

文章编号:1671-1637(2016)01-0073-07

电动汽车电池温度加权 PID 控制

秦大同,黄晶莹,刘永刚,胡明辉

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:针对纯电动汽车锂离子电池,建立了二自由度集中参数电池热模型,结合汽车行驶动力学模型,得到了电动汽车实际运行工况下电池的实时热响应模型。通过混合动力脉冲能力特性试验获得了电池热模型的参数,分析不同运行工况下电池的热响应,提出了基于加权比例积分微分法的再生制动控制策略。在满足制动安全性的前提下,通过调节电机制动力分配系数来实现电池充电电流的主动控制,从而控制生热源。在典型循环工况下,对比分析了再生制动控制策略与传统制动控制方案的电池热响应。分析结果表明:再生制动对电池的温升产生一定影响,汽车运行工况中再生制动的比例越大,电池温升越快;再生制动控制方案能够有效地调节充电电流幅值,在美国激进高速循环工况的长下坡条件下,电池的最高温度比传统制动控制方案降低了 2°C ,电池荷电量提高了10%,因此,再生制动控制策略能在确保能量回收的同时兼顾电池温升的主动控制。

关键词:汽车工程;再生制动控制;充电电流控制;加权PID控制;电池热管理;主动控制

中图分类号:U463.633

文献标志码:A

Weighted PID control of battery temperature for electric vehicle

QIN Da-tong, HUANG Jing-ying, LIU Yong-gang, HU Ming-hui

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A two degrees of freedom lumped parameter thermal model of lithium-ion battery for electric vehicle was developed. In order to obtain the real-time thermal responses of battery, the thermal model was combined with vehicle driving dynamics model. The parameters of thermal model were obtained by hybrid pulse power characterization test. The thermal responses of battery under different driving cycles were analyzed. A regenerative braking control strategy based on the weighted proportion integration differentiation (PID) method was proposed, the active control of charging current for battery was realized by adjusting the distribution coefficient of braking force for electromotor on the premise of meeting braking safety, so that the generating heat source of battery was controlled. The thermal responses of regenerative braking control strategy and traditional braking control strategy were analyzed under the typical driving cycles. Analysis result indicates that regenerative braking has definite impact to the temperature rise of battery, the greater the proportion of regenerative braking under the driving cycles is, the faster the temperature rise of battery is. The regenerative braking control strategy can effectively adjust the charging current amplitude of battery, the highest temperature of battery reduces by 2°C than the traditional braking control strategy under the long downhill condition in American radical high-speed driving cycles, and the charging capacity of battery increases by 10%.

收稿日期:2015-08-15

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAG12B01)

作者简介:秦大同(1956-),男,重庆人,重庆大学教授,工学博士,从事电动汽车关键技术研究。

Therefore, the regenerative braking control strategy can ensure the energy recovery and actively control the temperature rise of battery at the same time. 14 figs, 23 refs.

Key words: automotive engineering; regenerative braking control; charging current control; weighted PID control; battery thermal management; active control

Author resume: QIN Da-tong(1956-), male, professor, PhD, +86-23-65104217, dtqin@cqu.edu.cn.

0 引 言

电动汽车动力电池的设计要求为安全可靠、具有良好的充放电性能和较长的使用寿命。围绕电池安全性的主要问题是由于电池过热和模块间温度不均现象而导致的热失控问题^[1]。纯电动汽车电池连续工作在充电和放电模式,电池处于持续生热状态,当环境温度较高或充放电需求功率较大时,由于散热不均会引起电池局部温度过高,严重的会破坏整个电池组,甚至起火^[2]。而单体间温度不均会造成内阻差异,影响充放电性能一致性,降低电池容量^[3]。电池温度管理对提高电池安全性能 and 使用寿命非常重要。

在电动汽车动力电池热管理方面有很多科研成果,主要集中在改善冷却系统和单体电池静态热性能两方面。Kizilel 等分别通过提高冷却介质流速、冷却管分布、降低冷却介质温度等方式带走电池废热^[4-8],结果表明冷却效果有限,不能将电池温度有效地控制在允许工作温度范围内;Balakrishnan 等开发了电池热管理系统,在热管理控制策略中采用温度补偿的方式,电池的允许充电的最高温度被设为定值,超过这一值,则不允许再生制动,限制了能量回收,或者只考虑驱动模式下的电池温升,忽略了再生制动工况下的温升^[9-13];Chacko 等基于有限体积法建立了锂离子单体电池的三维电化学模型,通过试验验证了模型的准确性,并通过模型得到单体电池单独充电或放电的热响应^[14];Kim 等建立了单体二维集总参数电化学模型,研究了恒倍率充电下的电池热响应^[15]。以上研究为动力电池热分析建模方法提供了参考,但局限于单体电池,恒倍率充放电或单独充、放电工况的电池热效应,没有考虑充、放电对电池生热的相互影响,更没考虑汽车实际运行工况下随着充放电模式更替,充放电功率、充放电时长、电池荷电量(State-of-Charge, SOC)、温度等状态参数的实时变化。

目前,电池热管理研究主要存在以下问题:采用被动式冷却方法,冷却效果不足且需要额外的能量消耗;单体电池静态热效应以及单独充电或放电工

况不能准确反映实际运行工况下电池的热效应。针对上述问题,本文提出了采用加权比例积分微分(PID)控制再生制动工况下的充电电流幅值,实现充电温升控制,从而降低整个循环工况累积温升的方法。首先建立了基于有限体积法的二维集总参数热模型与结合行驶仿真建立了基于行驶工况的电池组热模型,通过混合动力脉冲功率特性(Hybrid Pulse Power Characteristics, HPPC)试验获得了模型参数;提出基于加权 PID 控制的再生制动工况电池温度控制策略,在满足制动力分配安全性的前提下,通过主动调节电机再生制动力占总制动力的比例(再生制动力比例)实现在车辆行驶工况中对电池生热量和电池温升的主动控制;最后,通过对比仿真验证了该控制方法对电池温升控制的有效性,并提出了该控制策略的适用工况。

1 电池组热模型

本研究中的锂离子电池组由 17 个串联而成的电池模块组成,每一个电池模块由 2 个并联的电池串组成,每一个电池串包含 6 个串联成的电池单体,其结构见图 1。在高温环境下,电池充放电性能大幅下降,温升导致电池内部反应加快,这个过程中放出的热量又导致温度继续上升,正反馈循环导致热失控,使电池丧失稳定性,降低了使用寿命。根据电池材料和结构,建立热模型之前进行如下合理假设。

(1) 电池分布为平板式,根据传热学毕奥数理



图 1 电池组结构

Fig. 1 Battery pack structure

论^[16],毕奥数较小,可以采用集中参数法研究其温度分布。

(2) 电池材料的热特性可以等效为线性响应^[17],电池的温度响应可以根据叠加原理,将热源集中在高温处,而最高温度和最低温度位置通过热传导传递热量。

(3) 假设散热条件固定,由于生产条件导致的模块或单体间的差异也是固定的,因此,电池工作后的最高温度和最低温度位置是基本固定的。

根据以上合理简化和假设,参照二自由度集中参数模型^[18],可以得到电池最高温度位置与最低温度位置的热平衡方程分别为

$$\gamma V \rho c \frac{dT_1}{dt} = q_0 - q_1 - q_{21} - q_{31} \quad (1)$$

$$(1 - \gamma) V \rho c \frac{dT_2}{dt} = q_1 - q_{22} - q_{32} \quad (2)$$

生热功率^[19]为

$$q_0 = I_2 \left(U_1 - U_2 + T_1 \frac{\partial U_1}{\partial T_1} \right) = I_2^2 R(T_1, C, I_1) + I_2 T_1 \frac{\partial U_1}{\partial T_1} \quad (3)$$

式中: q_0 为电池发热功率; q_1 为电池内部热传导功率; q_{21} 为电池最高温度时的对流散热功率; q_{31} 为电池最高温度时的辐射散热功率; q_{22} 为电池最低温度时的对流散热功率; q_{32} 为电池最低温度时的辐射散热功率; γ 为电池最高温度位置的等效体积占比; V 为电池单体体积; ρ 为空气密度; c 为比热容; C 为电池荷电量; T_1 为电池最高温度; T_2 为电池最低温度; U_1 、 U_2 分别为电池开路电压和工作电压; I_1 、 I_2 分别为电池的充电电流与工作电流; $R(T_1, C, I_1)$ 为电池内阻,以下简化为 R 。

采用 HPPC 试验^[20]测得内阻与开路电压,测试结果分别见图 2、3。从图 2 的充放电内阻特性可以看出:充放电的内阻变化趋势大致相同,但相同 SOC 和环境温度条件下充放电的内阻值有差异;在

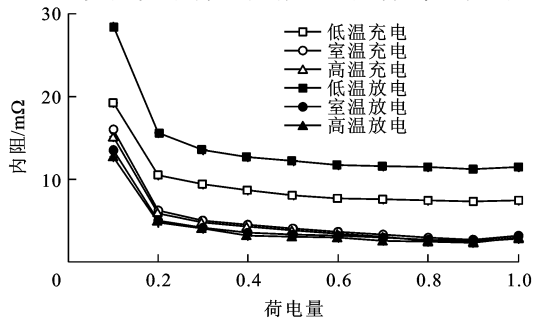


图 2 电池内阻

Fig. 2 Internal resistances of battery

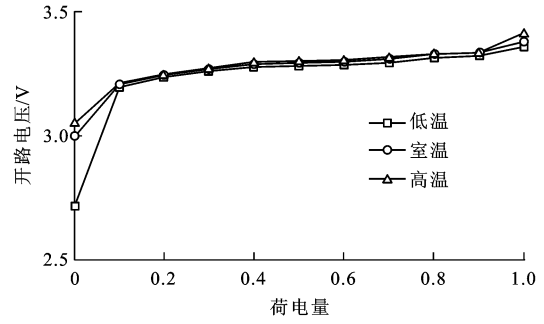


图 3 电池开路电压

Fig. 3 Open circuit voltages of battery

—10℃的低温环境中,充放电的内阻明显比 25℃、45℃的常温和高温环境下的内阻要大,而且内阻会随着放电深度的增大或放电倍率的增大而增大;当 SOC 在 0.2~1.0 的范围内时,内阻变化较平缓,而当 SOC 低于 0.2 时,内阻急剧增大;相比于 -10℃、25℃和 45℃下的内阻总体上受 SOC 与放电率的影响较小。而从图 3 可以看出:开路电压具有类似的变化趋势,在 SOC 为 0.2~1.0 的范围内变化平缓;在 SOC 低于 0.2 时快速下降;常温 25℃和高温 45℃下的开路电压变化不大。由于锂离子动力电池组工作温度在 25℃~45℃之间^[21],故温度影响系数可以选为常数。由于内阻焦耳热是电池工作中的主要热源^[22],而发热功率与电流的平方成正比,因此,当电池温度过高时或 SOC 较低时,应尽量避免大电流充电,以免造成电池温度进一步升高或温度升高过快而发生事故。

2 车辆行驶工况下电池充电分析

目前,对纯电动汽车锂离子动力电池热特性的研究和性能评价主要是基于恒倍率充电或放电的静态特性测试,而动力电池的生热速率和生热量受电池内部性能和外部条件共同影响,与电池充放电实际工况关系紧密^[21],因此,静态测试的电池热特性不能完全反映实际情况下的电池性能。首先,电池的充电状况会随着汽车行驶循环工况的变化而改变,充电电流的大小和充电时间都是动态变化的;其次,汽车在行驶循环工况中的驱动和制动模式是交替出现的,电池的充电和放电也随之交替进行,因此,电池总的温升是不断累加的,再生制动充电产生的电池热量会加速温度的提高;再者,从图 2、3 可以得知电池特性参数受温度、SOC 以及电池充放电倍率等因素影响较大,即使纯电动汽车制动需求恒定,随着环境和电池状态不同,电池组的充电热响应也不同,因此,为了准确反映电池在车辆实际运行工况

下的实际生热和温升,本文将动力电池的热模型与汽车行驶工况相结合,以研究电池在实际工况下的累积热响应。本文以前轮驱动的纯电动汽车为例,建立了行驶过程的动力平衡方程,为

$$m\dot{v} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 \quad (4)$$

式中: m 为整车质量; v 为车速; F_1 为前轮地面制动力; F_2 为后轮地面制动力; F_3 为空气阻力; F_4 为滚动阻力; F_5 为坡道阻力。

纯电动汽车的制动系统由再生制动系统与传统车辆原有的液压制动系统组成,相应的整车制动力由再生制动系统的电机制动力和液压制动系统的摩擦制动力组成。在制动时,基于制动控制策略,根据驾驶员制动需求,制动控制器分配前后轮的制动力和驱动轴上电机制动力与摩擦制动力。前轴制动力与总需求制动力之比为前轴制动力分配系数,即

$$\beta = \frac{F_1}{F_1 + F_2}$$

作用于前轴的再生制动力 F_6 与前轮制动力之比为电机制动力分配系数,即

$$\alpha = \frac{F_6}{F_1}$$

作用于驱动轮(前轮)的电机驱动力或再生制动力为

$$F_6 = \alpha\beta\delta(F_1 + F_2) \quad (5)$$

制动信号函数为

$$\delta(F_1 + F_2) = \begin{cases} 0 & \text{驱动}(F_1 + F_2 \geq 0) \\ 1 & \text{制动}(F_1 + F_2 < 0) \end{cases}$$

纯电动汽车再生制动分配策略必须首先满足制动时的安全性要求,为了避免后轮抱死侧滑与减少前轮抱死失去转向能力,前后轮制动力分配系数应兼顾制动稳定性和最短制动距离但优先稳定性的原则。根据 ECE No. 13H 法规^[23]得到图 4 的制动强度 z 与附着系数 φ 曲线,规定了 β 动态变化的区域。

设 η 为车辆动力系统的等效动力传动效率,则

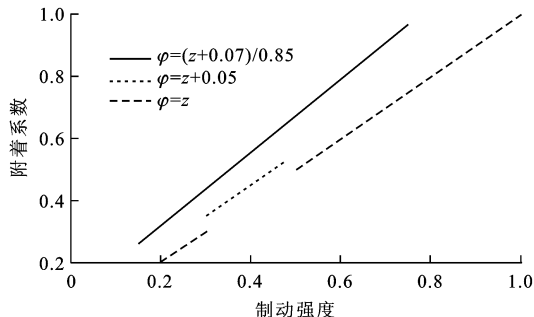


图 4 制动强度与附着系数曲线

Fig. 4 Curves of braking strength and adhesion coefficient

电池的输出或输入功率需求 P 为

$$P = \frac{F_6 v}{\eta} \quad (6)$$

由能量守恒定律可以得到电池开路电压与工作电流的关系为

$$U_1 I_2 = P + q_0 \quad (7)$$

$$U_1 - T_1 \frac{\partial U_1}{\partial T_1} = \frac{P}{I_2} + I_2 R \geq 2\sqrt{PR}$$

在一定温度与 SOC 下电池的最大放电、充电功率为

$$\max(|P|) = \left(U_1 - T_1 \frac{\partial U_1}{\partial T_1} \right)^2 / 4R \quad (8)$$

3 再生制动电池生热控制

3.1 再生制动与电池温升的关系

制动力分配系数 β 与 α 的确定方式为:根据车辆行驶安全性,结合图 4 的动态分配区域来确定 β , α 的确定需综合考虑制动能量回收率和电池的充电安全性。乘积 $\alpha\beta$ 决定了制动时电池的充电功率和充电电流。由于在电动汽车运行过程中电池的放电取决于驱动工况行驶时的需求功率,即便电池温度较高,仍不能限制电池放电的电流大小,但在制动时,可以通过控制制动时再生制动力占需求制动力的比例(简称再生制动比例),来避免电池温度较高时的大电流充电。通过调整制动比例来控制充电电流的主动控制热源的方法为解决电池热问题提供了新的途径。

为了对比有无再生制动对电池热响应的影响,选取 2 种制动方案:方案 1 为纯机械制动,方案 2 为最大化能量回收制动。本文选取 4 种典型的循环工况:美国激进高速循环工况(US06)、美国高速公路省油测试工况(HWFET)、欧洲汽车行驶油耗测试工况(ECE-EUDC)与欧洲经济委员会低载荷循环工况(ECE-EUDC Low Duty)进行电池的热响应分析。各行驶工况的车速与时间的关系见图 5。

通过分析方案 1、2 在 4 种典型循环工况下电池的热响应(图 6~8),可知通过控制电流降低温升的可行性。从图 6 可以看到,在 HWFET、ECE-EUDC 和 ECE-EUDC Low Duty 工况下 2 种制动方案的温升趋势比较接近,有无再生制动对电池温度影响不大。而图 7 显示在 US06 工况下,再生制动对最大温升与模块间温度不均的扩大作用明显。从整个 US06 行驶工况下电池累积温升的变化趋势可以看出:在工况运行初期, SOC 水平相对较高,再生制动

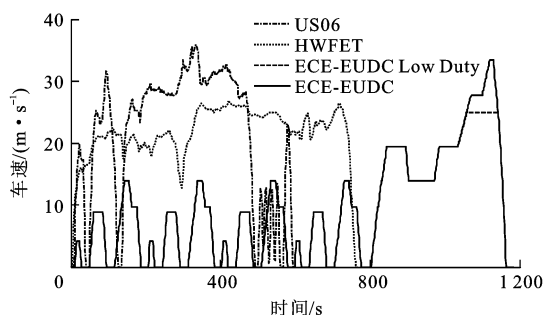


图 5 车速与时间关系曲线

Fig. 5 Relation curves of vehicle speed and time

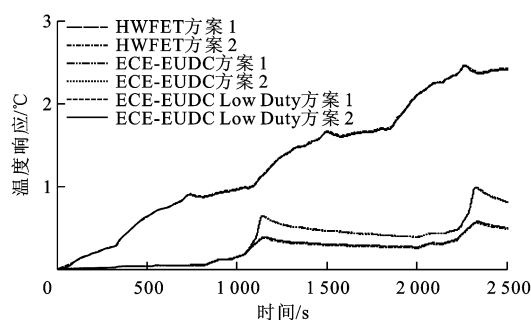


图 6 ECE-EUDC、ECE-EUDC Low Duty 与 HWFET 工况下的电池温度响应

Fig. 6 Temperature responses of battery under ECE-EUDC, ECE-EUDC Low Duty and HWFET

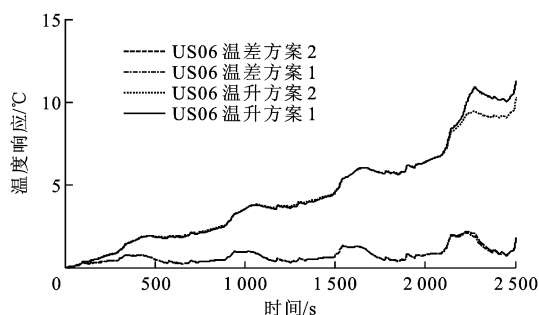


图 7 US06 工况下的电池温度响应

Fig. 7 Temperature responses of battery under US06

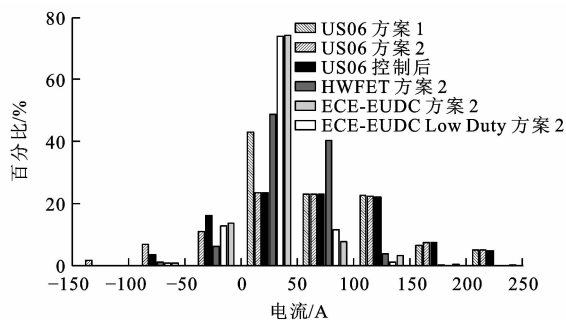


图 8 各行驶工况的电流分布

Fig. 8 Current distributions in different driving cycles

对升温影响不大;车辆运行一段时间后,方案 2 的电池温度比方案 1 略高,主要是因为方案 1 中只有驱动,电池仅放电发热,而方案 2 中电机驱动与制动交

替,放电和充电都会生热;在行驶工况后期,方案 2 的累积电池温升和温度差比方案 1 要低一些,主要是因为方案 1 中电池经过长时间放电,电池 SOC 水平下降较多,导致内阻增大与开路电压下降,使得电池温度快速上升,而方案 2 中,再生制动回收了能量,使 SOC 保持在一定范围内,避免了因 SOC 下降而导致电池充放电温升过快。对比图 6、7,可以发现再生制动在 US06 行驶工况下电池的温升比其他 3 种工况要大,这可以通过分析图 8 各工况电流分布得到解释,其中负的电流为充电电流。若 0~50 A 的电流为小电流,50~100 A 为中等电流,100 A 以上为大电流,从图 8 中可以看到 ECE-EUDC、HWFET 工况下再生制动时基本上属于小电流充电,而 US06 工况下中等及大电流比例的充电情况较多,因此,温升比较明显。

3.2 基于加权 PID 的充电电流控制

基于上述分析结果,本文提出通过调整再生制动比例控制充电电流,以降低电池的生热,进而控制电池的温升。该控制方法的实质为:减小再生制动中大电流占整个行驶工况中充电电流的比例,以降低电池整体的温升,延长小电流充电的时间以保证电池 SOC 处于适当水平。

具体控制方案为:在 SOC 较高时或电池温度较低时,制动能量回收的电流可以较大;在 SOC 较低或电池温度较高时应适当减小充电电流,即减小再生制动力占需求制动力的比例。而电池 SOC 和温度会随着行车工况的改变而动态变化,由于路况的多样性,会使控制变得复杂。结合上述控制方案,这样的问题很适合采用加权 PID 控制实现。

本文以提高能量回收和降低电池最高温度为目标,引入加权 PID 方法,以当前电池的 SOC 状态和电池的最高温度为控制器输入,对电池温度和 SOC 进行加权归一化处理,通过 PID 控制器实时调整再生制动分配系数。当 SOC 较低或电池温度较高时限制再生制动力比例为较低的值,反之则增大再生制动力比例。考虑到 SOC 特别低时内阻较大而开路电压较低,充电产生的生热速率更快,因此,充电电流要更小,即再生制动力比例较低,在满足制动工况需求的条件下尽量延长充电时间,回收尽可能多的能量。

3.3 典型工况控制结果分析

通过典型行驶工况下的电池热响应分析,可知在再生制动比例较大的工况,由充电电流引起的温升可控范围越大,控制方法发挥作用越大。为进一

步验证采用控制充电电流来降低电池最高温度和模块间温度差的方法的有效性,选择再生制动应用较多的长下坡工况和 US06 工况,进行电池热响应分析。采用 2 种制动控制策略:其一为传统的最大能量回收制动控制策略,电池最大允许工作温度限制在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, SOC 限制在 $0.2\sim 0.8$ 的范围内,超出范围则停止再生制动;其二为再生制动控制策略,通过引入加权 PID 控制充电电流,调节电流幅值,增大小电流充电的比例,同时衰减大的充电电流比例。从图 9 的温度响应可以看出本文提出的控制方法在长下坡工况下最高温升降低了近 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,其模块间的温升也有所降低。而从图 10 的电池 SOC 变化可以看出,进行主动电流控制后,电池 SOC 提高了 10% ,说明所提出的方法在保证更多能量回收的同时产热速率更慢,温升更小。图 11 为本文提出的控制方法和传统控制方法的充电电流分布,可以看出,控制后较大的充电电流比例减小,而小电流充电比例增大。

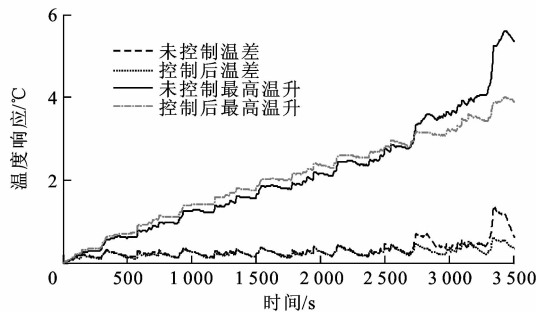


图 9 控制前后电池温度响应对比

Fig. 9 Comparison of temperature responses of battery before and after control

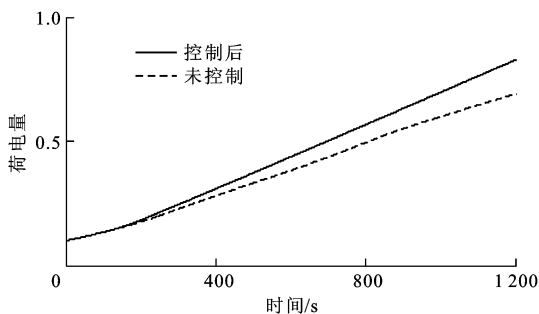


图 10 控制前后电池 SOC 变化对比

Fig. 10 Comparison of SOC variations of battery before and after control

US06 工况下的仿真结果对比见图 12~14。从图 12 的温度响应可以看出,所提的控制方法能有效控制温升。运行一段时间后,能量回收率有所提高,能量回收总量增加,见图 13。图 14 的电流分布显示控制后大的充电电流比例下降,中等幅值电流增

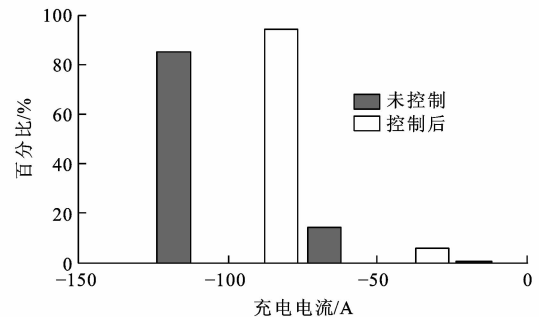


图 11 控制前后电池充电电流比例分布对比

Fig. 11 Comparison of discharge current distributions of battery before and after control

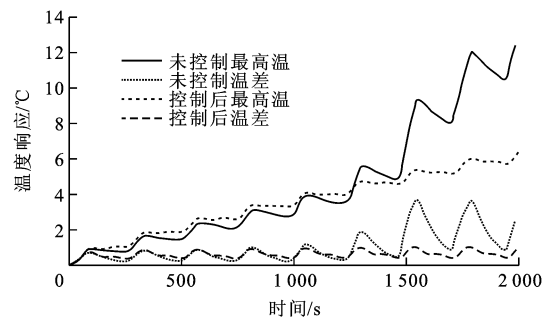


图 12 控制前后 US06 工况下电池温度响应对比

Fig. 12 Comparison of temperature responses of battery before and after control under US06

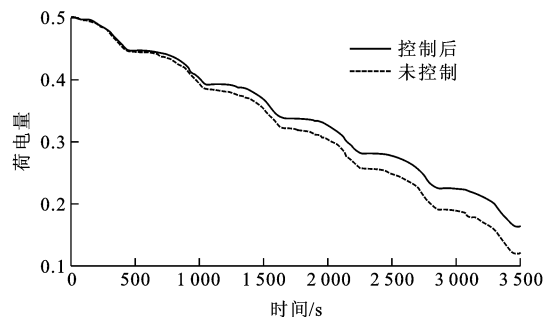


图 13 控制前后 US06 工况下电池 SOC 变化对比

Fig. 13 Comparison of SOC variations of battery before and after control under US06

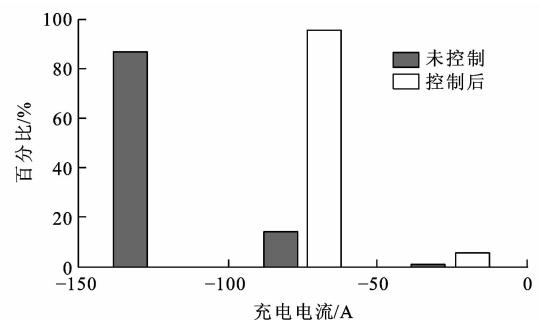


图 14 控制前后 US06 工况下电池充电电流比例分布对比

Fig. 14 Comparison of discharge current distributions of battery before and after control under US06

大,从而减小大电流充电造成的急剧温升。

4 结 语

(1)基于车辆行驶动力学模型,电池热模型能实时反映再生制动工况下电池充电电流的大小、充电时间的动态变化与实际行驶工况下电池的温度响应。

(2)再生制动对车辆行驶工况下电池的累积温升影响较大,对再生制动充电电流的主动控制可以有效降低行驶工况下电池的最大温升,提高电池充放电性能,延长电池使用寿命。

(3)采用加权 PID 方法控制再生制动充电电流,根据行车工况下的电池 SOC 状态、电池温度的动态变化和制动工况的制动力需求,实时调整再生制动力比例来减小再生制动充电过程中的大电流比例,增加小电流充电比例,可实现电池生热控制,并最大程度提高能量回收率。

(4)所提出的控制方法对再生制动工况较多或者制动强度与大充电电流比例较大的工况具有更好的控制效果。

(5)本文研究也存在一定的不足,如没有进一步考虑电池单体间温差对电池容量的影响等,需要在今后的研究中进一步完善。

参考文献:

References:

- [1] WILLIFORD R E, VISWANATHAN V V, ZHANG Ji-guang. Effects of entropy changes in anodes and cathodes on the thermal behavior of lithium ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 189(1): 101-107.
- [2] SAITO Y. Thermal behaviors of lithium-ion batteries during high-rate pulse cycling[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 146(1): 770-774.
- [3] SELMAN J R, AL HALLAJ S, UCHIDA I, et al. Cooperative research on safety fundamentals of lithium batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 97: 726-732.
- [4] KIZILEL R, SABBABH R, SELMAN J R, et al. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs[J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(2): 1105-1112.
- [5] HAMUT H S, DINCER I, NATERER G F. Analysis and optimization of hybrid electric vehicle thermal management systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 247: 643-654.
- [6] FAN Li-wu, KHODADADI J M, PESARAN A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 238: 301-312.
- [7] RAO Zhong-hao, WANG Shuang-feng, WU Mao-chun, et al. Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 65: 92-97.
- [8] JAVANI N, DINCER I, NATERER G F. Thermodynamic analysis of waste heat recovery for cooling systems in hybrid and electric vehicles[J]. *Energy*, 2012, 46(1): 109-116.
- [9] BALAKRISHNAN P G, RAMESH R, KUMAR T P. Safety mechanisms in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 155(2): 401-414.
- [10] ONDA K, OHSHIMA T, NAKAYAMA M, et al. Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 158(1): 535-542.
- [11] BUCHMAN I. Batteries in a Portable World: a Handbook on Rechargeable Batteries for Non-Engineers [M]. Richmond: Cadex Electronics Inc., 2001.
- [12] BAPTISTA P, TOMÁS M, SILVA C. Plug-in hybrid fuel cell vehicles market penetration scenarios[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(18): 10024-10030.
- [13] AVADIKYAN A, LLERENA P. A real options reasoning approach to hybrid vehicle investments[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2010, 77(4): 649-661.
- [14] CHACKO S, CHUNG Y M. Thermal modelling of Li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 213: 296-303.
- [15] KIM U S, YI J, SHIN C B, et al. Modelling the thermal behaviour of a lithium-ion battery during charge[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(11): 5115-5121.
- [16] SAW L H, YE Y, TAY A A O. Electro-thermal analysis and integration issues of lithium ion battery for electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 2014, 131: 97-107.
- [17] KISE M, YOSHIOKA S, HAMANO K, et al. Development of new safe electrode for lithium rechargeable battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 146(1/2): 775-778.
- [18] INUI Y, KOBAYASHI Y, WATANABE Y, et al. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries[J]. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(7): 2103-2109.
- [19] PARK C, JAURA A K. Dynamic thermal model of Li-ion battery for predictive behavior in hybrid and fuel cell vehicles[J]. *SAE Technical Paper*, 2003-01-2286.
- [20] MOTLOCH C G, CHRISTOPHERSEN J P, BELT J R, et al. High-power battery testing procedures and analytical methodologies for HEV's[J]. *SAE Technical Paper*, 2002-01-1950.
- [21] CHEN Y, EVANS J W. Three-dimensional thermal modeling of lithium-polymer batteries under galvanostatic discharge and dynamic power profile[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1994, 141(11): 2947-2955.
- [22] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [23] RAJAMANI R. Vehicle Dynamics and Control [M]. Berlin: Springer, 2011.