

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.08.032

电动三轮车制动能量回收系统研究^①

周胜灵, 钱晓胜, 冀杰

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 燃油机车对环境造成的污染日益加剧, 电动三轮车作为一种性价比高、维护经营成本低、节能环保的交通工具越来越受到人们欢迎. 针对电动三轮车动力特点, 开发了一套制动能量回收系统, 并分析能量回收系统各控制参数对能量回收率的影响, 扩大升压电路 boost 的输入电压范围、提高电机负载能力和优化充电占空比. 实验表明, 该系统结构简单, 性能可靠, 具备机械制动备份功能, 且通过调节充电电流的占空比即能满足轻度制动的要求, 又能获得 5% 以上的能量回收率.

关键词: 电动三轮车; 轻度制动; 能量回收; 占空比

中图分类号: U489

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2014)8-0194-07

燃油机车对环境造成的污染日益加剧, 电动三轮车作为一种性价比高、维护经营成本低、节能环保的交通工具越来越受到人们欢迎. 目前, 我国的电池技术还不能支撑电动客车、电动大卡车的产业化, 但是现在的电池技术足以支撑电动三轮车的产业化. 因此, 在交通代步、物流运输等方面, 电动三轮车具有无可比拟的竞争力, 是低碳产品的主力军之一^[1]. 研究表明, 在城市行驶工况下, 大约有 1/3 甚至更多的能量在制动过程中被消耗掉, 郊区行驶工况也有至少 1/5 的驱动能量在制动过程中损失掉^[2], 因此, 制动能量回收是提高电动三轮车能量利用效率的有效措施, 通过回收制动能量可以实现节能并提高车辆的续航能力.

1 电动三轮车能量回收技术方案

电动三轮车的驱动电机是直流无刷电机, 在驱动车辆行进时为电动机工作模式, 由蓄电池提供电能. 当车辆减速制动时, 电机可以作为发电机工作模式产生电能, 利用能量回收技术将制动产生的电能回馈至蓄电池成为有效能量储存起来, 同时电机会产生电磁阻力矩使车辆减速^[3, 4]. 电机产生的电磁阻力矩是有限的, 为了确保行车的安全, 车辆仍然保留机械制动系统. 当车辆需要较大制动力或紧急制动时, 仍然以机械制动为主.

实现能量回收需要完成的步骤是: 电机输出三相交流电—三相整流—升压—PWM 充电. 因此, 制动能量回收系统必须具备三相整流、升压、PWM 充电和控制单元等几个基本单元, 在保证车辆安全前提下, 最大限度提高能量回收率^[5]. 如何通过对车辆行驶状态、制动减速要求和蓄电池 SOC 的判断, 优化能量回收控制参数, 提高能量回收率是研究的重点内容.

2 制动能量回收控制系统

制动能量回收控制系统如图 1 所示, 主要包括整流、升压、PWM 充电和主控芯片等几个基本单元, 同时

^① 收稿日期: 2013-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61304189); 中央高校基本科研业务费资助项目(XDJK2011C068).

作者简介: 周胜灵(1981-), 黑龙江齐齐哈尔人, 讲师, 主要从事控制理论和控制方法方面的研究.

还包括车速传感器、制动踏板位置传感器、蓄电池电压传感器、充电电流传感器和能量回收切换继电器等。

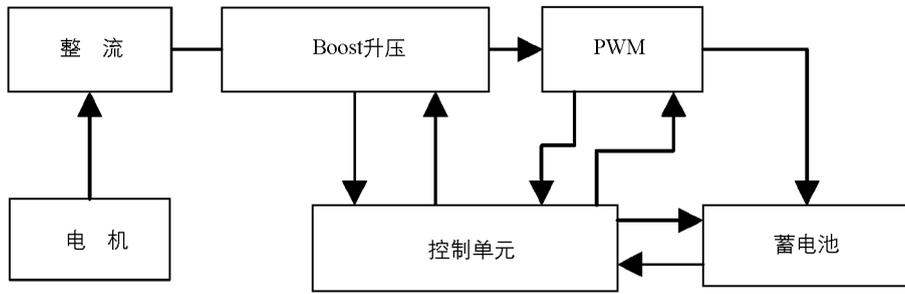


图 1 能量回收系统框图

2.1 主控芯片

制动能量回收控制系统采用 P89LPC935FA 单片机作为主控制芯片，最高振荡频率 18 MHz，实际选用 12 MHz，单条指令执行周期 0.167~0.33 μs ，具有 PWM, AD, DA 等功能^[6]。单片机通过接收车辆运行信号(制动踏板位置信号、车速信号、蓄电池电压信号)对车辆运行状态和制动要求进行判断，并确定能量回收的充电电流。

2.2 升压电路

电机输出三相交流电经整流滤波电路转换为直流。为了减小直流端的交流分量，整流滤波电路采用三相全波整流。能量回收时电机输出电压高低直接取决于车速的快慢，实验测得电动三轮车行驶速度与电机输出电压关系如图 2 所示。

图 2 中的电压是三相整流滤波电路输出端的空载电压。能量回收对充电空载电压的要求应在 59 V 左右，并保持稳定不受车速快慢的影响。因此，电机输出电压必须进行升压处理，采用 boost 电路作为升压电路。

boost 升压电路升压范围对能量回收率有直接的影响，要提高能量回收率就要尽可能扩大 boost 输入电压的有效范围，特别是降低失效电压的下限值^[7]。根据图 2 的试验数据，boost 升压电路的输入电压范围确定为 5 V~45 V，输出电压(空载)稳定在 59 V。满足上述要求相关联的主要参数有 PWM 频率、占空比调节范围、电感值、电容值等。

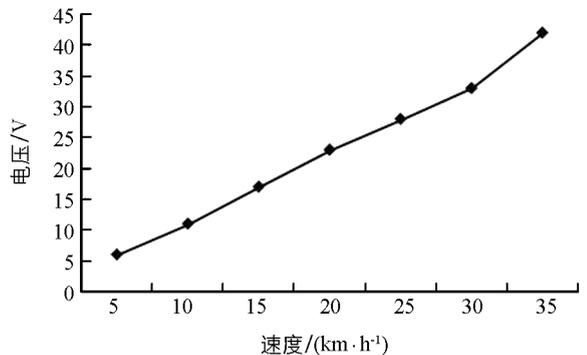


图 2 实验测得电压与速度关系曲线

2.2.1 主要元器件参数计算^[8-11]

能量回收充电电流幅值为 4 A，蓄电池等效内阻为 12.5 Ω (SOC=50%)，纹波电压低于 0.4%，电感电流连续。兼顾电感量、电容量、开关元件功耗和光耦工作频率等因素，PWM 频率为 200 kHz。

boost 电路输入电压 $U_s=5\sim 45$ V，输出电压 $U_o=59$ V，计算最小占空比 D_{\min} 和最大占空比 D_{\max} ，由式

$$\frac{U_o}{U_s} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

可得 $D_{\min}=0.24$ ， $D_{\max}=0.92$ 。按最小占空比电感电流连续的要求，确定电感值

$$L = \frac{R}{2} D_{\min} (1 - D_{\min})^2 T_s = 4 \mu\text{H} \quad (2)$$

根据要求纹波低于 0.4%，计算临界电容值

$$C = \frac{U_o D_{\max} T_s}{R \Delta U_o} = \frac{59 \times 0.92 \times 5 \times 10^{-6}}{12.5 \times 0.004} = 5428 \mu\text{F}$$

实际选择电容值为 6800 μF 。

2.2.2 boost 升压电路仿真

根据升压电路原理和主要元器件参数计算结果，运用 Matlab/simulink 对 boost 电路进行仿真，判断元

器件参数选择的合理性, 输入电压为 45 V 时仿真波形如图 3 所示. 对比仿真结果与理论计算值, 如表 1 所示, 表明所选择的元件参数完全满足设计要求.

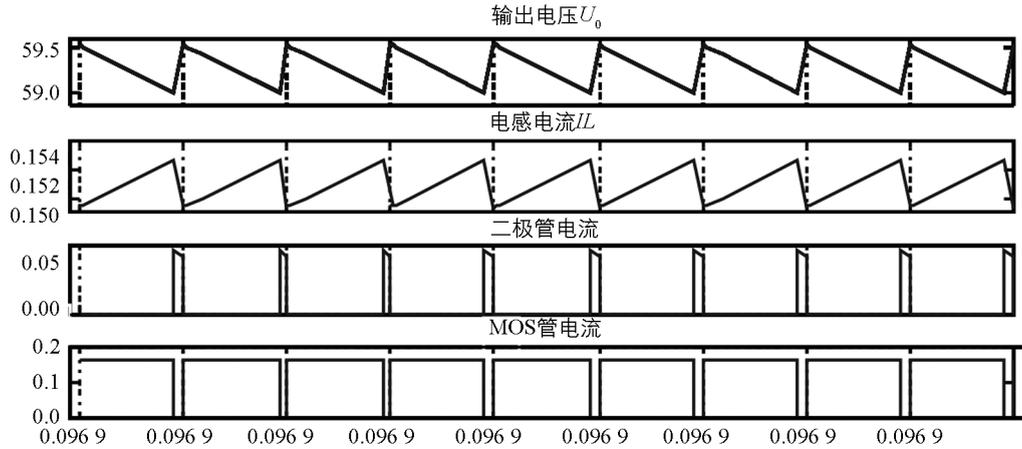


图 3 各节点电压电流波形图

表 1 仿真与理论计算值对比

输入电压/V	占空比	理论输出值/V	仿真输出值(空载)/V
5	0.915	58.82	58.98
10	0.831	59.17	59.51
20	0.661	59.00	58.95
30	0.492	59.06	59.00
45	0.237	58.98	59.23

2.3 充电电路

充电电路部分设定 PWM 的频率为 5 kHz, 电机制动力矩与电机输出电流关系如下:

$$T = \frac{I_o \cdot U_o}{n \cdot \eta_o} \quad (3)$$

式中, I_o 为电机输出电流; U_o 为电机输出电压; n 为电机转速; T 为电机制动力矩; η_o 为电机效率.

在制动能量回收过程中, 存在

$$I_o \cdot U_o \cdot \eta_c = U_c \cdot I_c \quad (4)$$

$$T = \frac{U_c \cdot I_c}{\eta_c \cdot \eta_o \cdot n} \quad (5)$$

式中, I_c 为充电电流; U_c 为充电电压; η_c 为 boost 电路和调制 PWM 电路的效率. 由公式(4)可知影响电机输出电流的主要因素是充电电流(占空比)和电机输出电压. 在能量回收过程中, U_c 基本保持不变, 增大 I_c 就能增大力矩 T .

根据电机特性, 电机产生的制动力矩取决于电枢电流 I_s 和气隙磁感应强度 B .

$$T = K \cdot B \cdot I_s \quad (6)$$

在制动过程中, 增加 I_c 和车速下降都会造成电枢电流 I_s 上升, 但无刷电机均为永磁电机, 气隙磁感应强度 B 在电枢反应的作用下会下降, 因此 I_s 对 T 的影响是非线性的, 并且与常数 K 有关. I_s 与制动力矩的特性关系需要通过试验获得.

车辆需要制动时, 主控芯片 P89LPC935FA 单片机根据车辆行驶状态、蓄电池状态和制动要求, 确定 PWM 占空比, 调整充电电流获得需要的制动力矩.

3 控制策略

制动能量回收控制策略需要满足的要求是: 在保证车辆行驶安全的前提下, 最大限度提高制动能量回

收率,同时要考虑电池的寿命^[12-13].

本文开发的电动三轮车具有两套各自独立的制动系统,电机能量回收制动系统和机械制动系统,并且是通过同一制动踏板实施制动,制动顺序是通过制动踏板上的位置传感器和预设的空行程实现先电机制动后机械制动,在空行程范围内,只产生电磁制动力,当制动踏板位置超出空行程范围,就是电磁制动力和机械制动力同时作用.调节空行程的大小能调节车辆整体制动性能和电机制动与机械制动吸收制动能量的分配比例,空行程越小,电机制动获得的制动能量就越少,回收的能量就越少,相反,回收能量就越多.但制动踏板空行程的预留值必须满足安全是第一位的原则,能产生满足制动要求的电磁制动力;boost 升压失效车速不能高于限定值.电机制动力与电机的磁动势、矫顽力、磁阻等重要参数有很大的关系.通过对驱动电机的负载试验,测试电机的负载能力.电机额定功率:1 000 W、额定电压:48 V、额定转速:2 800 r/min.试验根据电机高效区和常用工作转速的原则,选择 2 200 r/min 作为试验参数.电机保持恒转速 2 200 r/min,被充电蓄电池电压 47.2 V,改变充电占空比,获得电机输出电流与输出电压的关系曲线,如图 4 所示.

试验结果表明电机在恒速时,电压有明显的下降.而在实际制动过程中,电机输出电压是受车速(电机转速)和电流(电枢反应)双重影响,电压下降的速度比电机恒速要快.电机电压下降会使电流进一步上升,电流上升又加速电压下降,最终电压下降至 boost 升压失效的下限值,boost 升压失效(电磁制动失效),能量回收结束.在紧急制动或重度制动时电磁制动力消失,会影响车辆的制动性能.

当蓄电池的 SOC 达到 85%以上时,充电电流的 PWM 占空比要小于 0.2,以保护蓄电池的寿命.

4 试验分析

试验的目的是分析影响制动能量回收率的主要因素,寻求提高能量回收率的途径,测试电机的制动性能.试验时仅采用电机进行制动,拆除机械制动系统.试验路面为水平水泥路面,车辆及乘坐人员(2人)总重量 340 kg 左右,制动初速为 28 km/h,制动结束最低车速 6 km/h(boost 升压失效,最低失效电压 5 V),试验分轻度制动和中度制动,检查能量回收率和电磁制动失效对应的车速.通过五组不同充电电流占空比的制动试验,测取电机输出电压、输出电流、充电电流、蓄电池端电压等参数,分析在制动过程中参数之间的相互关系,以及占空比对制动力以及能量回收率的影响.数据采集采用 NI USB-6008 数据采集卡,最大采样率为 49 ks/s.双通道连续采集数据.

系统采用的是恒充电流模式,即在整个制动过程中,充电电流保持恒定.根据制动要求的不同,试验分别采用 15%,18%,21%,24%,27% 充电电流占空比以获得不同的制动力矩.图 5、图 6 分别是占空比为 15%和 27%时,采集到的电池充电电流、电池电压、电机输出电流、输出电压曲线.

实验中,实际电压与测试值关系是 31 倍;电流与测试值的关系的 $y=10x-25$, y 表示电流, x 表示测试值.

试验结果表明,随充电占空比增大(充电电流增大),制动力增加,制动距离缩短,能量回收过程持续时间也缩短,15%占空比持续时间 9.3 s,27%占空比持续时间 4.8 s.车辆制动减速时电机输出电压持续下降,降至 boost 失效电压,能量回收结束,电机输出电压下降使输出电流上升,制动力矩增大,有利于提高车辆的制动性能.充电占空比增大,电磁制动失效所对应的车速也在上升,对车辆的安全性产生一定的不利影响.占空比与制动距离、能量回收持续时间、电磁制动失效车速之间的关系如表 2 所示.

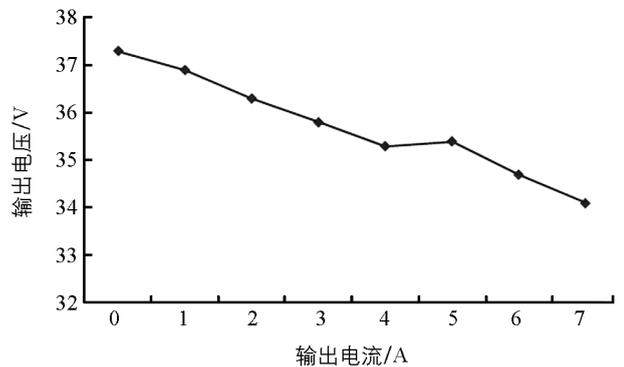


图 4 电机输出电流与输出电压关系曲线

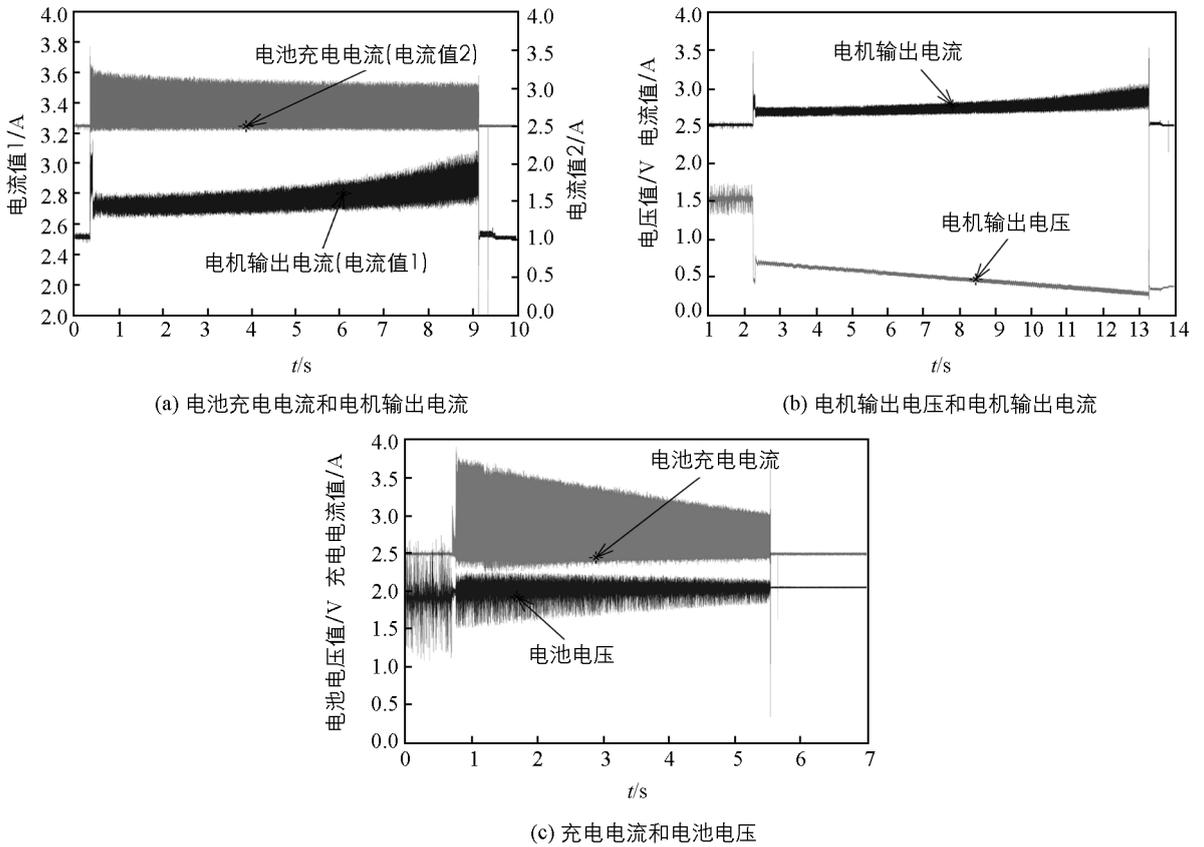


图 5 15%占空比时采集到的电池、电机参数

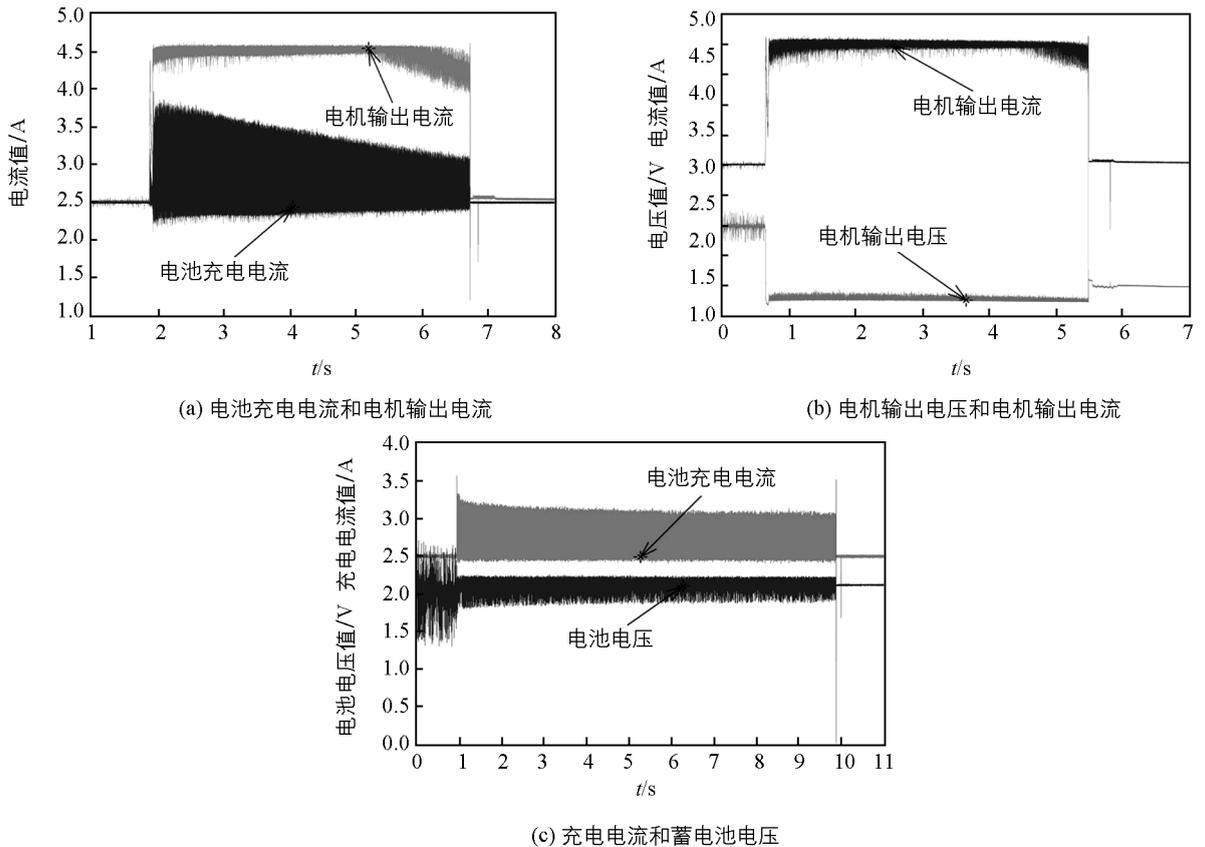


图 6 27%占空比时采集到的电池、电机参数

表 2 不同占空比时测试数据

占空比/%	15	18	21	24	27
能量回收持续时间/s	9.3	8.4	6.7	5.3	4.8
制动距离/m	38.2	36.6	31.1	25.9	22.1
boost 失效车速/(km·h ⁻¹)	6.7	6.9	7.4	8.2	8.8

27%占空比电机输出电流的幅值超过 20 A, 充电电流的最大幅值也达到 12 A, 制动距离仍然达到 22 m, 表明电机具有较强抗电枢反应的能量, 电磁制动能力较强. 在制动过程中充电电流的幅值有明显下降的趋势, 分析其原因是蓄电池端电压上升过快(上升 10 V 左右), 这也表明充电电流偏大, 极化现象严重. 尽管如此, 电机电流和制动力矩仍然保持, 仅在最后 0.5 s 内电机电流才略有下降. 由此表明通过调控充电电流占空比达到控制电磁制动力技术方案是有效的.

根据实验测试数据计算制动能量回收率

$$\eta_z = \frac{W_C}{W_D}$$

其中 η_z 为能量回收率, W_C 为能量回收的电量, W_D 为制动过程车辆动能的变化量.

$$W_D = \frac{1}{2}(n_0^2 - n_1^2)m \quad (7)$$

其中 n_0 为能量回收始点车速, n_1 为能量回收结束车速, m 为整车质量(包括驾乘人员).

$$W_C = U_C I_C \quad (8)$$

其中 I_C 为充电电流, U_C 为充电电压.

W_C 是根据充电电压和充电电流数据积分所得, 积分结果包含了占空比的影响. 能量回收率与占空比的关系如图 7 所示. 占空比对能量回收率的影响无明显规律, 都在 5% 左右. 分析原因有几个方面: 首先, W_D 计算的是整个制动过程车辆总的动能差, 其中包括了不可回收的能量(如风阻、滚动摩擦损失等), 制动过程不同, 不可回收能量的影响也不一样; 其次, NI USB-6008 数据采集卡采样频率偏低, 积分结果 W_C 受偏差影响.

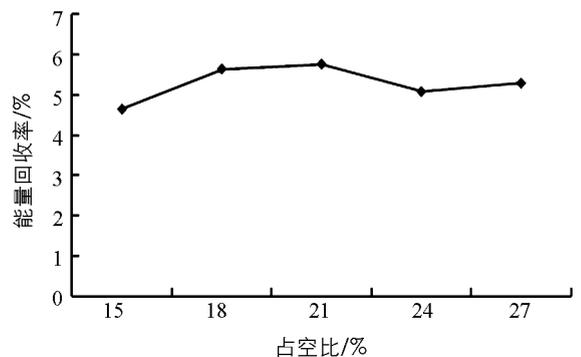


图 7 不同占空比下能量回收率

5 结 论

本文开发了一套针对电动三轮车的制动能量回收

系统, 通过调节充电电流的占空比既改变制动力矩和制动距离的大小, 又能满足一般减速制动的要求, 同时能获得 5% 以上的能量回收率. 电动三轮车作为短途运输、交通工具时常需要制动减速, 利用制动回收能量技术达到节能和提高车辆的续航能量的目的. 测试证明充电占空比随车速下降而减小, 能降低电磁制动失效车速, 改善车辆的制动性能; 降低 boost 升压电路输入电压的下限值、提高电机负载能力和优化充电占空比能提高系统能量回收率.

参考文献:

- [1] 马贵龙. 电动三轮车产业利国利民 [J]. 中国自行车, 2011(11): 46-47.
- [2] GAO Yin-min, CHEN Li-ping, EHSANI M. Investigation of the Effectiveness of Regenerative Braking for EV and HEV [R]. SAE International SP-1466. 1999-01-2910.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 王震, 马朝永, 王飞. 电子机械制动系统中制动能量回收的分析 [J]. 汽车工程, 2010, 32(11): 972-976.

- [6] 周立功. LPC900 系列 Flash 单片机应用技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [7] NAZMUL HASAN, MD RUBAYYAT, TANVIR HOSSAIN, et al. AC Side Switched Active Filter Based High Performance Three-Phase Boost Rectification with Energy Recovery Snubber [C] // Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Oct 7-11, 2012, Las Vegas, NV: 1-8.
- [8] CHEN Xiao-li, LIANG Da-qiang, ZHANG Wei-dong. Braking Energy Recovery for Electric Traction Based on Super-Capacitor and Bidirectional DC - DC Converter [C] // International Power Electronics and Motion Control Conference, ECCE Asia June 2-5, 2012, Harbin, China: 879-883.
- [9] MARCHESONI M, VACCA C. New DC-DC Converter for Energy Storage System Interfacing in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 301-308.
- [10] 李红朋, 胡明辉, 谢红军, 等. 基于工况分析法的电动汽车参数匹配 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2013(1): 13-17.
- [11] 王德伦, 叶成涛, 罗劲松, 等. 4806 电动汽车传动系统速比的优化计算 [J]. 四川兵工学报, 2011(2): 73-75.
- [12] 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: 1560-1565.
- [13] SUN Hui, YANG Li-fu, JING Jun-qing, et al. Control Strategy of Hydraulic /Electric Synergy System in Heavy Hybrid Vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(1): 668-674.

A Braking Energy Recovery System for Electric Tricycles

ZHOU Sheng-ling, QIAN Xiao-sheng, JI Jie

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: Taking into consideration the characteristics of the drive system of electric tricycles, a braking energy recovery system with simple structure, high reliability and fail-safe function was studied. The influences of various control parameters of the energy recovery system on energy recovery rate were analyzed. The input voltage range of boost circuit was expanded, the loading capability of the motor was improved, and the duty cycle was optimized. An experiment showed that this system was characterized by simple structure and reliable performance and that by adjusting the duty cycle of the charging current, it not only meets the requirements of mild braking, but also obtains an energy recovery rate of more than 5%.

Key words: electric tricycle; mild braking; braking energy recovery; duty cycle

责任编辑 汤振金

