doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.011

混合动力电动拖拉机模糊自适应能量管理策略研究

高宗余[1,2]　柴建敏[3]　聂　晶[1,4]　李利桥[1,3]

(1.石河子大学机械电气工程学院,石河子 832003;2.现代农业机械兵团重点实验室,石河子 832003;
3.兵团石河子国家农业科技园区管委会,石河子 832011;4.农业农村部西北农业装备重点实验室,石河子 832003)

摘要:针对非道路移动电动拖拉机犁耕作业过程负荷剧烈波动导致动力系统频繁放电使其牵引效率低、续航里程短、能耗量大等问题,提出一种模糊逻辑控制与作业模式相结合的混合动力系统自适应能量管理策略。建立混合动力电动拖拉机非道路移动作业模式,在此基础上建立不同作业模式下锂电池与超级电容混合动力系统能量流模型并对动力系统整体建模。在分析作业过程需求功率的基础上提出混合动力系统输出电压模糊自适应动态阈值调整策略,以最小节能率为目标,采用遗传算法对其权重进行寻优。通过仿真试验分别对 4 种能量控制策略下功率分配、荷电状态及能耗进行比较,验证在不同功率分配控制策略下混合动力系统在不同作业模式下功率分配效果。仿真试验结果表明,模糊自适应控制策略相比于比例法功率分配控制策略总制动能量回收率相对提高 61.5%,总能耗相对降低 19.96%,锂电池峰值电流降低 39.96%,电动拖拉机续航里程提升 19.53%。结果表明,所提控制方法可提高电动拖拉机牵引效率、延长续航里程、降低能量能耗及延长电池使用寿命。

关键词:电动拖拉机;作业模式;混合动力;能量管理;遗传算法

中图分类号:TM91　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0108-11　　**OSID**:

Fuzzy Adaptive Energy Management Strategy for Hybrid Electric Tractors

GAO Zongyu[1,2]　CHAI Jianmin[3]　NIE Jing[1,4]　LI Liqiao[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832003, *China*
2. *Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Modern Agricultural Machinery, Shihezi* 832003, *China*
3. *Management Committee of Xinjiang Production and Construction Corps Shihezi National Agricultural Science and Technology Park, Shihezi* 832011, *China*
4. *Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi* 832003, *China*)

Abstract: Aiming at the problems such as low traction efficiency, short driving range and high energy consumption caused by frequent discharge of the power system due to the intense load fluctuations during the plowing operation of non-road mobile electric tractors, an adaptive energy management strategy for hybrid system combining fuzzy logic control and operation mode was proposed. The non-road mobile operation mode of the hybrid electric tractor was established. On this basis, the energy flow model of the lithium battery and supercapacitor hybrid system under different operation modes was established and the overall power system was modelled. Based on the analysis of the power requirements in the operation process, a fuzzy adaptive dynamic threshold adjustment strategy for the output voltage of the power system was proposed, and its weights were optimized by genetic algorithm with the goal of minimizing the energy-saving rate. Through simulation experiments, the power allocation, the state of charge and energy consumption under four energy control strategies were compared respectively to verify the power allocation effect of the hybrid system in different operation modes under different power allocation control strategies. The simulation experiments showed that compared with the proportional power allocation control strategy, the fuzzy adaptive control method control strategy could relatively increase the total braking energy

收稿日期:2025-09-25　修回日期:2025-11-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52265038)、新疆维吾尔自治区 2023 人才发展基金-天池英才创新领军人才项目(CZ002507)、兵团科技计划项目(2023ZD056)、石河子大学国际科技合作推进计划项目(GJHZ202208)、石河子大学高层次人才科研启动项目(RCZK202309)和棉花生产技术现代化省部共建协同创新中心开放课题(KFKT202515)

作者简介:高宗余(1974—),男,副教授,博士,主要从事电动农机装备研究,E-mail:gzy19750510@163.com

通信作者:李利桥(1988—),女,副教授,博士后,主要从事农业工程研究,E-mail:liliqiao1108@163.com

recovery rate by 61.5%, the relative reduction rate of total energy consumption could reach 19.96%, the peak current of lithium batteries could be reduced by 39.96%, and the driving range of electric tractors could be increased by 19.53%. The results showed that the proposed control method had the performance of improving the traction efficiency of electric tractors, extending the driving range, reducing energy consumption and prolonging the battery service life.

Key words: electric tractor; working mode; hybrid; energy management; genetic algorithm

0　引言

电动拖拉机作为智慧农业与绿色农机发展的关键装备，是现代农业可持续发展不可或缺的工具[1-3]，并向着以信息技术为核心的智能化和以节能环保为目标的绿色化方向发展[4-5]。全球温室气体排放量大幅增加以及不可再生资源开采量急剧减少[6-7]，大力发展电池驱动电动拖拉机成为发展绿色农机技术的主要途径。

电池驱动电动拖拉机研究重点是其动力系统，根据结构不同，电动拖拉机可分为单电源电池供电与多电源电池混合供电 2 种类型。单电源电池供电存在牵引效率低、续航里程短和能耗大等问题，难以满足电动拖拉机在犁耕运输作业时能量和功率的全部需求。多电源混合动力电池电动拖拉机可提供电动拖拉机犁耕行驶作业过程全部驱动动力以满足其在作业过程中的动力需求，并且根据作业模式实现制动能量吸收与利用。因此电动拖拉机多电源混合动力系统能量分配控制策略设计至关重要。然而，实际驾驶过程不同作业模式的交替变化和瞬时大功率负载的频繁变化极大地增加了混合动力电动拖拉机能量输出合理分配的控制方法设计难度。为此，研究工况适应性强、性能好的电动拖拉机混合动力系统高效合理的分配策略是电动拖拉机大规模推广应用的关键问题。

实现混合动力系统能量管理分配策略可分为基于规则的能量管理分配策略和基于优化的能量管理分配策略[8]。文献[9]采用基于规则的能量管理分配策略决定混合动力系统间的能量共享。文献[10]提出利用平均功率法处理混合动力系统高频功率需求。为了使电池剩余能量循环寿命最大化，通常采用保证电池提供基准电源的小波变换[11-12]。然而，基于频率的功率分配方法应用于电动拖拉机车载混合动力系统中，会导致混合动力系统处于一种电池充电、另一种电池放电的现象，不利于电动拖拉机制动能量有效回收。此外，文献[13]提出将低通滤波与模糊逻辑控制器相结合，降低电池峰值电流，维持超级电容电压。文献[14]为验证电池能量规划的有效性，提出了一种基于模糊逻辑控制的自适应能量管理策略。以上策略均为基于规则的能量管理分配策略，主要特点是简单、实时性强且易于实现。

在基于优化的能量管理分配策略中，动态规划可以求得全局最优解[15-16]，但该方法以获知负载功率的全时范围为先决条件，无法实现实时优化。文献[17]提出 2 种基于同步收敛条件和神经网络的实时能量管理策略改善电池健康状态。文献[18]采用等效能量因子自适应瞬时等效能耗优化方法获取混合动力系统的全局最优功率分配点，使锂电池劣化最小化。文献[19]基于深度强化学习使总能量损失最小化，文献[20]利用遗传算法对超级电容储能装置能量管理和容量配置进行优化。文献[21]采用双模糊逻辑控制器实现电池与超级电容间的功率共享，并以减少电池退化为目标对控制器进行优化。此外，模型预测控制可实现最优功率分配[22]，但需精确建模和输入预测。文献[18-22]通过基于优化的方法可实时优化混合动力系统能量分配。然而，电动拖拉机犁耕行驶作业混合动力系统功率分配是一个复杂的时变非线性系统，难以通过数值解获取实时优化策略。相比之下，基于规则的能量管理分配策略更适合于电动拖拉机混合动力系统能量管理。

由于电动拖拉机属于非道路移动机械，在田间犁耕行驶作业过程中作业路况起伏变化频繁且功率波动较大，使电动拖拉机牵引制动频繁且系统功率需求变化频繁。因此，通过在线更新控制策略的方法在电动拖拉机中受到限制。针对电动拖拉机非道路移动作业模式变化及功率频繁波动应用场景，本文提出模糊逻辑控制与作业模式相结合的自适应能量管理方法。建立电动拖拉机犁耕作业模式，根据作业模式建立锂电池与超级电容组合的混合动力系统结构及动力系统能量流传输模型。在分析混合动力系统能量流传输特性的基础上根据作业过程功率需求变化提出混合动力系统超级电容电压充放电阈值自适应模糊动态调整策略。以节能率最大化为目标对其进行遗传算法优化并实现制动能量的回收再利用。通过仿真试验对比 4 种不同功率分配策略，分别对 4 种不同能量管理策略下混合动力系统荷电状态(State of charge, SOC)及作业过程总能耗进行比较，以证明所提能量管理控制策略的有效性。对

单电源供电及混合动力系统供电电动拖拉机性能进行对比分析。

1 电动拖拉机混合动力系统设计

1.1 电动拖拉机作业模式构建

电动拖拉机挂接农机具进行田间犁耕作业是一种循环往复作业过程[23]。其完整循环作业可划分为加速过程、农具入土过程、牵引匀速行驶过程、农具出土过程、怠速行驶过程、转向调整过程 6 个阶段。在加速过程、农具出土过程、行驶作业过程各个阶段中,加速度、行驶速度和牵引驱动力连续。因此,在一个完整的犁耕作业过程中,包含电动拖拉机加速、匀速、怠速和减速模式。4 种作业模式可进一步定义为:①加速模式:电动拖拉机犁耕作业过程加速度大于 0 m/s^2 的连续过程。②匀速模式:电动拖拉机犁耕作业过程加速度等于 0 m/s^2 的连续过程。③怠速模式:电动拖拉机空载状态下的连续运行过程。④减速模式:电动拖拉机犁耕作业过程加速度小于 0 m/s^2 的连续过程。其基本作业过程模式变化见图 1。

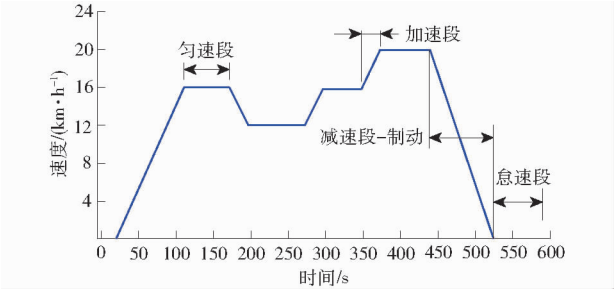

图 1 电动拖拉机犁耕行驶作业过程基本模式划分

Fig. 1 Basic mode division of plowing and driving operation process of electric tractor

1.2 电动拖拉机动力系统组成与参数

电动拖拉机混合动力系统采用模块化设计以便于分析,包括 DC/DC 变换器、锂电池系统和超级电容系统。混合动力系统中锂电池系统作为主要动力源提供持续稳定的能量供给。超级电容作为辅助能量源,可根据犁耕行驶作业模式变化通过充放电降低电动拖拉机犁耕行驶作业过程中功率频繁波动及实时补偿瞬时大功率变化,起到“削峰填谷”的稳压作用。锂电池与超级电容共同构成电动拖拉机分布式混合动力系统,2 个动力源共同构成电动拖拉机驱动系统。电动拖拉机根据犁耕行驶作业模式通过控制 DC/DC 变换器进而控制混合动力系统能量流变化的拓扑结构(图 2)。加速模式时,混合动力系统同时通过 DC/DC 变换器输出能量,超级电容处于放电状态,其内部能量流动如图 2a 所示;匀速模式时,锂电池通过 DC/DC 变换器输出能量,超级电容不输出能量,其内部能量流动如图 2b 所示;减速作业时,锂电池不输出能量,电动拖拉机通过制动产生能量,其能量通过 DC/DC 变换器流入锂电池与超级电容,锂电池与超级电容处于充电状态,其内部能量流动如图 2c 所示。电动拖拉机主要技术参数如表 1 所示。

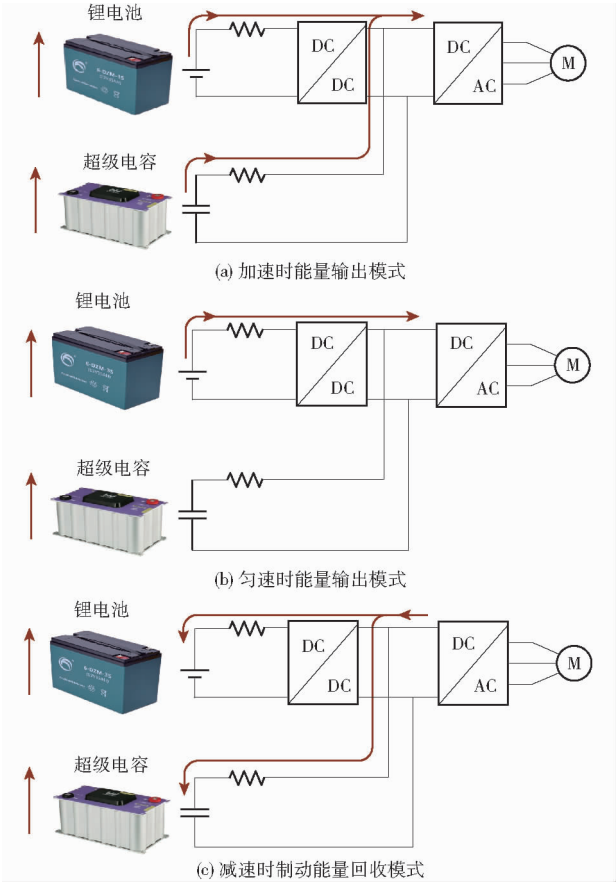

图 2 电动拖拉机犁耕作业过程能量流动示意图

Fig. 2 Schematics of energy flow during plowing operation process of electric tractor

表 1 电动拖拉机主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of electric tractor

参数	数值
拖拉机质量/kg	1 280
最大驱动力/kN	8.8
动力系统持续工作时间/h	4.5
驱动电机额定转矩/(N·m)	210
驱动电机额定功率/kW	8.2
驱动电机额定转速/($r \cdot min^{-1}$)	1 200
驱动电机最大效率/%	90

电动拖拉机车载混合动力系统全有源主动式拓扑结构如图 3 所示,其中 C 为支撑电容、U_c 为混合动力系统 DC/DC 变换器高压侧端电压、i_P 为电动拖拉机混合动力系统输出电流、L 为滤波电感、R_L 为线路电阻。在加速与减速过程中电动拖拉机可建模为受控功率源。锂电池组与超级电容组共同构成混合

动力供能系统，其动力传输通过两电平 DC/DC 变换器与 DC/DC 变换器高压侧端电压匹配。通过能量管理用于提高混合动力系统能量利用率，延长混合动力系统使用寿命，改善电动拖拉机犁耕作业过程整体能耗经济性。

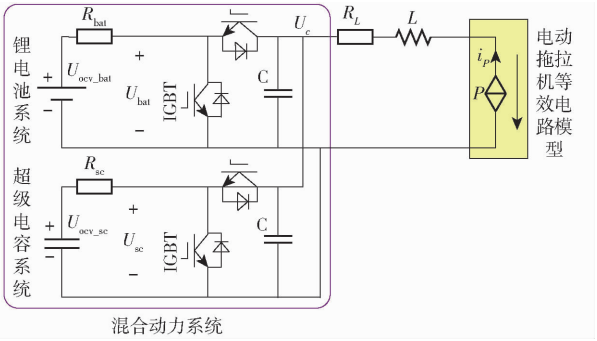

图 3　电动拖拉机混合动力系统基本结构

Fig. 3　Basic structure of hybrid system of electric tractor

1.3　锂电池模型

为简化计算，锂电池模型采用由电压源和电阻组成的 Rint 模型，该模型具有结构简单、参数少以及计算量小的特点，其等效电路如图 4 所示。采用安时积分法计算锂电池 SOC，表达式为

$$SOC_{bat}(k+1) = SOC_{bat}(k) - \frac{I_{bat}(k)\Delta t}{Q} \tag{1}$$

其中

$$I_{bat} = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4R_{int}P_{bat}}}{2R_{int}} \tag{2}$$

式中　R_{int}——锂电池内阻

U_{oc}——锂电池开路电压

I_{bat}——锂电池电流

P_{bat}——锂电池功率

SOC_{bat}——锂电池荷电状态

Q——锂电池容量

Δt——离散化时间间隔

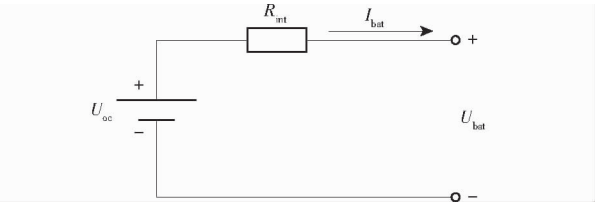

图 4　锂电池 Rint 模型

Fig. 4　Rint model of lithium battery

通过选取适当参数，对锂电池单体在额定放电电流 20、40、60 A 条件下进行放电测试，其放电特性曲线如图 5 所示，该曲线符合锂电池放电性能。

1.4　超级电容模型

超级电容一阶非线性模型阶数较高且计算过程复杂，不利于在线控制应用。此外，在电动拖拉机混合动力系统能量控制中，多以能量源输入输出功率作为控制目标。因此，在实际控制中采用图 6 所示

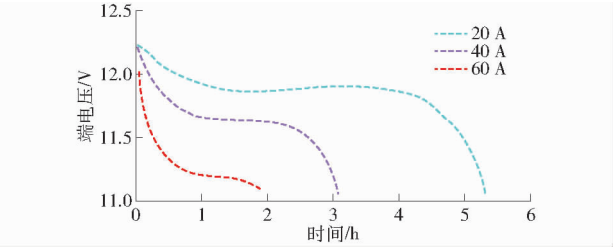

图 5　不同电流下锂电池放电特性曲线

Fig. 5　Discharge characteristic curves of lithium batteries at different current

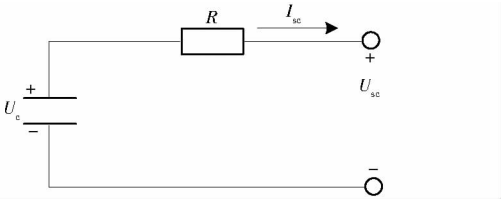

图 6　超级电容模型

Fig. 6　Supercapacitor model

的超级电容简化等效电路模型，超级电容特性为

$$U_{sc}(k) = U_c(k) + RI_{sc}(k) \tag{3}$$

其中

$$I_{sc}(k) = C\frac{\mathrm{d}U_c(k)}{\mathrm{d}t}$$

式中　R——等效串联电阻

U_c——超级电容端电压

I_{sc}——超级电容电流　　U_{sc}——开路电压

超级电容 SOC_{sc} 表示为

$$SOC_{sc}(k) = \frac{U_{sc}^2(k)}{U_{sc0}^2} \tag{4}$$

式中　U_{sc0}——超级电容额定电压

对超级电容模型表征的 Maxwell 公司超级电容进行放电测试，其电容为 2 600 F。对超级电容单体在 20、40、60 A 恒流条件下进行放电测试，其放电特性曲线如图 7 所示，该曲线符合超级电容放电性能。

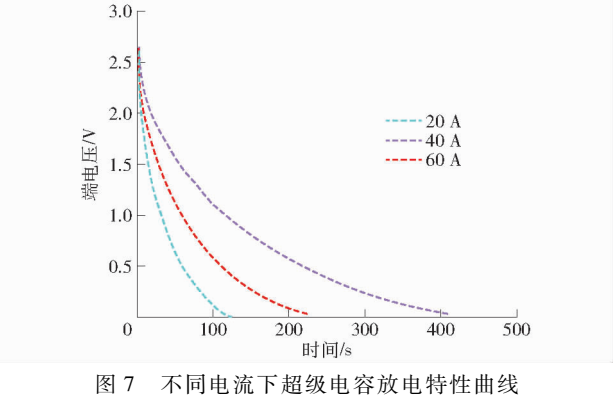

图 7　不同电流下超级电容放电特性曲线

Fig. 7　Discharge characteristic curves of ultracapacitor at different currents

2　自适应模糊控制能量管理策略

电动拖拉机混合动力系统能量分配管理旨在通

过优化分配策略调整各能量源功率响应,在满足电动拖拉机犁耕行驶作业过程需求功率的同时提高系统工作效率。利用超级电容的高功率密度实现混合动力系统 DC/DC 端母线电压稳压的作用。在考虑犁耕行驶作业过程特点基础上,根据犁耕行驶作业模式利用锂电池与超级电容混合动力系统实现能效提高及制动能量回收再利用。利用超级电容降低瞬时负载大功率的影响,提高混合动力系统使用寿命及延长电动拖拉机续航里程。

2.1 超级电容充放电阈值控制

为提高电动拖拉机超级电容混合动力系统能效与经济效益,利用超级电容高功率密度的瞬时充放电特性,对超级电容输出电压进行电压电流双闭充放电阈值控制,其控制框图如图 8 所示,控制框图左侧为电压外环结构,右侧为电流内环结构。

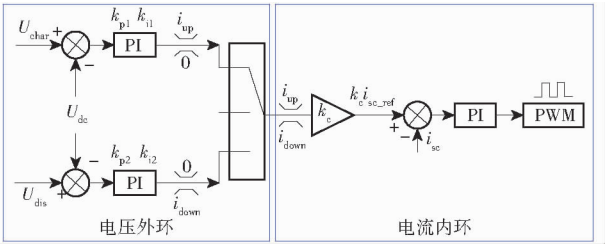

图 8 超级电容充放电电压阈值双闭环控制

Fig. 8 Double closed-loop control of supercapacitor charging and discharging voltage threshold

根据图 8,超级电容充放电阈值设定为电动拖拉机空载电压。当电动拖拉机混合动力系统 DC/DC 端电压 U_{dc} 高于混合动力系统充电阈值 U_{char} 时,超级电容作为充电装置进入充电状态,电压外环根据电压 U_{dc} 和充电阈值 U_{char} 得到充电指令超级电容开始充电;当电动拖拉机动力系统 DC/DC 端电压 U_{dc} 低于混合动力系统放电阈值 U_{dis} 时,超级电容作为放电装置进入放电状态,电压外环根据电压 U_{dc} 和放电阈值 U_{dis} 得到放电指令超级电容开始放电;当电动拖拉机动力系统 DC/DC 端电压 U_{dc} 处于充电阈值 U_{char} 和放电阈值 U_{dis} 之间时,超级电容处于静止模式,其控制指令处于待机状态。因此,混合动力系统通过比较 DC/DC 端母线电压与充放电阈值控制混合动力系统进入充电模式或放电模式。

图 8 的电流内环根据电压外环输出的电流指令 $k_c i_{sc_ref}$ 控制脉宽调制器(Pulse-width modulation, PWM),实现双向 DC/DC 变换器的绝缘栅双极晶体管(Insulate-gate bipolar transistor, IGBT)开关时刻控制,使超级电容储能装置输出电流与电流指令 i_{sc_ref} 处于动态平衡状态。

2.2 模糊自适应能量管理控制策略

电动拖拉机作业过程中超级电容充放电阈值随作业工况变化,其合理设置对提升电动拖拉机混合动力系统节能稳压及延长锂电池使用寿命至关重要。因此,采用基于模糊逻辑控制的超级电容电压阈值自适应调节策略,实现电动拖拉机犁耕作业过程混合动力系统能量有效管理及制动能量回收再利用,超级电容电压充放电阈值参数自适应模糊控制框图如图 9 所示。充放电电压阈值调节分为充电模糊逻辑控制模块和放电模糊逻辑控制模块。

充放电模糊逻辑控制模块采用五输入两输出模式。其充放电模糊逻辑控制输入分别为:电动拖拉机 DC/DC 端电量变化量 ΔW_{dc}、超级电容充电量 W_{sc_in} 和超级电容充电量变化量 ΔW_{sc_in};超级电容放电量 W_{sc_out} 和超级电容放电量变化量 ΔW_{sc_out}。模糊逻辑控制输出量为充电阈值调整量 ΔU_{char} 和放电阈值调整量 ΔU_{dis}。某时刻 k 其输入与输出量表达式为

$$\begin{cases}\Delta W_{sc_in}(k) = W_{sc_in}(k) - W_{sc_in}(k-1)\\ \Delta W_{sc_out}(k) = W_{sc_out}(k) - W_{sc_out}(k-1)\end{cases} \tag{5}$$

$$\Delta W_{dc}(k) = W_{dc}(k) - W_{dc}(k-1) \tag{6}$$

$$\begin{cases}U_{char}(k) = U_{char}(k-1) + \Delta U_{char}(k)\\ U_{dis}(k) = U_{dis}(k-1) + \Delta U_{dis}(k)\end{cases} \tag{7}$$

式中 U_{char}——超级电容充电电压阈值

U_{dis}——超级电容放电电压阈值

在阈值调节过程中,充放电阈值约束条件为

$$U_{min} < U_{dis} < U_{char} < U_{max} \tag{8}$$

式中 U_{min}、U_{max}——电压阈值最小、最大值

采用三角与梯型模糊控制器实现混合动力系统能量的潮流管理,输入输出隶属度函数如图 10 所示。在隶属度函数中,对于输入量 W_{sc_in} 和 W_{sc_out} 利用逻辑语言“VSma、Mid、VBig”表示其状态分别为

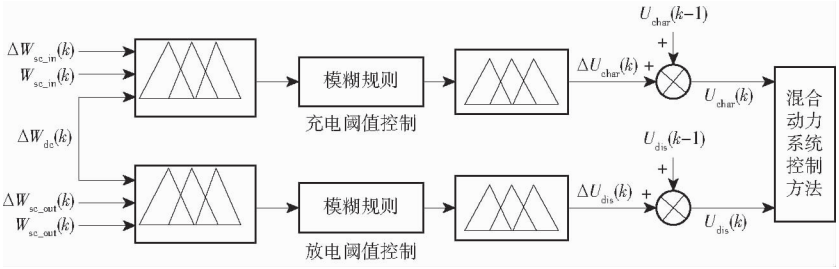

图 9 超级电容电压充放电阈值参数自适应模糊控制框图

Fig. 9 Adaptive fuzzy control of supercapacitor voltage charging and discharging threshold parameters

“非常小、中等、非常大”；对于输入量 ΔW_{sc_in}、ΔW_{sc_out} 和 ΔW_{dc} 利用逻辑语言“NBig、Zero、PBig”表示其分别处于“负大、零、正大”状态。输出量 ΔU_{char} 和 ΔU_{dis} 同样利用逻辑语言“NBig、NSma、Zero、PSma、PBig”表示其分别处于“负大、负小、零、正小、正大”状态，输入输出变量论域分别为 ΔW_{sc_in} 为 {NBig、Zero、PBig}，ΔW_{sc_out} 为 {NBig、Zero、PBig}，W_{sc_in} 为 {VSma、Mid、VBig}，W_{sc_out} 为 {VSma、Mid、VBig}，ΔW_{dc} 为 {NBig、Zero、PBig}，ΔU_{char} 为 {NBig、NSma、Zero、PSma、PBig}，ΔU_{dis} 为 {NBig、NSma、Zero、PSma、PBig}。各模糊集隶属度函数如图 10 所示。

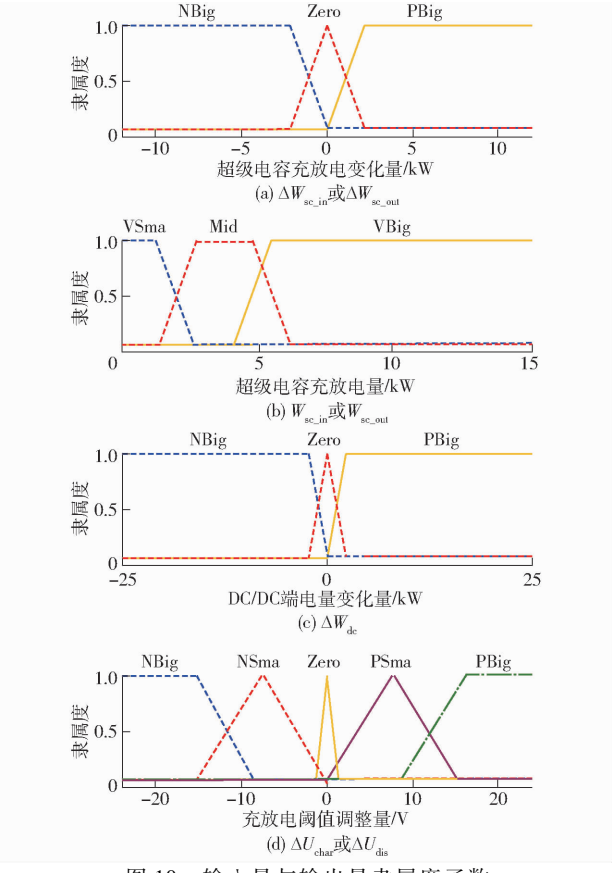

图 10　输入量与输出量隶属度函数

Fig. 10　Membership functions of input quantities and output quantities

2.3　模糊规则制定

采用 IF－THEN 形式，建立 72 条模糊控制规则，其中充电规则 36 条，放电规则 36 条，充放电规则如表 2、3 所示。

3　规则权重动态寻优

3.1　遗传算法寻优

自适应模糊逻辑控制阈值管理性能随权重变化而变化，固定权重方法无法适应实际作业模式的负载变化情况，因此权重确定必须考虑电动拖拉机的不同作业模式。由于本研究中决策变量较多，因此

表 2　充电模糊规则

Tab. 2　Charging fuzzy rules

W_{sc_in}	ΔW_{sc_in}	ΔW_{dc}		
		NBig	Zero	PBig
VSma	NBig	NSma	NSma	PBig
	Zero	Zero	Zero	NSma
	PBig	Zero	Zero	PSma
Mid	NBig	NSma	Zero	PBig
	Zero	Zero	Zero	NSma
	PBig	PSma	Zero	PSma
VBig	NBig	NSma	Zero	PSma
	Zero	Zero	Zero	NBig
	PBig	PSma	Zero	PSma

表 3　放电模糊规则

Tab. 3　Discharging fuzzy rule

W_{sc_out}	ΔW_{sc_out}	ΔW_{dc}		
		NBig	Zero	PBig
VSma	NBig	NSma	PSma	PBig
	Zero	Zero	PS	NS
	PBig	Zero	Zero	PSma
Mid	NBig	Zero	Zero	PSma
	Zero	Zero	Zero	NSma
	PBig	PSma	Zero	PSma
VBig	NBig	Zero	Zero	PSma
	Zero	Zero	Zero	NB
	PBig	PSma	Zero	Zero

采用可解决变量状态空间大、目标不连续、不可微分等问题的遗传算法进行寻优。以电动拖拉机循环作业过程中节能率最大为优化目标确定规则权重，目标函数 J 为

$$J=\left(1-\frac{\int_0^T(U_{dc}^{hess}I_{dc}^{hess})\mathrm{d}t+W_{hess}(0)-W_{hess}(t)}{\int_0^T(U_{dc}^{nosc}I_{dc}^{nosc})\mathrm{d}t}\right)\times 100\% \tag{9}$$

式中　U_{dc}^{hess}——投入超级电容时混合动力系统 DC/DC 直流端电压

I_{dc}^{hess}——投入超级电容时混合动力系统 DC/DC 直流端电流

U_{dc}^{nosc}——未投入超级电容时混合动力系统 DC/DC 直流端电压

I_{dc}^{nosc}——未投入超级电容时混合动力系统 DC/DC 直流端电流

$W_{hess}(t)$——混合动力系统 t 时刻储能量

T——系统运行周期

图 8 能量管理框图中包含 6 个参数，分别为 k_{p1}、k_{i1}、k_{p2}、k_{i2}、U_{char}、U_{dis}，可编码为遗传算法 $\boldsymbol{X}$ 染色体 6 个参数，即

$$\boldsymbol{X}=[k_{p1}\quad k_{i1}\quad k_{p2}\quad k_{i2}\quad U_{char}\quad U_{dis}] \tag{10}$$

式中 k_{p1}——充电状态电压外环控制器比例系数

k_{i1}——充电状态电压外环控制器积分系数

k_{p2}——放电状态电压外环控制器比例系数

k_{i2}——放电状态电压外环控制器积分系数

式(10)为 $\boldsymbol{X}$ 染色体编码,表示能量管理策略参数。每个 $\boldsymbol{X}$ 染色体作为遗传算法的一个种群个体,决定超级电容储能系统双环能量管理结构中的具体参数。通过寻找最大目标函数 J 实现对混合动力系统超级电容储能系统能量管理控制策略参数优化。将遗传算法与电动拖拉机混合动力系统仿真平台相结合,通过不断优化超级电容储能系统能量管理策略参数方案,获取相应目标函数,并进行种群迭代优化。随着遗传代数不断增长,寻找到最大目标函数 J,并得到超级电容储能系统最优能量管理策略参数方案。表 4 为所设计遗传算法相应参数。

表 4 遗传算法参数

Tab. 4 Genetic algorithm parameters

参数	数值
种群大小	50
迭代次数	140
交叉概率	0.5
变异概率	0.05

3.2 遗传算法优化结果

结合表 4 设置参数,采用固定阈值设置(优化方法 1)与模糊逻辑控制阈值设置(优化方法 2)2 种方案下遗传算法优化进行对比,结果如图 11 所示。

由图 11 可见,随着迭代次数增大,2 种不同优化方法得到的目标函数均不断增大,并最终稳定在最大目标函数。优化方法 1 得到的最大目标函数为 10.79%,而优化方法 2 得到的最大目标函数为 12.58%,且迭代次数降低,进一步提升了混合动力系统节能率。

表 5 为 2 种控制策略下不同优化方法得到的最大目标函数所对应的能量管理策略控制参数。根据

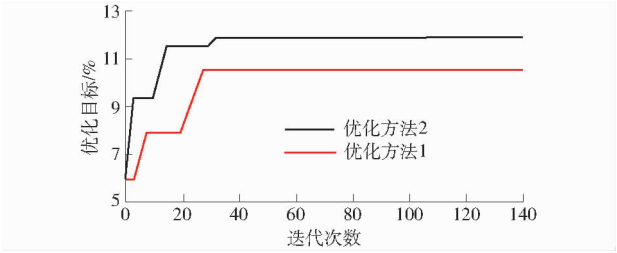

图 11 2 种优化方法仿真结果

Fig. 11 Simulation results of two optimization methods

表 5 2 种优化方法得到的能量管理策略参数

Tab. 5 Parameters of energy management strategy obtained by two optimization methods

优化方法	参数					
	k_{p1}	k_{i1}	k_{p2}	k_{i2}	U_{char}/V	U_{dis}/V
方法 1	50	50	50	50	520	480
方法 2	30	44	88	50	502	485

仿真过程可知优化方法 1 采用的能量管理策略参数始终恒定;优化方法 2 采用的能量管理策略控制参数通过迭代不断进行参数优化,最终获取最佳控制参数。

4 仿真试验与验证

在实验室利用 RT-LAB 半实物仿真平台和实际质子钛酸锂电池、超级电容混合动力装置搭建功率硬件仿真平台进行性能试验验证,试验平台如图 12 所示。仿真平台包括上位机、RT-LAB、DSP 控制板、四象限变流器、超级电容系统、钛酸锂电池系统和 DC/DC 变换器。超级电容和钛酸锂电池分别与 DC/DC 并联,四象限变流器与混合动力系统并联。半实物仿真平台分为数字仿真平台和硬件测试平台 2 部分,数字仿真平台与硬件测试平台之间通过 DSP28335 和 DSP28346 实现信息交互和 DC/DC 变流器控制。表 6 为混合动力系统试验参数,超级电容 SOC 初始值设置为 0.9,锂电池 SOC 初始值设置为 0.7。

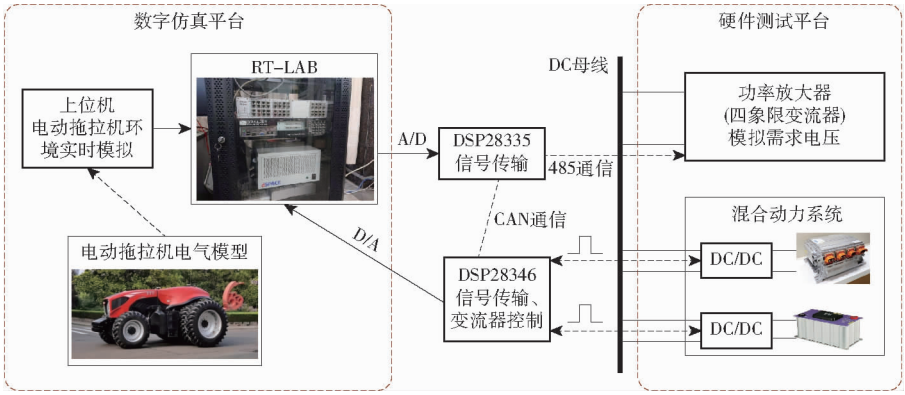

图 12 RT-LAB 半实物仿真平台

Fig. 12 RT-LAB hardware-in-the-loop simulation platform

表 6　混合动力系统仿真试验参数

Tab. 6　Hybrid system simulation experiment parameters

参数	数值
锂电池单体额定电压/V	3.2
锂电池单体额定容量/(A·h)	20
锂电池组最大放电电流/A	150
锂电池组最大额定电压/V	550
超级电容单体容量/F	280
超级电容组额定电压/V	650
超级电容组最大放电电流/A	210

4.1　功率分配对比

图 13 为电动拖拉机作业速度和功率随时间变化曲线，作为仿真输入参数，整个工况运行时长为 1 400 s。

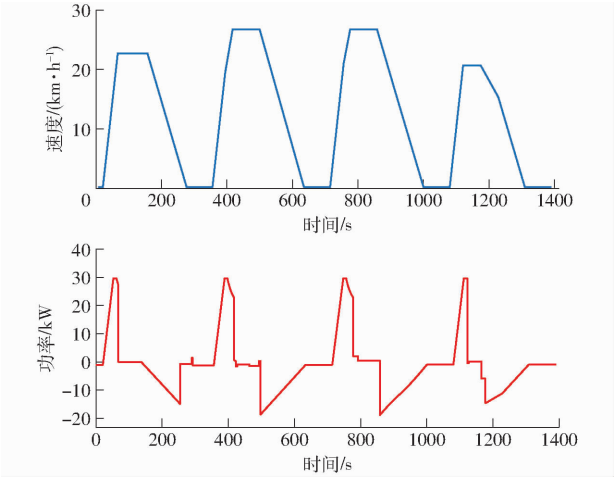

图 13　电动拖拉机作业过程输入速度与功率曲线

Fig. 13　Intput speed and power curve of electric tractor during operation

为验证提出的自适应模糊控制与作业模式相结合的自适应能量管理策略有效性，以图 13 所示电动拖拉机循环作业速度曲线和功率曲线作为仿真输入，对比例法控制策略（策略 1）、固定阈值控制策略（策略 2）、功率跟随控制策略（策略 3）及自适应模糊逻辑控制策略（策略 4）下的功率分配性能进行仿真验证，功率分配结果如图 14 所示。从图 14a 可看出，在 0 ~ 88 s 时，电动拖拉机初始启动过程需求功率极小，电动拖拉机处于预热状态，锂电池与超级电容分别处于待机状态，为电动拖拉机进入犁耕行驶作业做准备；88 s 后电动拖拉机开始进行加速驱动作业，这一过程需求功率增大，动力系统由锂电池和超级电容共同提供，超级电容与锂电池均处于放电状态；180 ~ 260 s 为匀速稳定运行期间，由于路况微小起伏变化，功率微小波动，以锂电池输出功率为主，超级电容基本处于待机状态，其间输出过剩能量由超级电容吸收；260 ~ 350 s 为电动拖拉机制动阶段，制动能量通过阈值调节由超级电容回收，至此第 1 次犁耕作业过程结束。后续作业过程相较于第 1 次作业过程，运行速度时常有大幅度变化，故需求功率时常出现尖峰特征，但由于超级电容作为辅助动力源可根据功率需求变化自适应进行充放电阈值调节，可实现制动能量释放和回收，使得锂电池避免了大功率频繁充放电，可提高混合动力系统工作效率和使用寿命，减少不必要能量浪费，提高整体动力系统能耗经济性。图 14a 为基于比例法（锂电池与超级电容功率分配比例为 6∶4）的控制策略，对超级电容充放电阈值不进行限制，由图 14a 可见混合动力系统效率不佳且制动能量回收效果差，主要由于锂电池与超级电容按比例进行功率分配，使其充放电适应性较差。图 14b 为固定阈值法控制策略，超级电容充放电根据固定阈值变化，固定阈值对超级电

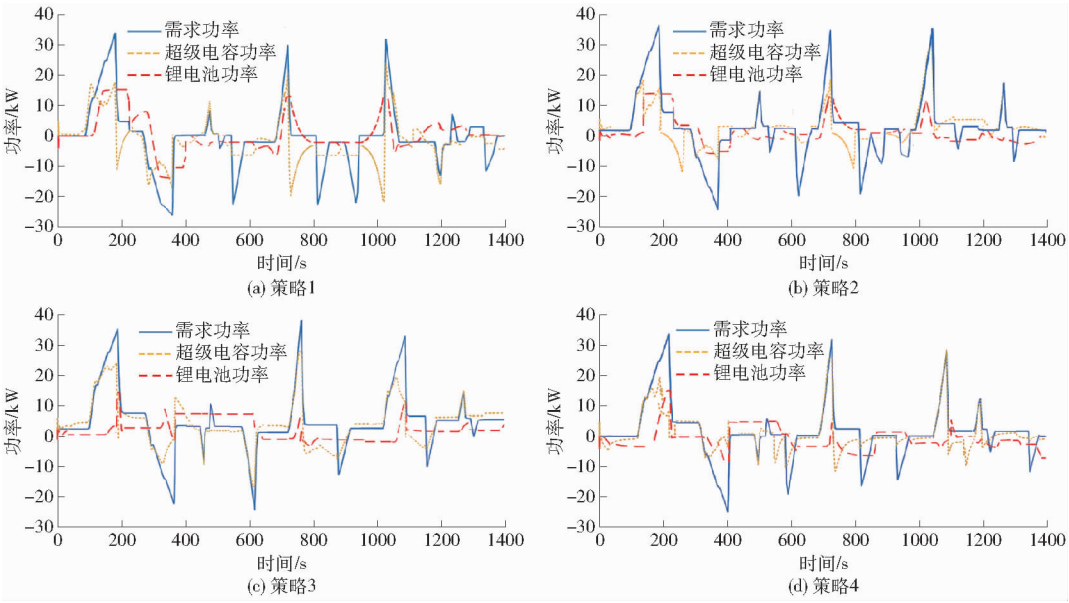

图 14　4 种不同策略下电动拖拉机混合动力系统功率分配变化曲线

Fig. 14　Power distribution variation curves of electric tractor hybrid system under four different strategies

容充放电进行管理。但固定阈值需在动力系统充放电超限时才开始启动,难以实现实时性,使制动能量回收效率降低。图 14c 为功率跟随控制策略,具有滞后性,无法根据需求功率变化实时监测充放电时刻,无法形成有效的制动能量回收。图 14d 为采用自适应模糊逻辑动态阈值调节的能量管理策略,相较于策略 1、策略 2 和策略 3 增加了超级电容充放电阈值自适应模糊逻辑控制,可根据作业过程作业模式变化及功率需求变化实现超级电容充放电阈值实时调节控制,矫正超级电容对负载功率变化时刻的误判,提高了制动能量回收效率。

由图 14 可知,策略 1 锂电池输出功率最多,策略 4 锂电池输出功率最少。策略 4 锂电池平均输出功率比策略 1 降低约 39.3%,比策略 2 降低约 33.5%,比策略 3 降低约 8.2%。因此,策略 4 可有效提高锂电池使用寿命与整体系统效率,表 7 为不同控制策略下制动能量回收结果。

表 7 不同策略制动能量回收结果

Tab.7 Result of braking energy recovery with different strategies

能量管理策略	总制动能量回收量/kW	相对提高率/%
比例法	2.34	
固定阈值法	2.79	19.2
功率跟随法	3.13	33.8
自适应模糊控制法	3.78	61.5

4.2 锂电池和超级电容 SOC 对比

图 15a 为不同能量管理策略下功率分配所对应的锂电池 SOC 变化曲线。由图 15a 可看出,自适应模糊控制锂电池波动幅度较小,稳定性更好。自适应模糊控制能量管理策略与功率跟随控制策略锂电池输出功率相比其他 2 种策略更小,有利于降低锂电池均方根电流,延长锂电池使用寿命。此过程中,锂电池平均输出功率为策略 1 大于策略 2,策略 2 大于策略 3,策略 3 约等于本文所提控制策略 4。

图 15b 为电动拖拉机犁耕作业混合动力系统不同能量管理策略下作为辅助动力源的超级电容 SOC 变化曲线。由图 15b 可看出,采用策略 1 和策略 2 时,超级电容容量在 218 ~ 279 s 内被过多占用,导致其在后续制动时段内充放电时间较短,超级电容 SOC 相比于其他 2 种能量管理策略更快达到最大值,策略 1 和策略 2 对电动拖拉机犁耕作业过程产生的制动能量回收效果较差。策略 3 和本文所提控制策略 4 在后续电动拖拉机犁耕作业过程中的制动期间回收制动能量时间较长,制动能量回收效果更好。此外,采用策略 1 时,由于超级电容在 218 ~ 279 s 内平均输出功率较小,使其在制动开始时电压较低,整体充电功率略低于策略 2、策略 3 和本文所提策略 4,因此该过程中回收的制动能量小于本文所提能量管理策略。

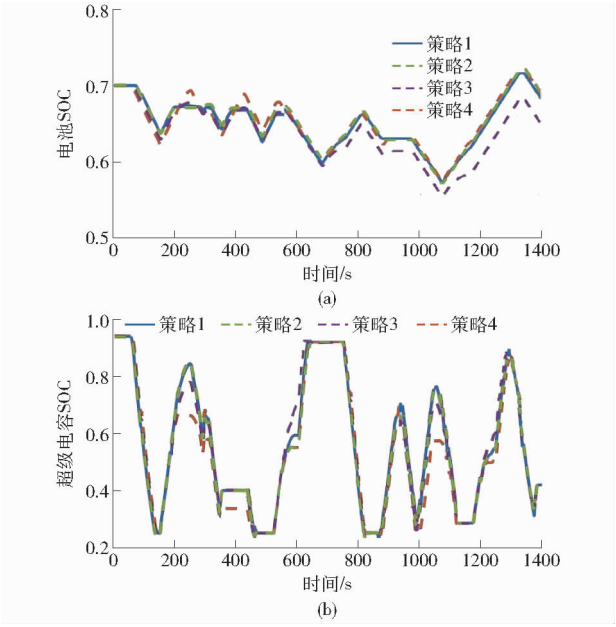

图 15 4 种策略下锂电池与超级电容 SOC 变化曲线

Fig. 15 Variation curves of lithium batteries and supercapacitor SOCs under four strategies

4.3 不同策略动力系统整体能耗对比

图 16 为 4 种不同策略下混合动力电动拖拉机动力系统作业过程总能耗变化曲线。从作业过程混合动力系统总能耗分布可看出,基于自适应模糊控制策略的锂电池自身功率损耗和 DC/DC 变换器自身功率损耗均减小,超级电容内阻产生的损耗增加,但混合动力系统总能耗减小。以比例法总能耗为基准,其中固定阈值控制策略总能耗降低 0.26%,功率跟随法控制策略总能耗降低 16.63%,自适应模糊逻辑控制策略降低 19.96%,4 种策略均减少电动拖拉机混合动力系统能量损失,均可提高作业过程混合动力系统效率。其主要原因在于进行自适应模

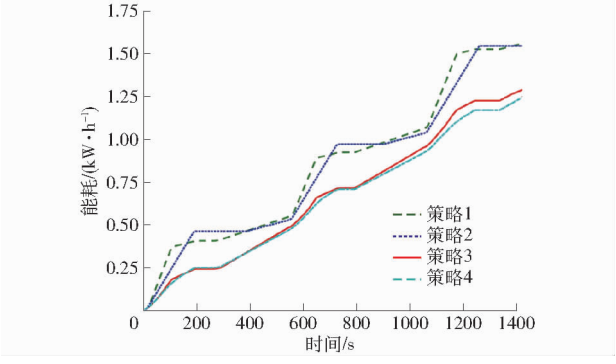

图 16 4 种策略下能耗变化曲线

Fig. 16 Variation curves of energy consumption under four strategies

糊逻辑控制时，对电动拖拉机超级电容充放电阈值进行自适应调节，可使电动拖拉机犁耕行驶作业过程动力系统释放功率实时紧随需求功率变化并可最大化吸收制动能量，通过自适应调节可以得到更好的节能效果，可实现近似最优的能量流控制。表 8 为混合动力系统不同犁耕行驶作业控制策略下能耗对比。

表 8　混合动力系统能耗对比

Tab. 8　Energy consumption comparison of hybrid system

能量管理策略	总能耗/(kW·h)	相对降低率/%
比例法	1.563	
固定阈值法	1.559	0.26
功率跟随法	1.303	16.63
自适应模糊控制法	1.251	19.96

4.4　单电源动力系统与混合动力系统性能对比

为探究所采用的混合动力系统自适应模糊逻辑控制策略性能优越性，对锂电池单电源电动拖拉机动力系统与锂电池和超级电容混合动力系统电动拖拉机性能进行对比分析。同样在图 13 输入条件下，对 2 种动力系统下锂电池电流和电动拖拉机一次充电后的续航里程进行对比，结果如图 17 所示。由图 17 可知，锂电池峰值电流分别为 109.1 A 和 65.5 A。采用混合动力系统结合超级电容阈值自适应模糊逻辑控制方法可使锂电池峰值电流降低 39.96%，且在其他高需求功率时刻，由于超级电容自适应充放电阈值控制对锂电池电流有不同程度消减作用。电动拖拉机续航里程分别为 3.06 km 和 2.56 km，电动拖拉机续航里程提升 19.53%，由此说明，采用混合动力系统及所提控制算法能在保证电动拖拉机动力性能的同时，大幅降低锂电池峰值电流，采用自适应模糊逻辑阈值控制方法能充分发挥锂电池高能量密度与超级电容高功率密度的优势。

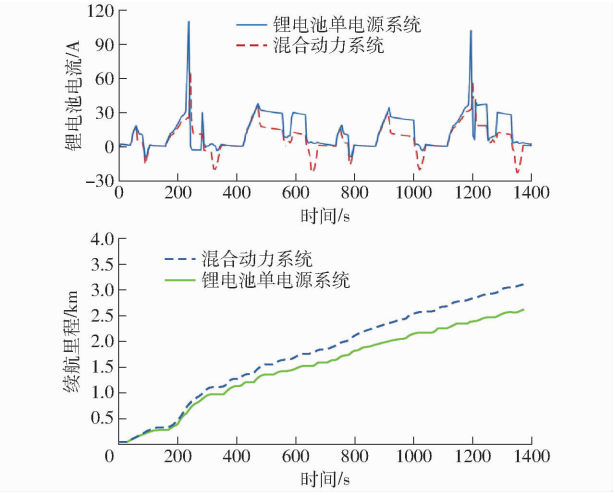

图 17　单电源动力系统与混合动力系统对比

Fig. 17　Comparison between single-power supply power systems and hybrid system

在图 12 所示试验平台上进行超级电容电压电流与锂电池电流充放电试验，利用对拖电机模拟电动拖拉机的输出特性，通过对拖电机转速调制输出功率。图 18 为对拖电机功率变化频繁时超级电容和锂电池充放电阈值跟随工作过程变化曲线，由于超级电容功率密度高，可在输出功率峰值期间抑制功率频繁变化，防止锂电池过度放电，由图 18 可看出超级电容电压随功率变化实时发生变化，抑制在峰值功率期间产生功率波动，保持锂电池稳定输出，最终提高锂电池使用寿命。

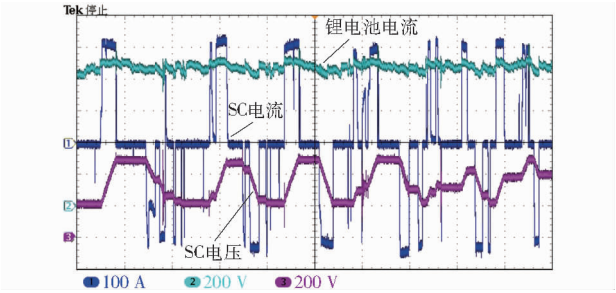

图 18　超级电容电压/电流和电池电流

Fig. 18　Supercapacitor voltage/current and battery current

5　结论

(1)根据作业模式建立了混合动力系统能量流模型，根据能量流模型建立了自适应阈值调整能量管理方法并对超级电容充放电电压阈值进行自适应模糊逻辑控制。所提策略相较于传统模糊控制策略，能够实现全局最优功率分配，且能够降低锂电池 SOC 偏移范围、提高混合动力系统整体效率。

(2)引入遗传算法对所提能量管理策略电压阈值自适应模糊调节控制并优化处理，对控制策略进行仿真对比试验。相较于比例法、固定阈值法及功率跟随法控制策略，所提能量管理控制策略可提高制动能量回收率 61.5%，降低总能耗 19.96%，降低锂电池峰值电流 39.96%，同时稳定了 DC/DC 端母线电压及缩小了锂电池 SOC 偏移范围。

(3)所提策略控制结构较简单，易于实现，可提高电动拖拉机作业效率、延长续航里程、降低能耗及延长电池使用寿命。

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] 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)
[3] 邱凌,周勤勤,朱铭强,等. 农林生物质制备铁炭复合材料及其环境污染治理应用的研究进展[J]. 农业工程学报,2022,38(22):172 - 182.
QIU Ling,ZHOU Qinqin,ZHU Mingqiang,et al. Research progress on the preparation of iron-carbon composites from agricultural and forestry biomass and their application in improving environmental pollution[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(22):172 - 182. (in Chinese)
[4] LI X Z,ZHANG M Z,YAN X H,et al. Power allocation strategy for fuel cell distributed drive electric tractor based on adaptive multi-resolution analysis theory[J]. Energy,2023,284:129350.
[5] 李利桥,高宗余,聂晶. 电动拖拉机混合电源负载自适应能量管理策略研究[J]. 农业机械学报,2024,55(9):459 - 469.
LI Liqiao,GAO Zongyu,NIE Jing. Load-adaptive energy management strategy for electric tractor based on hybrid power source [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(9):459 - 469. (in Chinese)
[6] 吴才聪,吴思贤,文龙,等. 拖拉机自动导航变曲度路径跟踪控制[J]. 农业工程学报,2022,38(21):1 - 7.
WU Caicong,WU Sixian,WEN Long,et al. Variable curvature path tracking control for the automatic navigation of tractors[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(21):1 - 7. (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] SILVAS E,HOFMAN T,MURGOVSKI N,et al. Review of optimization strategies for system-level design in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2017,66(1):57 - 70.
[9] TROVAO J P F,SANTOS V D N,ANTUNES C H,et al. A real-time energy management architecture for multisource electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2015,62(5):3223 - 3233.
[10] WANG B,HU Q,WANG Z Y. Improving power output of battery and mode switching frequency based on real-time average power method for multi-mode hybrid energy storage system in electric vehicles[J]. IEEE Access,2020,8:34654 - 34663.
[11] ELDEEB H H,ELSAYED A T,LASHWAY C R,et al. Hybrid energy storage sizing and power splitting optimization for plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55(3):2252 - 2262.
[12] DUSMEZ S,KHALIGH A. A supervisory power-splitting approach for a new ultracapacitor-battery vehicle deploying two propulsion machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2014,10(3):1960 - 1971.
[13] ZHANG Q,LI G. Experimental study on a semi-active battery-supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicle application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(1):1014 - 1021.
[14] 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)
[15] ROMAUS C,WIMMELBUECKER D,STILLE K S,et al. Self-optimization energy management considering stochastic influences for a hybrid energy storage of an electric road vehicle[C]// IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC),2013:67 - 74.
[16] SANTUCCI A,SORNIOTTI A,LEKAKOU C. Power split strategies for hybrid energy storage systems for vehicular applications [J]. Journal of Power Sources,2014,258:395 - 407.
[17] SHEN J Y,KHALIGH A. Design and real-time controller implementation for a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2016,12(5):1910 - 1918.
[18] 高锋阳,张浩然. 氢燃料电池混合动力有轨电车的自适应瞬时等效能耗优化[J]. 机械工程学报,2023,59(6):226 - 238.
GAO Fengyang,ZHANG Haoran. Adaptive instantaneous equivalent energy consumption optimization of jydrogen fuel cell hybrid electric tram[J]. Journal of Mechanical Engineering,2023,59(6):226 - 238. (in Chinese)
[19] 唐小林,陈佳信,刘腾,等. 基于深度强化学习的混合动力汽车智能跟车控制与能量管理策略研究[J]. 机械工程学报,2021,57(22):237 - 246.
TANG Xiaolin,CHEN Jiaxin,LIU Teng,et al. Research on deep reinforcement learning-based intelligent car-following control and energy management strategy for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering,2021,57(22):237 - 246. (in Chinese)
[20] 陈怀鑫,杨中平,林飞,等. 基于遗传算法的城轨交通超级电容储能装置能量管理和容量配置优化研究[J]. 铁道学报,2019,41(9):59 - 66.
CHEN Huaixin,YANG Zhongping,LIN Fei,et al. Management and configuration for stationary super-capacitor energy storage system applied in urban rail transit based on genetic algorithm[J]. Journal of the China Railway Society,2019,41(9):59 - 66. (in Chinese)
[21] CHEN H,XIONG R,LIN C,et al. Model predictive control based real-time energy management for hybrid energy storage system [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2021,7(4):862 - 874.
[22] ZHOU S Y,CHEN Z Q,HUANG D Y,et al. Model prediction and rule based energy management strategy for a plug-in hybrid electric vehicle with hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(5):5926 - 5940.
[23] 朱小蓉,赵磊,沈惠平. 3T1R 解耦并联机构动力学与惯量耦合特性分析[J]. 农业机械学报,2023,54(9):448 - 458.
ZHU Xiaorong,ZHAO Lei,SHEN Huiping. Dynamics coupling characteristics of 3T1R decoupled parallel manipulato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(9):448 - 458. (in Chinese)