

电动汽车最大能量回收再生制动控制策略的研究*

杨亚娟¹, 赵韩¹, 朱茂飞²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 江淮汽车股份有限公司新能源汽车研究院, 合肥 230601)

[摘要] 本文中针对一款轻型混合动力汽车进行了再生制动控制策略的研究。首先,以整体效率最高为目标,提出了最大能量回收制动控制策略,并采用序列二次规划法对充电功率进行优化,获得ISG电机优化转矩。接着建立了整车仿真模型,采用模糊控制方法对优化的ISG电机转矩进行跟随控制。分别进行了NEDC循环和3种不同制动力的仿真,得到不同工况下的再生制动能量回收率。最后进行了与仿真工况相应的实车试验,验证了控制策略的有效性。

关键词: 电动汽车;再生制动;模糊控制策略

A Study on the Control Strategy for Maximum Energy Recovery by Regenerative Braking in Electric Vehicles

Yang Yajuan¹, Zhao Han¹ & Zhu Maofei²

1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. Research Institute of New Energy Vehicles, Jianghuai Automobile Co., Ltd., Hefei 230601

[Abstract] The regenerative braking control strategy for a light hybrid electric vehicle (LHEV) is studied in this paper. Specifically, a braking control strategy for maximum energy recovery is proposed first with an objective of highest overall efficiency, and the charging powers are optimized by using sequential quadratic programming technique to obtain optimized torque working points of ISG motor. Then a simulation model for LHEV is built, a tracking control is performed over optimized torque of ISG motor with fuzzy control scheme, and a simulation is conducted on three different braking forces respectively with NEDC cycle to obtain energy recovery ratios in regenerative braking. Finally a real vehicle test corresponding to simulation conditions is carried out to verify the effectiveness of control strategy proposed.

Keywords: electric vehicles; regenerative braking; fuzzy control strategy

前言

制动能量回收能力是电动汽车(包括纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车等)最重要的特点之一。在制动或减速时,电动汽车中的发电机将汽车的动能或势能转换为电能,存储在能量存储单元中,从而显著提高汽车的能量利用效率。

再生制动的控制原理对能量回收效果和制动时的安全性及舒适性有重要的影响。制动系统的设计

首先要考虑汽车的安全性,包括快速降低车速和保持制动时方向的稳定性。这些安全性对制动力的具体要求是在各个车轮上提供足够大的制动力,并合理分配制动力。在电动汽车中,机械摩擦制动与电再生制动同时存在。这种混合制动系统有多种控制策略,控制策略的设计目标是要保证汽车的制动性能和尽可能多地回收制动能量。这两个目标常常要求不同的制动力分配,所以制动控制策略的设计就是根据目标要求找到两者间合适的平衡点。文献[1]中研究了一种在兼顾制动安全性和驾驶员制动

* 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2008AA11A139)资助。

原稿收到日期为2011年9月28日,修改稿收到日期为2011年11月20日。

感觉的前提下实现高效率能量回收的制动系统。文献[2]和文献[3]中研究了在防止车轮抱死,提高制动时的操纵性和稳定性的前提下更大限度地回收制动能量的方法。文献[4]和文献[5]中进行了混合动力汽车制动能量回收与ABS集成控制的研究。

本文中针对一款轻型混合动力汽车,在满足ECE制动法规要求并尽量提高安全性和驾驶员感觉的前提下,提出了一种最大制动能量回收控制策略。该控制策略对制动时的ISG电机工作点进行基于全局效率最优的优化,把优化后的ISG电机工作点用于制动过程中,采用模糊控制的方法对ISG电机转矩进行控制。最后对这个控制策略进行仿真分析,并与试验结果进行对比。

1 最大制动能量回收控制策略的原理

该轻型混合动力汽车的结构简图如图1所示。总制动力由机械摩擦制动力和电再生制动力组成,而电再生制动力只作用在前轮上。控制策略的目的是解决制动力在前后轮上的分配和机械制动力与电再生制动力的分配问题。

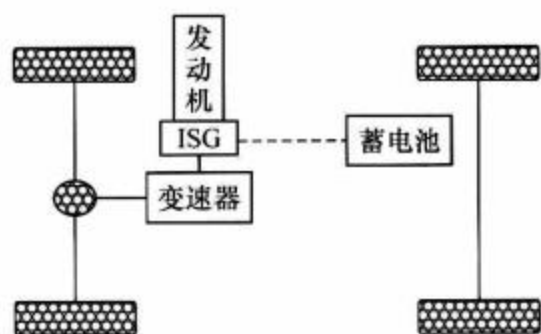


图1 轻型混合动力汽车结构简图

制动时的前后轮制动力根据理想制动力分配曲线分配时,能充分利用地面的附着条件,达到快速制动和保持方向稳定性的目的。对于混合动力汽车,后轮的制动力是纯机械制动力,前轮的制动力是机械制动和再生制动之和。要实现最大制动能量回收,就要使制动力优先施加在前轮上。

ECE制动规程约定了最大前制动力曲线,也即最小后制动力曲线,因此施加在前轮上的最大可能的再生制动力受限于ECE规程。ECE规程规定了非线性的制动力分配曲线。为简化控制和减少计算量,对ECE规程进行适当简化,把它近似成线性的制动力分配曲线。

当汽车在附着系数为 φ 的路面上以减速度 j 制动时,总的制动力是一定的,即

$$F_b = F_{bf} + F_{br} = Mj \quad (1)$$

$$F_{bf} = F_{bf_mech} + F_{moto} \quad (2)$$

式中: F_b 为驾驶员要求的总制动力; F_{bf} 为前轴上的制动力; F_{br} 为后轴上的制动力; M 为汽车质量; F_{bf_mech} 为前轴上的机械制动力; F_{moto} 为前轴上的电再生制动力。

只要满足总的制动力要求,前后轮上的制动力可随意分配。但是,基于安全性考虑,要求制动时无车轮抱死,并且后轮制动力要在ECE规程曲线上方。

2 基于效率最优的ISG电机工作点优化

2.1 约束条件

基于上述思想,初步界定出前后制动力分配的可行区域,见图2。图中计算基于汽车在良好水泥路面上行驶,路面附着系数为0.9。图2中曲线1、2、3所围区域为初步界定的前后轮制动力分布区。

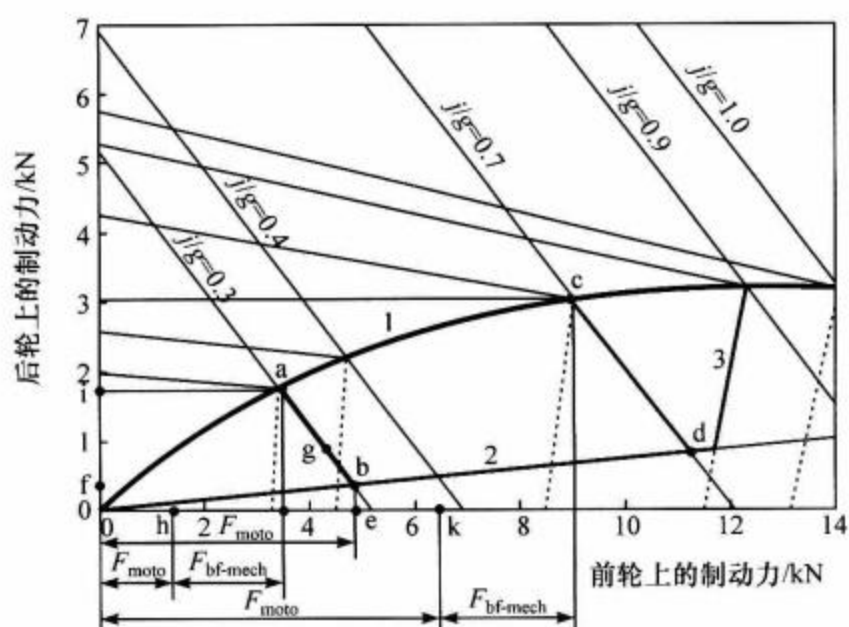


图2 前后轮制动力分布区域

曲线1为理想制动力分配曲线,可用式(3)表示。

$$\begin{cases} F_{bf} + F_{br} = \varphi Mg \\ F_{bf} = \varphi F_{z1} \\ F_{br} = \varphi F_{z2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中} \begin{cases} F_{z1} = \frac{Mg}{L}(b + \varphi h_g) \\ F_{z2} = \frac{Mg}{L}(a - \varphi h_g) \end{cases} \quad (4)$$

由上式可得

$$F_{br} = \frac{1}{2} \left[\frac{Mg}{h_g} \sqrt{b^2 + \frac{4h_g L}{Mg} F_{bf}} - \left(\frac{Mgb}{h_g} + 2F_{bf} \right) \right] \quad (5)$$

式中: F_{z1} 、 F_{z2} 分别为地面对前后轴车轮的法向反力; h_g 为质心到地面高度; L 、 a 、 b 分别为轴距、质心到前轴距离和质心到后轴距离。

曲线 2 为简化的 ECE 规程线,可用式(6)表示。

$$F_{br} = \frac{1-\beta}{\beta} F_{bf} \quad (6)$$

其中 $\beta = \frac{2\sqrt{0.07bh_g} + b + 0.07h_g}{0.85L}$

曲线 3 为 $\varphi=0.9$ 的 f 线,可用式(7)表示。

$$F_{br} = \frac{L-\varphi h_g}{\varphi h_g} F_{bf} - \frac{Mgb}{h_g} \quad (7)$$

对于较小的制动减速度需求,例如当 $j=0.3g$ 时,此时前后制动力可以沿线段 ab 任意分配。若 ISG 电机能提供的再生制动力大于或等于点 b 对应的横坐标值,则前后制动力按点 b 分配。前轮制动力全部由再生制动承担,由点 e 确定,后轮机械制动力由点 f 确定。若 ISG 电机能提供的再生制动力小于点 b 对应的横坐标值,且大于点 a 的横坐标值,用点 g 表示,则前后制动力按点 g 分配。若 ISG 电机能提供的再生制动力小于点 a 的横坐标值,用点 h 表示,则前后轮制动力按点 a 分配。ISG 电机提供其最大再生制动力,前轮不足制动力由机械制动力提供。后轮制动力由点 i 确定。对于驾驶员的较大制动减速度需求,例如当 $j=0.7g$ 时,此时前后制动力可以沿线段 cd 任意分配。此时 ISG 电机能提供的再生制动力小于点 c 对应的横坐标值,用点 k 表示,此时前后制动力按点 c 分配,前轮制动力由再生制动和机械制动共同承担。

2.2 目标函数

ISG 电机转矩施加到车轮处的制动力为

$$F_{moto} = T_m r_0 r / (R \eta_t) \quad (8)$$

式中: T_m 为 ISG 电机转矩; r_0 为主减速比; r 为变速器速比; R 为车轮半径; η_t 为传动效率。

车速可以表示为

$$v = Rn / (r_0 r) \quad (9)$$

式中: n 为 ISG 电机转速。

则再生制动功率为

$$P_{moto} = F_{moto} v = T_m n / \eta_t \quad (10)$$

为回收得到最大的制动能量,要求得到不同转速、制动减速度和电池荷电状态下电池的最大充电功率 P_{char} ,即优化的目标函数为

$$\max P_{char} \quad (11)$$

为求解方便,转化成最小值问题为

$$\min f(x) = \min \left(\frac{1}{P_{char}} \right) = \min \left(\frac{1}{P_{moto} \eta_m \eta_c \eta_t} \right)$$

将式(10)代入式(11)得

$$\min f(x) = \min \left(\frac{1}{T_m n \eta_m \eta_c} \right)$$

式中: η_m 为 ISG 电机效率; η_c 为充电效率,与电池荷电状态有关。

图 3 和图 4 分别为电机和电池效率图。

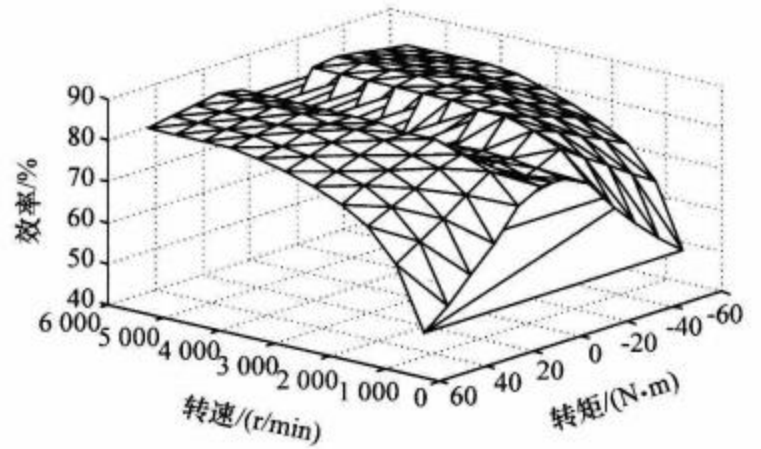


图 3 ISG 电机效率图

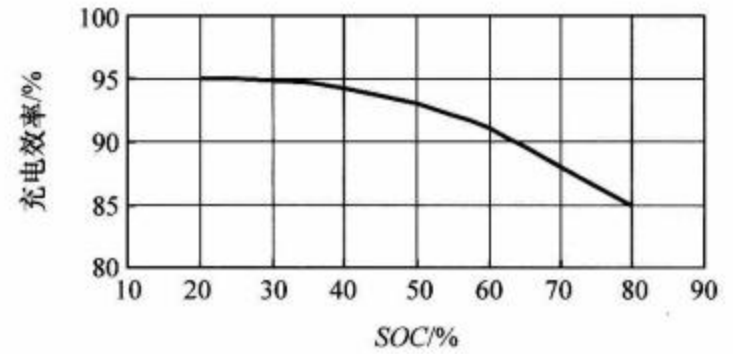


图 4 电池充电效率曲线

2.3 模型离线优化计算

影响充电功率的因素有制动减速度、ISG 电机转速、ISG 电机效率和充电效率等。根据上面的约束条件,在 $0 \sim 0.9g$ 的制动减速度范围和全 ISG 电机 map 范围内,对充电功率进行优化计算。采用序列二次规划方法 (SQP) 进行求解,得到再生制动所用的 ISG 电机转矩工作点。图 5 为 SOC 值为 60% 时的优化转矩。

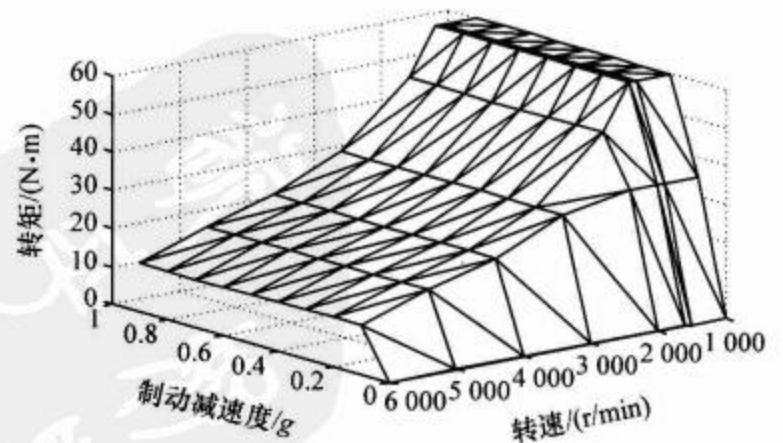


图 5 ISG 电机优化转矩

3 控制策略仿真

利用 Matlab/Simulink 平台建立了轻型混合动力汽车仿真模型。建模采用理论建模和试验建模相结合的方法,利用整车动力学理论建立传动系统和行驶系统模型,包括驾驶员、离合器、变速器和行驶阻力等,利用台架试验数据建立发动机、ISG 电机和电池模型。根据控制策略建立控制系统模型。

3.1 模糊控制器设计

模糊控制器的任务是在制动过程中将 ISG 电机转矩调整到最佳值附近。模糊控制器输入为实际 ISG 电机转矩 T 与目标转矩 T_{req} 之差 S 及其变化率 dS/dt , 输出为电流变化量 ΔI 。输入语言变量和输出语言变量采用三角形隶属函数。控制逻辑如图 6 所示。

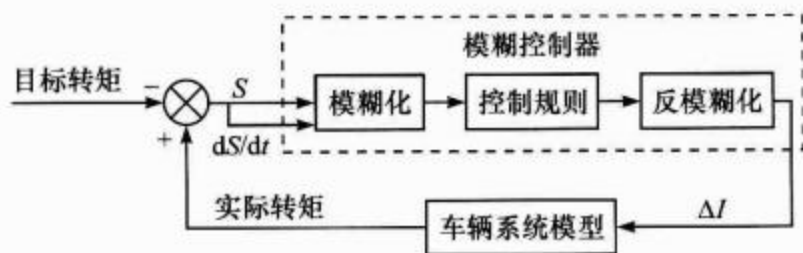


图 6 ISG 电机转矩模糊控制器

输入误差 S 的语言变量隶属函数如图 7 所示, 同样定义误差变化率及输出的语言变量隶属函数。

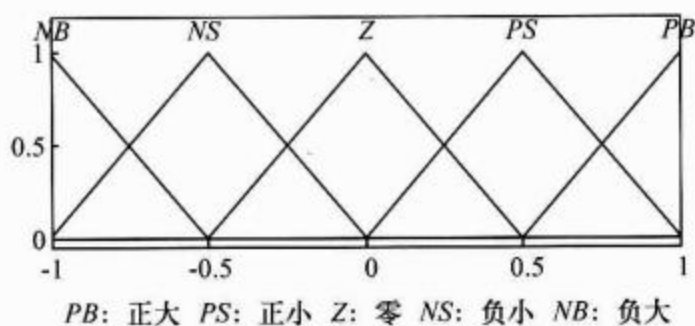


图 7 误差 S 对应语言变量隶属函数

模糊控制规则遵循以下规律。

(1) 若 ISG 电机实际转矩远大于目标转矩, 即转矩差 S 为 PB 时, 如果此时误差的变化率 dS/dt 也为 PB , 为尽快消除误差, 应快速减小转矩, 则控制量 ΔI 取 NB ; 若此时误差变化率为 NS , 即误差有减小的趋势, 则控制量 ΔI 取 NS , 防止系统超调。

(2) 若 ISG 电机实际转矩远小于目标转矩, 即转矩差 S 为 NB 时, 如果此时误差变化率 dS/dt 也为

NB , 为尽快消除误差, 应快速增大转矩, 则控制量 ΔI 取 PB ; 若此时误差变化率为 PS , 即误差有减小的趋势, 则控制量 ΔI 取 PS 。而当误差变化率为 PB 时, 因为容易超调, 控制量取 Z 。

控制规则表如表 1 所示。

表 1 ISG 电机转矩模糊控制器控制规则

ΔI		S				
		PB	PS	Z	NS	NB
dS/dt	PB	NB	NB	NS	Z	Z
	PS	NB	NS	Z	PS	PS
	Z	NS	NS	Z	PS	PB
	NS	NS	Z	PS	PS	PB
	NP	NS	Z	PS	PB	PB

3.2 仿真分析

采用新欧洲行驶循环工况 (NEDC) 和初速度为 100km/h 的 3 种不同制动踏板力制动对控制策略进行仿真分析。仿真初始 SOC 值设置为 60%。图 8 为 NEDC 循环工况仿真计算结果。

NEDC 循环的制动减速度较小, 大部分在 0.1g 以下, 制动力主要由再生制动承担。从图 8(d) 可以看出, 制动回馈效果明显。

不同制动力仿真设定制动踏板行程分别为 30%、50% 和 80%, 以 100km/h 的初速度进行制动, 初始挡位设定为 5 挡。图 9 为不同制动力仿真计算结果。

3 种不同制动踏板行程仿真时, 制动减速度较大, 都在 0.4g 以上。制动踏板行程为 80% 时, 达到路面附着力极限, 所以制动减速度根据地面能提供的最大附着力计算, 在图 9(b) 中, 最大制动减速度沿图中直线段。在制动过程中, ISG 电机发出了最大转矩, SOC 上升很明显, 只是由于制动时间较短, 回收的总能量有限。

通过计算车辆的动能和电池充电电能来确定能量回收率。

车辆动能为

$$\sum E_T = \sum \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (12)$$

电池充电电能为

$$\sum E_{bat} = \int_0^t U(t) \cdot I(t) dt \quad (13)$$

在 NEDC 循环中, 总共有 14 段区间处于制动状

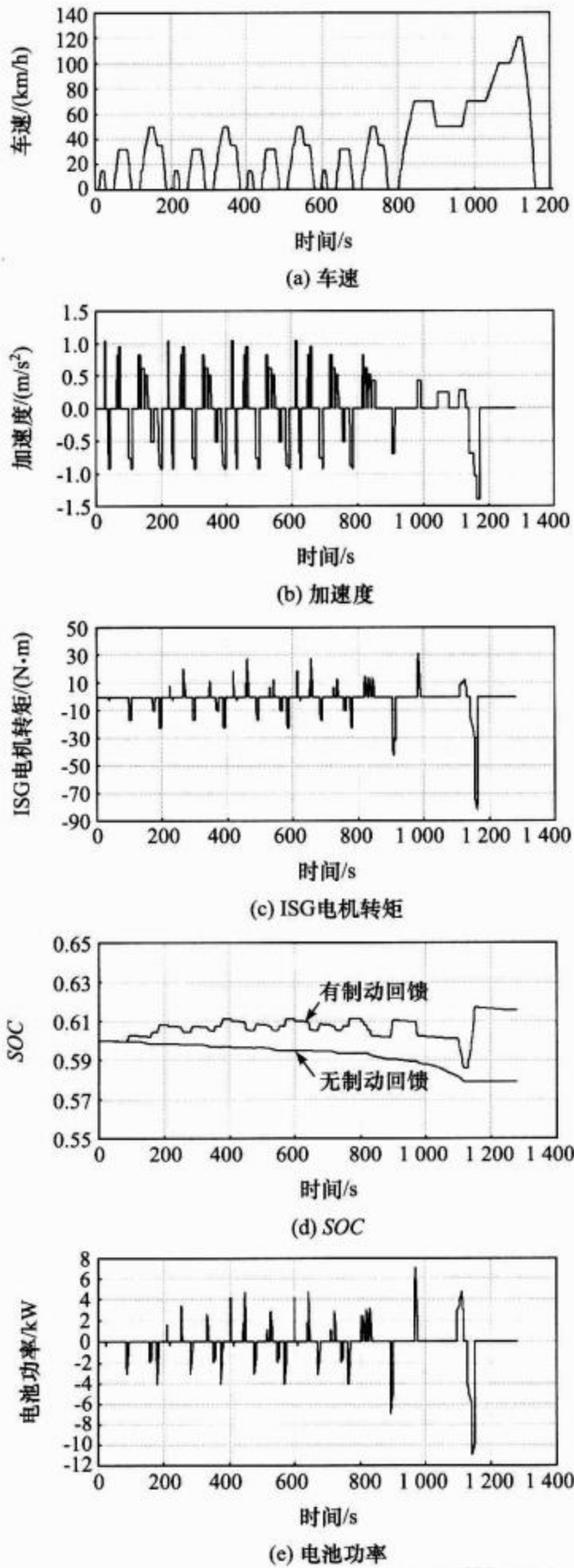


图8 NEDC循环工况仿真计算结果

态,车辆动能计算如表2所示。

3种不同制动力制动时车辆动能为488 812J。

仿真计算所得能量回收率如表3所示。

由表3可以看出,对于NEDC循环,由于在循环过程中,制动减速度相对较小,在良好的路面附着条件下,制动过程主要采用ISG电机制动,所以能量回

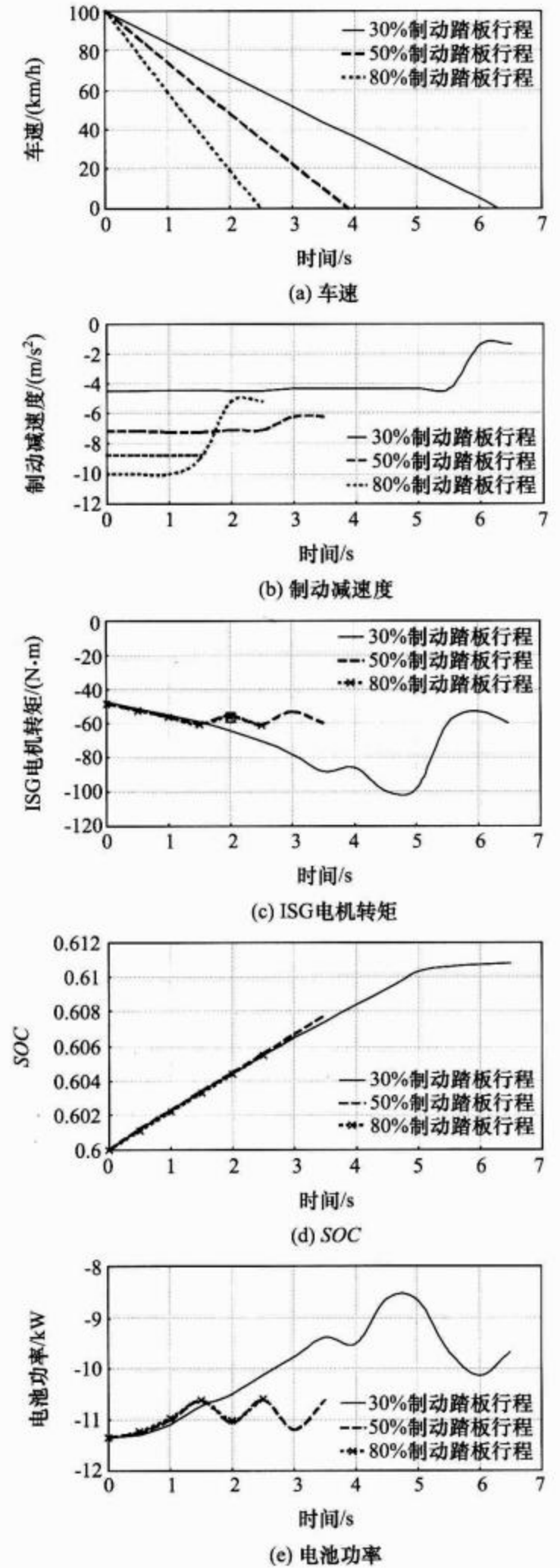


图9 不同制动力仿真计算结果

收率达到25%以上。对于3种不同制动力仿真,由于制动减速度较大,ISG电机能施加的制动力受本身能力所限,机械制动随减速度增大而占比加大。所以随着需求制动力的加大,能量回收率降低。

表2 NEDC 循环制动能量计算

序号	制动次数	起始车速/(km/h)	停止车速/(km/h)	每次回收的车辆动能/J
1	4	15	0	10 998
2	4	32	0	50 054
3	4	50	0	122 203
4	1	70	50	117 315
5	1	120	0	703 889
总计				1 554 226

表3 不同工况仿真能量回收率对比

工况	车辆动能/J	充电电能/J	能量回收率/%
30% 制动踏板行程	488 812	65 000	13.30
50% 制动踏板行程	488 812	38 367	7.85
80% 制动踏板行程	488 812	27 398	5.61
NEDC	1 554 226	390 754	25.14

4 控制策略试验

分别在底盘测功机上进行了 NEDC 循环工况试验和在道路上进行了不同制动力试验。道路试验在干水泥路面进行,对制动踏板进行了限位设置,以初速度 100km/h 分别进行轻度制动、中度制动和重度制动试验。道路试验无车辆抱死的情况发生。图 10 ~ 图 13 为试验结果曲线。

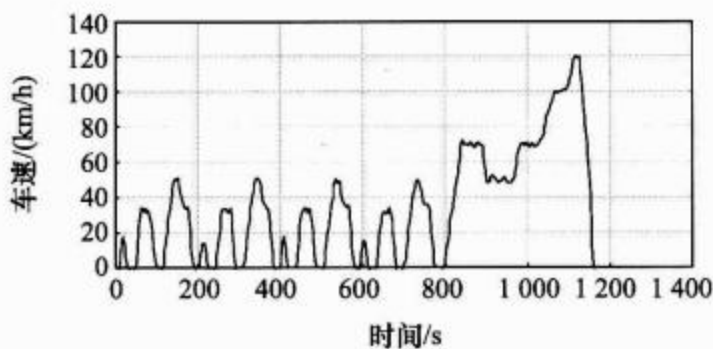


图 10 NEDC 循环车速变化曲线

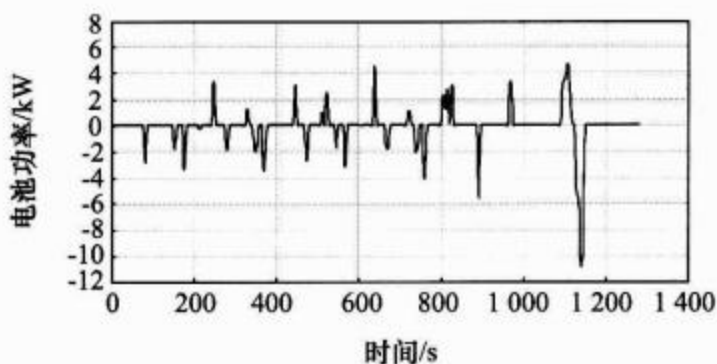


图 11 NEDC 循环电池功率曲线

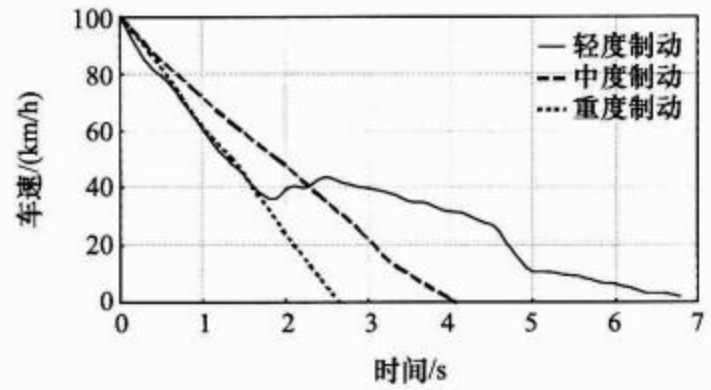


图 12 不同制动力试验车速曲线

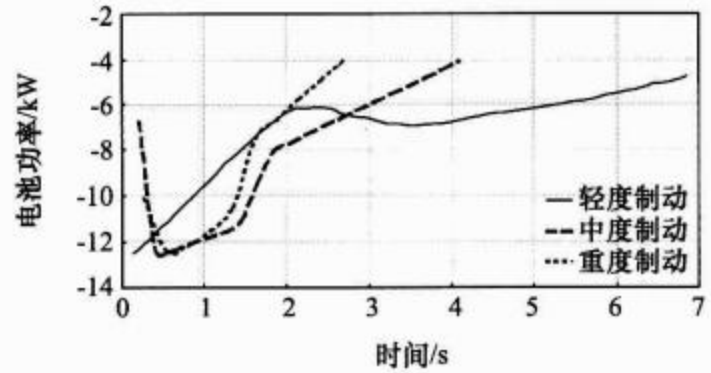


图 13 不同制动力试验电池功率曲线

试验结果制动能量回收率如表 4 所示。

表4 不同工况试验能量回收率对比

工况	车辆动能/J	充电电能/J	能量回收率/%
轻度制动	488 812	49 702	10.17
中度制动	488 812	32 645	6.68
重度制动	488 812	25 200	5.16
NEDC	1 554 226	403 981	25.99

通过以上分析可以看出,所设计的制动控制逻辑可以使车辆在 NEDC 循环中有较高的能量回收率,试验结果与仿真结果吻合较好。对于重度制动,有效利用了 ISG 电机的能力。由于试验环境中不确定性因素的影响,实车试验与仿真结果存在一定差异,但总体来看,在车速、制动时间和能量回收率方面具有较高的相似度。

5 结论

(1) 针对一款轻型混合动力汽车进行了再生制动控制策略的研究。在满足 ECE 制动法规的基础上,兼顾良好的制动感觉,以整体效率最高为目标,建立了最大能量回收制动控制策略。利用序列二次规划方法,对 ISG 电机工作区域进行模型离线优化,得到不同转速、不同减速度和不同电池 SOC 值下的
(下转第 132 页)