doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.007

基于牵引作业负载匹配的四电机双耦合电动拖拉机多驱动模式节能控制研究

赵子豪[1,2]　谢　斌[1,2]　温昌凯[1,2]　牛泽众[1,2]　赵军杰[1,2]　刘孟楠[3]　贾　方[4]　梅鹤波[5]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.智能农业动力装备全国重点实验室,北京 100083;
3.中国一拖集团有限公司,洛阳 471039;4.洛阳西苑车辆与动力检验所有限公司,洛阳 471000;
5.北京市农林科学院智能装备技术研究中心,北京 100097)

摘要:针对电动拖拉机牵引作业能量利用率低、速度稳定性不足等问题,本文提出一种基于四电机双耦合动力系统(Four-motor dual-coupled power system,FDPS)的节能控制方法。FDPS 兼具前后桥分布式驱动与单桥轴耦合驱动特点,支持单电机、双电机、三电机及四电机多驱动模式。建立作业机组纵向动力学模型和轮胎-土壤互作模型,以及能够表征 FDPS 效率特性与动力特性的电机模型与传动系统模型。提出一种与牵引作业负载匹配的多驱动模式节能控制架构,上层基于混合罚函数粒子群算法,针对不同需求驱动力与作业速度,离线生成 FDPS 驱动模式切换与多电机最优转矩分配规则;下层结合模糊 PID 算法在线精准识别整机需求驱动力,并跟踪目标作业速度。基于田间实测牵引阻力数据开展 900 s 的节能控制台架试验。试验结果表明,所提方法较平均转矩分配控制策略电能消耗降低 3.76%,速度均方根误差减少 11.1%,提高了整机作业经济性和速度稳定性。本文所提动力系统可作为通用动力平台,所提节能控制方法可为电动拖拉机多动力源驱动控制研究提供参考。

关键词:电动拖拉机;节能控制;牵引作业;多驱动模式

中图分类号:S219.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0087-12　　**OSID**:

Adaptive Energy-saving Control for Four-motor Dual-coupled Drive Electric Tractors in Load Traction

ZHAO Zihao[1,2]　XIE Bin[1,2]　WEN Changkai[1,2]　NIU Zezhong[1,2]　ZHAO Junjie[1,2]　LIU Mengnan[3]
JIA Fang[4]　MEI Hebo[5]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100083, *China*
3. *YTO Group Corporation*, *Luoyang* 471039, *China*
4. *Luoyang Xiyuan Vehicle and Power Inspection Institute Co., Ltd.*, *Luoyang* 471000, *China*
5. *Intelligent Equipment Research Center*, *Beijing Academy of Agriculture and Forestry Science*, *Beijing* 100097, *China*)

Abstract: Aiming to address issues such as low energy utilization efficiency and insufficient speed stability in electric tractor traction operations, an energy-saving control method was proposed based on a four-motor dual-coupled power system (FDPS). The FDPS combined the characteristics of distributed drive for front and rear axles with coupled drive for single axles, supporting single-motor, dual-motor, triple-motor, and quad-motor drive modes. A longitudinal dynamics model for the working unit and a tire-soil interaction model were established, along with motor and transmission system models that characterized the efficiency and dynamic properties of the FDPS. A multi-drive-mode energy-saving control architecture matching traction workload was proposed. The upper layer employed a hybrid penalty function particle swarm algorithm to offline generate FDPS drive mode switching and multi-motor optimal torque distribution rules based on varying demand driving forces and operating speeds. The lower layer integrated a fuzzy PID algorithm to online identify the machine's demand driving force with precision while

收稿日期:2025-09-09　修回日期:2025-09-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2001202)和智能农业动力装备全国重点实验室开放课题(SKLIAPE2025019)

作者简介:赵子豪(2000—),男,博士生,主要从事电动拖拉机智能化设计研究,E-mail:zzh13780285325@163.com

通信作者:谢斌(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农机装备数字化设计与智能控制研究,E-mail:xiebincau@126.com

tracking target operating speeds. A 900-second energy-saving control bench test was conducted by using field-measured traction resistance data. Test results demonstrated that the proposed method reduced energy consumption by 3.76% and lowered the root mean square speed error by 11.1% compared with the average torque distribution control strategy, enhancing the machine's operational economy and speed stability. The proposed power system can serve as a universal power platform, and the energy-saving control method can provide a reference for multi-power-source drive control research in electric tractors.

Key words: electric tractor; energy-saving control; traction operation; multi-drive mode

0 引言

随着能源革命与“双碳”战略深化,现代农业生产对高端化、智能化、绿色化农机装备需求日益增加[1-3]。作为清洁、高效、智能农业动力装备的典型代表,电动拖拉机已成为推动精准农业和智慧农业发展的关键支撑[4-6]。目前,电动拖拉机研发已从前期技术探索转入以核心技术攻关为重点的新阶段,正在加速推动关键技术创新与应用。其中,驱动构型设计及其配套的节能策略,是当前研究的重要方向。

驱动构型是实现电动拖拉机高效作业的关键技术之一,早期研究多采用单电机驱动构型。文献[7-8]针对传统拖拉机高油耗、变速器复杂等问题,提出了单电机驱动方案,在保证整机作业速度和牵引性能的同时,降低了驾驶劳动强度。随着驱动构型技术发展,学者们将新型驱动构型引入电动拖拉机。李贤哲等[9]提出了四电机轮边分布式驱动拖拉机的优化设计方法,提升了整机牵引效率与能效水平。文献[10-11]开发了后轮边分布式驱动拖拉机,增强了整机在复杂土壤条件下的作业稳定性。文献[12-15]设计了具备双电机动力耦合和解耦功能的驱动系统,进一步挖掘了整机能效潜能。然而上述驱动构型仍存在一定局限性:单电机方案下,PTO 转速难以独立控制,且电机输出功率随作业负载波动显著,无法长时运行在高效区;轮边分布式驱动方案面临多电机协同控制系统复杂、电机反拖能量损耗等问题;双电机耦合方案未能有效引入前轮驱动能力,限制了整机在复杂工况下的作业适应性。

节能控制技术旨在提高电动拖拉机作业续航和经济性水平。现有研究主要围绕基于规则和优化的能量管理策略(Energy management strategy,EMS)开展研究[16]。规则式 EMS 虽有逻辑简单、实时性高、算力低等优势,但经验依赖性强,作业工况适应性较差,难以实现整机最优能耗[17-19]。为此,学者相继探索了基于最优化控制的 EMS。LUO 等[20]引入驱动轮最优滑转阈值控制思想,提出了一种基于土壤圆锥指数动态辨识的轮边驱动拖拉机犁耕机组节能驱动控制方法,整机速度稳定性提高 37.50%,犁耕作业能耗减少 9.51%。WANG 等[21]提出了一种基于改进型蛇优化算法的双电机转矩分配策略,通过台架模拟犁耕作业能耗降低 14.44%。李同辉等[22]面向双电机耦合驱动系统,提出了一种基于极值搜索和随机动态规划算法的自适应 EMS,犁耕和运输工况下平均耗电量降低 10.17% 和 16.2%。李利桥等[23]设计了基于蓄电池和超级电容的复合供电系统,探索了基于遗传算法的储能装置成本、容量等参数的优化方法,整机节能率提升 3.09%。ZHANG 等[24]针对电动拖拉机双电机耦合驱动系统,设计了一种瞬时最优转矩分配方法,通过实时优化牵引电机与 PTO 电机的功率分配,整机犁耕和旋耕作业效率提升 7.86% 和 8.17%。然而,现有电动拖拉机节能控制研究尚未建立与复杂时变牵引负载匹配的多电机最优转矩分配机制,不可避免地造成整机能量利用率及作业速度稳定性下降等问题。

本文提出一种电动拖拉机四电机双耦合动力系统(Four-motor dual-coupled power system,FDPS),并设计一种融合混合罚函数粒子群算法和模糊 PID 算法的多驱动模式节能控制方法,建立不同牵引负载下的多电机最优转矩分配控制规则,实现整机能耗优化的同时保障在线应用能力,并通过台架试验验证所提方法的有效性。

1 方案与模型建立

1.1 动力系统总体方案

提出的电动拖拉机 FDPS 构型方案如图 1 所示,其兼具前后桥分布式驱动和单桥轴耦合驱动的

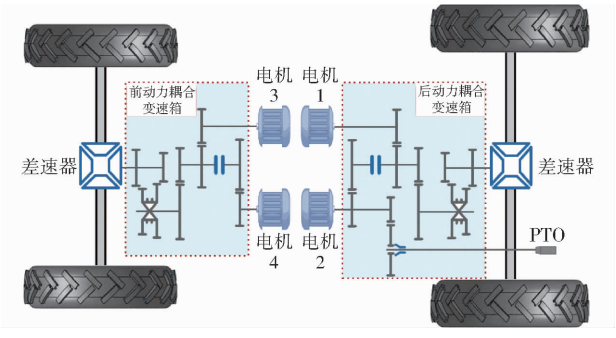

图 1 电动拖拉机四电机双耦合动力系统构型

Fig. 1 Electric tractor four-motor dual-coupling power system configuration

特点。该系统主要由 4 台电机、2 台离合器、前/后动力耦合变速箱、滑移齿轮和差速器等部件组成。其中，电机 1 和电机 2 共同驱动后动力耦合变速箱，电机 3 和电机 4 共同驱动前动力耦合变速箱。2 组电机动力经动力耦合变速箱一级齿轮减速后，分别传递至离合器 1 和离合器 2 内、外摩擦片，通过控制离合器接合或分离，实现双电机动力耦合或分流。然后，动力经由滑移齿轮选择低速或高速挡位，分别输入至前、后驱动桥，最终实现整机四轮驱动与牵引作业。此外，2 组电机动力也可传递至 PTO。

为提高整机牵引力，滑移齿轮选择低速挡位齿轮啮合。FDPS 主要参数如表 1 所示。

电动拖拉机从事耕、种、管、收等不同类型作业时，牵引负载不尽相同。并且同一作业类型下，受土壤条件、作物种类及农具类型等因素影响，牵引阻力也存在显著波动。为提升 FPDS 能效水平，将牵引负载划分为低负载、中负载、中高负载和重负载 4 级，在不同牵引负载下，匹配合适的电机或其组合参与驱动。动力系统驱动模式及对应的关键部件工作状态如表 2 和图 2 所示。

表 1　动力系统主要参数

Tab. 1　Key parameters of power system

参数	数值
电机 1/电机 2 额定功率/kW	21.5
电机 1/电机 2 额定转速/(r·min^{-1})	3 000
电机 1/电机 2 额定转矩/(N·m)	68.4
电机 3/电机 4 额定功率/kW	20
电机 3/电机 4 额定转速/(r·min^{-1})	2 400
电机 3 电机 4 额定转矩/(N·m)	80
动力耦合变速箱低速挡位传动比	88
前驱动轮半径/m	0.415
后驱动轮半径/m	0.62

表 2　不同牵引负载下动力系统工作状态

Tab. 2　Operating conditions of powertrain under different traction loads

牵引作业负载等级	FDPS 驱动模式	电机工作状态				离合器工作状态		FDPS 功率流向
		电机 1	电机 2	电机 3	电机 4	离合器 1	离合器 2	
低负载	模式Ⅰ：单电机后轮驱动	●	●/○	○	○	○	○	a
中负载	模式Ⅱ：双电机耦合前轮驱动	○	●/○	●	●	○	●	c + d
中高负载	模式Ⅲ：三电机四轮驱动	●	●/○	●	●	○	●	a + (c + d)
重负载	模式Ⅳ：四电机四轮驱动	●	●	●	●	●	●	(a + b) + (c + d)

注：●表示电机工作或离合器接合；○表示电机不工作或离合器分离；○/●表示电机可选择驱动或停止 PTO 运转。

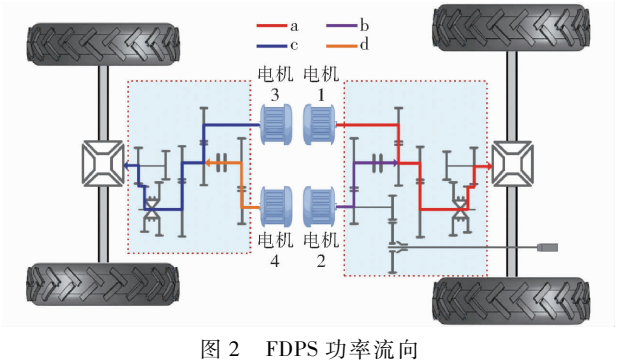

图 2　FDPS 功率流向

Fig. 2　FDPS power flow direction

1.2　整机与 FDPS 模型建立

1.2.1　电机模型

针对电机模型，重点考虑电机出厂后通过台架试验获得的效率特性和转速/转矩输出能力，忽略永磁体损耗、机械摩擦损耗等因素对电机工作性能的影响。电机效率可以表示为输出转速和转矩的函数，计算式为

$$\eta_{mi}=f(n_{mi},T_{mi})\quad(i=1,2,3,4)\tag{1}$$

式中　n_{mi}——电机输出转速，r/min

T_{mi}——电机输出转矩，N·m

其中，$i=1$，2，3，4 分别表示电机 1、电机 2、电机 3 和电机 4。各电机效率模型如图 3 所示。

1.2.2　传动系统模型

本文设计的 FDPS，前驱与后驱系统采用相同的传动方式与参数配置，以后驱传动系统为例，建立对应的动力传递模型与效率模型。为简化建模过程，传动系统简化如图 4 所示。

后驱动系统可实现 2 种驱动模式：电机 1 单独驱动、双电机动力耦合驱动。电机 1 单独驱动时，传动系统动力学模型可表示为

$$\begin{cases}T_{m1}i_1\eta_1=T_{shaft}\\T_{shaft}i_2\eta_2=T_{qR}\\T_{qR}-T_{loadR}=[(J_{m1}+J_1)i_1^2i_2^2\eta_1\eta_2+J_2i_2^2\eta_2+J_{wheel}]\dot{\omega}_{qR}\\\omega_{ch}=\omega_{shaft}=\omega_{qR}i_2=\dfrac{\omega_{m_1}}{i_1i_2}\end{cases}\tag{2}$$

式中　J_{m1}——电机 1 转动惯量，kg·m^2

J_1——一级齿轮及传动轴折算至电机 1 动力输入轴等效转动惯量，kg·m^2

J_2——二级齿轮至驱动轮折算至二级主动齿轮等效转动惯量，kg·m^2

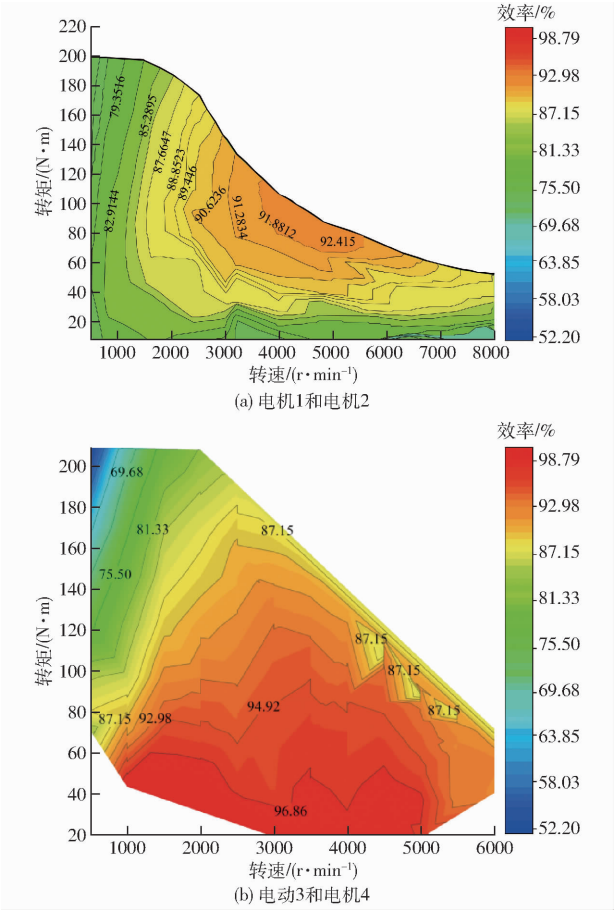

图 3 电机效率模型

Fig. 3 Motor efficiency models

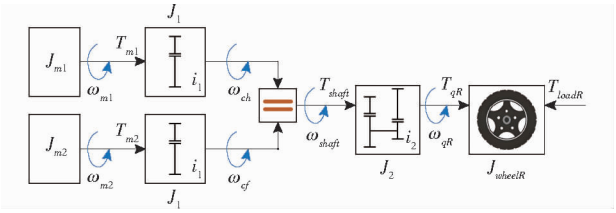

图 4 电动拖拉机后驱传动系统简化图

Fig. 4 Simplified diagram of rear-wheel drive transmission system for electric tractor

J_{wheel}——后驱动轮转动惯量,kg·m^2

i_1——一级齿轮减速比

i_2——二级齿轮至驱动轮减速比

T_{shaft}——二级主动齿轮轴转矩,N·m

η_1——一级齿轮啮合传动效率

η_2——二级齿轮至驱动轮传动效率

T_{qR}——后驱动轮驱动转矩,N·m

T_{loadR}——后驱动轮阻力矩,N·m

ω_{qR}——后驱动轮角速度,rad/s

ω_{ch}——离合器主动端角速度,rad/s

ω_{shaft}——二级主动齿轮轴角速度,rad/s

ω_{m_1}——电机 1 角速度,rad/s

电机 1 和电机 2 耦合驱动时,传动系统动力学模型可表示为

$$\begin{cases} (T_{m1}+T_{m2})i_1\eta_1 = T_{shaft} \\ T_{shaft}i_2\eta_2 = T_{qR} \\ T_{qR} - T_{loadR} = [(J_{m1}+J_{m2}+2J_1)i_1^2 i_2^2\eta_1\eta_2 + \\ \qquad J_2 i_2^2\eta_2 + J_{wheel}]\dot{\omega}_{qR} \\ \omega_{m1} = \omega_{m2} = \omega_{ch}i_1 = \omega_{cf}i_1 = \omega_{shaft}i_1 = \omega_{qR}i_1 i_2 \end{cases} \tag{3}$$

式中 J_{m2}——电机 2 转动惯量,kg·m^2

ω_{m_2}——电机 2 角速度,rad/s

ω_{cf}——离合器从动端角速度,rad/s

电机 1 和电机 2 动力通过定轴齿轮系和差速器传递。现有拖拉机动力学控制研究中,多将动力耦合变速箱传动效率视为定值[25]。然而,试验发现,动力耦合变速箱实际传动效率受电机转速和加载转矩的影响较为显著。为此,基于试验台架测试了耦合变速箱效率,并通过插值方法拟合得到其效率特性曲线,如图 5 所示。

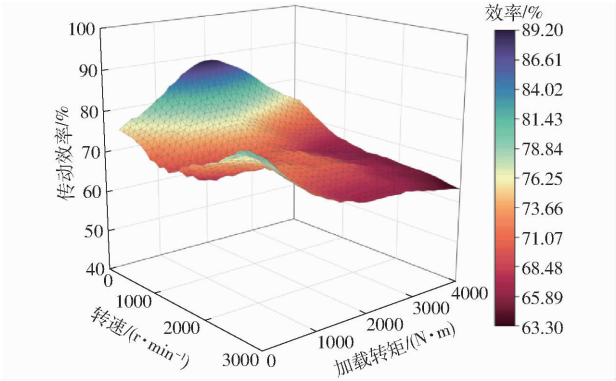

图 5 动力耦合变速箱效率特性

Fig. 5 Efficiency characteristics of power-coupled transmission

1.2.3 作业机组纵向动力学模型

为分析电动拖拉机牵引作业动态特性,以及与 FDPS 之间的关系,结合图 6 所示牵引作业机组受力,建立机组纵向动力学模型,可表示为

$$m_T\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = F_{qF} + F_{qR} - F_{fF} - F_{fR} - F_T \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} m_T g = W_F + W_R \\ W_R L = m_T a + F_T H \\ F_{fF} = f_F W_F \\ F_{fR} = f_R W_R \end{cases} \tag{5}$$

式中 m_T——拖拉机使用质量,kg

v——纵向作业车速,m/s

F_{qF}——前轮纵向驱动力,N

F_{qR}——后轮纵向驱动力,N

F_{fF}——前轮滚动阻力,N

F_{fR}——后轮滚动阻力,N

f_F——前轮滚动阻力系数

f_R——后轮滚动阻力系数

F_T——牵引阻力，N
W_F——前桥垂直载荷，N
W_R——后桥垂直载荷，N
r_F——前驱动轮滚动半径，m
r_R——后驱动轮滚动半径，m
a——拖拉机重心至前轴距离，m
H——拖拉机尾部牵引力中心至地面距离，m
L——轮距，m

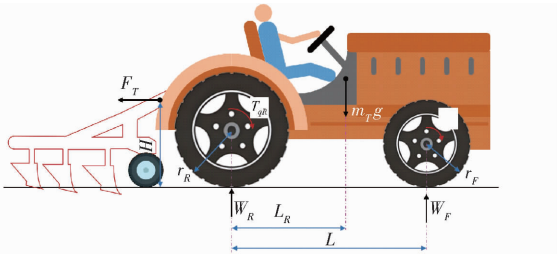

图 6　电动拖拉机牵引作业受力示意图

Fig. 6　Efficiency characteristics of power-coupled transmission

定义整机前驱动轮纵向驱动力分配比为 k，拖拉机驱动轮负载转矩 T_{load} 可计算为

$$T_{load} = T_{loadF} + T_{loadR} \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} T_{loadF} = (F_{fF} + kF_T) r_F \\ T_{loadR} = [F_{fR} + (1-k) F_T] r_R \\ k = \dfrac{F_{qF}}{F_{qF} + F_{qR}} \end{cases} \tag{7}$$

式中　T_{loadF}——前驱动轮负载转矩，N·m

1.2.4　轮胎-土壤互作模型

作业机组牵引作业时，驱动轮纵向牵引力与轮胎在土壤中的滚动阻力及轮胎自身的驱动力相关。参考 Wismer 轮胎-土壤经验模型，在不同土壤中，驱动轮驱动力和滚动阻力系数计算为

$$\begin{cases} F_{qR} = 0.75 W_R (1 - \mathrm{e}^{-0.3 C_{n,R} S_R}) \\ F_{qF} = 0.75 W_F (1 - \mathrm{e}^{-0.3 C_{n,F} S_F}) \\ f_R = \dfrac{1.2}{C_{n,R}} + 0.04 \\ f_F = \dfrac{1.2}{C_{n,F}} + 0.04 \end{cases} \tag{8}$$

其中

$$\begin{cases} C_{n,R} = \dfrac{2 C_I b_R r_R}{W_R} \\ C_{n,F} = \dfrac{2 C_I b_F r_F}{W_F} \end{cases} \tag{9}$$

式中　$C_{n,R}$——后轮轮壤拟合系数
$C_{n,F}$——前轮轮壤拟合系数
S_R——后驱动轮滑转率
S_F——前驱动轮滑转率
C_I——土壤圆锥指数，kPa
b_R——后驱动轮轮胎截面宽度，m
b_F——前驱动轮轮胎截面宽度，m

2　多驱动模式节能控制策略

电动拖拉机牵引作业时，为提升电能利用率，基于作业负载匹配思想，提出一种双层的多驱动模式节能控制（Multi-drive mode energy saving control，MDM－ESC）策略。策略上层基于混合罚函数粒子群算法，针对不同需求驱动力与作业速度，离线生成 FDPS 驱动模式切换与多电机最优转矩分配规则；下层结合模糊 PID 算法在线精准识别整机需求驱动力，并跟踪目标作业速度。

2.1　多电机最优转矩分配策略

多电机驱动电动拖拉机一般采用平均转矩分配策略，即将整机所需驱动转矩平均分配至各电机，完成整机牵引作业。但电机效率随输出转矩和转速变化较大，若采用上述策略，难以保证各电机长时间工作在高效区。粒子群算法作为一种全局优化算法，能够在不同整机需求作业速度与驱动力范围内，搜索最优四电机控制指令，实现整机能耗优化。鉴于 1.2 节所建立的整机及部件模型具有非线性特征，且作业过程中存在涉及安全性、经济性的约束条件，采用混合罚函数法将约束优化问题转化为无约束优化问题，使粒子群算法在寻优过程中规避不可行解，保证优化结果兼具可行性与最优性。尽管离线优化计算量较大，但是计算获得的转矩分配与模式切换控制规则可在线应用。因此，本文融合混合罚函数法和粒子群算法，求解不同牵引负载下四电机最优转矩分配值。

2.1.1　优化问题描述

多电机最优转矩分配策略核心是通过求解 FDPS 的最优工作模式及多电机转矩分配方式，使整机作业电耗最小。因此，定义整机驱动半轴功率与输入电功率之和为 FDPS 总效率，并将其作为目标函数，计算式为

$$J(T_{mi}) = \frac{U_{m1} I_{m1} + U_{m2} I_{m2}}{(n_{m1} T_{m1} + n_{m2} T_{m2}) \eta_r} + \frac{U_{m3} I_{m3} + U_{m4} I_{m4}}{(n_{m3} T_{m3} + n_{m4} T_{m4}) \eta_f} \tag{10}$$

式中　U_{m1}——电机 1 控制器输入电压，V
U_{m2}——电机 2 控制器输入电压，V
U_{m3}——电机 3 控制器输入电压，V
U_{m4}——电机 4 控制器输入电压，V
I_{m1}——电机 1 控制器输入电流，A
I_{m2}——电机 2 控制器输入电流，A
I_{m3}——电机 3 控制器输入电流，A
I_{m4}——电机 4 控制器输入电流，A
η_r——后动力耦合变速箱传动效率

η_f——前动力耦合变速箱传动效率

为保证动力系统安全稳定运行并避免发电工况,需对电机输出转矩和转速施加约束,即

$$0 \leqslant n_{mi} \leqslant n_{mi\max} \tag{11}$$

$$0 \leqslant g_j(T_{mi}) = \begin{cases} T_{mi} - T_{mi\min}(n_{mi}) \\ T_{mi\max} - T_{mi}(n_{mi}) \end{cases} \quad (j = 1,2) \tag{12}$$

式中 $n_{mi\max}$——第 i 个电机最大转速,r/min

$T_{mi\max}$——第 i 个电机在转速为 n_{mi} 时最大转矩,N·m

$T_{mi\min}$——第 i 个电机在转速为 n_{mi} 时最小转矩,N·m

同时,需确保各电机输出转矩经传动系统传递至驱动轮后,合成的总驱动力与整机需求驱动力保持一致,据此设定

$$h(T_{mi}) = \frac{(T_{m1} + T_{m2}) i_1 i_2 \eta_r}{r_R} + \frac{(T_{m3} + T_{m4}) i_1 i_2 \eta_f}{r_F} - F_{qd} = 0 \tag{13}$$

式中 F_{qd}——整机需求驱动力,N

2.1.2 最优转矩分配策略求解

采用混合罚函数法与粒子群算法相结合的策略,将多电机转矩分配约束优化问题转换为无约束优化问题,具体流程为:

(1)将电动拖拉机作业速度变量和需求驱动力变量离散化,构建作业速度为[0:0.1:10](km/h)、需求驱动力为[0:500:45 000](N)的精细离散网格。

(2)构建添加罚函数后的增广目标函数(或粒子适应度函数),公式为

$$P(T_{mi}, r^{k'}) = \min\left(J(T_{mi}) + \frac{h^2(T_{mi})}{\sqrt{r^{k'}}} + \sum_{j=1}^{2} \frac{r^{k'}}{g_j(T_{mi})}\right) \tag{14}$$

式中 $r^{k'}$——第 k'次迭代时的罚因子

且满足

$$\begin{cases} r^{k'+1} = cr^{k'} \quad (0 < c < 1) \\ \lim\limits_{k' \to \infty} r^{k'} = 0 \end{cases} \tag{15}$$

式中 c——缩减系数

(3)基于粒子群算法遍历计算不同作业速度与需求驱动力(即每个网格点)下的最优电机组合及输出转矩比例,计算步骤为:①初始化粒子数量 N、最大迭代次数 M,建立基于 T_{m1}、T_{m2}、T_{m3} 和 T_{m4} 四维粒子搜索空间,粒子最大速度限制为 $[-v_{\max}, v_{\max}]$。②初始化粒子位置与速度。③更新粒子位置与速度。粒子群中第 i 个粒子位置表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4})$,第 i 个粒子速度表示为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, v_{i4})$,位置与速度更新公式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}_i(n+1) = \boldsymbol{x}_i(n) + \boldsymbol{v}_i(n+1) \\ \boldsymbol{v}_i(n+1) = \phi_n \boldsymbol{v}_i(n) + \lambda_1 r_1 (P_i - \boldsymbol{x}_i(n)) + \lambda_2 r_2 (G - \boldsymbol{x}_i(n)) \end{cases} \tag{16}$$

其中

$$\phi_n = (\phi_{n0} - \phi_{nend}) \frac{M - k'}{M} + \phi_{nend} \tag{17}$$

式中 n——迭代次数

ϕ_n——粒子惯性系数

λ_1——自我学习因子

λ_2——社会学习因子

r_1、r_2——区间[0, 1]上均匀分布的随机数

ϕ_{n0}——初始惯性权重

ϕ_{nend}——最大迭代次数时惯性权重

P_i——第 i 个粒子历史最优位置

G——群体历史最优位置

④设定收敛条件。设置停滞迭代次数 M_{stall} 与目标函数容差 ε;对于任意连续的 M_{stall} 次迭代,当相邻两代目标函数值之差绝对值均不超过 ε 时,判定粒子群已实现全局最优,可以表示为

$$\begin{cases} |G(k'+1) - G(k')| \leqslant \varepsilon \\ |G(k'+2) - G(k'+1)| \leqslant \varepsilon \\ \vdots \\ |G(k'+M_{stall}-1) - G(k'+M_{stall}-2)| \leqslant \varepsilon \end{cases} \tag{18}$$

⑤根据群体最优目标函数收敛状态和迭代次数,判断是否达到终止条件。

融合混合罚函数法和粒子群算法多电机最优转矩分配算法流程如图 7 所示。求解得到的驱动模式切换规则如图 8 所示。图 9 展示了作业速度为[0:0.5:10] km/h、需求驱动力为[0:1 000:45 000] N 下四电机转矩分配比例。

2.2 整机需求驱动力识别策略

为了保证作业质量并降低驾驶员劳动强度,电动拖拉机在牵引作业时通常采用定速控制策略。然而,由于田间牵引作业类型多且负载时变性强,传统比例、积分和微分系数固定的 PID 控制器的动态响应能力与鲁棒性不足,导致整机在复杂工况扰动下对需求驱动力识别精度降低。本文设计控制系数可在线自动调整的模糊 PID 控制器,原理如图 10 所示。

模糊控制器以拖拉机目标作业速度和实际作业速度的误差 $E(t)$ 及误差变化率 $E_C(t)$ 作为输入语言变量,以 PID 控制参数调整量 ΔK_P、ΔK_I 和 ΔK_D 为输出语言变量。输入和输出语言变量均采用 7 级模糊子集划分{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},分

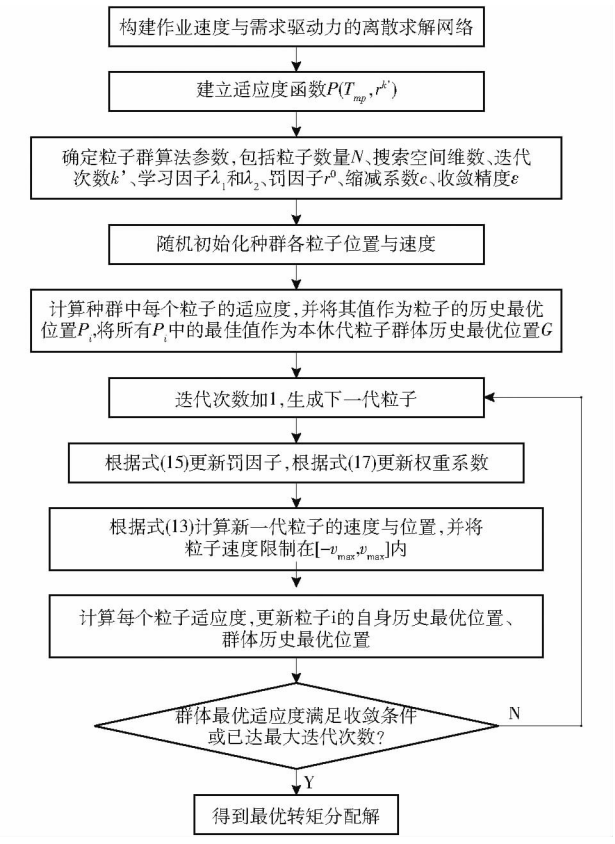

图 7　多电机最优转矩分配算法流程

Fig. 7　Multi-motor optimal torque distribution algorithm flowchart

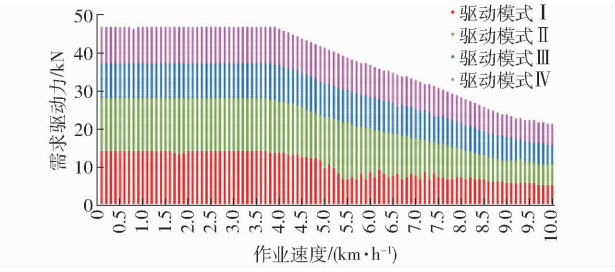

图 8　FDPS 驱动模式切换图谱

Fig. 8　FDPS drive mode switching diagram

别表示{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，各语言变量论域和比例因子如表 3 所示。

依据系统响应过程分阶段设计参数调整策略：在调整初期，输入语言变量偏差较大，采用较大的比例增益系数调整量 ΔK_P，较小的积分增益系数调整量 ΔK_I 和较大的微分增益系数调整量 ΔK_D，以提高响应速度；在调整中期，为抑制系统超调，选择较小的 ΔK_P、适中的 ΔK_I 和较小的 ΔK_D；在调整后期，为减小稳态误差，增大 ΔK_I 并适当减小 ΔK_D。ΔK_P、ΔK_I 和 ΔK_D 模糊规则如表 4 所示。

选用三角形隶属函数，并利用重心法对输出量进行解模糊。基于上述模糊推理与解模糊过程，PID 控制器参数在线自整定公表示为

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \tag{19}$$

式中　K_P——比例增益系数

K_I——积分增益系数

K_D——微分增益系数

K_{P0}——K_P 预设值

K_{I0}——K_I 预设值

K_{D0}——K_D 预设值

PID 控制器时域模型为

$$\begin{cases} F_{qd}(t) = K_P E(t) + K_I \int_0^t E(t)\,\mathrm{d}t + K_D \dfrac{\mathrm{d}E(t)}{\mathrm{d}t} \\ E(t) = v_{\mathrm{tr}} - v \end{cases} \tag{20}$$

式中　v_{tr}——目标作业速度，m/s

3　节能控制评价指标与台架试验

3.1　节能控制评价指标

为研究所提节能控制策略对四电机双耦合驱动电动拖拉机作业经济性和速度稳定性的影响，将电能消耗和速度均方根误差作为控制策略性能评价指标。

(1)电能消耗

电能消耗越小，整机经济性越好，节能效果越显著，计算式为

$$W_e = \int_0^{t_e} \frac{U_{m1}I_{m1} + U_{m2}I_{m2} + U_{m3}I_{mi3} + U_{m4}I_{m4}}{1\,000}\mathrm{d}t \tag{21}$$

式中　W_e——电能消耗，kJ

t_e——作业结束时间，s

(2)速度均方根误差

速度均方根误差(Root mean square error, RMSE)越小，表明实际速度与参考速度一致性越高，整机作业速度跟踪稳定性越高。

3.2　台架试验设计

为验证提出的四电机双耦合电动拖拉机动力系统及多驱动模式节能控制方法的适用性，搭建了如图 11 所示的性能测试台架。试验台架主要由前轮驱动试验系统、后轮驱动试验系统和通信控制系统组成，各电机性能参数与表 1 保持一致。该台架采用 4 台永磁同步电机为提供作业动力，通过 2 台电磁离合器实现动力系统驱动模式切换，并采用磁粉制动器模拟田间牵引作业阻力。试验台以 NI PXIe－1082 为主控制器，主要实现 3 项功能：①装有 Windows 10 操作系统的上位机通过 LabVIEW 2017 软件，经由 TCP/IP 协议将控制程序下载至 NI PXIe－

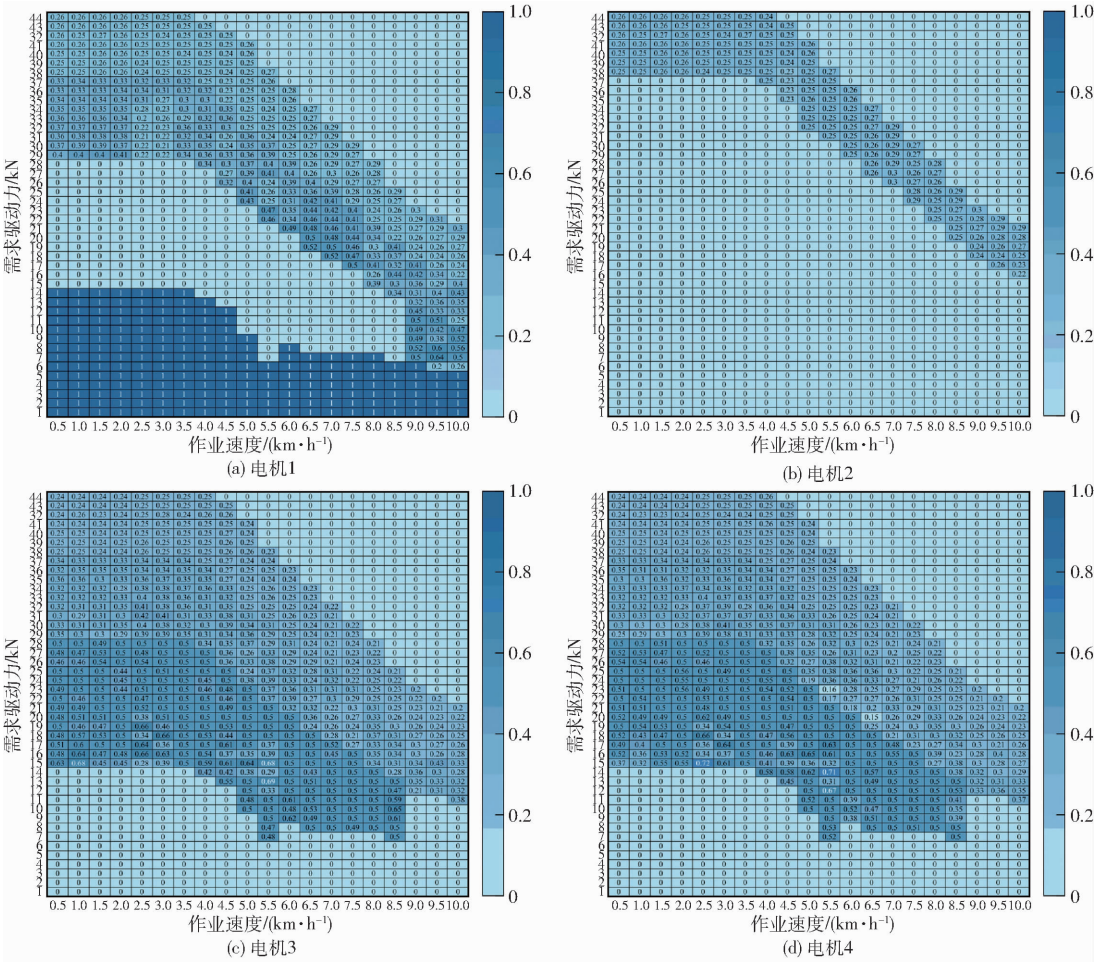

图 9 多电机最优转矩分配比例

Fig. 9 Optimal torque distribution ratio for multi-motor

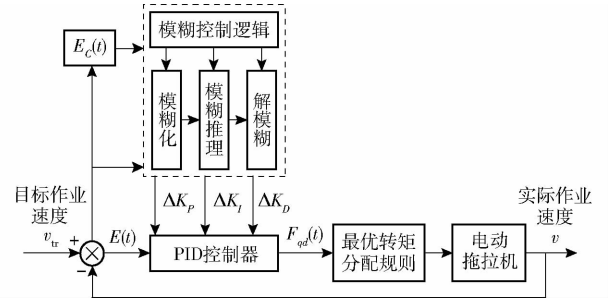

图 10 需求驱动力识别模糊 PID 原理

Fig. 10 Principles of demand-driven fuzzy PID identification

表 3 模糊变量参数设置

Tab. 3 Fuzzy variable parameter settings

语言变量	基本论域	量化论域	比例因子
$E(t)$	[-10, 10]	[-2, 2]	0.2
$E_C(t)$	[-2, 2]	[-2, 2]	1
ΔK_P	[-9, 9]	[-3, 3]	0.33
ΔK_I	[-18, 18]	[-3, 3]	0.17
ΔK_D	[-2, 2]	[-3, 3]	1.5

1082,通过 CAN 总线协调各电机运行,并通过 AO 模块控制磁粉制动器的加载转矩。②实时监测试验

表 4 ΔK_P、ΔK_I 和 ΔK_D 模糊规则

Tab. 4 Fuzzy rule of ΔK_P, ΔK_I and ΔK_D

$E(t)$	$E_C(t)$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

台运行状态，并通过以太网反馈至上位机。③将试验数据传输至上位机。此外，高压电源柜为试验台运行提供高功率直流电，低压直流电源则为弱电系统供电。

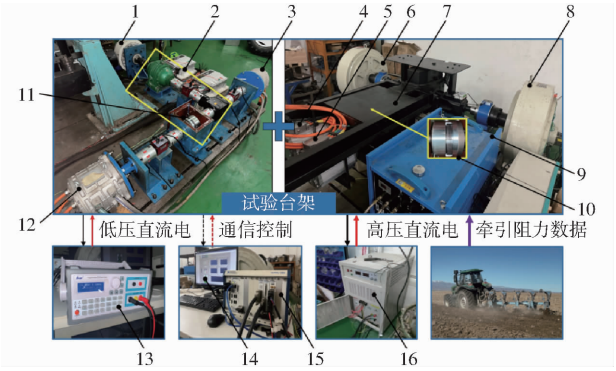

图 11　试验台架测试系统方案

Fig. 11　Test bench testing system solution

1、6、8. 磁粉制动器　2. 前动力耦合变速箱　3. 电机 3　4. 电机 1　5. 电机 2　7. 后动力耦合变速箱　9. 水箱　10、11. 电磁离合器　12. 电机 4　13. 低压直流电源　14. 上位机　15. NI PXIe－1082　16. 高压电源柜

为提升节能控制策略台架测试合理性与准确性，采用基于田间实测犁耕阻力的动态加载方法。通过在 1 台同功率段拖拉机的左右两侧下拉杆处分别安装销轴力传感器，开展田间犁耕作业测试，采集获得采样间隔为 100 ms、总时长为 900 s、覆盖电动拖拉机各驱动模式的牵引阻力，如图 12 所示，并将此数据输入至台架控制程序。获取牵引阻力的作业条件和土壤条件如表 5 所示。

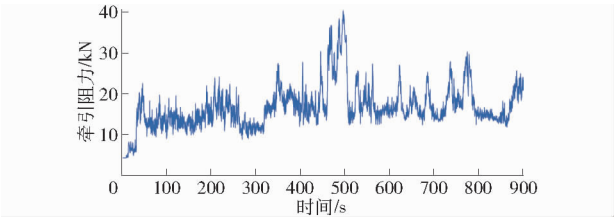

图 12　田间实测牵引阻力数据

Fig. 12　Field-tested traction resistance data

表 5　牵引阻力数据获取条件

Tab. 5　Traction resistance data acquisition conditions

耕地类型	犁铧数	耕作深度/cm	土壤圆锥指数/kPa	土壤含水率/%
留茬地	4	35	961	15.9

将试验台电机目标转速设为 2 635 r/min，对应整机目标作业速度为 7 km/h。将图 12 中的牵引阻力分别发送至前轮驱动系统和后轮驱动系统的磁粉制动器，通过控制程序实现自动变载。分别进行平均转矩分配控制（Mean torque distribution control，MTDC）策略和 MDM－ESC 策略试验，以评价 2 种策略控制性能。在 MTDC 策略中，系统采用 PID 控制算法，通过目标作业速度和实际作业速度，计算得总需求驱动转矩，进而平均分配至电机 1、电机 2、电机 3 和电机 4，旨在实现平均转矩分配的同时，准确跟踪目标作业速度。

3.3　试验结果分析

图 13 为 MDM－ESC 策略下 FDPS 驱动模式切换过程。可以看出，当整机目标作业速度为 7 km/h 且牵引阻力波动变化时，系统能按照图 8 预设的规则，灵活切换驱动模式。牵引阻力低于 8 kN 时，主要运行于驱动模式Ⅰ；介于 8～18 kN 时，以驱动模式Ⅱ为主；升高至 18～25 kN 时，切换为驱动模式Ⅲ；超过 25 kN 后，主要工作在驱动模式Ⅳ。此外，FDPS 在驱动模式Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ下工作时间占比分别为 3.48%、66.51%、22.70% 和 7.31%。

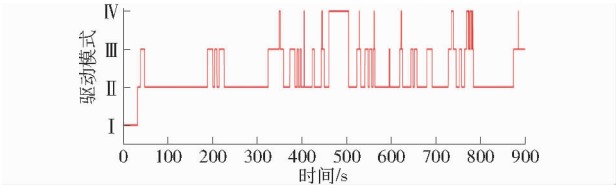

图 13　MDM－ESC 策略下动力系统工作模式切换情况

Fig. 13　Operation mode switching of the power system under MDM－ESC strategy

图 14 为 2 种策略下四电机输出转矩试验结果。结合表 6 可知，在 MTDC 策略下，电机 1、电机 2、电机 3 和电机 4 输出转矩分布较为均匀，四电机平均输出转矩分别为 34.34、34.96、34.97、35.04 N·m。在 MDM－ESC 策略下，四电机平均输出转矩分别为 26.78、4.33、64.96、42.85 N·m，平均值之和与 MDM－ESC 策略接近。值得注意的是，MDM－ESC 策略下，四电机输出转矩在去除转矩零值后平均值分别

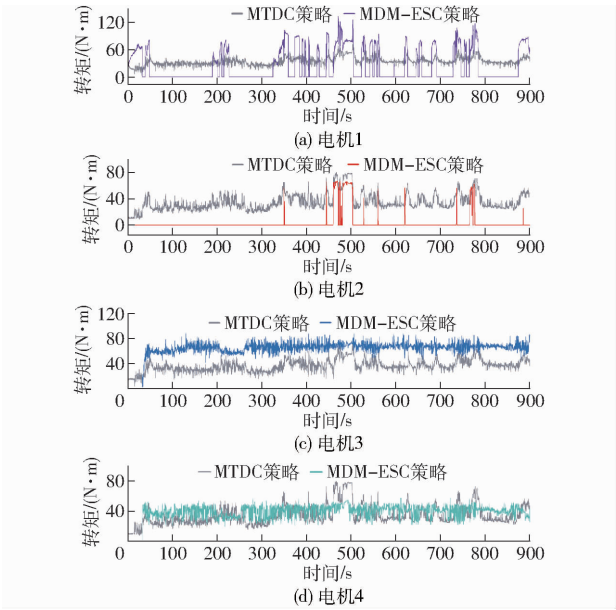

图 14　电机输出转矩对比

Fig. 14　Comparison of four-motor output torque

为 72.08、51.43、66.90、45.10 N·m。结合各电机效率模型可知,电机输出转速在 2 635 r/min 附近时,MDM－ESC 策略使各电机工作点更趋近于高效区。因此,MDM－ESC 策略下电机运行效率优于 MTDC 策略。综合来看,即使在牵引阻力频繁波动情况下,2 种策略系统输出动力与作业负载需求具有较高的匹配度,从而保障系统稳定运行。

表 6 2 种策略下输出转矩统计结果

Tab.6 Output torque statistics under two strategies

N·m

项目	电机	MTDC 策略	MDM－ESC 策略
900 s 转矩平均值	电机 1	34.34	26.78
	电机 2	34.96	4.33
	电机 3	34.97	64.96
	电机 4	35.04	42.85
去零值转矩平均值	电机 1	34.34	72.08
	电机 2	34.96	51.43
	电机 3	34.97	66.90
	电机 4	35.04	45.10

MDM－ESC 策略和 MTDC 策略控制下动力系统作业速度曲线如图 15 所示。在 1.37 s 时作业速度提升至目标作业速度 7 km/h 附近,之后围绕该速度小幅波动。结合表 7 可看出,2 种策略控制下动力系统作业速度平均值分别为 6.98、6.97 km/h,均接近目标作业速度。从速度波动程度来看,MTDC 策略 RMSE 为 0.18 km/h,高于 MDM－ESC 策略的 0.16 km/h;同时,MTDC 策略作业速度最大值和最小值与目标值偏差更大。综上所述,MDM－ESC 策略在维持动力系统作业速度稳定性方面具有更好的性能。

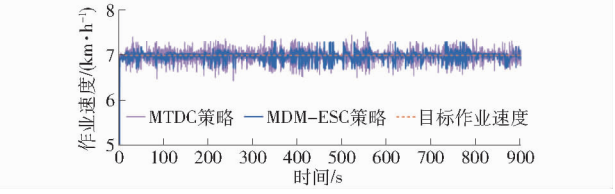

图 15 作业速度对比

Fig.15 Comparison of operation speed

表 7 2 种策略下作业速度统计结果

Tab.7 Statistical results of assignment speed under two strategies

km/h

控制策略	最大值	最小值	平均值	RMSE
MDM－ESC	7.30	6.70	6.98	0.16
MTDC	7.51	6.55	6.97	0.18

试验过程中,通过实时采集并记录 4 台电机控制器反馈的电压和电流,构建了动力系统总功率曲线。由图 16 可知,得益于模糊 PID 参数的自整定机制与多电机最优转矩分配逻辑,MDM－ESC 策略在实现动力系统较低电能消耗的同时,功率波动小于 MTDC 策略。图 17 为 2 种策略下动力系统电能消耗和速度 RMSE。与 MTDC 策略相比,所提 MDM－ESC 策略电能消耗降低 3.76%,作业速度 RMSE 降低 11.1%。由此可见,本文所提面向牵引作业负载匹配的多驱动模式节能控制在有效降低电动拖拉机作业能耗的同时,提高了作业速度稳定性。

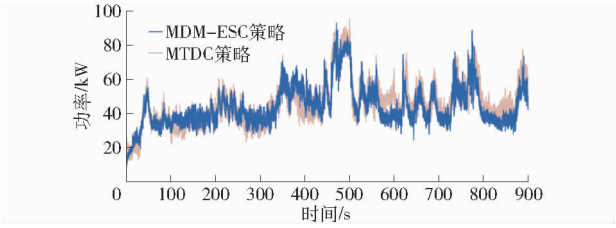

图 16 动力系统功率对比

Fig.16 Power comparison of power system

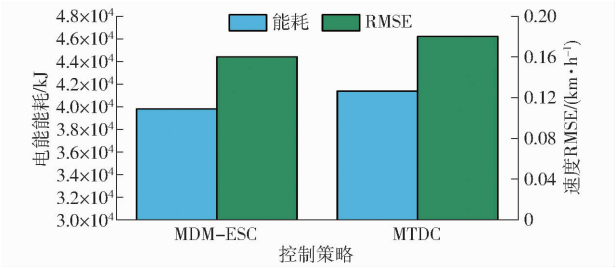

图 17 节能控制指标性能对比

Fig.17 Energy saving control index performance comparison

4 结论

(1)面向电动拖拉机高效作业需求,提出了一种新型四电机双耦合动力系统。该系统兼具前桥与后桥分布式驱动和单桥轴耦合驱动优势,可智能切换单电机、双电机、三电机以及四电机驱动模式。

(2)建立了牵引作业机组纵向动力学模型和轮胎-土壤互作模型,以及能够表征动力系统效率特性与动力特性的电机模型与传动系统模型,为整机智能作业动态控制奠定了基础。

(3)提出了一种双层的多驱动模式节能控制策略。上层基于混合罚函数粒子群算法,针对需求驱动力 0～45 kN、作业速度 0～10 km/h,离线生成驱动模式切换与多电机最优转矩分配规则;下层结合模糊 PID 算法在线精准识别整机需求驱动力,并跟踪目标作业速度。

(4)搭建了四电机双耦合试验台架测试系统,基于田间实测牵引阻力,进行了时长为 900 s 的节能控制试验与平均转矩分配试验。试验结果表明,在所提节能控制策略下,去零值后四电机输出转矩分别为 72.08、51.43、66.90、45.10 N·m,模拟整机作业速度平均值为 6.98 km/h,速度 RMSE 为

0.16 km/h，电能消耗为 39 802.2 kJ。其较平均转矩分配控制策略电能消耗降低 3.76%，速度均方根误差减少 11.1%，提高了电动拖拉机作业经济性和速度稳定性。

参 考 文 献

[1] 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）

[2] 罗锡文，谷秀艳，胡炼，等. 大田无人化智慧农场农田边界识别技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报，2025，56(2)：1－18.
LUO Xiwe，GU Xiuyan，HU Lian，et al. Research status and outlook of farmland boundary recognition technology in large-scale unmanned smart farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(2)：1－18.（in Chinese）

[3] SILVERWOOD S M，LICHTER K E，KLEINER H S，et al. PERSPECTIVE：a unified strategy for addressing climate change，improving public health，and mitigating environmental degradation[J]. Agriculture Communications，2025，3：100090.

[4] 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）

[5] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业，2019，1(1)：1－7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J]. Smart Agriculture，2019，1(1)：1－7.（in Chinese）

[6] 陈学庚，温浩军，张伟荣，等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业(中英文)，2020，2(4)：1－16
CHEN Xuegeng，WEN Haojun，ZHANG Weirong，et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture，2020，2(4)：1－16.（in Chinese）

[7] 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）

[8] 周志立，夏先文，徐立友. 电动拖拉机驱动系统设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2015，36(5)：78－81.
ZHOU Zhili，XIA Xianwen，XU Liyou. Design for driving system of electric tractor[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)，2015，36(5)：78－81.（in Chinese）

[9] 李贤哲，张明柱，刘孟楠，等. 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[J]. 农业机械学报，2024，55(3)：401－411.
LI Xianzhe，ZHANG Mingzhu，LIU Mengnan，et al. Optimized design and validation of distributed drive system for electric tractor based on multi-island genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(3)：401－411.（in Chinese）

[10] VOGT H H，DE MELO R R，DAHER S，et al. Electric tractor system for family farming：increased autonomy and economic feasibility for an energy transition[J]. Journal of Energy Storage，2021，40：102744.

[11] LUO Z，XIE B，CHEN Z，et al. Learning-based double layer control method of yaw stability simulation research for rear wheel independent drive electric tractor plowing operation[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2024，221：108985.

[12] XIE B，WANG S，WU X，et al. Design and hardware-in-the-loop test of a coupled drive system for electric tractor[J]. Biosystems Engineering，2022，216：165－185.

[13] 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）

[14] 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)：423－431，449.
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)：423－431，449.（in Chinese）

[15] 赵子豪，谢斌，温昌凯，等. 电动拖拉机双电机驱动系统模式切换瞬态特性与控制方法研究[J]. 农业机械学报，2025，56(4)：532－542.
ZHAO Zihao，XIE Bin，WEN Changkai，et al. Research on transient characteristies and control methods of mode switching in electric tractor dual motor drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2025，56(4)：532－542.（in Chinese）

[16] 刘静，夏长高，孙闫. 双能源电动拖拉机能量管理策略[J]. 中国农机化学报，2021，42(7)：115－121.
LIU Jing，XIA Changgao，SUN Yan. Energy management strategy of double energy electric tractor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2021，42(7)：115－121.（in Chinese）

[17] YU Q，HE X，LIU L，et al. A review on the powertrains and energy management strategies of electric tractors[J]. The

Innovation Energy, 2024, 2(1): 100064 - 1 - 100064 - 19.

[18] 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. Development process and research status of electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp. 1):348 - 364. (in Chinese)

[19] 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)

[20] LUO Z, XIE B, TONG Y, et al. Energy-saving drive control strategy for electric tractors based on terrain parameter identification[J]. Applied Energy, 2024, 376: 124230.

[21] WANG S, WU X, ZHAO X, et al. Co-optimization energy management strategy for a novel dual-motor drive system of electric tractor considering efficiency and stability[J]. Energy, 2023, 281: 128074.

[22] 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-otor-driven electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):530 - 543. (in Chinese)

[23] 李利桥, 冉国伟, 高宗余, 等. 纯电动拖拉机复合供电系统自适应能量管理与容量配置[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23):82 - 91.
LI Liqiao, RAN Guowei, GAO Zongyu, et al. Adaptive energy management and capacity configuration for electric tractor power supply system[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(23):82 - 91. (in Chinese)

[24] ZHANG J, SHI M, LIU M, et al. Dual-source cooperative optimized energy management strategy for fuel cell tractor considering drive efficiency and power allocation[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1455.

[25] 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.