

电动拖拉机混合电源负载自适应能量管理策略研究

李利桥^{1,2} 高宗余^{1,2} 聂晶^{1,2}

(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)

摘要: 针对纯电动拖拉机工况随机性大、动态负荷变化频繁导致能量利用率低等问题,提出了基于负载自适应的蓄电池/超级电容混合电源的纯电动拖拉机动力电源供能系统。通过分析纯电动拖拉机的作业工况特点以及功率需求,采用动态规划分析方法找出动力系统最优控制模式,并且从动态规划分析结果中提出分段式控制规则,建立了功率划分参数模型与负载统计量之间的函数关系。在此基础上提出了一种基于负载自适应规则的电动拖拉机能量管理策略,并对平稳路况组合负载周期和非平稳路况随机负载周期模式进行了验证实验。实验结果表明,与普通控制规则的能量管理策略相比,本文所提出的电动拖拉机负载自适应能量管理策略具有更强的电池保护和节能能力,能实现负载自适应模式下的最优能量管理,其中在不同工况下电池安培小时吞吐量及电源系统总能量损失分别降低 10.5% ~ 15.7% 和 8.7% ~ 15.1%,表明所提出的电动拖拉机负载自适应能量管理策略能够以较低的计算成本实时在线实现最优的能量管理。

关键词: 电动拖拉机; 动力电源系统; 能量管理策略; 负载自适应; 控制规则

中图分类号: S219.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)09-0459-11

OSID:



Load-adaptive Energy Management Strategy for Electric Tractor Based on Hybrid Power Source

LI Liqiao^{1,2} GAO Zongyu^{1,2} NIE Jing^{1,2}

(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)

Abstract: The large randomness of working conditions and frequent dynamic load changes leading to low energy utilization of pure electric tractor, in order to solve the problems, a power supply system of pure electric tractor based on load adaptive battery/super-capacitor hybrid power supply was proposed. Based on the analysis of operating conditions and power demand of pure electric tractor, the optimal control mode of power system was found by dynamic programming analysis method, and piecewise control rules were proposed from the dynamic programming analysis results, and the functional relationship between the power division parameter model and load statistics was established. Finally, an energy management strategy of electric tractor based on load adaptive rules was proposed, and the combined load cycle mode of stationary road conditions and random load cycle mode of non-stationary road conditions were verified by test. The results showed that compared with the energy management strategy of ordinary control rules, the load adaptive energy management strategy of electric tractor proposed had stronger battery protection and energy saving capabilities, and could realize the optimal energy management under the load adaptive mode. The battery ampere-hour throughput and the total energy loss of the power system were reduced by 10.5% ~ 15.7% and 8.7% ~ 15.1% respectively under different working conditions. The results showed that the proposed pure electric tractor load adaptability energy management strategy could achieve optimal energy management in real time and online with low computational cost.

Key words: electric tractor; power supply system; energy management strategy; load adaptability; control rules

收稿日期: 2023-12-22 修回日期: 2024-03-20

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)、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、RCZK2018C33)和石河子大学青年创新人才培养计划项目(CXPY201904)

作者简介: 李利桥(1988—),女,副教授,博士,主要从事农业工程研究,E-mail: liliao1108@163.com

通信作者: 高宗余(1974—),男,副教授,博士,主要从事机械电子工程研究,E-mail: gzy19750510@163.com

0 引言

电动拖拉机具有节能环保的特点,目前在农业生产中已得到推广应用^[1-2]。纯电动拖拉机是解决传统燃油拖拉机高能耗、高污染等问题的有效措施,也是农业机械向绿色、智能化发展的主要研究方向^[3]。在农业生产过程中,纯电动拖拉机对动力电源系统的能量需求,通过电机向能量控制系统发送功率需求来调节动力电池和超级电容之间的充放电工作状态,使动力电源系统工作在最佳效率状态^[4-5]。通过确定动力电源系统各部分参数和设计合理的能量控制策略,是提高纯电动拖拉机能量利用率、动力充足性和作业效率的有效方法^[6-8],对我国新能源农业机械的发展具有重要意义。

在纯电动拖拉机电池/超级电容混合储能系统中,能量管理至关重要。传统基于规则的控制方法是一种典型的实时管理策略,但其对动态负荷的适应性较差。本文以纯电动拖拉机的动力电源系统为研究对象,设计一种实用的能源管理策略,以在节能和延长电池寿命方面接近最佳性能。首先,采用动态规划(Dynamic programming, DP)分析方法找出能量管理系统最优控制模式;之后,从 DP 分析结果中提取 3 段控制规则,建立功率划分参数与负载统计量之间的函数关系,并通过遗传算法对其参数进行优化;最后,在此基础上提出一种基于负载自适应规则的控制策略,对 2 种不同工况复合荷载进行验证实验。

1 基于动态规划的电动拖拉机功率划分规则

1.1 拖拉机作业工况

电动拖拉机可与农机具连接,以机组形式进行田间作业,也可以牵引挂车进行运输,典型作业工况主要包括田间运输转移、旋耕和犁耕等。拖拉机悬挂农机具进行农业生产或者牵引挂车进行运输作业,其作业工况大体分为 3 种^[9]:①低速慢行作业,农田旋耕、挖掘沟槽及栽培耕种等(工况Ⅰ)。②田间生产作业,深耕施肥、除草施药等(工况Ⅱ)。③农作物收获及运输作业(工况Ⅲ)。由于拖拉机作业工况的多样性,其牵引阻力也随着发生变化。当负载需求功率占全部功率的 80%~100%、20%~80%、0~20%时分别称为重载模式、中载模式、轻载模式。对不同工况模式,拖拉机动力源系统的调控工作模式不同,因此只有保障动力电源系统各组成部分协同有效运行,输出能量高效利用,才会提高生产作业效率。

针对拖拉机作业工况的复杂性,本文设计了超

级电容(Ultracapacitor, UC)/蓄电池混合动力电源系统(Hybrid power supply, HPS)^[10-11]的纯电动拖拉机,其结构如图 1 所示。该纯电动拖拉机通过超级电容与蓄电池的协同工作,可满足在各种负载作业工况下长时间运行的能量需求。为充分利用动力电源系统能量,需通过能量控制策略合理有效地分配蓄电池和超级电容两者的输出功率,实现能量按最佳方式流动,从而提高能量利用率^[12-13]。

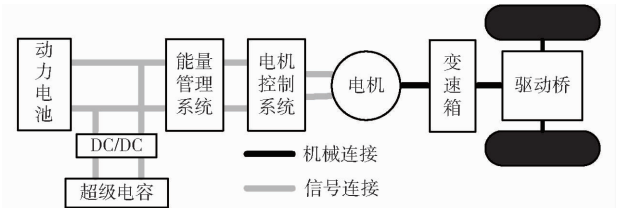


图 1 纯电动拖拉机混合动力电源系统结构示意图
Fig. 1 Structural sketch of compound power supply system for pure electric tractor

1.2 电动拖拉机混合动力电源系统设计与建模

本文选择轮式拖拉机,设定电动拖拉机的一次充电标准行驶距离(标称距离)为 100 km,拖拉机参数如表 1 所示,超级电容/蓄电池混合动力系统设计满足拖拉机的能量和功率需要。蓄电池采用铅酸铁锂电池,参数如表 2 所示。

表 1 电动拖拉机参数
Tab. 1 Electric tractor parameters

参数	数值
拖拉机质量/kg	2 640
气动阻力系数	0.4
滚动阻力系数	0.015
电机传动效率	0.9
标准行驶距离 S_w /km	100
电池模块电压 $U_{B,dc}$ /V	≥ 550

电动拖拉机行驶里程能耗计算式为

$$E_R = E_w \frac{S_R}{S_w} \tag{1}$$

式中 E_R ——拖拉机实际使用能耗
 E_w ——拖拉机行驶 100 km 所需能耗
 S_R ——拖拉机实际行驶距离

根据式(1)计算,电动拖拉机电池组总储能应不小于 E_R ,电池组供电电压不小于拖拉机直流供电电压(600 V)。参考文献[14]进行评估得出,当电池模块质量每增加 72 g 时,将需损耗约 0.07 W·h 的能量(大约占单个电池储能的 1%)。由此得到判据

$$N_{B,s} N_{B,p} (E_{B,unit} - E_{Br,unit}) \geq E_R \tag{2}$$

$$N_{B,s} U_{B,unit} > U_{B,DC} \tag{3}$$

表 2 蓄电池、超级电容与混合动力电源配置参数
Tab.2 Parameters of battery unit, UC unit and HPS configuration

部件名称	参数	数值
蓄 电 池	充电截止电压/V	5.5
	额定电压 $U_{B,unit}/V$	5.0
	额定容量/($A \cdot h$)	3.2
	储能量/($W \cdot h \cdot kg^{-1}$)	10.6
	额定充电电流/A	4.5
	最大放电电流/A	100.0
超 级 电 容	内阻 $R_{C,unit}/m\Omega$	0.32
	额定电压 $U_{C,unit}/V$	3.7
	标称容量 $C_{C,unit}/V$	3 500
	最大持续电流/A	160
	储能 $E_{C,unit}/(W \cdot h)$	4.5
	功率比/($kW \cdot kg^{-1}$)	7.9
混 合 动 力 电 源 配 置	电池单元串联数 $N_{B,s}$	125
	电池单元并联数 $N_{B,p}$	25
	超级电容单元串联数 $N_{C,s}$	112
	超级电容单元并联数 $N_{C,p}$	2
	电池模组额定电压 U_B/V	625.0
	超级电容模组额定电压 U_C/V	462.4
	电池模组额定功率/kW	28
	超级电容模组额定功率/kW	984.02
	DC/DC 变换器能效	0.95

式中 $E_{Br,unit}$ ——电池组每增加一个电池单元所损耗能量

$E_{B,unit}$ ——电池单元存储能量

对于超级电容,其功率应满足电动拖拉机作业期间峰值时段的功率需求。这里选择 Maxwell 超级电容^[15],超级电容参数如表 2 所示。功率峰值时段超级电容放电能量 E_{peak} 计算式为

$$E_{peak} = \max \int_{t_{p,i}} |P_W(t) - P_{B,n}| dt \tag{4}$$

式中 $t_{p,i}$ ——标称距离内峰值功率 P_W 大于电池额定功率 $P_{B,n}$ 的第 i 个时间周期

再生时段最大能量 E_{reg} 计算式为

$$E_{reg} = \max \int_{t_{r,i}} |P_W(t)| dt \tag{5}$$

式中 $t_{r,i}$ ——标称距离内峰值功率 P_W 等于电池额定功率 $P_{B,n}$ 的第 i 个时间周期

根据直流电压的要求,得到准则

$$\frac{3}{4}N_{C,s}N_{C,p}E_{C,unit} \geq \max(E_{reg}, E_{peak}) \tag{6}$$

$$\frac{1}{2}U_B < N_{C,s}U_{C,unit} < U_B \tag{7}$$

为了提高 DC/DC 变换器的效率,将超级电容的电压范围设置为 $(0.5U_B, U_B)^{[16]}$ 。根据式 (1) ~ (7) 确定混合动力电源配置,结果如表 2 所示。

本文动力电源采用半有源混合拓扑结构,如

图 2 所示;电池模块通过双向 DC/DC 变换器连接到直流母线,超级电容与直流母线直连,充电时电流为正、放电时电流为负。

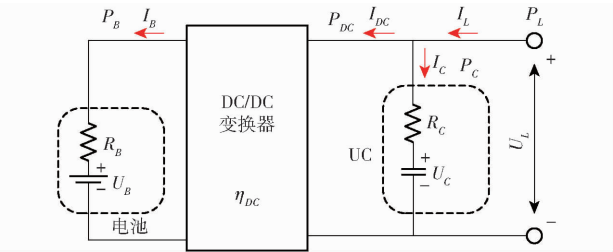


图 2 混合动力电源等效模型

Fig.2 Equivalent circuit model of HPS

如图 2 所示,电池模组由 1 个等效串联电阻和 1 个可控电压源表示,其关系为

$$R_B = \frac{N_{B,s}}{N_{B,p}}R_{B,unit} \tag{8}$$

$$U_B = N_{B,s}U_{B,unit} \tag{9}$$

式中 R_B ——电池模组内阻

$R_{B,unit}$ ——单个电池内阻

因此,电池工作特性为

$$I_{B,k} = \frac{-U_{B,k} + \sqrt{U_{B,k}^2 + 4P_{B,k}R_{B,k}}}{2R_{B,k}} \tag{10}$$

其中 $P_{B,k} = (U_{B,k} + I_{B,k}R_{B,k})I_{B,k} \tag{11}$

$$P_{BL,k} = I_{B,k}^2R_{B,k} \tag{12}$$

式中 $I_{B,k}$ ——在采样时刻 k 电池模组电流

$U_{B,k}$ ——在采样时刻 k 电池模组电压

$P_{B,k}$ ——在采样时刻 k 电池模组功率

$P_{BL,k}$ ——在采样时刻 k 电池模组功率损耗

$R_{B,k}$ ——在采样时刻 k 电池模组内阻

同样,UC 模组由等效串联电阻和等效串联电容组成,其关系为

$$R_C = \frac{N_{C,s}}{N_{C,p}}R_{C,unit} \tag{13}$$

$$U_C = N_{C,s}U_{C,unit} \tag{14}$$

$$C = \frac{N_{C,p}}{N_{C,s}}C_{C,unit} \tag{15}$$

式中 C ——超级电容模组额定电容

R_C ——超级电容模组内阻

因此,超级电容工作特性为

$$I_{C,k} = \frac{C}{T_s}(U_{C,k} - U_{C,k-1}) \tag{16}$$

$$P_{C,k} = \frac{C}{2T_s}(U_{C,k}^2 - U_{C,k-1}^2) + I_{C,k}^2R_C \tag{17}$$

$$P_{Closs,k} = I_{C,k}^2R_C \tag{18}$$

式中 $P_{Closs,k}$ ——在采样时刻 k 超级电容模组功率损耗

$I_{C,k}$ ——在采样时刻 k 超级电容模组电流

$P_{C,k}$ ——在采样时刻 k 超级电容模组功率
 $U_{C,k}$ ——在采样时刻 k 超级电容模组电压
 T_s ——采样周期

双向变换器用于连接电池和直流母线,其能效利用拓扑图中的功率传递函数进行说明,计算式为

$$P_{DCL,k} = P_{B,k} - P_{DC,k} \tag{19}$$

其中
$$P_{DC,k} = P_{L,k} - P_{C,k} \tag{20}$$

$$P_{B,k} = \begin{cases} P_{DC,k} \eta_{DC,k} & (P_{DC,k} \geq 0) \\ \frac{P_{DC,k}}{\eta_{DC,k}} & (P_{DC,k} < 0) \end{cases} \tag{21}$$

式中 $P_{DC,k}$ ——在采样时刻 k DC/DC 变换器功率 (负载侧)

$P_{L,k}$ ——在采样时刻 k 负载消耗功率

$P_{DCL,k}$ ——在采样时刻 k DC/DC 变换器功率损耗

$\eta_{DC,k}$ ——在采样时刻 k DC/DC 变换器能效

1.3 电动拖拉机动态规划方法

动态规划(DP)的基本思想是通过设计优化目标函数确定最优控制输入^[17-18]。对于电动拖拉机超级电容/蓄电池混合动力电源系统,本文设定优化目标为最小化能量损失及电池容量衰减速度^[19]。

对于最小化能量损失,利用混合储能系统的实时功率损失进行评估。计算式为

$$E_L = \sum_k P_{L,k} T_s \tag{22}$$

其中
$$P_{L,k} = P_{BL,k} + P_{CL,k} + P_{DCL,k} \tag{23}$$

式中 $P_{L,k}$ ——在采样时刻 k 混合动力电源总功耗

$P_{BL,k}$ ——在采样时刻 k 电池模组功耗

$P_{CL,k}$ ——在采样时刻 k 超级电容模组功耗

$P_{DCL,k}$ ——在采样时刻 k DC/DC 变换器功耗

E_L ——混合动力电源系统再生能量损耗

根据文献[20-21]可知,电池容量衰减量 ΔSOH_B 与其安培小时(A·h)总吞吐量 Q_B 相关,计算式为

$$\Delta SOH_B = B(c) \exp\left(\frac{-E_a(c)}{RT_e}\right) Q_B^z \tag{24}$$

式中 B ——预指数因子,为常量

E_a ——活化能

R ——气体常数

T_e ——绝对温度

z ——功率系数

c ——电池电流速率($c = 1$ 时,电流为 4 A,
 $c = 2$ 时,电流为 8 A)

由式(24)可知,在其他参数不变的情况下, Q_B 越小,电池容量衰减量 ΔSOH_B 越小。因此,为了简化计算,选择最小化 Q_B 代替 ΔSOH_B 。

电池 Q_B 可以通过电流 $I_{B,k}$ 绝对值累加进行计算,计算式为

$$Q_B = \sum_k |I_{B,k}| T_s \tag{25}$$

因此,优化目标函数 J 为

$$J = w_1 E_L + w_2 Q_B = \sum_k (w_1 P_{L,k} + w_2 |I_{B,k}|) T_s \tag{26}$$

式中 w_1, w_2 ——优化目标函数中各部分权重

由式(26)可知,超级电容的电压变化直接影响系统中其他参数的确定,因此选择超级电容电压 U_C 作为动态规划搜索的状态变量。对 U_C 进行离散化,获得 M 个独立状态,最终构成决策的状态空间。

DP 搜索路径如图 3 所示,设循环周期为 N ,采样周期 T_s 为 1 s,根据 Bellman 优化理论,DP 搜索分为 N 步,确定第 1 步规划算法($k = N$)的成本函数为

$$J_N(x_j) = g_N(x_j) \tag{27}$$

式中 $g_N(x_j)$ ——最后一步函数代价

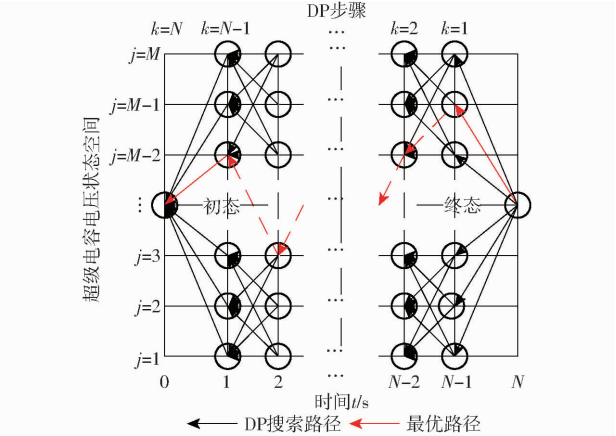


图 3 动态规划搜索路径图

Fig. 3 Search path graph of DP

对于后续规划算法($1 \leq k \leq N - 1$),其成本函数为

$$J_k(x_j) = \min_{u_i \in U_k(x_j)} \{ g_k(x_j, u_i) + J_{k+1}(f_{k+1}) \} \tag{28}$$

式中 $g_k(x_j, u_i)$ ——第 k 步函数代价

f_{k+1} ——第 $k + 1$ 步状态变量

$J_{k+1}(f_{k+1})$ ——第 $k + 1$ 步达到最佳能耗时的优化目标函数

U_k ——控制变量集

i, j ——控制变量和状态变量的离散点序号

1.4 电动拖拉机三段式负载规则设计

根据上述 DP 分析结果,可以得出某负载周期的最优功率分配模式。

根据电动拖拉机的驾驶工况及驾驶场景在 DP 分析中将其分为低速部分和高速部分,并通过对不同负载周期的分析,获得一些通用的控制规则,结

果如图4所示。

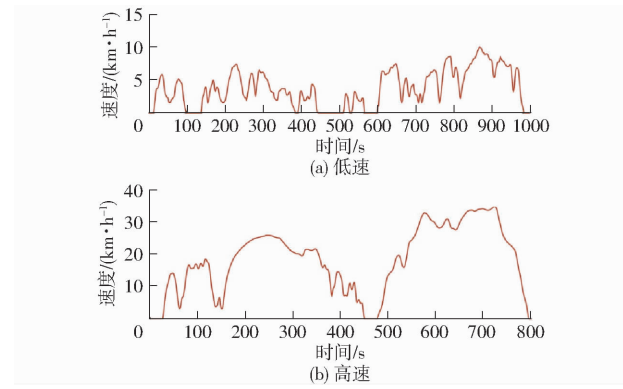
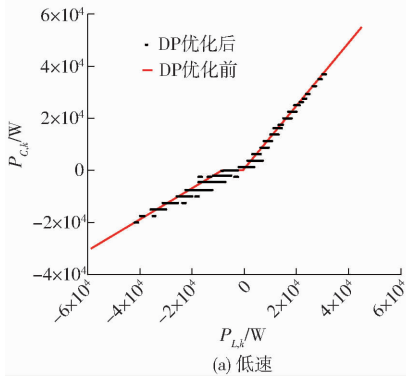


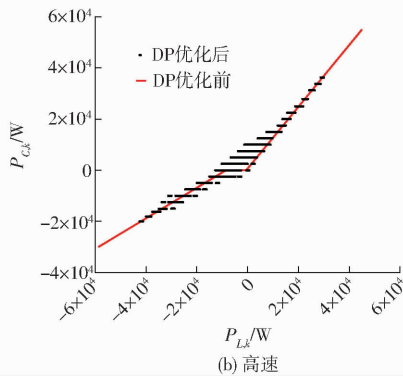
图4 不同负载周期的速度变化曲线

Fig. 4 Speed variations of different load cycles

不同负载下最优功率分配结果如图5所示。由图5可知,超级电容工作于所有再生功率和峰值功率中间,电池工作于匀速平稳状态及部分峰值功率中间。在超级电容辅助下,电池分配的功率比负载



(a) 低速



(b) 高速

图6 DP优化中UC功率与负载功率的关系

Fig. 6 Relationship between UC power and load power in DP results

第1段:如果 $P_L < P_{B,thd}$, 则 $P_C = \varphi(P_L - P_{B,thd})$, $P_B = (P_L - P_C)/\eta_{DC}$ 。

第2段:如果 $P_{B,thd} \leq P_L \leq -P_{C,chg}$, 则 $P_C = 0$, $P_B = P_L/\eta_{DC}$ 。

第3段:如果 $P_L > -P_{C,chg}$, 则 $P_C = P_L + P_{C,chg}$, $P_B = -P_{C,chg}/\eta_{DC}$ 。

其中 $P_{B,thd}$ 为负常数,表示电池放电功率阈值; $P_{C,chg}$ 为正常数,表示超级电容充电功率; φ 为 $(0,1]$ 范围的因子。

由于不同负载周期 $P_{B,thd}$ 与 φ 值不同,因此超级电容的上述特性可形成一组控制规则。考虑到电池荷电状态(State of charge, SOC)^[22] 和电压限制,可以得出相关控制规则如图7所示。

2 电动拖拉机实时能量管理策略

通过DP分析,可以得到负载周期下的最优功率分配模式。对此,本文提出一种基于负载自适应规则的控制策略,以满足实际应用中能量实时在线

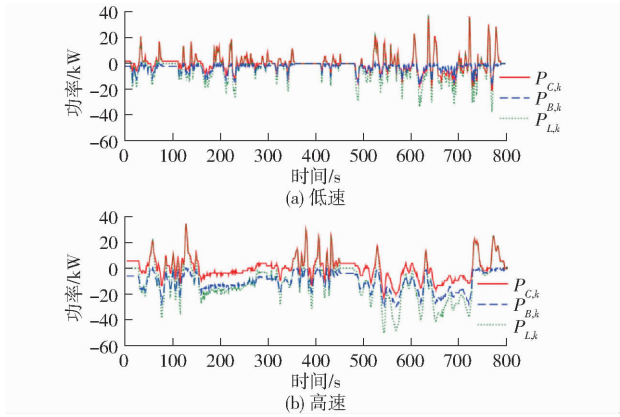
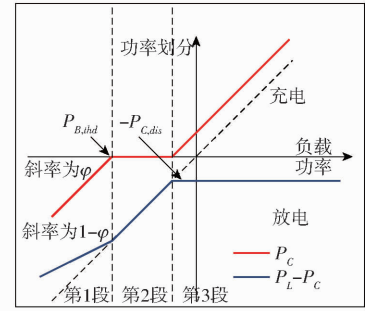


图5 不同负载周期 DP 功率变化曲线

Fig. 5 DP power variations of different load cycles

功率更平稳,峰值功率要求更低。

在电动拖拉机中,超级电容与负载功率的关系如图6所示。从图6可看出,对于电动拖拉机周期性工况可用3条线段进行拟合,具体为:



(c) 3段功率分割示意图

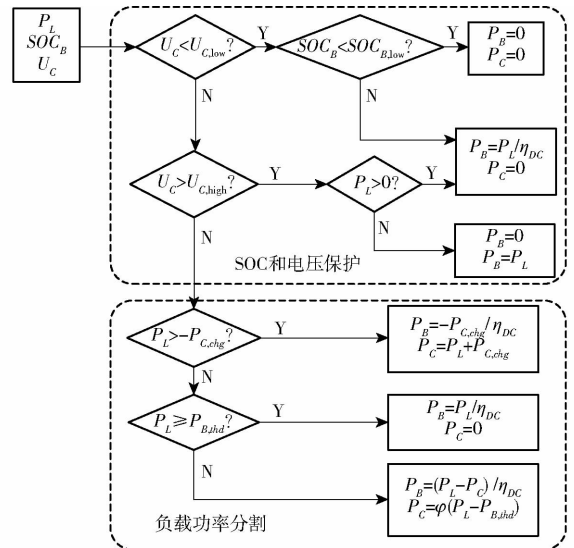


图7 3段规则控制流程图

Fig. 7 Flowchart of three-segment rule based control

管理的需求。

2.1 基于遗传算法的动力电源参数优化

根据1.4节可知,基于3段规则的控制策略性

能取决于功率分割参数取值。因此,当负载模式发生变化时,功率分割参数值也应发生相应的变化。为了获得不同负载周期下的最优参数,提出了一种基于遗传算法^[23-24]的参数优化方法。遗传算法优化问题可描述为

$$J(\varphi, P_{B,thd}) = \sum_k (w_1 P_{L,k} + w_2 |I_{B,k}|) T_s \quad (29)$$

其中 $J(\varphi, P_{B,thd})$ 为优化目标函数, φ 和 $P_{B,thd}$ 为优化变量,并给出取值范围,最小 $J(\varphi, P_{B,thd})$ 满足 $0.5 \leq \varphi \leq 1$, $-15\,000\text{ W} \leq P_{B,thd} \leq -2\,500\text{ W}$ 。将 $P_{C,chg}$ 设置为常数,给定 φ 和 $P_{B,thd}$,基于 3 段规则的控制策略即可给出功率分割的结果,并根据其定义计算相应的 $J(\varphi, P_{B,thd})$ 。

对于每个不同的负载周期,应用遗传优化算法重复 10 次。遗传优化算法步骤为:

第 1 步:初始化。

(1) 程序中载入测试周期数据。

(2) 算法关键参数设置如下:迭代次数为 200,惩罚因子为 100,迁移系数为 0.2,种群规模为 50,交叉概率为 0.8,变异率为 0.025。

第 2 步:遗传算法优化。

(1) 创建初始种群。

(2) 根据所得模型参数,通过个体种群对目标函数进行优化。

(3) 如果迭代次数小于 200,则通过繁殖、交叉和变异产生新的种群。将新种群的结果与步骤(2)中的结果进行比较。

(4) 返回步骤(2),直到迭代次数达到 200 或在约束条件下取得最小值。

电动拖拉机循环负载周期的遗传算法优化结果如表 3 所示,其中 $P_{C,chg}$ 设为 3 000 W。对于负载周期,给出了低速与高速两种工况遗传算法结果。由表 3 可看出,多组参数可接近最优性能。对于每种类型的负载周期,两个参数之间的关系如图 8 所示。

表 3 遗传算法参数优化结果

Tab.3 GA parameter optimization results

负载周期	$P_{B,thd}/\text{W}$	φ	$J_{\min}$
低速	-4 158.0	0.77	9.021×10^5
	-3 413.4	0.70	9.017×10^5
	-3 112.3	0.67	9.016×10^5
	-2 523.9	0.63	9.015×10^5
	-2 498.0	0.63	9.015×10^5
	-13 690.8	0.51	2.554×10^6
高速	-13 778.9	0.52	2.554×10^6
	-14 088.7	0.53	2.554×10^6
	-14 133.5	0.54	2.554×10^6
	-14 828.6	0.57	2.554×10^6

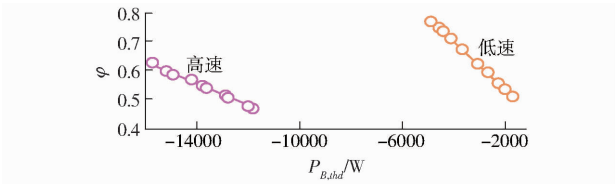


图 8 不同负载周期下的遗传算法结果

Fig.8 GA results for different load cycles

φ 可以用 $P_{B,thd}$ 的线性拟合获得,关系式为

$$\varphi = \lambda_{\varphi} P_{B,thd} + \theta_{\varphi} \quad (30)$$

式中 λ_{φ} 、 θ_{φ} —— φ 与 $P_{B,thd}$ 之间线性函数中的参数
线性函数拟合因子如表 3 所示。每个负载周期所选择的 $P_{B,thd}$ 取遗传优化结果中 3 个中间值的平均值,其原因为它们的 φ 相对较高,有助于降低电池功耗。

2.2 基于负载自适应规则的控制策略

为了建立负载自适应的参数调整机制,需对负载模式与最优功率分配参数之间的关系进行研究。如上文所述, φ 可以用 $P_{B,thd}$ 的线性函数来表示。因此,首先确定 $P_{B,thd}$ 。为了更深入地了解不同的负载模式,表 4 列出了电动拖拉机负载周期的统计信息。

表 4 负载周期参数

Tab.4 Parameters of load cycles

参数	低速	高速
放电时间 T_{dis}/s	1 000	800
充电时间 T_{chg}/s	556	575
总时间 T_{tol}/s	273	157
放电平均功率 P_{disavg}/W	-8 803.0	-16 662.6
充电平均功率 P_{chgavg}/W	6 860.3	10 670.4
平均功率 P_{avg}/W	-2 850.4	-10 118.1

可以看出, $P_{B,thd}$ 与 β_1 之间存在正相关关系,其中 β_1 定义为

$$\beta_1 = \frac{P_{avg}^2 T_{tol}}{P_{disavg} T_{dis}} \frac{(P_{avg} - P_{disavg}) T_{dis}}{(P_{chgavg} - P_{avg}) T_{chg}} \quad (31)$$

对 $P_{B,thd}$ 和 β_1 之间的关系进行拟合,可得

$$P_{B,thd} = -8 \times 10^{-5} \beta_1^2 + 0.52 \beta_1 - 1.1 \times 10^3$$

此外, φ 与 $P_{B,thd}$ 之间线性函数的 2 个拟合因子也需要在负载模式变化时进行调整。可以看出 λ_{φ} 与 γ_1 之间存在正相关关系,其中 γ_1 定义为

$$\gamma_1 = P_{avg} - P_{disavg} \quad (32)$$

θ_{φ} 与 δ_1 之间存在负相关关系, δ_1 定义为

$$\delta_1 = \frac{P_{chgavg} T_{chg}}{P_{disavg} T_{dis}} \quad (33)$$

上述关系可用二次函数分别对应拟合,可得

$$\lambda_{\varphi} = -9.63 \times 10^{-13} \gamma_1^2 + 2.4 \times 10^{-8} \gamma_1 - 1.83 \times 10^{-4}$$

$$\theta_{\varphi} = -16 \delta_1^2 - 12.2 \delta_1 - 2$$

对表 5 中数据进行分析,可知电池阈值功率

表 5 负载周期参数生成实验结果

Tab. 5 Parameters experimental results of load cycles

参数	阈值									
	0. 10	0. 15	0. 20	0. 25	0. 30	0. 35	0. 40	0. 45	0. 50	0. 55
电池阈值功率 $P_{B,thd}/W$	- 2 503	- 3 060	- 5 100	- 7 000	- 8 070	- 10 600	- 11 000	- 14 930	- 15 060	- 18 000
$P_{B,thd}$ 生成的辅助变量 β_1	- 2 025	- 2 600	- 4 960	- 6 950	- 8 000	- 8 250	- 10 800	- 11 950	- 12 050	- 13 800
线性函数 φ 的参数 λ_φ	- 1. 41 × 10 ⁻⁴	- 1. 15 × 10 ⁻⁴	- 9. 60 × 10 ⁻⁵	- 9. 20 × 10 ⁻⁵	- 8. 70 × 10 ⁻⁵	- 7. 10 × 10 ⁻⁵	- 6. 20 × 10 ⁻⁵	- 5. 90 × 10 ⁻⁵	- 4. 70 × 10 ⁻⁵	- 4. 00 × 10 ⁻⁵
λ_φ 生成的辅助变量 γ_1	2 500	3 740	4 600	5 690	6 250	7 150	8 050	9 520	11 850	12 500
线性函数 φ 的参数 θ_φ	0. 37	0. 35	0. 33	0. 20	0. 19	0. 10	0. 02	- 0. 02	- 0. 12	- 0. 22
θ_φ 生成的辅助变量 δ_1	- 0. 42	- 0. 35	- 0. 31	- 0. 27	- 0. 22	- 0. 18	- 0. 17	- 0. 12	- 0. 11	- 0. 06
优化变量 φ	0. 76	0. 70	0. 82	0. 84	0. 89	0. 85	0. 71	0. 85	0. 59	0. 50

$P_{B,thd}$ 小于 - 15 000 W 时,优化变量 φ 显著减小,故式 (29) 符合设计要求;同时,可得出功率划分参数与负荷统计关系如图 9 所示,对应决定系数分别为 0. 959、0. 957 及 0. 929,误差满足拟合要求,故其满足负载自适应的参数调整机制,分裂参数设计合理,能够适应不同工况的控制策略参数实时调整。最后,根据实际负载模式的统计信息,确定参数。

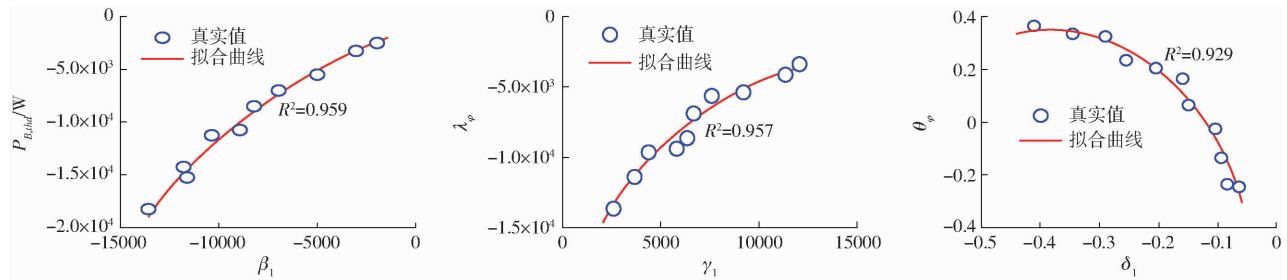


图 9 分裂参数与负载统计量之间的关系

Fig. 9 Relationship between splitting parameters and load statistics

为了实时获得负载模式的统计信息,引入滑动计数窗口^[25-26]。为与负载周期类型保持一致,将窗口尺寸设置为 800 s。此外,为了更新负载统计信息,当计数窗口移动 50 s 或出现不同运行路况对应负载统计信息时,将重新计算相关信息,并可对应生成新的分裂参数^[27]。

综合上述分析,在图 6c 的基础上,得出负载自适应规则控制流程图如图 10 所示。其中,在前 800 s,初始功率分割参数根据本工作中的标称距离周期进

行调优;利用本文提出的基于负载自适应规则的控制策略,通过负反馈机制调整 $P_{C,chg}$ 值(前 800 s,其初始值设置为 3 000 W),同时调整其他参数;为了防止超级电容过早达到最高电压或最低电压而不能正常工作,将 UC 电压保持在中等水平。

3 实验验证

为了验证所提控制策略的性能,需在动态负载周期下进行实验测试。采用 2 种运行负载循环模

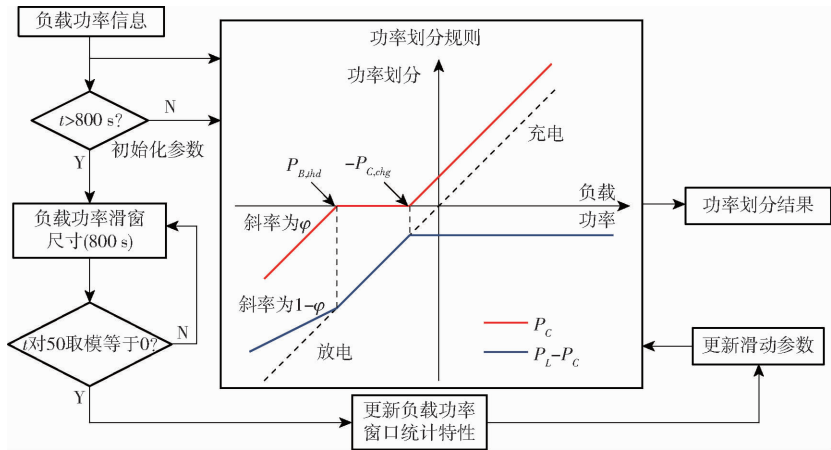


图 10 负载自适应规则控制流程图

Fig. 10 Flowchart of load-adaptive rule based control

式:①平稳路况组合负载周期(Combined load cycle, CLC)模式,即运行路况较平整,路面起伏波动较小,运行中电动拖拉机采用低速和高速相结合的模式,在超过 40%的时间里速度超过 35 km/h。②非平稳路况随机负载周期(Random load cycle, RLC)模式,即运行路况不平整,路面起伏波动较大,运行中电动拖拉机空转明显且速度因路面颠簸而变化频繁,在超过 70%的时间里速度低于 30 km/h。CLC 和 RLC 循环工作实验结果如表 6 所示。

表 6 CLC 和 RLC 循环工作实验结果
Tab.6 Cycle work experimental results of CLC and RLC

参数	CLC	RLC
行驶距离/km	64.6	52.6
总时间/s	4 500	5 000
最大行驶速度/(km·h ⁻¹)	70	50
平均行驶速度/(km·h ⁻¹)	35	25
空闲(0 km/h)时间占比/%	12.0	14.6
高速(≥35 km/h)运行时间占比/%	25.7	12.6
低速(0~30 km/h)运行时间占比/%	62.3	72.8

3.1 平稳路况负载循环

首先通过平稳路况组合负载模式对本文提出的基于负载自适应规则的控制策略(Load-adaptive rule based control strategy, LRBC)进行实验验证,并对比普通规则控制(Ordinary rule based control, RBC)、动态规划(DP)和纯电池系统(Battery-only system, BTO)的负载循环性能。其中,普通规则控制的参数在标称距离运行周期进行调优,组合负载模式的信息在测试前是未知的;所配置的纯电池系统,参数设置与本文电力系统蓄电池中的电池模组相同,相关配置参数详见表 2。

不同策略在平稳路况组合负载模式测试中的实验结果如表 7 所示,对应 LRBC 功率分配情况如图 11 所示。

表 7 不同策略在 CLC 测试中实验结果
Tab.7 Experimental results of different strategies in CLC test

参数	纯电池系 统(BTO)	混合动力电源		
		RBC	LRBC	DP
电池能耗/(W·h)	63.3	38.0	30.3	26.8
超级电容能耗/(W·h)		15.8	18.4	21.0
DC/DC 能耗/(W·h)		524.7	480.5	446.7
总能耗/(W·h)		578.5	529.2	494.5
电池最大电流/A	218.4	112.1	108.6	116.4
电池均方根电流/A	35.8	27.6	26.1	23.2
电池安培小时吞吐量/(A·h)	32.7	26.4	23.7	21.6

由表 7 可知,在 CLC 模式下,与纯电池系统相

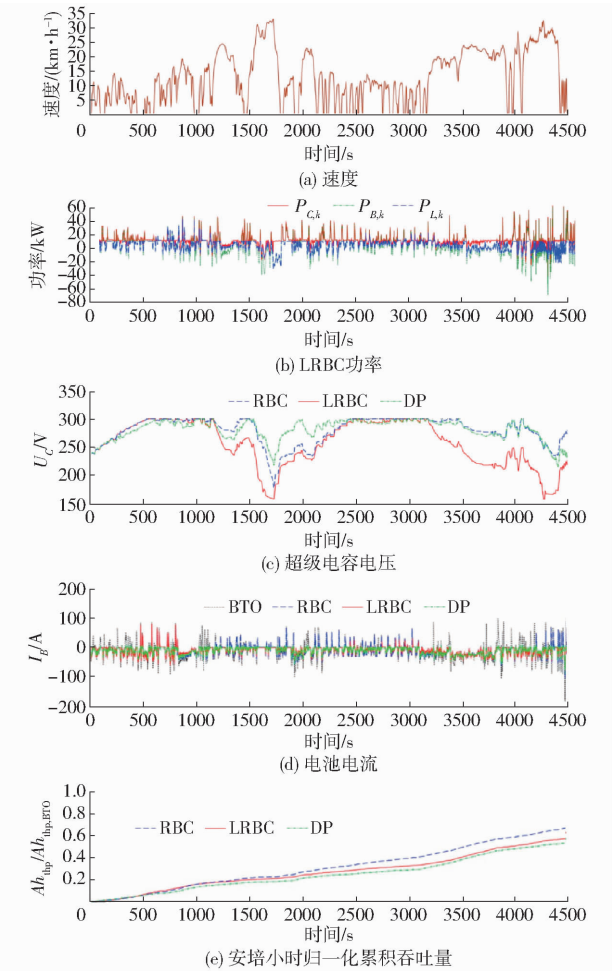


图 11 CLC 模式下 LRBC、RBC 及 DP 性能对比
Fig.11 Performance comparison of LRBC, RBC and DP in CLC

比,超级电容/蓄电池混合电源动力系统显著降低了蓄电池能量损失、均方根电流(RMS)和安培小时吞吐量(Ah_{thp})。由此,超级电容的加入有助于保护电池,延长混合电源动力系统寿命。此外,与普通规则控制相比,负载自适应规则的控制性能更接近动态规划的性能,实现了总能量损失和电池安培小时吞吐量之间的最佳等效。

电动拖拉机平稳路况组合负载周期行驶速度曲线如图 11a 所示,在 1 500~1 800 s、3 500~3 900 s 及 4 100~4 400 s 时间段内速度较大;速度较大时段表明路况较好,可进行惰性行驶。图 11c 反映在此速度下需投入超级电容电压,基于 3 段式功率设计超级电容可根据负载变化实时进行充放电,可看出在速度较大时本文所设计能量管理策略所需投入的超级电容电压最小(160 V),因此拖拉机处于惰性行驶状态所需能量较少,此时蓄电池对电动拖拉机供电的同时对超级电容进行充电,因此系统有较好的节能效果,符合设计要求。由图 11b 可知,超级电容工作于所有再生功率和部分峰值功率期间,电池工作于匀速平稳状态及部分小峰值功率期间。在超

级电容辅助下,电池所需供电功率比负载功率更平稳,峰值功率要求更低。图 11d 为 4 种模式下电池电流变化曲线,可看出 LRBC 控制策略下在速度较大时电池会对超级电容进行充电,故此时电池电流表现为负值,如图中 1 800 s 及 4 300 s 附近。图 11e 为 CLC 工况模式下电池安培小时归一化累积吞吐量对比曲线(图中 $Ah_{thp,BTO}$ 表示纯电池系统下安培小时吞吐量),可知本文所设计方法电池吞吐量最接近 DP 方法的电池吞吐量,根据式(24)、(25)可知本文所设计方法可有效提高电池寿命。

综合表 7、图 11 可知,在 CLC 模式下,与纯电池系统相比,当电池最大电流降低 47.8%、电池均方根电流降低 30.8%、安培小时吞吐量降低 31.1% 时,本文所提出的负载自适应规则控制策略提供了近似最优解。同时,与普通规则控制相比,在电池电流性能基本相同的情况下,采用负载自适应规则控制策略时安培小时吞吐量降低 10.5%、总能量损失降低 8.7%,这表明负载自适应规则控制策略在电池保护和节能方面比普通规则控制有更好的性能。因此,在 CLC 模式下,本文提出的负载自适应规则控制具有较强的负载适应能力及电池保护能力。

3.2 非平稳路况负载循环

不同策略在非平稳路况组合负载模式测试中的实验结果如表 8 所示,对应 LRBC 功率分配如图 12 所示。

参数	纯电池系	混合动力电源		
	统(BTO)	RBC	LRBC	DP
电池能耗/(W·h)	73.3	37.3	36.7	32.0
超级电容能耗/(W·h)		30.4	31.8	26.4
DC/DC 能耗/(W·h)		573.4	504.4	489.9
总能耗/(W·h)		641.1	572.9	548.3
电池最大电流/A	230.4	120.8	122.0	140.8
电池均方根电流/A	50.5	36.0	35.1	34.0
电池安培小时吞吐量/(A·h)	40.3	30.4	29.8	29.0

电动拖拉机非平稳路况组合负载周期行驶速度曲线如图 12a 所示,路况平整度较低,起伏较大,拖拉机行驶中空转情况较多,整体速度较低。在拖拉机频繁启停中,在负载自适应控制策略下电池充放电峰值较为平稳(图 12b),在 800 ~ 1 150 s 及 3 150 ~ 3 850 s 时间段内电池会给超级电容充电,使得超级电容保持其能量的连续性,避免超级电容充放电超出其阈值进而降低超级电容性能,同时在此时间段内 $P_{c,k}$ 最小,近乎为 0,因此可增强超级电容

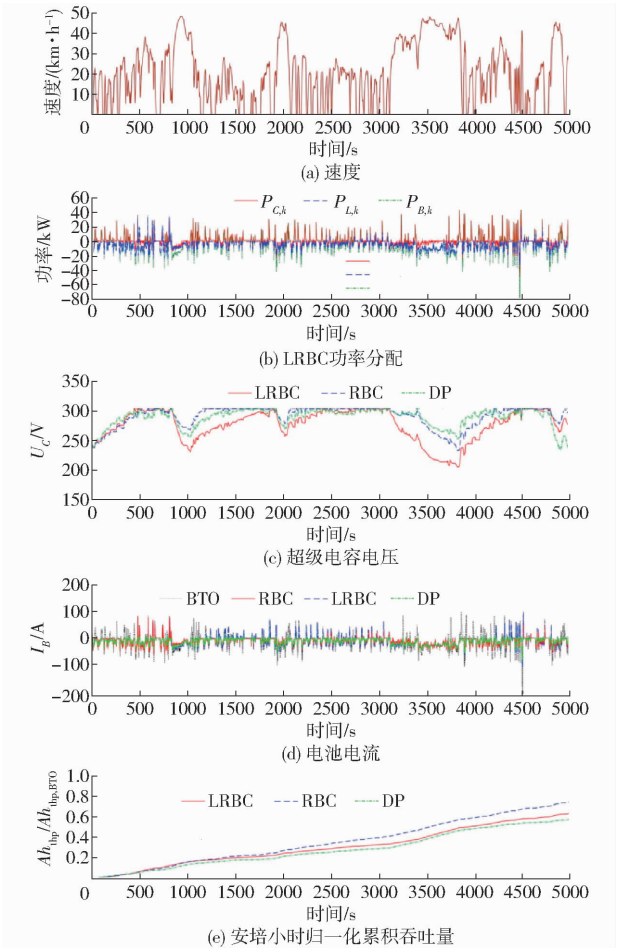


图 12 RLC 模式下 LRBC、RBC 及 DP 性能对比
Fig. 12 Performance comparisons of LRBC, RBC and DP in RLC

性能。图 12c 反映在此路况下 RBC、DP 及 LRBC 3 种控制策略所需投入超级电容电压。图 12d 为 4 种模式下电池电流变化曲线,可看出在速度较大时电池投入工作的同时给超级电容充电,故此时电池电流为负值。综上可知,图 12a ~ 12d 满足一致性。图 12e 为 RLC 工况模式下电池安培小时归一化累积吞吐量对比曲线,可知本文所设计方法电池吞吐量最接近动态规划方法的电池吞吐量,根据式(24)、(25)可知本文所设计方法可有效提高电池寿命。

利用表 7、图 11 相类似的分析方法可对应得出,在 RLC 工况下,与纯电池系统相比,当电池最大电流降低 58.6%、电池均方根电流降低 36.4%、安培小时吞吐量降低 35.6% 时,本文所提出的负载自适应规则控制策略提供了近似最优解。同时,与普通规则控制相比,在电池电流性能基本相同的情况下,采用负载自适应规则控制策略时电池最大电流降低 22.3%、安培小时吞吐量降低 15.7%、总能量损失降低 15.1%,这进一步表明了负载自适应规则控制具有更好的电池保护和节能能力。

非平稳路况负载周期的结果表明,负载自适应

规则控制在电池保护和节能方面优于普通规则控制。

4 结论

(1)提出了一种基于负载自适应规则的蓄电池/超级电容混合能量管理系统实时能量管理策略,通过分析动态规划策略,从不同负载周期的动态规划结果中提取3段控制规则。研究了功率分配参数与负载模式之间的关系,采用遗传算法进行搜索,得到最优功率分割参数。经过相关计算,建立了分功率参数与负载统计量之间的函数关系,并建立了负载自适应参数调整规则。

(2)为验证所提负载自适应规则控制策略的有效性,对电动拖拉机平稳路况组合负载周期和非平稳路况随机负载周期模式进行了实验验证分析。结果表明,与普通控制规则相比,负载自适应控制规则的能量损失和电池寿命明显改善,在不同工况下电池安培小时吞吐量降低10.5%~15.7%,总能量损失降低8.7%~15.1%。特别是在平均速度相对较低、空转较多的工况驾驶场景中,能量管理系统的改进使其效果更佳。同时,负载自适应规则控制在电池保护和节能方面的性能也更接近动态规划效果,能实现节能和延长电池寿命之间的最优状态以及负载自适应模式下的最优能量管理。

参 考 文 献

[1] 徐立友,赵一荣,赵学平,等. 电动拖拉机综合台架试验系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1): 355-363.
XU Liyou, ZHAO Yirong, ZHAO Xueping, et al. Design and test of multifunctional test system for electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 355-363. (in Chinese)

[2] 陈黎卿,詹庆峰,王伟伟,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): 387-394.
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): 387-394. (in Chinese)

[3] 谢斌,张超,陈硕,等. 双轮驱动电动拖拉机传动性能研究[J]. 农业机械学报,2015,46(6): 8-13.
XIE Bin, ZHANG Chao, CHEN Shuo, et al. Transmission performance of two-wheel drive electric tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 8-13. (in Chinese)

[4] LI X, WANG Z, ZHANG L, et al. State-of-health estimation for Li-ion batteries by combing the incremental capacity analysis method with grey relational analysis[J]. Journal of Power Sources, 2019, 410: 106-114.

[5] 李银平,刘立,靳添絮,等. 基于动态规划的电动拖拉机动力电源能量控制策略研究[J]. 农业机械学报,2020,51(4): 403-410.
LI Yinping, LIU Li, JIN Tianxu, et al. Energy control strategy of electric tractor power supply based on dynamic programming[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 403-410. (in Chinese)

[6] WANG Y, LIU C, PAN R, et al. Modeling and state-of-charge prediction of lithium-ion battery and ultracapacitor hybrids with a co-estimator[J]. Energy, 2017, 121: 739-750.

[7] 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)

[8] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2): 412-420.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, YANG Hangxu, et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 412-420. (in Chinese)

[9] 贾方,侯宇豪,韩建刚,等. 基于电驱动系统的农业车辆牵引负荷车设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(8): 394-401.
JIA Fang, HOU Yuhao, HAN Jian'gang, et al. Design and test of agricultural vehicle traction load vehicle based on electric drive system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 394-401. (in Chinese)

[10] 刘静,孙闫. 电动拖拉机复合电源系统研究[J]. 安徽农业科学,2020,48(11): 213-215.
LIU Jing, SUN Yan. Research on composite energy system for electric tractor[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(11): 213-215. (in Chinese)

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

[12] WANG Y, ZHANG X, LIU C, et al. Multi-timescale power and energy assessment of lithium-ion battery and super capacitor hybrid system using extended Kalman filter[J]. Journal of Power Sources, 2018, 389: 93-105.

[13] JING W, LAI C H, WONG W S H, et al. A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification[J]. Applied Energy, 2018, 224: 340-356.

[14] CAO J, EMADI A. A new battery/ultracapacitor hybrid energy storage system for electric, hybrid, and plug-in hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 27(1): 122-132.

[15] 夏长高,孙闫,周雯雯. 双电源电动拖拉机能量管理仿真研究[J]. 农机化研究,2019,41(1): 234-240.

XIA Changgao, SUN Yan, ZHOU Wenwen. Study on energy management of double power electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 234 – 240. (in Chinese)

[16] WANG Y, SUN Z, CHEN Z. Development of energy management system based on a rule-based power distribution strategy for hybrid power sources[J]. Energy, 2019, 175: 1055 – 1066.

[17] CASTAINGS A, LHOMME W, TRIGUI R, et al. Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints[J]. Applied Energy, 2016, 163: 190 – 200.

[18] 徐立友,刘恩泽,刘孟楠,等. 燃料电池/蓄电池混合动力电动拖拉机能量管理策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2019,40(2): 80 – 86.

XU Liyou, LIU Enze, LIU Mengnan, et al. Energy management strategy of fuel cell and storage battery hybrid electric tractor [J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 40(2): 80 – 86. (in Chinese)

[19] IBRAHIM M, JEMEI S, WIMMER G, et al. Nonlinear autoregressive neural network in an energy management strategy for battery/ultra-capacitor hybrid electrical vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 262 – 269.

[20] WIECZOREK M, LEWANDOWSKI M. A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2017, 192: 222 – 233.

[21] GOMOZOV O, TROVAO J P, KESTELYN X, et al. Adaptive energy management system based on a real-time model predictive control with nonuniform sampling time for multiple energy storage electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017,66(7): 5520 – 5530.

[22] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programing approach[J]. Applied Energy, 2015, 139: 151 – 162.

[23] ZHANG S, XIONG R. Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming[J]. Applied Energy, 2015, 155: 68 – 78.

[24] SHEN J, KHALIGH A. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 223 – 231.

[25] XIONG R, CAO J, YU Q. Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle[J]. Applied Energy, 2018, 211: 538 – 548.

[26] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942 – 3948.

[27] LIU C, WANG Y, CHEN Z. Degradation model and cycle life prediction for lithium-ion battery used in hybrid energy storage system[J]. Energy, 2019, 166: 796 – 806.

(上接第 401 页)

[41] 张垚,索龙,潘凤娥,等. 生物质炭对砖红壤性质与养分及硝化作用的影响[J]. 农业资源与环境学报,2016, 33(1):55 – 59.

ZHANG Yao,SUO Long, PAN Feng'e,et al. Effects of biochar application on soil physical properties, nutrients and nitrification in latosoil[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2016, 33(1):55 – 59. (in Chinese)

[42] 王翰琨,吴永波,刘俊萍,等. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(6):689 – 701.

WANG Hankun, WU Yongbo, LIU Junping, et al. A review of research advances in the effects of biochar on soil nitrogen cycling and its functional microorganisms[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(6): 689 – 701. (in Chinese)

[43] 张莉,李赞堂,王士银,等. 水稻氮素吸收低效型突变体 osnad1 的生理和遗传分析[J]. 作物杂志,2018(3):68 – 76.

ZHANG Li, LI Zantang, WANG Shiyin,et al. Physiological and genetic analysis of rice mutant osnad1 defective in nitrogen absorption[J]. Crops,2018(3):68 – 76. (in Chinese)

[44] 王思宇,刘赛男,黄玉威,等. 生物炭对植物土传病害的影响与作用机制研究进展[J]. 沈阳农业大学学报,2022,53(5): 611 – 619.

WANG Siyu, LIU Sainan, HUANG Yuwei, et al. Research progress on the influenced mechanism of biochar on soil-borne diseases of plants[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2022,53(5):611 – 619. (in Chinese)

[45] 夏桂敏,刘宇庭,罗秀兰,等. 覆膜条件下铁改性磷负载生物炭对花生磷素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报,2023, 39(20):176 – 187.

XIA Guimin, LIU Yuting, LUO Xiulan, et al. Effects of iron-modified and phosphorus loaded biochar on the phosphorus utilization and yield of peanut under film mulching[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(20):176 – 187. (in Chinese)

[46] 王晓琪,姚媛媛,陈宝成,等. 淹水条件硝态氮和铵态氮配施对水稻生长与土壤养分的影响[J]. 土壤,2020, 52(2):254 – 261.

WANG Xiaoqi, YAO Yuanyuan, CHEN Baocheng, et al. Effects of combined application of nitrate and ammonium on rice growth and soil nutrients under flooding conditions[J]. Soils,2020, 52(2):254 – 261. (in Chinese)

[47] 杜加银,胡兆平,陈海宁. 肥料中不同比例硝态氮对红壤水稻农艺性状及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2017(21):4 – 5.

DU Jiayin, HU Yaoping, CHEN Haining. Effects of different proportion of nitrate on agronomic characters and yield of rice in red soil[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(21):4 – 5. (in Chinese)

[48] 易亚科,周志波,陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2017,36(3):428 – 436.

YI Yake, ZHOU Zhibo, CHEN Guanghui. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science,2017,36(3):428 – 436. (in Chinese)