

燃料电池汽车并行复合制动系统开发^①

刘清河^② * ** 孙泽昌 **

(* 哈尔滨工业大学(威海)汽车学院 威海 264209)

(** 同济大学汽车学院 上海 201804)

摘 要 通过对复合制动系统功能需求的分析,提出了基于反比例溢流控制的并行复合制动系统方案及其控制系统结构。通过对再生制动控制算法约束条件的分析,提出了基于再生制动系统外特性的再生制动控制算法及其 ECE 法规修正方法。通过试验获取了控制算法过程控制参数,采用硬件在环的方式对系统的控制效果和制动能量回收效率进行了仿真测试。结果表明,液压制动力能够良好地跟随再生制动控制算法分配的结果,在一次制动过程中,改进后的系统和算法能够提高能量回收效率 6.3%。

关键词 燃料电池汽车(FCV),复合制动,再生制动,再生制动控制算法

0 引 言

复合制动系统作为燃料电池汽车、混合动力汽车等新能源汽车的重要关键技术,受到了国内外各企业和研究机构的高度重视。丰田公司 PRUISE 混合动力汽车装配了复合制动系统,提高了制动能量回收效率和整车经济性能^[1]。福特燃料电池汽车装配了大陆公司的电子液压制动(electronic hydraulic brake, EHB)系统。博世、天合等公司也在大力开发其复合制动系统^[2]。针对复合制动系统再生制动控制算法,国内外各研究机构针对复合制动系统结构提出了多种控制算法。并行再生控制策略由于具有较好的可行性而受到广泛的关注。燃料电池大客车已应用了并行再生制动控制策略^[3]。电动汽车也采用了基于欧盟经济委员会(ECE)标准约束的并行再生制动控制策略^[4]。

然而,鉴于车辆制动系统的高可靠性要求,众多的并行再生制动控制策略的研究均不改变液压制动系统结构,液压制动力作为不可控部分,电机再生制动力在其基础上叠加,因而限制了制动能量回收效率的提高。因此,要进一步提高并行复合制动系统的效率则必须实现液压制动的可控,并设计与之相适应的控制策略。本文结合燃料电池汽车制动系统,开发了更高效的并行复合制动系统结构及其控制算法。

1 复合制动系统结构研究

1.1 功能需求分析

复合制动是指在新能源车辆制动时,机械式液压制动力施加于车轮的同时,驱动电机也对车轮施加再生制动力,从而在完成车辆有效制动的同时回收制动能量。为了尽可能多地回收制动能量,系统要求在再生制动力满足制动需求的情况下优先使用再生制动力。因此复合制动系统应该具备以下的几项功能:(1)保证制动安全性。即在相同的驾驶员输入下,必须达到或超过传统制动系统的制动强度,并保证制动时方向的稳定性,确保车辆的安全性。(2)有效回收制动能量。在保证整车制动性能条件下,通过有效的再生制动力控制算法,尽可能多地回收制动能量。(3)保证驾驶员的刹车感受。复合制动时,同样的制动强度下,相应的前后液压制动力会下降,驾驶员踏板力减小。复合制动系统要通过控制算法或系统结构的优化,实现踏板力、踏板位移、制动减速度的平滑对应,保证驾驶员的刹车感受。(4)制动力可控。传统的液压制动系统中制动器摩擦力的施加仅仅受控于驾驶员的脚踏板力。车辆的液压制动力与驾驶员踏板力具备单值对应关系,无法实现再生制动力的单独施加。因此复合制动过程中,液压制动力和电机制动力必须灵活可控。一般而言,电机再生制动力都具备灵活控制的能力,所以

① 863 计划(2003AA501033)和上海市科技攻关计划(07dz12032)资助项目。
② 男,1977 年生,博士生,讲师;研究方向:汽车电子控制技术;联系人,E-mail: qinghelu@sina.com
(收稿日期:2009-04-20)

复合制动系统与传统制动系统的最大区别之处就是增加液压制动力控制装置。(5)具有可靠的机械备份制动能力。由于制动系统对整车安全性能至关重要,而电子控制系统的可靠性相对较低,复合制动系统必须保证电气故障时仍然能够实现制动过程。

1.2 并行复合制动系统结构

鉴于以上的复合制动系统功能分析,本文提出了一种新型的制动系统改型方案,该方案可以满足并行再生制动控制算法对液压制动系统功能需求(专利号:200620045353.4),方案的结构组成如图1所示。

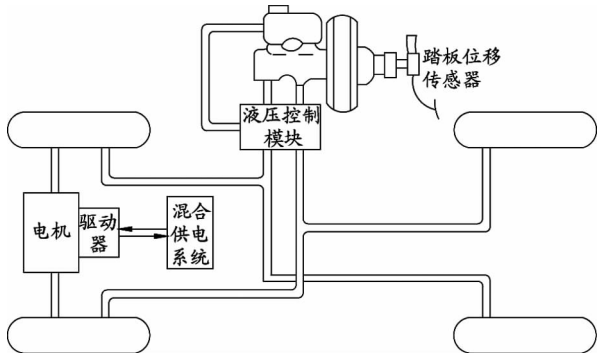


图1 并行复合制动系统结构组成

并行复合制动系统的设计应用对象为同济大学研发的“超越3号”燃料电池汽车,该车采用前轮中央电机驱动,再生制动力只能施加于前轮。制动系统管路采用X型连接,电动真空助力。

为了在同样的踏板位移输入下,电机再生制动力与液压制动力同时施加在车轮上时能够保持与传统车辆同等的制动减速度,需要使并行复合制动液压控制模块在同等踏板位移下的控制制动管路压力下降,从而减小液压制动力。

与传统的液压制动系统相比,并行复合制动系统增加了踏板位移传感器和液压控制模块以控制制动管路的压力,并且在液压控制模块与储油器之间增加回油管路。

1.3 复合制动系统控制系统方案

制动过程中,并行复合制动系统控制器(electric control unit of brake system, BECU)通过检测踏板位移解释出目标的汽车制动减速度,并从整车控制器(vehicle manage system, VMS)接收车速、蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)等信息,并行再生制动控制算法确定出再生制动力与液压制动力之间的分配关系,根据液压制动力的分配结果控制液压控制模块,通过控制电磁阀实现相应的液压制动力。将分

配得到的再生制动力传递给电机控制器(motor control unit, MCU),由MCU执行得到需要的再生制动力。系统工作逻辑框图如图2所示。

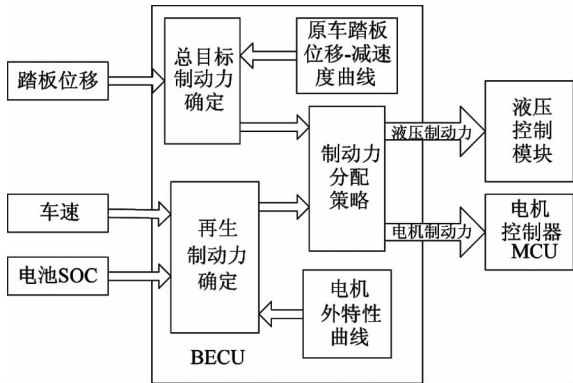


图2 并行制动系统控制逻辑框图

2 再生制动控制算法研究

2.1 再生制动控制约束条件分析

再生制动的控制算法设计就是在保证整车制动性能的前提下,设计回收能量最大的液压制动和再生制动分配策略。再生制动控制算法在设计中的约束条件有:

(1)液压制动系统结构。液压制动系统结构是对再生制动控制算法影响最大的约束条件。传统的液压制动系统前后轮制动力只能按照固定的分配线上升。当制动进入复合制动状态时,具备再生制动能力的驱动轮上必须并行地附加相应的液压制动力才能使系统完成制动强度需求。

(2)目标制动强度需求。复合制动过程中,再生制动力与液压制动力的总和必须满足目标制动强度的要求。在同样的驾驶员踏板输入下,复合制动系统必须与传统液压制动系统产生相同的制动强度。

(3)制动稳定性。复合制动过程中,由于在驱动轮上施加了再生制动力,因此会改变原制动系统前后制动力的分配比,影响整车制动稳定性。再生制动控制算法设计中,必须使前后制动力分配比满足ECE法规的要求。

(4)再生制动系统性能。电动汽车再生制动系统由电动机和蓄能装置组成。此系统在设计中是以满足整车驱动性能为目标的[5]。而在制动过程中,所需的最大制动功率往往会高出最大驱动功率数倍。

电机对复合制动的约束表现为再生制动力不得超出电机外输出特性曲线的范围。电机具有低速时

恒扭矩和高速时恒功率的输出特性。车速越高,电机再生制动能力越低。

蓄电池对再生制动的约束表现为两个方面:蓄电池 SOC 和最大充电电流。每一种电池都对 SOC 的运行范围有固定的要求,锂离子电池 SOC 运行范围是 30% ~ 70%,超出范围的过充和过放都会对电池造成不利的影响。由于一次制动回收能量不会使蓄电池 SOC 发生明显变化,因此只需在再生制动过程实施前确认电池 SOC 不在运行范围的上限即可。蓄电池充电电流约束表现在电机上时,与电机的最大功率约束性质相同,约束时两者取较小值。

2.2 基于再生制动系统外特性的并行再生制动控制算法

控制算法的基本思想是每次分配时先确认再生制动系统的最大制动能力 $F_{\max}$,当目标制动强度 z_0 对应的总制动力需求 $F_{bd} < F_{\max}$ 时,采用纯再生制动;否则进入复合制动。复合制动过程中,根据车速下降情况,以实时车速下对应的最大再生制动能力为再生制动力,其余的部分由液压制动力补充。

再生制动系统的最大制动能力取决于其最大外输出特性。再生制动系统在高速时,为恒功率特性;在低速时,为恒扭矩特性。燃料电池汽车驱动系统输出特性如图 3 所示,电机转速正比于车辆速度,不同车速下的 $F_{\max}$ 可以通过查表特出。

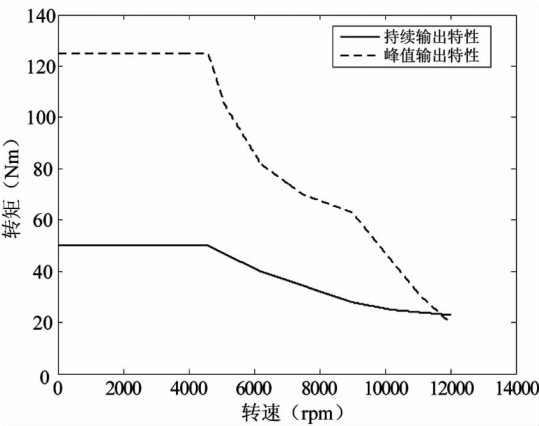


图 3 再生制动系统外特性

在纯再生制动阶段和复合制动阶段的制动力分配分别由式(1)和式(2)表示:

$$F_m = F_{bd}, F_{hr} = F_{hf} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{cases} F_m = F_{\max} \\ F_{hr} = (1 - \beta)(F_{bd} - F_{\max}) \\ F_{hf} = \beta(F_{bd} - F_{\max}) \end{cases} \tag{2}$$

式中, F_m 为电机再生制动力; F_{hf} 、 F_{hr} 为前后制动器液压制动力; β 为前后液压制动力分配比。

在不同的车速下制动时,得到的再生制动分配曲面如图 4 所示。

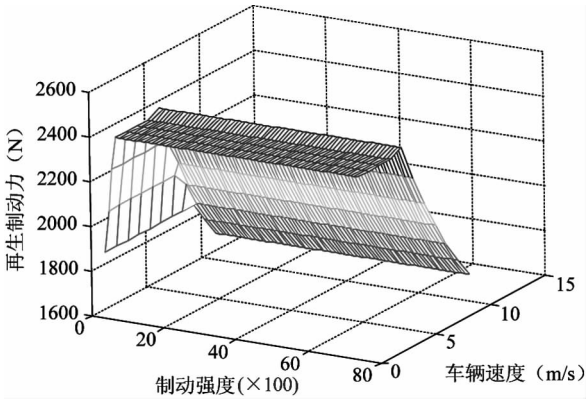


图 4 再生制动分配曲面

2.3 ECE 法规修正方法

由于算法首先保证了最大的再生制动能力,因此对前后制动力分配的影响也是最大的,特别是在低速下制动时,容易突破 ECE 法规的限制。在低速下制动时,计算得 ECE 法规对前轮制动力的最大限制线与算法最大再生制动力时的前后分配力曲线的关系如图 5 所示。

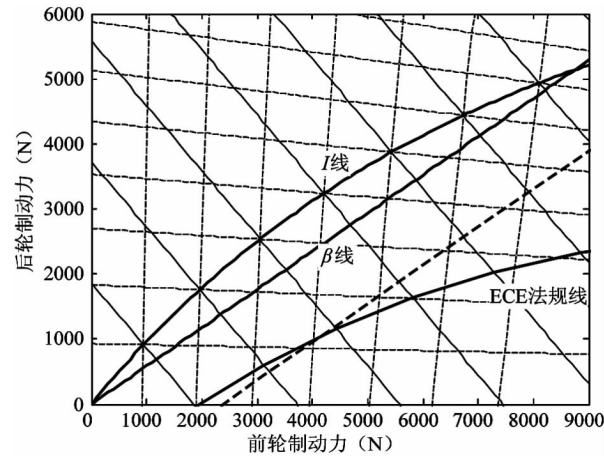


图 5 低速时制动力分配状态

从图 5 中可以看出,分配结果突破了 ECE 法规的限制,必须对算法添加 ECE 法规约束。

修正的方法如图 6 所示。如果基本算法分配的结果在 ECE 法规以外,如 A 点,则从将分配结果修正在 ECE 法规线与对应的等制动强度线的交点 B 上。

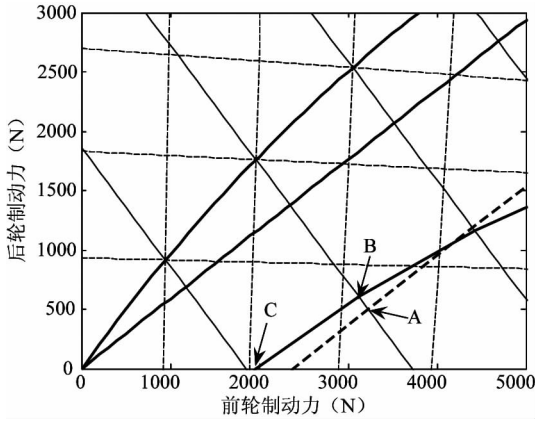


图6 修正过程示意图

具体算法:在车辆目标制动强度 z_0 下,

1)当 $F_{\max} \geq F_{bd}$ 时,求解方程组

$$\begin{cases} F_{xb1} = \frac{z + 0.07}{0.85} (b + zh_g) G/L \\ 0 = Gz - F_{xb1} \end{cases} \quad (3)$$

得 $F_{xb1} = F_{xb1C}$, F_{xb1C} 为 C 点对应的前轴制动力。

①若 $F_{\max} \leq F_{xb1C}$, 则再生制动力矩 $F_m = F_{bd}$, 前轮液压制动力 F_{hf} 和后轮液压制动力 F_{hr} 均为 0。

②反之需要修正。具体公式是:

$$\begin{aligned} F_{xb1} &= \frac{z_0 + 0.07}{0.85} (b + z_0 h_g) G/L \\ F_{hr} &= F_{xb2} = Gz_0 - F_{xb1} \\ F_{hf} &= \frac{\beta}{1 - \beta} F_{hr} \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_m = F_{bd} - F_{hr} - F_{hf}$$

式(3)和式(4)中, F_{xb1} 为前轴制动力, F_{xb2} 为后轴制动力, G 为整车重量, L 为车辆轴距, b 为后轴到质心的距离, z 为制动强度。

2)当 $F_{\max} < F_{bd}$ 时,初步分配前后轮液压制动力沿前后制动力比 β 线上升。考察是否需要修正,解方程组

$$\begin{cases} F_{xb1} = \frac{z + 0.07}{0.85} (b + zh_g) G/L = F_{hf} + F_m \\ F_{xb2} = Gz - F_{xb1} \end{cases} \quad (5)$$

得 $F_{xb2} = F_{xb2B}$, F_{xb2B} 为 B 点对应的后轴制动力。若按照式(2)初步分配的结果 $F_{hr} > F_{xb2B}$, 则不需要修正。反之则需要修正,修正结果为:

$$\begin{aligned} F_{xb1} &= \frac{z_0 + 0.07}{0.85} (b + z_0 h_g) G/L \\ F_{hr} &= F_{xb2} = Gz_0 - F_{xb1} \\ F_{hf} &= \frac{\beta}{1 - \beta} F_{hr} \\ F_m &= F_{bd} - F_{hr} - F_{hf} \end{aligned} \quad (6)$$

ECE 约束修正后的制动力分配结果如图 7 所示。

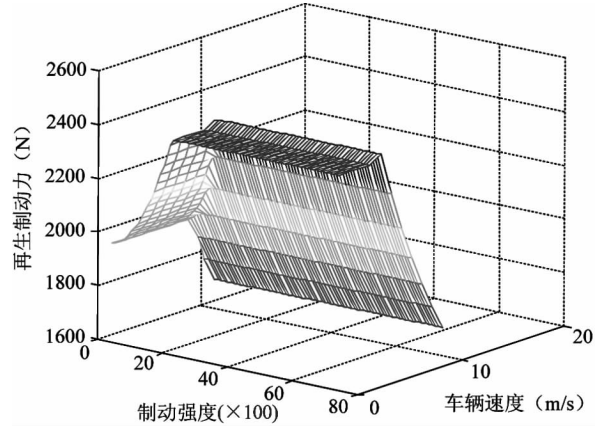


图7 ECE 法规修正后的再生制动分配结果

将图 4 与图 7 对比可以发现,修正的区域集中在低速制动时的纯再生制动阶段和低制动强度的复合制动阶段。修正后的分配结果可以同时满足再生制动系统外特性的约束和 ECE 法规的约束。

3 复合制动控制硬件在环试验研究

复合制动过程中,再生制动力由电机及其控制器完成施加,认为只要分配的结果满足其外特性约束即可以完成施加。因此试验研究的主要目的是匹配液压控制模块的控制参数,验证其对液压制动力的控制效果,并验证再生制动控制策略的执行效果及复合制动系统的能量回收效率。

3.1 试验系统

以 Matlab/xPC 为软件环境,建立了如图 8 所示的并行复合制动系统硬件在环试验系统。

试验系统主要由 3 个部分组成:xPC 主机、xPC 目标机和在环硬件,其中在环硬件包括液压控制模块、复合制动电子控制器、制动系统组件。液压控制模块采用反比例溢流阀组建立,电子控制器采用数字式 PID 电流闭环控制方式。制动系统采用超越 3 号制动系统。其中虚拟硬件主要包括整车模型、轮胎模型、锂离子蓄电池模型和电机及控制器模型四个部分^[6]。

3.2 控制算法参数获取

3.2.1 原始制动系统踏板特性

控制算法的基本约束之一是复合制动系统与原制动系统在同样的踏板位移产生同样的制动减速度。因此首先测试原始制动系统踏板——制动液压特性曲线作为计算总目标制动力的依据。通过试

验,超越 3 号制动系统踏板特性如图 9 所示。

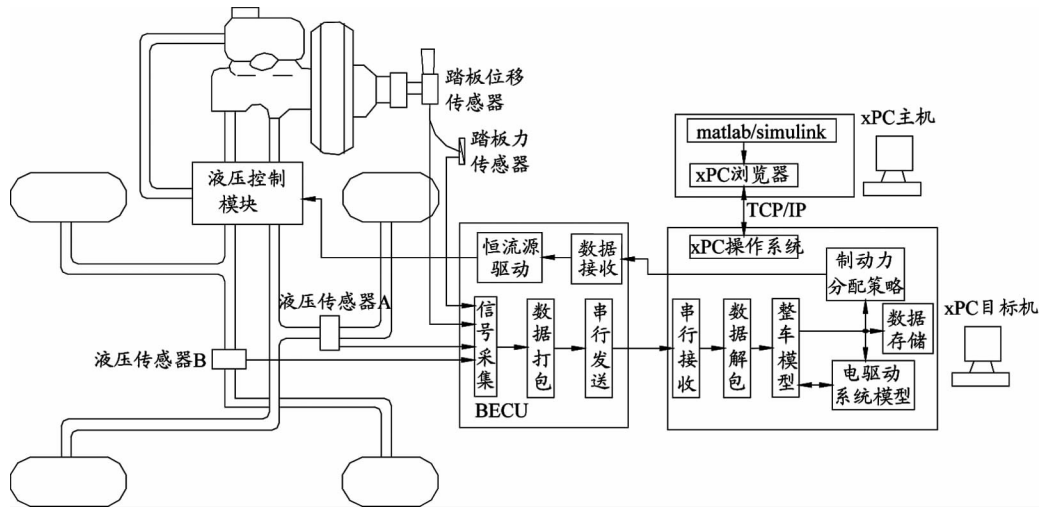


图 8 并行复合制动系统硬件在环测试系统

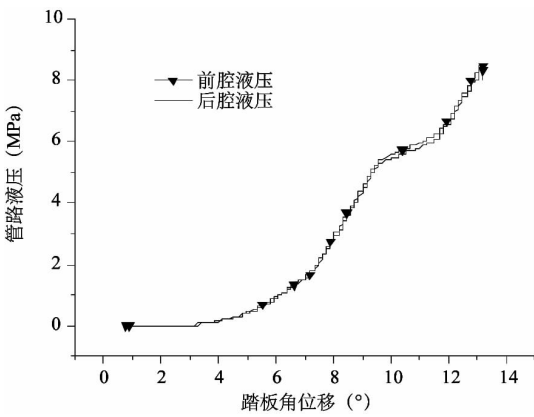


图 9 超越 3 号制动踏板特性

3.2.2 反比例溢流阀压力控制特性

系统采用反比例溢流阀控制管路压力,其溢流压力与控制电流成反比例关系。通过试验测得此关系曲线如图 10 所示,液压根据此曲线开环控制。

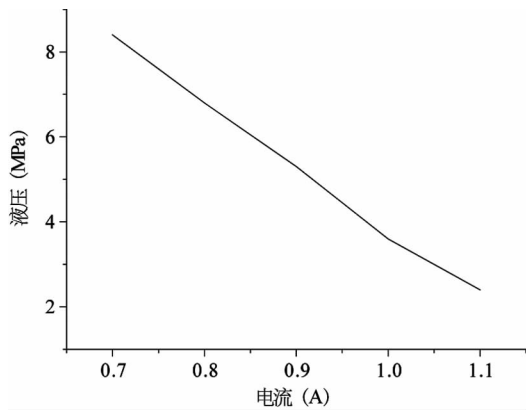


图 10 反比例溢流阀控制特性曲线

3.2.3 纯再生制动时管路残余压力值 P_0 的确定

在理论的并行再生制动控制算法上,纯再生制动阶段,管路残余压力应该为零。然而在硬件在环测试中发现,如果将此管路残余压力控制为零则会出现复合制动阶段无法及时补充液压制动力,造成制动强度不足的情况。试验的数据如图 11 所示。

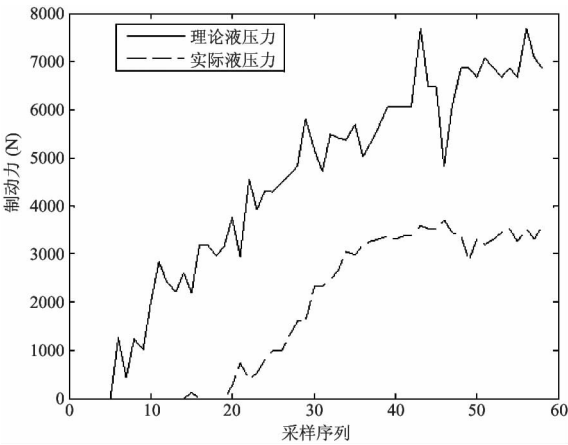


图 11 P_0 为零时复合制动液压控制结果

通过图 9 可以看出,原制动系统液压输出特性在整个工作区间内有明显的刚度变化,其中最初始的低刚度区对应的即是制动器间隙消除阶段。在不同的车型的制动系统测试时,此初值的数值略有差异,大概在 1MPa 左右。在复合制动开始之前必须控制液压制动系统度过此低刚度区,否则当溢流阀关闭时,管路液压不能直接进入高刚度区而实现理论液压力的跟随。

3.3 复合制动控制效果

通过在不同的车辆初速度下进行制动过程的硬件在环测试,得到的数据如图 12 和图 13 所示。

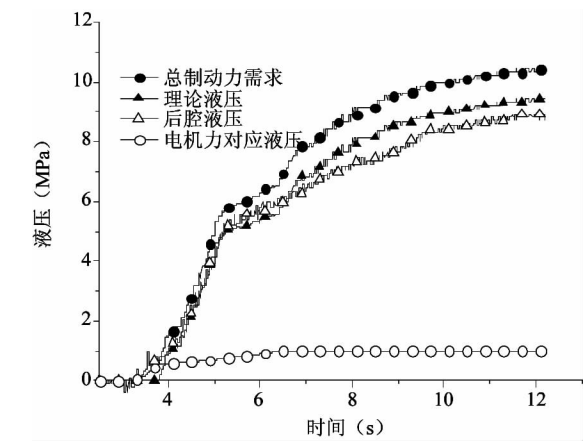


图 12 初速度为 100km/h 时,复合制动控制结果

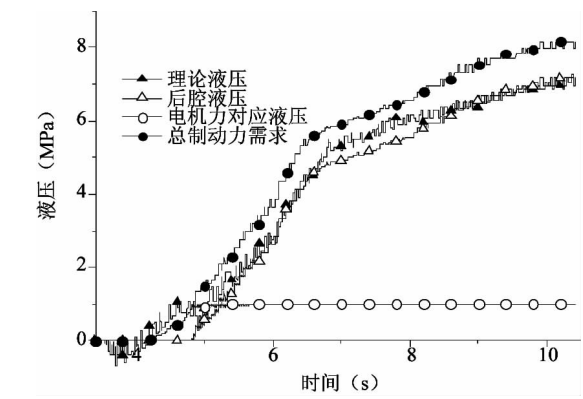


图 13 初速度为 60km/h 时,复合制动控制结果

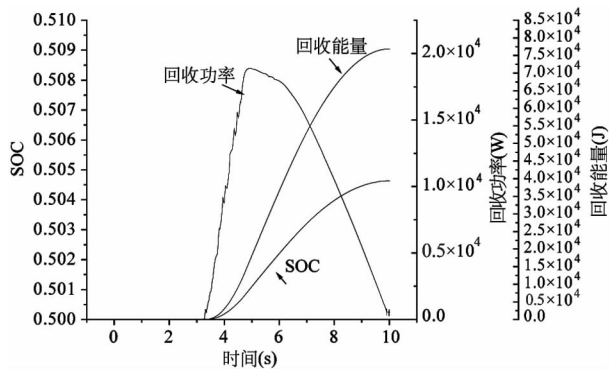
从图 12 和 13 中可以看出,在纯电制动阶段,液压上升到残余压力 P_0 后保持不变,随着踏板深度增加,系统进入复合制动过程,实际液压随着理论液压增长,液压跟随误差较小。低速制动市,电机再生制动能力强,控制过程更加明显。

3.4 再生制动状态

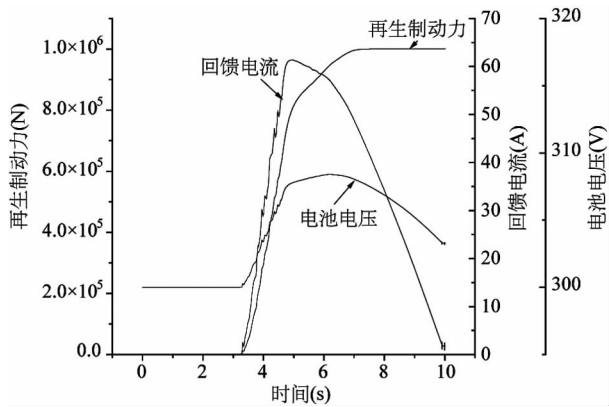
对于电气系统仿真的数据如图 14 所示。
仿真结果显示复合制动过程中,动力蓄电池最大回收功率 18.9kW,最大回馈电流 61.4A。在一次制动后蓄电池电压最终上升了 3V,电池 SOC 上升了 0.46%,共回收能量 77kJ,汽车制动初速度为 60km/h,质量 1900kg,车辆总动能 264kJ,回收总效率为 29%。

3.5 液压控制前后对比分析

为了更进一步研究本文并行复合制动系统设计的效果,在同样状态下,对不进行液压系统改动的并



(a)



(b)

图 14 复合制动过程中车辆状态数据

行复合制动系统进行分析,将结果进行对比。

有无溢流控制的制动管路液压在同样的踏板力输入下对比如图 15 所示。

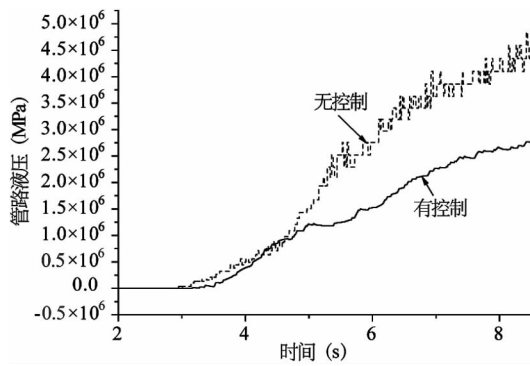


图 15 有无溢流控制管路压力对比图

从图 15 中可以看出,控制后的液压在复合制动阶段明显下降。

控制前后能量回收的状态对比如图 16 所示。
数据分析显示,无控制时,动力蓄电池最大回收功率为 18.7kW,最大回馈电流为 60.9A。蓄电池电压最终上升在一次制动后上升了 2.4V,电池 SOC 上

升了 0.36%，共回收能量 60kJ，回收总效率为 22.7%。控制后能量回收提高了 6.3%。

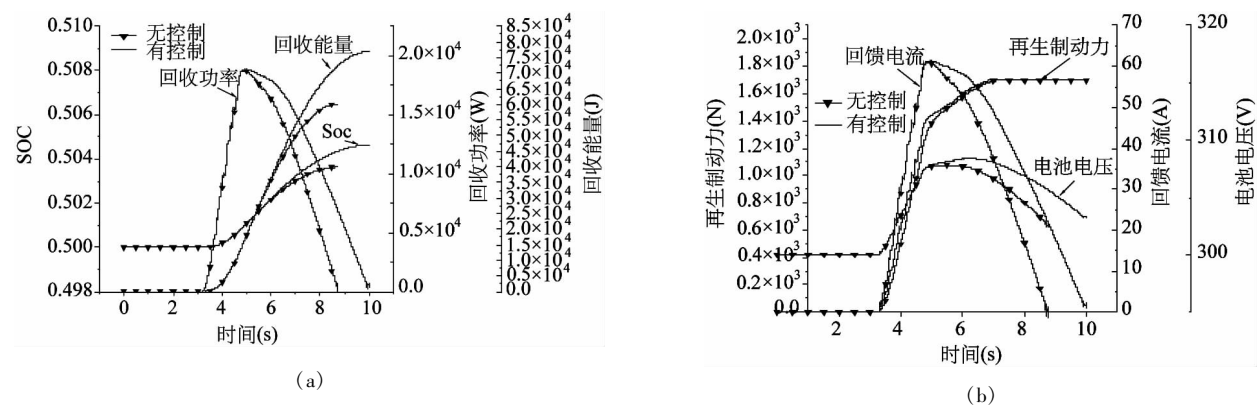


图 16 有无溢流控制能量回收状态对比图

4 结 论

在对复合制动系统功能需求分析的基础上,建立了新型的复合制动系统结构和控制方案。通过对再生制动控制算法约束条件的分析,建立了基于再生制动系统外特性的再生制动控制算法和 ECE 法规修正算法,得出了再生制动分配曲面。通过试验确定了系统控制参数,并采用硬件在环的手段对控制效果进行测试。结果表明,液压控制结果可以跟随理论分配曲线,一次制动过程能量回收可以达到 29%。通过改型前后系统在同样控制算法下制动过程的分析,阐明了改型系统的优越性,同样制动过程能量回收效率提高 6.3%。

参考文献

[1] Nakamura E, Soga M. Development of electronically controlled brake system for hybrid vehicle. In: Proceedings of the SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, USA, 2002

[2] 张元才. 电动汽车复合制动系统关键技术研究: [博士学位论文]. 上海: 同济大学汽车学院, 2008. 15-22

[3] 周磊, 罗禹贡, 杨殿阁等. 混联式混合动力车多能源动力控制系统的开发. 机械工程学报, 2007, 43(4): 125-131

[4] 赵国柱, 杨正林, 魏民祥等. 基于 ECE 法规的电动汽车再生制动控制策略的建模与仿真. 武汉理工大学学报, 2008, 32(1): 149-152

[5] 孙泽昌, 魏学哲, 钟再敏. 燃料电池汽车动力系统功率平衡控制策略. 机械工程学报, 2005, 41(12): 3-8

[6] Sun Z C, Liu Q H. Research on electro-hydraulic parallel brake system for electric vehicle. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Shanghai, China, 2006

Design of a parallel hybrid brake system for FCV

Liu Qinghe^{***}, Sun Zechang^{**}

(^{*} Automotive School, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209)

(^{**} Automotive School, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract

Based on the functional requirements analysis of hybrid brake systems, a parallel hybrid brake system scheme and its control system configuration are proposed. Base on the constraint condition analysis of regenerative brake control strategies, a strategy founded on regenerative brake systems' external characteristics and its modification algorithm is provided. Control strategy parameters are acquired by experiment and the effect and efficiency of hybrid brake systems are tested using the hardware-in-loop simulation. The experiment data shows that hydraulic brake force can follow the distributing result of regenerative brake control strategies and the regenerative efficiency is improved 6.3%.

Key words: fuel cell vehicle (FCV), hybrid brake, regenerative brake, regenerative brake control strategy