

DOI: 10.7652/xjtuxb201901007

新型功率分流混合动力系统能量管理预测优化

赵治国¹, 王茂垚¹, 郭元强², 王建光²

(1. 同济大学新能源汽车工程中心, 201804, 上海; 2. 山东联诚精密制造股份有限公司, 272100, 山东济宁)

摘要: 针对新型双模功率分流混合动力系统, 为改善拟搭载样车的能量经济性, 开发了基于模型预测控制的实时优化能量管理策略并进行了仿真验证。通过分析各动力源在不同工作模式下的转速转矩关系, 建立了功率分流系统模型。通过分析该构型方案在不同功率分流模式下的机械点, 得到系统效率随传动比的变化关系, 并基于发动机稳态燃油消耗特性曲线建立了其数学模型, 基于安时积分法建立了动力电池一阶等效模型。根据已有的发动机模型及动力电池模型, 建立了功率分流混合动力系统短时域预测模型, 预测了有限时域内电池荷电状态及发动机燃油消耗率的变化。最后, 基于预测时域内等效燃油消耗最小提出系统在混合动力模式下发动机工作点的最优决策律, 并基于该最优决策律开发功率分流混合动力系统模型预测能量管理策略, 实现了各动力源转矩的实时最优分配。设置预测时域和控制时域均为 3 s, 新欧洲行驶工况仿真结果表明, 该控制策略可实现能量管理的实时滚动优化, 其百公里油耗为 4.95 L, 相比于基于规则能量管理策略下的百公里油耗 5.364 L, 可提升整车大约 7.7% 的燃油经济性。

关键词: 双模功率分流混合动力系统; 能量管理策略; 模型预测控制; 最优决策律

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0052-10

Predictive Optimization of Energy Management Strategy for New Type Power-Split Hybrid Driveline System

ZHAO Zhiguo¹, WANG Maoyao¹, GUO Yuanqiang², WANG Jianguang²

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Liancheng Precision Co., Ltd., Jinan, Shandong 272100, China)

Abstract: To improve the fuel economy of a prototype vehicle with a new type dual-mode power split hybrid driveline system, a real-time optimized energy management strategy based on model predictive control (MPC) was developed and verified. First, the relationship of speed and torque of different power source under every working mode was analyzed, and a model of power split system was built. Then the mechanical points of different power split modes were analyzed, and the relationship between system efficiency and gear ratio was obtained. Based on the fuel consumption characteristic curve of the engine, its mathematical model was established. In the meantime, the first-order RC model of battery based on the amper-hour integral method was built. Further, a short-time prediction model for power split hybrid driveline system based on the engine and battery models was obtained to predict the variation of battery SOC and fuel consumption rate in a predictive horizon. Finally, an optimal decision law about the engine

收稿日期: 2018-06-12。 作者简介: 赵治国(1971—), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5167050371); 泰山产业领军人才资助项目(L201608)。

网络出版时间: 2018-10-17

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181017.1028.012.html>

operating point under hybrid mode at the minimum cost of the equivalent fuel consumption was proposed, and an MPC-based energy management strategy based on the optimal decision law was developed to realize the real-time optimal distribution of torque among different power sources. Simulation results show that the MPC-based energy management strategy can achieve the real-time rolling optimization of a hybrid power vehicle consuming 4.95 liters of gasoline per 100 kilometers. Compared with 5.364 liters of gasoline per 100 kilometers under the rule-based energy management, MPC-based energy management can dramatically improve fuel economy by 7.7%.

Keywords: dual-mode power-split hybrid driveline system; energy management strategy; model predictive control; optimal decision law

作为深度混合动力汽车重要解决方案的功率分流混合动力系统,因其可利用行星排结构将发动机及电机的输出功率进行分流与汇流,实现发动机端与动力输出端转速、转矩的完全解耦,从而充分发挥了混合动力汽车的节油潜力,实现了较好的燃油经济性^[1]。功率分流混合动力系统方案已经在国际几款车型上取得了巨大的成功,如丰田的 THS 系统、通用的 VOLTEC 系统等^[2-3]。

能量管理策略是功率分流混合动力汽车节能的关键技术,一般包括逻辑门限值^[4]、模糊控制^[5]等基于规则的能量管理策略,等效燃油消耗最小^[6]等瞬时优化策略,动态规划^[7]、最小值原理^[8]等全局优化策略。规则的能量管理策略简单易行,却难以保证优化效果;瞬时优化策略的效果依赖于油电转化因子的准确性,而针对功率分流混合动力系统没有一个足够准确的方法确定其参数;全局优化策略则需要提前预知工况信息,难以运用于实际车辆的控制中。随着研究的深入,基于模型预测控制的局部优化能量管理策略越来越受到重视^[9]。基于模型预测控制能量管理策略通过建立精确的预测模型,在每一个时刻基于系统的当前及过去状态信息,预测未来一段时间内的电池荷电状态(SOC)变化及发动机燃油消耗,并将其引入到成本函数中,通过局部寻优手段求解出预测时域内各动力源最优转矩分配序列,并将第一个控制量即当前控制量作用给系统。因为在每一个时刻都会将系统的状态量引入预测模型构成反馈校正,故基于模型预测控制的能量管理策略具有较好的鲁棒性^[10]。同时,相比于瞬时优化能量管理策略,基于模型预测控制能量管理策略可做到短时域内最优,相比于全局优化能量管理策略可以大大减少计算量。由于功率分流混合动力汽车是一个复杂的系统,涉及动力电池、发动机等诸多强非线性元件,故常规优化方法难以直接运用到能量

管理优化问题之中。

针对插电式混合动力汽车的能量管理问题,何洪文等将模型预测控制思想用于动态规划算法中,通过多步马尔科夫预测方法预测混合动力客车驾驶工况,构建预测时域内能量管理优化问题,并运用动态规划算法实现各动力源的转矩的最优分配^[11]。连静等针对并联式混合动力汽车在新欧洲行驶工况(NEDC)下的燃油经济性进行全局优化分析,获取特定工况下动力电池 SOC 的变化规律,将基于动态规划离线计算的 SOC 轨迹作为模型预测控制的参考轨迹,开发了既定工况下模型预测控制能量管理策略^[12]。

针对功率分流混合动力汽车的能量管理优化问题,Borhan 等首次将模型预测控制应用于功率分流混合动力汽车的能量管理中,将模型预测控制问题转化为预测时域内的二次规划问题,在每一个决策时刻通过对二次规划问题的求解得到各动力源的最优转矩控制序列,实现了基于模型预测控制能量管理策略的初步应用^[13]。袁洪亮等在考虑功率分流系统机械及电气特性的前提下,将模型预测控制与二次规划求解方法结合起来,实现了针对丰田 Prius 功率分流混合动力汽车能量管理策略的开发^[14]。项昌乐等将模型预测控制的思想与动态规划结合起来,通过马尔科夫链预测有限时域内的功率分流混合动力汽车的车速变化,在有限时域内运用动态规划算法求解能量管理的最优解,最终决策出发动机及电机的控制量^[15]。Zhu 等采用极小值原理对预测时域内的能量管理问题进行计算,实现了对预测驾驶员需求转矩的跟踪^[16]。王伟达等通过构建状态观测器实时观测电池 SOC 的状态,将模型预测能量管理优化问题转化为线性二次型最优控制问题^[17]。此外,还有人采用迭代算法^[18]、一维搜索算法^[19]等对预测时域内的能量管理优化问题进行计

算,以实现模型预测控制在能量管理中的应用。

针对新型双模功率分流混合动力系统方案,本文提出基于系统当前及历史状态信息的发动机工作点最优决策律,深入分析不同功率分流模式下转速转矩关系,研究发动机、电机及动力电池的工作机理及特性,并建立了功率分流混合动力系统短时域预测模型,提出了基于发动机最优决策律的能量管理优化策略。

1 新型双模功率分流混合动力系统

1.1 构型方案

如图 1 所示,该新型双模功率分流混合动力系统由共用行星架的双行星排构成,发动机通过单向离合器连接前行星排太阳轮,电机 1 连接前行星排齿圈,并通过离合器与后行星排齿圈连接,后行星排齿圈又通过制动器锁止。电机 2 连接后行星排太阳轮,行星架连接在一起作为整个行星排系统的输出。通过离合器和制动器不同的作动状态,可实现 5 种工作模式,其中有两种功率分流工作模式,如表 1 所示。整车参数与设计指标见表 2,动力系统关键部件参数见表 3。

表 1 工作模式一览表

工作模式	单向离合器	制动器	离合器
单电机纯电动	自由转动	锁止	打开
双电机纯电动	自由转动	打开	接合
输入功率分流	接合	锁止	打开
固定速比	接合	锁止	接合
复合功率分流	接合	打开	接合

表 2 整车参数与设计指标

参数	数值
整车整备质量/kg	1 595
迎风面积/m ²	2.86
滚动半径/m	0.363
空气阻力系数	0.368
滚动阻力系数	0.01
最高车速/km·h ⁻¹	180
单电机纯电动最高车速/km·h ⁻¹	100
最大爬坡度/(°)	35(10 km·h ⁻¹)
百公里加速时间/s	≤8
前行星排传动比 ρ ₁	1.785
后行星排传动比 ρ ₂	2.431
主减速比	3.3

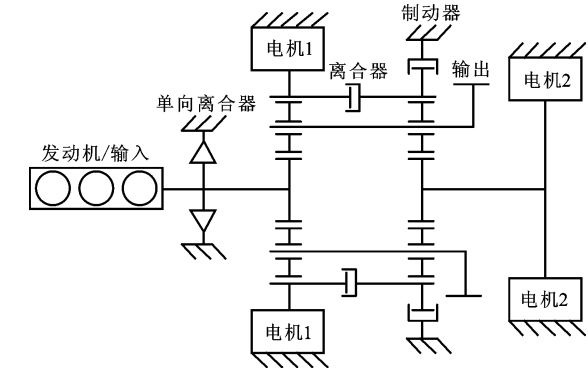


图 1 新型功率分流混合动力系统结构

表 3 动力系统关键部件参数

部件	参数	数值
发动机	最大功率/kW	88
	最大扭矩/N·m	174
	最高转速/r·min ⁻¹	5 500
电机 1	峰值功率/kW	72
	峰值扭矩/N·m	205
	最高转速/r·min ⁻¹	8 500
	额定转速/r·min ⁻¹	3 000
电机 2	峰值功率/kW	72
	峰值扭矩/N·m	205
	最高转速/r·min ⁻¹	8 500
	额定转速/r·min ⁻¹	3 000
电池	电压/V	375
	容量/A·h	8

1.2 数学模型

针对上述新构型方案,忽略各轴及其齿轮的旋转黏性阻尼的作用、啮合齿轮的啮合弹性、轴承及轴承座间的弹性作用,将车轮转动惯量以及车辆平动质量统一折算到变速箱输出轴,由此可得混合动力变速箱各部件转矩关系式

$$T_{\text{ENG}} - T_{\text{S1}} = J_{\text{ENG}} \alpha_{\text{ENG}} \tag{1}$$

$$T_{\text{M1}} - T_{\text{R1}} = J_{\text{M1}} \alpha_{\text{M1}} \tag{2}$$

$$T_{\text{M2}} - T_{\text{S2}} = J_{\text{M2}} \alpha_{\text{M2}} \tag{3}$$

式中: J 、 α 分别为等效转动惯量、角加速度; T 为转矩;下标 ENG 表示发动机(包括曲轴、飞轮、单向离合器等),M1、M2 分别表示电机 1、电机 2,S1、S2 和 R1 分别表示前、后行星排太阳轮及前行星排齿圈。

考虑行星排系统的转动惯量相对于发动机及电机的转动惯量比较小,进而忽略太阳轮、行星架及齿圈等的转动惯量,由此可得如下行星排的转矩转速平衡方程。

对于输入功率分流模式,有

$$T_{S1} + \rho_2 T_{S2} + T_{R1} = T_{OUT} \tag{4}$$

$$\rho_1 \rho_2 T_{S2} + (1 + \rho_1) T_{R1} = \rho_1 T_{OUT} \tag{5}$$

$$\rho_1 n_{M1} + n_{ENG} = (1 + \rho_1) n_{OUT} \tag{6}$$

$$n_{M2} = (1 + \rho_2) n_{OUT} \tag{7}$$

对于复合功率分流模式,有

$$T_{S1} + T_{S2} + T_{R1} = T_{OUT} \tag{8}$$

$$(1 + \rho_1) T_{S1} + (1 + \rho_2) T_{S2} = T_{OUT} \tag{9}$$

$$\rho_1 n_{M1} + n_{ENG} = (1 + \rho_1) n_{OUT} \tag{10}$$

$$\rho_2 n_{M1} + n_{M2} = (1 + \rho_2) n_{OUT} \tag{11}$$

式中: T 为折算的等效阻力矩; n 为转速;下标 OUT 表示输出端(即行星架)。

考虑行星排系统在稳态运行工况下其齿间隙及传动轴阻尼等均可忽略,由式(6)(7)可得输入功率

分流模式下各动力源的加速度关系表达式,由式(10)(11)可得复合功率分流模式下各动力源的加速度关系表达式

$$\rho_1 \alpha_{M1} + \alpha_{ENG} = (1 + \rho_1) \alpha_{OUT} \tag{12}$$

$$\alpha_{M2} = (1 + \rho_2) \alpha_{OUT} \tag{13}$$

$$\rho_1 \alpha_{M1} + \alpha_{ENG} = (1 + \rho_1) \alpha_{OUT} \tag{14}$$

$$\rho_2 \alpha_{M1} + \alpha_{M2} = (1 + \rho_2) \alpha_{OUT} \tag{15}$$

进一步可得该新型功率分流混合动力系统统一运动学模型的矩阵表达式^[20]

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \tag{16}$$

$$\mathbf{X} = [T_{S1} \ T_{S2} \ T_{R1} \ T_{ENG} \ T_{M2} \ \alpha_{M1} \ \alpha_{M2} \ T_{M1} \ T_{OUT} \ \alpha_{ENG} \ \alpha_{OUT}]^T \tag{17}$$

$$\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ T_{ENG} \ T_{OUT} \ \alpha_{ENG} \ \alpha_{OUT}]^T \tag{18}$$

在输入功率分流模式下

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -J_{ENG} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -J_{M1} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -J_{M2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \rho_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -(1 + \rho_2) \\ 0 & \rho_1 \rho_2 & 1 + \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 + \rho_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{19}$$

在复合功率分流模式下

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -J_{ENG} & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -J_{M1} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -J_{M2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 + \rho_1 & 1 + \rho_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -(1 + \rho_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -(1 + \rho_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{20}$$

1.3 效率分析

定义功率分流混合动力系统传动比为发动机转速与输出端转速的比值,当电路净输出功率为 0 时,发动机全部输出功率都经由机械路径传递到车轮,系统传动效率最高,此时系统的传动比称为机械点。

定义电功率循环比为功率分流模式下两电机总功率与发动机功率的比值^[21],得到机械点处电功率循环比为 0。将电机及输出端转矩转速相对于发动机转矩转速做归一化处理,可得该双模功率分流系统在输入功率分流模式下的机械点为 $1 + \rho_1$,而在复合

功率分流模式下的机械点有两个,分别为 $1 - \rho_1 / \rho_2$ 和 $1 + \rho_1$ 。假设两个电机的工作效率为 η_1 和 η_2 , 经过 Matlab 编程可计算输入功率分流模式和复合功率分流模式下电功率循环比随传动比的变化关系如图 2 所示。由图可见:在输入功率分流模式下,电功率循环比随传动比的增大先减小到 0 再逐渐增大;在复合功率分流模式下,电功率循环比随传动比的增大呈先减小后增大、而后再减小增大的复杂变化过程。

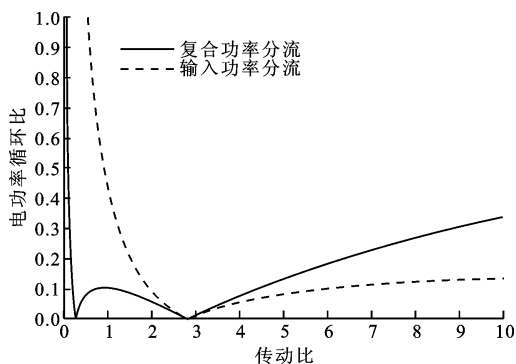


图2 电功率循环比随传动比的变化关系

由于构型的特殊性,输入功率分流的机械点同为复合功率分流的机械点之一。当传动比大于输入功率分流的机械点时,输入功率分流的电功率循环比低于复合功率分流的电功率循环比,而当传动比小于输入功率分流的机械点时,复合功率分流的电功率循环比低于输入功率分流的电功率循环比。在机械点处,因电功率循环比为 0,故系统效率最高。当传动比高于机械点时,因电功率循环,系统的效率会缓慢下降。当发动机转速一定时,车速越高,传动比越小,因此该构型的输入功率分流模式适合用于车辆传动比较大的低速行驶中,而复合功率分流模式更适合用于传动比较小的高速行驶中。

2 功率分流混合动力系统模型

2.1 发动机模型

该新型双模功率分流混合动力系统使用阿特金森循环发动机,其万有特性如图 3 所示。在发动机模型中,发动机的工况点及其燃油消耗率 m_f 可由转速和转矩决定,即

$$m_f = \text{Map}(n_{\text{ENG}}, T_{\text{ENG}}) \quad (21)$$

为方便构建预测模型,采用分段拟合函数法对发动机稳态燃油消耗 Map 图进行拟合,即

$$m_f = mT_{\text{ENG}} + n/T_{\text{ENG}} + l, n_{\text{ENG}} \in \psi \quad (22)$$

拟合误差如图 4 所示。从图中可以看出,当发动机

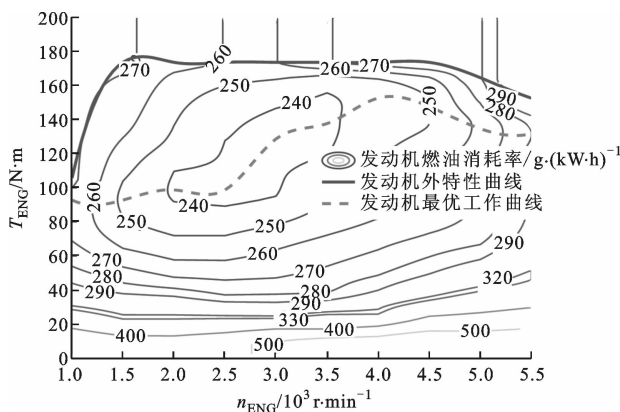


图3 发动机万有特性图

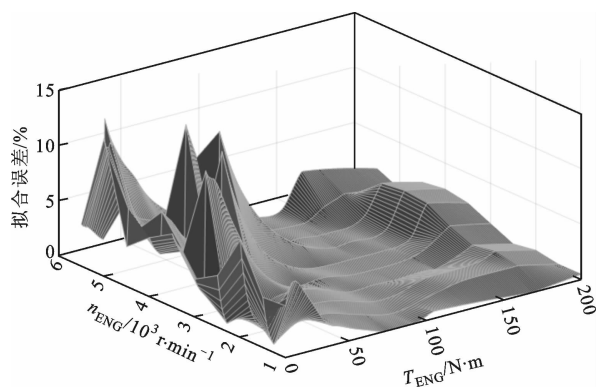


图4 发动机燃油消耗率拟合误差

转矩低于 $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,燃油消耗率拟合误差较大,而当发动机转矩高于 $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,燃油消耗率拟合较好,误差可保证在 8% 以内。考虑到发动机正常工作时输出转矩一般较大,故认为发动机燃油消耗率拟合较好。

2.2 电机模型

相比于发动机等机械部件,电机转矩响应速度较快,此构型方案所用的两电机为同一型号。这里忽略电机的磁、热效应,仅考虑电机在不同工况下的损耗,即电机的效率与电机转速和转矩的函数关系。通过实验,得到随转速和转矩变化的电机效率特性曲线如图 5 所示。

2.3 动力电池模型

忽略温度的影响,动力电池简化为一阶模型,如图 6 所示。

动力电池电回路方程如下

$$P = T_{M1} n_{M1} \eta_{M1}^{k_1} + T_{M2} n_{M2} \eta_{M2}^{k_2} \quad (23)$$

$$I = (V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4RP})/2R \quad (24)$$

式中: P 为电回路负载功率; η 为电机的效率; k_1 、 k_2 为电机 1、电机 2 的充放电状态,发电状态为 1,电动状态为 -1; R 为电池内阻; V_{oc} 为电池开路电压; I 为电回路电流。

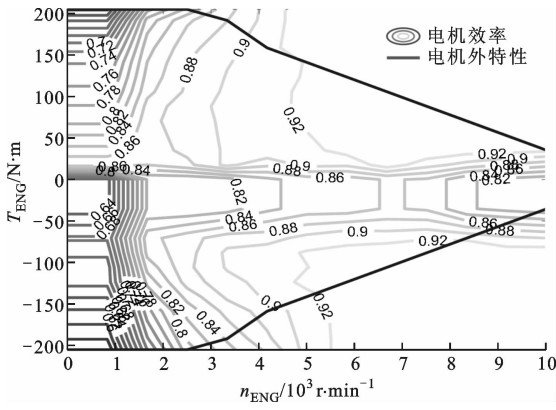


图5 电机效率特性曲线

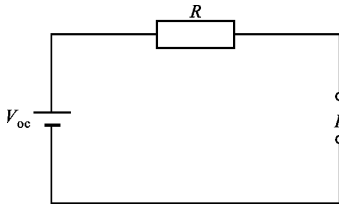


图6 动力电池一阶等效模型

电池荷电状态 ψ_{SOC} 的表达式为

$$\psi_{\text{SOC}} = \psi_{\text{SOC}0} - \frac{1}{C_{\text{batt}}} \int I dt \quad (25)$$

联立式(23)~式(25)并求导,可得

$$\dot{\psi}_{\text{SOC}} = \frac{-V_{\text{oc}} + \sqrt{V_{\text{oc}}^2 - 4R_{\text{batt}}(T_1 \omega_1 \eta_1^{k_1} + T_2 \omega_2 \eta_2^{k_2})}}{2C_{\text{batt}} R_{\text{batt}}} \quad (26)$$

$$\psi_{\text{SOC}} = \psi_{\text{SOC}0} + \int \dot{\psi}_{\text{SOC}} dt \quad (27)$$

3 基于模型预测控制的能量管理策略

模型预测控制的机理可描述为:在每一个采样时刻根据当前系统已知的测量信息,通过预测模型预测未来有限时域内的输出,在线优化未来时刻输出可得到相应的输入控制序列,将得到的控制序列的第一个元素作用于被控对象;在下一个循环时刻重复上述过程,用新的测量值刷新优化问题并重新求解^[22]。模型预测控制是一种实时优化算法,为了满足实时性,其预测模型不能复杂,故采用拟合函数法对发动机万有特性进行建模,采用安时积分法对动力电池进行建模。功率分流混合动力系统包含了发动机、电机及动力电池组等多个部件,均具有较复杂的非线性特性。对于非线性系统而言,当非线性因素对系统影响很小时一般可将其忽略,如果系统的变量在工作点附近只发生微小的偏移,可以通过取其线性主部用切线法进行线性化,故当设置预测

时域较短时,在预测时域内输出端的需求转矩也近似认为不变。

3.1 预测模型

取系统的状态变量与输出变量为 ψ_{SOC} 、 m_f ,控制变量为 n_{ENG} 、 T_{ENG} ,干扰变量为 T_{OUT} 、 n_{OUT} ,即

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \psi_{\text{SOC}} \\ m_f \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \quad (29)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} n_{\text{ENG}} \\ T_{\text{ENG}} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} n_{\text{OUT}} \\ T_{\text{OUT}} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \quad (32)$$

式(32)是电池 SOC 及发动机燃油消耗率的隐函数表现形式,对上述系统非线性模型在每一个采样时刻做最优线性逼近,可得泰勒展开表达式

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0) + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{v}} \Delta \mathbf{v} + \dots \quad (33)$$

基于较短预测时域尺度假设,可认为在预测时域内输出端的需求转矩及转速近似不变,由式(32)可得预测时域内线性化模型

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}_0 + \mathbf{g} \Delta \mathbf{u} \quad (34)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \quad (35)$$

$$\mathbf{g} = \left. \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{v}_0} \quad (36)$$

$$\mathbf{F}_0 = \mathbf{x} - \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u} \quad (37)$$

实际应用中为了满足在线数值计算的需求,需要将以上获得的连续系统模型在预测时域内转化为离散化模型

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} \Delta \mathbf{U} + \mathbf{F} \quad (38)$$

$$\mathbf{Y} = [\mathbf{y}(k+1)^T \quad \mathbf{y}(k+2)^T \quad \dots \quad \mathbf{y}(k+n)^T]^T_{2n \times 1} \quad (39)$$

$$\mathbf{y}(k+i) = \begin{bmatrix} \psi_{\text{SOC}}(k+i) \\ m_f(k+i) \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\Delta \mathbf{U} = [\Delta \mathbf{u}(k)^T \quad \Delta \mathbf{u}(k+1)^T \quad \dots \quad \Delta \mathbf{u}(k+n-1)^T]^T_{2n \times 1} \quad (41)$$

$$\Delta \mathbf{u}(k+i) = \begin{bmatrix} \Delta n_{\text{ENG}}(k+i) \\ \Delta T_{\text{ENG}}(k+i) \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\mathbf{F} = [\mathbf{F}_0(k+1)^T \quad \mathbf{F}_0(k+2)^T \quad \dots \quad \mathbf{F}_0(k+n)^T]^T_{2n \times 1} \quad (43)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_0 & & & \mathbf{0} \\ \mathbf{g}_1 & \mathbf{g}_0 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \mathbf{g}_{n-1} & \mathbf{g}_{n-2} & \cdots & \mathbf{g}_0 \end{bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (44)$$

式中: $\mathbf{y}$ 表示输出; $\Delta \mathbf{u}$ 表示控制量变化; $\mathbf{F}_0$ 为由式(37)算出的泰勒展开偏差量; $(k+i)$ 表示 $k+i$ 时刻; $\mathbf{g}_i$ 为由式(36)算出的线性主部系数, 是一个 2×2 的矩阵。

3.2 最优决策律

功率分流混合动力汽车能量管理策略的主要目的是使得系统在满足约束的条件下, 获得最佳的燃油经济性, 并且保持动力电池 SOC 在其参考值附近变化。预测时域内目标 SOC 及目标燃油消耗率

$$\mathbf{W} = [\mathbf{w}(k+1)^T \quad \mathbf{w}(k+2)^T \quad \cdots \quad \mathbf{w}(k+n)^T]^T_{2n \times 1} \quad (45)$$

$$\mathbf{w}(k+i) = \begin{bmatrix} \psi_{\text{SOCtrg}}(k+i) \\ m_{\text{ftrg}}(k+i) \end{bmatrix} \quad (46)$$

式中: $\mathbf{w}(k+i)$ 表示 $k+i$ 时刻目标 SOC 及目标燃油消耗率所组成的向量; $\psi_{\text{SOCtrg}}(k+i)$ 表示 $k+i$ 时刻目标 SOC; $m_{\text{ftrg}}(k+i)$ 表示 $k+i$ 时刻目标燃油消耗率。

在滚动时域内满足诸多约束的前提下, 既要使得动力电池 SOC 维持在参考值附近, 又要使得发动机的燃油消耗尽可能小, 为此在代价函数中添加控制量增量惩罚项, 以确保在控制时域内控制量增量

的合理变化, 即

$$J = (\mathbf{Y} - \mathbf{W})^T \mathbf{Q} (\mathbf{Y} - \mathbf{W}) + \lambda \Delta \mathbf{U}^T \Delta \mathbf{U} \quad (47)$$

s. t. $\mathbf{Y} \subseteq \Psi; \Delta \mathbf{U} \subseteq \Omega$

式中: $\mathbf{Q}$ 为预测时域内各项输出的罚函数对角阵; Ψ 为预测输出的有效集; Ω 为控制变化量的有效集。

系统状态变量约束条件为

$$\psi_{\text{SOC min}} \leq \psi_{\text{SOC}}(t) \leq \psi_{\text{SOC max}} \quad (48)$$

控制变量约束为

$$\begin{aligned} T_{\min} &\leq T_{\text{ENG}}(t) \leq T_{\max} \\ n_{\min} &\leq n_{\text{ENG}}(t) \leq n_{\max} \\ \Delta T_{\min} &\leq \Delta T_{\text{ENG}}(t) \leq \Delta T_{\max} \\ \Delta n_{\min} &\leq \Delta n_{\text{ENG}}(t) \leq \Delta n_{\max} \end{aligned} \quad (49)$$

基于最优控制理论, 令

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta \mathbf{U}} = 0 \quad (50)$$

可得控制时域内最优控制律为

$$\Delta \mathbf{U} = (\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q} (\mathbf{W} - \mathbf{F}) \quad (51)$$

实际控制时每次仅将第一个分量加入系统, 即

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{g}^T (\mathbf{W} - \mathbf{F}) \quad (52)$$

式中: $\mathbf{g}^T$ 为 $(\mathbf{G}^T \mathbf{Q} \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{Q}$ 的第一行。根据系统当前及历史状态信息, 在每一个决策时刻更新式(52)中各系数矩阵, 即可快速决策发动机工作点。

3.3 能量管理策略架构

基于模型预测控制(MPC)的能量管理策略架构如图7所示, 其中模型预测控制器用于决策发动

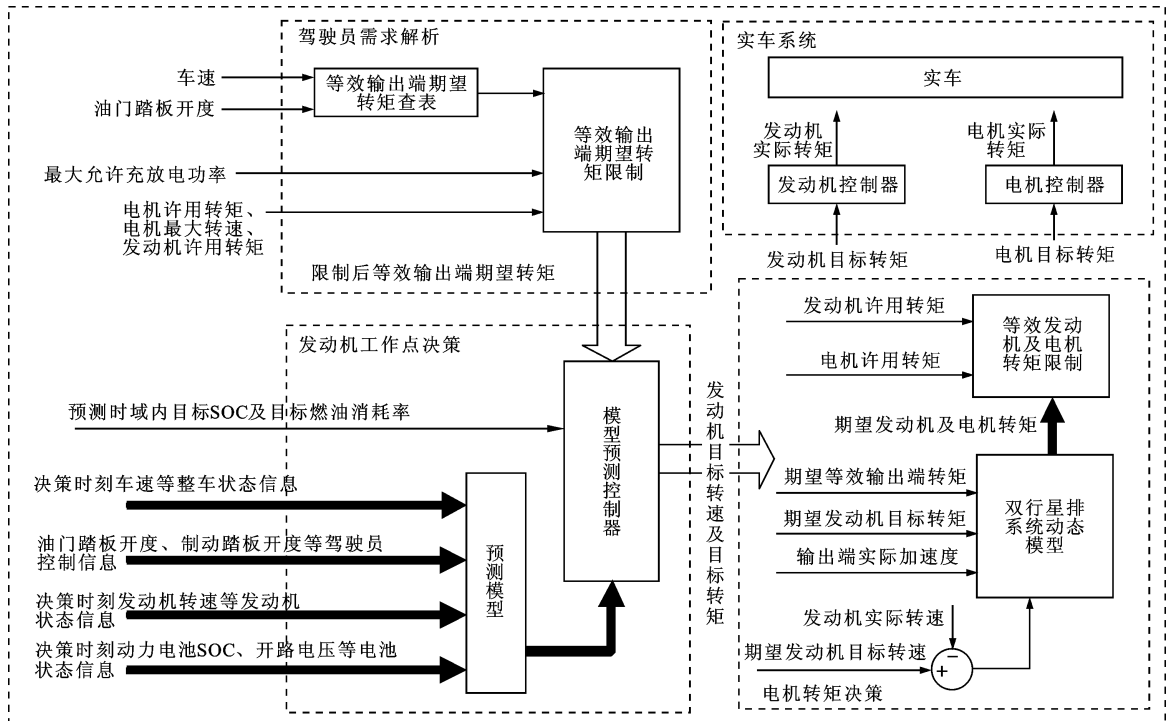


图7 模型预测控制能量管理策略架构

机转矩及转速;转矩分配控制器在考虑整车约束及功能安全的前提下,根据需求转矩及已决策出的发动机转矩和转速来决策相应两电机转矩,最终决策出每一个时刻发动机及两电机的目标转矩^[23]。

4 仿真测试及结果分析

4.1 仿真结果分析

为了验证基于模型预测控制的能量管理策略的有效性,在 Matlab/Simulink 中搭建功率分流混合动力系统模型及相应的控制策略,以 NEDC 工况为例进行仿真测试。设置初始 ψ_{soc} 为 60%,预测时域和控制时域均为 3 s,设置仿真步长为 0.01 s,一个仿真步长内发动机最大转矩增量不超过 2 N·m,发动机最大转速增量不超过 10 r·min⁻¹。

图 8 为 NEDC 工况车速跟踪图,可以看出,基于模型预测控制的能量管理策略能很好地实现整车控制功能,完成车速跟踪。图 9 为 NEDC 仿真工况下 SOC 的变化图,初始时刻的 ψ_{soc} 设置为 60%,终了时刻的 ψ_{soc} 为 60.18%,绝对误差为 0.18%,说明该控制策略能够实现 SOC 的基本稳定。在 800 s 前,由于以纯电动模式为主,SOC 振荡下降;在 800 s 后,输入功率分流模式和复合功率分流模式成为驱动整车运行的主要模式,SOC 快速上升,并维持在 SOC 目标值 60%左右。图 10 为整个 NEDC 工

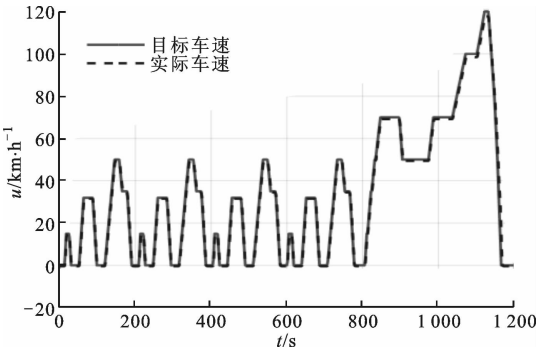


图 8 MPC 能量管理策略下车速跟踪图

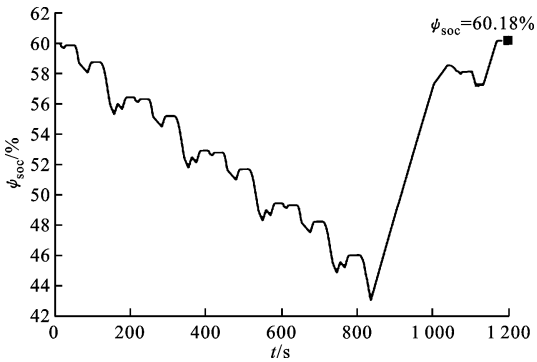


图 9 MPC 能量管理策略下 SOC 变化图

况下发动机工作点的分布图。从图中可以看出,基于模型预测控制的能量管理策略能够使发动机工作在最优工作区间。图 11 为 NEDC 工况下发动机及两电机转矩的变化过程图,图 12 为 NEDC 工况下整车模式变化过程图,图 13 为 NEDC 工况下发动机及两电机转速的变化过程图。经过多个 NEDC 仿真工况后,得到百公里油耗平均为 4.95 L。

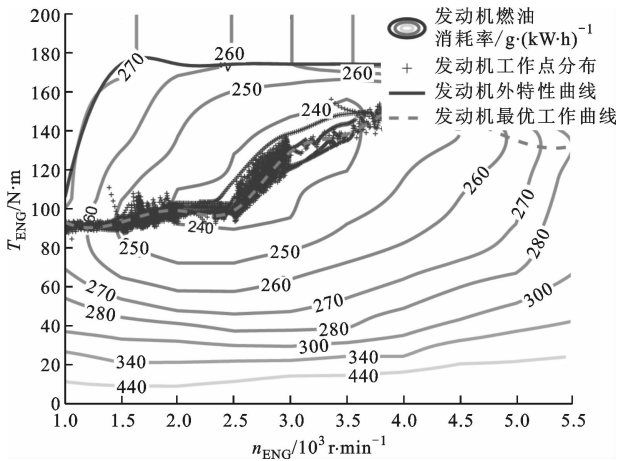


图 10 MPC 能量管理策略下发动机工作点分布图

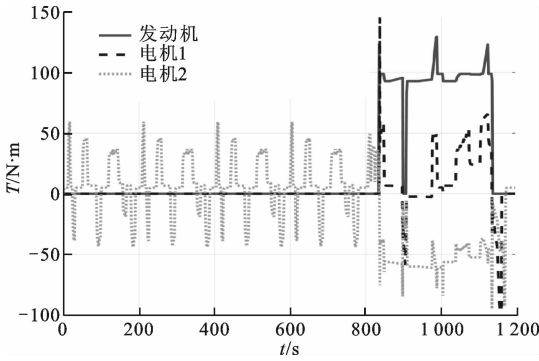


图 11 MPC 能量管理策略下发动机及电机转矩图

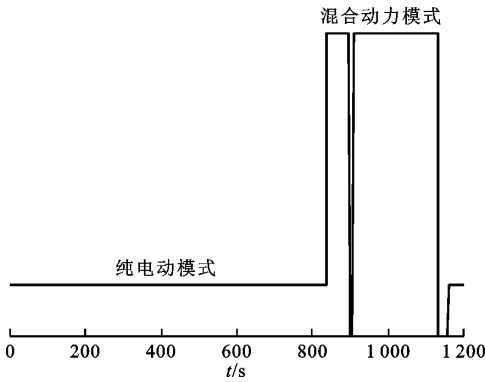


图 12 MPC 能量管理策略下工作模式变化图

4.2 基于规则的能量管理策略

如图 14 所示,基于规则能量管理策略根据车速、SOC 及踏板开度信息决策驾驶员需求转矩及当

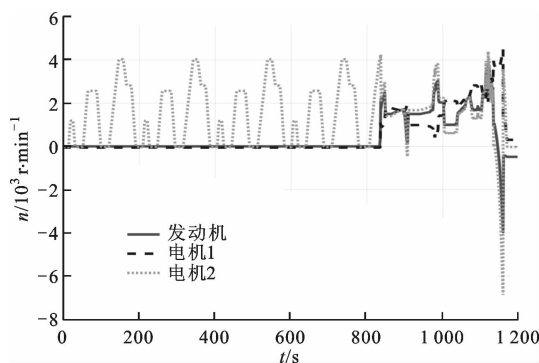


图13 MPC能量管理策略下发动机及电机转速图

前最佳工作模式。在纯电动模式下,将由电机直接提供驾驶员需求转矩;在混合动力模式下,先根据驾驶员需求功率查最佳发动机需求转速,再根据当前发动机转速查最佳发动机转矩输出范围,在保证系统平衡且正常工作的前提下决策两电机转矩。

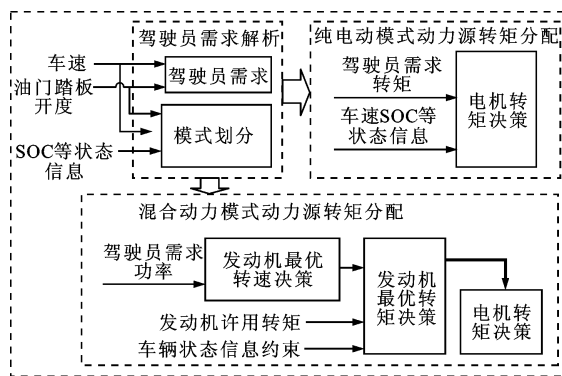


图14 规则能量管理策略控制架构

图15为采用规则能量管理策略NEDC工况下SOC的变化,初始时刻 ψ_{soc} 也设置为60%,而终了时刻的 ψ_{soc} 为67.53%。对比图9中SOC变化过程,在0~800 s内,规则能量管理策略的SOC变化与模型预测控制能量管理策略的结果基本相同,均为振荡下降,这是因为800 s之前两种控制策略下整车均处于纯电动工作模式。在800 s之后,由于SOC较低整车进入功率分流混合动力模式,两种控制策略下电池的SOC均开始上升,规则能量管理策略下SOC上升幅度明显高于模型预测控制能量管理策略下SOC的变化,导致终了时刻SOC有了明显的上升。这是因为规则能量管理策略优先保证发动机工作在较优的区间,而忽略了混合动力汽车电气特性的影响,故电池SOC的变化较大。图16为采用规则能量管理策略NEDC工况下发动机工作点的分布图,可以看出相比于图10,规则的能量管理策略下发动机的工作点紧紧分布在最优工作线两侧。图17为仿真过程中两种控制策略下电机功率

损失变化曲线,在800 s之前,两种控制策略下的整车均处于纯电动模式,因此电机功率损失变化曲线基本相同;在800 s之后,由于SOC较低,整车进入功率分流模式,规则控制策略下的电机损失功率略高于MPC能量管理策略。采用规则能量管理策略经过多个NEDC工况后其百公里油耗为5.364 L。相比于基于规则的能量管理策略,模型预测控制的能量管理策略可提升百公里燃油消耗约7.7%。

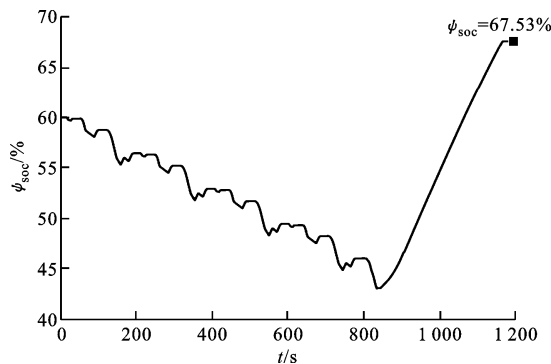


图15 规则能量管理策略下SOC变化图

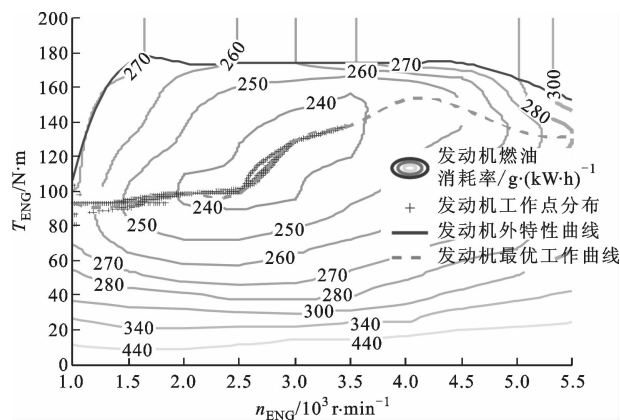


图16 规则能量管理策略下发动机工作点分布图

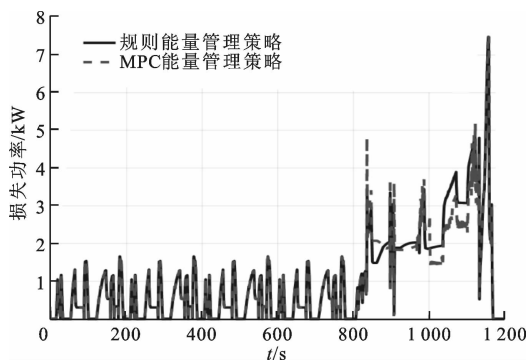


图17 不同控制策略下电机功率损失变化曲线

5 结论

本文以某新型功率分流混合动力系统方案为研究对象,以实时优化发动机转矩为研究目的,重点研

究混合动力模式下各动力源转矩的实时优化控制。首先,对功率分流混合动力系统的结构及模式进行分析,采用机理研究及实验拟合相结合的方法建立短时域预测模型;其次,以预测时域内改善发动机工作点及维持 SOC 的基本稳定为目标,提出了基于系统当前及历史信息的发动机工作点最优决策方法,开发了基于发动机转矩最优决策的能量管理策略。

NEDC 仿真结果表明,基于发动机工作点最优决策的功率分流混合动力汽车 MPC 能量管理策略可实现各动力源转矩的优化分配,改善整车的燃油经济性,可保证发动机基本工作在最优的工作区间的同时,又能兼顾混合动力汽车电气特性对燃油经济性的影响,对于工程实践具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] ROBERTS A, BROOKS R, SHIPWAY P. Internal combustion engine cold-start efficiency: a review of the problem, causes and potential solutions [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 82: 327-350.
- [2] CONLON B, BLOHM T, HARPSTER M, et al. The next generation “voltec” extended range EV propulsion system [J]. *SAE Int J Alt Power*, 2015, 4(2). doi: 10.4271/2015-01-1152.
- [3] ZHANG Xiaowu, LI Shengbo Eben, PENG Huei, et al. Design of multimode power-split hybrid vehicles: a case study on the voltec powertrain system [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6): 4790-4801.
- [4] 薛天扬, 彭增雄. 双模式功率分流混合动力车辆功率优化与仿真 [J]. *机械设计与制造*, 2014(7): 8-11.
XUE Tianyang, PENG Zengxiong. Power optimizing and simulation for a dual mode power-split hybrid electric vehicle [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2014(7): 8-11.
- [5] KISACIKOGLU M C, UZUNOGLU M, ALAM M S. Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(3): 1497-1507.
- [6] 王庆年, 王文, 王鹏宇, 等. 基于瞬时效率的功率分流式混合动力汽车最佳分离因子的确定 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2013, 43(5): 1160-1164.
WANG Qingnian, WANG Wen, WANG Pengyu, et al. Determination of the best separation factor for power-split hybrid electric vehicle based on instantaneous efficiency [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2013, 43(5): 1160-1164.

- [7] 郭明林, 朱建新, 王晨, 等. 新型功率分流混合动力汽车能量管理策略仿真 [J]. *计算机仿真*, 2015, 32(7): 137-143.
GUO Minglin, ZHU Jianxin, WANG Chen, et al. Power-split hybrid electric vehicle energy management strategy simulation [J]. *Computer Simulation*, 2015, 32(5): 137-143.
- [8] 沈登峰, 王晨, 于海生, 等. 复合功率分流混合动力汽车能量管理策略研究 [J]. *汽车工程*, 2017, 39(1): 15-27.
SHEN Dengfeng, WANG Chen, YU Haisheng, et al. A study on energy management strategy for compound power-split hybrid electric vehicle [J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(1): 15-27.
- [9] TAGHAVIPOUR A, AZAD N L, MCPHEE J. Real-time predictive control strategy for a plug-in electric powertrain [J]. *Mechatronics*, 2015, 29: 13-27.
- [10] 崔高健, 钟博浩. 基于模型预测控制的混合动力汽车能量管理策略研究综述 [J]. *时代汽车*, 2016(8): 33-34.
- [11] HE Hongwen, ZHANG Jieli, LI Gaopeng, et al. Model predictive control for energy management of a plug-in hybrid electric bus [J]. *Energy Procedia*, 2016, 88: 901-907.
- [12] 孙延秋, 连静. 基于模型预测控制的 HEV 能量管理策略研究 [D]. 辽宁: 大连理工大学, 2017.
- [13] BORHAN H A, VAHIDI A, PHILIPS A M, et al. Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle [C] // 2009 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 3970-3976.
- [14] LU Zijia, SONG Jipeng, YUAN Hongliang, et al. MPC-based torque distribution strategy for energy management of power-split hybrid electric vehicles [C] // Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China: Northwestern Polytechnical University, 2013: 7650-7655.
- [15] XIANG Changle, DING Feng, WANG Weida, et al. Energy management of a dual mode hybrid electric vehicle based on velocity prediction and nonlinear model predictive control [J]. *Applied Energy*, 2017, 189: 640-653.
- [16] YANG Jie, ZHU Guoming. Model predictive control of a power split hybrid powertrain [C] // 2016 American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 617-622.

(下转第 85 页)