合制动防抱死协调控制策略

当驾驶员踩下踏板时,再生-液压复合制动系统的 ECU 接收传感器信号,根据驾驶员意图按照预先设定的控制策略进行制动力矩的计算和分配,并依靠电机转速信号计算出轮毂电机此时可供给的最大再生制动力矩,并将其与目标制动力矩进行比较,由控制策略确定制动模式,输出再生及液压制动信号给对应的制动执行机构,实施车辆的制动控制<sup>[14-15]</sup>。本文制定的再生-液压复合制动系统控制策略如图 3 所示,依据不同制动强度,分为 3 种制动工况:制动工况 1——轻度制动工况;制动工况 2——中度制动工况;制动工况 3——重度制动工况。

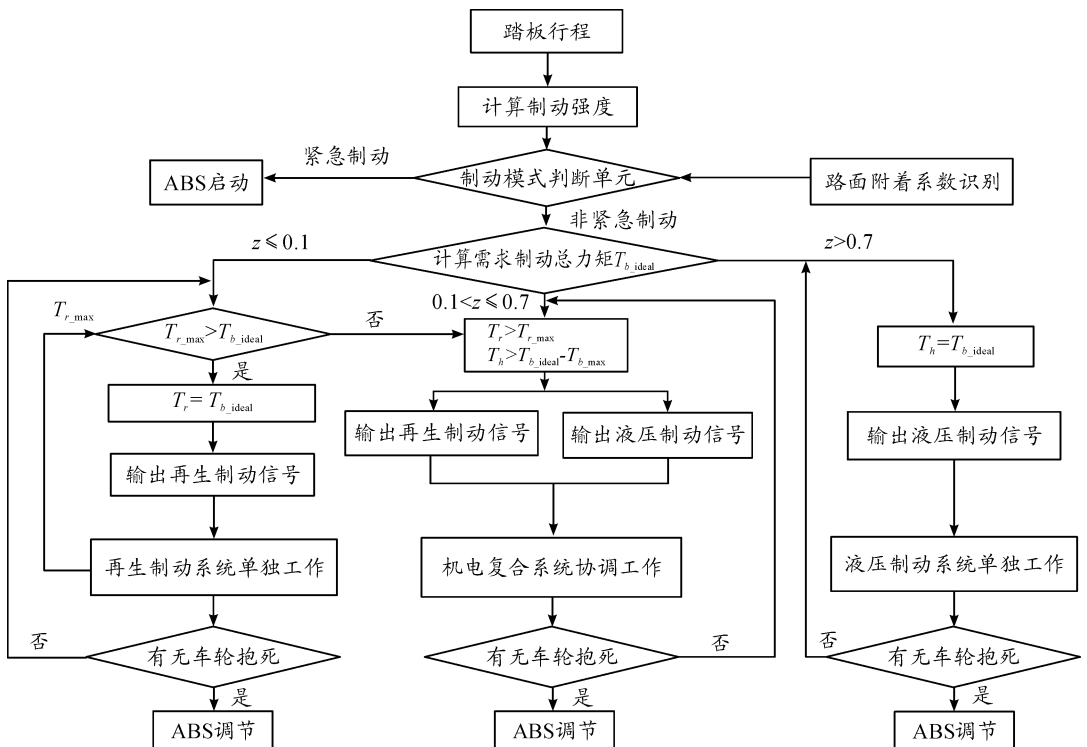


图 3 再生-液压复合制动系统控制策略

## 2.1 制动工况 1

当制动强度满足  $z \leq 0.1$  时,为轻度制动工况。在该工况下,制动减速度较小,目标制动力矩较小。当最大再生制动力矩大于或等于目标制动力矩时,液压制动系统不参与制动过程,实际再生制动力矩值等于目标制动力矩值。当最大再生制动力矩小于目标制动力矩时,再生制动系统和液压制动系统同时参与制动过程,其中再生制动力矩值为轮毂电机所能提供的实时最大再生制动力矩值,液压制动力矩值为目标制动力矩与再生制动力矩的差值。

## 2.2 制动工况 2

当制动强度满足  $0.1 < z \leq 0.7$  时,为中度制动工况。在该工况下,由于目标制动力矩较大,制动减速度也随之变大,ECU 根据轮毂电机转速实时计算出能提供的最大再生制动力矩值,比较最大再生制动力矩值与目标制动力矩值的大小。当最大再生制动力矩值大于或等于目标制动力矩值时,完全依靠轮毂电机供给所需的制动力矩;当再生制动力矩值小于目标制动力矩值时,ECU 计算出液压制动力矩值,将液压制动信号传输给液压调节机构,协调液压制动系统工作,开启增压阀进行液压补偿,供给需要补偿的液压制动力矩。

## 2.3 制动工况 3

当制动强度满足  $z > 0.7$  时,为重度制动工况。在该工况下,制动强度大于上述 2 种情况,制动所需目标制动力矩也最大。考虑轮毂电机在极限工作时能供给的最大再生制动力矩不足,当汽车处于重度制动工况时,不适用轮毂电机再生制动,仅依靠液压制动系统来提供目标制动力矩。

## 3 仿真结果与分析

在 Matlab/Simulink 环境下,根据所建立的再生制动系统及液压制动系统模型,同时基于单轮纵向动力学模型,搭建复合制动系统仿真模型,对 3 种制动工况进行仿真分析。

### 3.1 轻度制动工况

车辆模型参数、轮毂电机参数和等效液压元件参数如表 1 所示。

表 1 参数数值

参数	$M_e/\text{kg}$	$\delta$	$I/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$r/\text{m}$	
数值	180	1.00	0.50	0.30	
参数	$C_D$	$A/\text{m}^2$	$\rho_a/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$k_e$	
数值	0.29	0.87	1.26	0.07	
参数	$k_i$	$R/\Omega$	$L-M/\text{mH}$	$k_1$	$k_2$
数值	2.50	0.89	0.13	0.59	0.94

轻度制动工况下车辆的初始速度为 40 km/h,制动强度为 0.1,路面为附着系数足够的单一路面。图 4~7 分别表示制动工况 1 下制动力矩、车速、制动减速度和制动距离随时间的变化曲线。

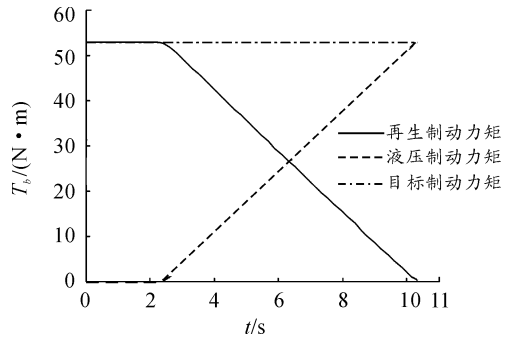


图 4 制动工况 1 下制动力矩随时间的变化曲线

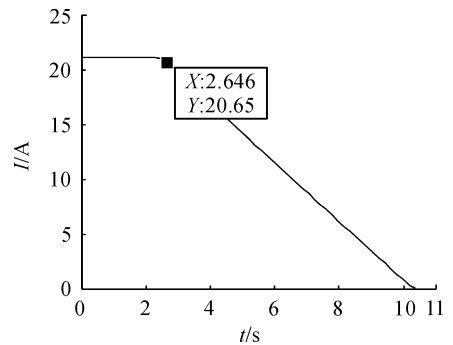


图 5 制动工况 1 下电机电流随时间的变化曲线

从图 4 可以看出:0~2.28 s 时段,再生制动力矩等于目标制动力矩,液压制动力矩为 0。因为制动强度较小,所需的制动力矩自然也较小,若车速较高,再生制动力矩大于目标制动力矩,此时电机单独进行作用,液压制动系统不工作;在 2.28 s 处出现拐点,随后再生制动力矩减小,液压制动力矩增加。由于车速降低的过程中,电动机供给的电流减小,最大再生制动力矩也随之减小,直到车

速达到临界值,最大再生制动力矩恰好能满足目标制动力矩。在接下来的过程中,再生制动力矩不能满足目标制动力矩的要求,此时液压制动系统发挥作用,补偿不足部分,直至车速降低为0。

如图5所示,0~2.28 s时段,再生制动力矩保持不变,由于再生制动力矩与电机电流成正比,所以电机电流也保持不变;在2.28 s处出现拐点,随后再生制动力矩逐渐减小,电机电流也随之减小。

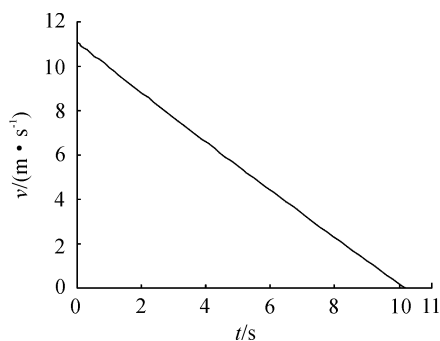


图6 制动工况1下车速随时间的变化曲线

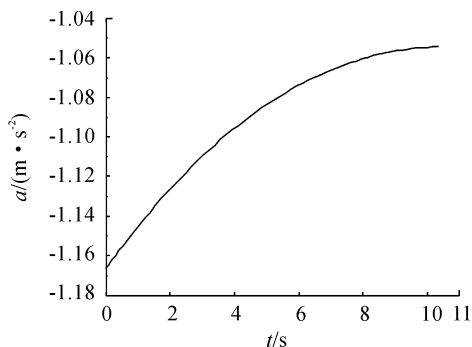


图7 制动工况1下制动减速度随时间的变化曲线

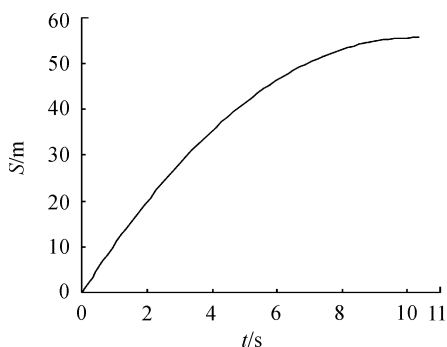


图8 制动工况1下制动距离随时间的变化曲线

于制动减速度的变化较小,车速近似线性减小,在10.19 s时,车速减为0,车辆停止。由图7可知:制动减速度大小从 $1.168 \text{ m/s}^2$ 逐渐减小到 $1.055 \text{ m/s}^2$ ,根据单轮纵向动力学分析,车速在制动过程逐渐降低,使得滚动阻力及空气阻力减小,因此制动减速度略微减小。图8是工况1下制动距离随时间的变化曲线,显示在55.58 m处,车速减为0,图中S表示制动距离。

综上所述,在轻度制动工况下,根据所提出的协调控制策略,轻度制动过程的前期再生制动系统提供满足驾驶员制动需求的目标制动力矩,再生制动系统单独进行制动;轻度制动过程的后期,由式(3)可知,随着轮毂电机转子转速的下降,轮毂电机所能提供的最大再生制动力矩随之减小,当最大再生制动力矩值小于目标制动力矩值时,液压制动系统介入制动过程。因此,在保证制动安全性的前提下,所提出的协调控制策略尽可能多地发挥了再生制动系统提供整车能量利用效率的优势。

### 3.2 中度制动工况

中度制动工况下车辆的初始速度为80 km/h,制动强度为0.5,路面为附着系数足够的单一路面。图9~14分别表示制动工况2下制动力矩、车速、制动减速度和制动距离随时间的变化曲线。

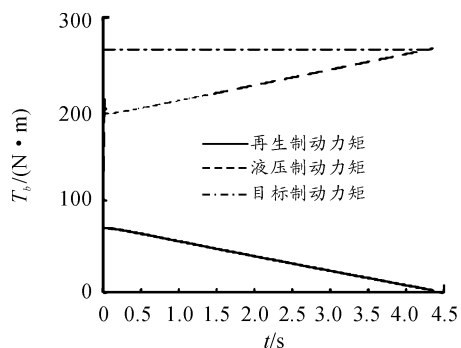


图9 制动工况2下制动力矩随时间的变化曲线

如图9所示,在制动刚开始时,由于液压调节机构的特性,突然增长的液压冲击力在短时间内造成力矩波动。随后,再生制动力矩持续减小,直至为0,液压制动力矩持续增加,直至液压制动力矩等于目标制动力矩。由于制动强度较大,目标

从图6可以看出:初始车速为 $11.11 \text{ m/s}$ ,由

制动力矩相对较大,即使在最大车速状态下,再生制动系统供给的最大再生制动力矩仍不足以供给目标制动力矩,需要再生制动系统和液压制动系统协调作用。

由图 10 可知:在 4.36 s 内,电机电流从 27.96 A 迅速减小至 0.79 A,由于再生制动力矩呈线性减小,所以电机电流也随之减小。从图 11 可以看出,轮缸压力基本呈线性递增,在 4.36 s 处达到 2.739 MPa。但在制动刚开始时,由于液压调节机构的特性,突然增长的液压冲击力会在短时间内造成轮缸压力有所波动。

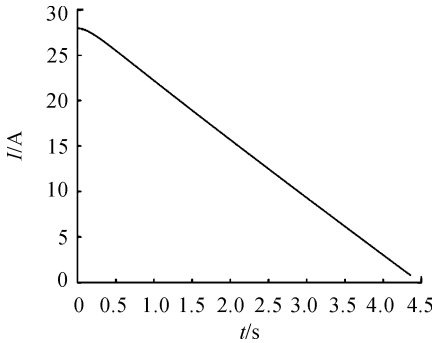


图 10 制动工况 2 下电机电流随时间的变化曲线

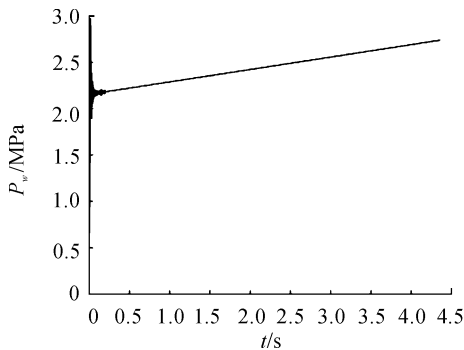


图 11 制动工况 2 下轮缸压力随时间的变化曲线

从图 12 可以看出:在 4.36 s 内,车速迅速从 22.22 m/s 减小至 0,由于制动减速度变化量较小,车速近似呈现线性减小。由图 13 可知:车速迅速降低,车辆的滚动阻力、空气阻力随之减小,因此制动减速度数值从 5.41 m/s<sup>2</sup> 减小至 4.99 m/s<sup>2</sup>。从图 14 中可以看出:初始速度较大,制动距离增加较快,随着持续制动,车速减低,制动距离增长速度放缓,制动距离为 47.56 m。

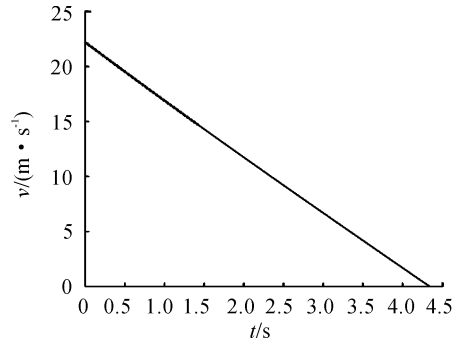


图 12 制动工况 2 下车速随时间的变化曲线

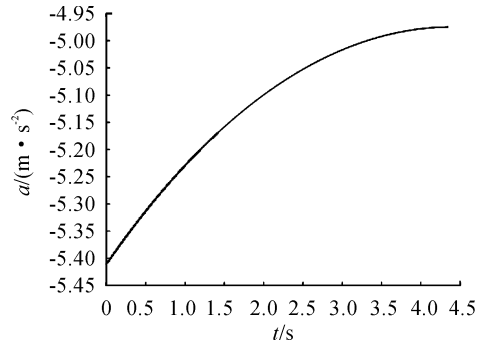


图 13 制动工况 2 下制动减速度随时间的变化曲线

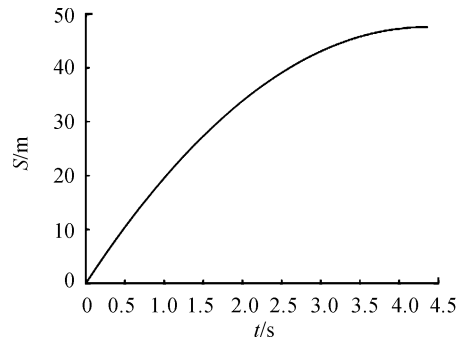


图 14 制动工况 2 下制动距离随时间的变化曲线

综上所述,在中度制动工况下,轮毂电机所能提供的最大再生制动力矩始终小于目标制动力矩。因此,当制动强度满足  $0.1 < z \leq 0.7$  时,再生制动系统和液压制动系统始终处于协调控制状态,此时电机控制器通过调节轮毂电机的外接电压使得再生制动系统处于能够获得最大能量回收功率的状态。液压制动系统提供再生制动力矩与目标制动力矩的差值力矩。

### 3.3 重度制动工况

重度制动工况下车辆的初始速度为 120 km/h,

制动强度为 0.8,路面为附着系数足够的单一路面。图 15~18 分别表示制动工况 3 下制动力矩,车速,制动减速度和制动距离随时间的变化曲线。

如图 15 所示,在整个过程中,液压制动力矩等于目标制动力矩,再生制动力矩始终为 0。由于在高速情况下制动时,制动减速度很大,目标制动力矩也随之变大,而再生制动力矩较小,因而电机工作易出现异常,影响制动的稳定性。

从图 16 可以看出:除了制动开始时突然增长的液压冲击带来的短时轮缸压力波动之外,在整个制动过程中,轮缸压力基本不变,维持在 4.68 MPa 上下小幅度波动。

如图 17 所示,在 4.05 s 内,车速迅速从 33.33 m/s 减小至 0,由于制动减速度变化量较小,车速近似呈现线性减小。由图 18 可知:随着制动的进行,车速迅速减低,车辆的滚动阻力、空气阻力随之减小,特别是空气阻力迅速减小,因此制动减速度数值从 8.89 m/s<sup>2</sup> 减小至 7.92 m/s<sup>2</sup>。如图 19 所示,在 66.18 m 处,车速减为 0,车辆静止。

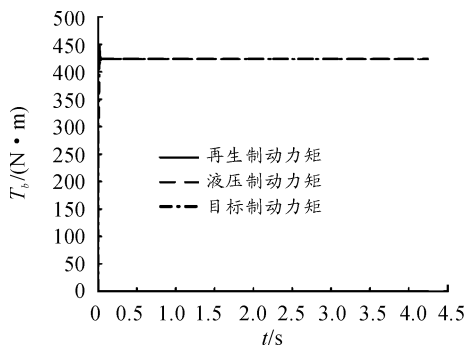


图 15 制动工况 3 下制动力矩随时间的变化曲线

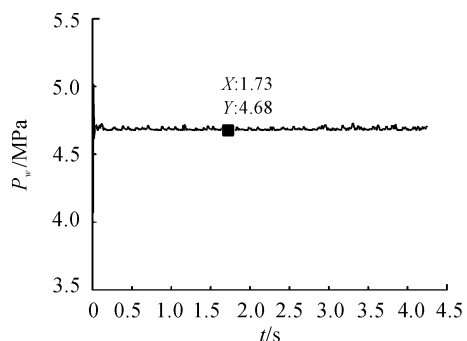


图 16 制动工况 3 下轮缸压力随时间的变化曲线

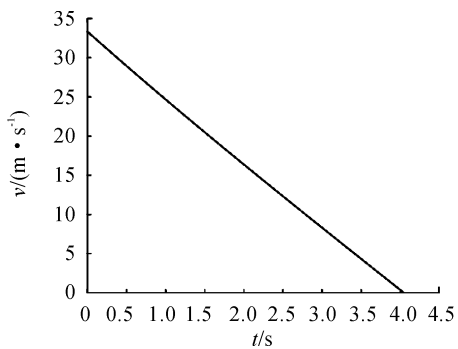


图 17 制动工况 3 下车速随时间的变化曲线

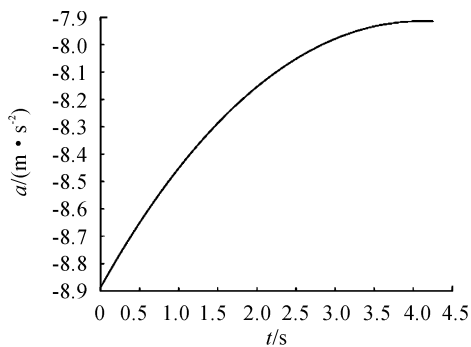


图 18 制动工况 3 下制动减速度随时间的变化曲线

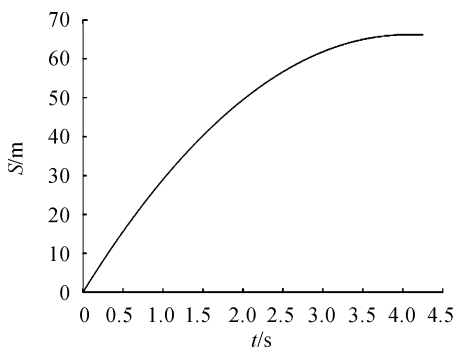


图 19 制动工况 3 下制动距离随时间的变化曲线

综上所述,在重度制动工况下控制策略的制定是以保证轮毂电机电动汽车制动安全性为首要任务,放弃了原有的制动能量回收功能。此时,液压制动系统单独实施轮毂电机电动汽车的制动行为。

## 4 结束语

本文提出了一种轮毂电机电动汽车再生-液压复合制动的协调控制策略。仿真结果表明:在轻度制动工况下,再生制动为主要制动方式能够

准确实施制动控制,充分发挥了轮毂电机再生制动控制精准高、响应迅速的优势。在中度制动工况下,再生-液压复合制动系统兼具再生制动及液压制动系统的优点。当制动开始时,再生制动快速响应,能够及时供给再生制动力矩,制动系统快速响应,因此可以弥补液压迟滞的缺点,同时液压制动快速参与制动,提供较大部分的制动力矩进行协调控制。在重度制动工况下,为了保证车辆制动系统的安全性,液压制动系统单独工作,提供了较大的制动力矩的同时取得了良好的制动控制效果。

### 参考文献:

- [1] STRATIS K, MOHSEN A, SVEN J. Control allocation for regenerative braking of electric vehicles with an electric motor at the front axle using the state-dependent Riccati equation control technique[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2014, 228(2): 129 - 143.
- [2] ITANI K, BERNARDINIS D, KHATRI Z, et al. Comparison between two braking control methods integrating energy recovery for a two-wheel front driven electric vehicle [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 122: 330 - 343.
- [3] WALKER A M, LAMPERTH M U, WILKINS S. On friction braking demand with regenerative braking[Z]. SAE Technical Paper, 2002 - 01 - 2581.
- [4] 何仁, 汤宝, 胡东海. 基于混杂理论的电磁与摩擦制动集成系统的建模与仿真[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 112 - 119.
- [5] 王骏骋, 何仁. 面向全制动工况的液压制动双环预测控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(209): 804 - 811.
- [6] 宋士刚, 李小平, 孙泽昌. 基于混合系统理论的串联式再生制动控制策略[J]. 汽车工程, 2015, 37(2): 313 - 320.
- [7] 靳立强, 孙志祥, 郑迎. 电动轮汽车复合再生制动系统防抱协调控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(5): 1344 - 1351.
- [8] 李仲兴, 王吴杰, 徐兴, 等. 四轮独立驱动电动汽车能效分析与功率分配[J]. 汽车工程, 2016, 9(38): 1037 - 1043.
- [9] 张雷, 于良耀, 宋健, 等. 电动汽车再生制动与液压制动防抱协调控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(2): 152 - 159.
- [10] 潘宁, 于良耀, 张雷, 等. 电液复合制动系统防抱控制的舒适性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 52(1): 9 - 16.
- [11] 王骏骋, 何仁. 电动车辆 ABS 的改进线性二次型最优控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 050(009): 108 - 115.
- [12] 王骏骋, 何仁. 电动轮轮内主动减振器的非线性最优滑模模糊控制[J]. 汽车工程, 2018, 40(6): 719 - 725.
- [13] 赵治国, 张军腾, 吴袅威, 等. 基于 ABS 的四驱 HEV 串联式电液复合制动控制[J]. 中国公路学报, 2015, 25(11): 124 - 133.
- [14] YIN J, ZHA N C, ZHANG J. Design and analysis of electro-mechanical hybrid anti-lock braking system for hybrid electric vehicle utilizing motor regenerative braking[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(1): 42 - 49.
- [15] 宋世欣, 王庆年, 王达. 电动轮汽车再生制动系统控制策略[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 341 - 346.

(责任编辑 杨黎丽)