

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.08.016

自行车制动能量回收控制系统的设计*

袁 翔,熊 智,蒋 鹏,李 化
(长沙理工大学 汽车与机械工程学院,湖南 长沙 410015)

摘要:针对自行车频繁制动损耗能量的问题,对自行车制动过程中能量流动情况、电机再生制动、锂电池充电展开研究,对自行车制动过程中能量损耗、电机再生制动控制策略进行了归纳,提出了一种基于 STC15F2K60S2 内核单片机的自行车制动能量回收控制系统,通过改装公路自行车,搭建具有该系统的试验样车,在不同骑行道路上选择不同制动模式进行制动试验。研究结果表明,该系统能够根据车速以及骑行者的意愿选用合理的制动模式,在考虑骑行安全的前提下充分回收制动能量,明显提高了自行车的能源效率。

关键词:自行车;制动能量;能量回收;控制系统;回收效率

中图分类号:U484;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)08-0997-06

Energy recovery control system of bicycle braking

YUAN Xiang, XIONG Zhi, JIANG Peng, LI Hua

(School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410015, China)

Abstract: Aiming at frequent braking energy dissipation problem of bicycles, energy flow situation in the process of bicycle braking, motor regenerative braking, lithium batteries were studied. The energy lost in the process of bicycle braking and the control strategy of motor regenerative braking were generalized. The energy recovery control system of bicycle braking was proposed based on STC15F2K60S2 kernel single-chip processor. A road cycling was modified with the control system, and braking experiment was carried out in different riding road and different braking mode. The results indicate that the system can select reasonable braking model according to the speed and the intention of riders, recover braking energy fully under the premise of considering the riding safety, and improve the energy efficiency obviously.

Key words: bicycle; braking energy; energy recovery; control system; recovery efficiency

0 引 言

21 世纪,节能、环保已成为社会关注的核心主题,许多城市倡导自行车健康出行。在城市骑行的自行车频繁制动减速或停车,使得自行车动能主要通过机械制动以热量的形式消耗,降低了自行车能源效率^[1]。制动能量回收又称再生制动^[2],对于自行车而言,是指在制动减速或停车过程中,使电机处于发电状态,将部分动能转化为电能储存起来,同时回收能量时产生

的电磁力对车轮施加回馈转矩进行制动。国外很早就已推出回收自行车制动能量的概念:配备轮毂式电机和蓄电池回收动能^[3]、在自行车上加装类似混合动力汽车的动能回收装置等^[4];国内对自行车制动能量回收的研究还处于起步阶段:通过涡卷簧式回收自行车制动能量^[5],提出来基于车辆制动能量回收概念的电动自行车制动能量回收系统设计思路等^[6],缺少自行车制动能量回收系统理论与实践相结合的尝试。

本研究首先从理论上对制动能量进行能量回收分

收稿日期:2016-03-17

基金项目:湖南省研究生科研创新项目(CX2015B358)

作者简介:袁 翔(1956-),男,湖南岳阳人,副教授,主要从事汽车电子与新能源汽车等方面的研究. E-mail: georgeyuan968@126.com

析,推导出不同制动模式下回收能量的计算公式;然后搭建采用无刷直流电机的自行车制动能量回收系统^[7-8];当自行车处于制动状态时,动能通过车轮传递到电机,电机发出的交流电经过整流后转变为直流电;通过 DC/DC 升降压斩波器控制三相桥式整流电路输出的直流电压和电流的大小,使输出电压达到锂电池组的恒定充电电压;同时调整制动电流改变制动力矩,最终将再生制动过程中产生的电能储存于锂电池组中。

最后通过骑行实验,采集相关数据,比较再生制动与普通机械制动系统的制动效果和制动能量回收情况,验证本研究设计的制动能量回收控制系统的可行性;根据数学模型及真实数据计算出不同制动环境下的制动能量回收效率。

1 自行车制动能量回收系统模型

1.1 制动过程动力学分析

自行车制动的过程实际就是消耗制动前车辆和负载动能的过程^[9]。由于自行车加速度较小,可以不考虑其加速阻力,自行车受力情况如图 1 所示。

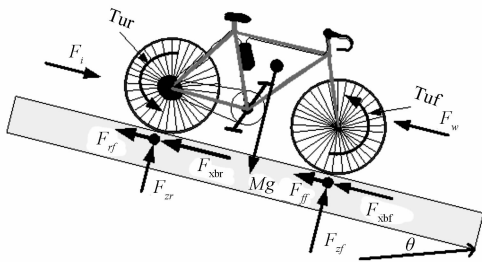


图 1 自行车制动时受力图

M —自行车车体及乘员质量; r —车轮的半径; F_f —滚动阻力; F_w —空气阻力; F_i —坡度阻力

根据图 1 可将自行车行使制动动力学模型简化为:

$$F_1 = F_b + F_f + F_w + F_i \quad (1)$$

其中:

$$F_b = (T_{ur} + T_{uf})/r \quad (2)$$

式中: T_{uf} , T_{ur} —前、后轮所受的制动力矩。

$$F_f = Mgf\cos\theta \quad (3)$$

式中: M —人与车的总质量,kg; g —重力加速度, m/s^2 ; f —滚动阻力系数。

$$F_w = \frac{1}{2}C_D\rho Au^2 \quad (4)$$

式中: C_D —空气阻力系数,取 0.5 ^[10]; A —迎风面积,取 0.3 m^2 ; ρ —空气密度,一般为 $1.2258 \text{ N} \cdot \text{S}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ 。

$$F_i = Mgsin\theta \quad (5)$$

1.2 制动能量回收系统数学模型

自行车制动系统包括电机再生制动系统和机械摩擦制动系统。当其制动时,电机再生制动力 F_{mot} 和机械摩擦制动力 F_v 一起参与制动,则有:

$$Fb = F_{mot} + F_v \quad (6)$$

$$Fb = \alpha F_{mot_{max}} + \beta F_{v_{max}} \quad (7)$$

式中: $F_{mot_{max}}$ —车轮在某一转速下电机产生的最大再生制动力; $F_{v_{max}}$ —机械制动器产生的最大摩擦制动力; α —再生制动力调节参数; β —机械摩擦制动力调节参数($0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$)。

α 、 β 的值通过调节制动把手的开度而改变,当 $F_{mot_{max}} \geq F_c$ (总的制动需求力),则: $\beta = 0$,只有电机参与制动,改变 α 的值来调节制动力;当 $F_{mot_{max}} \leq F_c$ 时,则: $\alpha = 1$,再生制动力达到制动时刻的最大值,改变 β 的值来调整机械摩擦制动力^[11]。

(1) 当无源电动助力自行车制动需求力较小时,只有电机再生制动参与制动,总的制动力 $F_b = F_{mot} = \alpha F_{mot_{max}}$,通过改变电机电流的大小实现对制动力的控制,同时回收制动能量。

自行车负载功率 P_1 为:

$$P_1 = F_1 u_a \quad (8)$$

式中: u_a —瞬时车速。

电机开始制动 t_0 时刻对应的整车动能 E_0 为:

$$E_0 = \frac{1}{2}Mu_{a0}^2 \quad (9)$$

式中: u_{a0} —制动初始时刻 t_0 对应的车速。

制动结束时刻 t_1 对应的整车动能 E_1 为:

$$E_1 = \frac{1}{2}Mu_{a1}^2 \quad (10)$$

式中: u_{a1} — t_1 时刻的车速。

从 t_0 时刻到 t_1 时刻,总共消耗的能量 ΔE 为:

$$\Delta E = \frac{1}{2}M(u_{a0}^2 - u_{a1}^2) \quad (11)$$

根据能量守恒,结合公式(1,8)可推出:

$$\Delta E = \int (F_b + F_f + F_w + F_i) u_a dt \quad (12)$$

在只有电机再生制动参与制动时回收的总电能 E_b 为:

$$E_b = k[\Delta E - \int (F_f + F_w + F_i) u_a dt] \quad (13)$$

即:

$$E_b = k[\Delta E - (F_f + F_w + F_i) \times S_1] \quad (14)$$

式中: k —制动能量回收系统能量传递效率, S_1 —制动距离。

通过式(14)分析可知,当自行车制动力需求较小时,自行车制动时回收的总电能 E_b 由整个能量回收系统的能量传递效率和制动初始速度决定,同时受制动时间、制动距离和制动力影响。

(2) 当制动需求力大于电机最大再生制动力,需要电机再生制动与机械摩擦制动两者复合作用。此时 $\alpha = 1$,电机输出的再生制动力 $F_{mot} = F_{mot_max}$,总制动力 $F_{mot} = F_{mot_max} + \beta F_{v_max}$,骑行者通过调节刹车把手开度来控制机械摩擦制动力,实现对车速控制。

在复合制动时,电机再生制动力矩:

$$T_{mot} = C_T \Phi I_{max} \quad (15)$$

式中: C_T — 转矩常数, Φ — 每极主磁通, I_{max} — 最大制动电流。

作用于后轮上的制动力为:

$$F_{mot} = \frac{T_{mot}}{r} \quad (16)$$

机械摩擦制动力为:

$$F_v = \beta F_{v_max} \quad (17)$$

由公式(16,17)可推出总制动力:

$$F_b = \frac{T_{mot}}{r} + \beta F_{v_max} \quad (18)$$

制动时回收的能量 E 为:

$$E = \int k_4 UI_{max} dt \quad (19)$$

式中: k_4 — 电池的充电效率。

通过式(19)分析可知,当电机的最大再生制动力矩小于制动需求力矩时,电机再生制动系统与机械制动系统共同作用,制动过程中回收的能量由制动时间和电池的充电效率 k_4 决定,此时的充电电流达到最大值 I_{max} 。

2 制动能量回收控制系统设计

2.1 硬件设计

硬件部分采用了 STC15F2K60S2 作为主控芯片,设计了信号采集模块、人机交换显示模块、数据通讯模块、电机再生制动模块,制动能量回收系统控制器结构如图 2 所示。

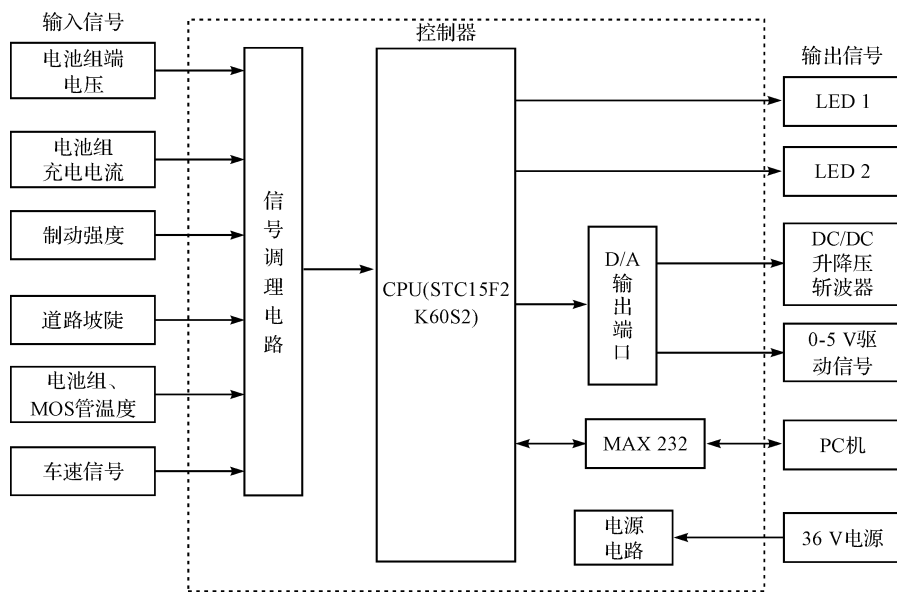


图 2 制动能量回收系统控制器结构图

其中信号采集模块主要包括电池组端电压、电池组充电电流、制动强度、道路坡度、电池组温度、MOS 管温度 6 路模拟信号,采集的信号经单片机处理后,再输出相应控制信号;人机交换显示模块用于显示电池工作情况;数据通讯模块采用 1 路 RS232 通信接口完成单片机与上位机的通讯;电机再生制动模块通过信号采集模块采集信号,采用 PWM 脉宽调制升降压原理,保持 DC/DC 升降压斩波电路中效应管通断频率不变,调整 PWM 脉冲宽度来控制场

效应管的通断时间,实现对电机电枢电流和制动力矩的控制。

2.2 程序设计

自行车的制动能量回收控制系统主程序主要实现的功能包括:系统初始化,制动与否检测、车速检测、道路坡度检测,制动强度检测,蓄电池组荷电状态、温度检测,电机再生制动力矩检测,以上各种条件是判断自行车是否回收制动能量。其主程序流程图如图 3 所示。

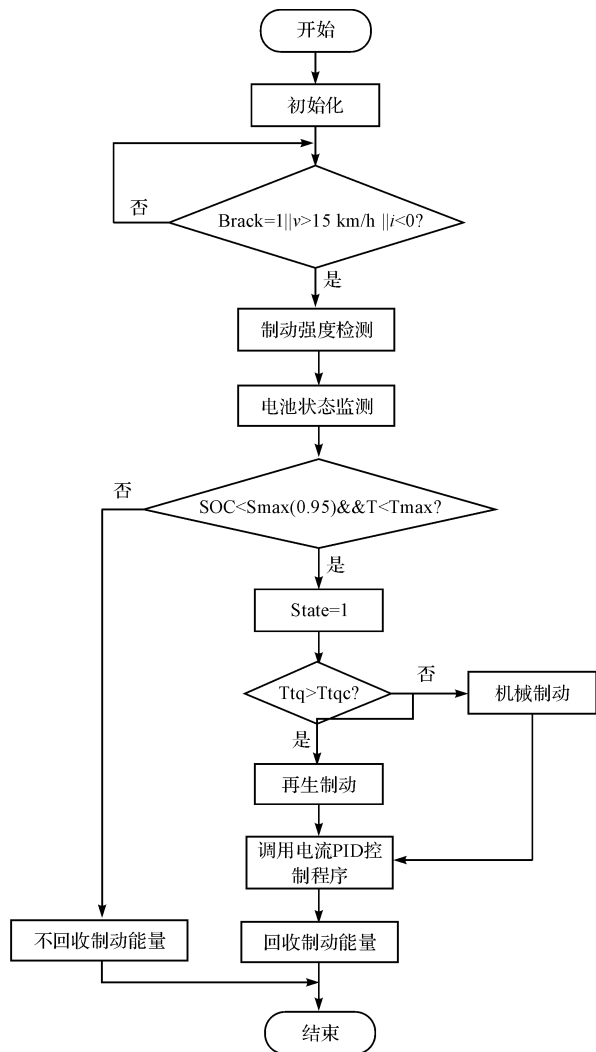


图 3 制动能量回收控制系统主程序流程图

Brack—刹车把手开关信号; v —当前车速; i —道路坡度; SOC—电池组荷电状态; T —电池组温度; T_{max} —电池组最高安全工作温度; State—电机再生制动标志; Ttq —电机再生制动力矩; $Ttqc$ —当前需求的制动力矩

由图 3 可知,通过系统初始化之后,检测是否有刹车信号 ($Brack = 1$ 表示有刹车信号)、车速 v 是否超过 15 km/h (骑行安全考虑) 及道路坡度 i 的值是否小于零 ($i < 0$ 为下坡路面),再通过检测刹车把手开度判断制动强度,再检测蓄电池组的状态,当锂离子电池组 $SOC < 0.95$ 与电池温度 $T < 50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,采用电机再生制动,然后再计算实际的制动需求力矩,电机再生制动力矩不能满足制动需求时,机械摩擦制动参与制动,最终调用电机电枢电流 PID 控制程序实现对电机再生制动力矩的大小进行控制,并回收制动能量。

3 试验及其结果分析

本研究对自行车制动能量回收控制系统的软、硬件设计之后,改装一辆公路自行车,搭建具有制动能量

回收系统的自行车,自行车实物图如图 4 所示。

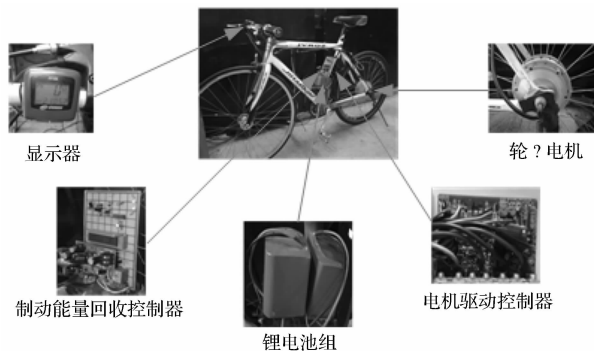


图 4 自行车实物图

无刷直流电机安装于自行车的后轮,锂电池组和制动能量回收控制器、电机驱动控制器分别安装于三脚架上。

自行车一般有 3 种制动模式,分别为:下缓坡限速制动、中度制动和紧急制动。下缓坡限速制动,指自行车在长缓坡道路 ($0 \sim 5\%$ 的坡度) 骑行时,为了保证骑行安全和骑行舒适性,需要将车速控制在安全车速 15 km/h 范围之内,制动力需求不大;中度制动,指行使的自行车在非紧急情况下制动将车速降为 0 km/h,实际的骑行过程中使用中轻度制动很频繁;紧急制动,指自行车超过安全车速或紧急情况下需尽快制动将车速降为 0 km/h,紧急制动时制动力矩需求大。

选取平路、缓坡 (坡度约为 5%) 等路段开展骑行实验。分别进行了下长缓坡限速制动、中度制动和紧急制动三种模式的制动,采集车载电池组的充电电压 (U_b)、充电电流 (I_b) 和车速值,其中车速变化曲线体现了电机再生的制动效能;电压电流值表明了再生制动能量回收情况。

(1) 下长缓坡限速制动

下长缓坡限速制动曲线图如图 5 所示。由图 5(a) 分析可知,自行车在下长缓坡限速制动过程中,有电机再生制动参与制动时,限速制动的效果较好,持续限速制动 10 s,车速稳定,电机再生制动力对车速的变化具有很好的跟随性,能有效的限制车速增长,同时电机再生制动能保证骑行的安全性和舒适性;由图 5 (b) 分析可知,自行车在下长缓坡限速制动过程中,在持续限速制动 10 s 内,车载电池组的充电电压 (U_b) 在 36 V 的基础之上有一定量的增长,充电电流 (I_b) 随着时间的变化稳定增长,在制动过程中能提供一个持续增长的制动力。

(2) 中度制动

中度制动时以电机再生制动为主,机械摩擦制动力为辅,电机再生制动力不能达到制动需求时,启动机械

摩擦制动。中度制动曲线图如图 6 所示。

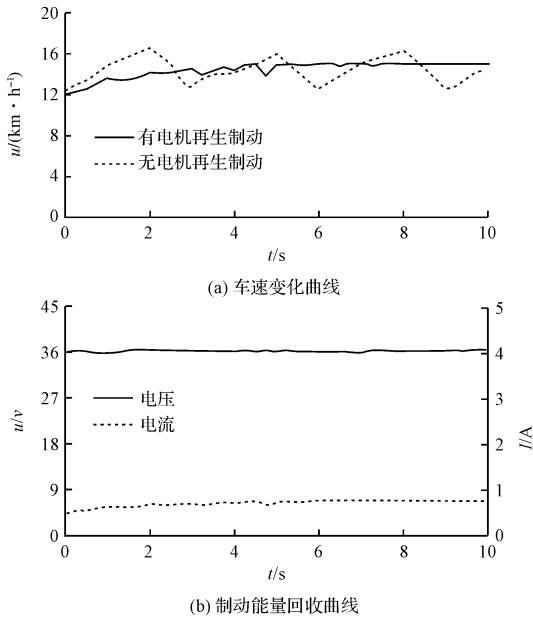


图 5 下长缓坡限速制动曲线

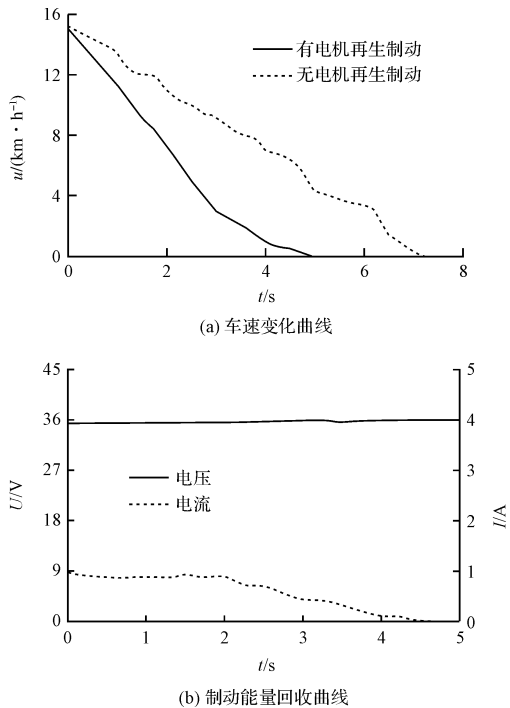


图 6 中度制动曲线

由图 6(a)分析可知,自行车在中度制动过程中,有电机再生制动参与制动时,制动时间减小,制动距离缩短;由图 6(b)分析可知,自行车在中度制动过程中,电机再生制动与机械摩擦制动共同参与制动。整个制动过程中车载电池组充电电压(U_b)有一定量的增长,车载电池组的充电电流(I_b)前期较稳,随着充电电流(I_b)持续减小,电机再生制动力矩也持续减小。

(3) 紧急制动

紧急制动时,自行车需要在短时间停车,制动力需

求较大,机械摩擦制动起主要作用,电机制动辅助制动。紧急制动曲线图如图 7 所示。

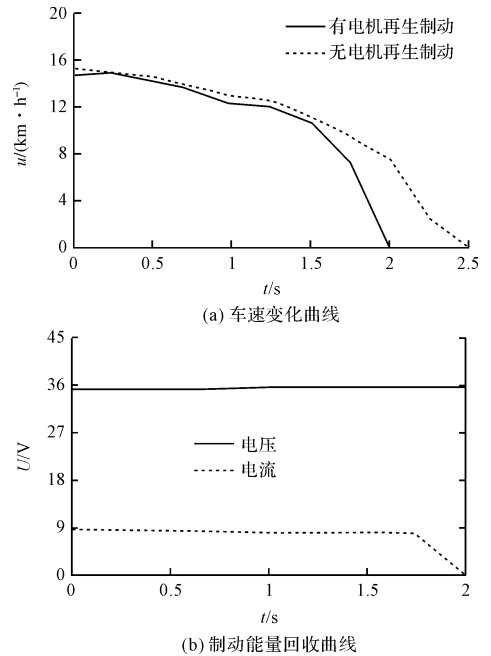


图 7 紧急制动曲线

由图 7(a)分析可知,自行车在紧急制动过程中,电机再生制动参与制动时,制动时间减小,制动距离缩短;由图 7(b)分析可知,自行车在紧急制动过程中,电机再生制动与机械摩擦制动共同参与制动。整个制动过程中车载电池组充电电压(U_b)有一定量的增长,车载电池组前期以恒定电流进行充电,随着充电电流(I_b)迅速减小,电机再生制动力矩也随之减小。

在同一制动模式下,采集的实验数据几乎一致,本研究在各种制动模式下选用三组代表试验数据,通过公式(11,13,19)计算出不同制动模式下电池组回收的能量 E_b 和 ΔE 制动过程中制动系统损耗的能量,最终得出电机再生制动参与的 3 种制动模式对应的能量回收效率 η 如表 1 所示。

表 1 能量回收效率计算结果

制动模式	E_b/kJ	$\Delta E/\text{kJ}$	η	$\bar{\eta}$
下长缓坡 限速制动	0.288	1.56	18.46%	17.69%
	0.264	1.56	16.94%	
	0.276	1.56	17.72%	
中度制动	0.106	0.69	15.39%	15.00%
	0.105	0.69	15.22%	
	0.099	0.69	14.39%	
紧急制动	0.061	0.69	8.80%	8.00%
	0.049	0.69	7.16%	
	0.055	0.69	8.04%	

通过以上数据表明,笔者设计制作的制动能量回收控制器能够有效地回收制动能量。其中下长缓坡限

速能量回收效率最高,平均能量回收效率为 17.69%;中度制动能量回收效率略低,平均能量回收效率为 15.00%;紧急制动时能量回收效率最低,平均能量回收效率仅为 8.00%。

4 结束语

本研究通过建立自行车制动能量回收系统数学模型,理论分析自行车制动能量回收的可行性;而且成功地搭建试验样车,通过骑行实验采集了车速、电池充电电压、充电电流等数据,验证了自行车制动能量回收控制系统的可靠性,并计算出各种制动模式下的能量回收效率,最高能达到 18%,具有很强的实用性。

本研究还存在一些不足:能量回收过程中存在不确定因素、试验样车搭建较粗糙、由于安全考虑对试验过程中的骑行道路有所限制,在接下来的研究中进行改善。基于该自行车制动能量回收控制系统的可行性和制动能量回收效率,今后的研究工作将从控制策略方面开展,优化控制系统,提高其能量回收效率;同时对于回收的能量进行合理有效的利用。

参考文献 (References):

- [1] 袁翔,杨靖.一种基于能量回收技术的无源电助力自行车方法与装置[P].中国专利,201310663235.4,2014-03-26.
- [2] 张俊智,吕辰,李禹橦,等.电驱动乘用车制动能量回收

技术发展现状与展望[J].汽车工程,2014,36(8):911—918.

- [3] HVA C C, KAO S J, FANG Y H. Design and implementation of a regenerative braking system for electric bicycles with a DSP controller[J]. **China Forest Products Industry**,2013,19(10):641-695.
- [4] MAIER O, PFEIFFER. M, WREDE J. Development of a Braking Dynamics Assistance System for Electric Bicycles: Design, Implementation and Evaluation of Road Tests[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2015, 16(16):1.
- [5] 单文泽,潘季斌,陈元泰,等.涡卷弹簧式制动能量回收装置研究[J].机械设计与制造工程,2015,44(10):73-77.
- [6] 于瑞.电动自行车制动能量回收系统的设计[J].考试周刊,2012,6(76):113.
- [7] 陈舒燕,朱靖,余朝刚.具有能量回馈的纯电动车驱动控制系统[J].轻工机械,2015,33(3):54-57.
- [8] 李华明,陆玲霞,陈海洋.基于 ARM 的电动自行车控制系统设计[J].机电工程,2012,29(9):1069—1072.
- [9] 段福斌,潘双夏.电动自行车制动性能检测的研究与实践[J].机电工程,2004,21(6):20-22.
- [10] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [11] CHU L, MINGLI S, FANG Y, et al. Braking force distribution strategy for HEV based on braking strength[C]. **Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha: IEEE**,2010:759-764.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

袁翔,熊智,蒋鹏,等.自行车制动能量回收控制系统的设计[J].机电工程,2016,33(8):997—1002.

YUAN Xiang, XIONG Zhi, JIANG Peng, et al. Energy recovery control system of bicycle braking[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(8):997—1002.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>