

融合工况预测的混合动力拖拉机 自适应能量管理策略

朱镇^{1,2}, 曾令新¹, 林勇刚², 陈龙¹, 邹荣³, 蔡英凤¹

(1. 江苏大学汽车工程研究院, 212013, 江苏镇江; 2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 310027, 杭州; 3. 江苏大学机械工程学院, 212013, 江苏镇江)

摘要: 针对传统等效燃油消耗最小策略(ECMS)下等效因子取值固定和工况适应性差的问题,提出了一种融合拖拉机工况预测的自适应等效燃油消耗最小策略(PA-ECMS)。以搭载混合动力液压机械无级变速动力总成的大马力拖拉机为研究对象,将ECMS策略应用于混合动力拖拉机的动力分配。首先,基于径向基(RBF)神经网络,建立了拖拉机工况预测模型,通过历史工况预测未来一段时间的工况信息;接着,结合电池荷电状态(SOC)反馈和预测的工况信息,对等效因子进行自适应调整;最后,在PA-ECMS策略框架下,对混合动力拖拉机的功率进行优化分配。仿真结果表明:与固定等效因子的ECMS策略和仅基于SOC反馈的自适应等效燃油消耗最小策略(A-ECMS)相比,采用所提策略时拖拉机在犁耕工况下的油耗分别降低了6.30%和2.55%,且具有更好的电量维持性能。

关键词: 混合动力拖拉机; 等效燃油消耗最小策略; 等效因子; 神经网络; 工况预测

中图分类号: U463.2 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202312020 **文章编号:** 0253-987X(2023)12-0201-10

Adaptive Energy Management Strategy for Hybrid Tractors Based on Condition Prediction

ZHU Zhen^{1,2}, ZENG Lingxin¹, LIN Yonggang², CHEN Long¹, ZOU Rong³, CAI Yingfeng¹

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: For the problems such as fixed value of equivalent factor and poor adaptability to working conditions in the traditional equivalent consumption minimization strategy (ECMS), a predictive adaptive equivalent consumption minimization strategy (PA-ECMS) integrating tractor working condition prediction was proposed. In the study, the ECMS was applied to the power distribution of a high-horsepower tractor equipped with a hybrid hydro-mechanical continuously variable transmission powertrain. Firstly, based on the radial basis function (RBF) neural network, a tractor working condition prediction model was established to predict the working condition for a period of time in the future based on the historical working condition. Then, the equivalent factor was adjusted adaptively based on the battery state of charge (SOC) feedback and the predicted

收稿日期: 2023-02-25。 作者简介: 朱镇(1985—),男,副教授;蔡英凤(通信作者),女,教授,博士生导师。 基金项目: 流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-202214);中国博士后科学基金资助项目(2023M731370);国家自然科学基金资助项目(52272435)。

网络出版时间: 2023-07-24

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230721.1651.002.html>

working condition. Finally, the power distribution of the hybrid tractor was optimized under the PA-ECMS framework. The results show that, compared with the ECMS with fixed equivalent factor and the adaptive equivalent consumption minimization strategy (A-ECMS) based on SOC feedback only, the fuel consumption of the tractor under ploughing condition is reduced by 6.30 % and 2.55 %, respectively, and that the tractor performed better in power maintenance.

Keywords: hybrid tractor; equivalent consumption minimization strategy; equivalent factor; neural network; condition prediction

“十四五”规划将我国的农业机械提到了极其重要的位置,并明确指出要提升农业机械的核心竞争力。拖拉机是农用动力机械的典型代表,传统大马力拖拉机存在挡位繁多、油耗高及排放性差等问题,不利于环境的保护和可持续发展^[1-2]。纯电动拖拉机在短期内受限于电池技术的影响,存在续航里程有限和充电时间过长的问题,不利于拖拉机的持续高功率作业,因此多应用于中小马力的拖拉机。而混合动力拖拉机在原有发动机的基础上,增加了电机作为动力源,在功率需求低时采用纯电动模式,降低排放;在功率需求高时通过电机辅助发动机,使发动机维持在高效率区间内工作,能够降低油耗,被认为是大马力拖拉机实现节能降耗的一个理想方案^[3-6]。

在混动拖拉机实际作业过程中,开发高效可行的能量管理策略来协调动力源的动力分配,是实现拖拉机节能减排的关键^[7-8]。目前,国内外对混动汽车的能量管理策略研究较多,主要包括基于规则和基于优化2种^[9-10]。基于规则的控制策略简单易行,在混动拖拉机中应用较多,诸如功率跟随型策略、恒温器式控制策略等^[11-13]。然而,控制规则的制定依赖于设计者的经验,需要通过大量调试获得参数,很难实现最优控制。动态规划算法(DP)是一种全局优化算法,可求解出能量管理问题的最优解。但该算法采用后向求解运算,需预知工况信息,不适合实时应用,多用于策略的对比以及为逻辑规则设计提供参考^[14-16]。

等效燃油消耗最小策略(ECMS)是瞬时优化策略的代表,其通过引入“油电等效因子”的概念,将电池电耗等效为发动机油耗,以瞬时总油耗最小为目标,计算出瞬时最优转矩分配组合。该策略计算量适中,适合拖拉机的实时应用^[17]。然而,由于适合于某一工况的最优等效因子很难适用于其他工况,因此对电量维持型的混动拖拉机影响较大。针对等效因子工况适应性差的问题,Wang等^[18]提出了一种用于混动车辆的模糊自适应ECMS策略,通过考虑电池荷电状态(SOC)偏差与发动机当前转速,建立了等效因子调节的模糊控制器。Rezaei等^[19]提

出了一种最优等效因子上下边界估计方法,在此基础上设计了一种新的等效因子调整方式。Tian等^[20]设计了一种混合算法来识别混动巴士驾驶员的驾驶风格,基于此获得了相应的校正函数,用于对等效因子进行调整。周维等^[21]通过分析混动矿用自卸车实际作业工况特点,对SOC参考轨迹进行设计,并结合基于SOC反馈的PI控制器实时调整等效因子。

上述策略均基于SOC反馈、模式识别、历史工况信息等对等效因子进行调整,未考虑未来工况信息对等效因子的影响。因此,本文针对搭载液压机械无级变速器(HMCVT)的混动拖拉机,提出了一种基于拖拉机工况信息预测的等效因子自适应调整方法。首先,利用径向基(RBF)神经网络对拖拉机的作业工况数据进行学习训练,建立RBF神经网络拖拉机工况预测模型;接着,根据拖拉机历史工况的信息预测,得到下一时域的未来工况信息,结合SOC反馈及预测到的未来工况信息,动态调整ECMS策略的等效因子,并将其应用于实际行驶,建立了基于工况预测的等效因子自适应模型;最后,通过仿真实验对控制策略的有效性进行了验证。

1 混合动力拖拉机系统构型

目前,我国传统大马力拖拉机动力传动系统的设计,大部分仍采用柴油机匹配机械式有级变速器的形式,由于纯机械传动无法实现无级变速,为了使发动机的转矩输出特性曲线接近理想状态,因此需要设置繁多的挡位,导致换挡操作繁琐复杂。

本文将混合动力技术与液压机械无级变速传动相结合,设计了一款新型的混合动力机液复合传动装置^[22],并应用到大马力拖拉机中。图1给出了混合动力拖拉机动力传动系统的结构原理图。与采用机械有级式变速器的拖拉机不同,所设计的混合动力拖拉机集成了油电混合双动力源与液压机械复合传动装置,其动力传动系统包括:①发动机部分;②电机部分;③行星齿轮分汇流机构;④液压传动机

构;⑤动力输出轴(PTO);⑥输出机构。其中,③和④构成了 HMCVT 变速器,整个动力传动系统可以看作是油电混合双动力源匹配 HMCVT。通过控制离合器 $C_0 \sim C_8$ 和制动器 B 的接合与分离,拖拉机可实现纯发动机驱动、纯电驱动、混合动力驱动、行车充电及能量回收 5 种工作模式的切换。

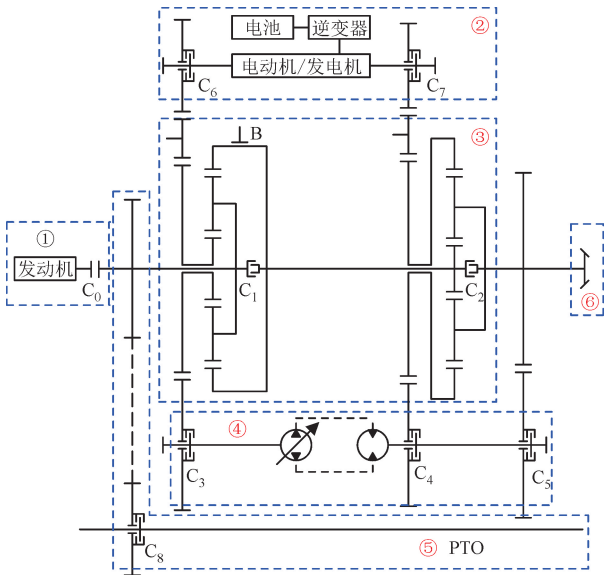


图 1 混合动力拖拉机动力传动系统结构原理图
Fig. 1 Structural principle of hybrid tractor power transmission system

2 动力传动系统建模

2.1 发动机模型

拖拉机通常搭载柴油发动机,因此可采用试验数据建模的方法建立发动机稳态模型,通过数据插值构建发动机比油耗关于发动机转速和转矩的关系曲面。发动机油耗的数学表达式可写为

$$Q = \frac{1}{3.6 \times 10^9 \rho} \int_0^t T_e \omega_e b_e dt \quad (1)$$

式中: T_e 为发动机输出转矩; ω_e 为发动机角速度; b_e 为比燃油消耗率; ρ 为柴油密度。

2.2 电机模型

通过数据插值构建电机的效率模型,使其可在电动或发电状态下工作。电机的功率可表示为

$$P_m = T_m \omega_m \eta_m^{-\text{sgn}(T_m)} \quad (2)$$

式中: T_m 为电机输出转矩; ω_m 为电机角速度; η_m 为电机效率,且当 $T_m > 0$ 时为电动机效率, $T_m < 0$ 时为发电机效率。

2.3 电池模型

电池模型采用 Rint 模型,即将电池等效为理想

电压源 U_{oc} 和内阻 R_{bat} 串联的模型,电池的输出功率和 SOC 反馈值可由下式描述

$$P_{bat} = U_{bat} I_{bat} = U_{oc} I_{bat} - I_{bat}^2 R_{bat} \quad (3)$$

$$S_{SOC}(t) = S_{SOC}(t_0) - \frac{1}{3\,600 Q_{bat}} \int_{t_0}^t I_{bat} dt \quad (4)$$

式中: P_{bat} 为电池输出功率; U_{bat} 为电池输出电压; I_{bat} 为电池输出电流; U_{oc} 为电池开路电压; R_{bat} 为电池等效内阻; $S_{SOC}(t)$ 为 t 时刻电池的 SOC 值; $S_{SOC}(t_0)$ 为电池的 SOC 初始值; Q_{bat} 为电池额定容量。

2.4 变速器模型

对于本文研究的液压机械无级变速器,当发动机工作时,需进行相应的速比匹配。以经济性作为控制目标,通过拟合油门开度与发动机经济性转速数据,可得到拖拉机不同油门开度下最佳经济性转速的计算式,表示如下

$$n_{e_opt} = -210\alpha^4 - 150\alpha^3 + 810\alpha^2 + 100\,0\alpha + 750 \quad (5)$$

$$v_a = 0.377 \frac{n_e r_w}{i_g i_0 i_w (1 + \epsilon)} \quad (6)$$

式中: n_{e_opt} 为发动机最佳经济性转速; α 为油门开度; v_a 为实际车速; n_e 为发动机转速; r_w 为拖拉机驱动轮半径; i_g 为变速器传动比; i_0 为主减速器传动比; i_w 为轮边减速器传动比; ϵ 为驱动轮滑转率。

式(6)给出了发动机转速与整机行驶速度的关系,联立式(5)与式(6),可得到液压机械无级变速器经济性速比控制曲面图,如图 2 所示,其中速比表示变速器的输入转速与输出转速之比。由图可知,随着油门开度和车速的变化,通过查表匹配对应的经济性速比,即可使得发动机运转在最佳经济性工作曲线上。

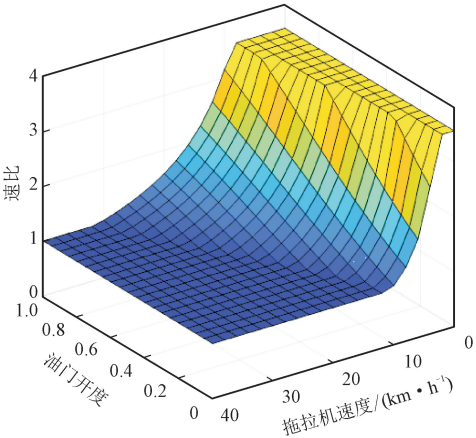


图 2 液压机械无级变速器经济性速比控制曲面
Fig. 2 Economic speed ratio surface of hydro-mechanical continuously variable transmission

2.5 整机纵向动力学模型

搭建的仿真模型主要用于验证车辆能量管理相关控制策略,故仅考虑拖拉机的纵向动力学模型,表示如下

$$\begin{cases} T_t i_g i_o i_w \eta_i - T_w = J_w \dot{\omega}_w \\ T_w = (F_T + \frac{1}{2} \rho_0 C_D A v_a^2 + mgf \cos \theta + mg \sin \theta) r_w \\ v_a = \omega_w r_w / (1 + \epsilon) \end{cases}$$

(7)

式中: T_t 为驱动转矩; η_i 为变速器效率; T_w 为驱动轮转矩; J_w 为驱动轮等效转动惯量; ω_w 为驱动轮角速度; $\dot{\omega}_w$ 为驱动轮角加速度; F_T 为挂钩牵引力; ρ_0 为空气密度; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; m 为整机使用质量; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数; θ 为坡度。

3 拖拉机工况预测模型建立

3.1 拖拉机作业工况分析

一般来说,拖拉机工况可分为道路运输工况和作业工况,其中,作业工况根据所牵引农机具的不同以及动力输出轴(PTO)是否工作,又可分为犁耕、旋耕、施肥等工况;根据负载的大小也可分为轻载、中载及重载作业工况^[23]。在进行农场作业时,通常需要拖拉机维持稳定的行驶速度牵引农机具工作,速度改变要缓慢,动力需求稳定,尤其是在特定的农场工作时,工作环境及线路固定,拖拉机只需进行大量定期重复的驾驶循环。因此,只要获得合适的样本数据用于神经网络训练,就能够实现良好的工况信息预测。

德国农业协会(DLG)根据国际标准与法规,制定了 PowerMix 测试项目,对拖拉机的油耗、效率及输出功率等进行测试。PowerMix 测试项目开发了 14 个测试循环工况,包括 12 个田间作业和 2 个运输循环,各个测试工况在部分负荷和满负荷下,复现了农用拖拉机典型的田间和运输作业。PowerMix 中各测试循环设定的负荷及车速信息如表 1 所示^[24]。

表 1 德国农业协会 PowerMix 测试工况
Table 1 DLG PowerMix test cycles

负载类型	代号	工况	负荷/ %	平均车速/ (km · h ⁻¹)
牵引工作	Z1P	犁耕	100	9
	Z2P	犁耕	60	9
	Z1G	耕耘	100	12
	Z2G	耕耘	60	12

续表

负载类型	代号	工况	负荷/ %	平均车速/ (km · h ⁻¹)
牵引+PTO	Z3K	旋耕	100	6
	Z4K	旋耕	70	6
	Z5K	旋耕	40	6
	Z3M	除草	100	16
	Z4M	除草	70	16
	Z5M	除草	40	16
牵引+PTO+ 液压	Z6MS	施肥	100	7
	Z7PR	打捆	60	10
运输作业	T1	重载运输	100	20
	T2	轻载运输	25	40

3.2 基于 RBF 神经网络车速预测模型的建立

RBF 神经网络为单隐层前馈神经网络,被广泛用于非线性化、时间序列预测等领域^[25]。图 3 给出了 RBF 神经网络的拓扑结构,其中 W 为权值, b 为偏置阈值。不同权值的输入信号先线性相加,再通过偏置阈值进行调整。隐藏层采用高斯函数作为基函数,先对输入序列进行非线性映射变换,再通过输出层线性映射变换得到输入信号所对应的输出。

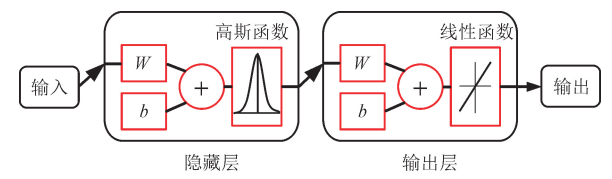


图 3 RBF 神经网络的拓扑结构
Fig. 3 Topology of RBF neural network

下文以拖拉机工况信息预测中的车速预测为例,将当前时刻 k 和过去时域 H_b 的历史车速信息作为神经网络的输入,将预测时域 H_p 内的预测车速作为神经网络的输出。

考虑到拖拉机工况复杂,负载多变,为了使预测模型在田间作业和道路运输工况下都具备良好的预测精度,提高模型的工况适应性,选取 Z1G、Z2P、Z3M、Z3K、Z6MS、Z7PR 共 6 种工况,以及拖拉机现场作业数据组合而成的组合工况作为模型训练样本数据,如图 4 所示。组合工况全程为 6 500 s,综合了 3 种负载类型,包括拖拉机作业工况中的犁耕、旋耕、耕耘、除草、打捆和施肥等工作循环,能够模拟拖拉机绝大多数的作业工况,因此具有一定的代表性。

图 5 为不同预测时域下验证工况的预测效果图,可以看出,基于 RBF 神经网络车速预测模型得到的车速预测值,能够与实际速度变化趋势保持一致。

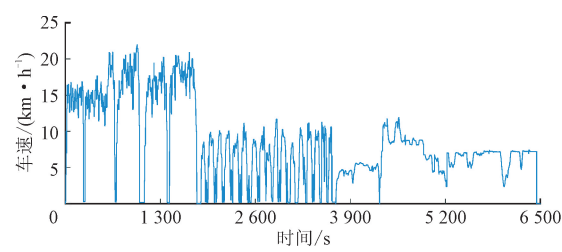


图 4 训练样本车速数据

Fig. 4 Speed data of the training sample

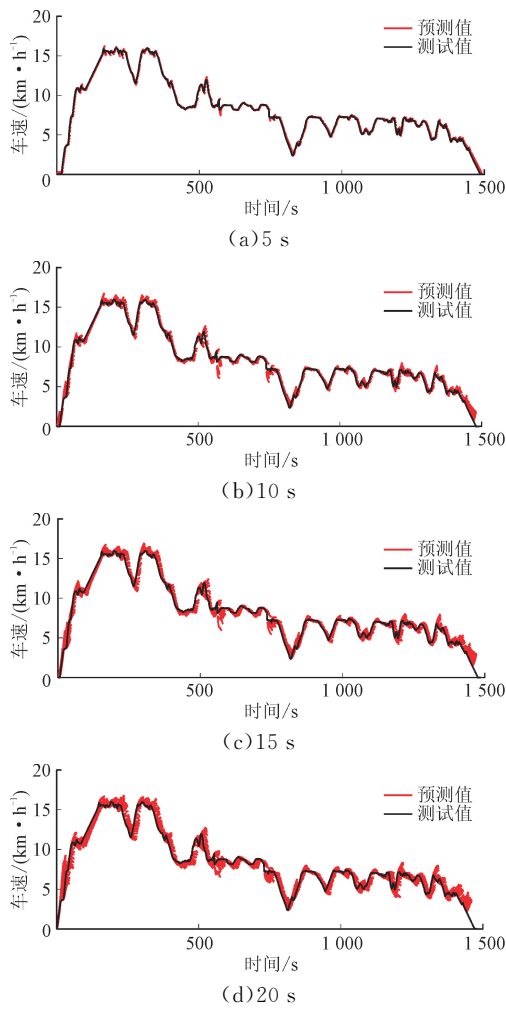


图 5 不同预测时域下基于 RBF 神经网络的车速预测值与测试值对比

Fig. 5 Comparison of predicted and tested values of vehicle speed based on RBF neural network in different prediction time domains

定义均方根误差 E_{RMSE} 和平均绝对百分比误差 E_{MAPE} ,以评价 RBF 神经网络车速预测模型的准确性。随着预测时长的增加,预测工况的车速信息与实际工况的车速信息误差也随之增加,具体的数据如表 2 所示。综合考虑预测精度及模型计算量,经过反复调校,选取预测时域长度为 10 s,扩散因子为 25,隐藏层神经元个数为 125,对拖拉机的工况信息进行短期预测。

表 2 不同预测时域车速信息的误差值

Table 2 Error values of vehicle speed under different prediction time domains

预测时域长度/s	E_{RMSE}	E_{MAPE}
5	0.195 6	0.012 7
10	0.205 3	0.013 1
15	0.261 2	0.015 7
20	0.424 1	0.017 8

4 拖拉机预测自适应能量管理策略

4.1 等效燃油消耗最小策略(ECMS)

对于非插电式混合动力拖拉机,由于其电池无法通过外部电网进行主动充电,故需要消耗燃油来维持电池 SOC 在工况始末电量稳定。ECMS 策略通过引入充放电等效因子,将混动车辆的电耗等效为油耗,并将等效总油耗作为统一指标进行最优控制。以每个瞬时下发动机油耗与电池等效油耗之和最小为目标,在满足相关约束条件的情况下求得最优解。其数学模型可表示如下

$$\begin{cases} \dot{m}_{eq} = \dot{m}_f + \dot{m}_{bat} \\ \dot{m}_{bat} = s(t) \frac{P_{bat}(t)}{q_{lhv}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\dot{m}_{eq}$ 为整车等效燃油消耗率; $\dot{m}_f$ 为发动机燃油消耗率; $\dot{m}_{bat}$ 为电池等效燃油消耗率; $s(t)$ 为 t 时刻的油电等效因子; $P_{bat}(t)$ 为 t 时刻电池的输出功率; q_{lhv} 为燃油低热值。

以拖拉机在时域 $[t_0, t_f]$ 内的总燃油消耗最小为控制目标,定义目标函数为

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_{eq}(x(t), u(t), t) dt \quad (9)$$

$$u(t) = T_m(t) \quad (10)$$

式中:状态变量 $x(t)$ 为电池的 SOC 值;控制变量 $u(t)$ 为电机分配的转矩 $T_m(t)$ 。

对状态变量 $x(t)$ 求导,可得

$$\dot{x}(t) = \dot{S}_{SOC}(t) = \frac{-\eta_{bat} I_{bat}}{Q_{bat}} \quad (11)$$

式中: $\dot{S}_{SOC}(t)$ 为电池充放电变化率; η_{bat} 为电池充放电效率。

对于电量维持型混动车辆,在时域 $[t_0, t_f]$ 始末应保持电池电量的稳定,即

$$S_{SOC}(t_0) = S_{SOC}(t_f) \quad (12)$$

而且,系统还需满足以下约束条件

$$\begin{cases} T_{e_min} \leq T_e(t) \leq T_{e_max} \\ \omega_{e_min} \leq \omega_e(t) \leq \omega_{e_max} \\ T_{m_min} \leq T_m(t) \leq T_{m_max} \\ \omega_{m_min} \leq \omega_m(t) \leq \omega_{m_max} \\ S_{SOC_L} \leq S_{SOC}(t) \leq S_{SOC_H} \end{cases} \quad (13)$$

式中: T_{e_max} 、 T_{e_min} 分别为发动机转矩的上、下限; ω_{e_max} 、 ω_{e_min} 为发动机转速的上、下限; T_{m_max} 、 T_{m_min} 为电机转矩的上、下限; ω_{m_max} 、 ω_{m_min} 为电机转速的上、下限; S_{SOC_H} 、 S_{SOC_L} 为电池 SOC 值的上、下限。

根据庞特里亚金极小值原理,构造瞬时哈密顿函数为

$$H\{u, t, \lambda(t)\} = \dot{m}_f(x, u, t) + \lambda(t)\dot{x}(u, t) \quad (14)$$

式中: H 为哈密顿函数; λ 为拉格朗日算子。

使得哈密顿函数最小的控制变量最优序列 $u^{opt}(t)$ 可表示为

$$u^{opt}(t) = \arg \min_u [H(u, t, \lambda(t))] \quad (15)$$

结合式(3)和式(11),可将式(14)改写为

$$H\{u, t, \lambda(t)\} = \dot{m}_f - \lambda(t) \frac{P_{bat}}{U_{bat} Q_{bat}} \quad (16)$$

结合式(8)和式(16),油电等效因子可写为

$$s(t) = -\frac{\lambda(t)q_{lhv}}{Q_{bat}U_{bat}} \quad (17)$$

4.2 预测自适应等效油耗最小策略(PA-ECMS)

传统 ECMS 策略的等效因子取值固定,工况适应性差,因而导致混动拖拉机在工作时,电池 SOC 处于不断地波动之中。当设定的等效因子偏小时,电池等效油耗相对较低,能量管理系统偏向于用电,容易导致电池 SOC 过放。反之,当等效因子偏大时,能量管理系统偏向于用油,导致电池 SOC 上升从而偏离目标值。为提高拖拉机的燃油经济性与维持电池 SOC 的稳定性,需对油电等效因子进行动态调整,提高其适应性。

常用的基于电池 SOC 反馈的等效因子自适应模型可表示为

$$s(t) = s_0 + K_p \Delta S_{SOC} + K_I \int \Delta S_{SOC} dt \quad (18)$$

$$\Delta S_{SOC} = S_{SOC_ref} - S_{SOC}(t) \quad (19)$$

式中: s_0 为初始等效因子; K_p 为比例系数; K_I 为积分系数; S_{SOC_ref} 为 SOC 参考值; $S_{SOC}(t)$ 为 SOC 实际值。

该模型通过引入 PI 控制器,根据电池 SOC 实际值与目标值之间的误差,对等效因子进行实时修正,虽然方法简便,但控制参数的整定需依靠人工经验,且等效因子每时每刻都在调整,修正时间过短且限制电池 SOC 的行程在目标 SOC 附近,不利于电能得到充分有效的利用。

本文提出的融合拖拉机工况预测的 PA-ECMS 策略,能根据神经网络预测得到的未来工况信息对等效因子进行调整,等效因子离散自适应的规律可

描述如下。基于预测的拖拉机工况信息,对等效因子进行自适应调节,得到

$$\begin{cases} s(k+1) = s(k) + \psi[(k+1)T](S_{SOC_ref} - S_{SOC}(t)) \\ t = kT, k = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (20)$$

式中: $s(k)$ 为 k 时刻的等效因子; $s(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的等效因子; T 为等效因子离散自适应的时间周期; $\psi[(k+1)T]$ 为未来车速的变化对等效因子的影响,可表示为

$$\psi[(k+1)T] = K_{SOC} \delta \quad (21)$$

式中: K_{SOC} 为常数; $\delta = V_{PS,i}/V_{PA,i}$, 其中 $V_{PS,i}$ 为预测时域 i 内的车速标准差, $V_{PA,i}$ 为预测时域 i 内的车速平均值,两者又可分别表示为

$$V_{PS,i} = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_j - \bar{v})^2 / N} \quad (22)$$

$$V_{PA,i} = \sum_{j=1}^N v_j / N \quad (23)$$

式中: $\bar{v}$ 和 v_j 分别为预测时域 i 内的区间平均车速和 j 时刻的预测车速; N 为预测区间采样点数目。

未来工况预测时域区内车速标准差与均值的比值 δ , 反映了单位均值上的车速数据离散程度,可用来描述未来有限时域内拖拉机行驶状态的变化趋势。若比值 δ 在下一个区间偏大,则说明车辆较上一区间有频繁加减速的趋势,车辆需求功率较大,需相应增大等效因子;若偏小,则表示车速变化平稳缓慢,需要减小等效因子。因此,根据比值 δ 的大小对等效因子进行实时调整,可满足不断变化的工况需求。PA-ECMS 能量管理控制策略的框架如图 6 所示。

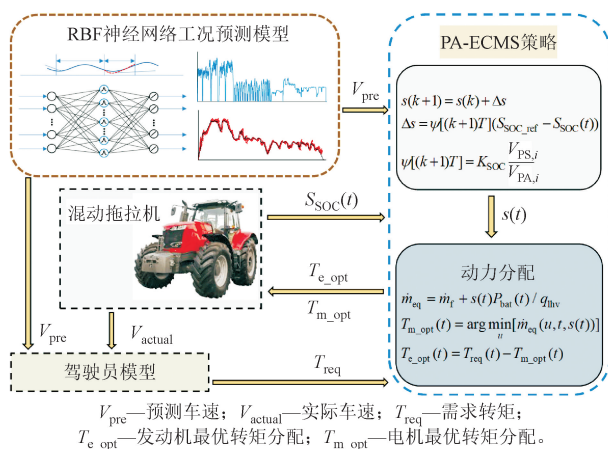


图 6 PA-ECMS 能量管理控制策略框架

Fig. 6 Energy management control strategy framework of PA-ECMS

5 仿真分析

5.1 仿真模型构建

整车动力传动系统的主要部件参数如表 3 所示。采用 SimulationX 软件,搭建混动拖拉机的整机物理模型;采用 Matlab/Simulink 软件,搭建控制策略和工况预测模型;通过 SimulationX 软件调用编译器生成的可执行文件,最终实现联合仿真。

表 3 动力传动系统主要部件参数

Table 3 Parameters of main components of the powertrain		
部件	参数	数值
整机	整机质量/kg	8 260
	驱动轮半径/m	0.875
发动机	额定功率/kW	132
	额定转速/(r · min ⁻¹)	2 300
	最大转矩/(N · m)	750
	最小燃油消耗率/(g · (kW · h) ⁻¹)	203
电机	最大功率/kW	85
	额定功率/kW	45
	最大转矩/(N · m)	250
	额定转矩/(N · m)	130
电池	额定容量/(A · h)	45
	额定电压/V	360
传动系统	HMCVT 速比	1.00~3.57
	主减速比	3.70
	轮边减速比	6.40

5.2 仿真工况构建

犁耕作业工况是拖拉机最具代表性的工况之一,根据美国环保署(EPA)公布的农用拖拉机工况数据,建立本文所研究混动拖拉机的犁耕工况,并将其作为联合仿真的工况,如图 7 所示。犁耕工况时间持续 600 s,其中,平均牵引阻力为 36.60 kN,平均作业车速为 8.86 km/h。

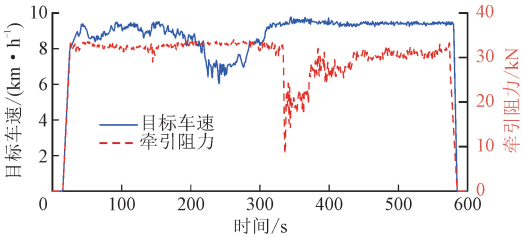


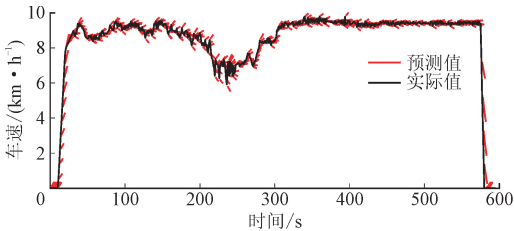
图 7 本文所研究混动拖拉机的犁耕工况

Fig.7 The plowing cycle of the hybrid tractor studied in this paper

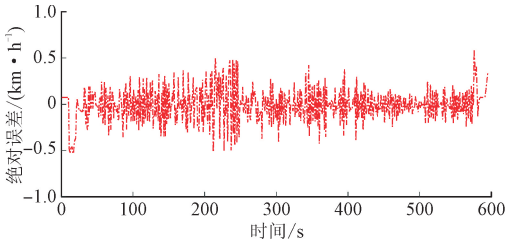
5.3 模型预测精度分析

图 8 为犁耕工况下预测时域为 10 s 时,采用基于 RBF 神经网络的拖拉机工况预测模型得到的车

速预测结果。由图可见,预测结果与拖拉机真实行驶车速存在偏差,误差在工况始末以及 200~250 s 之间较大,这是由于加速度变化剧烈所导致的。但总体上,预测车速的变化趋势与实际车速的变化趋势基本保持一致,且其 E_{RMSE} 及 E_{MAPE} 分别为 0.195 6 和 0.016 7,能够满足预测精度需求。



(a)车速预测值与实际值对比



(b)绝对误差

图 8 基于 RBF 神经网络工况的车速预测效果及绝对误差
Fig.8 The speed prediction effect and absolute error of the working condition based on RBF neural network

5.4 节油性验证

图 9 对比了分别采用传统 ECMS 策略、仅基于 SOC 反馈的自适应等效燃油消耗最小策略(A-ECMS)以及本文所提 PA-ECMS 控制策略时,发动机及电机的功率优化分配、电池 SOC 轨迹变化、等效因子调整轨迹和油耗情况。从发动机和电机的功率分配可以看出,A-ECMS 和 PA-ECMS 策略下,电机功率波动的幅度相较于传统 ECMS 策略更大,表明对电机的利用更为充分。在 220~260 s 时,由于车速下降导致整机需求功率变小,传统 ECMS 策略需通过启用电机分担需求功率,此时处于电机和发动机共同驱动状态;而 A-ECMS 和 PA-ECMS 策略则采用发动机提供整机需求功率,同时通过给电机充电,维持发动机在高效区域工作,从而有效地降低了油耗。传统 ECMS 策略的等效因子固定,整个工况内均为初始值 2.75,但该值并非犁耕工况下的最优等效因子,因此导致 SOC 终值与电量维持的目标值偏离较大。在 330~380 s 时,由于载荷波动导致整机需求功率下降,此时电池 SOC 偏离设定的电量维持值,A-ECMS 和 PA-ECMS 策略可通过提升电机的输出功率,保持与发动机共同驱动。对等效因子进行自适应调整后

可以看出, A-ECMS 和 PA-ECMS 策略下等效因子 SOC 轨迹在 SOC 目标值附近波动更加频繁, 且 PA-ECMS 策略在提供 SOC 反馈的基础上还能对未来工况进行预测。然而, 与 A-ECMS 策略在每一时刻连续对等效因子进行调整不同, PA-ECMS 策略对等效因子的调整是周期性的, 故对电能的利用更为充分, 波动幅度相较于 A-ECMS 策略更大, 表明其具有更为优异的电量维持性能。

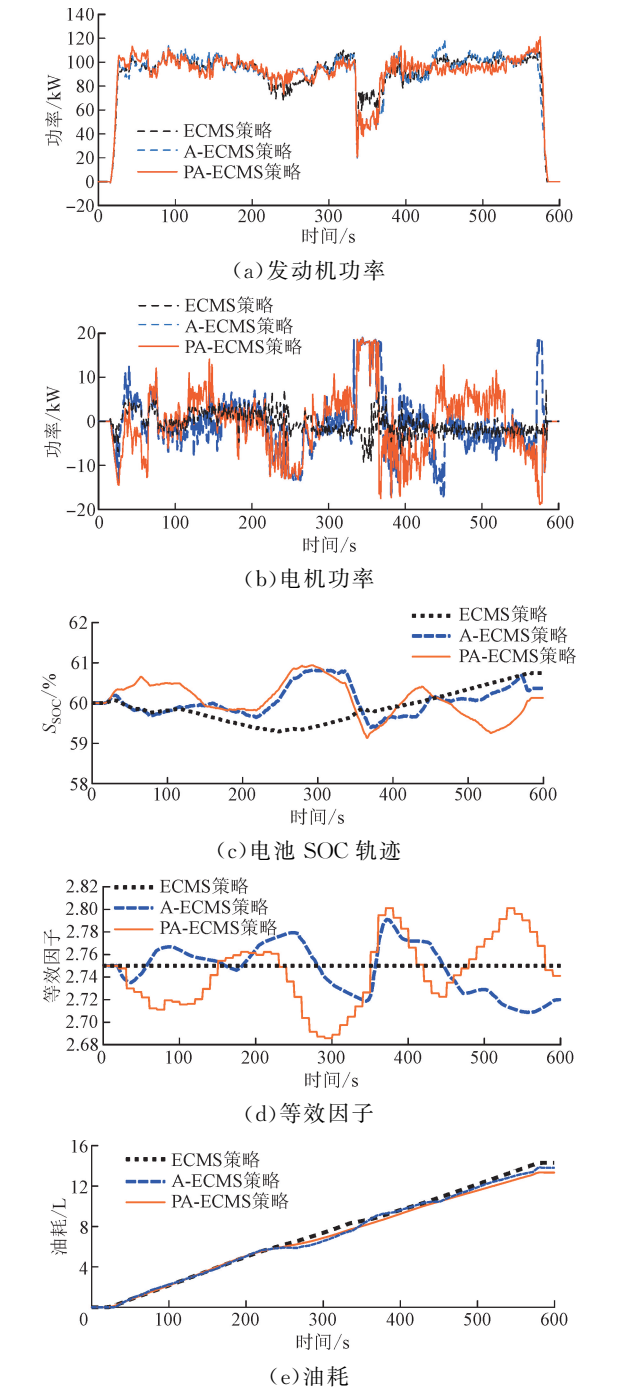


图 9 不同控制策略下犁耕工况的仿真结果对比
Fig. 9 Comparison of simulation results of plowing cycle under different strategies

上述 3 种策略在工况结束时, 电池 SOC 值与目标值均仍存在偏差, 故应对仿真结束时得到的燃油消耗量进行修正, 以消除 SOC 变化对油耗的影响。通过添加一个取决于 SOC 变化的拟合系数 σ 来修正燃油消耗, 修正后的油耗可表示为

$$m_0 = m_f - \sigma \Delta S_{SOC} \tag{24}$$

式中: m_0 为达到电量维持值, 即电池 SOC 值为 0 时的燃油消耗量; m_f 为仿真结束时的燃油消耗量; σ 为 ΔS_{SOC} 转换为对应燃油量的拟合系数。

表 4 给出了油耗校正后, 3 种不同控制策略下混动拖拉机在某个犁耕工况下的电池 SOC 值和油耗对比。可以看出, A-ECMS 和 PA-ECMS 策略在犁耕工况下的节油效果均优于 ECMS 策略, 节油率分别为 3.85% 和 6.30%, 体现了等效因子随着工况变化的自适应调整对整机油耗的影响。在一个犁耕工况结束后, PA-ECMS 策略的节油率仅高于 A-ECMS 策略 2.45%, 二者在油耗方面相差不大。相较于初始设置的电量维持值 60%, A-ECMS 和 PA-ECMS 策略的电池 SOC 终值分别偏离了 0.51% 和 0.13%, 表明 PA-ECMS 策略下电池 SOC 电量的维持性能更为优越, 这是因为 PA-ECMS 策略可以提前预测未来工况信息。然而, 预测模型的误差始终是无法避免的, 后续仍需不断提升预测模型的精度, 以进一步提升节油率。

表 4 不同控制策略下的电池 SOC 值和油耗对比
Table 4 Comparison of SOC and fuel consumption under different control strategies

控制策略	SOC 终值/%	SOC 偏差/%	油耗/L	节油率/%
ECMS	60.74	0.74	14.29	
A-ECMS	60.51	0.51	13.74	3.85
PA-ECMS	60.13	0.13	13.39	6.30

在犁耕工况下, PA-ECMS 策略相较于其他两种策略的发动机实时工作点分布对比如图 10 所示。

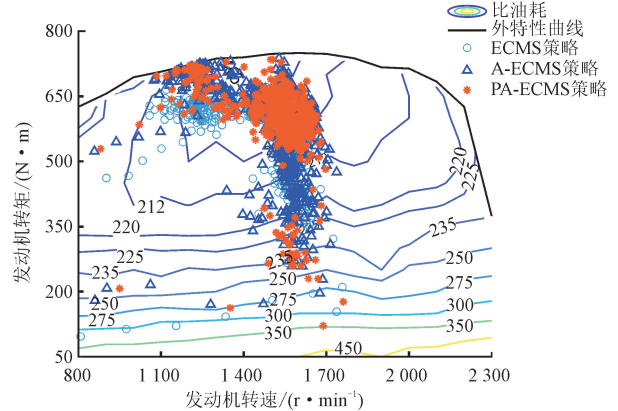


图 10 不同控制策略下的犁耕工况发动机工作点分布对比
Fig. 10 Comparison of engine operating point distribution under plowing cycle under different control strategies

由图 10 可见,通过预测未来工况信息对等效因子进行动态调整后,发动机工作点更为密集地分布在高功率、高效率区域,表明发动机的负荷率得到了有效提升,这也是 PA-ECMS 策略的节油性优于 ECMS 和 A-ECMS 策略的主要原因。

6 结 论

本文以一款搭载混合动力液压机械无级变速总成的大马力拖拉机为研究对象,结合拖拉机的工况信息,提出了一种融合工况预测的 PA-ECMS 策略,并在一个犁耕工况下进行了仿真验证,得到的主要结论如下。

(1)基于 RBF 神经网络,对拖拉机的历史工况数据集进行训练学习,找到输入与输出之间的映射关系,建立了满足预测精度要求的 RBF 神经网络拖拉机工况预测模型,得到犁耕工况下预测时域为 10 s 时的均方根误差及平均绝对百分比误差,分别为 0.195 6 和 0.016 7。

(2)PA-ECMS 策略相较于仅基于 SOC 反馈的 A-ECMS 策略和传统 ECMS 策略,节油率分别为 2.45%与 6.30%。电池电量维持方面,3 种策略在工况结束时的电池 SOC 值相较于初始值,分别偏离了 0.13%、0.51%和 0.74%。

(3)所提出的 PA-ECMS 策略工况适应性较好,原因在于其等效因子通过 SOC 反馈信息和 RBF 神经网络模型预测得到的拖拉机未来工况信息,能够自适应地进行动态调整。该策略不仅提高了混合动力拖拉机燃油经济性,还在工况结束时体现了更好的电池 SOC 电量维持性能。

参考文献:

- [1] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 348-364.
- LIU Mengnan, LEI Shenghui, ZHAO Jinghui, et al. Review of development process and research status of electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (S1): 348-364.
- [2] MALIK A, KOHLI S. Electric tractors: Survey of challenges and opportunities in India [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 28, Part 4: 2318-2324.
- [3] SCOLARO E, ALBERTI L, BARATER D. Electric drives for hybrid electric agricultural tractors [C]// 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design,

Control and Diagnosis (WEMDCD). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 331-336.

- [4] MOCERA F, MARTINI V. Numerical performance investigation of a hybrid eCVT specialized agricultural tractor [J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2438.
- [5] ROSSI C, PONTARA D, FALCOMER C, et al. A hybrid-electric driveline for agricultural tractors based on an e-CVT power-split transmission [J]. Energies, 2021, 14(21): 6912.
- [6] 窦海石,张幽彤,艾强,等. 面向耦合分流动力构型的拖拉机犁耕工况控制策略 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 41-49.
- DOU Haishi, ZHANG Youtong, AI Qiang, et al. Control strategy for hybrid tractor plow conditions oriented to coupled-split dynamic configuration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23): 41-49.
- [7] MOCERA F, SOMÀ A. Analysis of a parallel hybrid electric tractor for agricultural applications [J]. Energies, 2020, 13(12): 3055.
- [8] JIA Chao, QIAO Wei, QU Liyan. Numerical methods for optimal control of hybrid electric agricultural tractors [C]//2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [9] 施德华,容香伟,汪少华,等. 基于功率比的混合动力汽车模糊自适应等效燃油消耗最小策略研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(1): 12-21.
- SHI Dehua, RONG Xiangwei, WANG Shaohua, et al. Fuzzy adaptive equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle based on power ratio [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(1): 12-21.
- [10] SAITEJA P, ASHOK B. Critical review on structural architecture, energy control strategies and development process towards optimal energy management in hybrid vehicles [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157: 112038.
- [11] TEBALDI D, ZANASI R. Modeling control and simulation of a parallel hybrid agricultural tractor [C]// 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 317-323.
- [12] 徐立友,刘恩泽,刘孟楠,等. 燃料电池/蓄电池混合动力电动拖拉机能量管理策略 [J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 80-86.
- XU Liyou, LIU Enze, LIU Mengnan, et al. Energy management strategy of fuel cell and storage battery

- hybrid electric tractor [J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 40(2): 80-86.
- [13] JIA Chao, QIAO Wei, QU Liyan. Modeling and control of hybrid electric vehicles: a case study for agricultural tractors [C]//2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [14] KONG Yan, XU Nan, LIU Qiao, et al. A data-driven energy management method for parallel PHEVs based on action dependent heuristic dynamic programming (ADHDP) model [J]. Energy, 2023, 265: 126306.
- [15] 李同辉, 谢斌, 王东青, 等. 双电机驱动电动拖拉机实时自适应能量管理策略研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 530-543.
- LI Tonghui, XIE Bin, WANG Dongqing, et al. Real-time adaptive energy management strategy for dual-motor-driven electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 530-543.
- [16] 李银平, 刘立, 靳添絮, 等. 基于动态规划的电动拖拉机动力电源能量控制策略研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 403-410.
- LI Yinping, LIU Li, JIN Tianxu, et al. Energy control strategy of electric tractor power supply based on dynamic programming [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 403-410.
- [17] 韩少剑, 张凤奇, 任延飞, 等. 基于深度学习的混合动力汽车预测能量管理 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(8): 1-9.
- HAN Shaojian, ZHANG Fengqi, REN Yanfei, et al. Predictive energy management strategies in hybrid electric vehicles using hybrid deep learning networks [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(8): 1-9.
- [18] WANG Shuhan, HUANG Xingshuai, LÓPEZ J M, et al. Fuzzy adaptive-equivalent consumption minimization strategy for a parallel hybrid electric vehicle [J]. IEEE Access, 2019, 7: 133290-133303.
- [19] REZAEI A, BURL J B, ZHOU Bin. Estimation of the ECMS equivalent factor bounds for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(6): 2198-2205.
- [20] TIAN Xiang, CAI Yingfeng, SUN Xiaodong, et al. An adaptive ECMS with driving style recognition for energy optimization of parallel hybrid electric buses [J]. Energy, 2019, 189: 116151.
- [21] 周维, 刘鸿远, 徐彪, 等. 功率分流式混合动力矿用自卸车预测性等效燃油消耗最小控制策略研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(2): 200-209.
- ZHOU Wei, LIU Hongyuan, XU Biao, et al. Predictive equivalent consumption minimization strategy for power split hybrid electric mining truck [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2): 200-209.
- [22] 江苏大学. 一种混合动力多模式切换的无级变速传动系统: CN201910041132.1 [P]. 2021-07-20.
- [23] MOCERA F. A model-based design approach for a parallel hybrid electric tractor energy management strategy using hardware in the loop technique [J]. Vehicles, 2020, 3(1): 1-19.
- [24] TRITSCHLER P J, BACHA S, RULLIÈRE E, et al. Energy management strategies for an embedded fuel cell system on agricultural vehicles [C]//The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [25] LIU Hui, LI Xunming, WANG Weida, et al. Markov velocity predictor and radial basis function neural network-based real-time energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles [J]. Energy, 2018, 152: 427-444.

(编辑 刘杨 李慧敏)