

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.066

增程式电动拖拉机控制策略与启动方法研究

王丽绵^{1,2} 王书茂¹ 宋正河¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京汽车技师学院, 北京 102606)

摘要: 电动拖拉机适宜小地块、温室大棚和丘陵山区,但其作业历程短、临时充电不方便,于是衍生了增程式电动拖拉机,即附加一个柴油机和发电机组成的增程器,及时延长拖拉机的作业时间。本文对增程式电动拖拉机的控制策略进行了研究,提出了电动机功率前向预测控制模型,从发动机启动控制策略的优化标定角度对增程器启动平顺性、启动成功率、能耗等特性进行了试验研究和分析,通过改进拖动目标转速、电动机驱动退出时刻等方法,确定了启动控制方法及最佳拖动转速(1 000 r/min),提高了启动的平顺性和成功率,降低了启动能耗。

关键词: 增程式电动拖拉机; 控制策略; 启动方法

中图分类号: S219.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0486-06

Control Strategy and Startup Method of Extended Range Electric Tractors

WANG Limian^{1,2} WANG Shumao¹ SONG Zhenghe¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Automotive Technician College, Beijing 102606, China)

Abstract: Energy conservation and emission reduction is an important task in the research field of green agricultural machinery. Tractors are the main agricultural driving forces but the emission is a major problem. In particular, there are many small and medium tractors which have a large number of emissions. Electric tractors are new research hotspots, especially suitable for small plots, greenhouses and hilly areas. One of the problems of electric tractors is that the work mileage is short and the temporary charging is inconvenient. So the extended range electric tractors are derived, that is to add a range extender made up of a diesel engine and generator to extend the tractor working time in time. The control strategy of extended range electric tractors was studied, and a forward predictive control model of the motor power was proposed. The modeling and simulation research was carried out. Through the comparison and analysis, it was found that the introduction of the forward predictive control model can improve the following of low speed, the response of acceleration and the starting characteristics of the range extender at high speed. At the same time, when the descending gradient of the motor power demand was very large, the prediction of power lag can be beneficial to the stable operation and smooth unloading of the range extender. Then from the angle of optimization and calibration of the engine startup control strategy, the test research and analysis were carried out on the startup ride comfort, the success rate and the energy consumption of the range extender, and the method of startup control and the optimum drag speed (1 000 r/min) were determined by improving the speed of the dragging target, the exit time of the motor drive and the optimization of the fuel injection, so that the ride comfort and the startup success rate were obviously improved, and the startup energy consumption was reduced.

Key words: extended range electric tractors; control strategy; startup method

收稿日期: 2018-07-11 修回日期: 2018-08-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700102)

作者简介: 王丽绵(1983—),女,博士生,北京汽车技师学院高级讲师,主要从事新能源机械控制技术研究,E-mail: wlmjt2003@126.com

通信作者: 王书茂(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备智能测控技术研究,E-mail: wangshumao@cau.edu.cn

0 引言

我国越来越提倡发展绿色农用机械，“十三五”规划明确提出了“牢固树立创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，走环境友好的农业现代化道路”^[1-5]。作为主要的农用动力，拖拉机可以在小地块、温室大棚和丘陵山区等各种作业环境中使用，但它的排放是一大问题。国家环保总局明确规定了拖拉机的强制排放指标，节能减排成为拖拉机研究领域中的重要任务^[1-5]。由于传统拖拉机的变速器结构比较复杂、传动效率比较低，油耗和排放比较高，而纯电动拖拉机作业里程短、临时充电不便^[4-8]，于是衍生出了增程式电动拖拉机。随着环境污染和石油短缺问题的严峻化，增程式电动拖拉机具备环保、传输功率损失小、调速范围宽、易实现智能化等优点，逐渐成为研究热点^[9-13]。

本文针对增程式电动拖拉机的驱动系统构型和控制策略展开研究，基于 Cruise、Matlab/Simulink 进行建模和仿真研究，同时对启动控制方法进行设计和试验，以期对增程式电动拖拉机控制系统设计开发提供依据。

1 增程式电动拖拉机系统构型

增程式电动拖拉机(图1)，是在纯电动拖拉机的基础上增加了一个由柴油机和发电机组成的辅助动力单元——增程器，当动力电池荷电状态(State of charge, SOC)高于某一值时，拖拉机处于纯电动模式，增程器不工作；当动力电池荷电状态低于某一值时，增程器开启，给驱动电动机提供动力或给动力电池充电，达到延长拖拉机作业时间和里程的目的。

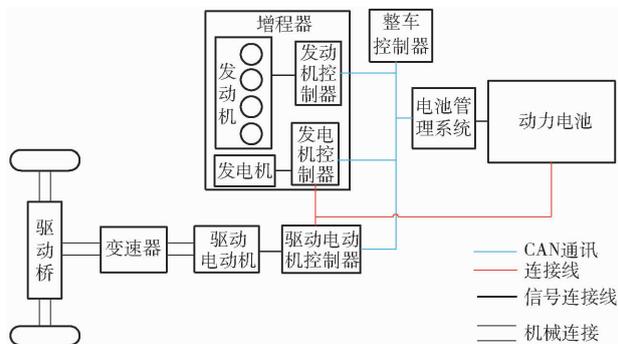


图1 增程式电动拖拉机系统构型

Fig. 1 System configuration of extended range electric tractors

2 前向预测控制策略

目前，常见比较成熟的控制策略有恒温器式能量管理策略和功率跟随式能量管理策略^[14-19]。

2.1 恒温器式能量管理策略

恒温器式能量管理策略是根据电池 SOC 确定增程器的开启和关闭，并设置发动机工作在最佳工作点范围，保障最低燃油消耗^[14-20]。工作模式如下：

(1)当电池 SOC 低于最低门限值时，增程器启动，发动机开始工作，发电机向驱动电动机提供动力或向动力电池充电。

(2)当电池 SOC 高于最低门限值而低于最高门限值时，发动机保持工作状态，增程器开启。

(3)当电池 SOC 重新回到高于最高门限值时，发动机停止工作，增程器关闭。

2.2 功率跟随式能量管理策略

功率跟随式能量管理策略是根据驱动电动机与动力电池的工作状态，调节发动机工作点，通过发电机向驱动电动机供电或给动力电池充电。工作模式如下：

(1)当电池 SOC 高于最高门限值，且动力电池足以提供拖拉机的需求功率时，发动机不工作，增程器关闭；当拖拉机的需求功率太大，动力电池无法满足时，发动机启动，开始工作，增程器开启。

(2)当电池 SOC 低于最低门限值时，发动机工作，增程器开启。

在功率跟随模式下，发动机工作时的功率输出跟随拖拉机功率需求的变化而变化，且在一个指定范围内，以保证较高的效率，有利于优化燃油消耗，同时延长动力电池的寿命^[14-20]。

2.3 电动机功率前向预测控制模型

在功率跟随模式中，电动机功率随拖拉机工况的变化而变化，很难用精确的数学模型描述，因此引入时间序列预测的方法，即基于电动机功率的历史数据，建立指数平滑模型来预测电动机功率。利用过去观测值的加权平均来预测未来的观测值，距预测值较近的观测值给以更多的权，权值按指数规律分配，权数按照已有观测数据时间序列排序，呈指数速度递减，时序指数实际是一个几何级数^[21]。

设定 t_1 时刻电动机实际功率为 P_{t_1} ， t_1 时刻平滑预测值为 S_{t_1} ，则指数平滑模型预测电动机功率为

$$S_{t_1+1} = \alpha P_{t_1} + (1 - \alpha) S_{t_1} \quad (1)$$

其中， α 为模型系数，在 0 ~ 1 之间。变动明显的序列，预测值与临近的序列数据相关性相对较小，故 α 选取较小的值，反之，选取较大的值。模型中的第 1 个平滑数据等于第 1 个实际数据，即

$$S_1 = P_1 \quad (2)$$

$$S_{t_1+1} = \alpha P_{t_1} + \alpha(1 - \alpha) P_{t_1-1} + \alpha(1 - \alpha)^2 P_{t_1-2} + \alpha(1 - \alpha)^3 P_{t_1-3} + \alpha(1 - \alpha)^4 P_{t_1-4} + \dots \quad (3)$$

在拖拉机控制过程中,预测得到的电动机功率作为功率需求的稳态分量输入给增程控制器,控制器根据反馈的功率和当前发动机工况,优化工作点。模型中, α 设定为 0.5,此时 $\alpha(1-\alpha)^4$ 为 0.031 25,此项之后的分量值更小,忽略不计,模型中时间序列取 5。

2.4 仿真研究

基于增程式电动拖拉机的系统构型和前向预测控制模型,在 Cruise 中进行了建模,并结合 Matlab/Simulink 进行了仿真研究和分析。从有、无预测模型的结果对比(图 2)中可以看出,原策略下的电动机需求功率急剧变化,造成增程器工作点的快速切换。引入电动机功率指数平滑预测模型后,电动机需求功率曲线整体更加平滑,预测值在需求功率较小的情况下,与原策略功率需求相比,跟随较快。功率需求值越大,则预测值跟随时间相对滞后。这就保证了在低速工况下,加速时的快速响应。在高速时,动力电池增大电流放电,以保证整车动力性,失去的电量则由增程器补充。同时,在电动机需求功率下降梯度很大的工况下,预测功率表现出滞后性,有利于增程发动机稳定运行和平顺卸载。

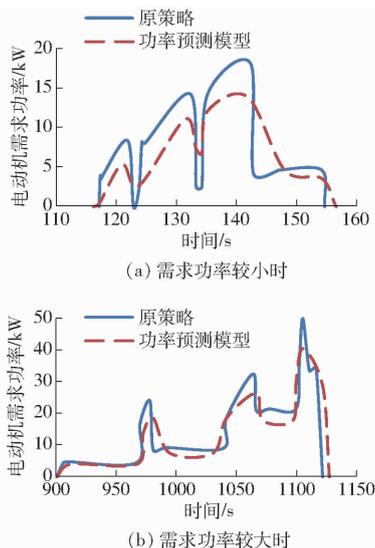


图 2 需求功率曲线

Fig. 2 Demand power curves

3 启动方法研究

3.1 启动条件

增程式发动机采用发电起动一体机(Integrated starter and generator, ISG)作为起动机,发动机的启动过程是指发动机在 ISG 电动机的驱动下由静止进入怠速或达到设定目标转速 n 的过程。发动机顺利完成启动,需要满足以下 3 个条件:

(1) 足够大的启动力矩

发动机的启动过程可分为两个阶段:①曲轴由静止被拖转到目标转速。②维持目标转速直至喷油,启动成功。要完成以上两阶段并保证发动机顺利启动,必须克服发动机活塞运动时摩擦阻力、气缸内压缩气体的反作用力、运动部件的惯性力等各种阻力矩,并且要在很短的时间内使发动机转速达到设定转速。

(2) 足够高的设定转速

为了保证发动机迅速可靠的启动,需要发动机的启动转速足够高。ISG 电动机为集中绕组式直流永磁无刷电动机,具有响应速度快,转速、扭矩可控且范围大,控制灵活的特点,满足启动需求。

(3) 恰当的驱动退出时刻和喷油时刻

发动机在达到合适转速以后,未启动成功即退出驱动,可能会造成启动失败。若启动成功后未退出驱动,又将造成能耗浪费。因此选择恰当的驱动退出时刻和喷油时刻,对于提升发动机启动性能具有重要作用。

3.2 试验

3.2.1 试验方法

基于拖动目标转速、电动机驱动退出时刻、电动机驱动能耗等几个参数,对增程器进行了优化标定试验。试验采用纯串联增程式结构,由 ISG 电动机和直列四缸发动机组成,ISG 电动机直接安装在发动机曲轴上,ISG 电动机受电动机控制器控制,发动机受发动机控制器控制,电动机控制器、发动机控制器、电池控制器与整车控制器通过 CANbus 通讯。使用 WT 3000 型功率分析仪对 ISG 驱动能耗进行测量,使用 FTF2-400/50-600BS 型电池模拟器进行动力电池模拟,使用 AVL_S11C0001 型油耗分析仪对发动机油耗进行测量。将集成好的增程器安装于实验室台架上,在室外通过上位机标定软件和标定工具对台架进行控制,同时通过采集设备对试验过程中的数据进行记录,如图 3 所示。

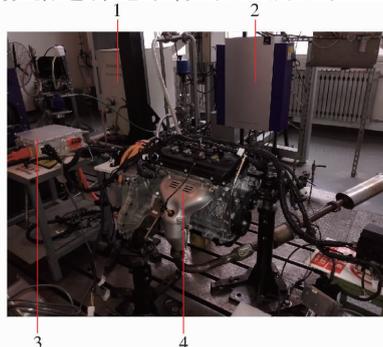


图 3 台架及采集设备

Fig. 3 Bench and acquisition equipment

1. 冷却设备 2. AVL 采集设备 3. 电动机控制器 4. 增程器

发动机启动控制逻辑见图4,在接收到发动机启动需求信号时,油泵开始泵油,同时给出拖转目标转速,ISG电动机开始驱动发动机。ISG拖转目标转速持续时间可表征驱动持续时间及退出时刻。当发动机转速达到目标转速时,发动机状态由停机变为启动中,同时允许喷油。当转速达到一定转速且保持一定时间后,发动机状态由启动变为运行,启动成功标志位,完成发动机启动。

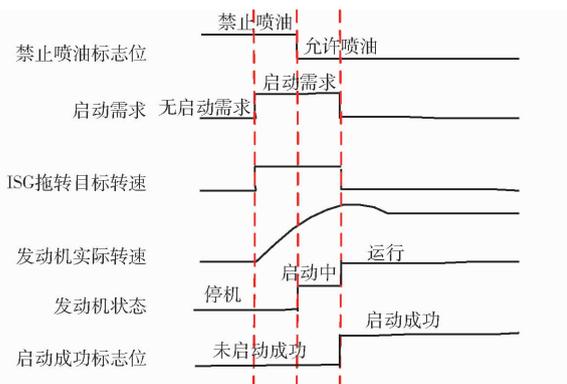


图4 发动机启动控制逻辑

Fig.4 Engine start control logic

3.2.2 启动方法对比

增程式发动机起动机为ISG电动机,ISG电动机可以被控制发出不同的转速和扭矩,从而可以对发动机的启动进行更加精确的控制。发动机一般是由起动机拖动到一定目标转速后喷油,完成启动。由于发动机压燃后运行存在不确定性,转速变化较大且容易造成冲击,因此通过改变ISG电动机驱动退出时刻来改变电动机参与驱动的时间,进而改变发动机启动工况。预设以下两种不同的启动控制模式:

模式1: ISG电动机将发动机拖动到目标转速(目标转速选取800~1400 r/min的6个转速点),然后退出工作,同时允许发动机喷油启动。

模式2: ISG电动机将发动机拖动到目标转速(目标转速选取800~1400 r/min的6个转速点),达到目标转速后允许发动机喷油启动,待发动机启动成功标志位发出后,退出工作。

研究发现模式1在将发动机拖到目标转速后ISG电动机退出驱动,按照默认喷油量喷油进行启

动,存在启动不成功的现象。转速较低时,成功率很低;加大喷油量后,成功率明显提高,由此可见模式1油耗较高。从表1中可以看出,随着拖动目标转速的提高,启动完成时间缩短;且模式1的启动时间明显比模式2的启动时间长0.4 s左右。可见模式2的启动可靠性和启动速度均优于模式1。

表1 不同模式下启动时间对比

Tab.1 Contrast of startup time in different modes

目标转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	启动时间/s	
	模式1	模式2
800	1.23	0.84
900	1.31	0.78
1000	1.12	0.68
1100	0.99	0.60
1200	0.97	0.59
1400	0.95	0.57

对两种模式启动过程中的转速波动进行研究,转速跌落对比如表2所示。从表2可看出,启动过程中模式1的转速波动可达到500 r/min,模式2的转速波动不超过100 r/min。

表2 不同模式下转速跌落对比

Tab.2 Contrast of speed drop in different modes

目标转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	跌落后转速/($r \cdot \min^{-1}$)	
	模式1	模式2
800	280.50	754.25
900	396.25	862.50
1000	474.75	976.00
1100	640.25	1065.25
1200	618.25	1200.00
1400	644.50	1307.75

从模式1转速曲线(图5a)中可看出,在0.5 s时,发动机转速达到1000 r/min,此时ISG电动机退出驱动,然后发动机转速发生了明显的跌落现象,后慢慢回升至1000 r/min,完成启动。从模式2转速曲线(图5b)中可以看出,ISG电动机在发动机完成启动后退出,发动机转速较为稳定,没有发生明显波动。由此可见模式2的启动过程转速波动明显低于模式1,与模式1相比具有较优的启动平顺性。

综合启动经济性、启动时间、启动平顺性等因

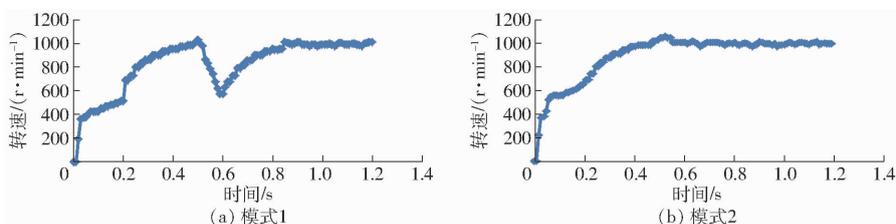


图5 启动转速波动

Fig.5 Startup speed curves

素,模式2明显优于模式1,故选用模式2作为启动控制方法。在模式2启动策略控制下,选取7个不同的目标转速,对启动时间进行统计分析,结果如图6所示。

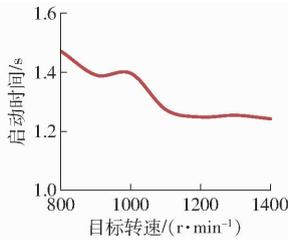


图6 模式2不同目标转速下的启动时间

Fig.6 Startup time at different speeds in mode 2

电动机的响应速度非常快,达到目标转速的时间很短,但是在发动机喷油到成功启动的过程中受到发动机当前转速的影响较为明显。从图6可以看出,随着目标转速的提高,启动成功时间变短。

3.2.3 启动能耗

在不同的转速下对启动过程中发动机能耗和ISG电动机电耗进行统计计算。计算公式^[22]为

$$E_{\text{elec}} = \int_0^t V_H I_{\text{ins}} dt \quad (4)$$

$$E_{\text{fuel}} = \int_0^t Q_{\text{fuel}} dt \quad (5)$$

式中 E_{elec} ——电动机能耗,J

I_{ins} ——电动机瞬时电流,A

V_H ——电动机电压,V

E_{fuel} ——发动机能耗,J

Q_{fuel} ——瞬时燃油流量,kg/s

整个启动过程的总能量消耗为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{elec}} + E_{\text{fuel}} \quad (6)$$

选取6个不同的目标转速进行试验,通过统计计算,得到不同目标转速下,发动机启动过程中的能量消耗,如表3所示。

表3 不同转速下的能耗统计

Tab.3 Energy consumption statistics at different rotational speeds

目标转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	ISG 电动机 能耗/J	发动机 能耗/J	总能量 消耗/J
800	4 046.15	61 790	65 836.15
900	4 106.67	61 637	65 743.67
1 000	4 362.50	61 215	65 577.50
1 100	4 709.17	61 080	65 789.17
1 200	5 018.29	60 715	65 733.29
1 400	5 729.35	60 318	66 047.35

通过对启动过程中的ISG电动机能耗、发动机能耗进行试验分析,发现随着目标转速的提高,ISG电动机驱动发动机所需的能量越来越大,而发动机启动过程中消耗的能量越来越低。对总能量消耗进行统计计算发现,随着目标转速的提高,总消耗能量先下降后升高,在目标转速为1 000 r/min时,总能量消耗最低。

4 结论

(1)研究了功率跟随控制策略,建立了电动机功率前向预测控制模型。仿真分析表明,引入前向预测控制模型后,可提高低速跟随、加速时响应和高速增程器启动特性。同时,在电动机需求功率下降梯度很大时,预测功率的滞后性可有利于增程器稳定运行和平顺卸载。

(2)ISG电动机驱动发动机启动过程中,在发动机达到目标转速后,ISG电动机继续参与驱动,可有效提高发动机启动成功率、启动平顺性,缩短启动时间,且目标转速越高启动时间越短。

(3)启动过程中ISG电动机和发动机总能量消耗随着目标转速的增大呈先降低后升高的趋势,在拖动目标转速为1 000 r/min时,总能量消耗最低。

参 考 文 献

- 1 白人朴. 关于“十三五”我国农业机械化发展的思考[J]. 中国农机化学报,2014,35(4):1-5.
BAI Renpu. Thinking on the development of agricultural mechanization during the ‘13th Five-year’ in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2014,35(4):1-5. (in Chinese)
- 2 付明亮,丁焰,尹航,等. 实际作业工况下农业拖拉机排放特性研究[J]. 农业工程学报,2013,29(6):42-48.
FU Mingliang, DING Yan, YIN Hang, et al. Characteristics of agricultural tractors emissions under real-world operating cycle [J]. Transactions of the CSAE,2013,29(6):42-48. (in Chinese)
- 3 GB 20891—2007 非道路移动机械用柴油机排气污染物排放限值及测量方法[S]. 2007.
- 4 宋永华,阳岳希,胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术,2011,35(4):1-7.
SONG Yonghua, YANG Yuexi, HU Zechun. Present status and development trend of batteries for electric vehicles[J]. Power System Technology,2011,35(4):1-7. (in Chinese)
- 5 习近平. 关于《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》的说明[J]. 新长征,2015,22(12):19-23.
- 6 徐立友,刘孟楠,周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系设计[J]. 农业工程学报,2014,30(9):11-18.
XU Liyou, LIU Mengnan, ZHOU Zhili. Design of drive system for series hybrid electric tractor [J]. Transactions of the CSAE,

- 2014,30(9):11-18. (in Chinese)
- 7 CHAN C C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicle[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4):704-718.
- 8 方树平, 周志立, 徐立友. 串联式混合动力拖拉机能量管理策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(6):62-66.
- 9 赵光耀, 陈泽宇, 杜志远, 等. 串联混合动力汽车的能量管理策略[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(4):583-587.
ZHAO Guangyao, CHEN Zeyu, DU Zhiyuan, et al. Energy management strategy for series hybrid electric vehicle [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2013, 34(4):583-587. (in Chinese)
- 10 王文伟, 程夕明, 尹义林, 等. 串联式混合动力电动客车能量管理系统的前向仿真[J]. 汽车工程, 2013, 35(2):121-126.
WANG Wenwei, CHENG Ximing, YIN Yilin, et al. Forward simulation on the energy management system for series hybrid electric bus [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(2):121-126. (in Chinese)
- 11 沈文龙, 周俊, 姬长英, 等. 中国电动拖拉机研究进展[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(10):103-107.
SHEN Wenlong, ZHOU Jun, JI Changying, et al. Research review about electric tractor in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(10):103-107. (in Chinese)
- 12 YUKO U. Study on the development of the electric tractor; specifications and traveling and tilling performance of a proto-type electric tractor[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2013, 6(4):160-164.
- 13 高辉松, 朱思洪, 吕占宝. 电动拖拉机发展及其关键技术[J]. 拖拉机与农用运输车, 2007, 34(6):4-7.
GAO Huisong, ZHU Sihong, LÜ Zhanbao. Development of electric tractor and key techniques[J]. Tractor & Farm Transporter, 2007, 34(6):4-7. (in Chinese)
- 14 张家俊. 电动拖拉机驱动系统控制策略的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
ZHANG Jiajun. Research on control strategy of electric tractor drive system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- 15 YOO I, KIM B. A study of driving simulation considering the various working modes of electric tractor[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2013, 14(11):5357-5365.
- 16 谢斌, 张超, 陈硕, 等. 双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6):8-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150602&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.002.
XIE Bin, ZHANG Chao, CHEN Shuo, et al. Transmission performance of two-wheel drive electric tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6):8-13. (in Chinese)
- 17 商高高, 张家俊. 电动拖拉机驱动控制策略开发[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6):149-153.
SHANG Gaogao, ZHANG Jiajun. Development of electric tractor powertrain control strategy[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6):149-153. (in Chinese)
- 18 刘孟楠, 徐立友, 周志立, 等. 增程式电动拖拉机及其旋耕机组仿真平台开发[J]. 中国机械工程, 2016, 27(3):413-419.
LIU Mengnan, XU Liyou, ZHOU Zhili, et al. Establishment of extended range electric tractor and its rotary cultivator's simulative platforms [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(3):413-419. (in Chinese)
- 19 徐立友, 张俊江, 刘孟楠. 增程式四轮驱动电动拖拉机转矩分配策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(3):80-85.
- 20 HOEIJIMAKES M J, FERREIRA J A. The electrical variable transmission[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2006, 42(4):1092-1100.
- 21 MEHRDAD E, YIMIN G, ALI E. Morden electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles—fundamentals, theory, and desing(second edition) [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- 22 献菁, 孙永正, 邓俊, 等. 插电式串联混合动力汽车发动机起停控制策略的优化[J]. 汽车工程, 2011, 33(2):112-117.
XIAN Jing, SUN Yongzheng, DENG Jun, et al. Optimization of control strategy for engine start-stop in a plug-in series hybrid electric vehicle [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(2):112-117. (in Chinese)