

文章编号:1000-582X(2008)09-0965-06

中度混合动力汽车匀速下坡再生制动策略优化

舒红,袁景敏,胡明辉,高银平

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘要:分析混合动力汽车匀速下坡再生制动过程;基于蓄电池充电效率模型、蓄电池温升模型及发电机效率模型,分别以混合动力汽车瞬时再生制动能量回收量最大和总制动能量回收量最大为优化目标,提出了瞬时再生制动优化控制策略和全局优化控制策略;分析了蓄电池温度对混合动力汽车再生制动能量回收效率的影响,计算了汽车在不同坡度和坡长的路况上再生制动能量回收效率,结果表明:全局优化控制策略优于瞬时优化控制策略,且坡度愈大或坡长愈长时,采用全局优化控制策略提高再生制动能量回收效率的效果愈显著。

关键词:混合动力汽车;再生制动;控制策略;蓄电池效率;蓄电池温度

中图分类号:U469.72;TP273.1

文献标志码:A

Optimized regenerative braking strategy for a medium hybrid electric vehicle cruising downhill

SHU Hong, YUAN Jing-min, HU Ming-hui, GAO Yin-ping

(State Key laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The regenerative braking process of hybrid electric vehicles (HEVs) cruising downhill was analyzed. Based on the charging efficiency, temperature model of battery, and efficiency model of the generator, instantaneous and global optimal control strategies were proposed, with the goal of maximum of instantaneous regenerative braking energy and total regenerative braking energy respectively. Regenerative braking energy efficiency on roads of differing slopes and slope lengths were obtained. The results show that global optimal control strategy is better than instantaneous optimal control strategy, and the steeper the slope or the longer the slope is, the more distinct the increase of regenerative braking energy efficiency with a global optimal control strategy is. The influence of battery temperature on efficiency of regenerative braking energy of HEVs was also discussed.

Key words: hybrid electric vehicles (HEV); regenerative braking; control strategy; battery efficiency; battery temperature

混合动力汽车在匀速或减速下坡制动时,汽车的势能和动能将通过发电机转化为电能储存到储能装置中,这样不但实现了再生制动能量的回收,还减少了制动器温升,提高了制动效能和制动安全性能。

关于再生制动控制策略研究,Yeo等^[1]提出的再生制动转矩考虑了蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)和汽车车速的影响,并控制无级变速器(continuously variable transmission, CVT)速比使

收稿日期:2008-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475067);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2007BB0116)

作者简介:舒红(1963-),女,重庆大学副教授,主要从事混合动力汽车仿真及控制研究,(Tel) 023-65102444;
(E-mail)shuhong@cqu.edu.cn。

发电机沿最高效率曲线运行以充分回收再生制动能量。Mukhitdinov 等^[2]分析了包括上述控制策略在内的 4 种再生制动控制策略,其余 3 种策略分别是最大化回收再生制动能量的控制策略,使每一制动距离或时间内再生制动能量回收最大的 CVT 速比控制策略以及模糊逻辑和遗传算法组合应用于控制器的 CVT 速比控制策略。Wang 等^[3]提出的再生制动转矩考虑了汽车车速、发电机最大转矩、发电机状态,储能装置的最大充电功率和电压的影响,以储能装置实际回收的最大再生制动功率为再生制动算法。Gao 等^[4]针对再生制动系统提出了基于 SRM 驱动控制策略的神经网络。

混合动力汽车再生制动能量回收效率与蓄电池充电效率有关。当蓄电池温度升高到一定温度后,充电效率随温度的升高而迅速降低,若此时继续对蓄电池充电不但充电效率低还会缩短蓄电池的使用寿命^[5]。在蓄电池充电过程中,蓄电池温度升高快慢与充电电流的大小有关^[6]。混合动力汽车在坡道上连续再生制动时将 对 蓄 电 池 进 行 连 续 充 电。当 坡 道 较 陡 时,系 统 需 求 的 制 动 转 矩 较 大,若 发 电 机 直 接 采 取 该 制 动 转 矩 进 行 能 量 回 收 会 导 致 蓄 电 池 连 续 大 电 流 充 电,使 蓄 电 池 温 度 迅 速 升 高 到 充 电 低 效 区,不 利 于 再 生 制 动 能 量 的 最 大 回 收,还 会 降 低 蓄 电 池 的 使 用 寿 命。所 以 在 混 合 动 力 汽 车 下 长 坡 再 生 制 动 过 程 中,考 虑 蓄 电 池 温 升 的 影 响 对 于 提 高 能 量 回 收 效 率 是 至 关 重 要 的。

1 中度混合动力汽车基本结构

中度混合动力汽车的结构如图 1 所示。当汽车进行再生制动时,与发动机相连的离合器断开,消除发动机反拖制动,以便回收更多能量。汽车为前轮驱动,再生制动时,能量由前轮通过传动机构由发电机转化为电能并最终储存在蓄电池内。

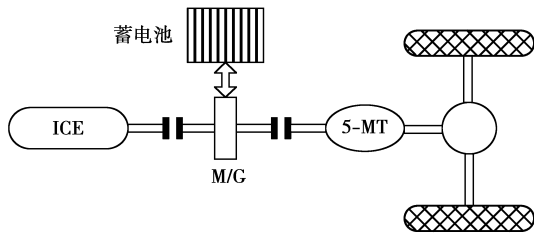


图 1 中度混合动力汽车结构简图

中度混合动力汽车参数为:整备质量 $m_0 = 1\ 625\ \text{kg}$,满载质量 $m = 2\ 000\ \text{kg}$,空气阻力系数 $C_D = 0.32$,迎风面积 $A = 2.28\ \text{m}^2$,主减速比 $i_0 =$

3.85,车轮滚动半径 $r = 0.31\ \text{m}$,滚动阻力系数 $f = 0.0135$ 。各部件主要参数如表 1 所示。

表 1 中度混合动力汽车各部件主要参数

部件	主要参数
发动机	电喷发动机, 1.6 L, 额定功率 67 kW
电动机/发电机	永磁无刷电机, 额定功率 25 kW, 峰值功率 33 kW
蓄电池	镍氢电池, 额定电压 154 V, 容量 6.5 A·h
变速器	5 速 MT

2 混合动力汽车匀速下坡再生制动能量回收控制策略优化

2.1 汽车匀速下坡制动过程分析

汽车在下坡行驶时受到汽车自身重力的下滑分力以及空气阻力的作用,在车轮上还作用有滚动阻力矩、地面制动力以及车轮法向反力,汽车匀速下坡制动时所需的车轮制动功率为

$$P_r = P_a - P_f - P_w, \quad (1)$$

式中: P_r 为车轮需求制动功率, kW; P_a 为下滑力产生的功率 ($P_a = u_a m g \sin \alpha / 3\ 600$), kW; P_f 为滚动阻力功率 ($P_f = u_a m g f \cos \alpha / 3\ 600$), kW; P_w 为空气阻力功率 ($P_w = C_D A U_a^3 / 76\ 140$), kW; α 为坡度, rad; u_a 为汽车车速, km/h; g 为重力加速度, m/s^2 。

2.2 蓄电池计算模型

混合动力汽车再生制动过程中,蓄电池充电电流由蓄电池充电功率、电动势和电阻来确定,如式 (2)(3)^[7]所示。

$$I_c = \frac{E(\text{SOC}, \tau) - \sqrt{E^2(\text{SOC}, \tau) - 4\ 000 R_t(\text{SOC}, \tau) P_c}}{2 R_t(\text{SOC}, \tau)}, \quad (2)$$

$$P_c = -P_r \eta_T \eta_m. \quad (3)$$

充电过程中蓄电池产生的单位热量为

$$Q_{\text{charge}} = 0.152 I_c + I_c^2 R_t(\text{SOC}, \tau). \quad (4)$$

充电过程中从蓄电池外壳散热到冷却空气中的单位热量为^[8]

$$Q_{\text{case}} = (\tau - \tau_{\text{air}}) / R_{\text{eff}}. \quad (5)$$

充电过程中冷却空气的温度为^[8]

$$\tau_{\text{air}} = \tau_{\text{env}} + \frac{0.5 Q_{\text{case}}}{\dot{m} c_{\text{air}}} - 273.15, \quad (6)$$

式(2)–(6)中 I_c 为充电电流, A; P_c 为蓄电池充电功率, kW; $E(\text{SOC}, \tau)$ 为蓄电池电动势, V; $R_t(\text{SOC}, \tau)$ 为蓄电池电阻, Ω ; η_T 为传动效率; η_m 为发电机效率; Q_{charge} 为充电过程中蓄电池所产生的单位热量,

J/s; Q_{case} 为从蓄电池外壳散热到冷却空气中的单位热量, J/s; τ 为蓄电池温度, $^{\circ}\text{C}$; τ_{air} 为冷却空气温度, $^{\circ}\text{C}$; R_{eff} 为有效热阻, Ω ; τ_{env} 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; \dot{m} 为空气质量流量, kg/s; c_{air} 为空气比热, J/(kg · K)。图 2 为电动机/发电机效率图。

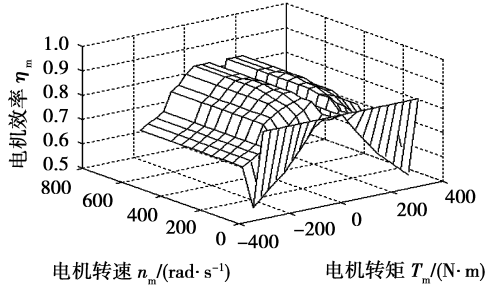


图 2 电动机/发电机效率图

再生制动过程中, 蓄电池温度 τ 和 SOC 变化量分别由式(7)(8)计算^[8]:

$$\Delta\tau = \int_{\Delta t} \frac{Q_{\text{charge}} - Q_{\text{case}}}{m_{\text{bat}} c_{\text{bat}}} dt - 273.15, \quad (7)$$

$$\Delta\text{SOC} = \frac{\int_{\Delta t} E(\text{SOC}, \tau) I_c dt}{W_{\text{htotal}}}, \quad (8)$$

式中: m_{bat} 为蓄电池质量, kg; c_{bat} 为蓄电池内部平均比热, J/(kg · K); W_{htotal} 为蓄电池所固有的初始总能量, J。

蓄电池充电效率由蓄电池性能试验获取, 其值是蓄电池 SOC、温度和充电功率的函数:

$$\eta_b = f(\text{SOC}, \tau, P_c).$$

图 3(a)(b)分别是镍氢蓄电池 SOC 为 0.5、0.6 时的充电效率。由图 3 可知, 当充电功率一定时, 从 0°C 开始, 随着蓄电池温度的上升蓄电池充电效率逐渐上升至最大值, 之后随着蓄电池温度上升蓄电池充电效率下降; 当蓄电池温度一定时, 随着充电功率(指绝对值, 下同)的增大蓄电池充电效率下降。

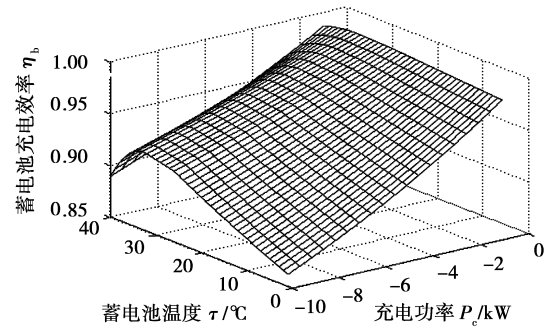
2.3 混合动力汽车匀速下坡再生制动瞬时优化控制

汽车下坡再生制动时, 若需求制动功率小于或等于用下述 2 种优化控制策略所确定的发电机最优再生制动功率, 则制动功率全部由发电机提供; 若需求制动功率大于发电机最优再生制动功率, 则发电机取其最优再生制动功率, 剩余需求制动功率由传统车轮摩擦制动系统提供。

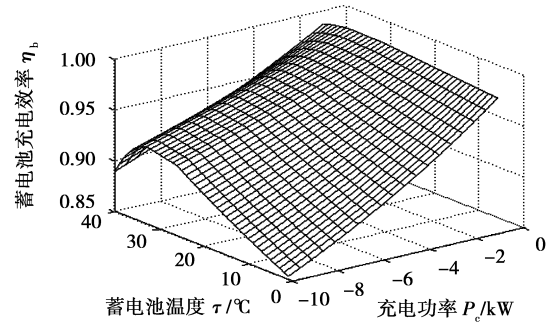
取发电机转矩为优化控制变量

$$x = T_m. \quad (9)$$

取蓄电池回收的瞬时再生制动功率最大为优化目标, 则优化目标函数



(a)SOC 为 0.5 时的蓄电池充电效率



(b)SOC 为 0.6 时的蓄电池充电效率

图 3 不同电池温度与充电功率下的蓄电池充电效率

$$\min f(x) = \min \left(\frac{1}{|x| n_m \eta_m \eta_b} \right), \quad (10)$$

约束条件如下:

$$g_1(x) = x < 0; \quad (11)$$

$$g_2(x) = |x| n_m / 1000 \eta_T - P_r \leq 0; \quad (12)$$

$$g_3(x) = |x| / T_{\text{mm}} - 1 \leq 0, n_m < n_{\text{mb}}; \quad (13a)$$

$$g_3(x) = |x| n_m / 1000 P_{\text{ma}} - 1 \leq 0, n_m \geq n_{\text{mb}}. \quad (13b)$$

式(9)–(13)中: T_m 为发电机转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; n_m 为发电机转速, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; T_{mm} 为发电机最大转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; n_{mb} 为在当前蓄电池 SOC 下的发电机基速, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; P_{ma} 为发电机在当前蓄电池 SOC 下实际能输入的最大发电功率, kW。

再生制动过程中, 蓄电池 SOC 与温度都不能超过允许的上限值, 若超过将切断发电机再生制动系统, 汽车制动力由传统车轮摩擦制动系统提供。该约束条件如式(14)(15)所示。

$$g_4(\tau) = \tau(k) / \tau_{\text{max}} - 1 \leq 0; \quad (14)$$

$$g_5(\text{SOC}) = \text{SOC}(k) / \text{SOC}_{\text{max}} - 1 \leq 0. \quad (15)$$

蓄电池 SOC 和温度 τ 迭代算式:

$$\text{SOC}(k+1) = \text{SOC}(k) + \Delta\text{SOC}(k), \quad (16)$$

$$\tau(k+1) = \tau(k) + \Delta\tau(k), \quad (17)$$

式中: τ_{max} 为蓄电池最高温度限制值, $^{\circ}\text{C}$; SOC_{max} 为蓄电池最大 SOC 限制值; k 表示再生制动过程的第 k

时刻。

上述约束非线性优化问题可用序列二次规划方法求解。

2.4 混合动力汽车匀速下坡再生制动全局优化控制

混合动力汽车能量管理策略的全局优化控制问题通常采用动态规划法来解决^[9-14]。在下坡制动工况已知的前提下,通过动态规划法可以实现混合动力汽车发电机再生制动转矩的最优控制。设下坡制动工况共有 N 个采样点,在一定的约束条件下,动态规划法从第 N 个采样点开始至第 1 个采样点结束,计算每个采样点的最优解,从而得到整个下坡制动工况的最优控制。

取蓄电池 SOC 和温度 τ 为系统状态变量:

$$\mathbf{x}(k) = [\text{SOC}(k), \tau(k)],$$

状态转移方程同式(16)(17)。

取发电机转矩为控制向量

$$\mathbf{u}(k) = [T_m(k)].$$

取每一瞬时再生制动能量回收量 E_k 的累计最大值为性能指标,则性能指标函数为

$$\max J = \sum_0^{N-1} E_k(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)), \quad (18)$$

式中 $E_k = T_m(k)n_m\eta_m\eta_b$ 。 (19)

状态变量和控制变量服从约束条件式(11) - (15)。

动态规划法求解步骤如下:

1)道路循环工况时间点 k 从最后时刻 N 开始。

2)在某一时刻 k 时,逐一选择所有的 SOC 点和 τ 点的组合,计算最优解

$$J_k^*(\mathbf{x}(k)) = \max[E_k(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) + J_{k+1}^*(\mathbf{x}(k+1))], \quad (20)$$

式中: $k=0, 1, \dots, N-1$; J_k^* 为第 k 时刻的最优解,且 $J_N^*=0$ 。

3)时间减少 1 s,重复步骤 2)。

3 控制策略优化计算及结果分析

计算时蓄电池的初始 SOC 设为 0.40,最高 SOC 设为 0.98;蓄电池初始温度设为 25 °C,最高温度限制 τ_{\max} 设为 50 °C。再生制动能量回收效率定义为再生制动过程中蓄电池充电所回收的有效再生制动能量与汽车制动所需要的总制动能量之比:

$$\eta_r = \frac{\int_0^T P_m \eta_m \eta_b dt}{E_b}, \quad (21)$$

式中: η_r 为再生制动能量回收效率; P_m 为发电机优化功率, kW; E_b 为汽车制动所需要的总制动能量

($E_b = \int_0^T P_r dt$), kJ; T 为总的再生制动过程时间, s。

中国山区公路多为三级和四级公路,在这样的公路上,汽车连续下坡的车速范围一般为 30 ~ 40 km/h^[15]。图 4 是汽车以 2 挡车速 35 km/h 在同一坡长(1 000 m)不同坡度的坡道上匀速下坡时,分别采用瞬时优化及全局优化控制策略所获得的再生制动能量回收效率。图 5 是蓄电池温度及发电机转矩图。

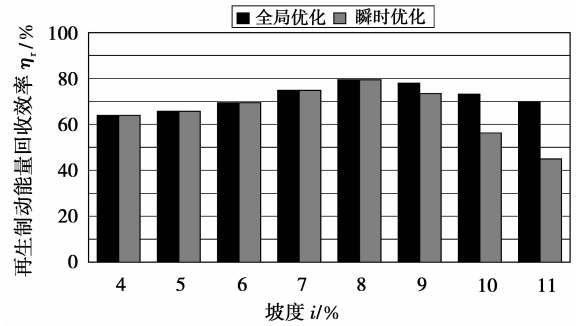
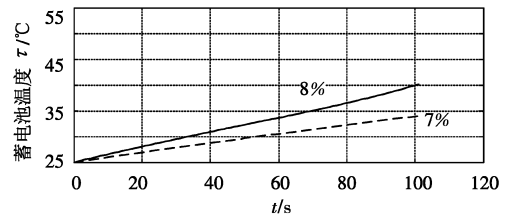
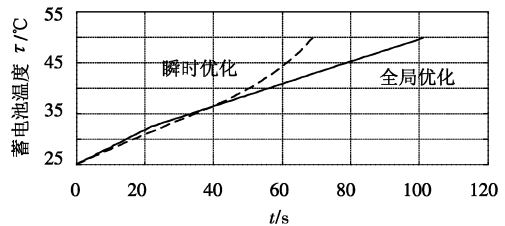


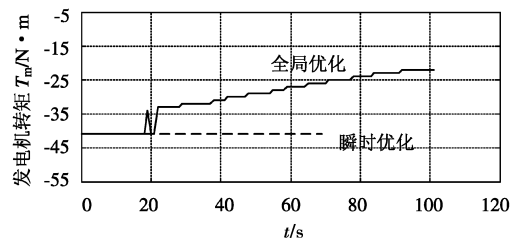
图 4 坡长为 1 000 m 时不同坡度下的再生制动能量回收效率



(a) 汽车下坡再生制动过程中的蓄电池温度



(b) 坡度 10% 时采用全局与瞬时优化控制的蓄电池温度



(c) 坡度 10% 时采用瞬时与全局优化控制的发电机转矩

图 5 蓄电池温度及发电机转矩图

由图 4、5 可得以下结论:1)当坡度小于 8% 时,采用全局优化控制策略得到的再生制动能量回收效

率与采用瞬时优化控制策略相同。这是由于当坡度较小时,汽车需求制动转矩较小,蓄电池温升较缓慢,平均充电效率较高,通过2种优化控制策略计算出发电机的优化转矩(指绝对值,下同)均等于需求制动转矩。如图5(a)所示坡度分别为7%、8%时汽车下坡再生制动过程中蓄电池的温度变化,从图5(a)可知蓄电池温度均未超过50℃,且坡度为7%时的蓄电池温升速度小于坡度为8%时的蓄电池温升速度。2)坡度小于8%时,随着坡度增大再生制动能量回收效率升高。这是由于随坡度增大需求制动转矩增大,发电机优化转矩相应增大,坡度4%~8%对应的发电机优化转矩为12.471~31.993 N·m,而发电机效率在该转矩范围内是递增的。又从图3可知,蓄电池平均充电效率随着充电功率增加而下降,但发电机效率增加量相对蓄电池平均充电效率降低量要多,使得两者的效率的乘积升高,所以再生制动能量回收效率升高。3)当坡度大于8%后,随着坡度的增大再生制动能量回收效率反而减小。这是由于当坡度增加时,汽车制动所需要的总制动能量增加,但发电机效率逐渐下降,蓄电池平均充电效率也下降,导致蓄电池回收的有效再生制动能量增加相对较小,所以再生制动能量回收效率随坡度增大而降低。4)坡度大于8%后,采用全局优化控制策略的再生制动能量回收效率明显高于瞬时优化控制策略。这是由于采用全局优化控制策略获得的发电机优化转矩有效地降低了蓄电池的温升速度,提高了蓄电池平均充电效率,使更多的制动能量得到了回收,提高了再生制动能量回收效率。如图5(b)坡度为10%时,采用全局与瞬时优化控制策略的蓄电池温度变化图。由图5(b)可见,在38s之前采用上述2种控制策略的蓄电池温升速度相近,38s之后采用瞬时优化控制策略的蓄电池温升速度迅速加快,而采用全局优化控制策略的蓄电池温升速度较缓慢,且充电时间较长,所以蓄电池平均充电效率较高,提高了再生制动能量回收效率。图5(c)为坡度10%时分别采用瞬时优化与全局优化控制策略所得的发电机优化控制转矩。

图6为同一坡度(9%)不同坡长的坡道上,汽车以2挡车速35 km/h匀速下坡时的计算结果。由图6可得以下结论:1)随着坡长的增加再生制动能量回收效率降低。这是由于随着坡长增加,汽车制动所需要的总制动能量增加,但是由于蓄电池充电时间

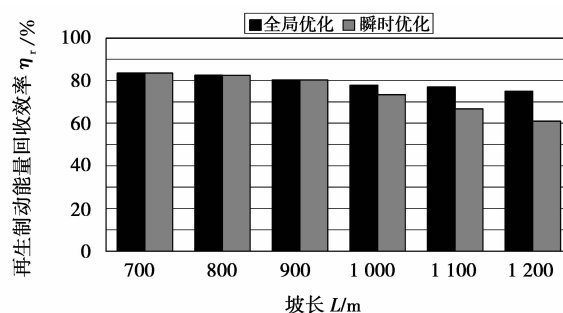


图6 坡度9%时不同坡长下的再生制动能量回收效率

增加,温度升高较多,使得再生制动过程蓄电池的平均充电效率降低,蓄电池回收的有效制动能量相对增加较少,所以再生制动能量回收效率减少。2)坡长小于900m时,采用全局优化控制策略得到的能量回收效率与采用瞬时优化控制的相同。这是因为坡长较短时,蓄电池充电时间较短,温度升高较少,充电效率较高,通过2种优化方法计算得出发电机优化转矩均等于需求制动转矩。3)坡长大于1000m后,与采用瞬时优化控制策略比较,采用全局优化控制策略降低了蓄电池温升速度,提高了再生制动能量回收效率,且坡长越长全局优化控制策略的优化效果越显著。

4 结 语

混合动力汽车进行下长坡再生制动时,蓄电池温升对蓄电池充电效率及再生制动能量回收效率有着很大的影响。笔者分别建立了混合动力汽车匀速下坡再生制动瞬时优化控制策略和全局优化控制策略的计算模型。对汽车在几种不同的路况上的再生制动过程进行了优化计算,结果表明全局优化控制策略有效地控制了汽车匀速下坡再生制动过程中蓄电池温升速度。当坡度较小或坡长较短时,全局优化控制效果与瞬时优化控制相同,但当坡度或坡长增大到一定程度后,前者的优化控制效果优于后者,且路面坡度愈大或坡长愈长时全局优化控制策略提高再生制动能量回收效率的效果愈显著。

下一步的研究重点是提高动态规划的计算效率,并将再生制动全局优化控制策略与模型预测控制相结合,应用于基于GPS/GIS的混合动力汽车预测控制中,使蓄电池充电电流及温升得到有效控制,从而保证汽车整个制动过程的再生制动能量回收效率最高。

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/OL] // International Continuously Variable and Hybrid Transmission Congress, California, USA, September 23-25, 2004 [2008-03-15]. <http://www.lib.ucdavis.edu/dept/pse/resources/cvt04/papers/04CVT-41.pdf>.
- [2] MUKHITDINOV A A, RUZIMOV S K, ESHKABILOV S L. Optimal control strategies for CVT of the HEV during a regenerative process[C]// 2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles, December 18-20, Pune, India. Pune:[s. n.], 2006:1-12.
- [3] WANG F, ZHONG H, MAO X J, et al. Regenerative braking algorithm for a parallel hybrid electric vehicle with continuously variable transmission [C] // 2007 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, December 13-15, Beijing, China. Beijing:[s. n.], 2007:1-4.
- [4] GAO H W, GAO Y M, EHSANI M. A neural network based SRM drive control strategy for regenerative braking in EV and HEV[C]// Electric Machines and Drives Conference, June 17-20, 2001, Cambridge, MA. [S. l.]: IEEE Press, 2001:571-575.
- [5] 范美强, 廖维林, 吴伯荣, 等. 电动汽车用 MH-Ni 电池温度特性研究[J]. 电池工业, 2004, 9(6):287-288.
FAN MEI-QIANG, LIAO WEI-LIN, WU BO-RONG, et al. Temperature characteristic of MH-Ni battery used in EVs[J]. Chinese Battery Industry, 2004, 9(6): 287-288.
- [6] 李海晨, 田光宇, 赵立安, 等. 电动车用 MH/Ni 电池的充放电特性[J]. 电池, 2002, 32(2):282-284.
LI HAI-CHEN, TIAN GUANG-YU, ZHAO LI-AN, et al. Character of MH/ Ni battery used in EV[J]. Battery Bimonthly, 2002, 32(2):282-284.
- [7] 胡明辉, 秦大同, 舒红, 等. 混合动力汽车电池管理系统 SOC 的评价[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2003, 26(4):20-23.
HU MING-HUI, QIN DA-TONG, SHU HONG, et al. SOC definition of battery management system used in hybrid vehicles[J]. Journal of Chongqing University: Nitural Science Edition, 2003, 26(4):20-23.
- [8] 胡明辉, 秦大同, 石万凯, 等. 混合动力汽车镍氢电池组温度场研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(1):37-40.
HU MING-HUI, QIN DA-TONG, SHI WAN-KAI, et al. A study on temperature field of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(1):37-40.
- [9] KOOT M, KESSELS J T B A, HEEMELS W PM H, et al. Energy management strategies for vehicular Electric power systems [J]. IEEE, 2005, 54(3): 771-781.
- [10] HOFMAN T, VAN DRUTEN R. Energy analysis of hybrid vehicle powertrains[C/OL]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Vehicular Power and Propulsion (VPP 2004), Paris, France, October 6-8, 2004 [2007-05-05]. <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/4501.pdf>.
- [11] ARSIE I, GRAZIOSI M, PIANESE C, et al. Optimization of supervisory control strategy for parallel hybrid vehicle with provisional load estimate[C/OL]// Proceedings of the 7th International Symposium on Adv. Vehicle Control (AVEC), Arnhem, Netherlands, August 23-27, 2004: 483-488 [2008-03-15]. http://www.dimec.unisa.it/leonardo/Documents/AVEC04_080_Optimization.
- [12] 欧阳易时, 金达锋, 罗禹贡. 并联混合动力汽车功率分配最有控制及其动态规划性能指标的研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(2):117-121.
OUYANG YI-SHI, JIN DA-FENG, LUO YU-GONG. An investigation into the optimal control of power distribution for PHEV and the appropriate performance indicator for dynamic programming [J]. Automotive Engineering, 2006, 28(2):117-121.
- [13] 浦金欢, 殷承良, 张建武. 并联型混合动力汽车燃油经济性最优控制[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 947-951.
PU JIN-HUAN, YIN CHENG-LIANG, ZHANG JIAN-WU. Fuel optimal control of parallel hybrid electric vehicle [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(6):947-951.
- [14] LAURA V P, GUILLERMO R B, DIEGO M, et al. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2006, 73(1):244-254.
- [15] 余强. 客车连续下坡制动性能试验研究[R]. 西安:长安大学, 2000.

(编辑 张 苹)