

双流耦合构型混合动力拖拉机旋耕工况控制策略研究

窦海石¹ 魏洪乾¹ 艾强² 张幽彤^{1,2}

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 嘉兴 314001)

摘要: 大功率拖拉机作业时载荷冲击会造成发动机的输出转矩大范围波动, 为减小载荷冲击对拖拉机动力单元的影响, 提出以发动机和双电机为动力源的拖拉机双流耦合动力系统构型, 以减小载荷冲击引起的动力传动系统换挡频次。基于 Haar 小波分解提出了基于功率预测的转矩分配策略, 首先记录拖拉机的作业参数, 基于径向基神经网络对拖拉机旋耕作业时的功率需求进行预测, 由 Haar 小波变换确定高频和低频转矩需求值的范围, 并分别由电机和发动机提供。最后, 通过硬件在环试验对提出的动态转矩分配进行了可行性验证, 测试结果表明: 提出的基于神经网络功率需求预测模型对行驶端和动力输出端 (Power take-off, PTO) 的功率进行预测, 实际值和预测值均方根误差分别占最大功率的 7.6% 和 7.9%; 提出的转矩分配策略能够应对拖拉机旋耕时的载荷波动。发动机转矩波动与传统构型相比减小 35.0%, 有效地缩小了发动机转矩波动范围, 缓解了拖拉机作业时载荷冲击对发动机的影响。

关键词: 混合动力拖拉机; 双流耦合构型; 功率预测; 转矩分配; Haar 小波变换

中图分类号: S222.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0393-08

OSID:



Control Strategy for Rotary Tillage Condition of Hybrid Electric Tractor with Coupled-split Dynamic Configuration

DOU Haishi¹ WEI Hongqian¹ AI Qiang² ZHANG Youtong^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Yangtze Delta Region Academy, Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314001, China)

Abstract: The load impact of high-horsepower tractors during operation will cause a wide range of fluctuations in the output torque of the engine. In order to reduce the impact of load impact on the tractor power unit, a tractor coupled-split power system configuration with the engine and dual-motor as the power source was proposed to reduce the shift frequency of the power transmission system caused by load impact. A torque allocation strategy was proposed based on Haar wavelet decomposition algorithm and power prediction. Firstly, a priori prediction of power demand for tractor rotary tillage based on radial basis function neural network was researched in which the working load parameters were collected; and then the comprehensive dynamics of tractor loads were mathematically formulated. Then the torque requirements for high and low frequencies were determined by Haar wavelet transform and provided by motor and engine respectively. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed strategy were validated with the hardware-in-loop test. The result indicated that the prediction model of power requirement based on neural network can accurately predict the power demand of driving and power take-off (PTO), and driving end and PTO end root mean square error of predicted values accounted for 7.6% and 7.9% of the maximum power, respectively. The proposed model predictive controller can following tractor torque demand in operation. The torque ripple of the engine was reduced by 35.0% compared with the traditional configuration. And the strategy effectively reduced the torque variation range of the engine and alleviated the adverse effects of excessive shock of the operating load.

Key words: hybrid electric tractors; coupled-split configuration; power demand prediction; torque distribution; Haar wavelet transform

收稿日期: 2023-09-26 修回日期: 2023-11-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3101500)、中国博士后科学基金项目(2022TQ0032、2022M710380)和河北省 2022 年技术攻关类“揭榜挂帅”项目

作者简介: 窦海石(1994—), 男, 博士生, 主要从事混合动力拖拉机研究, E-mail: yuanhaoyuy@163.com

通信作者: 张幽彤(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事混合动力控制技术研究, E-mail: youtong@bit.edu.cn

0 引言

农田集约化和农村人口流失促使大功率拖拉机的使用得到进一步推广,传统大功率拖拉机在作业时受外界载荷波动的影响需要不断地通过动力换挡和无级变速^[1-2]实现拖拉机匀速作业。然而,当前我国自主设计的动力换挡和无级变速系统受制于加工工艺、材料和加工精度等技术问题,短时间内很难突破动力换挡和无级变速系统的可靠性难题。因此,采用发动机和电机耦合的动力系统构型能够借助电机快速响应特性应对拖拉机的动态载荷工况,具有替代传统动力换挡和无级变速的潜力。混合动力拖拉机在替换传统无级变速技术的同时,可以提高整机燃油经济性并减少碳排放^[3-4]。与混合动力工程机械相比,拖拉机具有作业和驱动的双重负载特性,需要根据拖拉机作业时载荷特性进行功率分流的构型设计,以实现动力换挡和无级变速技术的替代。传统大功率拖拉机前后桥输出轴和动力输出轴通过减速分动箱实现,柴油机的动力经分动箱分流至驱动桥和动力输出端(PTO),拖拉机行驶车速和旋耕作业下机具的刀片转速呈线性耦合关系,旋耕时作业载荷冲击会影响拖拉机的驾驶性能,且造成拖拉机的作业质量难以提高。为解决这一问题,本文提出混合动力拖拉机双流耦合动力系统构型。

刘孟楠等^[5]提出电动拖拉机动力双向耦合装置,这种构型能实现功率的双向耦合流动。李同辉等^[6]提出行星齿轮耦合的双电机驱动系统构型,双电机驱动系统能够跟随负载变化按照功率分配规则实现两电机功率的合理分配。但这两种构型在实际作业时携带大量的电能,拖拉机成本难以使农场主接受。混合动力拖拉机在实际工作时受到外界载荷冲击的影响,制约了整机燃油经济性和动力性的发挥^[7]。为此,需要针对混动拖拉机的作业工况和负载环境进行实时功率需求预测和多动力源的转矩优化控制。ZHANG 等^[8]基于马尔科夫链和 BP (Back propagation) 神经网络算法预测接下来 5 s 内的车速,并基于预测的车速进行等效燃油最小策略的能量管理。ZHANG 等^[9]基于深度学习算法预测插电式混合动力车驾驶循环的 SOC (State of charge) 曲线,并基于模型预测控制方法分配功率流的路径提高燃油效率。文献[10]通过离线求解多参数二次规划问题得到模型预测控制 MPC (Model predictive control) 的控制律。文献[11]通过 AVL - Cruise 仿真软件对混合动力拖拉机电池和燃油的动力输出参数进行调整。XIANG 等^[12]提出分级

控制器的转矩分配方法,首先对车速进行预测,再基于动态规划进行求解。然而以上模型预测控制方法需要大量的计算资源和较复杂的最优轨迹寻根过程,会消耗整车控制器大量的算力,转矩分配策略在线执行难度较大。此外,上述方法大多基于混合动力乘用车展开,很少探究混合动力拖拉机作业时多动力源的转矩分配问题,而混动拖拉机具有作业、驱动双重负载工况,使转矩分配设计更为复杂。

为此,本文以混合动力拖拉机为研究对象,采用图论原理设计满足整机作业功率需求全覆盖的双流耦合动力系统构型。在此基础上,为减小旋耕作业载荷冲击的影响,提出基于径向基神经网络的功率需求预测和优化转矩分配控制策略。首先根据拖拉机行驶速度、加速度、耕深和土壤比阻等参数对拖拉机功率需求进行网络训练,用于识别土壤环境的载荷特性;然后将预测的功率需求进行 Haar 小波变换,通过变换后得到高频和低频的转矩需求分别由发动机和电机提供,整车控制器输出旋耕作业时转矩的控制量。通过 Haar 小波变换得到发动机的稳态工作区间以及发动机和 ISG (Integrated starter and generator) 电机的转矩分配关系,减小载荷冲击对拖拉机驾驶性能的影响。

1 双流耦合动力系统构型设计

旋耕作业下,PTO 所需的功率输出约占拖拉机整机功率的 70%,外界的冲击载荷会影响拖拉机的驾驶性能,本文基于分层图论原理设计的拖拉机双流耦合动力系统如图 1 (图中 C1、C2、C3 为离合器;VCU 为整车控制器;MCU 为电机控制器;ECU 为发动机控制器;BMS 为电池管理系统) 所示。动力系统采用发动机和两电机作为动力单元,两两之间的

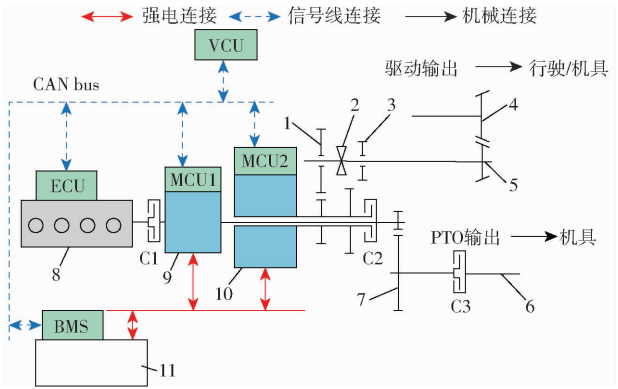


图 1 双流耦合动力系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of coupled-split power system

1. 低速挡 2. 同步器 3. 高速挡 4. 前驱动输出轴 5. 后驱动输出轴 6. PTO 动力输出轴 7. PTO 减速箱 8. 发动机 9. ISG 电机 10. 驱动电机 11. 动力电池

动力通过离合器实现耦合或分流,离合器断开情况下,驱动电机作为拖拉机前后桥的动力源,发动机和ISG电机主要作为PTO旋耕时的动力源。根据动力单元和离合器的不同组合形式,双流耦合拖拉机主要作业模式如表1所示。

表1 双流耦合拖拉机工作模式

Tab.1 Operation mode of coupled-split configuration tractor

模式	发动机	ISG电机	驱动电机	C1	C2	C3
单电机1	关闭	关闭	驱动	断开	断开	断开
混合驱动	开启/关闭	驱动/发电	驱动	结合	结合	断开
单电机2	开启/关闭	驱动/发电	驱动	结合/断开	断开	结合
混合PTO	开启	驱动/发电	驱动	结合	结合/断开	结合

旋耕作业时发动机根据负载确定 ISG 电机处于驱动或是发电模式。不同作业项目的动力系统功率流如图2所示。单电机1模式(图2a),主要针对于拖拉机在结构化道路或转运作业时使用,这时的电池 SOC 相对较高,且负载阻力较小。混合驱动模式(图2b),主要针对犁耕作业时使用,为满足1 d 中犁耕作业时长的要求,ISG 电机处于发电模式使 SOC 缓慢减少。这时发动机和 ISG 电机构成增程模式,增程模式则根据整机电池电量进行发电补偿,该模式发动机动力一部分用于 ISG 电机发电,另一部分参与犁耕作业进行功率输出,ISG 电机用于调节发动机的工作区间以提高发动机的燃油效率,此时离合器 C2 处于结合状态。若犁耕作业需要瞬时大功率输出,则 ISG 电机选为电驱动模式。单电机2模式(图2c),针对旋耕作业时使用,旋耕作业起始阶段负载较小,电池 SOC 较高,此时驱动电机和 ISG 电机分别为驱动输出和 PTO 提供动力。若电池 SOC 较低,发动机和 ISG 电机构成增程模式补充电能,发动机另一部分动力用于驱动旋耕机具,此时驱动输出和 PTO 完全解耦。混合 PTO 模式(图2d),发动机工作在稳定的高效区间,ISG 电机根据载荷冲击补偿作业载荷所需的转矩或吸收发动机额外的功率。若拖拉机的行驶阻力较大,离合器 C2 处于结合状态,为大负载工况下拖拉机的行驶提供动力。

为调节发动机的工作区间并减小发动机因载荷冲击引起的大范围转矩波动,采用 ISG 电机作为动力调节单元(作为发动机或电动机)。拖拉机的功率输出路径可以通过离合器 C1、C2 与驱动电机、ISG 电机以及发动机进行耦合与分流,通过不同的

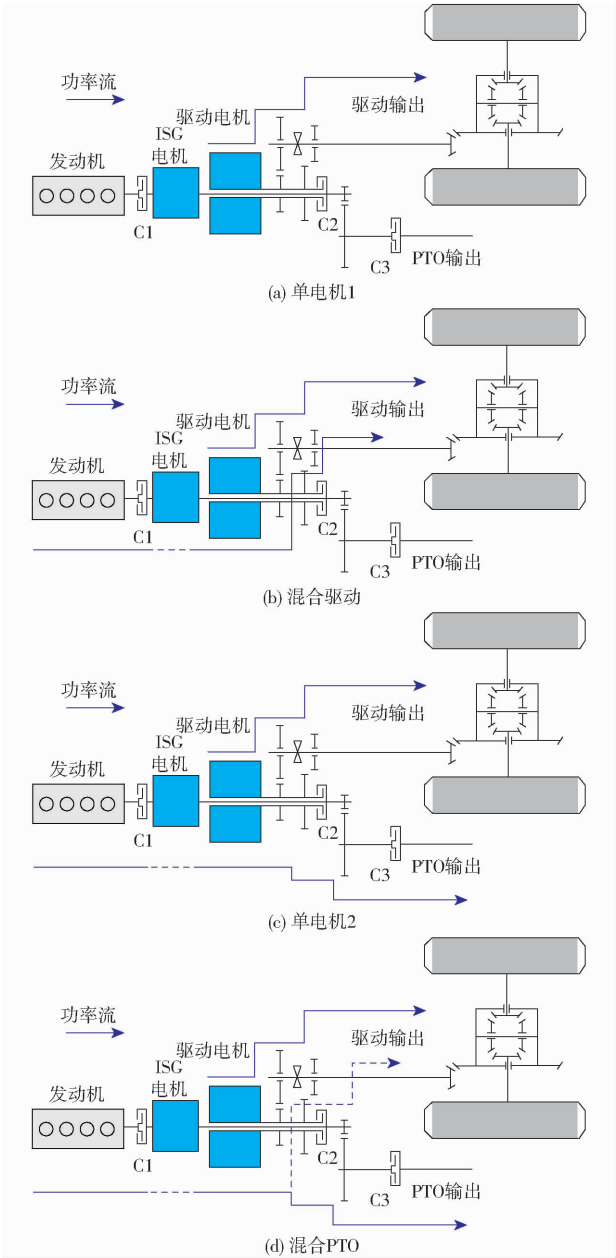


图2 双流耦合动力系统功率流示意图
Fig.2 Schematic of power flow in coupled-split power system

组合方式实现对多种作业工况下拖拉机功率的全覆盖。双流耦合构型中动力单元参数如表2所示。

表2 拖拉机动力单元参数

Tab.2 Tractor power unit parameters

动力单元	参数	数值
驱动电机	额定功率/kW	65
	额定转速/(r·min ⁻¹)	2 100
	额定转矩/(N·m)	304
ISG电机	额定功率/kW	45
	额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
	额定转矩/(N·m)	215
发动机	额定功率/kW	140
	额定转速/(r·min ⁻¹)	2 100
	额定转矩/(N·m)	630

为便于后续拖拉机作业载荷波动的分析,本文重点建立双流耦合系统不同功率流传递的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} w_e \\ w_i \\ w_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 i_1 \\ i_0 i_1 \\ i_0 i_1 \end{bmatrix} w_w \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} w_e \\ w_i \\ w_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 i_1 & 0 & 0 \\ 0 & i_3 & 0 \\ 0 & 0 & i_0 i_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_w \\ w_{pto} \\ w_{pto} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中

w_e ——发动机角速度,rad/s

w_i ——ISG 电机角速度,rad/s

w_d ——驱动电机角速度,rad/s

i_0 ——主减速器减速比

i_1 ——驱动低速挡减速比

i_3 ——PTO 减速箱减速比

w_w ——车轮角速度,rad/s

w_{pto} ——PTO 输出轴角速度,rad/s

不同功率流路径下驱动输出转矩 T_{out} 表示为

$$\frac{1}{i_0 i_1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & J_d \\ J_e & -J_i & J_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w}_e \\ \dot{w}_i \\ \dot{w}_d \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{i_0 i_1} & -1 \\ \frac{1}{i_0 i_1} & -\frac{1}{i_0 i_1} & \frac{1}{i_0 i_1} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ T_i \\ T_d \\ T_{out} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中

$\dot{w}_e$ ——发动机角加速度,rad/s²

$\dot{w}_i$ ——ISG 电机角加速度,rad/s²

$\dot{w}_d$ ——驱动电机角加速度,rad/s²

J_e ——发动机转动惯量,kg·m²

J_i ——ISG 电机转动惯量,kg·m²

J_d ——驱动电机转动惯量,kg·m²

T_e ——发动机输出转矩,N·m

T_d ——驱动电机输出转矩,N·m

T_i ——ISG 电机输出或发电消耗转矩,N·m

旋耕作业时,PTO 输出轴转矩 T_{pto} 表示为

$$\frac{1}{i_0 i_1} \begin{bmatrix} 0 & J_i & J_d \\ J_e & -J_i & J_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w}_e \\ \dot{w}_i \\ \dot{w}_d \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{i_3} & \frac{1}{i_0 i_1} & -1 & -1 \\ \frac{1}{i_0 i_1} & -\frac{1}{i_0 i_1} & \frac{1}{i_0 i_1} & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ T_i \\ T_d \\ T_{out} \\ T_{pto} \end{bmatrix} \tag{4}$$

旋耕模式下,拖拉机需要克服滚动阻力、加速阻力、风阻、坡道阻力和牵引阻力,拖拉机牵引力需要与这些阻力相平衡,拖拉机各阻力分别表示为^[13]

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A_f c_d v^2 \tag{5}$$

$$F_g = Mg \sin \alpha \tag{6}$$

$$F_A = M \frac{dv}{dt_2} \tag{7}$$

$$F_f = fMg \cos \alpha \tag{8}$$

式中

F_a ——空气阻力,N

F_g ——坡道阻力,N

F_A ——加速阻力,N

F_f ——滚动阻力,N

M ——拖拉机使用质量,kg

ρ ——空气密度,kg/m³

A_f ——拖拉机迎风面积,m²

c_d ——风阻系数

v ——拖拉机纵向行驶速度,m/s

f ——滚动阻力系数

α ——道路坡度,(°)

g ——重力加速度,m/s²

t_2 ——拖拉机作业时间,s

旋耕作业下切土节距为 12 ~ 15 cm 时,主要参数和速度曲线分别如表 3^[14-15] 和图 3 所示,其旋耕负载阻力表示为^[16]

$$F_x = 0.1 K_g K_1 K_2 K_3 K_4 h_r B \tag{9}$$

式中

F_x ——经验公式求得的旋耕机具端负载阻力,N

表 3 旋耕作业主要参数

Tab.3 Main parameters in ploughing operation mode	
参数	数值
旋耕深度 h_r /cm	15.0 ~ 18.0
旋耕幅宽 B /m	1.6 ~ 1.7
旋耕阻力系数 $K_g/(N \cdot cm^{-2})$	11.0 ~ 13.2
根深修正系数 K_1	0.8 ~ 1.0
土壤含水率修正系数 K_2	0.9
土壤中植被含量修正系数 K_3	1.0 ~ 1.2
运行模式修正系数 K_4	0.5 ~ 0.7

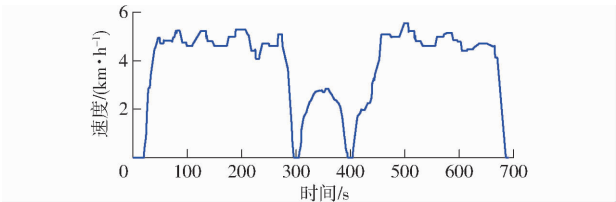


图 3 拖拉机作业速度曲线

Fig.3 Speed curve of tractor under working condition

拖拉机犁耕和旋耕等作业时考虑土壤参数、作

业地点随时间的变化^[1],负载阻力随时间连续变化,为方便研究近似用正弦曲线表示负载阻力随时间的变化关系,旋耕机具端负载阻力 F_x 为

$$F_x = F_x + 0.5 F_x \gamma \sin(f_i t_1) \tag{10}$$

式中 γ ——牵引阻力不均等率,取 0.2 ~ 0.4

f_i ——农机具阻力变化频率^[17]

t_1 ——拖拉机作业时间, s

牵引阻力不均等率和农机具阻力变化频率通过田间试验后数据拟合得到;旋耕作业时拖拉机的功率需求表示为

$$P_{dem} = (F_a + F_g + F_A + F_f + F_x) v \tag{11}$$

拖拉机旋耕作业的速度曲线根据实际作业时的速度而设定,如图 3 所示,0 ~ 300 s 为拖拉机单程作业阶段,包括加速、速度波动和减速阶段;300 ~ 400 s 为拖拉机掉头阶段,400 ~ 700 s 为拖拉机返程作业阶段,如此往复直至完成整片土地的耕作。犁耕作业功率需求和预测以此速度曲线进行。

2 旋耕功率需求预测与控制算法

2.1 基于径向基神经网络的功率需求预测

拖拉机的功率需求受驱动和作业负载双重影响,虽然驾驶员的驾驶习惯存在一定的规律,但拖拉机旋耕作业负载受旋耕阻力系数、土壤参数和地形等因素影响,这给功率需求的预测带来挑战。本节通过对已知数据的采集,预测未来 10 s 内的平均功率需求,为双流耦合动力系统的转矩分配提供基础。以径向基神经网络(Radial basis function, RBF)为功率需求预测的载体,其神经网络架构和功率需求预测结构示意图如图 4 所示。

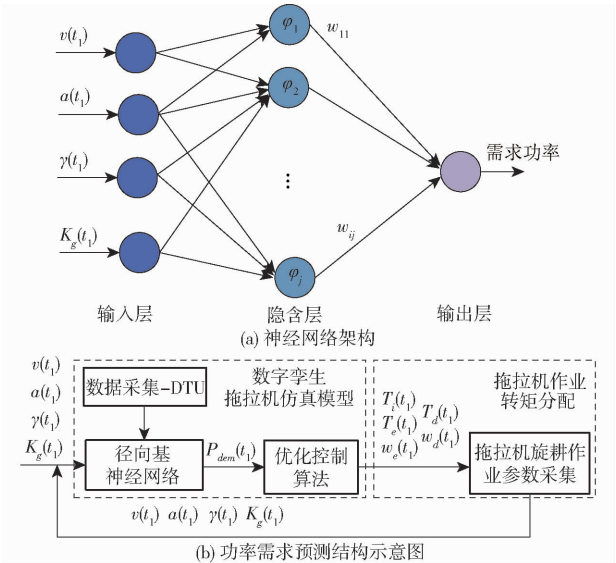


图 4 神经网络架构与功率需求预测结构示意图

Fig. 4 Neural network architecture and schematic of power demand forecasting structure

神经网络输入参数在驱动方面选择拖拉机车速 $v(t_1)$ 和加速度 $a(t_1)$;由于作业时土壤参数不同,对机具的控制有力控制、位置控制和力位综合控制 3 种方式^[18],在旋耕机具方面选择旋耕阻力不均等率 $\gamma(t_1)$ 和旋耕阻力系数 $K_g(t_1)$ 作为输入参数^[19]。其隐含层的基函数为高斯函数,表达式为

$$y_j = \sum_{i=1}^h w_{ij} e^{-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma}} \quad (j = 1, 2, \dots, p) \tag{12}$$

式中 y_j ——网络输出

w_{ij} ——权重

x ——输入参数

c_i ——神经网络中心

σ ——神经网络传播宽度

h ——隐含层节点数量

p ——输出节点数

隐含层节点数量 h 设为 25,输出节点数为 1 个,即预测的旋耕功率需求。

2.2 转矩分配控制器设计

拖拉机 PTO 输出规律研究的目的是确定低频转矩需求值和高频转矩需求值分布特点及范围,两种特性的转矩分别由发动机和 ISG 电机提供。定义转矩分配比 k 为同一时刻高频载荷 T_h 与低频载荷 T_l 的比例,即

$$k = \frac{T_h}{T_l} \tag{13}$$

并总结动态转矩分配比例 k 的分布规律。拖拉机作业时稳态转矩分配需要对实际负载信号进行频域分析。小波变换(Wavelet transform, WT)和短时傅里叶变换(Short-time Fourier transform, STFT)均可满足要求,短时傅里叶变换是通过给待分析的信号加一个窗口,分析窗内信号进行变换并分析其特征。分析低频和高频信号时窗函数大小不可调节,因此选用小波变换对转矩需求特性进行分析。小波变换通过尺度 a 和平移变化因子 b 变换窗口的位置和形状,适应高频和低频信号的随机性^[20]。选用小波变换作为稳态转矩输出转矩分配的滤波工具,计算式为

$$WT(a, t) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \overline{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{14}$$

$$STFT(t, w) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) g(t - \tau) e^{-jw(t-\tau)} dt \tag{15}$$

式中 $s(t)$ ——信号

$\overline{\varphi}(t)$ ——小波变换窗函数

$g(t)$ ——短时傅里叶变换窗函数

t ——积分时间

τ ——相对偏移时间

w ——频率信号

j ——信号分解层数

小波函数中基函数的选取影响算法的复杂度和代码的执行效率,本节选用简单的 Haar 小波对动态随机载荷快速分解。Haar 小波尺度函数和小波函数分别为

$$\phi(t)=\begin{cases}1 & (0 < t < 1) \\ 0 & (t \geq 1)\end{cases}\tag{16}$$

$$\varphi(t)=\varphi(2t)-\varphi(2t-1)=\begin{cases}1 & (0 \leq t < 1/2) \\ -1 & (1/2 \leq t < 1) \\ 0 & (t \geq 1)\end{cases}\tag{17}$$

以尺度函数 $\phi(t)$ 为父函数,以小波函数 $\varphi(t)$ 为母函数,构造正交空间 W_j 和 V_j ,采集离散的负载转矩 $T_{bj}(n)$, ($T_{bj}(n) \in V_j$), W_{j-1} 是 V_{j-1} 关于 V_j 正交补空间,通过定义高频信号 $w_{j-1}(n) \in V_{j-1}$,可得

$$V_j=V_{j-1} \oplus W_{j-1}\tag{18}$$

$$\begin{cases}T_{bj}(n)=w_{bj-1}(n)+T_{bj-1}(n) \\ w_{bj-1}(n)=\sum b_l^{j-1}\varphi(2^{j-1}n-l) \\ T_{bj-1}(n)=\sum a_l^{j-1}\varphi(2^{j-1}n-l)\end{cases}\tag{19}$$

$$\begin{cases}a_l^{j-1}=(a_{2l}^j+a_{2l+1}^j)/2 \\ b_l^{j-1}=(a_{2l}^j-a_{2l+1}^j)/2\end{cases}\tag{20}$$

式中 a_l ——离散化后尺度因子

n ——离散化后时间

l, b_l ——离散化后平移因子

将拖拉机载荷波动信号分为低频转矩 $T_{bj}(n)$ 和细节高频信号 $w_j(n)$,即

$$w_j(n)=T_{bj}(n)-T_{b0}(n)=\sum b_l^{j-1}\varphi(2^{j-1}n-l)\tag{21}$$

根据动力源的类型,旋耕作业时机具端负载和行驶端负载分别通过滤波器分解至第 1 层,机具端分解得到的基本信号由发动机提供转矩,细节信号由 ISG 电机提供转矩;行驶端由驱动电机提供转矩。

3 控制策略验证

为了验证本文提出的功率预测算法和转矩分配策略的有效性和可执行性,在台架试验的基础上进行了拖拉机旋耕硬件在环测试,分别探究了双流耦合动力系统的可行性,发动机工作在稳态区域 ISG 电机作为载荷冲击补偿的动力单元。

3.1 基于神经网络的拖拉机功率需求预测

考虑到拖拉机作业时存在冲击载荷,动力单元进行转矩分配前通过对整机的功率需求进行预测,以更有效分配动力单元的转矩。首先通过电机控制器的转速信号计算拖拉机速度,旋耕阻力不均等率

通过土壤参数标定得到;旋耕阻力系数由不同时间段采集土壤参数计算后绘制成表格,在线使用时通过查表得到。通过前 5 min 对历史数据的收集和训练,用于识别土壤环境的载荷特性。训练集中行驶端和机具负载端的最大误差分别为 3.4% 和 7.2%,行驶端的载荷波动较小,所以预测精度比机具负载端的高,这种工况下认为训练精度满足对拖拉机稳态工作后 10 s 平均功率需求的预测。测试集中,对行驶端的功率需求预测如图 5a 所示,对于后 10 s,PTO 端的功率预测值和实际值如图 5b 所示,通过神经网络的输入参数,实时迭代预测下一个 10 s 的功率需求,对预测的功率再由 Haar 小波分解,分配发动机和 ISG 电机的转矩。

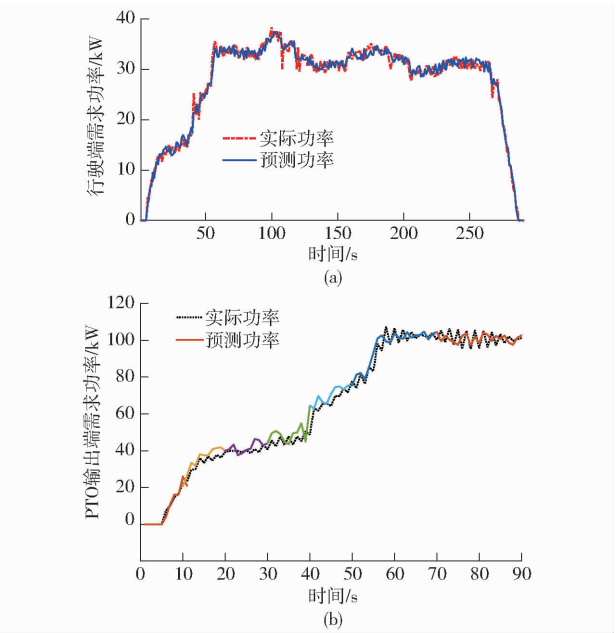


图 5 基于径向神经网络的旋耕功率需求预测

Fig.5 Prediction of rotary tillage power demand based on radial basis neural network

测试集中通过径向神经网络算法对行驶端和 PTO 输出端的功率需求进行预测,行驶端和 PTO 输出端的实际值和预测值均方根误差分别占最大功率的 7.6% 和 7.9%。

3.2 硬件在环测试系统搭建

硬件在环测试主要验证 Haar 小波分解的实时性和可行性,搭建的拖拉机动力系统试验台如图 6a 所示,与计算机上旋耕负载模型、整车控制器等构成拖拉机旋耕控制策略的硬件在环测试平台。利用 Matlab/Simulink 模型构建拖拉机旋耕作业时的负载模型和整机动力学模型,首先将旋耕负载的历史数据进行径向神经网络训练,通过边缘计算预测出后 10 s 的平均功率需求,然后将转矩需求输入 Haar 小波分解算法,分解得到发动机和 ISG 电机的转矩。预测的功率需求通过 CAN(Controller area network)

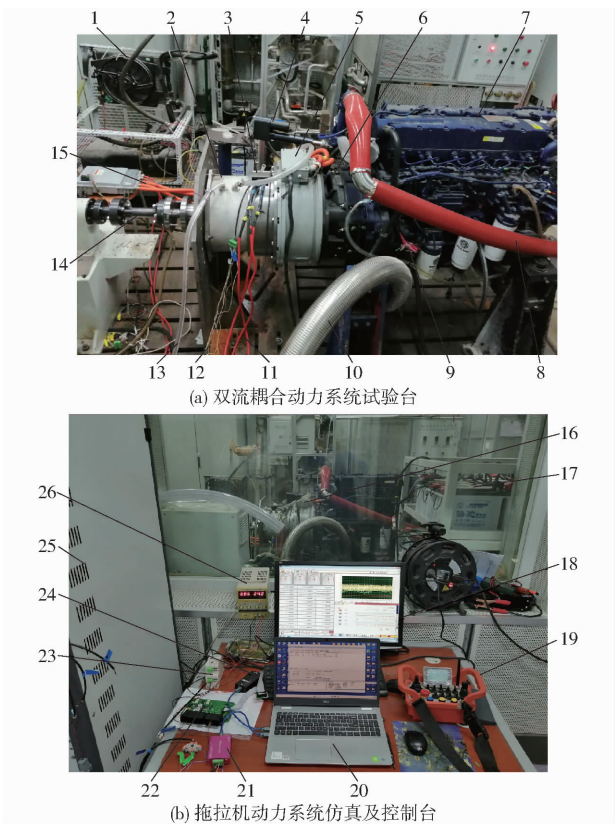


图 6 拖拉机旋耕作业硬件在环测试平台

Fig. 6 Hardware-in-the-loop test platform for tractor rotary tillage

- 1. 冷却风扇 2. 驱动电机 3. 离合器 C2 4. 电动推杆 5. ISG 电机
- 6. 离合器 C1 7. 发动机 8. 发动机进气管 9. 发动机 ECU
- 10. 发动机排气管 11. 驱动电机三相线 12. 电机控制器信号线
- 13. 冷却水管 14. 测功机输入轴 15. ISG 电机三相线 16. 动力
- 系统试验台 17. 蓄电池 18. 上位机 19. 无人驾驶遥控器
- 20. 计算机 21. CAN 卡 22. 整车控制器 23. 接收器 24. 烧录
- 器 25. 配电柜 26. 稳压电源

总线发送给整车控制器,整车控制器根据电池 SOC 和功率需求,确定 ISG 电机的工作形式,Haar 小波分解输出下一时段发动机和 ISG 电机的转矩分配,再通过 CAN 总线传给 ISG 电机控制器 (MCU1) 和发动机控制器 (ECU),通过测功机加载并记录发动机和 ISG 电机的输出转矩。

3.3 基于 Haar 小波变换的旋耕转矩分配

为验证双流耦合动力系统构型能够减小拖拉机载荷冲击的影响,以神经网络预测的功率需求作为已知量进行测试。硬件在环测试试验时首先将转矩需求作为已知量传给 Haar 小波分解器,整车控制器根据同一时间间隔内高频 ($> 1.5\text{ Hz}$) 和低频 ($0 \sim 1.5\text{ Hz}$) 转矩需求的均值分配 ISG 电机和发动机的输出转矩。

拖拉机硬件在环测试时首先根据负载的历史数据进行径向基神经网络训练,将采集到的前 5 min 功率需求的历史数据作为训练集,对后 10 s 的平均

功率需求进行预测,再通过 PTO 转速计算旋耕所需转矩,并动态更新前 5 min 的数据库。PTO 输出轴转速为 900 r/min 时,根据 Haar 小波分解得到机具端未经减速箱的转矩需求如图 7a、7b 所示。根据分解的结果,旋耕作业低频转矩需求由发动机提供,高频转矩需求由 ISG 电机提供。并记录转矩分配比 k ,在旋耕作业时转矩分配比 k 的分布如图 7c 所示,高频载荷与低频载荷的比例在 $0.06 \sim 0.3$ 范围内。其中高频负转矩表示载荷在发动机输出转矩的基础上减小的部分,高频正转矩表示在发动机输出转矩的基础上 ISG 电机需要补偿的转矩。

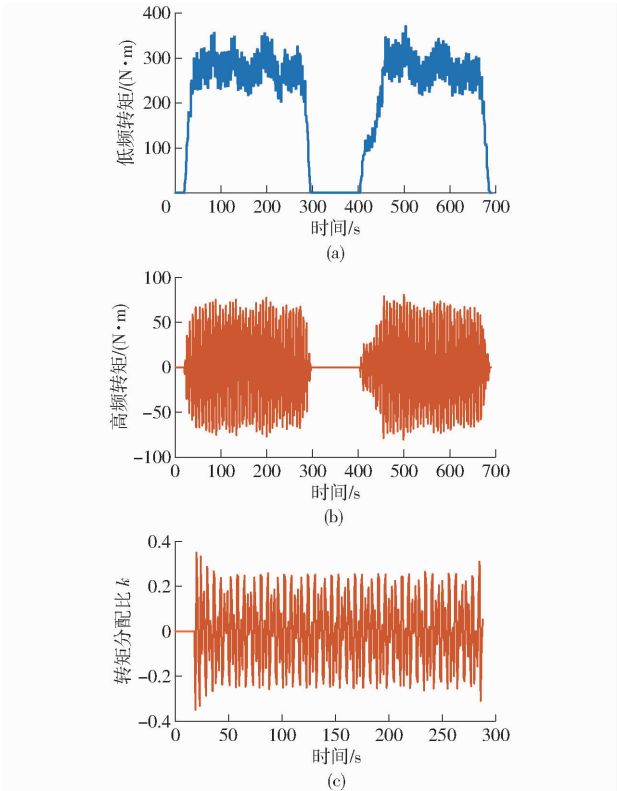


图 7 基于 Haar 小波变换对机具端载荷的分解

Fig. 7 Decomposition of PTO load based on Haar wavelet transform

双流耦合构型与传统单发动机加多挡变速箱的构型相比,旋耕作业时发动机转矩输出如图 8 所示。由图 8 可知,传统单发动机构型中由于拖拉机机具端载荷的波动引起发动机输出的动力需要进行动力

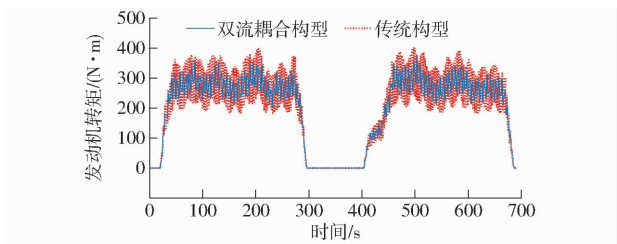


图 8 不同构型中发动机输出转矩对比

Fig. 8 Comparison of engine output torque in different configurations

换挡和无级变速以保证车速的平稳;而双流耦合构型中,ISG 电机快速响应旋耕载荷波动的高频转矩需求,这有利于拖拉机在大负载作业时缓解载荷波动对发动机带来的载荷冲击,提高拖拉机动力系统的使用寿命。双流耦合构型中发动机工作在稳态区间,与传统构型相比发动机转矩波动减小 35.0%。

采用先验性的功率需求预测方法和双流耦合构型能够极大地改善发动机转矩波动,降低载荷冲击对整机的影响,这有利于实现双流耦合构型对无级变速技术难点的替换。

4 结 论

(1)与传统拖拉机动力系统构型相比,提出的

双流耦合构型混合动力拖拉机实现了驱动和 PTO 动力的解耦输出,利用双流耦合动力系统构型实现传统拖拉机动力换挡和无级变速的驱动效果。通过径向基神经网络算法对行驶端和 PTO 输出端的功率需求进行预测,行驶端和 PTO 输出端的实际值和预测值均方根误差分别占最大功率的 7.6% 和 7.9%。

(2)旋耕作业下,采用 Haar 小波分解得到发动机稳态的工作区间,能够减少发动机转矩波动幅值,缓解发动机转矩波动范围,通过 ISG 电机的高频转矩响应特性减小拖拉机作业时的载荷冲击。双流耦合构型与传统构型相比发动机转矩波动减小 35.0%,缓解了拖拉机作业时的载荷冲击。

参 考 文 献

[1] 张海军,刘峰,朱思洪,等. 大马力拖拉机新型液压功率分流无级变速器优化设计[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(1):156 - 165.
ZHANG Haijun, LIU Feng, ZHU Sihong, et al. The optimization design of a new type of hydraulic power-split continuously variable transmission for high-power tractors [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(1): 156 - 165. (in Chinese)

[2] 陈黎卿,詹庆峰,王韦韦,等. 纯电动拖拉机电驱动系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8):388 - 394.
CHEN Liqing, ZHAN Qingfeng, WANG Weiwei, et al. Design and experiment of electric drive system for pure electric tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8):388 - 394. (in Chinese)

[3] 武仲斌,刘宇,张君,等. 电动拖拉机动力电池压载构型设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10):425 - 433.
WU Zhongbin, LIU Yu, ZHANG Jun, et al. Configuration design and parameter optimization of power battery ballast for electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10):425 - 433. (in Chinese)

[4] 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):486 - 491.
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.):486 - 491. (in Chinese)

[5] 刘孟楠,李书苑,徐立友,等. 拖拉机双向耦合电驱系统设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4):423 - 431.
LIU Mengnan, LI Shuyuan, XU Liyou, et al. Design and performance analysis of tractor bidirectional coupling electric drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4):423 - 431. (in Chinese)

[6] 李同辉,谢斌,宋正河,等. 电动拖拉机双电机耦合驱动系统传动特性研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6):379 - 388.
LI Tonghui, XIE Bin, SONG Zhenghe, et al. Transmission characteristics of dual-motor coupling system for electric tractors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):379 - 388. (in Chinese)

[7] 武仲斌,谢斌,迟瑞娟,等. 电动拖拉机田间巡航作业驱动转矩管理模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4):88 - 98.
WU Zhongbin, XIE Bin, CHI Ruijuan, et al. Driving torque management model for electric tractor in field cruise condition[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(4):88 - 98. (in Chinese)

[8] ZHANG L P, LIU W, QI B N. Energy optimization of multi-mode coupling drive plug-in hybrid electric vehicles based on speed prediction[J]. Energy, 2020, 206:118126.

[9] ZHANG X, GUO L, GUO N, et al. Bi-level energy management of plug-in hybrid electric vehicles for fuel economy and battery lifetime with intelligent state-of-charge reference[J]. Journal of Power Sources, 2021, 481: 228798.

[10] LI X, HAN L, LIU H, et al. Real-time optimal energy management strategy for a dual-mode power-split hybrid electric vehicle based on an explicit model predictive control algorithm[J]. Energy, 2019, 172:1161 - 1178.

[11] XU L, ZHANG J, LIU M, et al. Control algorithm and energy management strategy for extended range electric tractors[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(5):10.

[12] XIANG C, DING F, WANG W, et al. Energy management of a dual-mode power-split hybrid electric vehicle based on velocity prediction and nonlinear model predictive control[J]. Applied Energy, 2017, 189(3):640 - 653.

[13] 陈燕呢. 电动拖拉机动力系统设计与驱动控制方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
CHEN Yanni. Study on design and drive control methods of powertrain for electric tractor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[14] WEN C, ZHANG S, XIE B, et al. Design and verification innovative approach of dual-motor power coupling drive systems for electric tractors[J]. Energy, 2022, 247: 123538.

<https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230156>.

ZHANG Rongyun, FENG Yongle, SHI Peicheng, et al. Estimation of road adhesion coefficient of distributed drive electric vehicles[J/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering; 1-12[2023-07-22]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230156>. (in Chinese)

- [29] 王姝,赵轩,余强. 基于自适应奇异值分解无迹卡尔曼滤波算法的车辆质心侧偏角估计[J]. 公路交通科技,2020,37(12):133-141.
- WANG Shu, ZHAO Xuan, YU Qiang. Estimation of vehicle centroid sideslip angle based on ASVD-UKF algorithm[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(12): 133-141. (in Chinese)
- [30] 邹晓军,廉保旺,丹泽升. 基于自适应容积卡尔曼滤波的矢量跟踪算法[J]. 西北工业大学学报,2018,36(6):1108-1115.
- ZOU Xiaojun, LIAN Baowang, DAN Zesheng. Vector tracking algorithm based on adaptive cubature Kalman filter[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(6): 1108-1115. (in Chinese)
- [31] 余志生. 汽车理论[M]. 6版. 北京:机械工业出版社,2019.
- [32] 王建强,何凤江,张立斌,等. 汽车动力性检测模型的建立[J]. 中国公路学报,2001,14(3):112-115.
- WANG Jianqiang, HE Fengjiang, ZHANG Libin, et al. A model for testing automobile dynamic property[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 112-115. (in Chinese)
- [33] 吴献金. 路面纵向附着系数测量仪[J]. 汽车技术,1985(11):22-26.
- [34] 全国法制计量管理计量技术委员会. 附着系数测试仪校准规范:JJF 1551—2015[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2015.
- [35] 赵静慧,刘孟楠,徐立友,等. 四轮驱动拖拉机牵引性能预测模型与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(9):439-447.
- ZHAO Jinghui, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Prediction model and experiment on tractive performance of four-wheel drive tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 439-447. (in Chinese)

(上接第 400 页)

- [15] ZHANG S, WEN C, REN W, et al. A joint control method considering travel speed and slip for reducing energy consumption of rear wheel independent drive electric tractor in ploughing[J]. Energy, 2023, 263: 126008.
- [16] 刘孟楠. 电动拖拉机设计理论及控制策略研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- LIU Mengnan. Study on design theory and control strategy of electric tractor[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] 周志立,倪倩,徐立友. 并联混合动力拖拉机传动系参数设计及性能分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2016,37(6):9-15.
- ZHOU Zhili, NI Qian, XU Liyou. Design and performance analysis of parallel hybrid electric tractor transmission parameters[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 37(6): 9-15. (in Chinese)
- [18] 杨福增,牛瀚麟,孙景彬,等. 山地履带拖拉机与农具姿态协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1):414-422.
- YANG Fuzeng, NIU Hanlin, SUN Jingbin, et al. Design and experiment of attitude cooperative control system of mountain crawler tractor and farm tools[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 414-422. (in Chinese)
- [19] MAO Y, WU Y, YAN X, et al. Simulation and experimental research of electric tractor drive system based on modelica[J]. PLOS ONE, 2022, 17(11): 231-251.
- [20] 刘孟楠,周志立,徐立友,等. 基于随机载荷功率谱的电动拖拉机复合能量系统研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2):358-366.
- LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Electric tractor energy system and management strategy research based on load power spectral density[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 358-366. (in Chinese)