

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.066

双电机驱动电动拖拉机实时自适应能量管理策略研究

李同辉¹ 谢 斌¹ 王东青² 张胜利¹ 武丽萍²

(1. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;
2. 拖拉机动力系统国家重点实验室, 洛阳 471039)

摘要: 提出了一种用于纯电动拖拉机的双电机多模动力耦合驱动系统(DMCDS),通过对两电机与制动器的协调控制可以实现4种驱动模式:电机EM_S独立驱动、电机EM_R独立驱动、双电机耦合驱动和双电机独立驱动,多种驱动模式有利于提高电机负荷率和运行效率,从而提高整机驱动效率。为实现双电机动力耦合驱动系统的高效运行,增强能量管理策略对电动拖拉机不同作业工况的适应性,设计了一种基于随机动态规划+极值搜索算法(SDP_PESA)的实时自适应能量管理策略,该策略利用随机动态规划离线生成的状态反馈控制表作为控制输入参考,以保证近似全局最优,在此基础上,引入自适应寻优算法-极值搜索算法动态搜索系统输出的局部极大值,以反馈校正SDP的控制输入,并生成能耗更低、效率更高的工作点。基于SDP_PESA的能量管理策略综合考虑了全局优化算法的良好优化性能和瞬时优化算法的实时性、鲁棒性,利用两种算法的优势,实现更加优异的控制性能。基于Matlab/Simulink建立了带有SDP状态反馈控制表的双电机驱动电动拖拉机(DMET)整机仿真模型,利用真实作业工况数据分别对基于SDP和SDP_PESA的能量管理策略进行仿真实验。仿真结果表明,DMET实际车速可以实时跟踪目标车速的变化,控制策略能够快速响应作业负载的变化;基于SDP的能量管理策略,DMET在犁耕和运输工况的每千米平均耗电量分别为1.77、1.17 kW·h/km,整机驱动效率分别为0.80和0.81。引入PESA输出反馈控制器后,整机驱动效率分别提高了2.13%和1.97%,平均耗电量分别降低了10.17%和16.2%,这表明基于SDP_PESA的能量管理策略可以有效增加纯电动拖拉机的作业里程,并且SDP_PESA完全具备实时应用能力。

关键词: 电动拖拉机; 双电机耦合驱动; 随机动态规划; 极值搜索算法; 功率分配

中图分类号: S219.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0530-14

Real-time Adaptive Energy Management Strategy for Dual-motor-driven Electric Tractors

LI Tonghui¹ XIE Bin¹ WANG Dongqing² ZHANG Shengli¹ WU Liping²

(1. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. State Key Laboratory of Power System of Tractor, Luoyang 471039, China)

Abstract: Considering different power requirements of the tractor under various working conditions, the single-motor powertrain system is usually in low load state under low load working conditions, with low efficiency, resulting in energy waste. To solve this problem, a dual-motor multi-mode coupling driving system for electric tractors was proposed. Through the coordinated control of two motors and brakes, four driving modes could be realized: motor EM_S independent drives, motor EM_R independent drives, dual-motor coupling drives and dual-motor independent drives. These modes could meet the tractor power demand under various working conditions, improve the load rate of motor, and thus improve the efficiency of the whole vehicle. A parameter matching method was proposed to match the parameters of the two motors and the main transmission ratios of the coupling box according to the dynamic performance indexes of the typical working conditions. In order to realize the efficient operation of DMET, and enhance the adaptability of the energy management strategy to different operating conditions of electric tractors, a real-time energy management strategy based on stochastic dynamic programming + extreme seeking algorithm (SDP_PESA) was proposed. The state feedback control table generated offline by SDP as the control

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-10
基金项目: 拖拉机动力系统国家重点实验室开放基金项目(SKT2020001)
作者简介: 李同辉(1990—),男,博士生,主要从事车辆动力传动及综合控制研究,E-mail: 18630225356@163.com
通信作者: 谢斌(1973—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业装备智能化、电液控制和车辆电控研究,E-mail: xiebineau@126.com

input reference was used to ensure the approximate global optimum. On this basis, the adaptive optimization algorithm-PESA was introduced to dynamically search the local maximum value of the system output to compensate for the control input of SDP and generate operating points with lower energy consumption and higher efficiency. The EMS based on SDP_PESA considered the good optimization performance of the global optimization algorithm and the robustness of the instantaneous optimization algorithm comprehensively, and the advantages of the two algorithms were used to achieve more excellent control performance. A DMET simulation model with SDP state feedback control table was established based on Matlab/Simulink, and real operating conditions were used to simulate the energy management strategies based on SDP and SDP_PESA. The simulation results demonstrated that the actual vehicle speed can track the change of the target vehicle speed in real time, and the control strategy can quickly respond to the change of the work load, indicating that the DMET simulation model was efficient and feasible, and can meet the simulation accuracy requirements. Based on the energy management strategy of SDP, the average power consumption of DMET in plowing and transportation conditions were respectively $1.77 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$ and $1.17 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$, the driving efficiency was 0.80 and 0.81, respectively. However, after adding the PESA output feedback controller, the driving efficiency was increased by 2.13% and 1.97%, and the average power consumption was reduced by 10.17% and 16.2%, respectively, which meant the energy management strategy based on SDP_PESA can effectively increase the operating range of pure electric tractors, and SDP_PESA was fully capable of real-time application.

Key words: electric tractor; dual-motor coupling driving; stochastic dynamic programming; extremum seeking algorithm; power distribution

0 引言

拖拉机作为我国主要的农业动力机械,其保有量逐年上升,然而传统拖拉机带来的能源危机和环境污染问题是我国大力发展节能环保和可持续发展战略必须解决的问题^[1]。纯电动拖拉机作为一种新型农业机械,能源来源广泛,可实现零排放,克服传统燃油拖拉机存在的油耗高、排放差、变速器结构复杂等问题,因此,针对农用纯电动拖拉机驱动系统开展相关研究,对促进我国电动拖拉机的发展具有一定的意义和指导作用^[2-3]。目前纯电动拖拉机多采用单电机驱动^[4-5],考虑到拖拉机在多种作业工况下的不同功率需求,所选电机都是较大功率等级。这种情况将导致电机在低负载作业工况下处于低负荷状态,效率较低,造成能源浪费^[6-7]。因此,为了提高电动拖拉机的驱动效率,提出一种双电机多模式动力传动系统构型,当电动拖拉机工作在低负载作业工况时,可使用小功率电机驱动,以提高电机的负荷率。

为实现双电机驱动电动拖拉机(DMET)的高效运行,需开发高效可行的能量管理策略(EMS)来控制两电机的运行状态。通常控制策略可以分为两种类型,即基于规则和基于优化的控制策略^[8-9]。

基于规则的控制策略由于易于实施被广泛用于各种类型的电动车辆,它仅取决于车辆的状态,例如电池充电状态(SOC)、需求功率和行驶速度等,而不使用任何驾驶循环信息^[10-11]。杜玖玉等^[12]针对混

联式混合动力系统提出了一种基于规则的控制策略,通过分析液压混合动力系统的结构和工作原理,限定了发动机和电机的工作区域并制定了控制规则;王春光^[13]提出了一种基于模糊逻辑的并联混合动力拖拉机的能量管理策略,并通过仿真实验验证了该策略的能效性。然而良好的控制规则需要进行大量调试以获得最佳控制参数,这通常取决于设计者的经验,无法保证效率性和鲁棒性。

基于优化的控制策略旨在最小化或最大化代价函数,代价函数是一些目标的度量,例如能量消耗、系统效率等^[14]。确定性动态规划(DDP)和Pontryagin最小原理(PMP)是EMS设计中广泛使用的优化算法,如果已知整个循环工况信息,可以得到全局最优策略。LEE等^[15]采用DDP算法优化了混合动力拖拉机的动力分配策略,通过仿真实验证明所提出的控制策略提高了并联混合动力拖拉机的燃油经济性。ZHANG等^[16]在3种循环工况下采用PMP算法对双电机驱动电动客车的控制策略进行优化,并提出了基于规则的功率分配控制策略,降低了不同循环工况下的能量损失。然而,上述两种控制策略存在两个缺点。首先,该方法针对特定的驾驶循环进行优化,在其他循环工况下可能不是最优;其次,DDP的解决方案不能实时应用,需要提取控制规则,该过程非常耗时。

为克服这些缺点,随机动态规划理论应运而生。随机动态规划(SDP)是在动态规划基础上结合马尔可夫决策发展而来,既有动态规划求解全局最优的

特点,又有马尔可夫决策处理随机过程的优势^[17]。随机动态规划理论在不确定问题分析上应用广泛,最早曾用于发动机和变速器性能优化,并显示出一定的优越性^[18]。基于随机动态规划的能量管理策略将驾驶员需求功率视为一个离散的随机动态过程,通过统计车辆行驶历史数据,建立驾驶员需求功率的马尔可夫模型,在平均意义上针对一系列随机驱动周期进行优化。文献[19-21]重点介绍了SDP在多种构型混合动力车辆中的应用,这些计算大多可以离线进行,并具有潜在的实时应用价值。

然而,秦斐燕^[22]的研究表明基于SDP的能量管理策略对具有相似需求功率概率预测模型(具有相同统计特征)的工况适应性更强,这意味着SDP-EMS的控制性能与需求功率概率转移矩阵密切相关,而概率转移矩阵需由大量工况数据统计计算得到,由于拖拉机作业工况多且杂,同种类作业工况的负载也会随农艺要求的不同而有所差异,因此,本文采用基于正弦扰动的极值搜索算法^[23-24]通过系统输出反馈在线搜索局部最优优点,来提高SDP对电动拖拉机不同作业负载的工况适应性和控制性能。

本研究提出一种用于纯电动拖拉机的新型双电机耦合驱动系统,并结合随机动态规划与极值搜索算法的优点开发一种近似最优、具有实时应用能力的能量管理策略,满足拖拉机动力性的同时提高整机能耗经济性,增加DMET的作业里程。

1 模型建立与模式分析

1.1 DMET 总体构型方案

双电机驱动电动拖拉机的总体构型方案如图1所示,作为其核心的双电机耦合动力传动系统(DMCPS)主要由2个牵引电机、2个制动器和动力耦合变速箱组成,电机EM_S和EM_R分别通过减速齿轮与太阳轮和齿圈相连,行星架作为动力输出与两挡变速器输入轴相连。动力输出轴(PTO)通过减速齿轮与EM_R相连,为拖拉机农田作业提供动力输出,并且在二级减速齿轮的主动轮一侧设有拨叉,用于断开电机EM_R与齿圈的动力连接,实现两电机独立驱动,适用于旋耕等有动力输出的作业工况。值得注意的是,当DMET进行有动力输出作业时,EM_R采用转速闭环控制即可实现PTO的两级调速(540/1 000 r/min),因此本文取消了动力输出轴变速装置。

由于电机在零转速时即可提供高扭矩,在较宽的转速范围内都能输出峰值功率,具有调速范围宽和转矩响应快等特点,因此双电机驱动电动拖拉机不再需要传统多挡位变速箱,仅保留高低挡即可满

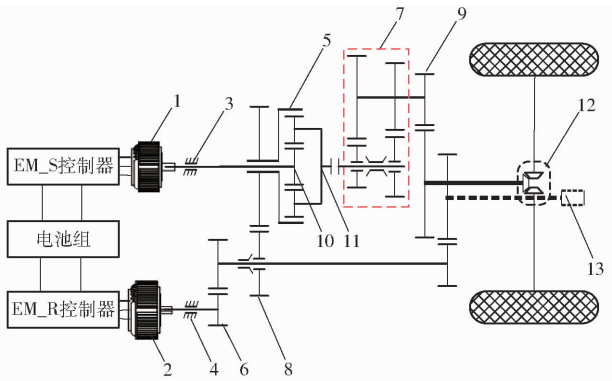


图 1 DMET 总体构型方案

Fig. 1 Overall configuration of DMET

1. 电机 EM_S 2. 电机 EM_R 3. 制动器 B1 4. 制动器 B2 5. 齿圈 6. 减速齿轮 7. 两挡变速器 8. 二级减速齿轮 9. 主减速器 10. 太阳轮 11. 行星架 12. 差速器 13. 动力输出轴 (PTO)

足拖拉机作业车速需求,可以减轻重量,节省空间,降低成本。

1.2 理论模型建立

1.2.1 整机纵向动态模型

基于DMET动力总成结构与车辆纵向动力学,DMET纵向动态模型可表示为

$$\begin{cases} T_c i_{H/L} i_f \eta_t - T_w = J_w \dot{\omega}_w \\ T_w = (F_T + m_s g f \cos \theta + m_s g \sin \theta) r_w \\ v_a = \frac{\omega_w r_w}{1 + \lambda} \\ \frac{\omega_w (k + 1)}{i_{H/L} i_f} = \omega_{m1} + k \frac{\omega_{m2}}{i_{22} i_{22}} \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 T_c ——行星架输出扭矩, N·m
 T_w ——驱动轮总需求扭矩, N·m
 ω_{m1} ——电机 EM_S 角速度, rad/s
 ω_{m2} ——电机 EM_R 角速度, rad/s
 ω_w ——驱动轮角速度, rad/s
 v_a ——拖拉机实际车速, m/s
 λ ——驱动轮滑转率
 i_2 ——一级减速齿轮传动比
 i_{22} ——二级减速齿轮传动比
 $i_{H/L}$ ——高低挡齿轮传动比
 i_f ——主减速齿轮传动比
 F_T ——挂钩牵引力, N
 m_s ——拖拉机使用质量, kg
 g ——重力加速度, m/s²
 f ——滚动阻力系数
 θ ——坡道角度, (°)
 r_w ——驱动轮滚动半径, m
 η_t ——整车传动效率
 k ——行星齿轮特征参数
 J_w ——驱动轮等效转动惯量, kg·m²

1.2.2 牵引电机模型

电机 EM_S 和 EM_R 均可在电动或发电状态下工作,利用输出转速和转矩的准静态图建立两电机的效率模型,电机效率可通过查表获得。电机的功率消耗可表示为

$$P_m = T_m \omega_m \eta_m^{-\text{sgn}(T_m)} / 1\,000 \tag{2}$$

式中 T_m ——电机输出转矩, N·m
 ω_m ——电机角速度, rad/s
 P_m ——电机功率, kW
 η_m ——电机运行效率

1.2.3 电池模型

本文忽略了电池的热温效应与瞬态影响,电池物理模型被简化为具有开路电压和内部电阻的电压源,两者都依赖于电池 SOC^[25-26]。电池荷电状态为

$$SOC_{t+1} = SOC_t - \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_{bat}P_{bat}}}{2R_{bat}Q_{bat}} \tag{3}$$

式中 U_{oc} ——电池开路电压, V
 R_{bat} ——电池内阻, Ω
 P_{bat} ——电池输出功率, kW
 Q_{bat} ——电池容量, A·h
 SOC_{t+1} 、 SOC_t —— $t+1$ 、 t 时刻电池荷电状态

电池能耗的瞬时变化率可表示为

$$P_{ele} = -U_{oc}Q_{bat}\Delta SOC \tag{4}$$

其中 $\Delta SOC = SOC_{t+1} - SOC_t$

式中 P_{ele} ——电池瞬时能量消耗, W
 ΔSOC ——电池荷电状态 SOC 的变化率

1.2.4 驾驶员模型

驾驶员模型可以在仿真实验中真实反映驾驶员

的实际操作,将其建立为关于车速误差的 PI 控制器^[27],其输出为踏板开度 θ' , $\theta' \geq 0$ 表示加速踏板开度, $\theta' < 0$ 表示制动踏板开度。

$$\theta' = K_p(v_t - v_a) + K_I \int (v_t - v_a) dt \tag{5}$$

 $(0^\circ < |\theta'| < 100^\circ)$

式中 v_t ——目标车速, m/s
 K_p ——比例系数
 K_I ——积分系数

1.3 驱动模式分析

由于电机具有优良的扭矩传递能力和快速响应能力,通过对电机、制动器的协调控制,双电机多模式动力耦合驱动系统在拖拉机驱动状态下可实现 4 种工作模式:电机 1 (EM_S) 独立驱动 (M1S)、电机 2 (EM_R) 独立驱动 (M2S)、双电机耦合驱动 (DMC) 和双电机独立驱动 (DMI)。

当 DMCPS 工作于 M1S 模式时,制动器 B1 断开,电机 EM_R 关闭,制动器 B2 接合制动,锁止 EM_R 输出轴,EM_S 的动力经太阳轮输入,由行星架输出驱动 DMET 行驶,适用于犁耕等低速大扭矩作业工况。图 2a 为 M1S 模式下 DMCPS 的功率流,根据式(1)得到 M1S 模式下驱动系统动态模型为

$$\begin{cases} (T_{m1} - J_{m1}\dot{\omega}_{m1})(1+k) - \frac{T_w}{i_f i_{H/L}} = J_c \dot{\omega}_c \\ J_c \dot{\omega}_c = \frac{m_s r_w^2}{i_f^2 i_{H/L}^2} \frac{\dot{v}_a i_f i_{H/L}}{r_w} = \frac{m_s r_w \dot{v}_a}{i_f i_{H/L}} \\ \omega_{m1} = \frac{v_a i_f i_{H/L}}{r_w} (1+k) \end{cases} \tag{6}$$

式中 T_{m1} ——电机 EM_S 输出转矩, N·m

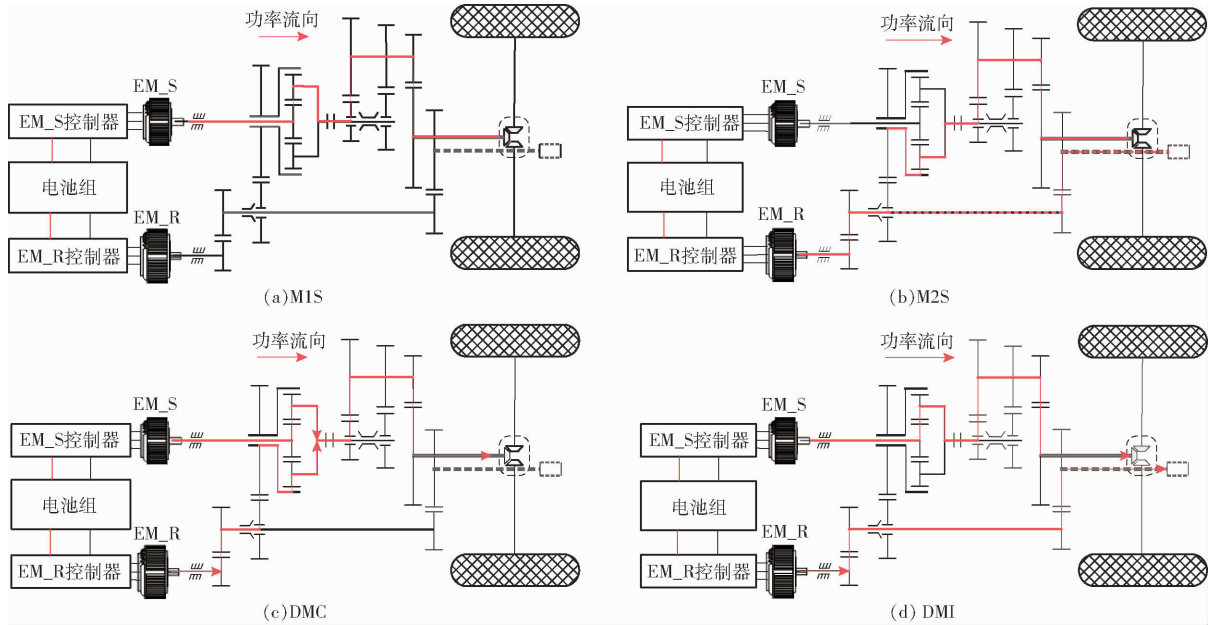


图 2 不同驱动模式的功率流

Fig. 2 Power flow under different driving modes

J_{m1} ——电机 EM_S 等效转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 J_c ——行星架等效转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 ω_c ——行星架角速度, rad/s

当 DMCPS 在 M2S 模式运行时, EM_S 处于关闭状态, 制动器 B1 接合以锁死 EM_S 输出轴, 进而制动太阳轮, EM_R 独立驱动 DMET 行驶的同时, 也可以为 PTO 提供动力。该模式可以在中低速下输出较大扭矩, 适用于播种、喷药等中负荷作业工况。图 2b 为 M2S 模式下 DMCPS 的功率流, 其动态模型为

$$\begin{cases} (T_{m2} - J_{m2}\dot{\omega}_{m2})i_2i_{22}\frac{1+k}{k} - \frac{T_w}{i_fi_{H/L}} = \frac{m_s r_w \dot{v}_a}{i_fi_{H/L}} \\ \omega_{m2} = \frac{v_a i_f i_{H/L} i_2 i_{22}}{r_w} \frac{1+k}{k} \\ T_{B1} = -T_s \\ T_{m1} = 0 \\ \omega_{m1} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中 T_{m2} ——电机 EM_R 输出转矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 J_{m2} ——电机 EM_R 等效转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 T_{B1} ——制动器 B1 扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 T_s ——太阳轮负载扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$

当 EM_S 和 EM_R 同时工作且二级减速齿轮处于接合状态时, DMCPS 以 DMC 模式工作, 制动器 B1、B2 全部分离, DMCPS 成为双输入单输出两自由度系统, 两电机经传动齿轮减速增扭后同时向行星齿轮机构输入动力, EM_S 传递给太阳轮, EM_R 传递给齿圈, 经行星架合成后传递到两挡变速器, 最终传输到驱动轮, 实现功率耦合。此时系统可以在中低负荷条件下输出更高转速, 适用于转场、运输等高速作业工况。DMC 模式下的功率流如图 2c 所示, 在此模式下驱动系统的动态模型为

$$\begin{cases} \frac{m_s r_w \dot{v}_a + T_w}{i_f i_{H/L} (1+k)} + \frac{J_{m2} \dot{\omega}_{m2} i_2 i_{22}}{k} = \\ \min \left(T_{m1}, \frac{T_{m2} i_2 i_{22}}{k} \right) - J_{m1} \dot{\omega}_{m1} \\ \omega_{m1} + \frac{k \omega_{m2}}{i_2 i_{22}} = (1+k) \frac{v_a i_f i_{H/L}}{r_w} \end{cases} \quad (8)$$

当 EM_S 和 EM_R 同时工作且二级减速齿轮断开连接时, 系统工作在 DMI 模式。此时齿圈处于锁止状态, EM_S 的输出功率经太阳轮、行星架、高低挡齿轮和主减速齿轮驱动 DMET 行驶; EM_R 经过一级减速齿轮和 PTO 减速齿轮为动力输出轴提供动力。该模式主要适用于旋耕、深松和播种等有动力输出的作业工况, 其中 EM_R 采用转速闭环控制以保证 PTO 恒转速的农艺要求, 由于拖拉机在田间作业时车速近乎恒定, 因此, EM_S 采用转速闭环控制以降低驾驶员的工作强度。DMI 模式下的功率流

如图 2d 所示, 在此模式下驱动系统的动态模型为

$$\begin{cases} (T_{m1} i_{H/L} i_f - J_{m1} \dot{\omega}_{m1} i_{H/L} i_f) (k+1) = J_w \dot{\omega}_w + T_w \\ T_{m2} i_2 i_p - T_{PTO} = J_p \dot{\omega}_p + J_{m2} \dot{\omega}_{m2} i_2 i_p \\ \frac{\omega_{m1}}{k+1} = \frac{v_a i_f i_{H/L}}{r_w} \\ \omega_{m2} = \omega_p i_p i_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 T_{PTO} ——动力输出轴需求扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 ω_p ——动力输出轴角速度, rad/s
 J_p ——动力输出轴上的等效转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 i_p ——PTO 减速齿轮传动比
 J_w ——驱动轮等效转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

2 DMCPS 参数匹配

与汽车或工程车辆不同, 拖拉机主要用于农田作业和道路运输, 在不同作业工况下其阻力载荷有较大差别^[28]。DMCPS 的性能发挥与两电机和动力耦合变速箱等部件的参数匹配有重要关系, 正确选择这些参数, 可以有效提高 DMET 的动力性和经济性。DMET 的基本参数和性能指标如表 1 所示。

表 1 拖拉机基本参数和性能指标
Tab. 1 Basic parameters and performance indicators of tractor

参数		数值
基本参数	拖拉机使用质量 m_s/kg	2 200
	拖车和货物总质量 m_n/kg	15 000
	驱动轮滚动半径 r_w/m	0.48
	滚动阻力系数 f	0.07(田间)、 0.016(道路)
	PTO 减速齿轮传动比 i_p	2.95
性能指标	主减速齿轮传动比 i_f	5.071 4
	最大牵引力/ kN	13.5
	最高车速 $v_{\max}/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	28
	10 km/h 最大爬坡度 $\theta_{\max}/\%$	10
	0~7 km/h 田间带载加速时间 t_m/s	10

2.1 电机参数匹配

当驱动系统进行参数匹配时, 首先要满足拖拉机的动力性要求, 然后根据作业工况数据对两电机效率特性进行匹配。DMCPS 的总功率应满足最大牵引力、最大爬升梯度和田间带载加速时间的要求。由于犁耕是拖拉机最基本且负荷最重的作业工况, 因此 DMET 的额定牵引力首先应该满足犁耕作业需求。犁耕时农具所受的平均阻力 F_T 为

$$F_T = zb_i h_k S_r \quad (10)$$

式中 z ——犁铧数
 b_i ——单犁铧宽度, cm

h_k ——耕深,cm
 S_r ——土壤比阻,N/cm²
考虑到因工作条件和农具的变化所引起的阻力动态变化,应留有 10% ~ 20% 的储备牵引能力^[29],因此拖拉机最大牵引力 F_{Tmax} 可表示为

$$F_{Tmax} = 1.2 F_T \tag{11}$$

根据最大牵引力计算得到拖拉机最大牵引功率 P_{Tmax} 为

$$P_{Tmax} = \frac{F_{Tmax} v_T}{3\,600 \eta_T} \tag{12}$$

式中 v_T ——犁耕作业车速,km/h

拖拉机加速行驶时,需要克服加速阻力,拖拉机犁耕作业时原地起步加速到 7 km/h 的加速时间为 10 s,需求功率 P_{Jmax} 为

$$P_{Jmax} = \frac{1}{3\,600 \eta_i t_m} \left[\frac{\delta m_s v_m^2}{3.6 \times 2} + (m_s g f + F_T) \int_0^{t_m} v_m \left(\frac{t}{t_m} \right)^{0.5} dt \right] \tag{13}$$

式中 δ ——拖拉机旋转质量换算系数
 v_m ——加速末期车速,km/h

爬坡度是衡量拖拉机动力性能的另一个重要指标。如果不考虑山区坡地作业,在平整的农田作业时坡度一般很小,因此,主要对道路运输作业时的爬坡度进行计算,根据最大爬坡度计算的最大功率为

$$P_{\theta max} = \frac{v_{\theta}}{3\,600 \eta_i} (f \cos \theta_{max} + \sin \theta_{max}) \cdot (m_n + m_s) g \tag{14}$$

式中 $P_{\theta max}$ ——爬坡度最大时驱动系统的峰值功率,kW

v_{θ} ——拖拉机爬坡时的车速,km/h

DMCPS 总功率为两电机功率之和 P_{total} ,其必须满足上述所有要求,即

$$P_{total} \geq \max(P_{Tmax}, P_{Jmax}, P_{\theta max}) \tag{15}$$

本文的研究对象为中小功率拖拉机,选择犁宽 25 cm 的三铧犁作为配套农机具,犁耕作业的理论速度 v_T 为 7 km/h,由式(12)计算得 P_{Tmax} 为 31.35 kW;由式(13)计算得加速需求功率 P_{Jmax} 为 14.5 kW;将 v_{θ} = 10 km/h、 θ_{max} = 10°代入式(14)得到爬坡需求功率 $P_{\theta max}$ 为 30.7 kW;综上所述,通过分析拖拉机最大牵引力、最大爬坡度、加速时间与最高车速确定了各项指标的最大需求功率。通常电机的峰值功率只能在短时间内运行,否则会大大缩减使用寿命,因此DMCDS的额定功率须达到 32 kW 才能满足拖拉机的各项动力性指标,同时考虑系统传动效率和计算误差,需要留有部分后备功率,故确定 DMCPS 的额定总功率为 35 kW。

此外,电机 EM_R 经减速齿轮与动力输出轴(PTO)相连,由 EM_R 提供拖拉机旋耕作业时动力输出轴的功率输出。旋耕的平均功耗可表示为^[30]

$$P_R = 0.1 K_{\lambda} h_0 v_x B \tag{16}$$

式中 P_R ——旋耕作业的平均功耗,kW

K_{λ} ——旋耕比阻,N/cm²

h_0 ——耕深,cm

v_x ——拖拉机行驶速度,m/s

B ——耕幅,m

考虑到旋耕作业期间负载存在波动,因此 EM_R 的峰值功率应满足条件

$$P_{Rmax} \geq 1.2 \frac{P_R}{\eta_i \eta_r} \tag{17}$$

式中 P_{Rmax} ——EM_R 峰值功率,kW

η_r ——旋耕机传动效率

经上述分析和计算,确定 EM_R 的峰值功率为 42.5 kW,结合市场上现有电机产品,初步确定 EM_R 额定功率为 20 kW,从而确定 EM_S 的额定功率为 18 kW,具体参数如表 2 所示。两电机的效率 MAP 图如图 3 所示。

表 2 电机主要参数
Tab.2 Main parameters of motors

电机	参数	数值
EM_S	额定/最大功率/kW	18/36
	额定/最大转矩/N·m	65/135
	额定/最大转速/(r·min ⁻¹)	2 700/6 000
EM_R	额定/最大功率/kW	20/45
	额定/最大转矩/N·m	70/150
	额定/最大转速/(r·min ⁻¹)	3 000/8 000

2.2 传动比参数匹配

由于拖拉机经常工作在犁耕等重负荷作业工况,需求功率大且持续时间长,因此应合理匹配传动比,使其在足够的转速范围内满足 DMET 的动力需求。本文所提出的双电机多模动力耦合驱动系统,主要针对行星齿轮特征参数 k 、高速挡传动比 i_H 、低速挡传动比 i_L 进行匹配研究,并使用 4 个动力性指标对其进行评价,包括最大牵引力、最高车速、爬坡能力和田间带载起步的加速能力。

为了保证 DICPS 能够为犁耕和其他重载作业提供足够的动力,以车速 7 km/h 进行犁耕作业的最大传动比 i_{max} 需满足

$$\left\{ \begin{aligned} i_{max} &\geq \frac{(F_{Tmax} + m_s g f) r_w}{T_{max1} (\omega_{m1}) \eta_i} \\ \omega_{m1} &= \frac{v_a i_{max}}{r_w} \\ i_{max} &= (k + 1) i_L i_f \end{aligned} \right. \tag{18}$$

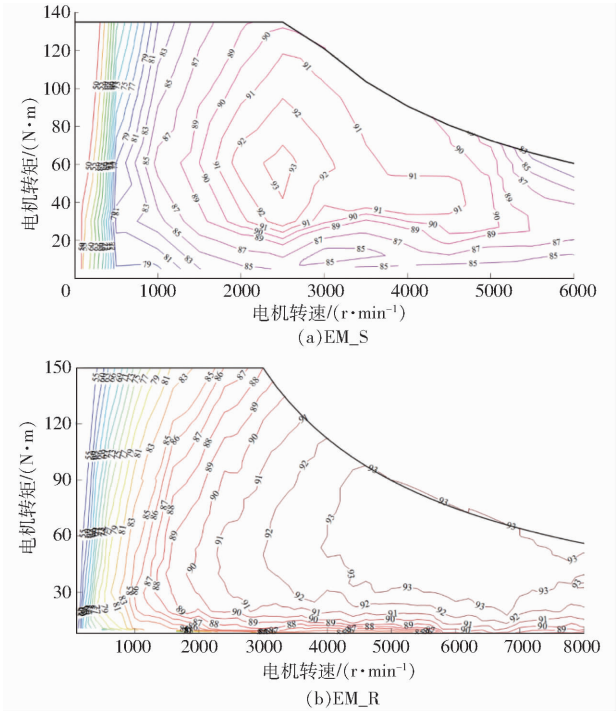


图3 电机效率 MAP 图
Fig.3 Efficiency MAP of motor

式中 $T_{\max 1}$ ——EM_S 的最大输出扭矩, N·m
 $F_{T_{\max}}$ ——拖拉机所受牵引阻力, N
 i_L ——行走低速挡传动比

根据前文的工作模式分析可知,当 DMET 以中高速道路运输时,DMCPS 工作在双电机耦合驱动模式,为保证 DMET 可达到最高车速 28 km/h,且驱动系统的输出扭矩能够克服行驶阻力,DMCPS 的最大持续输出转速 $v_{\max}$ 与最小传动比 $i_{\min}$ 之间的关系需满足

$$\begin{cases} T_{m1} i_{\min} \eta_t \geq (m_n g + m_s g) f r_w \\ \omega_{1\max} + k \frac{\omega_{2\max}}{i_2 i_{22}} \geq \frac{v_{\max} i_{\min}}{3.6 r_w} \\ i_{\min} = i_H i_f (k + 1) \end{cases} \quad (19)$$

式中 $\omega_{1\max}$ ——EM_S 的最高持续输出角速度, rad/s
 $\omega_{2\max}$ ——EM_R 的最高持续输出角速度, rad/s
 i_H ——行走高速挡齿轮传动比

拖拉机需要满足道路运输条件下的最大坡度要求。DMET 在 15% 坡度的道路上以车速 10 km/h 前进所需的传动比表示为

$$\begin{cases} i_{H/L} i_f T_{c\max} \geq F_{total} r_w \\ F_{total} = (G_t + G_s) (f \cos \theta + \sin \theta) \\ v_\theta = 10/3.6 \\ \theta = \arctan(15/100) \end{cases} \quad (20)$$

式中 $T_{c\max}$ ——行星架最大输出转矩

基于上述分析与计算,DMCPS 的行星齿轮特征参数 k 为 2.882 3,行走高速挡传动比 i_H 为 2.294,低

速挡传动比 i_L 为 3.85。

3 基于 SDP – ESA 实时自适应能量管理策略

随机动态规划作为一种全局优化算法,可以在无限时域内搜索所有系统状态的所有可行控制动作来实现系统总效率的全局优化。虽然离线计算量较大,但是计算得到的状态反馈控制律可以在线应用。研究发现,SDP 的控制性能与转移概率预测模型的精度密切相关。理论上,通过对大量工况数据的统计分析,可以得到精确的概率预测模型,从而获得更为准确的全状态反馈控制律。然而,与汽车等道路车辆不同,拖拉机作业工况多且杂,同种类作业工况的负载会随农艺要求的不同而有所差异,因此,为了提高 SDP 能量管理策略的控制性能和工况适应性,本文将随机动态规划与极值搜索算法相结合,提出一种实时自适应能量管理策略。该策略将系统状态(需求功率、车速等)反馈至 SDP 以获得近似全局最优解,将系统输出(能量损耗或系统总效率)反馈至 ESA 控制器在线搜索局部最优点,以补偿 SDP 的控制指令。状态和输出双反馈的方式有利于降低两种算法的局限性,发挥各自的优势,基于 SDP_PESA 实时自适应能量管理策略的基本原理如图 4 所示。

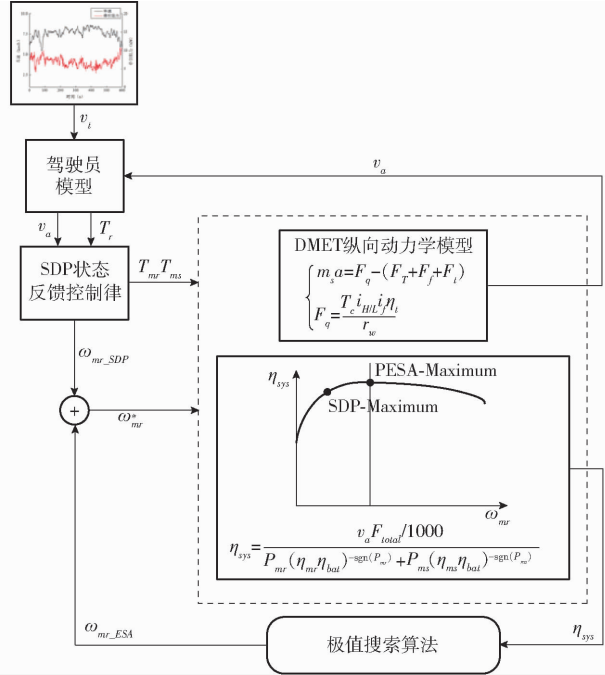


图4 基于 SDP_PESA 实时自适应能量管理策略示意图
Fig.4 Schematic of real-time adaptive EMS based on SDP_PESA

3.1 基于 SDP 的全局优化控制

3.1.1 最优控制问题

双电机驱动电动拖拉机的能量管理问题可转换为多目标约束优化问题,目的是在满足驾驶员需求功率和动力系各部件物理约束的同时,找到最优控

制输入,以最大限度减少 DMET 在作业过程中的能量损耗,其代价函数 J 可表示为

$$J = \int_{t_0}^{t_f} c(x(t), u(t)) dt \quad (21)$$

式中 $x(t)$ ——系统在 t 时刻的状态变量
 $u(t)$ ——系统在 t 时刻的控制变量
 $[t_0, t_f]$ ——系统优化时段
 $c(x(t), u(t))$ ——系统瞬时代价函数

由于 DMET 具有两个动力源,因此整机驱动总效率受 2 个电机之间功率分配的影响。通过综合考虑电池、电机和变速器的效率,优化整体效率以增加 DMET 的作业里程。故选择系统总效率作为主要代价函数,此外,模式切换策略对双电机驱动电动拖拉机的能耗经济性有重要影响,如果不对模式切换次数加以限制,以效率最高为目标的能量管理策略将会导致驱动模式的频繁切换,影响拖拉机行驶的平稳性和动力性。因此,需要增加惩罚函数来避免频繁切换,具体可表示为

$$\begin{cases} c(x(t), u(t)) = 1/\eta_{sys}(t) + \gamma |shift(t)| \\ \eta_{sys} = P_{out}/P_{bat} \\ P_{out} = \frac{F_{total} v_a}{1\,000} \\ P_{bat} = \frac{T_{m1} \omega_{m1} \eta_{m1}^{-\text{sgn}(T_{m1})} + T_{m2} \omega_{m2} \eta_{m2}^{-\text{sgn}(T_{m2})}}{1\,000 \eta_{bat}} \end{cases} \quad (22)$$

式中 η_{sys} ——系统总效率
 γ ——加权因子
 P_{out} ——DMET 输出功率, kW
 η_{m1} ——电机 EM_S 运行效率
 η_{m2} ——电机 EM_R 运行效率
 η_{bat} ——电池充放电效率

其中 $shift(t)$ 为模式切换指令,其取值分别为 -1、0、1,分别代表降档、保持和升档。

当 DMET 工作在单电机模式(M1S、M2S)时,电机工作点完全由目标车速和驾驶员需求扭矩决定;而在双电机耦合模式中,两电机的目标转矩与驾驶员需求扭矩成比例,两电机转速在约束条件内具有多种组合,并且电机在不同工作点的运行效率不同,这意味着当车速一定的情况下,电机 EM_S 和 EM_R 不同的转速组合会导致不同的系统驱动效率。因此,最优控制的本质是找到 EM_S 和 EM_R 的最优功率分配,以提高电动拖拉机在给定车速、需求扭矩和电池荷电状态下的总效率。定义功率分配比 PDR 为电机 EM_R 输出功率占总需求功率的比值,当 PDR 为 0 时,DMCDS 工作在 M1S 模式;当 PDR 为 1 时,DMCDS 工作在 M2S 模式;当 PDR 大于 0 小于 1 时,DMCDS 工作在 DMC 模式,具体表

示为

$$PDR = \frac{P_{m2} \eta_t}{P_{out}} \quad (23)$$

式中 P_{m2} ——电机 EM_R 输出功率, kW

如前所述,选择两电机功率分配比和驱动模式切换命令作为控制变量,以驾驶员需求功率 P_r 、车轮转速 ω_w 和当前驱动模式作为状态变量,即

$$\begin{cases} u(t) = (PDR(t), shift(t)) \\ x(t) = (P_r(t), \omega_w(t), Mode(t)) \end{cases} \quad (24)$$

其中 $Mode(t)$ 表示当前驱动模式,其取值为 -1、0、1,分别代表 EM_S 单独驱动模式,双电机耦合驱动模式和 EM_R 单独驱动模式。为确保电池和电机的安全运行,对每个时刻需要满足的状态和控制变量施加瞬时约束

$$\begin{cases} 0 \leq \omega_{m1}(t) \leq \omega_{1max} \\ 0 \leq \omega_{m2}(t) \leq \omega_{2max} \\ 0 \leq |T_{m1}(\omega_{m1}(t))| \leq T_{1max}(\omega_{m1}(t)) \\ 0 \leq |T_{m2}(\omega_{m2}(t))| \leq T_{2max}(\omega_{m2}(t)) \\ 0 \leq |P_{bat}(t)| \leq P_{bat_max} \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (25)$$

式中 SOC_{max} ——电池 SOC 最大值
 SOC_{min} ——电池 SOC 最小值
 P_{bat_max} ——电池组的最大功率, kW

3.1.2 需求功率随机预测模型

拖拉机作业过程中,驾驶员会根据作业类型及外界环境,如车轮滑转、坡度、车速等信息产生加速或制动动作,这些动作可由拖拉机需求功率(变速箱输入轴功率)来表征。为外界对拖拉机的随机扰动,无法提前预知。

马尔可夫过程适用于以不确定的状态转换为特征的领域。马尔可夫过程满足马尔可夫属性,这意味着状态转换独立于当前决策步骤之前的动作和状态。因此,拖拉机需求功率具有马尔科夫性质,即下一时刻的需求功率只取决于当前需求功率,与之前的状态无关。本文基于马尔科夫理论建立 DMET 需求功率随机预测模型。

图 5 为拖拉机在犁耕作业中实测的牵引阻力和车速,根据 DMET 的纵向动力学模型(式(1))计算出每一时刻对应的驾驶员需求功率。

采用 Nearest Neighborhood 插值法将需求功率离散化,定义 P_{ij} 为当前时刻需求功率到下一时刻需求功率的转移概率, P_{ij} 可由最大似然估计法计算得到,即

$$P_{ij} = P(P_r^i(t) | P_r^j(t+1)) \quad (i, j = 1, 2, \dots, N_p) \quad (26)$$

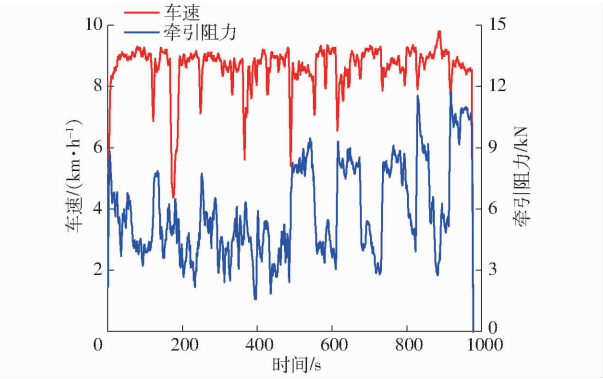


图5 拖拉机犁耕作业循环工况

Fig. 5 Ploughing cycle for agricultural tractors

$$\left\{ \begin{aligned} P_{ij} &= \frac{m_{i,j}}{\sum_{j=1}^{N_p} m_{i,j}} \\ \sum_{j=1}^{N_p} P_{ij} &= 1 \end{aligned} \right. \quad (27)$$

式中 $P_r^i(t)$ —— t 时刻的需求功率,kW
 $P_r^j(t+1)$ —— $t+1$ 时刻的需求功率,kW
 $m_{i,j}$ —— t 时刻需求功率为 $P_r^i(t)$,并且 $t+1$ 时刻需求功率为 $P_r^j(t+1)$ 在作业工况循环中出现的次数

拖拉机在犁耕作业工况下的需求功率转移概率预测模型如图6所示。马尔可夫模型反映了拖拉机未来功率需求的概率分布和未来工况周期的变化。因此,在SDP优化的迭代过程中会产生随机的驱动循环,从而使优化结果对一系列驱动循环有效,而不是特定的驱动循环。

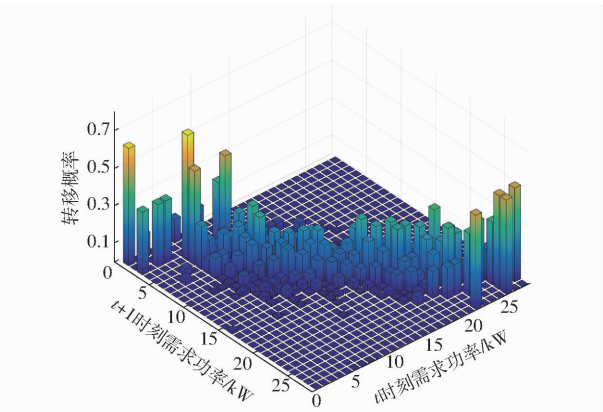


图6 犁耕工况下的需求功率转移概率

Fig. 6 Power demand transition probability under ploughing condition

3.1.3 随机动态规划问题求解

将DMET建模为离散时间动态系统

$$\begin{cases} x(t+1) = f'(x(t), u(t), w(t)) \\ w(t) = P_r(t) \end{cases} \quad (28)$$

式中 f' ——DMET状态转移方程

$P_r(t)$ ——拖拉机作业需求功率,kW
 $w(t)$ —— t 时刻的随机变量,其满足需求功率转移概率分布

电动拖拉机随机最优能量管理策略的目的是确定控制动作序列 U ,使初始状态为 x_0 经过无限时域后达到每个状态代价的期望最小,保持牵引动力性的同时,使电能消耗最少,提高能耗经济性。由于DMET驱动系统的动力学特性和代价函数在无限时域上为常数,没有工况循环的终端限制,并且无限时域上生成的策略是不变的,易于在控制器中实现,因此将3.1.1节中的有限动态优化问题转换为无限马尔可夫决策问题。

$$V_U(x_0) = \min E \left(\sum_{t=0}^{\infty} \beta^t c(x_t, U(x_t), x_{t+1}) \right) \quad (29)$$

式中 $V_U(x_0)$ ——系统由状态 x_0 开始经过优化策略 $u_t = U(x_t)$ 后的总体代价值
 β ——确保总体代价函数收敛的折扣因子,取 $0 \sim 1$

$c(x_t, U(x_t), x_{t+1})$ ——瞬时代价函数
 $E(\cdot)$ ——总体代价函数的数学期望

基于Bellman的最优性原则,DMET随机动态规划的最优值函数可表示为

$$V_U(x_t) = \beta \min \left(\sum_{x_{t+1}} p_r(x_{t+1} | x_t, u_t) V_U(x_{t+1}) + c(x_t, u_t, x_{t+1}) \right) \quad (30)$$

在每一时刻的状态变量 x_t 下,对于任何时刻的驾驶员需求功率,获得最佳控制策略 $u_t = U(x_t)$,使当前时刻和未来时刻的期望成本累加值最小,因此针对最优值函数的最优控制策略可以表示为

$$U^*(x_t) = \operatorname{argmin} \left(\beta \sum_{j=1}^N P(x_{t+1} | x_t, u_t) V_U(x_{t+1}) + c(x_t, u_t) \right) \quad (31)$$

通常有3种方法可以求解SDP全局优化问题:值迭代、策略迭代和改进的策略迭代方法^[33]。由于值迭代算法(Value iteration)是求解折扣准则马尔可夫决策过程问题的最为广泛且最易实现的方法,因此本文采用值迭代方法计算最优代价函数。图7为基于SDP的状态反馈控制律,可以看出当作业车速低于5 km/h且需求功率小于18 kW时,DMET主要由EM_S独立驱动;随着车速的继续增加,当车速高于6 km/h时,EM_R开始作为主要动力源驱动DMET行驶作业,EM_S则根据当前需求功率和自身运行效率适时参与驱动。

3.2 基于ESA的自适应寻优控制

本文以整机驱动效率 η_{sys} 为性能函数,基于正

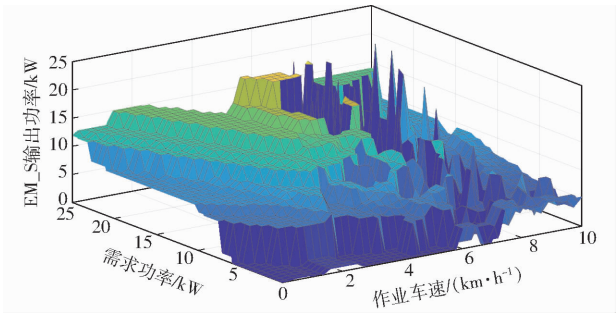


图 7 犁耕工况状态反馈控制律

Fig. 7 State feedback control law under plowing condition

弦扰动的极值搜索算法设计了一种使 η_{sys} 最大化的输出反馈控制器,其作用原理如图 8 所示。其中 $\alpha\sin(\omega t)$ 为控制回路的扰动信号,用于测量 η_{sys} 的梯度信息,由于所加入的扰动信号频率相比控制对象要慢得多,因此可以把控制对象看成静态映射关系 $\eta_{sys}=f(\omega_{mr})$,从图中可以看出电机 EM_R 转速 ω_{mr} 和系统总效率 η_{sys} 分别为 DMET 非线性系统的输入和输出,为了避免 η_{sys} 的低频分量干扰自适应寻优过程,首先采用高通滤波器来提取 η_{sys} 的高频周期分量,去除均值,保持非稳态分量,从而获得系统静态输出斜率 δ 。如果系统输出的斜率为负,则扰动信号与正弦输出不同相;反之则与正弦输出同相。两个异相信号相乘得到平均值为负的非零解调信号,反之非零解调信号的平均值为正,然后采用低通滤波器去除非零解调信号的高频分量并留下平均值,通过积分模块得到最优补偿转速估计值 $\hat{\omega}_{mr}$,从

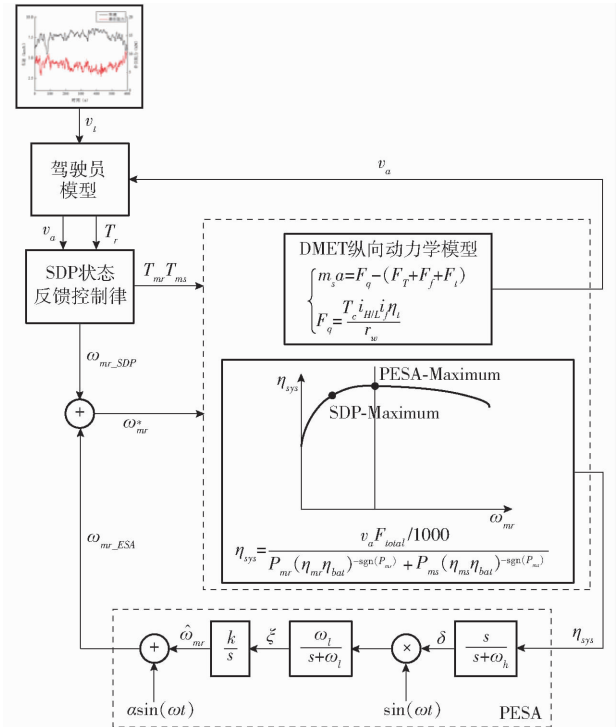


图 8 基于正弦扰动的极值搜索算法控制原理

Fig. 8 Control principle of extremum seeking algorithm based on sinusoidal perturbation

而可以将 ω_{mr_SDP} 向最优工作点 ω_{mr}^* 移动,直到达到系统最大稳态效率 η_{sys}^* 。

根据上述分析,基于正弦扰动的 ESA 动态方程可以表示为

$$\begin{cases} \eta_{sys} = f(v_a, \omega_{mr}^*, T_{mr}) \\ \omega_{mr}^* = \omega_{mr_SDP} + \omega_{mr_ESA} \\ \omega_{mr_ESA} = \hat{\omega}_{mr} + \alpha \sin(\omega t) \\ \hat{\omega}_{mr} = \xi L^{-1}(k_s/s) \\ \xi = \delta \sin(\omega t) L^{-1}\left(\frac{\omega_l}{s + \omega_l}\right) \\ \delta = \eta_{sys} L^{-1}\left(\frac{s}{s + \omega_h}\right) \end{cases} \quad (32)$$

- 式中 α ——扰动信号的振幅
 ω ——扰动信号的频率
 ω_h ——高通滤波器的截止频率
 ω_l ——低通滤波器的截止频率
 ξ ——低通滤波器的输出信号
 k_s ——积分增益
 L^{-1} ——拉普拉斯逆变换

4 仿真实验与结果分析

为了使能量管理策略获得更好的控制性能,在进行仿真分析之前需要确定 PESA 控制器的关键参数,包括扰动信号的振幅和频率、积分器增益、高通滤波器和低通滤波器的截止频率。较大的振幅 α 和积分器增益 k_s 可以扩大 PESA 的搜索范围,从而导致更快的收敛速度,但是较大的 α 和 k_s 同样会增加控制器的振荡幅度。因此, α 和 k_s 的选择应综合考虑收敛速度与系统稳定性。此外,在可行范围内应使 ω_h 和 ω_l 尽可能地高,以确保 PESA 控制器在受到干扰时能够快速响应。经过多次仿真调试,最终确定各参数值如表 3 所示。

表 3 PESA 控制器关键参数

Tab. 3 Key parameters of PESA controller

参数	α	ω	k_s	ω_h	ω_l
数值	120	2 000	600	300	60

为了验证基于 SDP_PESA 的实时自适应能量管理策略的有效性和控制性能,在 Matlab/Simulink 中建立了如图 9 所示的 DMET 前向仿真模型,并进行仿真实验,该模型包括作业工况循环模块、驾驶员模块、EMS 模块、电池模块、传动系统模块、整车模块以及消耗能量计算模块。通过实时信息传输和每个模块的联合控制实现对 DMET 的控制。

4.1 犁耕作业工况仿真实验

仿真所采用的作业工况数据是在田间犁耕作业

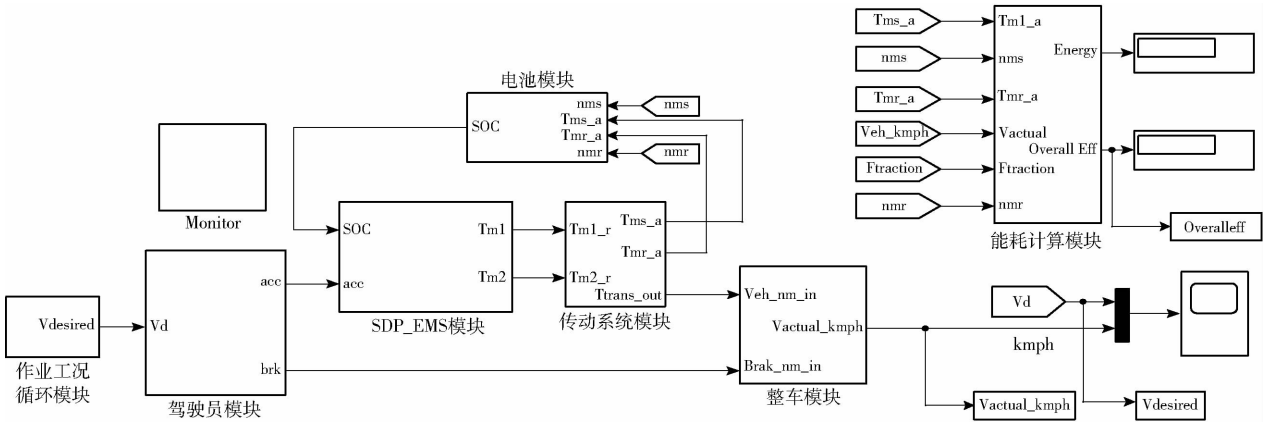


图 9 DMET 前向仿真模型
Fig. 9 Forward simulation model of DMET

中实测的真实数据,以准确模拟实际作业情况。记录的拖拉机车速和牵引阻力如图 10 所示,其中平均牵引阻力为 7 020.3 N,平均车速为 7.43 km/h。

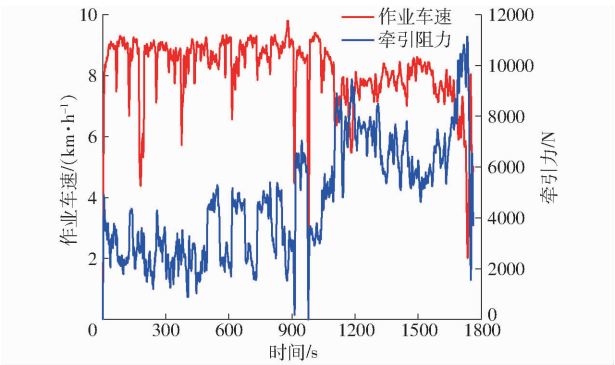


图 10 犁耕仿真工况车速和牵引力变化曲线
Fig. 10 Variation curves of vehicle speed and traction force under plowing conditions

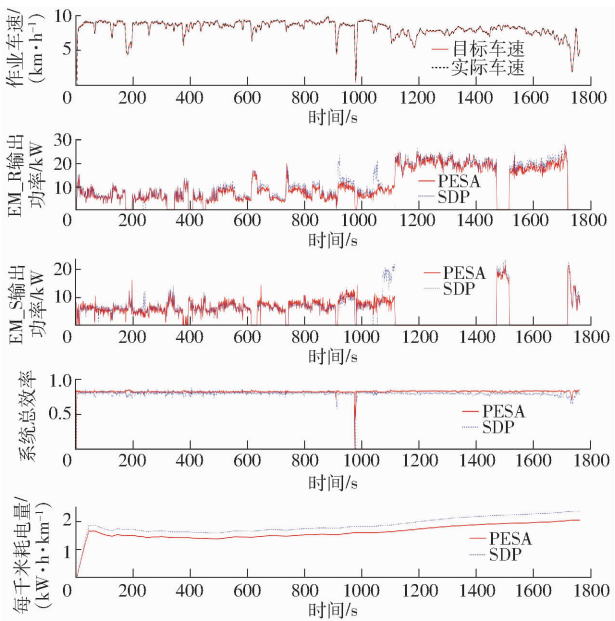


图 11 犁耕作业工况下优化结果对比
Fig. 11 Comparison between optimized results under plowing conditions

在犁耕工况下采用两种策略的优化结果对比如

图 11 所示。从图中可以看出,DMET 实际车速可以实时跟踪工况车速的变化,在负载波动频繁的时段,跟踪误差较大,最大误差为 0.468 km/h,平均误差为 0.049 km/h,表明 DMET 整车仿真模型高效可行,能够满足仿真精度要求;对比分析 EM_R 和 EM_S 输出功率可以发现,在 PESA 实时反馈校正的作用下,当系统处于双电机耦合驱动模式时,EM_R 输出功率有所降低,EM_S 输出功率则对应升高,这提高了 EM_S 的负荷率和运行效率,进而提高了 DMET 的整机驱动效率。此外,由于 PESA 控制器中存在扰动信号 $\alpha\sin(\omega t)$,因此,优化后的输出功率存在轻微波动;由整机驱动效率曲线可知,经 PESA 控制器优化后的整机驱动效率几乎在每一时刻都有所提高,其效率平均值为 0.817,SDP 作用下的总效率平均值为 0.800,在 SDP 的基础上提高了 2.13%;根据电池组数学模型,可以计算得到瞬时放电电流 I_d ,进而积分得到整个工况的总耗电量,同时根据车速计算 DMET 的总作业里程,从而可以得到每千米犁耕的耗电量。基于 SDP 和 SDP_PESA 能量管理策略的每千米犁耕耗电量平均值分别为 1.77 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{km}$ 和 1.59 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{km}$,在 PESA 的自适应优化作用下,平均耗电量降低了 10.17%。

4.2 道路运输工况仿真实验

除了田间作业工况外,城郊道路运输是拖拉机的另一主要工况,拖拉机在运输作业时无异于道路车辆,因此参照低速 EUDC 循环工况建立拖拉机的城郊道路运输工况,如图 12 所示,此工况以拖拉机牵引拖车和货物的总质量为 15 000 kg 的情况为例,平均车速为 18.5 km/h,最高车速为 27.9 km/h,工况总时长为 400 s。假设电动拖拉机在水平良好路面进行运输作业,忽略坡度阻力和加速阻力。

图 13 为 DMET 在道路运输工况分别采用基于 SDP 和 SDP_PESA 的能量管理策略的优化结果。图中仿真所得实际车速能够较好地跟踪工况车速的变化,

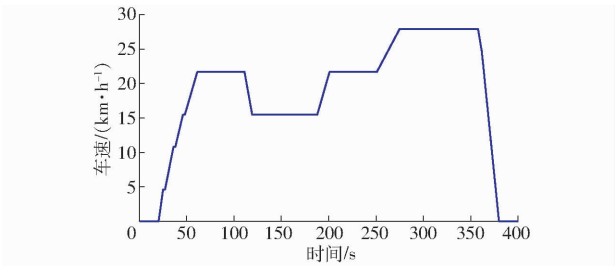


图 12 拖拉机道路轮运工况车速

Fig. 12 Tractor speed under road transport condition

最大偏差为 0.7 km/h,工况平均偏差为 0.043 6 km/h;由电机输出功率曲线可知,在 PESA 输出反馈控制器的反馈校正作用下,与 SDP_EMS 相比,EM_R 输出功率有所降低,最大降低了 2.92 kW,EM_S 输出功率对应升高,最大升高了 2.65 kW;由驱动总效率曲线可以看出,经 PESA 优化后的整机驱动效率更高,整个工况的平均效率为 0.826,比 SDP_EMS 提高了 1.97%,值得注意的是在 DMET 加速阶段(如 252 ~ 275 s),PESA 的优化作用更加明显,这表明当 DMCDs 处于动态调速状态时,基于 PESA 的输出反馈控制器可以自适应寻找局部极值点,在 SDP 基础上进一步提高了整机驱动效率。每千米耗电量曲线进一步证明了这一观点,基于 SDP_PESA 的平均耗电量为 0.98 kWh/km,相比 SDP_EMS 降低了 16.2%,平均耗电量的降低意味着更多的作业里程。

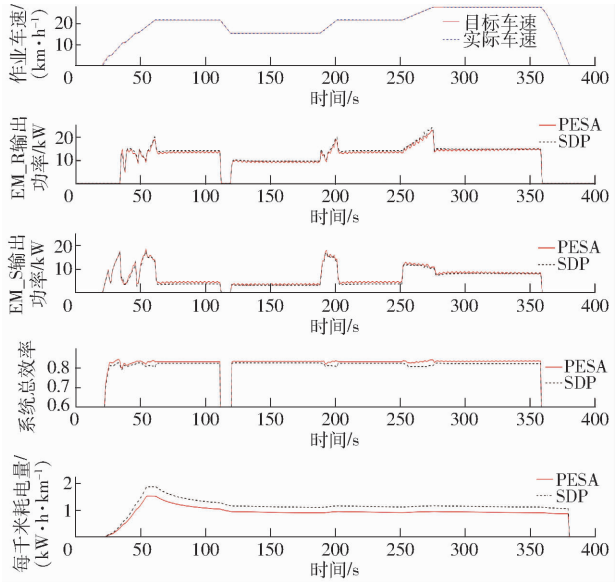


图 13 道路运输工况下优化结果对比

Fig. 13 Comparison between optimized results under road transportation conditions

4.3 两种能量管理策略对比分析

前文分别对基于随机动态规划和基于 SDP_PESA 的能量管理策略进行了设计与仿真实验。DMET 采用 2 种能量管理策略在犁耕和运输工况下作业的性能对比如表 4 所示。从表中可以看

出,在仿真条件相同的情况下,基于 SDP_PESA 能量管理策略的经济性优于 SDP_EMS,原因在于 SDP_EMS 通过对工况数据的统计分析得到全局状态反馈控制律,该控制律可以实时查表应用,适用于具有相同需求功率转移概率预测模型的工况。然而,对于具有不同统计特性的作业工况,SDP 的适应性明显变差,控制效果降低;基于 SDP_PESA 的能量管理策略将全局优化算法与局部寻优算法相结合,组成实时自适应优化算法,该算法对工况的适应性强于 SDP,能耗经济性和电机运行效率优于 SDP,控制性能更好。

表 4 不同工况下基于两种能量管理策略的 DMET 性能对比

Tab.4 Comparison of DMET performance based on two energy management strategies under different working conditions

工况	EMS	平均整机 驱动效率	平均耗电量/ (kW·h·km ⁻¹)	工况末端 SOC
犁耕	SDP_EMS	0.800	1.77	58.3
	SDP_PESA	0.817	1.59	61.1
运输	SDP_EMS	0.810	1.17	85.7
	SDP_PESA	0.826	0.98	87.3

5 结论

(1)提出了一种用于纯电动拖拉机的新型双电机多模动力耦合驱动系统,该系统可实现 4 种驱动模式:EM_S 单独驱动、EM_R 单独驱动、双电机耦合驱动和双电机独立驱动。多种驱动模式可以更好地满足拖拉机多种作业工况的动力需求。针对系统构性特点,以最大牵引力、最高车速、最大爬坡度和加速时间为动力性指标,完成了两电机和耦合箱主要传动比的参数匹配,使双电机多模式动力传动系统的动态特性满足 DMET 动力需求。

(2)为了提高纯电动拖拉机的能耗经济性,根据拖拉机的作业特点和双电机多模动力耦合驱动系统的能量流特点,以系统能量损耗最小为目标,提出了基于随机动态规划的全局优化能量管理策略;此外,为了降低 DMET 需求功率随机预测模型的误差,提升能量管理策略的工况适应性,在 SDP 的基础上基于极值搜索算法制定了具有输出反馈控制功能的实时自适应能量管理策略,并在犁耕作业工况和道路运输工况下对两种能量管理策略进行了仿真实验。仿真结果表明,与 SDP_EMS 相比,基于 SDP_PESA 的能量管理策略可以获得更高的整机驱动效率,降低了每千米作业耗电量,有效增加了 DMET 的作业里程。此外,基于 SDP_PESA 的能量管理策

略具有良好的实时性,可以实车应用。

(3)SDP_EMS 中没有考虑模式切换过程和变速过程中执行元件的瞬时响应特性,因此,模式切换过

程控制研究是下一阶段的主要工作,为物理样机实验做准备。

参 考 文 献

- [1] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180801&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.001. (in Chinese)
- [2] 方树平,王宁宁,徐立友,等. 纯电动拖拉机与传统燃油拖拉机性能对比分析[J]. 农机化研究, 2018, 40(2): 241-246.
FANG Shuping, WANG Ningning, XU Liyou, et al. Performance comparison between pure electric tractor and conventional fuel tractor [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 241-246. (in Chinese)
- [3] 沈长龙,周俊,姬长英,等. 中国电动拖拉机研究进展[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(10):102-107.
SHEN Changlong, ZHOU Jun, JI Changying, et al. Research review about electric tractor in China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(10):102-106. (in Chinese)
- [4] VOLPATO C E S, PAULA V R, BARBOSA J A, et al. Evaluation of the operational viability of the use of electricity as a source of power in agricultural tractors [C]//ASABE Ann. Int. Meet., 2016.
- [5] UEKA Y, YAMASHITA J, SATO K, et al. Study on the development of the electric tractor specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor [J]. EAEF, 2013, 6(4): 160-164.
- [6] 陈燕呢. 电动拖拉机动力系统设计及驱动控制方法研究[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)
- [7] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):379-388. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190645&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.045. (in Chinese)
- [8] ENANG W, BANNISTER C. Modelling and control of hybrid electric vehicles (a comprehensive review) [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 1210-1239.
- [9] BAYINDER K Ç, GÖZÜKÇÜK M A, TEKE A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units [J]. Energy Convers. Manage, 2011, 52(2): 1305-1313.
- [10] KIM N, ROUSSEAU A, RASK E. Autonomie model validation with test data for 2010 Toyota Prius [J]. Presented at the SAE Tech. Papers, 2012(1):1040.
- [11] WU Jinglai, LIANG Jiejunyi, RUAN Jiageng, et al. A robust energy management strategy for EVs with dual input power-split transmission [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 111: 442-445.
- [12] 杜玖玉,王贺武,黄海燕. 基于规则的混联式混合动力系统控制策略[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1):152-157.
DU Jiuyu, WANG Hewu, HUANG Haiyan. Rule-based control strategy application on power-split hybrid powertrain [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp.1): 152-157. (in Chinese)
- [13] 王春光. 并联式混合动力拖拉机能量管理策略研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2014.
WANG Chunguang. Study on energy management strategy for parallel hybrid electric tractor [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] GÖKCE K, ÖZDEMİR A. An instantaneous optimization strategy based on efficiency maps for internal combustion engine/battery hybrid vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 81: 255-269.
- [15] LEE H S, KIM J S, PARK Y, et al. Rule-based power distribution in the power train of a parallel hybrid tractor for fuel savings [J]. Int. J. Precis. Eng. Manuf., 2016, 3(3): 231-237.
- [16] ZHANG Shuo, XIONG Rui, ZHANG Chengning. Pontryagin's minimum principle-based power management of a dual-motor-driven electric bus [J]. Applied Energy, 2015, 159: 370-380.
- [17] 刘克. 实用马尔可夫决策过程[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [18] KOLMANOVSKY I, SIVERGUINA I, LYGOE B. Optimization of powertrain operating policy for feasibility assessment and calibration: stochastic dynamic programming approach [C]//Proceedings of the 2002 American Control Conference, New York. IEEE, 2002: 1425-1430.
- [19] VAGG C, AKEHURST S, BRACE C J, et al. Stochastic dynamic programming in the real-world control of hybrid electric vehicles [J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2015, 24(3): 853-866.
- [20] LI L, YAN B, YANG C, et al. Application-oriented stochastic energy management for plug-in hybrid electric bus with AMT

- [J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2015, 65(6): 4459–4470.
- [21] DU Yongchang, ZHAO Yue, WANG Qinpu, et al. Trip-oriented stochastic optimal energy management strategy for plug-in hybrid electric bus [J]. Energy, 2016, 115: 1259–1271.
- [22] 秦斐燕. 基于随机动态规划的混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 深圳: 中国科学院深圳先进技术研究院, 2018. QIN Feiyan. Research on stochastic dynamic programming based energy management strategy of hybrid vehicles [D]. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [23] ARIYUR K B, KRSTIC M. Real-time optimization by extremum-seeking control [M]. Wiley-Interscience, Hoboken, 2003.
- [24] ZHANG Chunlei, ORDÓÑEZ R. Extremum-seeking control and applications: a numerical optimization-based approach [M]. Springer, 2012.
- [25] BIN Yang, LI Yaoyu, FENG Nenglian. Nonlinear dynamic battery model with boundary and scanning hysteresis [C] // ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference, 2009: 245–251.
- [26] WINDARKO N A, CHOI J. SOC estimation based on OCV for NiMH batteries using an improved takacs model [J]. Journal of Power Electronics, 2010, 10(2): 181–186.
- [27] LIN C C, KIM M J, PENG H, et al. System-level model and stochastic optimal control for a PEM fuel cell hybrid vehicle [J]. ASME: J. Dyn. Syst. Meas. Control, 2006, 128(4): 878–890.
- [28] 张松明, 吴湘淦. 农业机械运用原理[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1990.
- [29] 周一鸣. 汽车拖拉机学: 汽车拖拉机理论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.
- [30] 胡雷. 基于有限元技术的旋耕机设计与工作部件仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014. HU Lei. Based on finite element technology of rotary cultivator design and working parts simulation research [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
-

(上接第 529 页)

- [15] 何东健, 邵小宁, 王丹, 等. Kinect 获取植物三维点云数据的去噪方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 331–336. HE Dongjian, SHAO Xiaoning, WANG Dan, et al. Denoising method of 3-D point cloud data of plants obtained by Kinect [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 331–336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160145&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.045. (in Chinese)
- [16] 倪涛, 赵泳嘉, 张红彦, 等. 基于 Kinect 动态手势识别的机械臂实时位姿控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 417–423. NI Tao, ZHAO Yongjia, ZHANG Hongyan, et al. Real-time mechanical arm position and pose control system by dynamic hand gesture recognition based on Kinect device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 417–423. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171053&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.053. (in Chinese)
- [17] 蔡诗琦. 基于 Kinect 的人体骨架提取与坐姿识别研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018. CAI Shiqi. Research on human skeleton extraction and sitting activity recognition based on Kinect [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [18] 徐立友, 吴依伟, 周志立. 基于人体测量学的拖拉机驾驶员工作空间设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 124–129. XU Liyou, WU Yiwei, ZHOU Zhili. Design of workplace for tractor operator based on anthropometry [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11): 124–129. (in Chinese)
- [19] GB/T 13547—1992 工作空间人体尺寸[S]. 1992.
- [20] GB/T 10000—1988 中国成年人人体尺寸[S]. 1998.
- [21] SEOKHEE N, SUNGHYUN L, HWA-SOON C, et al. Evaluation of driver's discomfort and postural change using dynamic body pressure distribution [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(12): 1085–1096.
- [22] LILIANA L P, MARCO L C. 3D skeleton-based human action classification: a survey [J]. Pattern Recognition, 2016, 53: 130–147.
- [23] 吴燕. 基于层次分析法的重卡企业大客户价值与商机分析研究[D]. 济南: 山东大学, 2019. WU Yan. Based on analytic hierarchy process analysis and research the value of large customer and business opportunity of heavy truck enterprise [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019. (in Chinese)