

基于系统效率最优的 CVT 电动汽车再生制动策略

杨军平¹, 王歆誉², 蔡源春³, 周智庆⁴

(1. 南昌工程学院 机械与电气工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 湖南大学 汽车电子与控制技术教育部工程研究中心, 湖南 长沙 410082;
3. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082; 4. 佛山科学技术学院 机械与电气工程学院, 广东 佛山 528000)

摘要:在考虑再生制动安全性和稳定性的情况下,以能量回收最大化为目标提出了一种并联再生制动控制策略。然后根据实验获取的电池、电机和无级变速器效率特性,基于传动系统效率最优的原则,优化得到再生制动过程中电机转速和无级变速器速比的最佳控制规律,并搭建整车仿真模型且在 NEDC 循环工况进行仿真分析。仿真结果表明,相比于常用的电机效率最优控制策略,本研究提出的控制策略能够充分利用动力部件的效率特性,进一步提高了能量回收率。

关键词:电动汽车;再生制动;无级变速器;效率最优

中图分类号:U463. 212 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)04-0023-05

Regenerative braking strategy research for electric vehicle with continuously variable transmission based on optimal system efficiency

YANG Junping¹, WANG Xinyu², CAI Yuanchun³, ZHOU Zhiqing⁴

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

2. Engineering Research Center of Automotive Electrics and Control Technology, Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

4. Mechanical and Electrical Engineering College, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract: In the case of considering security and stability of regenerative braking, a parallel regenerative braking control strategy was proposed with the objective of maximizing the energy recovery. Then according to the efficiency characteristics of battery, motor and continuous variable transmission which acquired from experiment, an optimization procedure was implemented to optimize motor and CVT's best control strategy during regenerative braking with the principle of optimal powertrain efficiency, and the vehicle simulation model was established and simulation analysis was carried out under NEDC driving cycles. The simulation result indicates that, compared with traditional optimal motor efficiency control strategy, the proposed strategy enables to take full advantage of power parts' efficiency characteristics and further improve the recover rate of regenerative braking energy.

Key words: electric vehicle; regenerative braking; continuously variable transmission; optimal efficiency

电动汽车与传统车辆的一个重要区别就是,电动汽车可以实现再生制动,回收一部分传统车辆在制动过程中损失的能量。电动汽车采用无级变速器,通过速比的无级连续调节,可以使车辆无论在

驱动还是制动工况,传动系统都在最佳效率区域运行,最大程度的提高整车能量利用率,增加续航里程。

目前,关于匹配无级变速器电动汽车再生制动

控制策略的研究不多, YEO、秦大同等人提出了制动过程中, 在考虑整车制动安全性和能量回收最大的前提下, 基于电机高效发电工作的 CVT 速比控制策略^[1-3]. 邓涛等人根据实验获取的镍氢电池充电特性和 ISG 电机发电特性, 确定了电池电机联合高效优化工作线, 并在此基础上制定了 CVT 速比控制策略及再生制动控制策略^[4]. 以上研究在优化过程中都只考虑了制动过程中传动系统部分部件的效率, 没有考虑电池、电机和变速器整个传动系统的工作效率.

本文以 LF620 电动汽车为研究对象, 在并联制动的基础上, 以传动系统效率最优为目标对制动过程中电机和无级变速器速比的控制策略进行研究, 建立整车再生制动仿真模型并进行相应的仿真研究, 为电动汽车再生制动系统的研究提供了参考.

1 CVT 电动汽车传动系统

图 1 所示为 LF620 电动汽车传动系统结构图, 其中无级变速器去掉液扭和 DNR 机构, 驱动电机与无级变速器的主动带轮轴直接相连. 制动过程中, 电机切换至发电机模式, 无级变速器则根据优化后的最佳速比控制策略调整速比使整车工作在效率最优区域, 整车的动能通过传动系统传递到电机, 并由电机发电充入到动力电池.

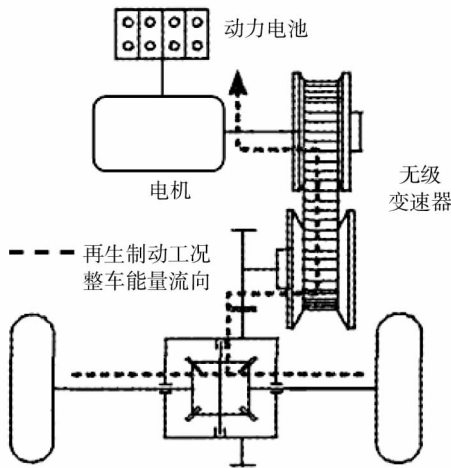


图 1 电动汽车传动系统结构图

样车的相关参数如表 1 所示.

2 再生制动过程效率优化控制策略

2.1 并联再生制动控制策略

目前再生制动控制策略主要有并联再生制动控制策略、最佳感觉制动控制策略和最大能量回收制动控制策略. 其中并联制动控制策略由于对传统汽车的结构改动最小, 是目前应用较多的再生制动控制策略方式^[5-7].

表 1 动力系统参数

类别	参数名称	参数值
整车参数	整备质量/kg	950
	空气阻力系数	0.29
	迎风面积/m ²	2.1
	车轮半径/m	0.307
	质心至前/后轴距离/m	1.632/1.038
电机参数	质心高度/m	0.726
	额定转速/(r/min)	1800
	额定功率/kW	17.9
电池参数	最大扭矩/(N·m)	185
	电池容量/(A·h)	60
	电池电压/V	320
	最大放电倍率	2.5

并联制动中, 整车的制动由机械制动和再生制动共同实现, 其中从动轮始终为机械制动, 而驱动轮(通常为前轮)的制动力由再生制动力和机械制动提供, 且为了最大程度的回收制动能量, 应尽可能使用再生制动. 当所需制动力超过电机所能提供的最大制动力时, 则由机械制动提供超出的制动力^[8-9]. 此外, 在制定再生制动控制策略时还必须考虑制动的安全性和电池的 SOC 值^[10].

并联再生制动的控制逻辑为

1) 制动踏板动作时, 首先判断电池 SOC 值, 若 $SOC > 0.9$, 则为了避免电池过充, 前后轮都采用传统机械制动方式, 若 $SOC \leq 0.9$, 则驱动轮可采用再生制动.

2) 当制动强度 $Z \leq 0.1$ 时, 为尽可能多的回收制动能量, 仅由前轮施加再生制动力以模拟发动机制动, 实现制动效果.

3) 当制动强度 $0.1 < Z < 0.7$ 时, 前后轮按照设定的制动力分配规律同时施加制动力, 即前轮的制动力根据电机的工作状况由电机单独提供或者电机制动和机械制动共同实现, 后轮完全由机械制动实现.

4) 当制动强度 $Z \geq 0.7$ 时, 为保证紧急制动时的安全性和制动效果, 整车的制动力全部由机械制动实现.

并联再生制动控制策略具体如图 2 所示.

2.2 最优工作曲线的获取

1) 电池的效率特性分析

电池组的能量转化效率是指电池组自身能量变化与外界输入电池组能量或者电池组对外输出能量之比. 影响电池能量转化效率的主要因素有电池组的充放电电流、电池的工作温度、电池组的内阻以及电池的 SOC 等等. 为了简化, 本文在通过实验获取电池的效率特性数据时, 忽略了电池的内阻和电池工作温度的影响, 仅考虑了电池的充放电电流和电池 SOC 对效率的影响^[11-12], 建立电池效率

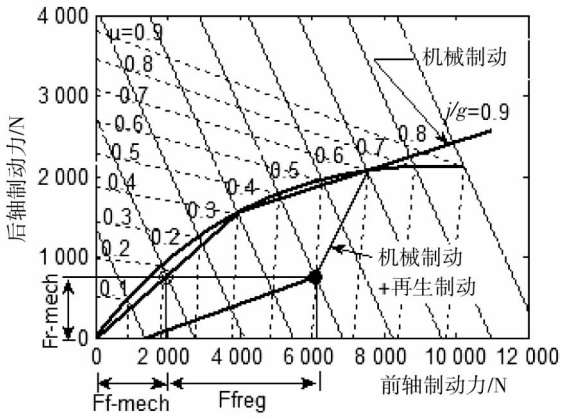


图2 并联制动控制策略

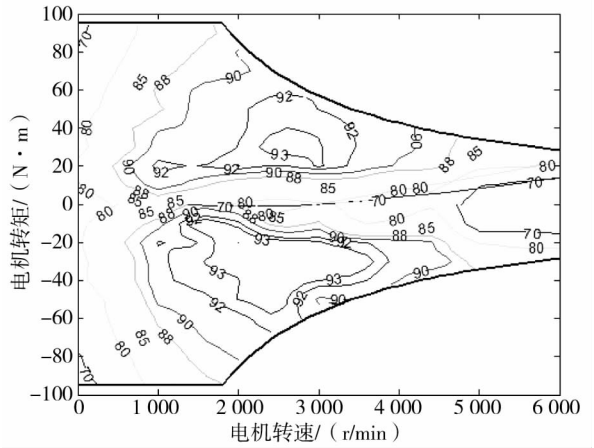


图4 电机等效率特性图

的表达式为

$$\eta_b = f(I, SOC). \tag{1}$$

式中, η_b 为电池能量转换效率; I 为电池组充放电电流的绝对值, A; SOC 为电荷状态.

图3所示为根据实验数据拟合得到的电池效率特性图.

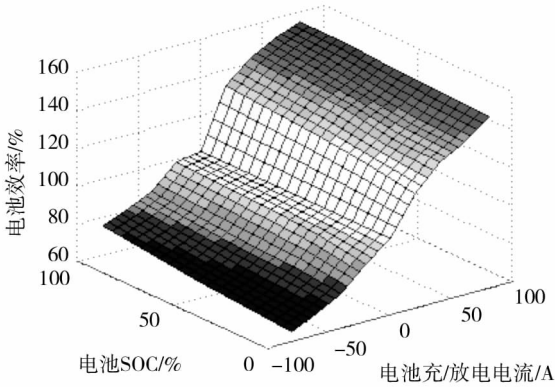


图3 电池效率特性图

由图3可知,正常状态下电池的SOC对电池效率的影响并不是很大,因此下文中进行研究时忽略了SOC对效率的影响.

2) 电机的效率特性分析

电机工作特性是决定再生制动性能的重要因素,电动汽车制动时电机工作在发电模式,其工作点直接影响能量回收的效率.由于电机动态响应过程的复杂性,本文通过台架试验获得所选用电机的效率特性图如图4所示,且有

$$\eta_m = f(n_m, T_m). \tag{2}$$

式中, η_m 为电机工作效率; n_m 为电机转速, (r/min); T_m 为电机转矩, (N·m).

由图4可知,电机的工作效率在70%~95%之间波动,如果能够合理的调整的电机的工作点,则能显著改善能量回收率.

3) 无级变速器效率特性分析

在再生制动过程中,能量从车轮通过变速器传

递至电机,因此,变速器的工作效率对能量回收也有着不可忽略的影响.为了使制动过程中整个传动系统工作在最优区域,最高效的回收制动能量,在获取电机最优工作点时也考虑了无级变速器的工作效率,且有表达式:

$$\eta_t = f(i_g, T_t). \tag{3}$$

式中, η_t 为无级变速器工作效率; i_g 为无级变速器速比; T_t 为变速器传递转矩, N·m.

其中无级变速器的速比可以根据车速和电机的转速获得:

$$i_g = \frac{n_m \cdot r}{v_e \cdot i_0} \cdot \frac{2\pi}{60}. \tag{4}$$

式中, v_e 为当前车速, m/s; i_0 为主减速器比; r 为车轮半径, m.

通过实验得到无级变速器的工作效率特性,如图5所示.

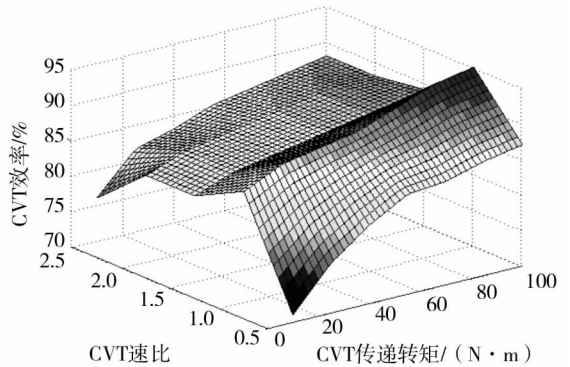


图5 无级变速器效率特性图

4) 电机和无级变速器最优工作曲线的获取

制动过程中,电动汽车的回收能量不仅与电机的运行效率有关,很大程度上还受到电池、变速箱等动力部件效率的影响.因此为了实现最大能量回收的目标,制定能量回收电机的控制策略时仅考虑电机的效率还不够,必须综合考虑包括电机、电池、

变速箱在内的整个传动系统的效率^[13-15].

当驾驶员踩下制动踏板时,首先通过制动控制单元根据整车制动力分配策略得到电机的目标制动力,并根据当前车速计算电机可能的转速范围,然后根据转矩、车速和转速等参数利用效率特性图计算当前电池、电机和变速箱的效率,求得传动系统的总效率

$$\eta = \eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_t \quad (5)$$

式中, η 为传动系统总效率.

然后根据传动系统最优效率值获得当前车速下电机的最佳工作点和变速箱的最佳速比,图6和图7所示为30%制动踏板开度电机和无级变速器的最佳控制规律.

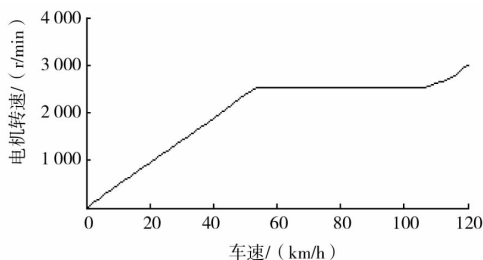


图6 30%制动踏板开度电机最佳控制规律

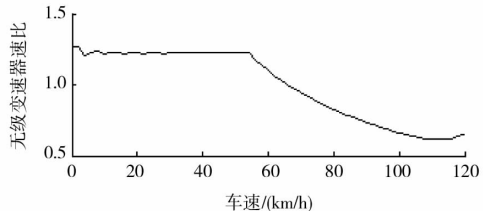


图7 30%制动踏板开度无级变速器的最佳控制规律

综合各个制动踏板开度下的电机和无级变速器控制规律得到最佳控制曲面,如图8和图9所示.

由图可知,电机的最佳转速一般控制在2000~3000 r/min左右,这主要是因为电机在该区域属于高效工作区,而无级变速器的速比也控制在效率较高的速比为1左右的区域.

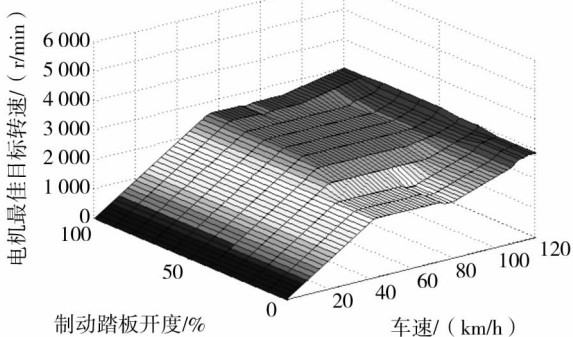


图8 电机最佳转速控制规律

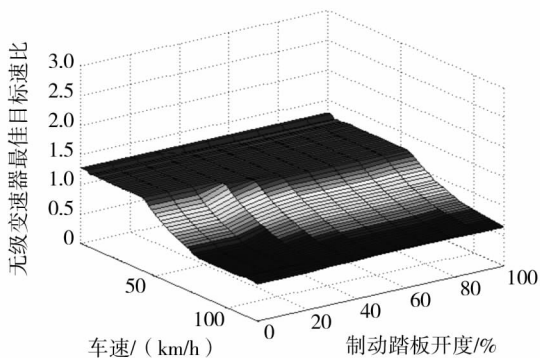


图9 CVT最佳速比控制规律

3 建模与分析

3.1 仿真模型的建立

由于电动汽车工作状态的复杂性以及非线性,很多部件采用传统的数学模型方法建立模型比较困难,而且可靠性不高,因而本文基于 Matlab/Simulink 平台,灵活的采用了理论建模和实验建模相结合的方法建立 LF620 电动汽车前向仿真模型,如图10所示.

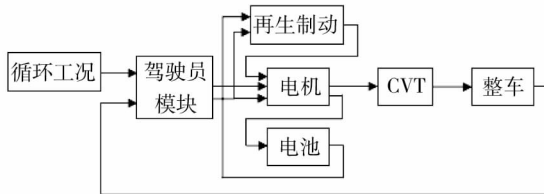


图10 再生制动仿真模型

3.2 仿真分析

根据上述获得的最优控制规律,利用建立的整车仿真模型,本文在NEDC循环工况分别对只考虑电机效率和综合考虑整个传动系统效率两种情况进行仿真分析.其中电池SOC的初始值设定为0.9,路面附着系数设为0.8.仿真结果如图11和图12所示.

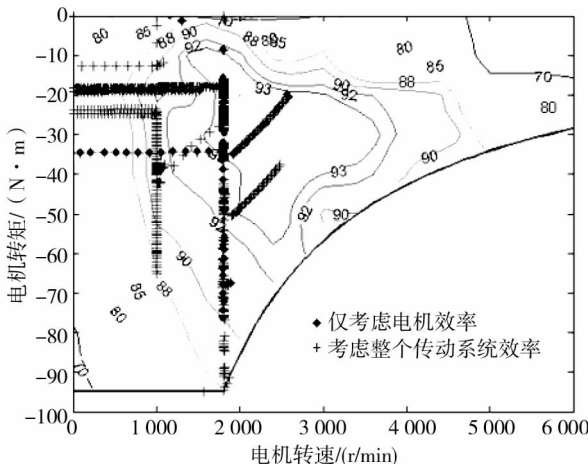


图11 NEDC循环工况电机工作点分布图

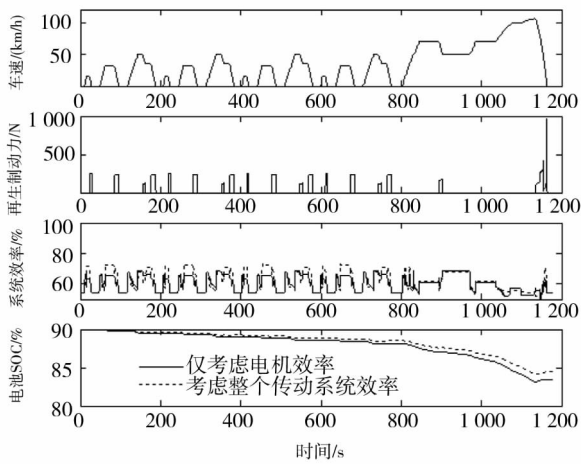


图 12 仿真结果

由图可知,考虑电池、电机和无级变速器整个传动系统的效率后电机的工作转速要低于仅考虑电机效率的情况,且电机的工作点分布也没有单独考虑电机效率的工作点分布要好,但是整个传动系统的工作效率要高于仅考虑电机效率的情况. 仿真结束时,仅考虑电机效率的情况下 SOC 值为 83.22%,而考虑系统效率时 SOC 值为 84.41%,提高了 1.19%. 因而本文基于传动系统效率最优的控制策略能够改善整车的能量利用率.

4 结论

1) 在满足不发生车轮抱死和制动效能的情况下,以最大能量回收为目标,提出了一种较为实用的前后轮再生制动力分配策略.

2) 以实验获取的电池、电机和无级变速器效率特性曲线为依据,基于传动系统效率最优的原则,优化得到再生制动过程中电机和无级变速器的最佳控制规律.

3) 采用理论和实验建模相结合的方法建立电动汽车仿真模型,并在 NEDC 循环工况下对单独考虑电机效率和考虑整个传动系统效率两种情况进行仿真对比分析. 仿真结果表明,采用本文所提出的再生制动控制策略会适当降低电机的工作转速,但整个系统工作在效率更优区域,能够改善整车能量回收率.

参考文献:

[1] Yeo H, Kim D, Hwang S, et al. Regenerative braking algorithm for a HEV with CVT ratio control during deceleration [C]// International Continuously Variable

and Hybrid Transmission Congress. San Francisco: Society of Automotive Engineers, 2004.

- [2] Yeo H, Hwang S, Kim H. Regenerative braking algorithm for a hybrid electric vehicle with CVT ratio control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2006, 220(11): 1589 - 1600.
- [3] 秦大同,颜静,杨阳,等. HEV 再生制动过程中 CVT 速比控制策略[J]. 重庆大学学报, 2007, 30(1): 1 - 5.
- [4] 邓涛,孙东野,秦大同. CVT 混合动力汽车再生制动系统仿真[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 214 - 221.
- [5] 李国斐,林逸,何洪文. 电动汽车再生制动控制策略研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(6): 522 - 527.
- [6] Wang F, Zhong H, Mao X J, et al. Regenerative braking algorithm for a parallel hybrid electric vehicle with continuously variable transmission [C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Beijing: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007.
- [7] Li J, Zhang J W, Yu F. An investigation into fuzzy controller for anti-lock braking system based on road autonomous identification [R]. Detroit: Society of Automotive Engineers, 2001.
- [8] 王猛,孙泽昌,卓桂荣,等. 电动汽车制动能量回收系统研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 6 - 11.
- [9] 杨亚娟,赵韩,朱茂飞. 电动汽车最大能量回收再生制动控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(2): 105 - 112.
- [10] 林志煌. 基于电机电池高效工作的 HEV 再生制动系统仿真研究[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
- [11] 舒红,袁景敏,胡明辉,等. 中度混合动力汽车匀速下坡再生制动策略优化[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(9): 965 - 970.
- [12] 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[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(1): 150 - 154.
- [13] 张承慧,吴剑,崔纳新. 基于无级变速器的并联式混合动力汽车能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 114 - 118.
- [14] Oba H, Yamanaka A, Katsata H, et al. Development of a hybrid powertrain system using CVT in a minivan[J]. Toyota Technical Review, 2002, 51(2): 74 - 79.
- [15] Datong Q, Tao D, Yang Y, et al. Regenerative braking simulation research for CVT hybrid electric with ISG based on forward modeling [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 618 - 624.