

增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型研究

汪珍珍¹ 周俊² 王旭²

(1. 浙江农林大学光机电工程学院, 杭州 311300; 2. 南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 以双电机独立电驱动增程式电动拖拉机旋耕机组为对象, 提出一种适用于旋耕作业的双输入变量后向建模方法, 即在模型中将行驶速度和动力输出轴旋耕转矩作为输入量, 设计了双电机独立驱动增程式电动拖拉机动力系统能量管理模型。针对旋耕作业特性, 提出一种基于实测数据与经验公式相结合的设计方法, 建立了旋耕工况周期模型。基于动态规划算法, 分别对其进行旋耕作业仿真试验和台架试验, 结果表明: 仿真试验结果与台架试验结果吻合度较高, 能量管理模型能够很好地描述增程式电动拖拉机在给定旋耕工况下各电机功率、发电机组功率和动力电池组荷电状态的变化情况, 且仿真试验和台架试验中燃油消耗量分别为 4 065.5 g 和 3 994.7 g, 其相对误差为 1.77%, 验证了建立的增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型的合理性和准确性。

关键词: 增程式电动拖拉机; 旋耕; 动态规划; 能量管理模型; 双电机独立驱动

中图分类号: S219.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)04-0428-11

OSID:



Research on Energy Management Model for Extended-range Electric Rotary-tilling Tractor

WANG Zhenzhen¹ ZHOU Jun² WANG Xu²

(1. College of Optical, Mechanical and Electrical Engineering, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

2. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: The demand for green power agricultural machinery and equipment in modern agricultural production environment is more and more urgent. Among them, the extended-range electric tractor has attracted much attention in the demand for medium and high horsepower, which not only makes up for the lack of battery life of pure electric tractors, but also reduces pollution emissions compared with traditional tractors. Due to the complex operating conditions of tractors (such as ploughing, rotary tillage, transportation, and harvesting, etc.), among them, rotary tillage is one of the most common agricultural operations. In order to promote the diversified development of electric tractor products, taking an extended-range electric rotary-tilling tractor with a dual-motor independent electric drive structure as the object, a novel backward modeling method of a dual-input variable, including the forward speed and the power take-off (PTO) was proposed to set up the energy management model of the powertrain system. The energy management model designed mainly contained a Genset model, motor model, power battery pack model, transmission system (reducer and differential) model, wheel-soil system model, engine accessories, and auxiliary load system models. According to the characteristics of rotary tillage operation, a design method based on the combination of measured data and empirical formulas was put forward to establish a cycle model of rotary tillage conditions, which provided an environment for simulation tests and bench tests. Based on the dynamic programming, the energy management strategy of the extended-range electric rotary-tilling tractor was designed, the rotary tillage operation simulation test and the bench test were carried out respectively. The results showed that the simulation results were in good agreement with the bench test results in the aspect of the forward speed, and the maximum average error was 2.18%, which was within the acceptable range, especially when operating at low speed below 0.6 m/s, these two

收稿日期: 2022-07-30 修回日期: 2022-09-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701003)、浙江农林大学科研发展基金项目(2022LFR071)和江苏省现代农机装备与技术示范与推广项目(NJ2021-36)

作者简介: 汪珍珍(1990—),女,讲师,博士,主要从事新能源农业车辆驱动系统控制及能量管理研究,E-mail: zzwang@zafu.edu.cn

通信作者: 周俊(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人和电动拖拉机研究,E-mail: zhoujun@njau.edu.cn

results were basically consistent. There was also a high degree of coincidence between the results of simulation and bench test in terms of the rotary tillage torque. The power values of the Genset in the bench test were larger than Genset results of the simulation, which indicated that the Genset module in the simulation underestimated the actual efficiency of the Genset of the bench. Nevertheless, the variation trend of SOC in the simulation was the same as that of the bench test results. In general, the energy management model of the extended-range electric tractor can well describe the changes in the power of each motor, the power of the Genset and the SOC of the power battery pack during a given rotary tillage condition, and the fuel consumption of the simulation test and the bench test were 4 065.5 g and 3 994.7 g, respectively, the relative error was 1.77%, which verified the rationality and accuracy of the established energy management model of the extended-range electric rotary-tilling tractor.

Key words: extended-range electric tractor; rotary tillage; dynamic programming; energy management model; dual-motor independent drive

0 引言

现代农业生产环境对绿色动力农机装备的需求越来越迫切,其中,增程式电动拖拉机在中大功率需求中备受关注,它在纯电动拖拉机基础上添加增程器,延长了作业时间,既弥补了纯电动拖拉机续航能力不足,与传统拖拉机相比又减少了污染排放^[1-2]。

近年来,国内外企业、研究机构和高校对增程式电动拖拉机研究热度渐增。2020 年,菲亚特动力科技公司与斯太尔(STEYR)公司在汉诺威国际农机展览会上,联合展示了一款新型增程式混合动力拖拉机,该拖拉机由 4 个轮毂电机独立驱动,提高了安全性、抓地性、操纵性和响应速度,并可以实现制动能量回收^[3]。MOUSAZADEH 等^[4]对太阳能插电式混合动力拖拉机动力电池选用上进行了研究,分别对铅酸蓄电池 VRLA、镍铬电池 Ni-Cd、镍氢电池 Ni-MH 和锂离子电池 Li-ion 进行了对比分析。KIM 等^[5]对增程式混合动力拖拉机驱动系统进行了研究,基于传统拖拉机道路测试获得的负载工况,分析了其动力源功率特性,设计了两级减速比,以用于典型农业作业。

鲁植雄等^[6]针对串联式混合动力拖拉机的驱动系统提出了参数匹配方法,给出了驱动系统动力性能评价指标,并进行了牵引试验测试。徐立友等^[1]以东方红 1804 型拖拉机为例,根据犁耕作业工况特性,给出了一种串联式混合动力拖拉机驱动系统设计方法,并对其牵引性能进行分析,结果表明,与传统拖拉机相比,等效燃油消耗率降低了 2.64%;之后又提出了一种基于犁耕作业的控制参数调整算法,在 AVL-Cruise 平台上进行仿真分析,并与基于发动机定点启停控制策略进行比较,结果表明,与发动机定点启停控制策略相比,油耗显著降低,动力电池耗电量明显增加^[7]。王丽绵等^[2]对增程式电动拖拉机的控制策略进行了研究,建立了电动机功率前向预测控制模型,提出了基于电动机功

率历史数据的指数平滑模型方法,提高了启动的平顺性,降低了启动能耗。

然而,在混合动力车辆研究开发过程中,能量管理策略作为核心技术之一,对提高燃油经济性有直接影响^[8-9]。目前,增程式电动拖拉机能量管理策略的研究虽处于起步阶段,但也取得了一定的成果。如 KANG 等^[10]基于规则的能量管理策略,研究了增程式电动拖拉机在运输、割草、装载和拖车等多种工况下的电池荷电状态变化情况。方树平等^[11]分别对基于恒温器式、基于功率跟随式和基于模糊控制规则的能量管理策略进行了在犁耕工况下的仿真分析,结果表明,基于模糊规则控制策略的燃油经济性比基于功率跟随式控制策略高 4.16%,比基于恒温器式控制策略高 8.10%。JIA 等^[12]分别设计了基于恒温器(TC)和基于功率跟随器控制(PFC)的能量管理策略,在犁耕和收获工况下对其进行仿真比较,结果表明,PFC 更节省燃料和减少氮氧化物(NO_x)和一氧化碳(CO)排放,但会产生更多的颗粒物(PM)。

由于拖拉机作业工况复杂繁多(如犁耕、旋耕、运输和收获等),其中,旋耕作业是最为常见的作业之一,就江苏省而言,拖拉机旋耕机组的使用率在所有耕整地机械中的比例约为 75.8%^[13]。为促进电动拖拉机产品多元化发展,本文以中功率增程式电动拖拉机旋耕机组为研究对象,建立增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型,提出一种基于实测数据与经验公式相结合的旋耕工况周期模型设计方法,基于动态规划算法,设计增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理策略,对其进行仿真试验和台架试验,验证所建立的增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型的合理性和准确性,以期电动拖拉机能量管理策略研究提供参考。

1 增程式电动拖拉机旋耕机组系统结构参数

本文以中国一拖集团有限公司东方红 ME500

型拖拉机和东方红 1GQN - 160D 型旋耕机为原型^[14-15],在此基础上,添加发电机、驱动电机系统和电池系统。增程式电动拖拉机旋耕机组动力系统结构如图 1 所示,其主要参数如表 1 所示。

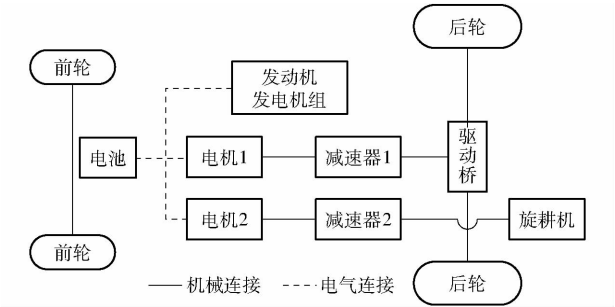


图 1 增程式电动拖拉机双电机独立驱动系统结构简图
Fig. 1 Structure diagram of dual-motor independent powertrain architecture for extended-range electric rotary-tilling tractor

表 1 动力系统主要部件基本参数

Tab. 1 Basic parameters of key components for powertrain system

名称	参数	数值/型号
柴油机	标定功率/kW	36.80
	最大转矩/(N·m)	165
发电机	额定功率/kW	30
	额定电流/A	66
	额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
	额定功率/kW	22
驱动电机	额定转矩/(N·m)	70
	最高转速/(r·min ⁻¹)	4 500
	额定容量/(A·h)	132
动力电池组	标称电压/V	318.2
	单体电压/V	2.80 ~ 4.15
传动系统	减速器 1(行驶)速比	10.7
	减速器 2(PTO)速比	13
	驱动桥速比	12
	质量/kg	1 765
拖拉机	前轮胎型号	5.5 - 16
	后轮胎型号	9.5 - 24
	质量/kg	315
	配套功率/kW	29.41 ~ 44.12
旋耕机	耕幅/cm	160
	耕深/cm	12 ~ 16
	刀轴转速/(r·min ⁻¹)	230
	刀轴回转半径/mm	225

2 动力系统主要部件模型建立

2.1 双输入变量后向建模方法

目前用于估计电动车辆的燃油和电能消耗的仿真方法主要有 3 种:前向建模、后向建模以及前/后向相结合的建模方法^[16-17]。农用车辆的普遍特点是作业行驶速度低,作业工况复杂且负载多变,且实

际负载决定了电机需求功率,因此,电动拖拉机更多的是选择后向建模方法^[7, 12, 18-19]。然而,在旋耕作业时,旋耕刀片组产生的耕作阻力水平分力 F_H 作为外力通过三点悬挂机构又反作用于电动拖拉机,并推动拖拉机向前行驶^[20]。因此,提出了行驶速度和旋耕扭矩双输入变量后向建模法,如图 2 所示。在此建模中,每个组件都由一个块表示,每个块都包含静态或单自由度的集总参数模型。下面将对其动力系统主要部件逐一建模。

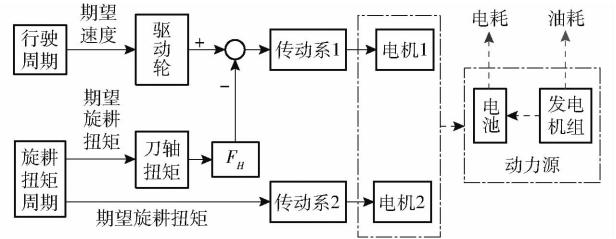


图 2 增程式电动拖拉机旋耕机组后向模型示意图
Fig. 2 Schematic of backward simulator for extended-range electric rotary-tilling tractor

2.2 发电机组模型

发电机组模型中主要包括发动机和发电机,在增程式混合动力系统中,通常将发动机与发电机看成一个整体,即发电机组。由于发动机不与拖拉机传动系机械连接,因此,发电机组可以在发动机最佳工作线(OOL)上以其最大效率运行,再加上发电机效率,即为发电机组模型^[21]。

在能量管理策略研究中,发动机一般采用准静态模型^[22],发动机整体效率为输出(机械)功率与输入功率(燃料的化学功率)的比值。其中,燃料化学功率可以表示为燃料质量流量率和燃料低热值的函数,即

$$\eta_{ice} = \frac{P_{ice_mech}}{P_{fuel}} = \frac{T_{ice}\omega_{ice}}{Q_{lhv}\dot{m}_f} \times 100\% \tag{1}$$

式中 η_{ice} ——发动机效率,%
 P_{ice_mech} ——发动机机械输出功率,W
 T_{ice} ——发动机转矩,N·m
 ω_{ice} ——发动机角速度,rad/s
 P_{fuel} ——燃料化学功率,W
 $\dot{m}_f$ ——燃料质量流量率,kg/s
 Q_{lhv} ——柴油机燃料低热值,kJ/kg

图 3 为发电机组等效率曲线和最佳工作曲线,其中,OOL 曲线是一组可为任何给定的功率输出提供最大效率的转矩和转速的组合。从图 3 可以看出,该发电机组燃油消耗率最佳转速范围为 1 600 ~ 1 800 r/min。

2.3 驱动电机模型

本文采用基于试验数据的查表建模法,即通过

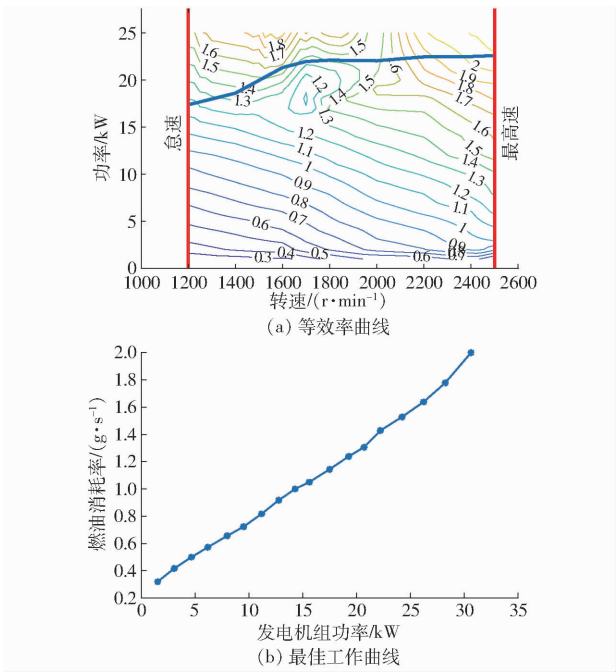


图 3 发电机组等效率曲线和最佳工作曲线
Fig. 3 Iso-efficiency and optimal operation line of Genset

台架试验测得电机特性数据,得出转矩-效率图,所需的电功率或转矩可以用作控制输入。若研究的电机技术参数与实测的不相同,在电机同一类型且制造材料相同的前提下,可以采用 Willans line 模型方法进行缩放得到符合需求的电机参数^[23]。则根据转矩需求计算出电功率表达式为

$$\begin{aligned} P_{elec} = & \begin{cases} \frac{P_{mech}}{\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})} = \frac{\omega_{em} T_{em}}{\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})} & (P_{elec} \leq 0) \\ \eta_{em}(\omega_{em}, T_{em}) P_{mech} = \eta_{em}(\omega_{em}, T_{em}) \omega_{em} T_{em} & (P_{elec} > 0) \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

式中 P_{elec} ——电机电功率, W, 其中 $P_{elec} \leq 0$ 表示用电状态, $P_{elec} > 0$ 表示发电状态

P_{mech} ——电机机械输出功率, W
 $\eta_{em}(\omega_{em}, T_{em})$ ——转速和转矩(表示为最大扭矩的百分比)有关函数的效率

图 4(图中效率单位为%)为额定功率 22 kW 的永磁同步电机的效率图。从图 4 可以看出,驱动电机在转速范围 2 500 ~ 4 000 r/min 内其效率可达 93% 以上。

2.4 动力电池组模型

通常,电动车辆仿真模型中电池模型的目的是在给定负载的情况下来预测荷电状态的变化。但对于车辆能量管理问题来说,重点在于电池功率与动力总成其余部分交换功率的相互关系,因此,电池的简单电路模型就足够了。目前,用于能量管理建模

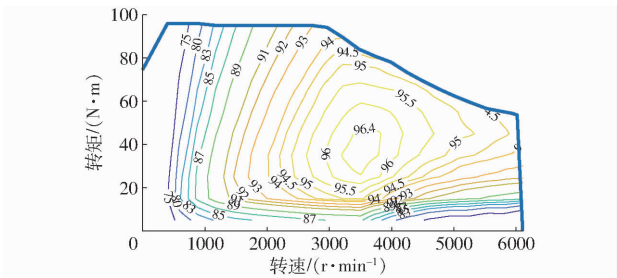


图 4 电机效率
Fig. 4 Efficiency of electric machine

中的单体电池电路模型主要有 0 阶等效电路模型和 1 阶等效电路模型^[24]。本文忽略电池热效应与瞬态响应的影响,选择 0 阶等效电路模型,电池荷电状态 SOC 动态方程为

$$\dot{SOC} = -\frac{\eta_{batt}^{sign(I)}}{Q_{batt}} \left[\frac{V_{oc}}{2R_0} - \sqrt{\left(\frac{V_{oc}}{2R_0}\right)^2 - \frac{P_{batt}}{R_0}} \right] \quad (3)$$

式中 Q_{batt} ——电池标称容量, A·h
 P_{batt} ——动力电池组功率, W
 V_{oc} ——电池开路电压, V
 R_0 ——电池内阻, Ω
 $\eta_{batt}^{sign(I)}$ ——电池充放电效率, $\text{sign}(I > 0) = 1$ 为电池放电效率, $\text{sign}(I < 0) = -1$ 为电池充电效率
 I ——电池电流, A

图 5 为额定容量 132 A·h 的动力电池组开路电压 V_{oc} -SOC 曲线。从图 5 可以看出,动力电池组在约 300 V 急剧下降,为延长电池组寿命, SOC 阈值设置应大于 30%。

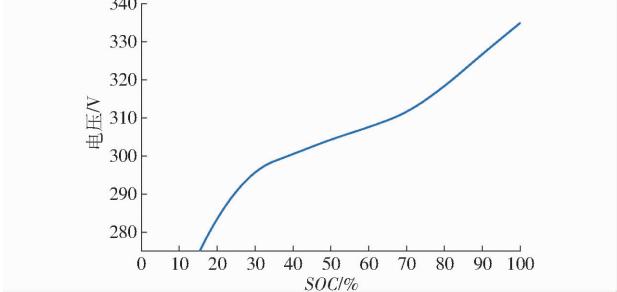


图 5 动力电池组开路电压 V_{oc} - SOC 曲线
Fig. 5 Open circuit voltage vs state of charge for battery pack

2.5 传动系模型

拖拉机的传动系主要包括变速器、减速器和差速器,属于齿轮传动机构。拖拉机为满足不同作业速度,其变速器挡位数远多于城市车辆,但当作业工况确定时,拖拉机不像城市车辆一样需要频繁换挡,其作业速度变化不是很大。因此,本文将传动系模型简化为固定传动比的有损齿轮模型,即

$$\omega_{out} = g_i \omega_{in} \quad (4)$$

$$T_{out} = \eta_g \frac{T_{in}}{g_i} \quad (5)$$

式中 ω_{in} ——主动齿轮输入角速度,rad/s
 ω_{out} ——从动齿轮输出角速度,rad/s
 T_{in} ——主动齿轮输入转矩,N·m
 T_{out} ——从动齿轮输出转矩,N·m
 g_i ——齿轮传动比,其中 i 表示挡位序号
 η_g ——齿轮传动效率,%

2.6 轮胎-土壤模型

车轮代表动力总成和外部环境之间的联系,拖拉机在田间行驶作业时,车轮的每一次转动中,轮胎的橡胶化合物在与土壤接触时就会变形,当橡胶变形时,它会变热并导致能量损失。因此,有必要将土壤特性参数考虑到轮胎模型中,提出了一种适用于拖拉机能量管理模型的轮胎-土壤半静态模型,用于在给定动力总成转矩、制动信号和车轮垂直负载的情况下可以计算轮胎和路面接触面处的牵引力。

2.6.1 牵引力/制动力

基于动力学分析可知,作用在驱动轮上的转矩大小和方向会随旋耕阻力水平分力而变化,从而使驱动轮上的牵引力变成“制动力”。然而,这里的制动力是指由机械制动器产生的,在建模时以附加转矩的形式表示,该附加转矩由最大可用制动转矩计算,与制动输入信号成正比。因此,作用在车轮上的净牵引力(净制动力) $F_{t/b}$ 为

$$F_{t/b} = \frac{T_t - T_{brake}}{r_2} \tag{6}$$

式中 T_{brake} ——制动器转矩,N·m
 r_2 ——后轮驱动半径,m
 T_t ——驱动轮转矩,N·m

需要说明的是,由于拖拉机行驶作业速度小,不考虑因刹车产生的再生制动问题。

2.6.2 垂直地面载荷

对于能量管理问题来说,可以适当简化模型,即不考虑轮胎滚动阻力作用点的偏移,并忽略旋耕机所产生的载荷转移。则作用在前、后轮上的垂直地面载荷分别为

$$F_{z1} = \frac{G_T l_2}{l_1 + l_2} \tag{7}$$

$$F_{z2} = \frac{G_T l_1}{l_1 + l_2} \tag{8}$$

式中 F_{z1} ——前轮的垂直地面载荷,N
 F_{z2} ——驱动轮的垂直地面载荷,N
 G_T ——拖拉机重力,N
 l_1 ——拖拉机重心到前轮中心点的水平距离,m

l_2 ——拖拉机重心到驱动轮中心点的水平距离,m

2.6.3 滚动阻力

关于拖拉机轮胎滚动阻力的研究有很多,大部分研究都与稳态特性有关^[25-26]。一般来说,与农用轮胎滚动阻力有关的最重要的3个参数是轮胎参数(半径、宽度和轮胎充气压力)、土壤参数(土壤覆盖度、土壤强度、土壤含水率)和轮胎载荷^[27]。在轮胎标准胎压下,拖拉机前、后轮滚动阻力 F_{f1} 、 F_{f2} 分别为^[28]

$$F_{f1} = \frac{1.2 F_{z1}^2}{CI b_1 d_1} + 0.04 F_{z1} \tag{9}$$

$$F_{f2} = \frac{1.2 F_{z2}^2}{CI b_2 d_2} + 0.04 F_{z2} \tag{10}$$

式中 CI ——土壤圆锥指数,kPa,通过试验获取
 b_1 ——前轮胎宽度,m
 b_2 ——后轮胎宽度,m
 d_1 ——前轮胎直径,m
 d_2 ——后轮胎直径,m

3 基于动态规划算法的能量管理策略

增程式电动拖拉机能量管理本质在于如何对发电机组和动力电池组之间的功率进行合理分配,以实现成本函数(如燃油消耗、排放污染、发动机启停频率等)在约束条件(动态约束、局部约束和全局约束)下最小化。因此,可以将功率分配问题看成是时间步长内的多阶段决策问题,而动态规划是一种解决多阶段决策问题的数值方法^[29],能够为任何复杂程度的问题(在计算能力范围内)提供最佳解决方案。它不是考虑连续解,而是选择和评估离散解,其选择序列代表了发电机组和动力电池组在时间步长内的功率分配,成本函数对应于燃油消耗、电能消耗、排放或任何其他函数。首先,创建可能的功率分配网格或候选解决方案,并将成本与每个候选解决方案相关联。其次,向后进行(即从优化周期结束起),计算每个网格点的最佳运行成本,并存储在成本矩阵中。最后,检查整个周期,总成本最低的路径代表最佳解决方案。

3.1 动态规划问题描述

对于增程式电动拖拉机来说,所有动力总成执行器(发电机组、电机)的响应比电池组荷电状态的瞬变快得多。因此,主要的状态变量是动力电池组 SOC,则增程式电动拖拉机离散时间系统可以描述为

$$SOC_{k+1} = SOC_k - t_s \eta_{batt}^{sign(I)} (SOC_k, P_{batt,k}) \frac{P_{batt,k}}{E_{batt}} \tag{11}$$

($k = 1, 2, \dots, N - 1$)

式中 t_s ——采样时间, s

N ——优化区间的长度(以样本数表示)

下标 k 表示变量在第 k 个时间步长的变量值:

$SOC_k = SOC(t_k)$, $P_{batt,k} = P_{batt}(t_k)$ 。

另外,除了电池 SOC 外,还将发电机组是否处于工作状态作为状态变量之一。

本文选择发电机组运行功率 P_{gen} 作为控制变量,除此之外,还将发电机组启/停控制纳入其中,并将发电机组启/停事件作为成本罚函数添加到目标函数中,以降低发电机组启/停次数,从而减少燃料消耗,则目标函数为

$$\min_u J = \min_u \left(\int_{t_0}^{t_f} (\dot{m}_f(SOC, u) dt + \Phi |\Delta u_{gen}| dt) \right) \quad (12)$$

式中 u ——控制变量输入向量

t_0 ——开始时间, s

t_f ——结束时间, s

Δu_{gen} ——发电机组启停次数

Φ ——与发电机组启停事件相关的成本罚函数

为确保发电机组、电机、电池工作在安全区域内,优化过程中需要对其施加约束条件

$$\begin{cases} SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \\ P_{batt, lower}(t) < P_{batt}(t) < P_{batt, upper}(t) \\ P_{gen, min}(t) < P_{gen}(t) < P_{gen, max}(t) \\ T_{x, min}(t) < T_x(t) < T_{x, max}(t) \\ \omega_{x, min}(t) < \omega_x(t) < \omega_{x, max}(t) \end{cases} \quad (13)$$

其中 $P_{batt, lower}(t) = \max(P_{req} - P_{gen, max}, P_{batt, min}(t))$

$P_{batt, upper}(t) = \max(P_{req} - P_{gen, min}, P_{batt, max}(t))$

式中, $T_x(t)$ 表示发动机、发电机和两个驱动电机的转矩,对应的 $T_{x, min}(t)$ 、 $T_{x, max}(t)$ 分别表示发动机、发电机和两个驱动电机的最小转矩和最大转矩; $\omega_x(t)$ 表示发动机、发电机和两个驱动电机的角速度,对应的 $\omega_{x, min}(t)$ 、 $\omega_{x, max}(t)$ 分别表示发动机、发电机和两个驱动电机的最小角速度和最大角速度。

3.2 仿真分析

3.2.1 仿真循环工况

针对电动拖拉机作业工况循环问题,有学者参照汽车驾驶周期设计了行驶作业循环来研究犁耕作业和运输作业^[7,11],也有直接通过试验获取的实际数据作为行驶作业周期^[10,30]。然而,旋耕作业的驱动特性与犁耕和运输等作业有极大区别,犁耕和运输作业周期很难适用于旋耕工况。本文提出一种基于经验公式和实测试验数据相结合的方法设计旋耕工况周期,为电动拖拉机旋耕机组能量管理优化提供循环工况。

田间实测数据由课题组制造的一款双电机独立驱动的小型履带式纯电动拖拉机旋耕机组样机进行旋耕试验获取^[31],该样机作业幅宽为 80 cm,不符合东方红 1GQN-160D 型旋耕机的作业参数要求,为此需要对实测数据进行相应的处理。然而,影响旋耕功耗的因素较多,虽然也有文献对其进行了理论公式推导^[32-33],但对于旋耕循环工况的设计来说,理论公式过于复杂。本文采用经验公式进行计算处理^[34],其表达式为

$$P_{rt} = K_A B h v \quad (14)$$

式中 P_{rt} ——旋耕机功率, W

K_A ——土壤比阻, N/cm²

B ——旋耕作业幅宽, m

h ——旋耕作业耕深, m

v ——旋耕作业行走速度, m/s

在土壤条件一定且旋耕刀排列布置已确定的情况下,当拖拉机旋耕机组保持稳定的耕作状态,旋耕阻力随着旋耕刀轴的旋转以几乎恒定的方式波动,即旋耕转矩会以恒定模式周期性波动^[35-36]。假设同一片田区域在同一深度其土壤特性相同,即,在同一片区域内切土节距不变的情况下,土壤比阻恒定,则可由式(14)进一步对实测旋耕工况处理以获取旋耕机不同速度和作业幅宽下的旋耕负载。

以葱苗栽植作业要求为例^[37],旋耕深度为 5 cm,试验田长 60 m,宽 11 m,单个作业工况从田间行头到行尾一个来回包括旋耕机入土、加速作业、匀速作业、减速作业、掉头作业、加速作业、匀速作业、减速作业以及旋耕机出土 9 个阶段,如图 6 所示。其中,平均匀速约为 0.83 m/s。连续作业过程中还包括转场作业,转场行驶速度约为 0.42 m/s,转场时 PTO 不工作^[38]。根据旋耕循环工况可得,电动拖拉机旋耕机组行驶功率需求最大值为 4.40 kW,PTO 功率需求最

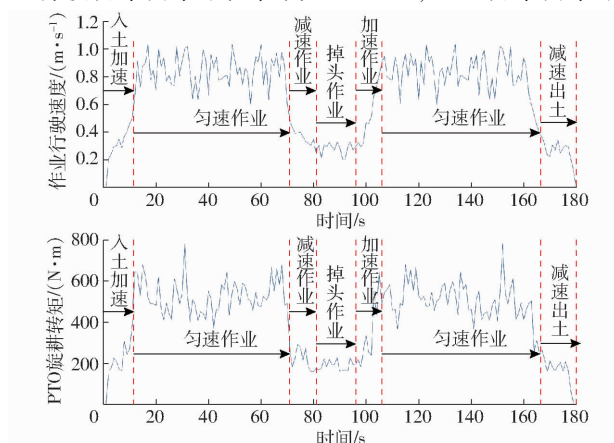


图6 旋耕作业单个循环工况

Fig.6 Single cycle condition of rotary tillage operation

大值为 17.92 kW,总功率需求最大值为 22.05 kW。

3.2.2 结果分析

考虑动态规划算法计算时间和计算精度,设置离散精度 ΔSOC 为 0.08%^[16-17]。 SOC 的门限值设定如下: $SOC_{lb}=40\%$, $SOC_{ub}=99.5\%$, $SOC_{lo}=40\%$, $SOC_{hi}=41\%$,另外,电池 SOC 的初始值设置为 80%^[39-41],仿真时长约为 3 h。整个循环工况仿真结果如图 7 所示。

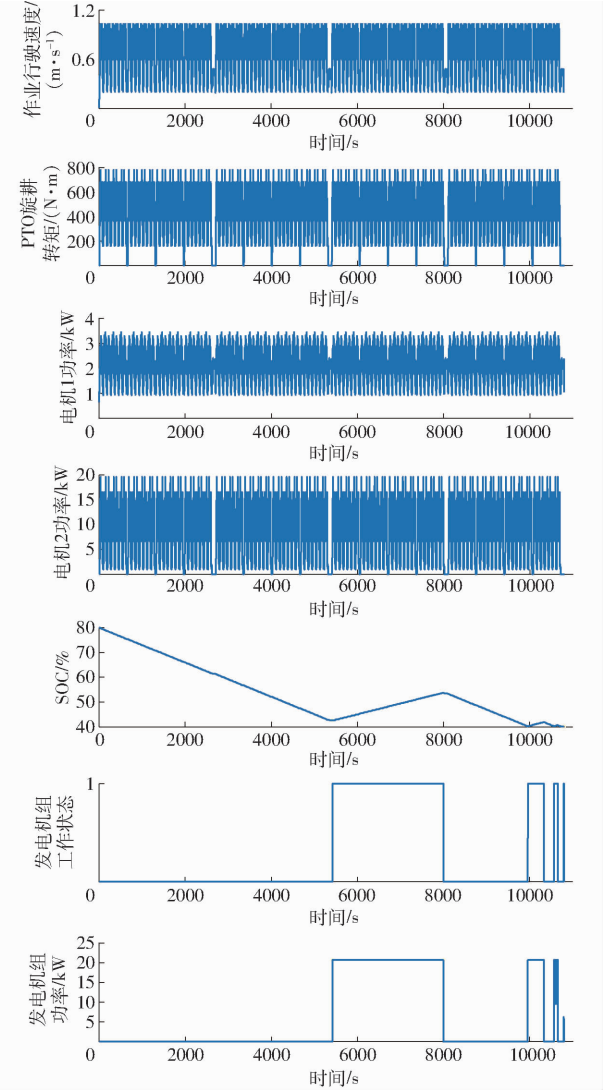


图 7 增程式电动拖拉机旋耕机组整个循环工况仿真结果

Fig.7 Simulation results of whole cycle condition for extended-range electric rotary-tilling tractor

从图 7 可以看出,增程式电动拖拉机旋耕机组开始是以纯电模式运行,大约在 5 415 s, SOC 下降到约为 42.56% 时发电机组开启,并以功率约 20.68 kW 进行工作,大约运行 2 578 s 后,发电机组关闭,又以纯电模式运行,如此反复,整个循环工况中发电机组启停 4 次,结束后 SOC 最终值约为 40.06%,在(40%,41%)范围内。

为了更加清晰地分析行驶速度、PTO 旋耕转矩、电机 1 功率、电机 2 功率以及电池 SOC 的变化规

律,选取了其中部分仿真结果并将其放大,如图 8 所示,其中,红色点划线框为试验田间小转场作业,红色虚线框为试验田大转场作业。从电机 1 功率曲线可知,电机 1 一直处于用电状态,其最大功率为 3.44 kW,小于行驶功率需求最大值(4.40 kW)。这表明,在旋耕作业过程中,尽管两电机在传动系上是相互独立驱动的,但电机 2 旋耕作业时产生的旋耕阻力水平分力仍会通过三点悬挂机构反作用于拖拉机机身,推动电动拖拉机向前作业,从而使得电机 1 的需求功率减小。从电机 2 功率曲线可知,电机 2 的最大功率为 19.63 kW,电机 2 功率变化趋势与 PTO 旋耕工况周期相似,且在无 PTO 旋耕转矩时,电机 2 功率为 0,这表明电机 2 负责 PTO 旋耕作业。结合行驶速度曲线、PTO 旋耕转矩曲线以及电池 SOC 曲线可以看出,在转场作业时,电池 SOC 下降速度变缓,电机 2 不工作,其动力均来自于电机 1。这进一步说明,电机 1 负责驱动行驶作业,电机 2 负责 PTO 旋耕作业,验证了仿真模型建立的合理性。

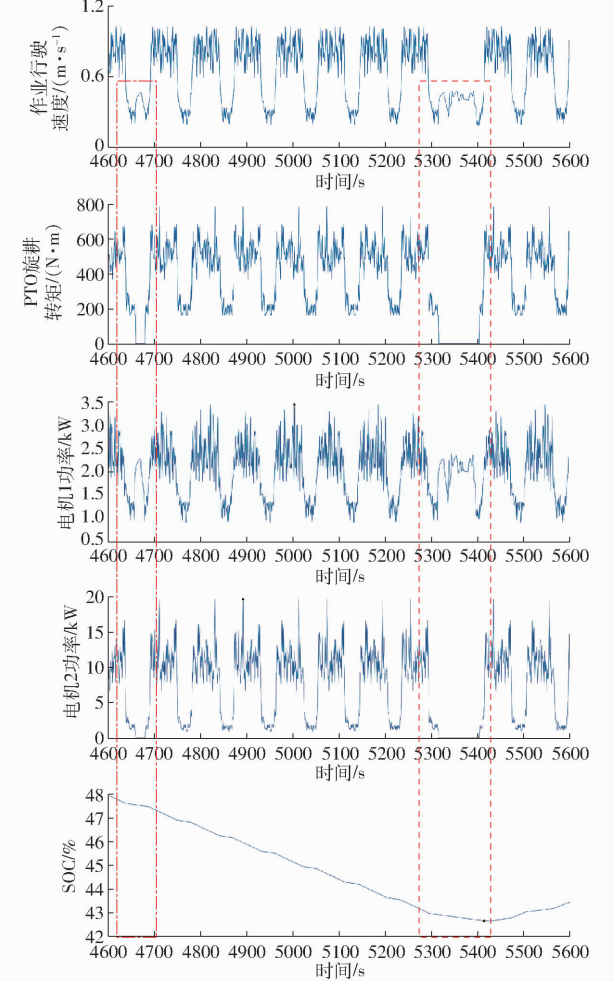


图 8 增程式电动拖拉机旋耕机组部分局部放大仿真结果
Fig.8 Partial amplification simulation results of whole cycle condition for extended-range electric rotary-tilling tractor

4 台架验证试验

4.1 试验设计

为了验证能量管理模型的合理性和准确性,以及基于动态规划的能量管理策略能否满足真实动力总成的驱动需求和达到预期效果,基于课题组搭建的快速原型试验平台^[42-43],进行耕深 5 cm 的旋耕作业台架试验,采集试验数据进一步处理,并与仿真试验结果进行比较分析。由于该试验平台是基于 dSPACE 和 Simulink 联合搭建的,试验平台各部件是实物设备,且为非标准件,采样频率过高会影响各设备间的协调运转,甚至会导致数据丢失。为使测控系统正常运行,其采样频率设为 20 Hz。尽管如此,对于仿真时长为 3 h 来说,采集的数据量也非常庞大,其测量系统很难完全获取数据。鉴于仿真过程中前半程 1.5 h 为纯电动模式,后半程 1.5 h 为混动模式,因此,台架试验可以选取仿真后半程的作业工况,且台架试验动力电池组的 SOC 初始值为仿真运行 1.5 h 时刻的 SOC 值,从而实现在满足试验验证需求的同时又能减少数据采集量的目的。

4.2 结果分析

对获取的台架试验数据进行处理,并与仿真结果进行比较,如图 9 所示,图中时间 0~900 s 为台架试验最后时间段 900 s,与之对应的仿真时间为 9 900~10 800 s。

从图 9a 可以看出,仿真试验速度与台架试验的行驶速度相差不大,其平均相对误差为 2.18%,在可接受范围内,尤其在低速作业 0.60 m/s 以下时,两者基本吻合。与行驶速度变化相对应的是电机 1 功率变化,如图 9c 所示,仿真试验中电机 1 需求功率与台架试验结果基本一致,表明仿真中行驶作业模块可以准确地描述实际行驶作业工况。

然而,仿真试验与台架试验在 PTO 旋耕转矩结果对比上的吻合度差一些,尤其是在 PTO 旋耕负载大扭矩范围内急速增大后又急速减小或急速减小后又急速增大时最为明显,这是因为实际电机被拖动作业需要一个响应过程。尽管如此,仍可以从图 9b 看出,仿真试验中 PTO 旋耕转矩与台架试验结果有较高的重合度。同样地,与 PTO 旋耕转矩相对应的是电机 2 功率变化,如图 9d 所示,亦可以看出,仿真试验中电机 2 需求功率与台架试验结果有较高的重合度,这表明仿真中旋耕机作业模块可以较为真实地模拟实际旋耕作业时动力输出轴的工作状态。

PTO 旋耕转矩和电机 2 需求功率在仿真试验和台架试验过程中出现较大误差主要原因是:在仿真模型中,驱动电机和负载电机采用的是静态模型,并

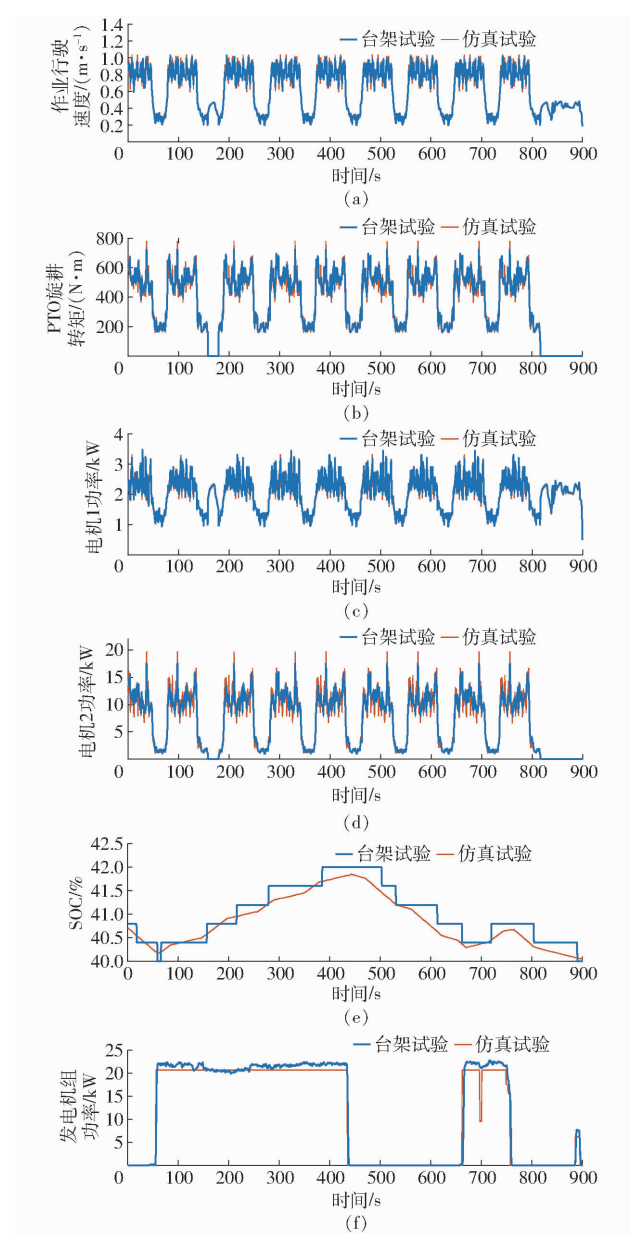


图 9 双电机独立驱动系统试验与仿真比较结果
Fig.9 Comparison results of test and simulation for dual-motor independent powertrain

假定电机可以立即对命令做出反应,且未考虑其惯性以及响应时间等特性,因此,台架试验中 PTO 旋耕转矩和电机 2 功率很难达到仿真试验中的波峰和波谷值。

从图 9e 可以看出,发电机组工作时,仿真试验中的 SOC 状态变化与台架试验中的 SOC 变化趋势基本一致,说明仿真模型较为准确地描述了动力电池组 SOC 的变化。由图 9f 可以看出,台架试验中发电机组功率比仿真结果大一些,且为波浪式变化,这表明仿真中发电机组模块低估了台架发电机组的实际效率。另外,实际发电机组不会像仿真模型中以恒定值工作,虽然仿真中建立的发电机组静态模型简化了,但不影响能量管理策略的研究。结合图 9e 分析可知,台架试验中的 SOC 由于采集系统的精度

原因使其呈现阶梯式变化,但其值普遍大于仿真值,进一步验证了实际台架试验中发电机组的发电效率高于仿真模型中的效率。

综合对比仿真和台架试验结果,总体而言,仿真曲线与台架试验曲线吻合度较高,仿真模型能够很好地描述增程式电动拖拉机在给定旋耕工况过程中各电机功率、发电机组功率和动力电池组 SOC 的变化。在整个后半行程中,仿真试验和台架试验中燃油消耗量分别为 4 065.5 g 和 3 994.7 g,其相对误差为 1.77%,进一步验证了建立的增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型的合理性和准确性以及基于动态规划能量管理策略的可行性。

5 结论

(1)提出了一种适用于旋耕作业的双输入变量后向建模方法,建立了动力系统能量管理模型,该模型能够很好地描述增程式电动拖拉机在给定旋耕工况过程中各电机功率、发电机组功率和动力电池组 SOC 的变化。

(2)仿真试验中行驶速度与台架试验结果的平均相对误差为 2.18%,在可接受范围内,与行驶速度变化相对应的仿真电机 1 需求功率与台架试验结果基本一致,表明仿真中行驶作业模块可以准确地描述实际行驶作业工况,然而 PTO 旋耕转矩结果对比上吻合度差一些,但仿真中电机 2 需求功率与台架试验结果仍有较高的重合度,这表明仿真中旋耕机作业模块可以较为真实地模拟实际旋耕作业时动力输出轴的工作状态。

(3)仿真试验中 SOC 状态变化与台架试验中的 SOC 变化趋势基本一致,这表明仿真模型较为准确地描述动力电池组 SOC 的变化。而台架试验中的 SOC 值普遍大于仿真值,且台架试验中发电机组功率比仿真结果大一些,这表明仿真中发电机组模块低估了实际发电机组的效率。

(4)在混合动力模式下,仿真试验和台架试验中燃油消耗量分别为 4 065.5 g 和 3 994.7 g,其相对误差为 1.77%,进一步验证了建立的增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型的合理性和准确性。

参 考 文 献

- [1] 徐立友,刘孟楠,周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计[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)
- [2] 王丽绵,王书茂,宋正河. 增程式电动拖拉机控制策略与启动方法研究[J]. 农业机械学报, 2018,49(增刊):493-498.
WANG Limian, WANG Shumao, SONG Zhenghe. Control strategy and startup method of extended range electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):493-498. (in Chinese)
- [3] 中国工程机械商贸网. 菲亚特动力科技. 全球首发: FPT 与斯太尔共同打造新型混合动力拖拉机概念[EB/OL]. (2020-01-08) <http://news.21sun.com/detail/2020/01/2020010808483770.html>.
- [4] MOUSAZADEH H, KEYHANI A, JAVADI A, et al. Evaluation of alternative battery technologies for a solar assist plug-in hybrid electric tractor[J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2010,15(8):507-512.
- [5] KIM J Y, PARK Y I. Analysis of agricultural working load experiments for reduction gear ratio design of an electric tractor powertrain[J]. Transactions of KSAE, 2012,20(5):138-144.
- [6] 鲁植雄,侯辛奋,邓晓亭. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计匹配与牵引试验[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(5):928-935.
LU Zhixiong, HOU Xinfen, DENG Xiaoting. Matching design and traction tests for driving system of series hybrid electric tractor[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, 40(5): 928-935. (in Chinese)
- [7] XU L, ZHANG J, LIU M, et al. Control algorithm and energy management strategy for extended range electric tractors[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2017,10(5):35-44.
- [8] HU X, MURGOVSKI N, JOHANNESSON L, et al. Energy efficiency analysis of a series plug-in hybrid electric bus with different energy management strategies and battery sizes[J]. Applied Energy, 2013,111(10):1001-1009.
- [9] SABRI M F M, DANAPALASINGAM K A, RAHMAT M F. A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,53(1):1433-1442.
- [10] KANG H, JUNG D, KIM M, et al. Study of energy management strategy considering various working modes of plug-in hybrid electric tractor[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2013,37(2):181-186.
- [11] 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): 61-67.
FANG Shuping, ZHOU Zhili, XU Liyou. Energy management strategy for series hybrid tractor[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2015,36(6):61-67. (in Chinese)
- [12] JIA C, QIAO W, QU L. Modeling and control of hybrid electric vehicles: a case study for agricultural tractors[C]//2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). IEEE, 2018:1-6.

- [13] 中国机械工业年鉴编辑委员会. 中国农业机械工业年鉴[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- [14] 中国一拖集团有限公司. 旋耕机:东方红 1GQN-160D[EB/OL]. http://www.yituo.com.cn/cpzx/jjcp/xgj/201706/t20170620_156696.html.
- [15] 中国一拖集团有限公司. 拖拉机:东方红-ME600[EB/OL]. http://www.yituo.com.cn/cpzx/nyjx/lstljxl/201802/t20180205_182637.html.
- [16] 申彩英. 串联混合动力汽车能量优化管理策略研究[D]. 天津:天津大学,2010.
SHEN Caiying. Study on energy optimal management for series hybrid electric vehicles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [17] 雷贞贞. 融合交通信息与自适应控制的插电式混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
LEI Zhenzhen. Research on energy management strategies for plug-in hybrid electric vehicles with incorporation of traffic information and adaptive control[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [18] LEE H S, KIM J S, PARK Y I, et al. Rule-based power distribution in the power train of a parallel hybrid tractor for fuel savings[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2016,3(3):231-237.
- [19] LI H, SONG Z H, XIE B. Plowing performance simulation and analysis for hybrid electric tractor[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,365-366:505-511.
- [20] 刘崢. 旋耕机—拖拉机机组牵引特性及其参数选择[J]. 农业机械学报,1965,8(1):50-61.
- [21] ANIL V S, ZHAO T, ZHAO M, et al. Powertrain design optimization for a range-extended electric pickup and delivery truck[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2020,13(3):189-203.
- [22] 杨业,张幽彤,张彪,等. 基于等效因子优化的插电式混合动力客车自适应能量管理策略[J]. 汽车工程,2020,42(3):292-298,306.
YANG Ye, ZHANG Youtong, ZHANG Biao, et al. Adaptive energy management strategy for plug-in hybrid electric bus based on equivalent factor optimization[J]. Automotive Engineering, 2020,42(3):292-298,306. (in Chinese)
- [23] RIZZONI G, GUZZELLA L, BAUMANN B M. Unified modeling of hybrid electric vehicle drivetrains[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999,4(3):246-257.
- [24] ONORI S, SERRAO L, RIZZONI G. Hybrid electric vehicles: energy management strategies[M]. London: Springer, 2016.
- [25] GHARIBKHANI M, MARDANI A, VESALI F. Determination of wheel-soil rolling resistance of agricultural tire[J]. Australian Journal of Agricultural Engineering, 2012,3(1):6-11.
- [26] CROSSLEY C P, KIBIWOT V N, REYNOLDS A J, et al. SW—soil and water: rut formation and rolling resistance on earth roads[J]. Journal of Agricultural and Engineering Research, 2001,78(1):99-107.
- [27] SCHREIBER M, KUTZBACH H D. Comparison of different zero-slip definitions and a proposal to standardize tire traction performance[J]. Journal of Terramechanics, 2007,44(1):75-79.
- [28] WISMER R D, LUTH H J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 1974,10(2):49-61.
- [29] BERSTEKAS D P. Dynamic programming and optimal control[M]. 2nd. Athena Scientific, 1995.
- [30] TRONCON D, ALBERTI L, MATTETTI M. A feasibility study for agriculture tractors electrification: duty cycles simulation and consumption comparison[C]//2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2019:1-6.
- [31] 吴永栓,孙晨阳,周学剑,等. 小型履带自走式电动多功能作业平台的设计及试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(6):664-668.
WU Yongshuan, SUN Chenyang, ZHOU Xuejian, et al. Design and test of the small size crawler-type self-propelled electric multifunctional operation platform[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019,45(6):664-668. (in Chinese)
- [32] 朱新民. 旋耕机功率消耗的研究[J]. 安徽工学院学报,1986,5(3):125-137.
ZHU Xinmin. The study on the power consumption of a rotary tiller in rototilling[J]. Journal of Anhui Institute of Technology, 1986,5(3):125-137. (in Chinese)
- [33] KIRAN B R, RAKESH N, JYOTHI M N, et al. Design and evaluation of push type rotary tiller[J]. The Andhra Agricultural Journal, 2015,62(1):190-197.
- [34] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [35] SHIBATA Y, SAKAI J. Dynamic characteristics of tractors with rotary-tillers mounted (Ⅱ) motion equations of tractors[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1979,41(1):37-42.
- [36] SHIBATA Y, SAKAI J. Dynamic characteristics of tractors mounted with rotary tillers. I. Measurement and analysis of fundamental external forces[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1978,40(3):345-353.
- [37] 张吉强,牛子儒,李玉华,等. 基于大葱移栽机的卧式旋耕机的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(8):41-45.
ZHANG Jiqiang, NIU Ziru, LI Yuhua, et al. Design and research of horizontal rotary tiller based on scallion transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(8):41-45. (in Chinese)
- [38] 商高高,夏勇. 履带式电动拖拉机传动系统的匹配及优化[J]. 农机化研究,2015,37(9):250-253.
SHANG Gaogao, XIA Yong. Powertrain matching and optimization of crawler electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(9):250-253. (in Chinese)

[39] 张俊江,徐立友,刘孟楠. 增程式电动拖拉机阈值调整控制策略设计[C]//第十三届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集,2016:366-370.
ZHANG Junjiang, XU Liyou, LIU Mengnan. Threshold adjustment control strategy design for extended-range electric tractors [C] // Proceedings of the 13th Henan Province Automotive Engineering Technology Symposium, 2016: 366 - 370. (in Chinese)

[40] 胡悦. 混合动力电动汽车控制系统设计与能量管理策略研究[D]. 深圳:中国科学院大学(深圳先进技术研究院), 2018.
HU Yue. Research on control system design and energy management strategy of hybrid electric vehicle [D]. Shenzhen: University of Chinese Academy of Sciences(Shenzhen Institutes of Advanced Technology), 2018. (in Chinese)

[41] 施德华. 功率分流式混合动力汽车能量管理系统混杂动态建模与优化控制研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
SHI Dehua. Research on hybrid dynamic modeling and optimal control of the energy management system for power split hybrid electric vehicle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)

[42] WANG Z, ZHOU J, WANG X, et al. Design and verification of a modular reconfigurable test platform for electric tractors[J]. Applied Sciences-Basel, 2021, 11(4):1881.

[43] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2):412-420.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2):412-420. (in Chinese)

(上接第 398 页)

[19] MOONEY S J, PRIDMORE T P, HELLIWELL J, et al. Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1-2):1-22.

[20] JACQUIN P, LONGUETAUD F, LEBAN J, et al. X-ray microdensitometry of wood: a review of existing principles and devices [J]. Dendrochronologia, 2017, 42:42-50.

[21] KOTWALI WALE N, SINGH K, KALNE A, et al. X-ray imaging methods for internal quality evaluation of agricultural produce [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(1):1-15.

[22] LI Z Y, ZHANG X X, LIU Y. Pore-scale simulation of gas diffusion in unsaturated soil aggregates: accuracy of the dusty-gas model and the impact of saturation[J]. Geoderma, 2017, 303:196-203.

[23] MIZUTANI R, SUZUKI Y. X-ray microtomography in biology[J]. Micron, 2012, 43:104-115.

[24] 吴龙海. 高分辨率 CT 图像的肺部病变计算机辅助诊断研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2008.
WU Longhai. Research on computer-aided diagnosis of lung disease based on high resolution CT images [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)

[25] 王倩,杨正,方正. 基于 X 射线吸收谱的不同生物组织的辨识[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(7):1434-1439.
WANG Qian, YANG Zheng, FANG Zheng. Biological tissue recognition based on X-ray absorption spectral detection [J]. Chemical Journal of Chinese University, 2018, 39(7):1434-1439. (in Chinese)

[26] KAMILARIS A, PRENAFETA-BOLDÚ F X. Deep learning in agriculture: a survey [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147:61-88.

[27] 方正,王仁彬,陈思媛. 基于 GA-BP 神经网络的塑料 X 射线吸收光谱的辨识[J]. 应用化工, 2019, 48(1):238-241.
FANG Zheng, WANG Renbin, CHEN Siyuan. Identification of X-ray absorption spectroscopy of plastics based on GA-BP neural network [J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(1):238-241. (in Chinese)

[28] LI S X, FAN X, MEI J Q, et al. Identification of antibiotic mycelia residues in cottonseed meal using fourier transform near-infrared microspectroscopic imaging[J]. Food Chemistry, 2019, 293:204-212.

[29] LIN Y F, YANG Z L, LIANG H, et al. Identification of antibiotic mycelia residue in protein rich feed using on near-infrared microscopy imaging[J]. Food Additives and Contaminants Part A—Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2018, 35(5):818-827.

[30] European Parliament and of the Council. Animal by-products and derived products not intended for human consumption and repealing regulation; No. 1774/2002[S]. Official Journal of the European Union, 2009.

[31] European Parliament and of the Council. The methods of analysis for the determination of constituents of animal origin for the official control of feed; No. 152/2009[S]. Official Journal of the European Union, 2013.

[32] 余晓镔. CT 原理与技术[M]. 北京:科学出版社, 2014.

[33] 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2011.