

基于多岛遗传算法的电动拖拉机分布式驱动系统优化设计与试验

李贤哲^{1,2} 张明柱^{1,3} 刘孟楠^{2,4} 徐立友^{1,2} 闫祥海^{1,2} 雷生辉^{1,2}

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 智能农业动力装备全国重点实验室, 洛阳 471039;

3. 黄河科技学院工学部, 郑州 450006; 4. 中国一拖集团技术中心, 洛阳 471039)

摘要: 针对分布式驱动电动拖拉机(Distributed drive electric tractor, DDET)牵引效率低、系统能量损耗大的问题, 提出了一种基于多岛遗传算法(Multi-island genetic algorithm, MIGA)的分布式驱动系统参数优化设计与验证方法。根据犁耕作业工况, 建立了拖拉机分布式驱动系统7自由度耦合动力学模型以及轮胎-土壤交互模型, 完成了驱动系统关键部件参数设计和匹配选型。提出基于MIGA的前后轮边传动比参数优化策略, 将轮边传动比作为决策变量, 驱动系统能量损失最小为优化目标, 驱动电机功率和转速为约束条件。搭建Matlab/Simulink-NI PXI联合仿真平台验证了参数优化策略的正确性和实时可执行性。结果表明, 基于MIGA参数优化后的分布式驱动系统各方面性能得到了有效提升。犁耕循环工况下, 拖拉机平均牵引力为10 610 N, 最大牵引功率为31.25 kW; 平均效率提升了0.38%, 驱动电机能耗降低了7.53%。本研究可为分布式驱动电动拖拉机优化设计和系统控制提供理论基础和验证方法。

关键词: 电动拖拉机; 分布式驱动系统; 多岛遗传算法; 优化设计; 联合仿真

中图分类号: S219.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0401-11

OSID:



Optimized Design and Validation of Distributed Drive System for Electric Tractor Based on Multi-island Genetic Algorithm

LI Xianzhe^{1,2} ZHANG Mingzhu^{1,3} LIU Mengnan^{2,4} XU Liyou^{1,2} YAN Xianghai^{1,2} LEI Shenghui^{1,2}

(1. College of Vehicle and Traffic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment, Luoyang 471039, China

3. Engineering Department, Huanghe Science and Technology University, Zhengzhou 450006, China

4. YTO Group Corporation R&D Center, Luoyang 471039, China)

Abstract: The distributed drive system allows for independent control of each wheel, providing greater maneuverability and adaptability to various terrains and working conditions. Additionally, when combined with electric technology, the distributed drive system can reduce emissions, decrease reliance on fossil fuels, and improve sustainability. These advantages position distributed drive electric tractor (DDET) as having broad potential for applications in agriculture and industry. Aiming at the low traction efficiency and high energy consumption of the DDET, a distributed drive system parameter optimization design and verification method based on the multi-island genetic algorithm (MIGA) was proposed. According to the working conditions of plowing operations, a 7-DOF coupled dynamics model of the tractor distributed drive system and a tire-soil interaction model were established. The parameter design and matching selection of key components in the drive system were completed. An MIGA-based optimization strategy for the front and rear wheel-side transmission ratios (WTR) was proposed, taking WTR as the decision variable, minimizing energy losses in the drive system as the optimization objective, and with constraints on the power and speed of the drive motor. This effectively prevented the algorithm from prematurely

收稿日期: 2023-12-26 修回日期: 2024-01-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001203)、河南省重点研发推广项目(222102240088)和国家农业重大专项(NK202216010401)

作者简介: 李贤哲(1996—),男,博士生,主要从事农机新型动力系统智能控制研究, E-mail: lixianzhe0827@163.com

通信作者: 刘孟楠(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事农机新型动力系统与智能控制技术研究, E-mail: liumengnan27@163.com

falling into local optima during the optimization process, improving the efficiency and reliability in obtaining the globally optimal. A Matlab/Simulink – NI PXI joint simulation platform was built to verify the correctness and real-time executability of the parameter optimization strategy. The joint simulation results showed that the distributed drive system optimized based on MIGA achieved effective performance improvements. Under cyclic plowing conditions, the average traction of the tractor was 10 610 N with maximum traction power of 31.25 kW. The average efficiency was increased by 0.38% and energy consumption of the drive motor was decreased by 7.53%. The research result can provide theoretical foundations and verification methodologies for the optimal design and system control of distributed drive electric tractors.

Key words: electric tractor; distributed drive system; multi-island genetic algorithm; optimal design; joint simulation

0 引言

鉴于目前全球温室气体的大幅排放以及不可再生资源的急剧减少,电动拖拉机为绿色农机技术发展开辟了新途径^[1-5]。

驱动系统决定电动拖拉机的主要作业性能,是电动拖拉机能量存储单元与驱动轮之间的纽带^[6-7]。同时,承载多维能量转化以推动电动拖拉机克服田间多变土壤载荷行走和牵引驱动农机具高效作业^[8-10]。但在制造成本和关键技术的制约下,大多数电动拖拉机一般采用单电机或双电机耦合驱动,即动力通过减速齿轮、动力耦合装置、差速机构分配给驱动轮集中式驱动,冗长的传动机构链增加了功率损耗、降低了整机传动效率、减少了传动轴使用寿命^[11-13]。分布式驱动拖拉机采用独立的电机直接驱动 4 个车轮,以 CAN 总线控制系统替代传统的机械传动,在大幅减轻装备质量、提升传动效率、提高轴荷分配合理性的同时,能够实现各个驱动轮转矩独立控制和快速响应,为电动拖拉机机组底盘动力学集成控制提供了独特的优势方案^[14-15]。

DENG 等^[16]研制了分布式驱动电动拖拉机测试样机,并基于 Advisor 软件验证了不同工况下的整体动态性能良好。BAEK 等^[17]设计并评估了一种基于机械系统和电力系统耦合的四轮驱动拖拉机的牵引性能,仿真和试验结果表明,电动拖拉机在高负荷工况下具有较好的牵引性能和较低的滑转率。LI 等^[18]基于公理设计和拓扑学设计方法,对分布式混合动力电动拖拉机的动力总成结构进行了创新设计分析,仿真和试验证明,新型动力系统样机具有节能减排的优势。ZHANG 等^[19]提出了一种基于主动转矩分配的考虑行驶速度和滑移的联合控制方法,并将其应用于独立驱动电动拖拉机,结果表明,在转矩主动分配模式下,拖拉机滑移率、牵引效率和驱动电机能耗均为最优。YAN 等^[20]提出了基于模糊控制的混动拖拉机转矩分配控制策略,联合仿真结果表

明,发动机始终处于高效工作范围内,动力性和经济性得到了改善。DAMANAUSKAS 等^[21]提出了考虑垂直车轮载荷和轮胎压力参数的拖拉机作业性能影响机理,试验结果表明,四轮驱动相较于二轮驱动拖拉机,在越野性能、牵引力、稳定性等方面均具明显优势。

上述研究为分布式驱动电动拖拉机优化设计提供了思路。然而,分布式驱动系统全轮驱动模式下无法完全输出拖拉机全部动力,主要原因在于拖拉机行驶过程中产生了垂向载荷传递现象,导致轮胎与土壤的交互情况产生变化,进而影响拖拉机的牵引性能和生产率。而且,电机控制精度的差异导致驱动力矩无法实时适应负载的高频率变化,导致驱动系统产生不必要的能量损失。因此,需要通过参数优化或动力分配等策略来减少分布式驱动系统的功率损耗。

综上所述,本文根据犁耕工况下拖拉机分布式驱动系统 7 自由度耦合动力学模型以及轮胎-土壤交互模型,完成驱动系统关键部件参数设计和匹配选型。提出基于 MIGA 的前后轮边传动比参数优化策略。搭建 Matlab/Simulink – NI PXI 联合仿真平台验证参数优化策略的实时可执行性。以期提高 DDET 的牵引性能,同时降低功率损耗。

1 结构方案

1.1 功能需求

功能需求为:满足分布式驱动系统需要协调控制的驱动力、转向、制动等,确保拖拉机的动力性能;合理分配和管理电源系统的输出功率,实现拖拉机高效运作;实时确定拖拉机在作业场景中的精确位置,实现作业路径规划。

1.2 传动原理

DDET 的驱动系统结构如图 1 所示,图中 FL、FR、RL、RR 分别表示左前、右前、左后、右后方位。驱动系统主要配置 4 个永磁同步电机 (Permanent

magnet synchronous motor, PMSM) 分布排列, 并通过轮边行星齿轮机构进行减速。其中, 太阳轮与驱动电机主轴相连, 并配备电磁制动器, 用于拖拉机制动; 行星架与车轮相连, 齿圈通过制动器进行固定。动力输出系统采用单电机独立驱动, 匹配高低挡位齿轮以规定标准转速输出。协同控制器根据拖拉机的工作状态和田间路面载荷, 实时调节所有 PMSM 的输出转矩。通过协调 PMSM 开关装置, 将 DDET 分为前电机独立驱动、后电机独立驱动和全轮驱动模式, 保证拖拉机的稳定性, 提高作业效率。

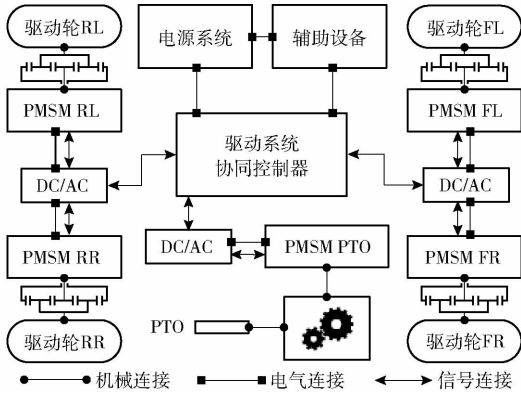


图1 DDET 结构框图

Fig.1 DDET structure schematic

2 驱动系统设计

2.1 牵引动力学模型

为了全面研究 DDET 作业特性, 建立了拖拉机牵引工况 7 自由度动力学模型, 包括车身沿 X 轴的纵向运动、 Y 轴的横向运动、 Z 轴的横摆运动 3 个自由度, 以及每个驱动轮的独立旋转运动 4 个自由度, 如图 2 所示。

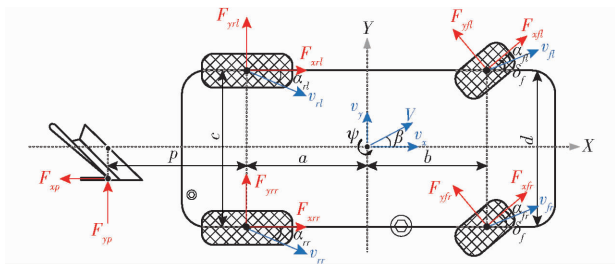


图2 DDET 7 自由度牵引动力学模型

Fig.2 DDET 7-DOF traction dynamic model

因此, 推导得到 DDET 牵引机组耦合动力学方程为

$$m \dot{v}_x - m v_y \psi = (F_{xfl} + F_{xfr}) \cos \delta_f - (F_{yfl} + F_{yfr}) \sin \delta_f + F_{xrl} + F_{xrr} - F_{xp} \quad (1)$$

$$m \dot{v}_y + m v_x \psi = (F_{xfl} + F_{xfr}) \sin \delta_f + (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta_f + F_{yrl} + F_{yrr} + F_{yp} \quad (2)$$

$$I_z \dot{\psi} = (F_{xfl} \sin \delta_f + F_{yfl} \cos \delta_f + F_{xfr} \sin \delta_f + F_{yfr} \cos \delta_f) b - (F_{yrl} + F_{yrr}) a + (-F_{xfl} \cos \delta_f + F_{yfl} \sin \delta_f + F_{xfr} \cos \delta_f - F_{yfr} \sin \delta_f) \frac{d}{2} + (-F_{xrl} + F_{xrr}) \frac{c}{2} - F_{yp} (p + a) \quad (3)$$

式中 m ——拖拉机结构质量, kg

δ_f ——前轮转角, ($^\circ$)

ψ ——质心侧偏角速度, rad/s

$\dot{\psi}$ ——质心侧偏角加速度, rad/s²

I_z ——车身绕 Z 轴的转动惯量, kg·m²

F_{xi} 、 F_{yi} ——轮胎纵向力和横向力 (i 表示 fl 、 fr 、 rl 、 rr , 即左前轮、右前轮、左后轮、右后轮, 下同), N

F_{xp} 、 F_{yp} ——犁铧纵向力和横向力, N

v_x 、 v_y ——车身纵向速度和横向速度, m/s

$\dot{v}_x$ 、 $\dot{v}_y$ ——车身纵向和横向速度变化率, m/s²

a 、 b ——质心到后轮和前轮距离, m

c 、 d ——后轮和前轮轮距, m

p ——犁铧牵引点到后轴距离, m

每个车轮旋转动力学方程表示为

$$\begin{cases} I_{wf} \dot{\omega}_{fl} = T_{fl} - f F_{zfl} r_{wf} - F_{xfl} r_{wf} \\ I_{wf} \dot{\omega}_{fr} = T_{fr} - f F_{zfr} r_{wf} - F_{xfr} r_{wf} \\ I_{wr} \dot{\omega}_{rl} = T_{rl} - f F_{zrl} r_{wr} - F_{xrl} r_{wr} \\ I_{wr} \dot{\omega}_{rr} = T_{rr} - f F_{zrr} r_{wr} - F_{xrr} r_{wr} \end{cases} \quad (4)$$

式中 I_{wf} 、 I_{wr} ——前、后驱动轮转动惯量, kg·m²

r_{wf} 、 r_{wr} ——前、后驱动轮有效半径, m

$\dot{\omega}_i$ ——驱动轮角加速度, rad/s²

T_i ——驱动轮驱动力矩, N·m

F_{zi} ——驱动轮垂向载荷, N

f ——滚动阻力系数

式(4)中, 垂向载荷 F_{zi} 不仅关系到车轮滚动阻力的计算, 而且是拖拉机车身模型和轮胎模型结合的关键参数。表示为

$$\begin{cases} F_{zfl} = \frac{mga}{2(a+b)} - \frac{ma_x h}{2(a+b)} - \frac{ma_y ha}{(a+b)d} - \frac{F_{zp} p}{2(a+b)} \\ F_{zfr} = \frac{mga}{2(a+b)} - \frac{ma_x h}{2(a+b)} + \frac{ma_y ha}{(a+b)d} + \frac{F_{zp} p}{2(a+b)} \\ F_{zrl} = \frac{mgb}{2(a+b)} + \frac{ma_x h}{2(a+b)} - \frac{ma_y hb}{(a+b)c} - \frac{F_{zp} (a+b+p)}{2(a+b)} \\ F_{zrr} = \frac{mgb}{2(a+b)} + \frac{ma_x h}{2(a+b)} + \frac{ma_y hb}{(a+b)c} + \frac{F_{zp} (a+b+p)}{2(a+b)} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $a_x = \dot{v}_x - v_y \psi$ $a_y = \dot{v}_y - v_x \psi$

式中 h ——质心高度, m

F_{zp} ——犁铧垂向载荷, N

a_x 、 a_y ——车身纵向和横向加速度, m/s²

2.2 轮胎-土壤交互模型

拖拉机作业时轮胎作用于松软地面,轮下土壤发生明显沉陷,轮胎与土壤接触区域如图 3 所示。

根据轮壤交互模型,土壤作用在轮胎上的正应力表示为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos \frac{r_w - z_1}{r_w} \\ \theta_2 = c_3 \theta_1 \\ \theta_m = (c_1 + c_2 \sigma_i) \theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 θ_1 、 θ_2 ——轮胎进入角和离开角, (°)
 θ_m ——正应力最大值,同时也是纵向和横向最大剪应力点, (°)
 r_w ——轮胎有效半径, m

$$\begin{cases} p(\theta_1) = \left(\frac{k_c}{b_w} + k_\varphi \right) r_w^n (\cos \theta + \cos \theta_1)^n & (\theta_m < \theta \leq \theta_1) \\ p(\theta_2) = \left(\frac{k_c}{b_w} + k_\varphi \right) r_w^n \left[\cos \left(\theta_1 - \frac{\theta - \theta_2}{\theta_m - \theta_2} (\theta_1 - \theta_m) \right) - \cos \theta_1 \right]^n & (\theta_2 \leq \theta \leq \theta_m) \end{cases} \quad (7)$$

式中 b_w ——轮胎宽度, m
 $p(\theta)$ ——正应力, N
 k_c 、 k_φ ——土壤粘聚模量和摩擦模量
 n ——土壤沉降指数

轮胎纵向和横向剪应力分布函数为

$$\begin{cases} \tau_x(\theta) = (C + p(\theta) \tan \varphi) (1 - e^{-j_x/k_x}) \\ j_x = r_w [\theta_1 - \theta - (1 - \sigma_{ij})(\sin \theta_1 - \sin \theta)] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tau_y(\theta) = (C + p(\theta) \tan \varphi) (1 - e^{-j_y/k_y}) \\ j_y = r_w (1 - \sigma_{ij})(\theta_1 - \theta) \tan \alpha_i \end{cases} \quad (9)$$

式中 C ——土壤粘聚力, N
 φ ——土壤内摩擦角, (°)
 $\tau_x(\theta)$ 、 $\tau_y(\theta)$ ——纵向和横向剪应力, N
 k_x 、 k_y ——纵向和横向土壤弹性剪切模量, MPa
 j_x 、 j_y ——纵向和横向土壤剪切变形量, m
 α_i ——轮胎侧偏角, (°)

将上述正应力、纵向剪应力和横向应力进行积分,土壤与轮胎之间的作用力表达式为

$$\begin{cases} F_{xi} = r_w b_w \int_0^{\theta_1} (\tau_x(\theta) \cos \theta - p(\theta) \sin \theta) d\theta \\ F_{yi} = r_w b_w \int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau_y(\theta) \cos \theta d\theta \\ F_{zi} = r_w b_w \int_{\theta_2}^{\theta_1} (p(\theta) \cos \theta + \tau_x(\theta) \sin \theta) d\theta \end{cases} \quad (10)$$

此外,根据文献[22]提出的拖拉机理论牵引性能预测模型,式(6)中轮胎滑转率可以表示为

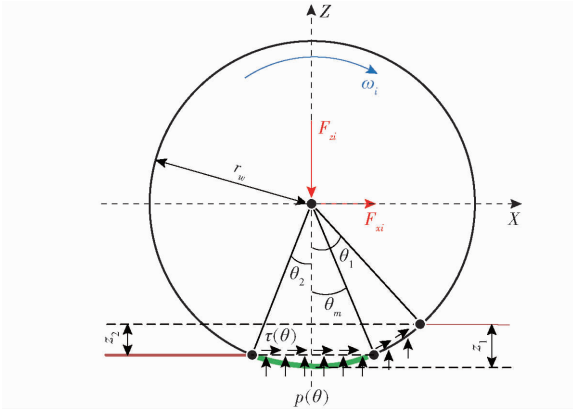


图 3 轮胎-土壤交互模型
Fig. 3 Tire - soil interaction model

σ_i ——轮胎滑转率
 c_1 、 c_2 、 c_3 ——接触角度系数

$$\sigma_i = \sigma^* \ln \frac{\phi_{\max}}{\phi_{\max} - (a + b) (T_i / r_w) / (bmg + hT_i / r_w)} \quad (11)$$

式中 σ^* 、 $\phi_{\max}$ ——拟合系数,在普通土壤条件下推荐值为 0.075 7 和 0.624

轮胎侧偏角 α_i 可以表示为

$$\begin{cases} \alpha_{fl} = \arctan \frac{v_y + b\psi}{v_x - 0.5d\psi} - \delta_f \\ \alpha_{fr} = \arctan \frac{v_y + b\psi}{v_x + 0.5d\psi} - \delta_f \\ \alpha_{rl} = \arctan \frac{v_y - a\psi}{v_x - 0.5c\psi} \\ \alpha_{rr} = \arctan \frac{v_y - a\psi}{v_x + 0.5c\psi} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 参数匹配

(1) 驱动电机参数匹配

驱动电机峰值功率需满足犁耕作业工况、低速爬坡工况、最高速度行驶工况、最大加速度行驶工况要求。根据动力学耦合方程,有

$$\begin{cases} P_{m1} \geq \frac{F_T v_1}{3\,600 \eta_T \beta_m} \\ P_{m2} = \frac{v_2}{3\,600 \eta_c} \left[m (\sin \gamma + f \cos \gamma) g + \frac{C_d A v_3^2}{21.15} \right] \\ P_{m3} = \frac{v_3}{3\,600 \eta_c} \left(mgf + \frac{C_d A v_3^2}{21.15} \right) \\ P_{m4} = \frac{v_4}{3\,600 \eta_c} \left(mgf + \frac{C_d A v_3^2}{21.15} + \delta_m m \frac{dv}{dt} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中 P_{m1} 、 P_{m2} 、 P_{m3} 、 P_{m4} ——犁耕作业、低速爬坡、最高速度行驶、最大加速速度行驶功率,kW
 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 ——犁耕作业速度、爬坡速度、最高行驶速度、最大加速速度行驶速度,km/h
 F_T ——拖拉机牵引力,kN
 η_T ——拖拉机牵引效率
 β_m ——驱动电机功率储备系数
 η_c ——机械传动效率
 γ ——坡度,(°)
 C_d ——空气阻力系数
 A ——拖拉机迎风面积,m²
 δ_m ——质量转换系数

驱动电机峰值功率大于所有工况条件下的需求功率,额定功率则根据峰值功率进行估算,有

$$\begin{cases} P_{me_max} = \max(P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}, P_{m4}) \\ P_{me_rated} = P_{me_max} / \vartheta_{me} \end{cases} \quad (14)$$

式中 P_{me_rated} ——驱动电机额定功率,kW
 P_{me_max} ——驱动电机峰值功率,kW
 ϑ_{me} ——驱动电机过载系数

(2) PTO 电机参数匹配

当拖拉机进行旋耕作业时,由 PTO 电机独立驱动旋耕机动力输出。此外,还要考虑旋耕中的负载波动,有

$$\begin{cases} P_r = (k_r h_r B + mgf) v_r / 36 \\ P_{mr_rated} = 1.2 P_r / \eta_T \end{cases} \quad (15)$$

式中 P_r ——旋耕机需求功率,kW
 k_r ——旋耕土壤比阻,N/cm²
 h_r ——耕深,cm
 B ——旋耕机工作耕幅,cm
 v_r ——旋耕作业速度,km/h
 P_{mr_rated} ——PTO 电机额定功率,kW

(3) 轮边传动比计算

为了使拖拉机达到设计的动力性能,需要设计轮边减速器对驱动电机输出性能参数进行修正。轮边传动比下限值由最高车速和驱动电机最高转速确定,上限值由驱动电机最大转矩和牵引作业对应的最大驱动阻力确定,有

$$\frac{0.377 n_{me_max} r_w}{v_3} \leq i_n \leq \frac{F_{qmax} r_w}{2 T_{me_max} \eta_c} \quad (16)$$

式中 i_n ——轮边传动比设计值
 n_{me_max} ——驱动电机最高转速,r/min
 T_{me_max} ——驱动电机最大转矩,N·m
 F_{qmax} ——犁耕作业最大驱动阻力,N

3 参数优化策略

3.1 多岛遗传算法

遗传算法是一种模拟自然界生物进化的全局搜索优化方法。根据生物进化中的适者生存和优胜劣汰原则,通过编码和不断进化,最终得到最优解函数值。然而,传统遗传算法在编码上可能存在不规则性和不准确性,并且可能出现过早收敛的问题。因此,文献[23]在传统遗传算法的基础上进行改进,提出了多岛遗传算法。

多岛遗传算法本质上是对并行分布式遗传算法的改进^[24]。MIGA 将后代种群划分为若干个岛屿,经过一定的代数间隔在岛屿之间迁移,以增加种群的多样性。这有效地防止了算法在优化过程中提前陷入局部最优解,提高了求解效率和最优解的可靠性。每个岛上的个体都可以被选择、杂交和突变,可以在岛上挑选优秀的个体定期在不同的岛屿间迁徙。该算法仅对设计点进行评估,不计算函数梯度和连续性,具有较强的适应性。最后,当迭代次数达到最大值,输出最优解^[25]。

3.2 决策变量、目标函数和约束

驱动系统作为 DDET 的核心部件之一,轮边传动比决定驱动电机的高效工作区间,其参数设计和性能对拖拉机动力性和经济性影响具有决定性作用。因此,选择前后轮边传动比作为决策变量,其约束条件如式(16)所示,决策变量 i_{gf} 范围为 12 ~ 30, i_{gr} 范围为 11 ~ 38。

为了优化每个电机的工作点,提高整机作业经济性,以驱动系统损失能量最小为优化目标函数,表示为

$$J = \sum_{i=fl,fr,rl,rr} L_{me}(t) + L_{mr}(t) + L_{gear}(t) \quad (17)$$

式中 J ——优化目标函数
 L_{me} ——驱动电机损失能量,W·h
 L_{mr} ——PTO 电机损失能量,W·h
 L_{gear} ——传动机构损失能量,W·h

则系统各部分损失能量分别表示为

$$\begin{cases} L_{me}(t) = \frac{T_{me}(t) n_{me}(t)}{9549} \frac{1 - \eta_{me}(t)}{\eta_{me}(t)} \frac{\text{sign}(T_{me})}{\text{sign}(T_{me})} \\ L_{mr}(t) = \frac{T_{mr}(t) n_{mr}(t)}{9549} \frac{1 - \eta_{mr}(t)}{\eta_{mr}(t)} \frac{\text{sign}(T_{mr})}{\text{sign}(T_{mr})} \\ L_{gear}(t) = \frac{T_{me}(t) n_{me}(t) + T_{mr}(t) n_{mr}(t)}{9549} (1 - \eta_c(t)) \end{cases} \quad (18)$$

式中 $T_{me}(t)$ 、 $n_{me}(t)$ 、 $\eta_{me}(t)$ ——驱动电机瞬时转矩、转速和效率

$T_{mr}(t)$ 、 $n_{mr}(t)$ 、 $\eta_{mr}(t)$ ——PTO 电机瞬时转矩、转速和效率
 $\eta_c(t)$ ——传动系统瞬时总效率
 $\text{sign}(\cdot)$ ——符号函数

同时,为了保证驱动系统安全合理运行,还需要施加约束

$$\begin{cases} T_{me_min}(n_{me}(t)) \leq T_{me}(t) \leq T_{me_max}(n_{me}(t)) \\ T_{mr_min}(n_{mr}(t)) \leq T_{mr}(t) \leq T_{mr_max}(n_{mr}(t)) \\ n_{me_min} \leq n_{me}(t) \leq n_{me_max} \\ n_{mr_min} \leq n_{mr}(t) \leq n_{mr_max} \end{cases} \quad (19)$$

式中,下标 min 和 max 分别表示参数下限值和上限值。

3.3 优化过程

根据 MIGA 种群生成原理和优化目标,建立算法流程如图 4 所示。

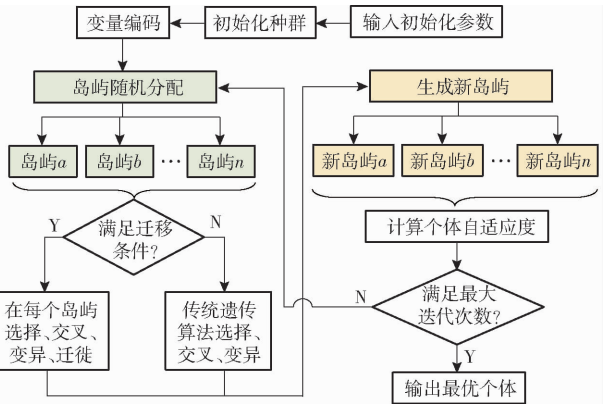


图 4 基于 MIGA 的 WTR 优化流程图

Fig.4 Flowchart of WTR optimization based on MIGA

具体的算法步骤如下:

(1) 初始化群体和编码

随机生成多个种群作为算法的起始群体,进行非优势分类。MIGA 初始化优化参数如表 1 所示。每个个体由一组编码后的设计变量组成。MIGA 采用格雷码编码,表达式为

$$\begin{cases} g_m = b_m \\ g_i = b_{i+1} \oplus b_i \quad (i = m - 1, m - 2, \dots, 1) \end{cases} \quad (20)$$

式中 g_m —— m 位的格雷码
 b_m —— m 位的二进制码
 $\oplus$ ——编码运算符号

表 1 MIGA 初始参数

Tab.1 Initial MIGA parameters

参数	数值	参数	数值
子种群数量	10	变异率	0.01
岛屿数量	6	迁移率	0.02
遗传代数	11	迁移间隔	5
交叉率	0.9	迭代次数	100

(2) 选择、交叉和变异
对每个子群体分别进行遗传算法的选择、交叉和变异操作,产生下一代群体。选择操作保留较优的个体;交叉操作结合不同个体产生新个体;变异操作维持群体多样性。

(3) 迁移和合并
根据预设的迁移概率,选择部分个体进行迁移。迁移方式包括随机迁移、最优迁移、相邻迁移等。迁移使各子群体之间实现信息交换和种群融合。每隔一定代数,将所有子群体合并为一个大群体。然后将大群体重新分割为多个子群体,新的子群体将包含不同的个体。

(4) 适应度计算
对每代个体的适应度进行评价,判断驱动电机和 PTO 电机转矩和转速是否满足约束条件。如果任何一个约束条件不满足则适应度设定为 0。另一方面,如果满足所有约束条件,则根据适应度函数评估个体自适应度,即计算其目标函数值。

(5) 结果判定
迭代结束时,比较岛屿内精英群体中新后代和前后代的最优个体,并检查最优个体在迭代中是否保持不变。如果是,迭代结束,输出最优个体自适应度;反之,则重复步骤(2)~(4)。

4 试验

4.1 实例设计

DDET 牵引性能主要体现在拖拉机是否能够满足作业过程中对牵引性能、爬坡性能、加速性能、提升性能、最高速度、持续作业时间、PTO 输出功率的要求^[26]。本文以中国第一台氢燃料电池分布式驱动电动拖拉机 ET504-H 为例开展研究,基本参数和性能指标如表 2 所示^[27]。

根据参数匹配和选型结果,驱动电机和 PTO 电机的具体参数如表 3 所示。

4.2 测试设备

为了验证参数优化方法的正确性和实时可执行性,基于 Matlab/Simulink 建立了参数优化验证模型,如图 5 所示。同时,结合 National Instruments 开发的 PXI 控制器硬件在环测试系统搭建了联合仿真平台,如图 6 所示。上位机配置环境基于 Windows 10 64 bit 操作系统,32 GB 内存,CPU@3.2 GHz。PXI 配置环境基于 VeriStand 软件,模拟量输入输出采用 PXIe-6363 板卡,拥有多功能 I/O 模块,并通过 PCI Express 总线提供高兼容性支持。

4.3 测试方案

首先,通过田间试验采集拖拉机犁耕工况牵引

表 2 DDET 基本性能参数

Tab.2 DDET basic performance parameters		
参数		数值
基础参数	外形尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	3 650×2 450×1 800
	服务质量/kg	2 400
	最大整备质量/kg	4 500
	前、后轴距/m	1. 16、0. 63
	前、后轮距/m	1. 625、1. 65
	前、后轮滚动半径/m	0. 42、0. 58
	前、后轮转动惯量/(kg·m ²)	3. 35、7. 40
	车身转动惯量/(kg·m ²)	12 240
	低、高档 PTO 标准转速/(r·min ⁻¹)	540、1 000
	最高车速/(km·h ⁻¹)	≥25
性能指标	最大爬坡度/%	≥15
	场地加速时间/s	≤10
	最大牵引力/kN	≥8
	牵引功率/kW	≥15
	连续运行时间/h	≥4
	最大提升力/kN	≥5
	PTO 输出功率/kW	≥10

表 3 电机性能参数

Tab.3 Motor performance parameters		
参数		数值
驱动电机	额定电压/V	520
	额定功率、峰值功率/kW	5. 8、8. 7
	额定转速、最高转速/(r·min ⁻¹)	571、1 200
	额定转矩、最大转矩/(N·m)	98、210
PTO 电机	额定电压/V	540
	额定功率、峰值功率/kW	6. 3、13. 8
	额定转速、最高转速/(r·min ⁻¹)	1 460、3 000
	额定转矩、最大转矩/(N·m)	40、115

阻力和作业速度信号,经过 NI 9201 采集卡转换接口将模拟量输入信号传递给硬件实时系统。基于 Speedgoat 硬件实时系统设置犁耕作业土壤为砂壤土,土壤比阻为 3. 92 N/cm²,配套农机具为东方红

1L-425 铧式犁,工作幅宽为 100 cm,耕深为 18 cm。在 Matlab/Simulink 环境中,将驱动系统控制代码计算得到的前后轮边传动比值通过报文信息传递给驱动系统控制器。其次,上位机通过采集驱动电机转速信号,将其与目标车速的差值转换为电压控制信号发送给驱动系统控制器,从而跟踪电机转速到目标车速,实现速度控制。然后,基于 VeriStand 应用软件针对 PXI 实时硬件配置 I/O 通道、激励生成和主机通讯,执行系统命令,完成指标交互和反馈,并对其进行监控。最后,经过 PXI 测试平台计算得到拖拉机的牵引特性、作业效率和能量消耗。

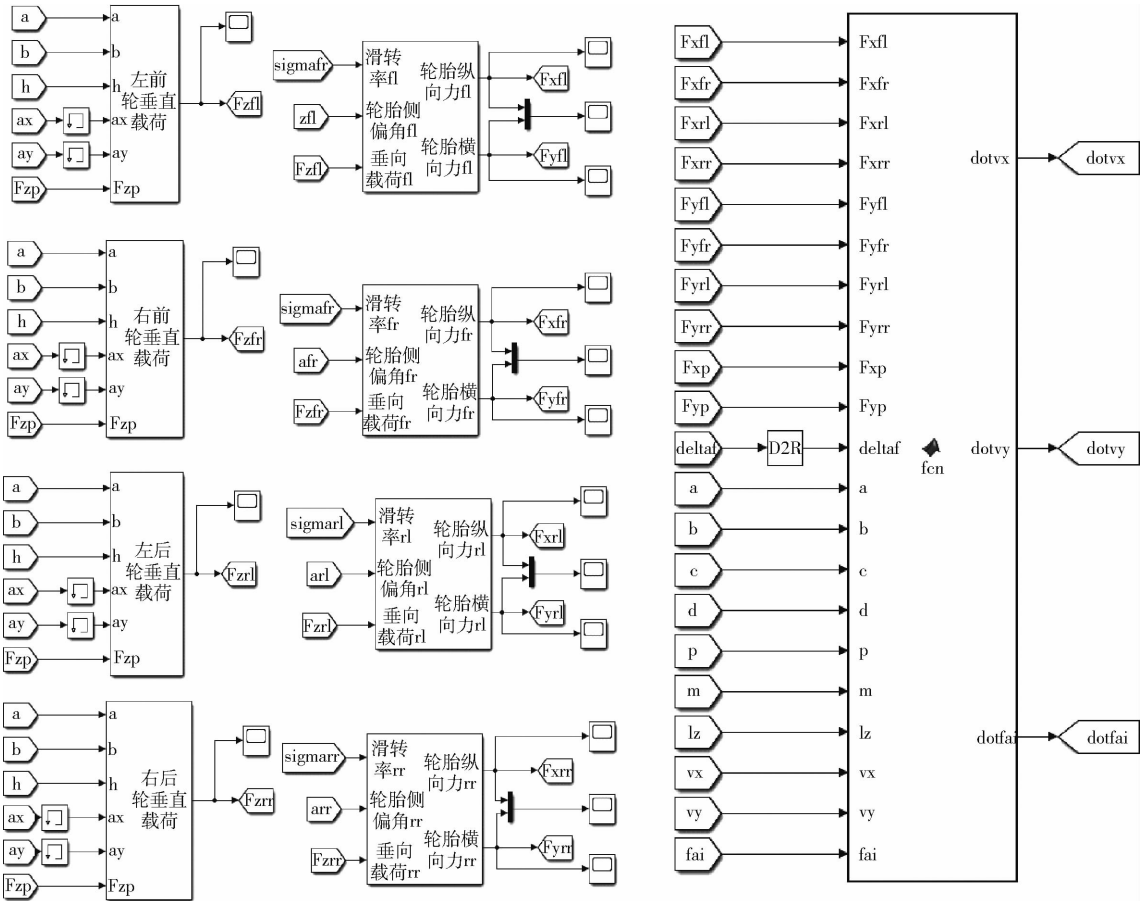


图 5 Matlab/Simulink 参数优化验证模型

Fig. 5 Matlab/Simulink parameter optimization validation model

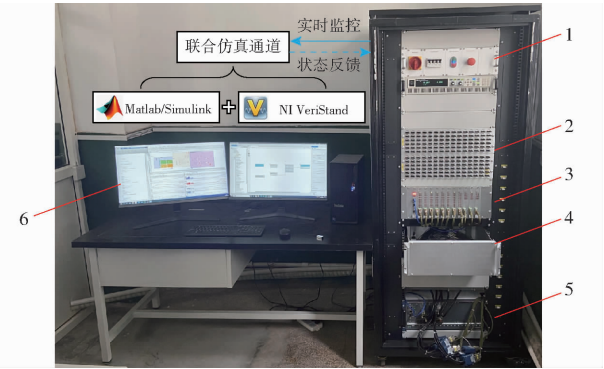


图 6 Matlab/Simulink - NI PXI 联合仿真平台

Fig. 6 Matlab/Simulink - NI PXI joint simulation platform

1. 程控电源 2. 故障注入模块 3. 信号调制模块 4. 驱动系统
协同控制器 5. 硬件实时系统 6. 上位机

4.4 试验结果分析

图 7 为拖拉机犁耕作业信息实际测量结果,包括牵引阻力和作业速度,其中牵引阻力作为联合仿真模型的输入变量,测试作业速度作为目标车速。通过将仿真模型计算车速与目标车速的差值转换为控制信号发送给驱动系统控制器,从而跟踪电机转

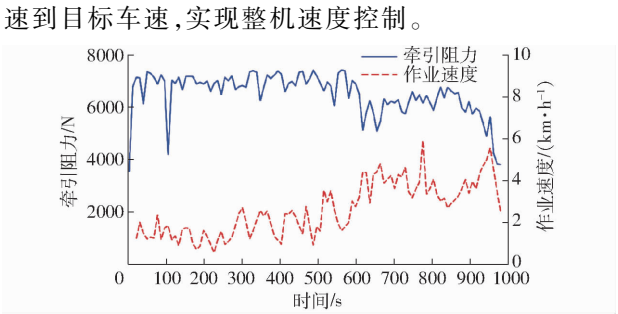


图 7 犁耕作业信息实测结果

Fig. 7 Test results of plowing operation information

基于 MIGA 的前后轮边传动比优化结果如图 8 所示。其中,图 8a 为前轮边传动比优化过程,在 18 代之后缩小了搜索范围,第 36 代时由于岛间迁移导致自适应度出现了跳跃现象,在 97 代后逐渐稳定,得到最优解为 13.40。图 8b 为后轮边传动比优化过程,在 26 代后快速收敛,之后偶尔出现波动,主要是优化过程中交叉变异造成的,且在此过程中产生了较多优良个体,最终收敛结果为 15.60。

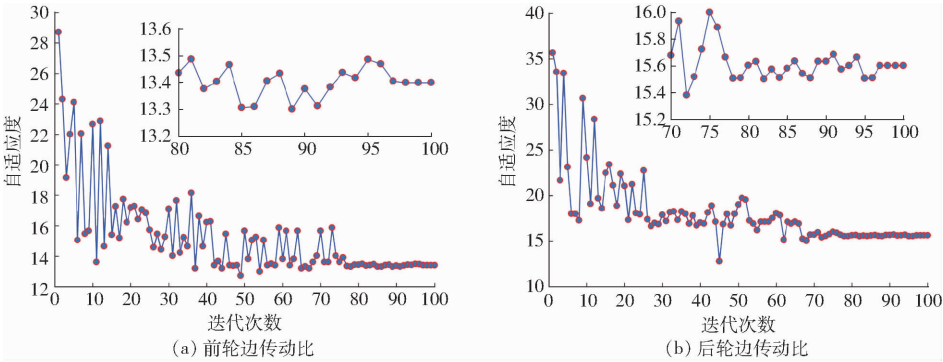


图 8 轮边传动比优化结果

Fig. 8 Wheel-side transmission ratio optimization results

图 9 为驱动系统犁耕工况下分布式驱动系统 4 台永磁同步电机协同作业情况。驱动电机特性数据由中国一拖集团技术中心提供。从图 9 可以看出,4 台电机能够实现良好的协同作业,转速准确跟踪拖拉机作业速度,工作点位基本位于高效率区($\geq 85\%$)。值得注意的是,前轮驱动电机输出转矩普遍低于后轮,主要原因在于犁耕作业过程中产生了垂向载荷转移现象。由于前轴载荷减小,为了防止轮胎出现负荷不足而导致拖拉机失控,需要相应减小前轮驱动电机的输出转矩,而后轴载荷增加,可以提供较大的附着力,因此允许后轮驱动电机的输出转矩更大。

图 10 为 PTO 电机工作特性联合仿真结果。配套机具为东方红 1GQN - 125D 型旋耕机,动力范围为 6 ~ 12 kW、耕幅为 125 cm、耕深为 14 cm、连接方式为标准三点悬挂。从图 10 可以看出,低高速 PTO

转速(540 r/min 和 1 000 r/min)分别对应电机转速为 1 200 r/min 和 1 500 r/min,与此对应的齿轮传动比为 2.3 和 1.5,输出功率范围为 4.5 ~ 12.9 kW。联合仿真结果验证了 PTO 电机能够在标准转速范围内(± 50 r/min)有效输出转矩,且位于电机高效率区间。

图 11 为优化前后系统瞬时效率求解结果。优化策略改善了电机的工作点,避免长时间超负荷运转,从而驱动系统效率得到提升,优化后平均效率为 84.16%,相较于优化前(83.84%)平均提升 0.38%。

图 12 为 DDET 牵引力计算结果,可以看出,优化后的拖拉机能够获得更大的牵引力,提高复杂地形中的通过性,平均牵引力为 10 610 N,相较于优化前(9 905 N)提高 7.11%,且最高牵引力达到 19 210 N,满足设计要求。

图 13 为牵引功率计算结果,拖拉机能够按照犁

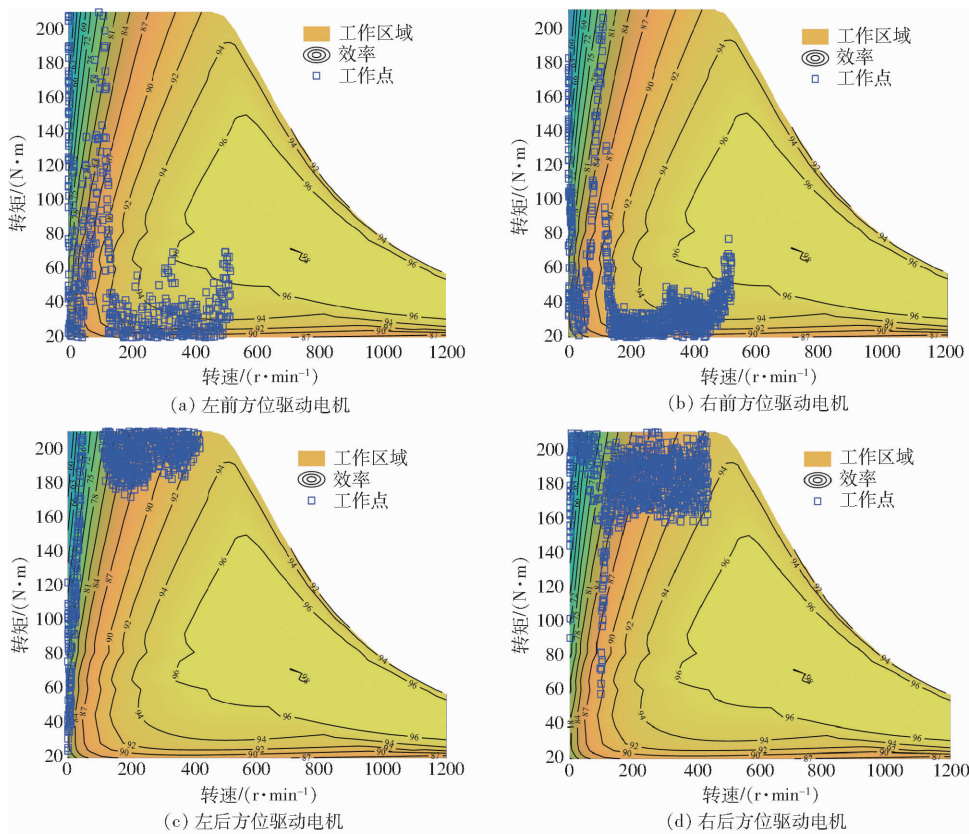


图 9 驱动电机协同作业特性曲线

Fig. 9 Drive motors cooperative operation characteristic curves

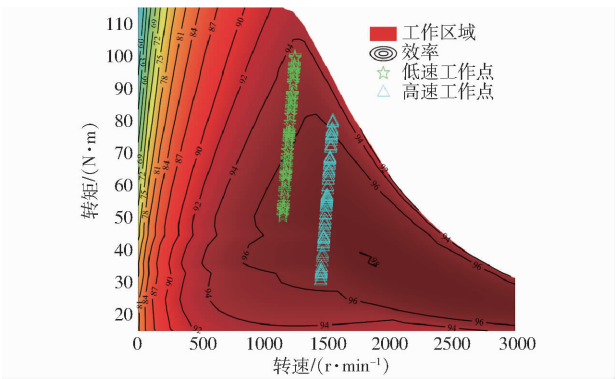


图 10 PTO 电机作业特性曲线

Fig. 10 PTO motor operation characteristic curves

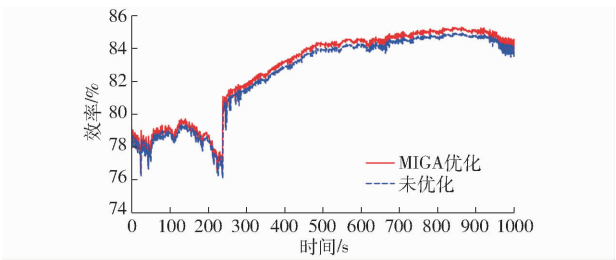


图 11 驱动系统瞬时效率

Fig. 11 Drive system instantaneous efficiency

耕负载调节功率输出,在联合仿真时间内,优化后的拖拉机最大牵引功率达到 31.25 kW,平均牵引功率为 13.33 kW,相较于优化前(12.47 kW)提升 6.89%,减少了额外功率损耗,提高了拖拉机作业生产率。

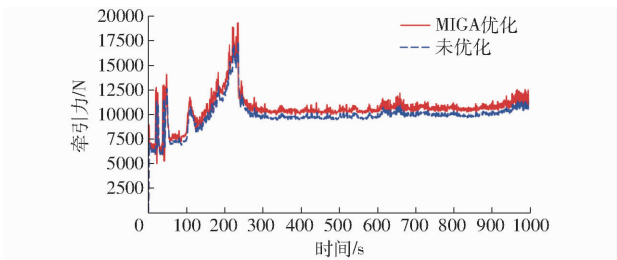


图 12 牵引力计算结果

Fig. 12 Traction force calculation results

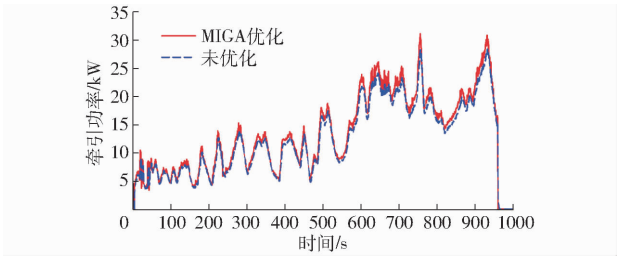


图 13 牵引功率计算结果

Fig. 13 Traction power calculation results

图 14 为驱动电机能耗计算结果,优化后的 WTR 可以使驱动电机工作在经济区,驱动电机总能耗为 25 006 W·h,相较于优化前(27 045 W·h)降低 7.53%,有利于降低排放和减少环境污染。

将拖拉机作业性能优化结果量化处理,如表 4 所示,优化后的 DDET 各方面性能相较于优化前得到了有效提升。

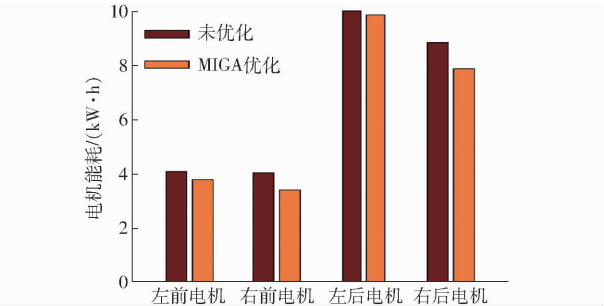


图 14 驱动电机能耗计算结果

Fig. 14 Drive motor energy consumption calculation results

表 4 优化前后性能对比

Tab. 4 Performance comparison before and after optimization

性能指标	平均效率/ %	平均牵引 力/N	平均牵引 功率/kW	电机能耗/ (W·h)
优化前	83.84	9 905	12.47	27 045
优化后	84.16	10 610	13.33	25 006
相对误差/%	0.38	7.11	6.89	7.53

5 结论

(1)针对 DDET 牵引效率低、系统能量损耗大

的问题,提出了一种基于 MIGA 的分布式驱动系统参数优化设计与验证方法。建立了拖拉机分布式驱动系统 7 自由度耦合动力学模型和轮胎-土壤交互模型,完成了驱动系统关键部件参数设计和匹配选型。

(2)基于 MIGA 的前后轮边传动比参数优化策略,有效防止了传统遗传算法在优化过程中提前陷入局部最优解,提高了求解效率和最优解的可靠性,实现了 DDET 全局最优参数匹配和系统控制。

(3)搭建了 Matlab/Simulink - NI PXI 联合仿真平台。结果表明,基于 MIGA 参数优化后的分布式驱动系统各方面性能得到了有效提升。犁耕循环工况下,拖拉机平均牵引力为 10 610 N,最大牵引功率为31.25 kW;平均效率提升 0.38%,电机能耗降低 7.53%。

(4)联合仿真结果证明,参数优化策略准确可行,符合设计目标。研究可为分布式驱动电动拖拉机优化设计和系统控制提供新的理论基础和验证方法。

参 考 文 献

[1] LI X, ZHANG M, YAN X, et al. Power allocation strategy for fuel cell distributed drive electric tractor based on adaptive multi-resolution analysis theory[J]. Energy, 2023, 284: 129350.

[2] 徐立友,张俊江,闫祥海,等. 农业装备电动化技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(9):1-12.

XU Liyou,ZHANG Junjiang,YAN Xianghai,et al. Review of research for agricultural equipment electrification technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):1-12. (in Chinese)

[3] ABBASI K R, SHAHBAZ M, ZHANG J, et al. Analyze the environmental sustainability factors of China: the role of fossil fuel energy and renewable energy[J]. Renewable Energy, 2022, 187: 390-402.

[4] KHAN I, ZAKARI A, AHMAD M, et al. Linking energy transitions, energy consumption, and environmental sustainability in OECD countries[J]. Gondwana Research, 2022, 103: 445-457.

[5] 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(增刊1):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(Supp.1):348-364. (in Chinese)

[6] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2018,49(8):1-17.

XIE Bin,WU Zhongbin,MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):1-17. (in Chinese)

[7] 李贤哲,刘孟楠,徐立友,等. 拖拉机串联式液力机械复合传动系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1):406-413.

LI Xianzhe,LIU Mengnan,XU Liyou, et al. Design and test of tractor serial hydraulic and mechanical hybrid transmission system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):406-413. (in Chinese)

[8] LIU M, LI Y, XU L, et al. General modeling and energy management optimization for the fuel cell electric tractor with mechanical shunt type[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108178.

[9] 张俊江,冯港辉,徐立友,等. 基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机节能控制[J]. 农业机械学报,2023,54(5):396-406.

ZHANG Junjiang,FENG Ganghui,XU Liyou, et al. Energy-saving control of hybrid tractor based on Pontryagin's minimum principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):396-406. (in Chinese)

[10] 张明柱,王界中,王建华,等. 提高燃油经济性的拖拉机变速控制策略[J]. 农业工程学报,2020,36(1):82-89.

ZHANG Mingzhu,WANG Jiezhong,WANG Jianhua, et al. Speed changing control strategy for improving tractor fuel economy [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 82-89. (in Chinese)

[11] 张延安,杜岳峰,毛恩荣,等. 基于改进 NSGA-II 的大功率拖拉机变速箱箱体多目标优化[J]. 农业机械学报,2022, 53(增刊2):310-319.

ZHANG Yan'an, DU Yuefeng, MAO Enrong, et al. Multi-objective optimization of high-horsepower tractor gear box based on improved NSGA-II [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (Supp. 2) : 310 – 319. (in Chinese)

[12] 刘孟楠, 李书苑, 徐立友, 等. 拖拉机双向耦合电驱动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)

[13] 闫祥海, 魏海江, 刘孟楠, 等. 基于充油流量与曝气程度的拖拉机动力换向性能研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8) : 381 – 393. YAN Xianghai, WEI Haijiang, LIU Mengnan, et al. Dynamic change direction of tractor based on oil filling flow and aeration degree [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8) : 381 – 393. (in Chinese)

[14] 高辉松, 朱思洪. 电动拖拉机传动系设计理论与方法研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1) : 140 – 145.

[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 (增刊 2) : 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 (Supp. 2) : 530 – 543. (in Chinese)

[16] DENG X, SUN H, LU Z, et al. Research on dynamic analysis and experimental study of the distributed drive electric tractor [J]. Agriculture, 2022, 13(1) : 40.

[17] BAEK S Y, BAEK S M, JEON H H, et al. Traction performance evaluation of the electric all-wheel-drive tractor [J]. Sensors, 2022, 22(3) : 785.

[18] LI J, WU X, ZHANG X, et al. Design of distributed hybrid electric tractor based on axiomatic design and extenics [J]. Advanced Engineering Informatics, 2022, 54 : 101765.

[19] 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.

[20] YAN X, ZHANG H, LI X, et al. Control strategy of torque distribution for hybrid four-wheel drive tractor [J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(7) : 190.

[21] DAMANAUSKAS V, JANULEVIČIUS A. Differences in tractor performance parameters between single-wheel 4WD and dual-wheel 2WD driving systems [J]. Journal of Terramechanics, 2015, 60 : 63 – 73.

[22] 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建立与试验[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)

[23] XU Y, ZHANG H, YANG Y, et al. Optimization of energy management strategy for extended range electric vehicles using multi-island genetic algorithm [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 61 : 106802.

[24] AGYEMAN P K, TAN G, ALEX F J, et al. Parameter matching, optimization, and classification of hybrid electric emergency rescue vehicles based on support vector machines [J]. Energies, 2022, 15(19) : 7071.

[25] ZHANG Q, LUO Y, LIN W, et al. Control and optimisation of a dual-motor coupling drive system of pure electric vehicle based on multi-island genetic algorithm [J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2021, 13(1) : 21 – 37.

[26] 李贤哲, 张明柱, 刘孟楠, 等. 基于自适应多分辨率分析的电动拖拉机驱动功率分配策略[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23) : 55 – 66. LI Xianzhe, ZHANG Mingzhu, LIU Mengnan, et al. Drive power allocation strategy for electric tractor based on adaptive multi-resolution analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(23) : 55 – 66. (in Chinese)

[27] LI X, ZHANG M, YAN X, et al. Real-time estimation of barycenter position for fuel cell distributed drive electric tractor based on derived UKF [J/OL]. Vehicle System Dynamics, 2024 : 1 – 25. <https://doi.org/10.1080/00423114.2023.2300273>.