

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.03.029

混合动力三轮摩托车制动能量回收系统控制策略^①

李云伍¹, 刘得雄¹, 吴高华², 刘峰¹, 赵华慧¹

1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业机械鉴定站, 重庆 永川 402160

摘要: 制动能量回收技术是有效解决摩托车面临的环境污染严重和能源损耗大等问题的技术方案之一. 本文以混合动力三轮摩托车为对象, 在分析制动能量回收方案、电磁制动力调节和充电电流控制的基础上, 制定了制动能量回收控制策略并进行了实验. 实验结果表明, 制定的制动能量回收控制策略制动平稳, 能量回收效率能达到 6.3%~9.9%.

关键词: 混合动力; 三轮摩托车; 制动能量回收; 控制策略

中图分类号: U483 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2017)03-0184-06

制动能量回收技术是摩托车实现节能减排的技术方案之一. 国内外对制动能量回收技术的研究主要集中在汽车上: 通过采用各种制动能量回收技术, 丰田 Prius 混合动力轿车整车能量利用率提高 20% 以上^[1]; 本田 Insight 混合动力轿车获得高效制动能量回收^[2]; 福特并联混合动力电动汽车有效改善了其制动性能^[3]. 目前, 摩托车制动能量回收的研究尚处于有深入拓展空间的状态. 本文以混合动力三轮摩托车为研究对象, 提出通过控制 PWM(脉冲宽度调制)占空比来调节制动力大小以实现安全制动与高效制动能量回收, 制定了制动能量回收控制策略并通过实验验证了其有效性.

1 制动能量回收方案

本课题研究前提是: 三轮摩托车原有汽油机动力系统和机械制动系统保持不变, 用装有配套轮胎的永磁无刷直流轮毂电机取代前轮, 发动机驱动系统与电机驱动系统相互独立. 研究的目的是: 设计制动能量回收系统, 在保留原有机械制动系统的基础上, 利用制动时轮毂驱动电机的发电特性将制动能量部分转换成电能回收到储能装置中, 同时产生制动力矩, 实现安全制动的目的^[4-5].

混合动力三轮摩托车制动能量回收系统如图 1 所示. 电磁制动采用铅酸蓄电池充电制动和电阻制动两种模式. 电阻制动用于当电磁制动电流大于蓄电池可接受充电电流时与蓄电池充电制动进行联合制动.

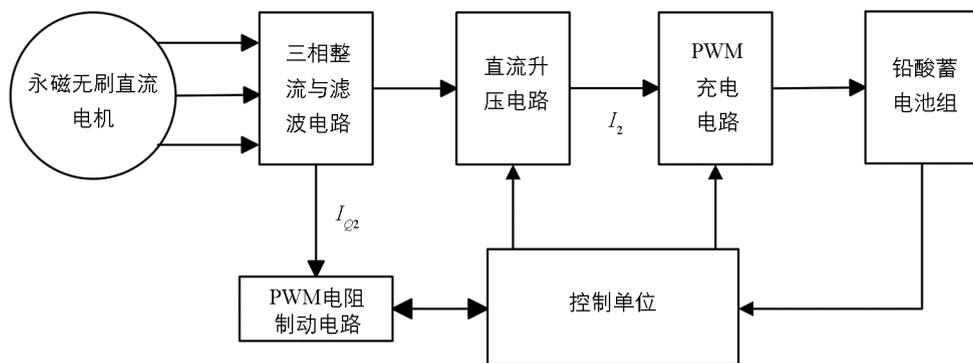


图 1 混合动力三轮摩托车制动能量回收方案

① 收稿日期: 2014-07-02

基金项目: 重庆市科委应用技术项目(cstc2014yykfa80001).

作者简介: 李云伍(1974-), 男, 重庆垫江人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师.

系统电控部分主要包括三相整流滤波电路、直流升压电路、PWM 充电电路、PWM 电阻制动电路等。PWM 充电电路与 PWM 电阻制动电路如图 2 所示。充电电路利用 PWM 信号控制功率管 Q1 的导通与截止的时间来控制流过功率管 Q1 的电流大小；电阻制动电路利用 PWM 信号控制功率管 Q2 的导通与截止的时间来控制流过功率电阻的电流大小。为避免大电流窜入控制单元，两电路均采用光电耦合器将控制芯片与大电流回路隔离。

2 电磁制动力调节

永磁无刷直流轮毂电机电磁制动原理如图 3 所示，滚动阻力偶矩忽略不计^[6]。正常行驶过程中，轮毂驱动电机提供驱动力矩 $T_{驱动}$ 的方向与车轮转动的方向(图中 ω 方向)相同，给车辆提供行驶动力。制动能量回收过程中，由于惯性作用，固定在车轮上的轮毂电机磁极将继续转动，此时磁极与线圈绕组发生相对运动，当相线 L_1 、 L_2 和 L_3 之间带上负载，形成闭合回路，由楞次定律知，旋转磁极与线圈绕组之间将产生阻碍其相对运动的制动力矩 $T_{制动}$ 。制动力矩 $T_{制动}$ 与车轮转动的方向相反，地面将产生与摩托车前进方向(图中 v 方向)相反的制动力 F ^[6]，从而使摩托车减速。

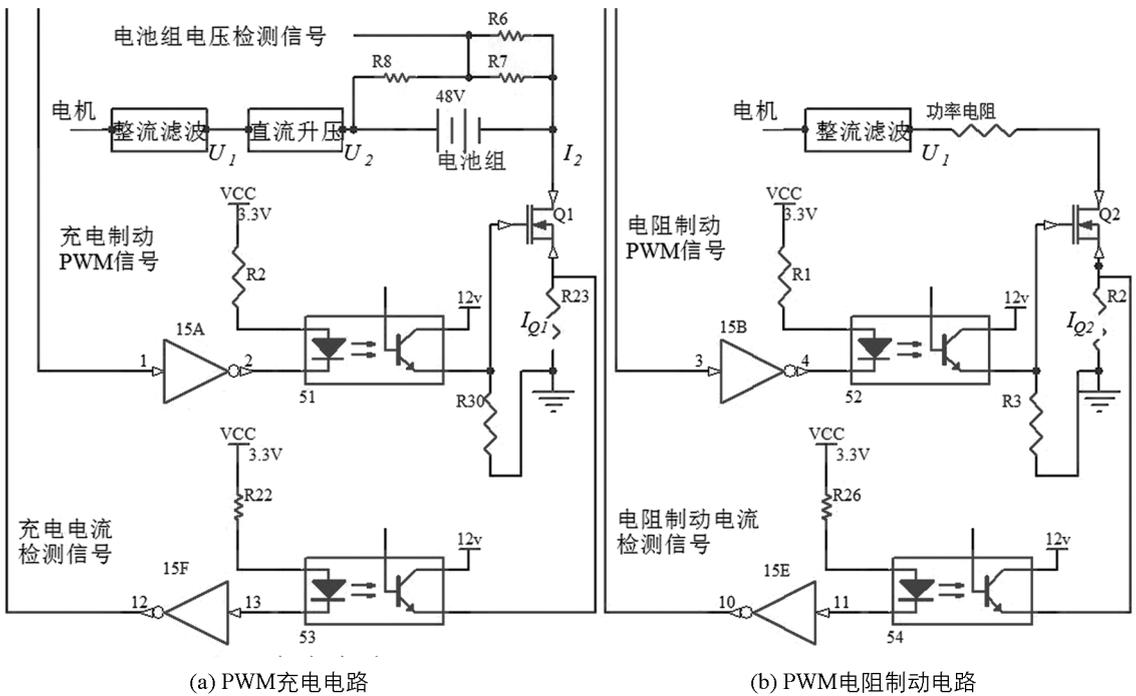


图 2 PWM 充电电路与 PWM 电阻制动电路

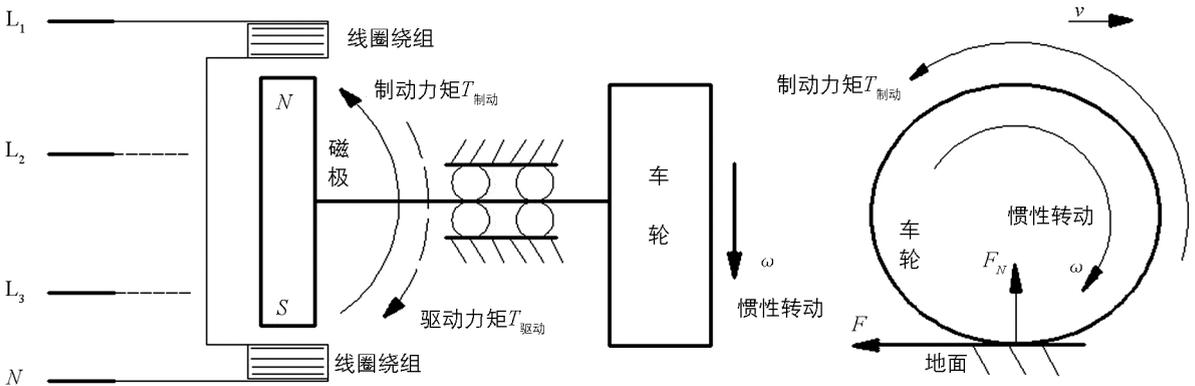


图 3 永磁无刷直流轮毂电机电磁制动原理图

制动能量回收时，如图 2 电路所示，设定发电机发出的三相交流电整流滤波后的电压、电流分别为

U_1 、 I_1 , 经过升压电路升压后的电压、电流分别为 U_2 、 I_2 , 升压电路转换效率为 η ; 充电电路的 PWM 占空比为 D_{Q1} , 转换效率为 η_{Q1} , 流过功率管 Q_1 的电流为 I_{Q1} ; 电阻制动电路功率电阻电压为 U_1 , PWM 占空比为 D_{Q2} , 转换效率为 η_{Q2} , 流过功率管 Q_2 的电流为 I_{Q2} . 升压电路与蓄电池组串联, 则充电电流为 I_2 , $I_{Q1} = \eta_{Q1} I_2$.

根据功率平衡关系得:

$$U_1 I_1 = \frac{U_2 I_{Q1}}{\eta \eta_{Q1}} + \frac{U_1 I_{Q2}}{\eta_{Q2}} \quad (1)$$

由发电电压与电机转速 n 的函数关系式 $U_1 = f(n)$ 与式(1)得:

$$I_1 = \frac{U_2 I_{Q1}}{f(n) \eta \eta_{Q1}} + \frac{I_{Q2}}{\eta_{Q2}} \quad (2)$$

忽略其它损耗, I_1 与电枢电流相等, 则

$$T_e = K_e I_1 = K_e \left(\frac{U_2 I_{Q1}}{f(n) \eta \eta_{Q1}} + \frac{I_{Q2}}{\eta_{Q2}} \right) \quad (3)$$

式中: T_e 为电机电磁转矩, K_e 为电磁转矩常数.

I_{Q1} 的大小由充电制动 PWM 的占空比 D_{Q1} 决定, I_{Q2} 的大小由电阻制动 PWM 的占空比 D_{Q2} 决定; 转速一定时 $f(n)$ 值一定; 升压后 U_2 基本保持不变. 因此由式(3)知, 可通过调节 PWM 占空比 D_{Q1} 与 D_{Q2} 来改变电枢电流的大小, 从而调节电磁制动力矩的大小, 达到制动的目的. 其中, 能量回收产生的电机电磁转矩为:

$$T_e' = K_e \frac{U_2 I_{Q1}}{f(n) \eta \eta_{Q1}} \quad (4)$$

能量回收时充电占空比 D_{Q1} 对电机输出电流和电压的影响实测数据如表 1^[7] 所示, 电压为电机整流滤波电压, 电流为整流端的直流电流. 由实验数据可得: 同一 PWM 占空比控制下给电池组充电, 高转速时, 输出电流小, 电磁制动转矩小; 低转速时, 电流大, 电磁制动转矩大; 电机输出电流随着占空比增大而增大^[7]. 实验结果与式(4)电磁制动力矩与占空比成正相关结论一致. 因此, 通过调节 PWM 占空比来调节制动力大小是可行的.

表 1 占空比、电压和电流实验相关数据

| 电流电压/ V | 占空比/% | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 30 | 60 | 90 |
| 12 | 0.77A | 1.3A | 1.82A | 2.25A |
| 24 | 0.37A | 0.66A | 0.91A | 1.12A |
| 36 | 0.22A | 0.41A | 0.56A | 0.71A |
| 48 | 0.15A | 0.27A | 0.37A | 0.46A |

3 充电电流控制

提高制动能量回收率的同时, 还要考虑电池的寿命^[8-9]. 影响铅酸电池寿命的主要原因是硫化 and 活性物质脱落, 这两者主要由过充过放和大电流充放电造成. 因此, 充电过程对蓄电池的寿命影响较大^[10-11], 需要控制其充电电流.

美国科学家马斯在对大量的蓄电池充电过程的数据研究的基础上, 提出了以最低析气率为前提的蓄电池可接受的充电电流曲线^[12], 用下式表示:

$$I = I_0 e^{-at} \quad (5)$$

式中: I 为蓄电池可接受的充电电流; I_0 为蓄电池初始的可接受的充电电流; a 为衰减率常数, $a = I_0 / C$, C 为需要充电的电池容量; t 为充电时间. 在实际工作中, 可以依据电池的 SOC (蓄电池荷电状态) 选择最佳 I_0 ^[12], SOC 值在实际应用中可考虑用蓄电池组开路电压确定. 结合文献[13]的数据结果, 使用最小二乘法拟合可得到不同 SOC 下的 I_0 , 拟合曲线如图 4 所示.

电磁制动过程中参考拟合曲线的 I_0 -SOC 关系控制充电电流 I_2 大小, 使其保持在对应 SOC 状态下

可接受的最大充电电流,以尽可能多地回收制动能量;当充电电流值超过可接受的最大电流时,由式(1)知,通过提高电阻制动电流 I_{Q2} 的值来满足功率转化的需求。

4 制动能量回收系统控制策略

考虑制动安全,需要判断是紧急制动还是非紧急制动,其方法是检测制动操作机构的加速度.紧急制动时直接采用机械制动,但需防止出现侧滑、跑偏和失去转向能力等.非紧急制动时根据制动强度,合理分配电磁制动力矩与机械制动力矩的比例,并将制动能量回收的模式分为轻度制动、中度制动、高强度制动 3 种模式^[7].

1) 轻度制动(制动减速度 $a < 0.5 \text{ m/s}^2$),仅使用电磁制动.主要在长下坡,起、停频繁等工况,特点是三轮车随时需减速或需要控制速度,防止超速.

2) 中度制动(制动减速度 $0.5 \text{ m/s}^2 \leq a \leq 2 \text{ m/s}^2$),以电磁制动为主,机械制动为辅,需防止前轮抱死现象发生.此时电磁制动系统提供大部分制动力矩,机械制动系统逐渐增加制动力矩,以达到制动目的.

3) 高强度制动(制动减速度 $a > 2 \text{ m/s}^2$),以机械制动为主、电磁制动为辅,机械制动提供主要制动力矩.同样需防止车轮抱死现象发生.

制动能量回收控制系统控制流程如图 5 所示.在进入制动后,由于需要在制动停止信号产生时能够立即停止制动,将制动停止信号在此时设为最优中断信号。

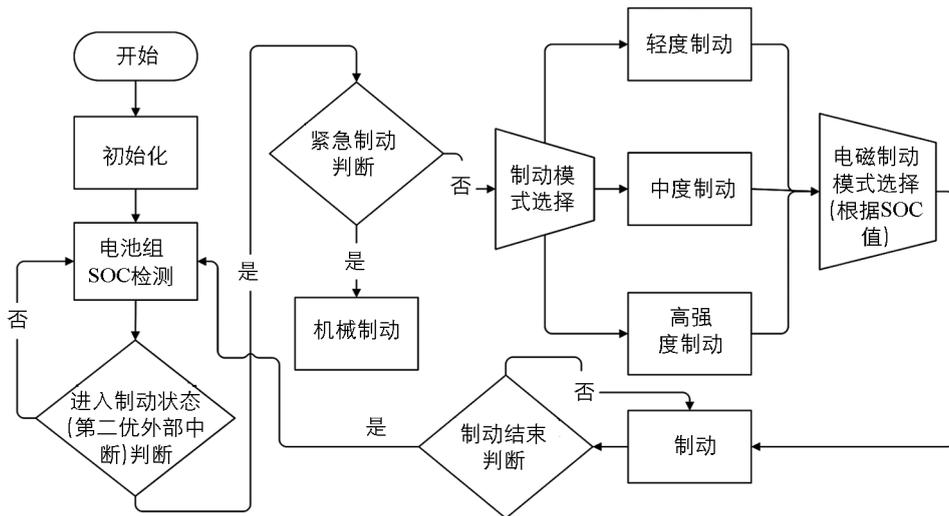


图 5 制动能量回收控制系统控制流程

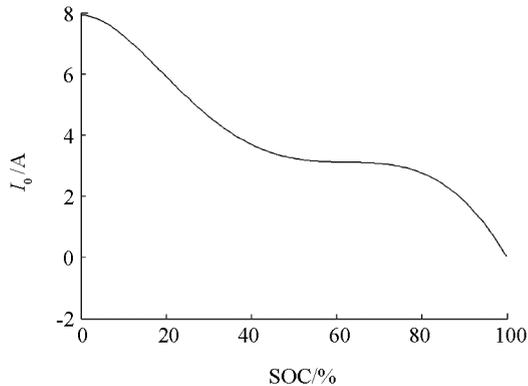


图 4 I_0 -SOC 关系曲线

5 实验结果分析

根据控制策略做了轻度、中度和高强度制动试验.混合动力三轮摩托车的永磁无刷直流轮毂电机额定功率为 800 W,工作电压为 48 V,额定电流为 16.7 A,最大扭矩为 25.5 N·m;铅酸蓄电池为 48 V/20 Ah.不同制动模式实验结果如图 6—图 8 所示.实验中蓄电池为低电荷状态,电阻制动电路未参与工作,电磁制动始终处于充电制动状态.图中电流为发电机电枢电流,电压为电机发出的三相交流电整流后的电压经分压的电压值(测试值为实际值的 1/30).

5.1 轻度制动模式实验

轻度制动模式实验分频繁轻度制动及长下坡制动两种制动模式.由图 6 知,频繁轻度制动能量回收时,电机输出电流较稳定,电压平稳降低,无较大幅度波动,能够提供一个稳定的制动力矩;长下坡制动能量

回收时, 电机输出的电流略微增加, 电压平稳下降, 这与制动过程车速逐渐降低状况一致. 实验表明, 轻度制动能量回收时, 系统能够实现平稳制动.

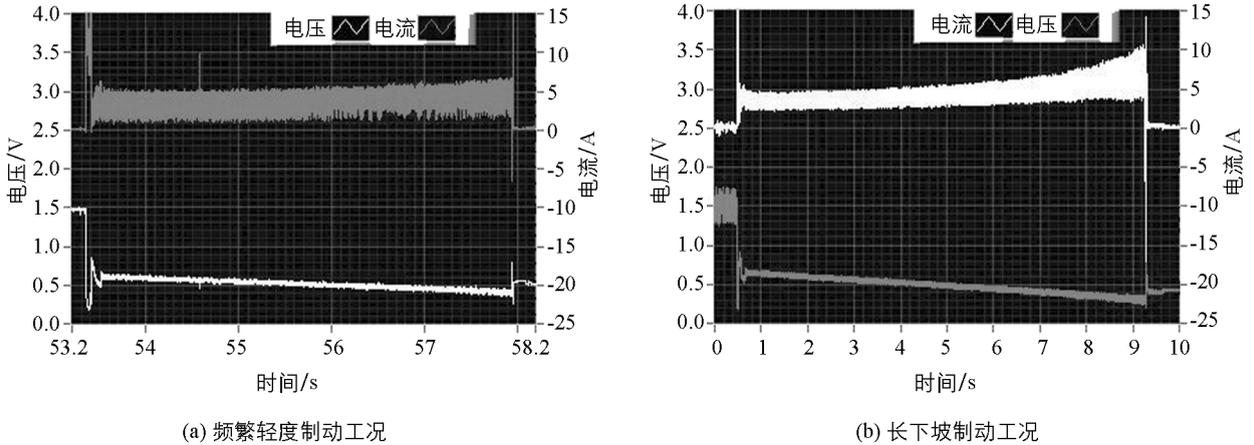


图 6 轻度制动时能量回收电压与电流曲线

5.2 中度制动模式实验

中度制动模式实验结果如图 7 所示. 与轻度制动能量回收相比, 电机的输出电流增大, 即制动力矩增大; 制动开始瞬间电机电流有较大幅度变化, 但整个制动过程电流变化相对平稳, 在实验中车身无大幅抖动现象发生.

5.3 高强度制动模式实验

高强度制动模式实验结果如图 8 所示, 电机输出电流小且平稳, 此时电磁制动力矩投入较少, 机械制动系统提供较大制动力矩. 实验表明, 在高强度制动模式时, 以机械制动力矩为主、电磁制动力矩为辅, 系统能够实现平稳制动.

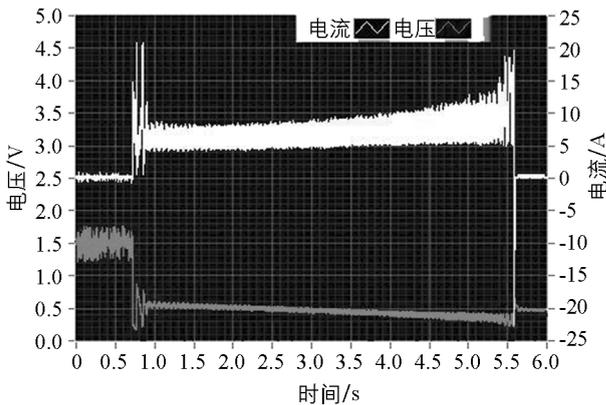


图 7 中度制动时能量回收电压与电流曲线

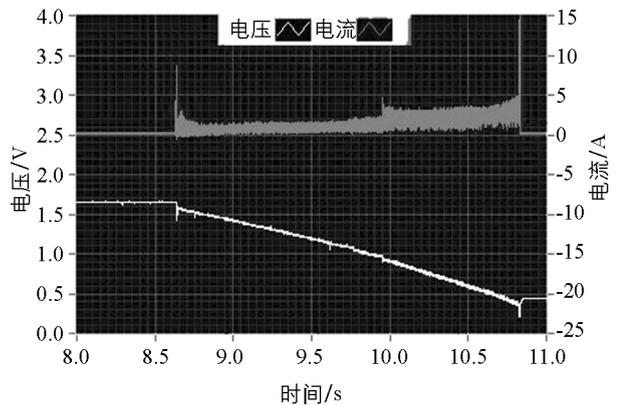


图 8 高强度制动时能量回收电压与电流曲线

5.4 能量回收率计算

由于影响车辆制动能量回收的因素较多, 到目前为止对制动能量回收率的计算仍没严格定义. 作者对能量回收率的计算主要考虑制动起点车辆的动能与制动结束点车辆的动能的差值、电机产生的能量、升压电路的转换效率等因素, 能量回收率用以下公式计算.

$$\text{能量回收率} = \frac{\text{电机产生的能} \times \text{电路转换效率}}{\text{制动起点车辆的动能} - \text{制动结束点车辆的动能}} \quad (4)$$

制动能量回收实测数据参见文献[7], 在升压电路的转换效率取 75% 情况下, 计算出的能量回收率: 轻度制动时为 8.1%~9.9%; 中度制动时为 6.3%~6.8%; 高强度制动时为 0.4%~0.6%.

6 结 论

通过对混合动力汽车制动能量回收方案和电磁制动力大小调节的分析, 制定出考虑电池组 SOC 值的

轻度制动、中度制动和高强度制动等模式下的制动能量回收控制策略,并在混合动力三轮摩托车上完成相关实验.实验结果表明,该制动能量回收策略实现了混合动力三轮摩托车平稳制动,能量回收效率达到 6.3%~9.9%(高强度制动模式除外).因此,三轮摩托车制动能量回收控制系统能够在安全制动的同时回收部分能量,对摩托车的节能减排具有实用意义.

参考文献:

- [1] 胡安平. 基于 AMESim-Simulink 联合仿真的再生制动系统研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [2] 张子英, 张保成. 车辆制动能量回收再利用技术研究 [J]. 节能技术, 2010, 28(3): 213—217, 235.
- [3] CIKANEK S R, BAILEY K E. Regenerative Braking System for A Hybrid Electric Vehicle [C] // American Control Conference, Anchorage: IEEE, 2002: 3129—3134.
- [4] 舒红, 秦大同, 胡明辉, 等. 轻度混合动力汽车再生制动能量管理策略 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 167—173.
- [5] 赵国柱, 魏民祥. 无刷直流电机电动汽车再生 ABS 双闭环控制研究 [J]. 汽车工程, 2013, 35(4): 307—311.
- [6] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] 吴高华. 混合动力摩托车制动能量回收系统研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [8] SUN P, YU X M, YI W S, et al. Research on Control System of Hybrid Regenerative Braking and Low Speed Energy Recovery [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 55(5): 1560—1565.
- [9] SUN H, YANG L F, JING J Q, et al. Control Strategy of Hydraulic/Electric Synergy System in Heavy Hybrid Vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(1): 668—674.
- [10] 何代杰, 王泽京, 李庆东, 等. 微型纯电动汽车电池管理系统的设计与研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(9): 136—140.
- [11] 赵伟. 蓄电池 SOC 值估计与均衡充电研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [12] 李敬兆. 采用神经网络预测和变结构模糊控制的铅酸蓄电池最优充电技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [13] 李蓓, 何莉萍. 基于马斯理论的蓄电池充电电流衰减指数研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(10): 26—30.

A Control Strategy of Brake Energy Recovery System in Hybrid Three-Wheeled Motorcycles

LI Yun-wu¹, LIU De-xiong¹, WU Gao-hua²,
LIU Feng¹, ZHAO Hua-hui¹

1. School of Engineering and Technology, Southwestern University, Chongqing 400716, China;
2. Chongqing Agricultural Machinery Identification Station, Yongchuan Chongqing 402160, China

Abstract: Braking energy recovery technology is one of the technical schemes for effectively solving the problems encountered by motorcycles: serious environment pollution and large energy consumption. In an experiment with hybrid three-wheeled motorcycles, their braking energy recycling schemes, electromagnetic brake force adjustment methods and control of charging current were analyzed, and a control strategy of braking energy recovery was developed and tested. The results showed that the control strategy of braking energy recovery described in this paper provided a stable braking and the energy recovery efficiency was as high as 6.3%—9.9%.

Key words: hybrid; three wheeled motorcycle; braking energy recovery; control strategy

