

单轴联结式并联混合动力汽车分层切换控制设计

付主木^{1,2†}, 李东卫¹, 宋书中^{1,2}, 王晓红^{1,2}

(1. 河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471023;

2. 河南科技大学 河南省机器人与智能系统重点实验室, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为提高整车燃油经济性, 降低尾气排放, 本文针对单轴联结式并联混合动力汽车 (parallel hybrid electric vehicle, PHEV) 提出了一种分层切换控制方法. 首先, 在分析发动机稳态效率和电池充放电内阻变化规律基础上, 采用分层切换思想, 制定了PHEV各运行模式间切换规则. 然后, 研究了不同目标运行模式下的能量分配策略, 针对单一驱动模式和3种制动模式, 设计了基于规则的转矩分配策略; 针对混合模式, 分别设计了行车充电/混合驱动模式下的Lyapunov优化功率分配策略以及驻车充电模式下的Willans line模型极值法功率分配策略. 最后, 仿真结果表明, 所提出方法可确保发动机和电池工作在高效区. 在UDDS+HWFET工况下, 与电辅助策略相比, 百公里油耗降低了40.82%, CH, CO和NO_x的排放量分别减少了2.86%, 4.41%和8.02%; 与基于庞特里亚金最小值原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)的全局优化策略相比, 百公里油耗降低了9.37%.

关键词: 混合动力汽车(HEV); 分层控制; 切换控制; Lyapunov优化算法

中图分类号: TP273; U469.72 文献标识码: A

Hierarchical switching control design for single-axle parallel hybrid electric vehicles

FU Zhu-mu^{1,2†}, LI Dong-wei¹, SONG Shu-zhong^{1,2}, WANG Xiao-hong^{1,2}

(1. Information Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023, China;

2. Henan Key Laboratory of Robot and Intelligent Systems, Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471023, China)

Abstract: In order to improve the fuel economy and reduce the exhaust emissions, a hierarchical switching control method for single-axle parallel hybrid electric vehicles (PHEVs) is proposed in this paper. Firstly, based on analyzing the steady-state efficiency of the engine and the change laws of batteries charge/discharge internal resistance, the switching rules between operation modes of PHEV are formulated by a hierarchical switching idea. Then, the energy allocation strategies under different target operating modes are researched. For single driving modes and three braking modes, a torque distribution strategy based on rules is devised. For the hybrid modes, a power allocation strategy on the basis of the Lyapunov optimal algorithm is designed in driving charge or hybrid driving mode, and a Willans line model extreme-value method of power allocation strategy is developed to split the power in the parking charge mode, respectively. Finally, simulation results show that the proposed strategy can ensure the engine and batteries work in high-efficiency area. Under UDDS+HWFET cycle conditions, the fuel consumption per hundred kilometers is reduced by 40.82%, CH, CO and NO_x emissions by 2.86%, 4.41% and 8.02% respectively compared with that of the electric assist control strategy. The fuel consumption per hundred kilometers decreases by 9.37% compared with that of the global optimization strategy based on Pontryagin's minimum principle (PMP).

Key words: hybrid electric vehicle (HEV); hierarchical control; switching control; Lyapunov optimal algorithm

1 引言(Introduction)

并联混合动力汽车(parallel hybrid electric vehicle, PHEV)提高了发动机运行效率, 增加了续行里程, 从而有效地降低了汽车的燃油消耗和尾气排放, 已成为

世界各大汽车公司争相研发的热点. PHEV具有发动机和电机两种动力源, 存在多种运行模式, 循环工况下各模式间的切换控制以及各目标运行模式下能量分配已成为研究的重点.

收稿日期: 2016-12-22; 录用日期: 2017-07-11.

†通信作者. E-mail: fzm1974@163.com; Tel.: +86 13513844662.

本文责任编辑: 陈虹.

国家自然科学基金项目(61473115), 河南省高校科技创新团队支持计划(18IRTSTHN011)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61473115) and Science and Technology Programme Foundation for Innovative Team of Henan Province University (18IRTSTHN011).

在PHEV切换控制方面,周奇勋等^[1]从控制发动机输出负荷角度出发,对发动机、集成起动发电一体机(integrated starter generator, ISG)、电池组稳态工作区域进行划分,制定了ISG混合动力汽车模式切换规则和转矩分配策略,在保证发动机工作在高效区域的同时,提高了汽车的燃油经济性;魏光璞^[2]考虑发动机稳态效率和电池组的安全工作确定了由需求转矩和电池荷电状态(state of charge, SOC)组成的模式迁移条件,将电池SOC和发动机/电机扭矩控制在合理范围内;曹占国^[3]基于电池充放电内阻变化规律和发动机稳态效率,制定了基于状态切换的转矩分配策略,提高了发动机的工作效率,使电池始终工作在高效区.在PHEV功率分配方面,申彩英等^[4]针对给定的混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)功率需求,采用改进的动态规划(dynamic programming, DP)算法,优化发动机和电机两种动力源的输出功率,减小了计算量;夏超英等^[5]提出了一种基于二次型性能指标最优的HEV功率分配方案,提高了系统的实时性;KIM等^[6]给出了表征油耗的哈密顿函数,通过打靶法选取函数中协态变量初值,利用庞特里亚金最小值原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)求解最优解,取得接近于DP全局优化策略的功率分配效果,且计算量明显减小;Balaji和Roberto等^[7-8]构建了油耗代价函数,利用Lyapunov优化代价函数的方法,得到了发动机最优功率,达到了接近PMP策略的优化效果.在PHEV转矩分配方面,Stefano和赵韩等^[9-10]提出了一种基于马尔科夫随机模型预测控制策略,得到了最优转矩分配;赵子亮和黄妙华等^[11-12]以发动机稳态效率为基础,利用基于规则的电辅助策略,合理分配发动机、主电机和ISG电机的目标转矩,降低了发动机燃

油消耗,维持了电池SOC的平衡.

由以上分析可知,现有成果在PHEV切换控制方面,一般采用发动机转矩界定其高效工作区,利用电池SOC划分其不可用和高效工作区;然后离线分析动力总成可能存在的需求状态,确定各状态下对应的最优目标模式,最终得到离线切换规则,确定汽车目标模式.采用这些方法所设计的切换规则可确保发动机和电池高效工作,但也存在不足之处:1) 发动机工作效率应由转矩和转速共同确定,仅用转矩来界定其高效区,不够全面,对发动机效率的提升有限;2) 不分层次地直接考虑汽车需求转矩、转速和电池SOC三种状态值,容易遗漏动力总成系统可能出现的需求状态以及相应状态下的最优目标模式,导致汽车某一时刻不能根据所制定的切换规则确定目标模式;3) 在PHEV各目标模式能量分配方面,由于PHEV各运行模式下动力总成系统工作状态不尽相同,传统采用单一控制方法对多种运行模式进行能量分配,难免顾此失彼.

基于此,本文针对一种单轴联结式PHEV,以循环工况下汽车的需求转矩、需求转速和电池SOC等相关参数为分层控制依据,制定PHEV各运行模式间的切换规则;针对目标模式下能量分配问题,将混合动力汽车运行模式划分为单一驱动模式、制动模式和混合模式,对前两者设计了基于规则的转矩分配策略,对混合模式设计了基于优化控制的功率分配策略,以实现节能、减排、高效、环保的目标.

2 单轴联结式PHEV系统结构和运行模式分析(The system structure and the analysis of operating modes for a single-axle PHEV)

2.1 系统结构(The system structure)

单轴联结式PHEV结构如图1所示.

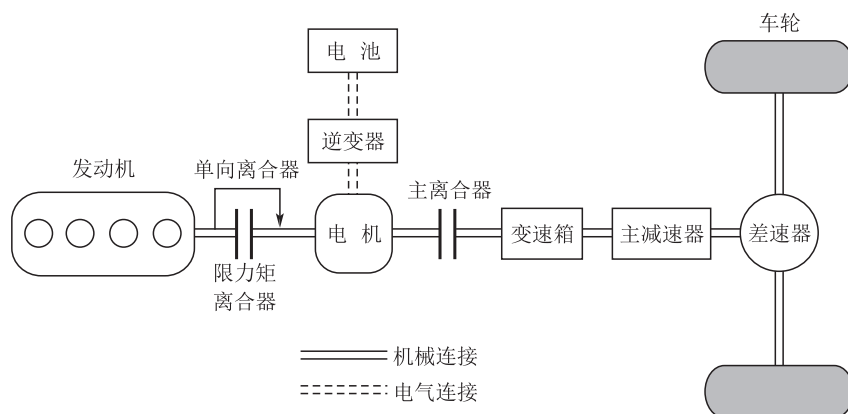


图1 单轴联结式PHEV系统结构图

Fig. 1 The structure diagram of a single-axle PHEV

采用同轴单电机结构,在发动机和电机之间设有限力矩离合器和单向离合器,在电机和变速箱之间设有主离合器.分离限力矩离合器,电机可以单独工作;接合限力矩离合器,电机可以启动发动机.

发动机启动后,限力矩离合器分离,单向离合器锁止,隔离电机对发动机的影响,可有效避免发动机启动后转速高于电机转速.该系统具有结构简单、可发电和快速起停发动机等优点,避免了发动

机怠速情况下燃油经济性差、排放高等不足.

和机械制动系统组合成多种运行模式, 如表1所示.

2.2 运行模式分析 (The analysis of operating modes)

表1中不仅给出了汽车运行模式的具体划分, 还给出了各个运行模式下各部件的状态, 为切换规则的制定奠定基础.

通过3个离合器的分离/结合, 可使发动机、电机

表 1 运行模式划分及各模式下部件状态

Table 1 The division of operating modes and parts state in each mode

序号	运行模式	状 态					
		发动机	电机	机械制动系统	单向离合器	限力矩离合器	主离合器
①	纯电动	停机	电动	不工作	自由状态	分离	结合
②	发动机驱动	驱动	空转	不工作	锁止	分离	结合
③	行车充电	驱动	发电	不工作	锁止	分离	结合
④	混合驱动	驱动	电动	不工作	锁止	分离	结合
⑤	停车	停机	停机	不工作	自由状态	结合	结合
⑥	驻车充电	驱动	发电	不工作	锁止	分离	分离
⑦	再生制动	怠速	发电	不工作	锁止	分离	结合
⑧	机械制动	怠速	停机	工作	锁止	分离	结合
⑨	混合制动	怠速	发电	工作	锁止	分离	结合

3 运行模式间分层切换控制设计(The design of the hierarchical switching control between operating modes)

PHEV各运行模式之间的切换与汽车的需求转矩、需求转速和电池SOC等息息相关, 因此, 需首先分析发动机稳态效率和电池的充放电内阻变化规律, 以确定当前循环工况和SOC下对应的目标运行模式, 然后设计相应的分层切换规则, 确保发动机和电机工作在高效区.

T_{ice_max} 分别是发动机高效工作区的转矩下限值、上限值和发动机可输出最大转矩. 由图2可知, 当 $\omega_{ice} \geq \omega_{idle}$ 时, 才可为汽车提供动力转矩; 当 T_{ice} 和转速 ω_{ice} 满足 $T_L \leq T_{ice} \leq T_H$ 且 $\omega_L \leq \omega_{ice} \leq \omega_H$ 时, 发动机工作在高效区; 当需求转矩超过发动机 T_{ice_max} 时, 为满足整车动力性要求, 汽车进入混合驱动模式. 以发动机转矩和转速共同界定其高效工作区, 基于此制定切换规则, 可进一步提高发动机工作效率.

3.1 发动机稳态效率分析(The analysis of steady-state efficiency of engine)

3.2 电池充放电内阻变化规律分析(The change laws analysis of batteries charge / discharge internal resistance)

典型发动机稳态效率如图2所示.

本文采用镍氢电池, 电池型号为ESS_NIMH45_OVONIC, 采用 Rint 仿真模型, 具体包括电池开路电压和内阻检测、电流计算和功率限制以及温度调节等模块, 对温度、充放电电流等进行约束, 可确保电池正常工作.

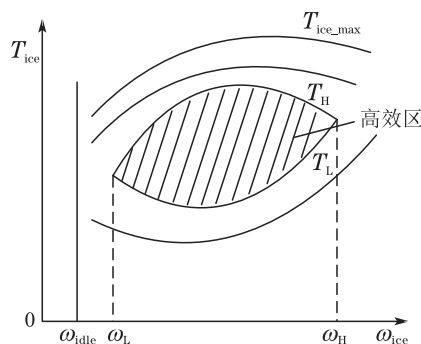


图 2 发动机典型稳态效率图

Fig. 2 The typical steady-state efficiency diagram of the engine

图2中: ω_{idle} , ω_L 和 ω_H 分别是发动机怠速转速、高效工作区的转速下限值和上限值; T_L , T_H 和

镍氢电池的充放电内阻随 SOC 变化规律如图3所示, 图中: SOC_{min} , SOC_{low} 和 SOC_{high} 分别为电池不可用区上限值、高效区的下限值和上限值. 由图3可知, 当电池处在较低电量或较高电量时, 内阻较大, 充放电效率较低; 当电池长期处在不可用区时, 极易损坏. 为此, 将电池电量划分为4个区域, 当电池SOC在不可用区时, 禁止放电, 必须充电; 当电池SOC在低效区1时, 可以放电, 需要充电; 当电池SOC在高效区时, 可以放电, 为最佳工作状态; 当电

池SOC在低效区2时,可以放电,但效率较低.为达到节能环保的目的,在设计分层切换规则时,尽可能地使电池工作在高效区.

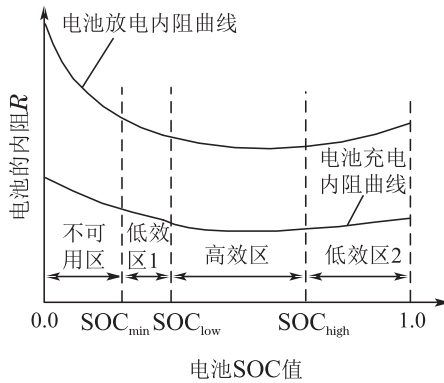


图3 电池充放电内阻变化规律

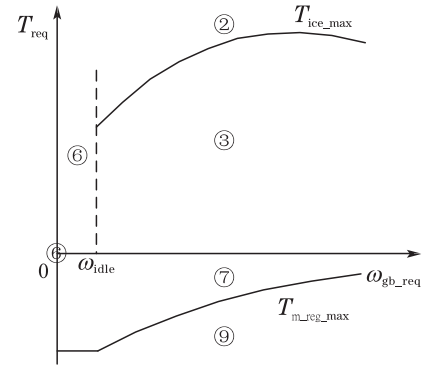
Fig. 3 The change rules of batteries internal resistance in the course of charge / discharge

3.3 分层切换控制设计(The design of the hierarchical switching control)

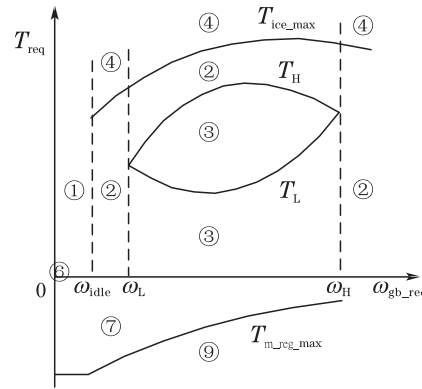
结合第3.1节、第3.2节给出的发动机和电池高效工作区间,重点考虑循环工况下车辆的需求转矩、转速以及电池SOC3个因素,来制定汽车各运行模式间的分层切换规则.首先,以电池SOC作为外层切换依据,以确保电池工作在高效区;然后,以汽车需求转矩、转速为内层切换依据,以发动机工作在高效区为原则,确定汽车在当前需求转矩、转速下的最优目标运行模式.

根据上述分层切换控制原则,可分别得到不同需求转矩、转速和电池SOC下对应的最优目标运行模式,如图4所示.图中: ω_{gb_req} 和 T_{req} 分别为图1中变速箱输入侧需求转速和转矩, $T_{m_req_max}$ 为电机可提供的最大发电转矩,图中模式①-⑨分别对应表1中各运行模式;最终制定各目标运行模式间的切换规则如表2所示.

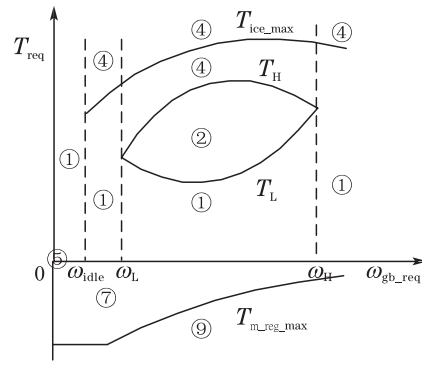
分层切换控制不易遗漏动力总成系统可能出现的需求状态,且相对容易得到各状态对应的最优目标模式,可使车辆在各运行模式间合理切换,即“经济”地安排每一时刻发动机、电机、机械制动系统和3个离合器的状态.然而,分层切换控制仅确定了由谁提供下阶段需求转矩/功率,并没有明确给出各部件所需提供转矩/功率的大小,故在提高燃油经济性,减少尾气排放方面作用有限.为了取得更好的控制效果,需要在分层切换控制原则指导下,确定各目标运行模式下能量分配策略.



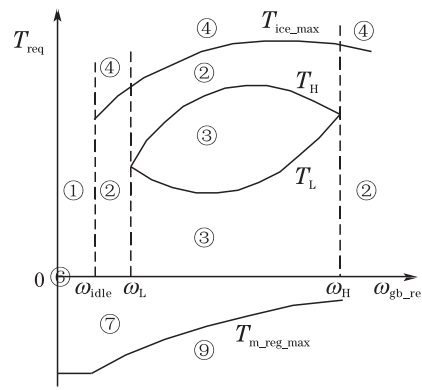
(a) $SOC \leq SOC_{min}$



(b) $SOC_{min} < SOC \leq SOC_{low}$



(c) $SOC_{low} < SOC \leq SOC_{high}$



(d) $SOC_{high} < SOC \leq 1$

图4 汽车各目标运行模式分析

Fig. 4 The analysis for the target modes of the vehicle

表 2 运行模式间的切换规则

Table 2 The switching rules between the operation modes

序号	目标运行模式	切换规则
①	纯电动	$\begin{aligned} & \text{SOC} > \text{SOC}_{\min} \text{ 且 } T_{\text{req}} > 0 \text{ 且 } 0 < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{idle}} \\ & \text{SOC} > \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } 0 < T_{\text{req}} \leq T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{idle}} < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{L}} \\ & \text{SOC} > \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } 0 < T_{\text{req}} \leq T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{gb_req}} > \omega_{\text{H}} \\ & \text{SOC} > \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } 0 < T_{\text{req}} \leq T_{\text{L}} \text{ 且 } \omega_{\text{L}} < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{H}} \end{aligned}$
②	发动机单独驱动	$\begin{aligned} & \text{SOC}_{\min} < \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } 0 < T_{\text{req}} \leq T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{idle}} < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{L}} \\ & \text{SOC}_{\min} < \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } 0 < T_{\text{req}} \leq T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{gb_req}} > \omega_{\text{H}} \\ & \text{SOC}_{\min} < \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } T_{\text{H}} < T_{\text{req}} \leq T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{L}} < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{H}} \\ & \text{SOC} > \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } T_{\text{L}} < T_{\text{req}} \leq T_{\text{H}} \text{ 且 } \omega_{\text{L}} < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{H}} \end{aligned}$
③	行车充电	$\begin{aligned} & \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\min} \text{ 且 } 0 < T_{\text{req}} \leq T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{gb_req}} > \omega_{\text{idle}} \\ & \text{SOC}_{\min} < \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } 0 < T_{\text{req}} \leq T_{\text{H}} \text{ 且 } \omega_{\text{L}} < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{H}} \end{aligned}$
④	混合驱动	$\begin{aligned} & \text{SOC}_{\min} < \text{SOC} \leq 1 \text{ 且 } T_{\text{req}} > T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{gb_req}} > \omega_{\text{idle}} \\ & \text{SOC}_{\text{low}} < \text{SOC} \leq 1 \text{ 且 } T_{\text{H}} < T_{\text{req}} \leq T_{\text{ice_max}} \text{ 且 } \omega_{\text{L}} < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{H}} \end{aligned}$
⑤	停车	$\text{SOC} > \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } T_{\text{req}} = 0$
⑥	驻车充电	$\begin{aligned} & \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{low}} \text{ 且 } T_{\text{req}} = 0 \text{ 且 } \omega_{\text{gb_req}} = 0 \\ & \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\min} \text{ 且 } T_{\text{req}} > 0 \text{ 且 } 0 < \omega_{\text{gb_req}} \leq \omega_{\text{idle}} \end{aligned}$
⑦	再生制动	$\text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{high}} \text{ 且 } T_{\text{m_reg_max}} < T_{\text{req}} < 0$
⑧	机械制动	$\text{SOC} > \text{SOC}_{\text{high}} \text{ 且 } T_{\text{req}} < 0$
⑨	混合制动	$\text{SOC} \leq \text{SOC}_{\text{high}} \text{ 且 } T_{\text{req}} \leq T_{\text{m_reg_max}}$

4 各目标运行模式下能量分配策略设计(The design of energy allocation strategy in each target operating mode)

能量分配的主要任务是根据当前目标运行模式,设计转矩分配或功率分配策略. 停车模式下,发动机和电机的目标转矩均为0,故不存在转矩分配问题;再生制动、机械制动和混合制动模式,在满足制动安全的前提下,以最大限度回收能量为目标,需优先考虑电机提供制动需求转矩,其转矩分配相对简单;纯电动或发动机单独驱动时,仅有一个动力源,故需求转矩直接由该动力源提供;行车充电、混合驱动和驻车充电时,发动机和电机均处于工作状态,情况较为复杂,需合理分配各动力源间的转矩/功率.

4.1 单一驱动和制动模式下基于规则的目标转矩分配策略(The torque allocation strategy based on rules in single-drive modes and three braking modes)

单一驱动模式包括纯电动和发动机单独驱动两种模式,制动模式包括再生制动、机械制动和混合制动3种制动模式.其目标转矩分配采用基于规则方法实现.

1) 纯电动.

纯电动模式时电机单独驱动整车前行,发动机和电机的目标转矩为

$$\begin{cases} T_{\text{ice_req}} = 0, \\ T_{\text{m_req}} = \min(T_{\text{req}}, T_{\text{m_max}}), \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_{\text{ice_req}}$ 和 $T_{\text{m_req}}$ 分别为目标模式下发动机和电机的目标转矩, $T_{\text{m_max}}$ 为电机可提供的最大驱动转矩.

2) 发动机单独驱动.

发动机单独驱动模式时,仅发动机单独驱动,电机不工作,发动机和电机的目标转矩为

$$\begin{cases} T_{\text{ice_req}} = \min(T_{\text{req}}, T_{\text{ice_max}}), \\ T_{\text{m_req}} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

3) 再生制动.

再生制动模式时,仅依靠电机来满足制动需求,此时,电机和机械制动系统的目标转矩为

$$\begin{cases} T_{\text{m_req}} = \max(T_{\text{req}}, T_{\text{m_req_max}}), \\ T_{\text{b_req}} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

式中 $T_{\text{b_req}}$ 为机械制动系统的目标转矩.

4) 机械制动.

机械制动模式时,仅机械制动系统发挥制动作用,电机和机械制动系统的目标转矩为

$$\begin{cases} T_{\text{m_req}} = 0, \\ T_{\text{b_req}} = T_{\text{req}}. \end{cases} \quad (4)$$

5) 混合制动.

此模式下,电机和机械制动系统共同制动,使汽

车减速,此时,电机和机械制动系统的目标转矩为

$$\begin{cases} T_{m,req} = T_{m,reg,max}, \\ T_{b,req} = T_{req} - T_{m,reg,max}. \end{cases} \quad (5)$$

4.2 混合模式下基于优化控制的目标功率分配策略 (The power allocation strategy based on the optimal control in hybrid modes)

混合模式包括行车充电、混合驱动和驻车充电。此模式下发动机和电机同时工作,需对需求功率合理分配,以达到提高整车燃油经济性和降低尾气排放目标。首先需要建立混合模式下动力总成系统动力学方程,然后设计功率优化控制算法。

混合模式下动力总成系统动力学方程为

$$\begin{cases} T_{ice} + T_m = T_{req}, \\ \omega_m = \omega_{ice}, \\ P_{ice} + P_m^m = P_{req}, \\ P_m^m = \eta_m^i P_m^e, \\ P_{batt} = P_m^e + P_{acc}^e, \end{cases} \quad (6)$$

式中: T_m 表示电机的输入/输出转矩; ω_m 表示电机转速; P_{batt} , P_{ice} 和 P_{req} 分别为电池输入/输出功率、发动机输出功率和汽车需求功率; P_m^m 和 P_m^e 分别为电机输入/输出机械功率和电池提供给电机的功率; P_{acc}^e 为汽车电气辅助设备消耗的功率; η_m^i 为电机的工作效率,当汽车处于行车充电或驻车充电模式时, $i = -1$; 处于混合驱动模式时, $i = 1$ 。

结合式(6),在已知循环工况下,当汽车处于行车充电或混合驱动模式时, $\omega_m = \omega_{ice} = \omega_{gb} \neq 0$ 且 $T_{req} > 0$,发动机和电机的转速唯一确定,但两者提供的功率不同,此时可采用Lyapunov优化方法确定发动机的最优目标功率;当处于驻车充电模式时, $\omega_m = \omega_{ice}$, $\omega_{gb} = 0$,且 $T_{req} = 0$,发动机和电机转速为相同的任意设定值,此时,可先利用Willans line模型极值法确定发动机的最优转速,经计算可得到对应最优转速下发动机目标功率。

4.2.1 行车充电/混合驱动模式下的Lyapunov优化功率分配策略 (The power allocation strategy based on the Lyapunov optimal algorithm in driving charge / hybrid driving mode)

由前文分析可知,对行车充电/混合驱动模式,需要利用优化方法确定发动机的最优目标功率。Lyapunov优化方法^[13]是以电池能量状态空间模型描述为基础的一种功率优化算法,其实时性和优化性能较好。

1) 电池能量状态空间模型。

以电池能量状态(state of energy, SOE)变化量 ζ 为状态变量, $\zeta = SOE_{ref} - SOE$, SOE_{ref} 为电池能量状态参考值,则 $\dot{\zeta}$ 为

$$\dot{\zeta} = -S\dot{O}E = -S\dot{O}C \cdot \frac{V_L}{V_{oc}^{max}}, \quad (7)$$

式中: V_L 为电池端电压, V_{oc}^{max} 为电池最大开路电压。

将 $\dot{O}C = -\frac{I}{Q_{max}}$ (I 为电池充放电电流, Q_{max} 为电池最大电荷容量)代入式(7),求解 $\dot{\zeta}$ 得

$$\dot{\zeta} = \frac{P_{batt}}{E_{max}}, \quad (8)$$

式中 $E_{max} = Q_{max} \cdot V_{oc}^{max}$ 。

结合式(6)和式(8), $\dot{\zeta}$ 可化为

$$\dot{\zeta} = -kP_{ice} + kP_d, \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} k = \frac{1}{E_{max}\eta_m^i}, \\ P_d = P_{req} + \eta_m^i P_{acc}^e. \end{cases} \quad (10)$$

由此可得到电池能量状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = -kP_{ice} + kP_d, \zeta(0) = \zeta_0, \\ z = \zeta, \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\zeta \in \mathcal{Z}$ 为系统的状态, $P_{ice} \in \mathcal{U}$ 为控制输入, $z \in \mathbb{R}$ 为受控输出, $P_d \in \mathcal{W}$ 且 $P_d \in \mathcal{L}_2$ 为外部扰动。

系统式(11)的状态域 \mathcal{Z} 、控制域 \mathcal{U} 和干扰域 \mathcal{W} 可表示为

$$\begin{cases} \mathcal{Z} = [SOE_{ref} - SOE_{max}, SOE_{ref} - SOE_{min}], \\ \mathcal{U} = [0, P_{ice}^{max}], \\ \mathcal{W} = \{P_d : P_d \in \mathcal{L}_2\}, \end{cases}$$

式中: SOE_{max} 和 SOE_{min} 分别表示电池的最大能量状态和最小能量状态值, P_{ice}^{max} 为发动机可输出的最大机械功率。

2) Lyapunov优化功率分配策略。

对式(11)所示状态方程,定义代价函数如下:

$$J_{\infty}(\zeta_0, P_{ice}(\cdot)) = \int_0^{\infty} \dot{m}_f dt, \quad (12)$$

式中 \dot{m}_f 为发动机的燃油消耗率。

进一步 \dot{m}_f 可表示为

$$\dot{m}_f = \frac{P_{ice,f}}{Q_{LHV}} = \frac{a_{ice}(\omega_{ice})P_{ice} + b_{ice}(\omega_{ice})}{Q_{LHV}}, \quad (13)$$

式中: $P_{ice,f}$ 为发动机的燃油功率, Q_{LHV} 为发动机的低热值。

由发动机的Willans line模型^[14],可得 $P_{ice,f}$:

$$P_{ice,f} = a_{ice}(\omega_{ice})P_{ice} + b_{ice}(\omega_{ice}), \quad (14)$$

式中: $a_{ice}(\omega_{ice})$ 和 $b_{ice}(\omega_{ice})$ 分别为与发动机转速相关的线性回归系数, $a_{ice}(\omega_{ice})$ 可认为是发动机指示效率的倒数, $b_{ice}(\omega_{ice})$ 可认为当发动机输出功率为零时所消耗的燃油功率。

$a_{ice}(\omega_{ice})$ 和 $b_{ice}(\omega_{ice})$ 可通过以下多项式求解:

$$\begin{cases} a_{ice}(\omega_{ice}) = a_{i2}\omega_{ice}^2 + a_{i1}\omega_{ice} + a_{i0}, \\ b_{ice}(\omega_{ice}) = b_{i2}\omega_{ice}^2 + b_{i1}\omega_{ice} + b_{i0}, \end{cases} \quad (15)$$

式中 $a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}, b_{i0}, b_{i1}$ 和 b_{i2} 均为常系数。

由式(13)–(15), 式(12)可化为

$$J_{\infty}(\zeta_0, P_{ice}(\cdot)) = \int_0^{\infty} [p_1(\omega_{ice})P_{ice} + p_0(\omega_{ice})]dt, \quad (16)$$

式中: $p_0(\omega_{ice}) = \frac{b_{ice}(\omega_{ice})}{Q_{LHV}}, p_1(\omega_{ice}) = \frac{a_{ice}(\omega_{ice})}{Q_{LHV}}$.

定义 1 考虑系统式(11), 当干扰量 $P_d = 0$ 时, 假设最小化代价函数式(16), 得到 P_{ice} 的解为 $\phi(\zeta(t))$, 将其代入到系统式(11)中, 相应闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = -k\phi(\zeta) + kP_d, \zeta(0) = \zeta_0, \\ z = \zeta. \end{cases} \quad (17)$$

如果 $t \rightarrow \infty, \zeta(t) \rightarrow 0$, 则闭环系统式(17)在原点平衡状态(即 $\zeta(0) = 0$)时渐近稳定。

针对代价函数式(16), 设定Hamilton函数

$$\mathcal{H}(\zeta, P_{ice}, \lambda) = p_1(\omega_{ice})P_{ice} + p_0(\omega_{ice}) + \Gamma(\zeta, P_{ice}) + \lambda \cdot (-kP_{ice}), \quad (18)$$

式中: $\Gamma(\zeta, P_{ice})$ 为存储函数, λ 为协态变量。

将式(18)化为Lyapunov最优化方法的典型Hamilton形式^[12]为

$$\bar{\mathcal{H}}(\zeta, P_{ice}, \lambda) = p_1(\omega_{ice})P_{ice} + \Gamma(\zeta, P_{ice}) + \lambda \cdot (-kP_{ice}). \quad (19)$$

根据Lyapunov最优化定理得到定理1。

定理 1 考虑系统模型式(11)和代价函数式(16), 存在最优反馈控制律 P_{ice}^* 为

$$P_{ice}^* = \begin{cases} \frac{k^2(\mu^4\zeta^3)^2}{4\gamma^2(k\mu^4\zeta^3 - p_1(\omega_{ice}))}, \zeta > \bar{\zeta}, \\ \zeta^2, 0 < \zeta < \bar{\zeta}, \end{cases} \quad (20)$$

满足如下性能:

1) 闭环系统式(17)的平衡状态 $\zeta(t) = 0 (t \geq 0)$ 是局部渐近稳定的;

2) 代价函数式(16)最小。

式中: $\bar{\zeta} = (p_1(\omega_{ice})/k\mu^4)^{1/3}$, μ 和 γ 为正增益, k 如式(10)所示。

证 1) 选取Lyapunov函数为

$$V(\zeta) = \frac{1}{4}\mu^4\zeta^4, \mu \in \mathbb{R}. \quad (21)$$

当 $\zeta \neq 0$ 时, $V(\zeta) > 0$, 式(21)两边对时间求导, 可得

$$\dot{V}(\zeta) = \left(\frac{\partial V}{\partial \zeta}\right)\dot{\zeta} = (\mu^4\zeta^3)(-kP_{ice}^*(\zeta) + P_d).$$

当 $P_d = 0, \zeta \neq 0$ 时, $\dot{V}(\zeta) < 0$. 故根据定义1, 结

论1)得证。

2) 对于闭环系统式(17)和Lyapunov函数式(21), 定义函数 $r(\zeta, P_d) = \gamma^2 P_d^2 - \zeta^2$, 选取存储函数 $\Gamma(\zeta, P_{ice}) = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial V}{\partial \zeta}\right)^2 k^2 \cdot (1 + \ln(P_{ice}^2))$, 对Hamilton函数

式(19)求 $\frac{\partial \bar{\mathcal{H}}}{\partial P_{ice}} = 0$ 和 $\frac{\partial^2 \bar{\mathcal{H}}}{\partial^2 P_{ice}} > 0$, 可得到如式(20)所

示最优反馈控制律 P_{ice}^* , 则 $\mathcal{H}(\zeta, P_{ice}^*, \frac{\partial V}{\partial \zeta})$ 为式(18)的最小值。由于 $p_0(\omega_{ice})$ 已知, 因此, P_{ice}^* 同时使代价函数(16)最小, 结论2)得证。

注 1 根据Lyapunov最优化定理, 与干扰输入量 P_d 相关的被动条件

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \zeta}\right) \cdot k \cdot P_d \leq$$

$$r(\zeta, P_d) + p_1(\omega_{ice})P_{ice}^* + p_0(\omega_{ice}) + \Gamma(\zeta, P_{ice}^*) \quad (22)$$

也成立。

将式(22)视为 P_d 的二阶不等式, 通过判别式 $\Delta \leq 0$, 可求出使式(22)成立的 γ 的范围, 经计算, γ 取值为某一范围, 取其平均值为 $\bar{\gamma} = 5.21$ 。

4.2.2 驻车充电模式下Willans line模型极值法功率分配策略 (The Willans line model extreme-value power allocation strategy in the parking charge mode)

对驻车充电模式, 汽车需求转速为0, 发动机和电机转速相同, 且可任意选取, 需要通过优化方法确定发动机的最优转速。Willans line模型极值法是以发动机燃油功率模型为基础的一种功率优化算法。

利用Willans line模型极值法求解驻车充电时发动机的最优转速, 即结合发动机的Willans line模型式(14)–(15), 求 $\frac{\partial P_{ice.f}}{\partial \omega_{ice}} = 0$ 和 $\frac{\partial^2 P_{ice.f}}{\partial^2 \omega_{ice}} > 0$, 可得到驻车充电时最小油耗下发动机的最优转速 ω_{ice}^* :

$$\omega_{ice}^*(t) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{b_{i1} + a_{i1}P_{ice}(t)}{b_{i2} + a_{i2}P_{ice}(t)}. \quad (23)$$

由式(23), 为进一步确定 ω_{ice}^* 下对应发动机最大功率, 需寻找到 ω_{ice} 和 P_{ice} 的一般关系。

首先, 当汽车处于驻车充电时, 由电池SOC状态可得电池需求功率 P_{batt} :

$$P_{batt} = \frac{(\text{SOC}_{high} + \text{SOC}_{min})/2 - \text{SOC}}{(\text{SOC}_{high} - \text{SOC}_{min})/2} \cdot T_{fc.ch.max} \cdot \omega_m, \quad (24)$$

式中 $T_{fc.ch.max}$ 为最大的充电转矩。

由式(6)(24), 可得 P_m^e :

$$P_m^e = P_{batt} - P_{acc}^e = d \cdot \omega_m - P_{acc}^e, \quad (25)$$

式中 $d = \frac{(\text{SOC}_{high} + \text{SOC}_{min})/2 - \text{SOC}}{(\text{SOC}_{high} - \text{SOC}_{min})/2} \cdot T_{fc.ch.max}$.

然后,由电机的Willans line模型

$$P_m^e = a_{m_}(\omega_m)P_m^m + b_{m_}(\omega_m), \quad (26)$$

式中 $a_{m_}$ 和 $b_{m_}$ 为与电机转速相关的线性回归系数.

$a_{m_}$ 和 $b_{m_}$ 的计算式为

$$\begin{cases} a_{m_}(\omega_m) = a_{m1}\omega_m + a_{m0}, \\ b_{m_}(\omega_m) = b_{m1}\omega_m + b_{m0}, \end{cases} \quad (27)$$

式中 a_{m0} , a_{m1} , b_{m0} 和 b_{m1} 均表示常系数.

进而,由式(6)(26)–(27)可得 ω_{ice} 与 P_{ice} 之间的一般关系式

$$P_m^e = -(a_{m1}\omega_{ice} + a_{m0}) \cdot P_{ice} + b_{m1}\omega_{ice} + b_{m0}. \quad (28)$$

结合式(25),式(28)可化为

$$-(a_{m1}\omega_{ice} + a_{m0}) \cdot P_{ice} + (b_{m1} - d) \cdot \omega_{ice} + b_{m0} + P_{acc}^e = 0. \quad (29)$$

根据式(23),令 $\omega_{ice} = \omega_{ice}^*(t)$,将 ω_{ice} 代入式(29),可得关于 P_{ice} 的一元二次方程

$$aP_{ice}^2 + bP_{ice} + c = 0, \quad (30)$$

式中:

$$\begin{aligned} a &= a_{m1}a_{i1} - 2a_{m0}a_{i2}, \\ b &= a_{m1}b_{i1} + 2a_{i2}b_{m0} + 2a_{i2}P_{acc}^e + \\ &\quad a_{i1}d - 2a_{m0}b_{i2} - a_{i1}b_{m1}, \\ c &= 2b_{m0}b_{i2} + b_{i1}d + 2b_{i2}P_{acc}^e - b_{m1}b_{i1}. \end{aligned}$$

通过式(30),可求得驻车充电时发动机的最优需求功率 P_{ice}^* :

$$\begin{cases} P_{ice}^* = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \\ P_{ice}^* > 0. \end{cases} \quad (31)$$

采用分类设计目标模式下能量分配控制的方法,综合考虑了各模式下动力总成工作状态,可充分发挥各相应工作状态下不同控制策略的优势.

5 仿真分析(Simulation analysis)

以MATLAB/Simulink和Advisor为联合仿真环境,在UDDS(美国城市路况)+HWFET(高速工况)下,对所设计的分层切换策略进行仿真,并与电辅助策略和PMP全局优化策略进行性能比较.

单轴联结式PHEV发动机、电机和电池等动力总成部件参数如表3所示.

利用Advisor中的发动机、电机实验数据,通过m函数polyfit(·)和polyval(·)可分别得到式(14)和式(26)中发动机与电机的Willans line模型的常系数项,其中:发动机模型中的常系数

$$\begin{aligned} a_{i0} &= 4.0171, \quad a_{i1} = -0.005531, \\ a_{i2} &= 7.8417 \times 10^{-6}, \quad b_{i0} = 3200.3347, \end{aligned}$$

$$b_{i1} = -4.48451, \quad b_{i2} = 0.064066;$$

电机模型中常系数 $a_{m0} = 1.1646$, $a_{m1} = 1.1684 \times 10^{-4}$, $b_{m0} = b_{m1} = 0$.

表3 动力总成部件参数表

Table 3 The parameters of the main drivetrain components

部件	型号	技术参数
发动机	FC-S141-emis	最大功率: 41 kW
		最大扭矩: 81 Nm
		最高转速: 5700 r/min
		怠速转速: 1000 r/min
电机	MC-AC-75	最大功率: 75 kW
		最大扭矩: 220 Nm
		最高转速: 10000 r/min
电池	ESS-NIMH45 -OVONIC	标准电压: 335 V
		单体电压: 12 V
		容量: 45 Ah
		质量: 210 kg

进一步,可求得式(14)和式(26)中发动机和电机的Willans line模型分别为

$$\begin{aligned} P_{ice.f} &= (7.8417 \times 10^{-6}\omega_{ice}^2 - 0.005531\omega_{ice} + \\ &\quad 4.0171) \cdot P_{ice} + 0.064066\omega_{ice}^2 - \\ &\quad 4.48451\omega_{ice} + 3200.3347, \\ P_m^e &= (1.1684 \times 10^{-4}\omega_m + 1.1646)P_m^m. \end{aligned}$$

发动机和电机的最大输出转矩随转速的变化曲线,可由实验数据得到.本文仿真时直接利用lookup table得到每时刻转速下对应的电机、发动机最大扭矩.以28.716%作为效率高效区界限,根据实验数据可得到发动机的高效区转速、转矩范围(ω_L, ω_H), (T_L, T_H).

以降低油耗和提高发动机效率为原则,采用试凑法,选取Lyapunov优化功率分配策略中参数 $\mu = 4000$.

给定循环工况下汽车消耗的总能量 E 为

$$E = V\rho Q_{LHV} + (SOC_0 - SOC) \cdot Q,$$

式中: V 为循环工况下汽车的总油耗(L); ρ 为燃油密度, $\rho = 749 \text{ g/L}$; Q_{LHV} 为燃油低热值, $Q_{LHV} = 42600 \text{ J/g}$; SOC_0 为电池的SOC初值; Q 为电池标称能量, $Q = 598 \times 3600 \times 25 \text{ J}$.

燃油消耗和电池SOC变化情况仿真结果分别如图5–6所示.由图5–6可知,循环工况下,分层切换控制策略作用时,汽车消耗的总能量 E 较电辅助策略减少了30.4%,与PMP全局优化策略相接近,仅增加

了1.02%, 这说明分层切换控制策略减少了汽车的能量消耗. 另外, 由图6还可知, 分层切换控制策略和电辅助策略下, 电池SOC终值均小于SOC初值, 而PMP全局优化策略下, 电池SOC一直维持在初值左右, 说明分层切换控制策略和电辅助策略属于电量消耗型策略, 而PMP全局优化策略属于电量维持型策略.

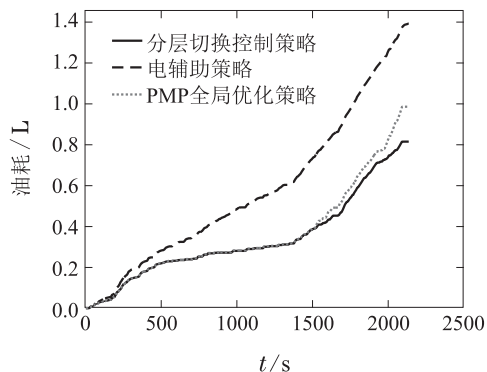


图 5 不同控制策略下汽车的燃油消耗

Fig. 5 The fuel consumption in different control strategies

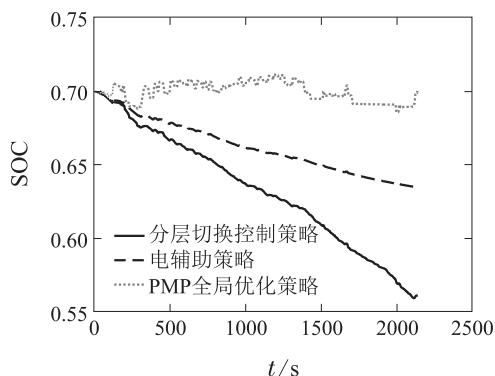


图 6 不同控制策略下电池SOC的变化

Fig. 6 The SOC change in different control strategies

3种策略下汽车的百公里油耗和尾气排放如表4所示.

表 4 不同控制策略下汽车的百公里油耗和尾气排放

Table 4 The fuel consumption per hundred kilometers and exhaust emission in different strategies

策 略	百公里油耗/ (L·(100 km) ⁻¹)	排放量/(g·km ⁻¹)		
		HC	CO	NO _x
分层切换控制策略	2.9	0.17	0.758	0.149
电辅助控制策略	4.9	0.175	0.793	0.162
PMP全局优化策略	3.2	0.168	0.757	0.149

由表4可知, 所设计的分层切换控制策略与电辅助策略相比, 汽车百公里油耗降低了40.82%, CH₄

和NO_x的排放量分别减少了2.86%, 4.41%和8.02%; 与PMP全局优化策略相比, 百公里油耗降低了9.37%, 尾气排放量较为接近. 因此, 分层切换控制策略有效提高了整车燃油经济性, 降低了尾气排放量.

在所设计的分层切换控制策略下, 汽车运行模式切换情况、发动机工作点分布以及电池工作效率变化曲线分别如图7-9所示. 由图7可知, 相比于电辅助策略仅在怠速、动力不足或电池有充电需求时才启用电机不同, 分层切换控制策略下, 纯电动和混合驱动模式出现频率较高, 电机能更好地辅助发动机工作, 从而使发动机尽可能地工作在了高效区(达28%以上, 见图8); 另外, 这也导致了电池SOC较电辅助策略下降较多(如图6所示), 但由SOC值可知电池始终工作在高效区, 如图9所示.

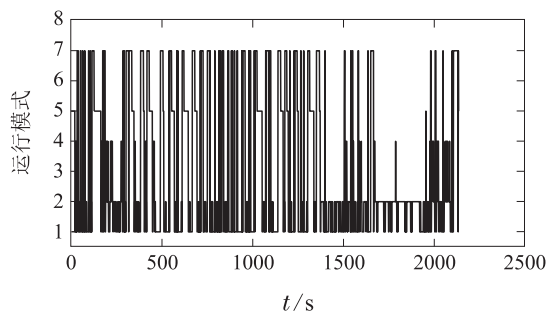


图 7 汽车运行模式切换图

Fig. 7 The modes switching of the vehicle

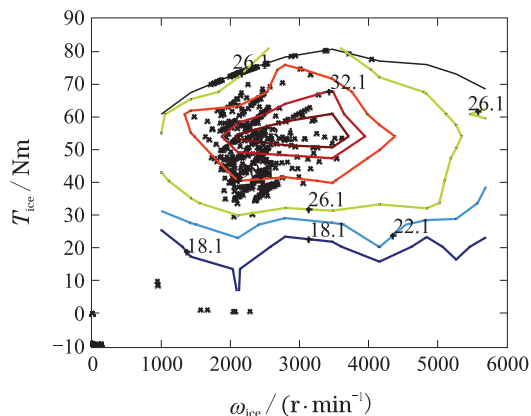
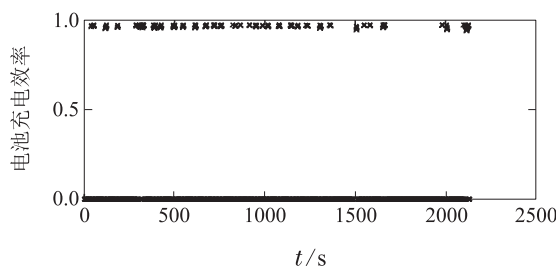
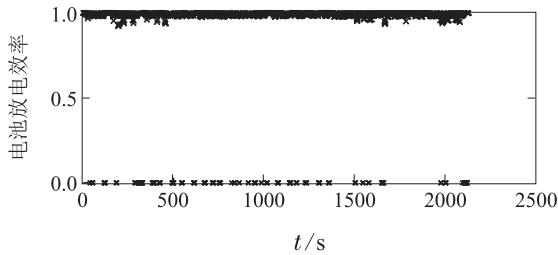


图 8 发动机工作点分布图

Fig. 8 The operation points distribution of the engine



(a) 电池充电效率



(b) 电池放电效率

图9 电池工作效率图

Fig. 9 The working efficiency of batteries

6 结论(Conclusions)

1) 将循环工况下汽车的需求转矩、需求转速和电池SOC等相关参数作为分层控制依据,以使发动机和电池高效工作为目标,设计了PHEV各运行模式间的切换规则,确定了汽车实际行驶中的运行模式。

2) 设计了单一驱动模式和制动模式下基于规则的转矩分配策略;在行车充电/混合驱动模式下,设计了Lyapunov优化功率分配策略;在驻车充电模式下,设计了基于Willans line模型极值法的功率分配策略。有效提高了整车的燃油经济性,降低了尾气排放。

3) 仿真和对比分析表明,所设计的分层切换控制策略,可使发动机和电池工作在设定的高效区。与电辅助策略相比,汽车百公里油耗降低了40.82%,循环工况下消耗的总能量减少了30.4%,CH₄、CO和NO_x的排放量分别减少了2.86%,4.41%和8.02%;与PMP全局优化策略相比,汽车百公里油耗降低了9.37%,循环工况下消耗的总能量较接近,仅增加了1.02%,由于分层切换控制策略属于电量消耗型,PMP全局优化策略属于电量维持型,SOC终值有所减小,但电池始终工作在高效区。

PHEV在模式切换过程中容易导致动力中断或扭矩波动,因此,如何提高分层切换控制中汽车的驾驶舒适性,将是后续研究工作的重点。

参考文献(References):

- [1] ZHOU Qixun, CAO Shihong, JI Xinjie. A research on the control rules optimization and torque distribution strategy for ISG hybrid electric vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(7): 751 – 756. (周奇勋, 曹世宏, 季新杰. ISG混合动力汽车控制规则优化与转矩分配策略研究 [J]. *汽车工程*, 2015, 37(7): 751 – 756.)
- [2] WEI Guangpu. *Research on modeling and energy management optimization of parallel hybrid electric bus* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (魏光璞. 并联式混合动力客车建模与能量管理优化策略研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.)
- [3] CAO Zhanguo. *Torque Control Strategy and Forward Simulink Modeling and Simulation of ISG Hybrid Electric Vehicles* [M]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.

(曹占国. ISG混合动力车转矩控制策略及前向式Simulink建模仿真 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010.)

- [4] SHEN Caiying, XIA Chaoying. Control strategy of series hybrid electric vehicle based on improved dynamic programming [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(3): 427 – 432. (申彩英, 夏超英. 基于改进型动态规划算法的串联混合动力汽车控制策略 [J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 427 – 432.)
- [5] XIA Chaoying, ZHANG Cong. Real-time optimization control for hybrid electric vehicles based on quadratic performance index [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(5): 601 – 606. (夏超英, 张聪. 基于二次型性能指标的混合动力汽车实时优化控制 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(5): 601 – 606.)
- [6] KIM N, LEE D, ZHENG C, et al. Realization of pmp-based control for hybrid electric vehicles in a backward-looking simulation [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2014, 15(4): 625 – 635.
- [7] BALAJI S, SIMONA O, STEPHEN Y. An optimal regulation strategy with disturbance rejection for energy management of hybrid electric vehicles [J]. *Automatica*, 2014, 50(1): 128 – 140.
- [8] ROBERTO M, VADIM U, SIMONA O. Energy management design in hybrid electric vehicles: a novel optimality and stability framework [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1307 – 1322.
- [9] CAIRANO S, BEMARDINI D, BEMPORAD A, et al. Stochastic MPC with learning for driver-predictive vehicle control and its application to HEV energy management [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(3): 1018 – 1031.
- [10] ZHAO Han, WU Di. A research on the control strategy of a parallel HEV based on stochastic model predictive control [J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36(11): 1289 – 1294. (赵韩, 吴迪. 基于随机模型预测控制的并联式混合动力汽车控制策略研究 [J]. *汽车工程*, 2014, 36(11): 1289 – 1294.)
- [11] ZHAO Ziliang, LIU Dongqin, LIU Minghui, et al. Study on control strategy and simulation for parallel hybrid electric vehicle [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(12): 13 – 18. (赵子亮, 刘东秦, 刘明辉, 等. 并联混合动力汽车控制策略与仿真分析研究 [J]. *机械工程学报*, 2005, 41(12): 13 – 18.)
- [12] HUANG Miaohua, CHEN Biao, CHEN Shengjin. Study on energy management strategy for parallel hybrid electric car based on torque distribution [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2006, 30(1): 33 – 36. (黄妙华, 陈彪, 陈胜金. 基于转矩分配的并联式混合动力电动轿车能量管理策略研究 [J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2006, 30(1): 33 – 36.)
- [13] HADDAD W, CHELLABOINA V. *Nonlinear Dynamical Systems and Control* [M]. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 2008.
- [14] YE Xiao. *Research on the control strategy of a parallel hybrid electric vehicle* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (叶晓. 并联混合动力汽车控制策略研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.)

作者简介:

付主木 (1974–), 男, 教授, 目前研究方向为混合动力汽车系统建模、控制与优化, E-mail: fzm1974@163.com;

李东卫 (1991–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为混合动力汽车模式切换控制算法设计, E-mail: dongweili1991@163.com;

宋书中 (1961–), 男, 教授, 目前研究方向为混合动力汽车能量管理和模式切换控制, E-mail: ssshong@haust.edu.cn;

王晓红 (1985–), 女, 讲师, 目前研究方向为神经网络分析与控制, E-mail: wxhong2006@163.com.