

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.02.018

基于超级电容辅能的电动微耕机 复合电源系统研究与试验

薛劭帅, 蔡宗平, 李庆, 杨崇山, 刘威, 李光林

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 锂电池组为单一动力源的电动微耕机在丘陵山地复杂多变的作业工况中, 锂电池频繁瞬时大电流波动放电, 严重影响锂电池的能效及寿命, 本文将超级电容应用在电动微耕机上构成复合电源, 并对该复合电源的参数匹配及能量分配策略进行了研究. 结合电动微耕机实际作业情况, 设计了逻辑门限控制策略, 控制系统以主控芯片 STM32F103 为核心, 使用 C 语言编程, 对单一锂电池电源和复合电源两种工作模式下磷酸铁锂电池的工作电流、功率、温度、容量衰退速率等进行了试验与分析. 田间试验表明, 在一定土壤条件下, 复合电源工作模式与单一锂电池电源相比, 针对电机不同转速和不同地块, 磷酸铁锂电池电流平均波动范围分别缩减 14.37, 13.07, 14.3, 15.23, 13.77A, 平均峰值功率分别下降 43.6%, 75.2%, 77.4%, 76.4%, 60.3%. 由于超出阈值的部分大电流由超级电容补充, 磷酸铁锂电池输出电流变平缓, 使磷酸铁锂电池组免受突变大电流的冲击; 复合电源中磷酸铁锂电池组平均温升相较于单一电源锂电池组分别下降 0.13, 1.48, 1.67, 2.26, 3.45 °C; 在试验作业时间内, 复合电源中磷酸铁锂电池组平均容量衰退速率分别下降 2.1%, 9.1%, 9.7%, 9.2%, 4.4%, 在长期频繁使用情况下, 复合电源系统微耕机的经济性和安全性要高于单一锂电池系统. 该研究可为复合电源在农机装备上应用提供理论基础和技术参考.

关键词: 电动微耕机; 磷酸铁锂电池; 超级电容; 复合电源;

逻辑门限控制策略

中图分类号: TM13; S222

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)02-0179-13

Research and Experiment on Composite Power Supply System of Micro-tiller Based on Supercapacitor Auxiliary Energy

XUE Shaoshuai, CAI Zongping, LI Qing,
YANG Chongshan, LIU Wei, LI Guanglin

College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In view of the frequent instantaneous high current fluctuation discharge of the lithium battery in

收稿日期: 2021-12-17

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展重点项目(cstc2019jcsx-gksbX0001).

作者简介: 薛劭帅, 硕士研究生, 主要从事系统检测与智能控制方面的研究.

通信作者: 李光林, 教授, 博士研究生导师.

the complex and changeable operating conditions of the electric micro-tiller with the lithium battery pack as the single power source, which seriously affects the energy efficiency and service life of lithium battery, the supercapacitor was applied to the electric micro-tiller to form a composite power supply, and the parameter matching and energy distribution strategy of the composite power supply were studied. Combined with the actual operation of electric micro-tiller, the logic threshold control strategy was designed. The control system took the main control chip STM32F103 as the core and was programmed with C language. The working current, power and temperature changes of lithium iron phosphate battery and capacity decline rate of lithium iron phosphate battery under two working modes of single lithium battery power supply and composite power supply were tested and analyzed. The field experiment showed that under certain soil conditions, for different moto speeds and different blocks, the average current fluctuation range of lithium iron phosphate battery was reduced by 14.37, 13.07, 14.3, 15.23, 13.77A, respectively. The average peak power decreased by 43.6%, 75.2%, 77.4%, 76.4% and 60.3%, respectively. Because the high current exceeding the threshold was supplemented by the super capacitor, the output current of lithium iron phosphate battery became flat, so that the lithium iron phosphate battery pack was protected from the impact of sudden high current. The average temperature rise of lithium iron phosphate battery pack in composite power supply decreased by 0.13, 1.48, 1.67, 2.26, 3.45 °C, respectively, compared with that of lithium battery pack in single power supply. During the period time of testing, the average capacity attenuation rate of lithium iron phosphate battery pack in the composite power supply decreased by 2.1%, 9.1%, 9.7%, 9.2% and 4.4%, respectively. Under the condition of long-term and frequent use, the economy and safety of the micro-tiller with the composite power system were higher than that of the single battery system. The research can provide theoretical basis and technical reference for the application of composite power supply in agricultural machinery and equipment.

Key words: electric micro-tiller; lithium iron phosphate battery; supercapacitor; composite power supply; logic threshold control strategy

我国丘陵山地占全国耕地总面积的 2/3 以上, 地块狭小且分散, 不能满足大中型农业机械田间作业和转移的条件, 微耕机是现阶段不可或缺的农业机械^[1-2]. 电动微耕机是一种新型农用作业机具, 具有体积小、质量轻、好操作、轻便灵活、作业过程振动小、噪声低、无废气排放、维护保养技术难度较低等优点, 是解决设施农业、园艺、果园与茶园中传统农业机械所造成的能源和环保问题的有效途径之一. 同时, 在对环境要求较高的农业作业中, 电动微耕机相比内燃机微耕机具有更广阔的应用前景, 是未来农业机械“绿色化”研究的重要方向^[3].

锂电池组是电动微耕机的核心部件, 现有锂电池电动微耕机在田间旋耕作业时, 由于不同地理位置土壤的含水量、容重、密度等特性存在差异, 土壤坚硬松软程度不同, 土壤中还存在石块、根茎等工况会使电动微耕机作业时受力不均匀、扭矩变化大, 作业时的负载特性具有较大的随机性和不可预测性.

在南方丘陵山区, 农忙时期环境温度高于 35 °C 很常见, 温室大棚等封闭环境温度更高, 电动微耕机锂电池组发热最高温度可达 70 °C 以上, 远超锂离子电池适宜工作温度上限(40 °C)^[4]. 大电流放电会引起电池本体化学反应热、极化反应热、焦耳热增加, 电池温度也会增加, 如果不及时控制电池组电流输出大小, 很容易引起电池组内部的热量堆积、单体电池间不一致性增大、热失控等问题, 导致电动微耕机锂电池组寿命下降、容量衰减过快、安全性降低, 甚至威胁到使用人员安全^[5]. 而且, 电池迅速老化会使电池无法满足电动微耕机的瞬时大功率需求, 造成农机装备动力性变差, 对电动微耕机生产效率造成不利的影响. 同时, 电池组寿命衰减使电动微耕机在其使用周期内需要多次更换锂电池, 导致了使

用成本大幅增加, 制约了电动微耕机的普及和发展, 因此电池的充放电特性为复合电源系统的提出和使用奠定了理论基础^[6-9].

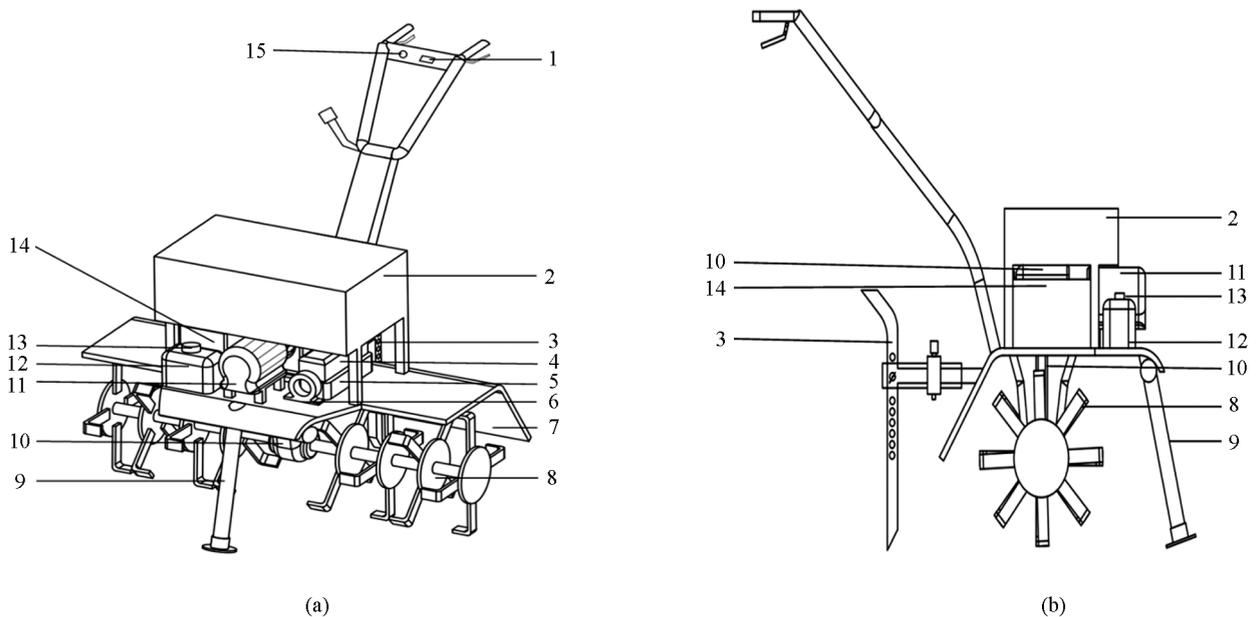
我国对电动微耕机的研究已经超过 20 年, 但研究多集中在整机布局、结构分析和作业功能拓展等方面, 对于以复合电源为动力的微耕机相关研究报道还极为少见^[1-3].

在上述背景下, 为了减小电池组的功率负担、延长其使用寿命、提高电动微耕机使用中电池组的安全性, 将比功率高的超级电容与比能量高的磷酸铁锂电池结合作为微耕机的动力源, 匹配高效的能量管理控制策略, 以此提高电动微耕机的续航能力、安全性和工作效率, 推动电动微耕机在丘陵山区的推广应用和我国电动微耕机产业的进一步发展.

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

复合电源电动微耕机主要由磷酸铁锂电池组、超级电容器、电动机、电机控制器、减速器、机架、旋耕装置、限深杆及控制系统组成. 控制系统包括 STM32F103ZET6 单片机、双向 DC/DC 变换器、霍尔电流传感器、电压传感器、库仑计等. 电机采用永磁无刷直流电机, 传动方式是锥齿轮传动. 本机复合电源系统拓扑结构选型为半主动式构型, 即超级电容器与双向 DC/DC 变换器串联再与磷酸铁锂电池组并联的复合电源结构. 复合电源电动微耕机结构简图如图 1 所示, 复合电源电动微耕机主要技术参数如表 1.



1. 电源开关; 2. 磷酸铁锂电池组; 3. 限深杆; 4. 电机控制器; 5. 双向 DC/DC 变换器; 6. 电流传感器; 7. 挡泥板; 8. 旋耕刀; 9. 支撑架; 10. 减速器; 11. 无刷直流电动机; 12. 控制模块(内含单片机、电压传感器、库仑计、降压模块等); 13. 报警灯; 14. 超级电容器; 15. 调速旋钮.

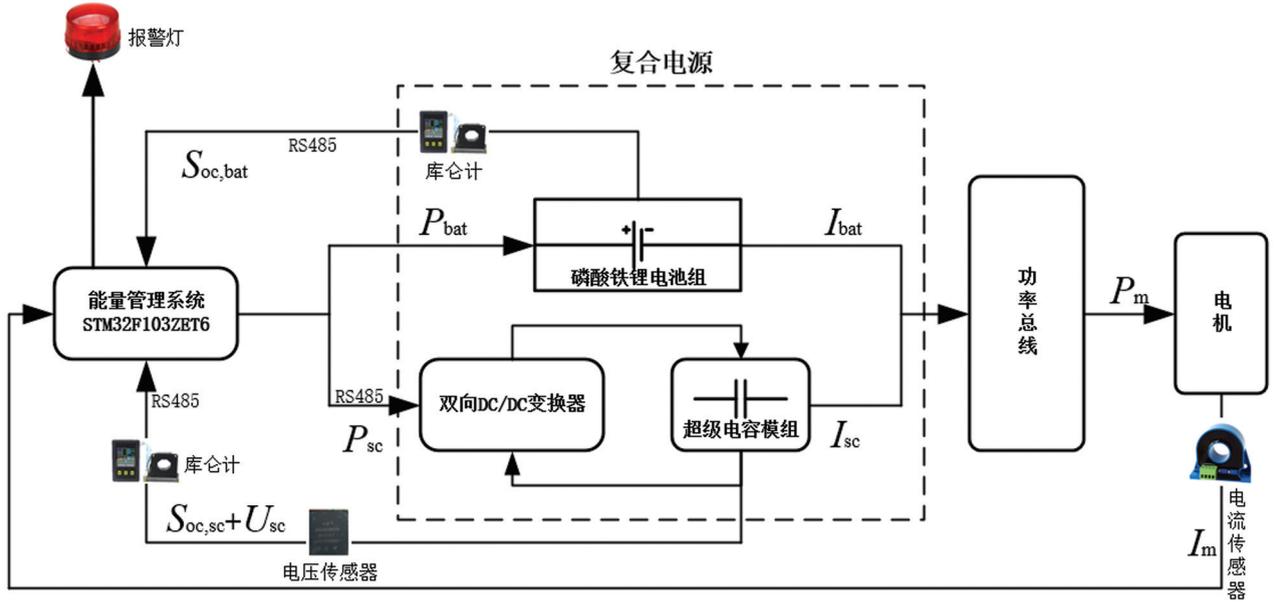
图 1 复合电源电动微耕机结构简图

表 1 复合电源电动微耕机主要技术参数

项目	参数	项目	参数
耕深/mm	≥ 100	联接方式	直联
耕幅/mm	600	传动方式	齿轮传动
额定功率/W	1 500	作业速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.01~0.2
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	3 600		

1.2 工作原理

复合电源电动微耕机进入田间工作后,主控制器对电流传感器采集的工况信号进行处理,判断电机需求电流 I_m 和设定电流阈值 I_h 的大小关系,同时结合电压传感器和库仑计采集到的状态参数综合判断磷酸铁锂电池组和超级电容模组两者的能量状态,然后按照逻辑门限控制策略合理分配二者的能量输出,实现磷酸铁锂电池组基本平稳放电,达到保护锂电池的目的.电动微耕机复合电源系统控制原理如图 2 所示.



图中 $S_{oc,sc}$ 、 $S_{oc,bat}$ 分别表示超级电容器荷电状态,电池荷电状态; I_{bat} 表示电池输出电流, I_m 表示电机需求电流, I_{sc} 表示超级电容器输出电流, P_{bat} 表示电池输出功率, P_m 表示电机需求功率, P_{sc} 表示超级电容器输出功率, U_{sc} 表示超级电容器电压, RS485 表示 485 通讯.

图 2 复合电源系统控制原理图

2 主要部件选型与参数匹配

2.1 电机选型及参数计算

根据电动微耕机作业环境及自身特点,选用以电子换向取代传统机械换向的无刷直流电机,其使用寿命较长、负荷效率较高、转动惯量较低、工作噪声较小、控制性能较好,电机功率大小根据以下经验公式计算^[10]:

$$P_N \geq K \frac{P_f}{\eta_T} \quad (1)$$

其中 P_N 为电动机额定功率, kW; K 为电动机功率储备系数; P_f 为电动微耕机作业时所需功率, kW; η_T 为电动微耕机传动效率; 旋耕刀切削土壤所消耗的功率可由以下经验公式计算^[10]:

$$P_f = 0.1 K_\lambda H B v \quad (2)$$

其中 H 为电动微耕机作业的耕地深度, 取 $H = 15$ cm; B 为电动微耕机作业的耕宽, 取 $B = 0.6$ m; v 为电动微耕机耕作时的前进速度, 取 $v = 0.3$ m/s; K_λ 为旋耕比阻, N/cm^2 .

$$K_\lambda = K_g K_1 K_2 K_3 K_4 \quad (3)$$

其中 K_g 为旋耕比阻修正系数, K_1 为耕深修正系数, K_2 为土壤含水率修正系数, K_3 为残茬植被修正系数, K_4 为作业方式修正系数. 根据丘陵山区耕作条件, 查阅农业机械设计手册^[10], 可取 $K_1 = 0.8$, $K_2 = 0.95$, $K_3 = 0.8$, $K_4 = 0.66$, $K_g = 10$ N/cm^2 , 带入式(3)中, 计算可得 $K_\lambda = 4$ N/cm^2 , 将 K_λ , H , B , v 的值带入式(2)中可计算得到 $P_f = 1.08$ kW, 考虑到电动微耕机作业环境复杂, 取电动机的功率储备系数 $K = 1.1$, 因为传动采用锥齿轮传动方式, 精度与传动效率较高, 取 $\eta_T = 0.8$, 代入式(1)

中可得: $P_N \geq 1.485 \text{ kW}$. 因此, 选择尤奈特 BM1424ZXF 永磁无刷直流电机, 额定功率为 1.5 kW , 额定电压为 48 V .

2.2 电池选型及参数计算

本文选用磷酸铁锂电池组作为整机动力来源, 其优点是比普通铅酸电池有更高的能量密度, 热稳定性和安全性优于三元锂电池. 对于锂电池组的数量, 主要由在作业过程中电动机需输出的最大功率和电动微耕机连续作业的时间来确定, 磷酸铁锂电池组所需的数量最小为^[11-13]:

$$n = \max(n_1, n_2) \quad (4)$$

其中: n_1 为在作业过程中电动机输出最大功率时所需的锂电池数量; n_2 为整机连续作业时间所需的锂电池数量.

$$n_1 \geq \frac{P_{N, \max}}{P_{b, \max} \eta_{mc}} \quad (5)$$

其中: $P_{N, \max}$ 为电动机需输出的最大功率, 本文取 3 kW ; $P_{b, \max}$ 为单个锂电池所能提供的最大功率, kW ; η_{mc} 为电机及控制器正常工作时的整体效率, 本文取为 90% .

$$n_2 \geq \frac{T_{\min} P_N}{W} \quad (6)$$

其中: T_{\min} 为整机作业持续时间, 按照一次作业时间取 3 h ; P_N 为电动机额定功率, kW ; W 为单个锂电池组所需释放的电能, $\text{kW} \cdot \text{h}$.

根据上式, 选择两块能量型磷酸铁锂电池模块串联而成的电池包作为动力源, 每块电池额定电压 24 V , 额定能量 $2.4 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 额定容量 100 Ah .

2.3 双向 DC/DC 选型

在复合电源系统中, 超级电容和磷酸铁锂电池分别发挥高比功率和高比能量的优势, 但磷酸铁锂电池和超级电容的充放电特性差异较大, 两者组合使用将会出现电压不匹配等问题. 在复合电源系统中引入双向 DC/DC 变换器, 利用其对磷酸铁锂电池和超级电容的电压进行协调, 同时对超级电容的工作状态进行调节和控制. 双向 DC/DC 变换器的两端输入输出电压极性不变, 但电流的流动方向却可以改变, 从而实现能量的双向流动, 相当于将两个单向变换器并联运行, 大大减少了系统的体积和成本. 本文选用清驰科技全数字双向 DC/DC 变换器, 该变换器采用非隔离式双向 Buck/Boost 双象限结构, 转化效率高, 输出电压可根据用户需求灵活可调, 输入侧兼容超级电容及磷酸铁锂电池组, 通过标准 Modbus-RTU 协议的 RS485 接口实现与主控制器通信.

2.4 超级电容选型及参数匹配

超级电容具有电容量大、比功率高、工作温度范围广、可进行大电流充放电、充电时间短、寿命长等优点, 但由于其能量密度较小, 无法大量存储能量, 故单独使用受到一定限制. 超级电容的充放电特性和容量特性决定了超级电容器在大电流放电时容量并没有减小, 超级电容作为复合电源系统的辅助能量源, 可在工程机械大功率负载时提供峰值功率, 对锂电池进行保护, 使锂电池尽量工作在较理想的放电状态. 当超级电容与锂电池的端电压比值越接近时, 双向 DC/DC 变换器越容易达到更高的交换效率, 且当两者端电压值越接近时, 超级电容越能更好发挥作用, 故超级电容模组额定电压定为 48 V . 超级电容模组工作时能量随模组电压变化如下式:

$$E_{sc} = \frac{1}{2} N_{sc} C_{sc} (U_{sc, \max}^2 - U_{sc, \min}^2) \quad (7)$$

其中 E_{sc} 为超级电容模组释放能量, J ; N_{sc} 为超级电容模组中单体超级电容串联数量; C_{sc} 为单体超级电容额定容量, F ; $U_{sc, \max}$ 为单体超级电容的最大工作电压, V ; $U_{sc, \min}$ 为单体超级电容的最小工作电压, V . 由公式(7)可以看出, 当超级电容模组的电压下降为最大电压的 $1/2$ 时, 其能量利用率为 75% , 此后超级电容

模组的充放电效率会大大降低, 因此为保护超级电容和延长其循环使用寿命, 取超级电容模组工作的最小电压为正常工作额定电压的 $1/2$, 即 $U_{sc, \min} = U_{sc}/2$. 依据前文对超级电容特性分析, 设定单体超级电容的工作电压范围为 $(0.5 \sim 1) U_{sc}$ 之间, 则所需要单体超级电容数量和容量分别为

$$N_{sc} \leq \frac{48}{U_{sc}} \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} \eta_1 N_{sc} C_{sc} (U_{sc, \max}^2 - U_{sc, \min}^2) \geq (P_{t, \max} - P_b) t_1 \times 1\,000 \quad (9)$$

$$C_{sc} \geq \frac{(P_{t, \max} - P_b) t_1 \times 1\,000}{\frac{1}{2} \eta_1 N_{sc} \left[U_{sc}^2 - \left(\frac{1}{2} U_{sc} \right)^2 \right]} \quad (10)$$

其中 η_1 为 DC/DC 变换器的效率, 取 96% ; U_{sc} 为单体超级电容额定电压, V; $U_{sc, \max}$ 为单体超级电容最大工作电压, V, 取 $U_{sc, \max} = U_{sc}$; $U_{sc, \min}$ 为单体超级电容最小工作电压, V, 取 $U_{sc, \min} = U_{sc}/2$; $P_{t, \max}$ 为微耕机旋耕时最大峰值功率, 取 2.8 kW ; P_b 为磷酸铁锂电池输出功率, 依据以往研究人员测得微耕机田间作业功率的平均值, 取 0.528 kW ; t_1 为微耕机保持最大峰值功率时间, 取 60 s ; 经过计算, 选用由 18 块单体超级电容(额定电压 2.67 V , 额定容量 $3\,000 \text{ F}$) 串联组成的型号为 BMOD0165P048C01Maxwell 超级电容器, 其额定电压为 48 V , 额定容量为 165 F , 最大放电电流 $1\,900 \text{ A}$.

2.5 其他器件

电流采样模块选用了霍尔闭环直流电流传感器, 型号为 FX-BY35-100B2D, 量程为 $0 \sim 100 \text{ A}$, 精度 $\pm 1\%$, 输出信号为 $0 \sim 3 \text{ V}$; 选用经久耐用、绝缘性好的 ZP100A 螺纹整流二极管防止超级电容给电池反向充电; 电压采样模块采用中霍 CHVS-ASV 系列霍尔直流电压传感器, 量程为 $0 \sim 60 \text{ V}$, 精度 $\pm 0.5\%$, 输出信号为 $0 \sim 5 \text{ V}$; 荷电状态(SOC)采样模块选用绿深 VAC9010H 库仑计与 VAC9610S 库仑计, 主要对输入的信号经过 CPU 运算处理后, 输出当前设备电量以及能量, 实时显示容量、能量、运行时间等多种物理参数, 通过 RS485 和主控制器 STM32F103ZET6 实现通讯, 串口参数为: 波特率 $4\,800$, 数据位 8, 无校验位, 停止位 1; 选用正源电子生产的工业级降压模块, 参数分别为输入 $28 \sim 80 \text{ V}$ 转输出 12 V 和输入 $8 \sim 58 \text{ V}$ 转输出 5 V , 磷酸铁锂电池组通过降压模块给电压传感器、电流传感器、库仑计、stm32 主控制器以及调速电位器供电; 测量转速采用优利德非接触式转速计 UT372 测量电机输出轴转速, 可测的转速范围为 $10 \sim 99\,999 \text{ r/min}$, 精度为 $\pm 0.04\%$, 通过 USB 与电脑端连接记录数据; 温度传感器采用 NTC 热敏电阻, 标称阻值 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) 为 $10 \text{ k}\Omega$, 阻值允许公差为 $\pm 1\%$, 热敏电阻材料常数 (B 值) 为 $3\,950$, 温度量程为 $-30 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$; 基于 Arduino Due 微控制器制作电池温度监测界面, 使用 Arduino 硬件的 Simulink 支持包可以在 Arduino 板上创建和运行 Simulink 模型, 可以交互式地监视和调优在 Simulink 中开发的算法, 通过 USB 连接线实现电脑端 Simulink 与 Arduino Due 通信, 可以有效实时监测磷酸铁锂电池组体表温度。

3 能量管理控制策略

根据电动微耕机的实际工作需求, 设计相应的逻辑门限控制策略. 电动微耕机作业时, 电机需要的平均功率由锂电池供应, 超级电容则提供波动部分的需求功率, 从而将超级电容比功率高和磷酸铁锂电池比能量高的优势充分发挥出来, 同时为了避免超级电容和磷酸铁锂电池过充过放等危险状况, 荷电状态和电压也被相应设置为阈值.

3.1 逻辑门限控制策略参数选择

本文选择从能量角度定义超级电容荷电状态^[14-15], 由前文可知超级电容开路电压达到其额定电压的一半时已经放出 75% 的能量, 故设定超级电容 SOC 的工作区间为 $[0.25, 1]$, 即超级电容 SOC 充电上限阈值

为 $S_{oc,sc,max} = 1$, 放电下限阈值为 $S_{oc,sc,min} = 0.25$. 综合考虑厂家提供的磷酸铁锂电池相关数据, 磷酸铁锂电池的 SOC 工作区间选在 $[0.2, 1]$, 即磷酸铁锂电池充电上限阈值为 $S_{oc,b,max} = 1$, 放电下限阈值为 $S_{oc,b,min} = 0.2$. 综合考虑以往研究人员采集的微耕机功率谱平均值与磷酸铁锂电池容量衰减规律^[16-19], 选定 $I_h = 11A$ 作为电流阈值.

3.2 逻辑门限控制流程图(图 3)

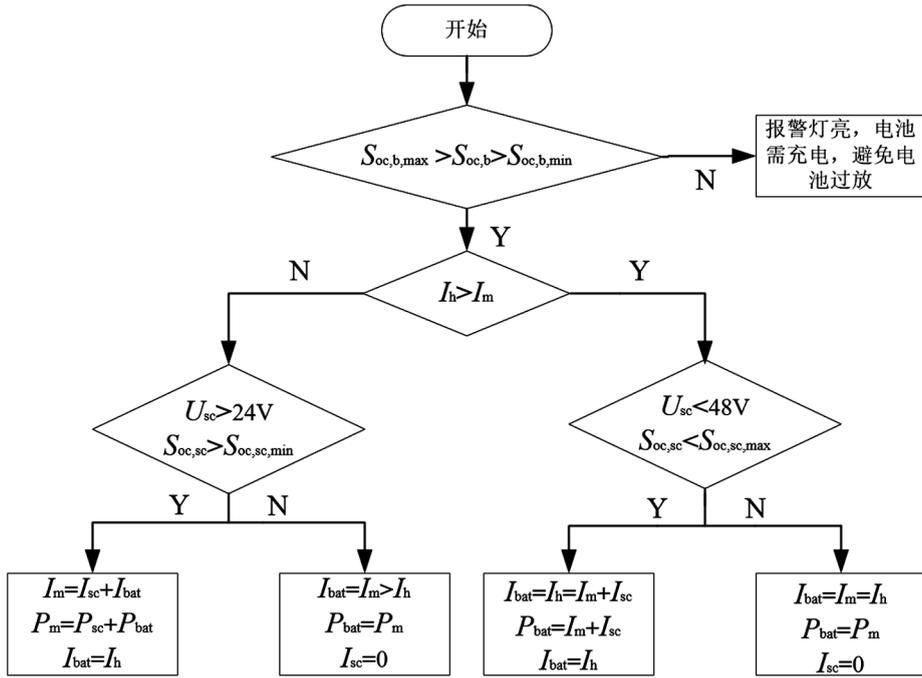


图 3 逻辑门限控制流程图

3.3 逻辑门限控制策略

在机器工作之前, 确保主能量源磷酸铁锂电池荷电状态良好 $(S_{oc,b,max} > S_{oc,b} > S_{oc,b,min})$, 工作过程中一旦发现磷酸铁锂电池即将过放时 $(S_{oc,b} \leq S_{oc,b,min})$, 报警灯亮.

低负荷工况时, 电动微耕机工作需求功率 P_m 较小即电机所需电流 I_m 较小时 $(I_m < I_h)$, 复合电源系统由磷酸铁锂电池组单独提供微耕机需求功率. 此时若超级电容 SOC 值低于 SOC 充电上限值 $(S_{oc,sc} < S_{oc,sc,max})$, 为保证下一次大倍率放电, 超级电容有能力放电削减峰值电流, 磷酸铁锂电池通过双向 DC/DC 变换器对超级电容进行充电. 为防止超级电容过压, U_{sc} 高于 $U_{sc,max} = 48V$ 时自动停止充电, 电流(能量功率)流向如图 4(a)所示, 此时 $P_{bat} = P_m + P_{sc}$, $I_{bat} = I_m + I_{sc}$; 当超级电容 SOC 值非常接近或一旦大于充电上限值时 $(S_{oc,sc} \geq S_{oc,sc,max})$, 为防止超级电容过充, 此时双向 DC/DC 变换器立刻处于待机状态, 磷酸铁锂电池停止向超级电容充电, 电流(能量功率)流向如图 4(b)所示, 此时 $P_{bat} = P_m$, $I_{bat} = I_m$, $I_{sc} = 0$.

突变大负荷及持续大负荷工况时, 电动微耕机工作需求功率 P_m 较大, 即电机所需电流 I_m 较大 $(I_m > I_h)$ 时, 磷酸铁锂电池组和超级电容联合提供给微耕机需求功率. 若超级电容 SOC 值高于 SOC 放电下限值 $(S_{oc,sc} > S_{oc,sc,min})$, 表示超级电容有能力辅助电池放电, 则磷酸铁锂电池组和超级电容共同提供需求电流, 同时为防止超级电容欠压工作, U_{sc} 低于 $U_{sc,min} = 24V$ 时, 双向 DC/DC 变换器立刻处于待机状态, 超级电容停止放电, 电流(能量功率)流向如图 4(c)所示, 此时 $P_m = P_{bat} + P_{sc}$, $I_m = I_{bat} + I_{sc}$; 若检测到超级电容 SOC 值一旦低于或等于放电下限值时 $(S_{oc,sc} \leq S_{oc,sc,min})$, 超级电容已经没有能力辅助电池放电, 同时磷酸铁锂电池组已经大电流放电, 如果再给超级电容充电, 会导致磷酸铁锂电池组电流进一步加大, 所以此时不宜给超级电容充电, 双向 DC/DC 变换器立刻处于待机状态. 电流(能量功率)流向如图 4(d)所示, 此时 $P_{bat} = P_m$, $I_{bat} = I_m$, $I_{sc} = 0$.

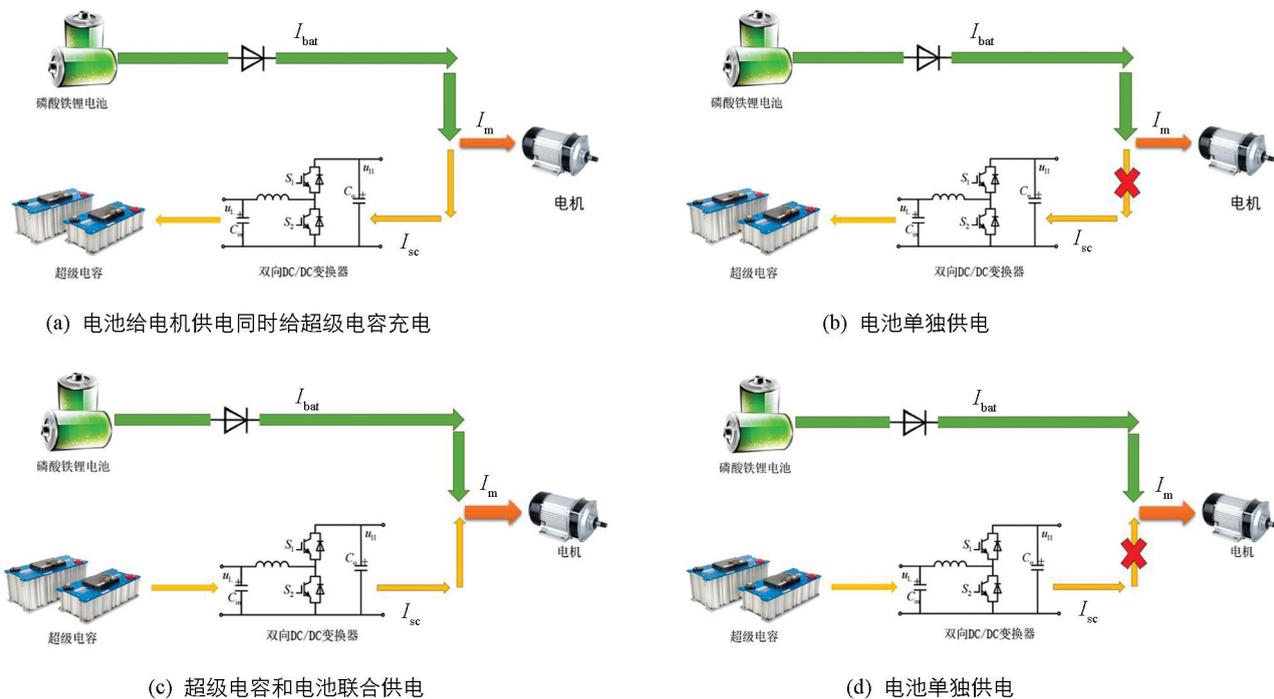


图 4 4 种工作模式简图

4 田间试验

2021 年 11 月在中国农业科学院柑桔研究所进行田间试验, 试验器材主要有复合电源电动微耕机样机、卷尺、高精度电子秤(量程 3 kg, 精度 0.1 g)、直尺、UT372 转速测量仪(10~99 999 r/min, 精度为 $\pm 0.04\%$)、环刀、SC900 土壤坚实度仪(量程 0~45 cm, 0~7 000 kPa, 精度 ± 1.25 cm, 103 kPa)、华盛昌 DT-83 温度测量仪(量程 $-20\sim 60$ $^{\circ}\text{C}$, 精度 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$)等。

在进行旋耕试验之前, 依据 GB/T5262-2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》测定土壤含水率与坚实度。在试验区内用五点法定位并用环刀取样, 烘干法测含水率, 测得 A 号地土壤平均含水率为 16.23%, B 号地为 22.81%; 采用 SC900 土壤坚实度仪用五点法定位并测量, 测得 A 号地土壤 0~150 mm 平均坚实度为 0.643 Mpa, B 号地为 0.471 Mpa。

将约 150 m^2 表面平整的 A 号地分成 24 块, 每块长为 6 m, 宽为 1 m, 并依次进行编号。试验按照 GB/T5668-2017《旋耕机》、JB/T10266-2013《微型耕耘机》国家标准进行, 总共进行 24 次耕作试验即 12 组对照试验, 每次耕作前记录环境温度、电池温度(温度传感器监测)和超级电容工作前后端电压。电池温升是一项重要指标, 需要保证同转速下每组对照试验电池起始温度一致, 田间试验中对照试验部分过程中采取自然冷却来保证电池起始工作时温度基本一致, 即做完单一电源试验之后, 打开电池箱盖进行散热, 通过在 PC 端温度监测界面实时监测电池温度变化, 待电池温度恢复到试验起始温度时关闭电池箱盖, 然后进行复合电源试验。

(1) 在 1,3,5 号地中, 采用锂电池单独供电, 在 2,4,6 号地中, 采用复合电源供电, 在 1 200 r/min 的转速下进行试验, 耕深约为 15 cm, 耕作长度 5 m, 耕宽 0.6 m, 记录电池参数变化。

(2) 在 7,9,11 号地中, 采用锂电池单独供电, 在 8,10,12 号地中, 采用复合电源供电, 在 2 700 r/min 的转速下进行试验, 耕深约为 15 cm, 耕作长度 5 m, 耕宽 0.6 m, 记录电池参数变化。

(3) 在 13,15,17 号地中, 采用锂电池单独供电, 在 14,16,18 号地中, 采用复合电源供电, 在 2 800 r/min 的转速下进行试验, 耕深约为 15 cm, 耕作长度 5 m, 耕宽 0.6 m, 记录电池参数变化。

(4) 在 19,21,23 号地中, 采用锂电池单独供电, 在 20,22,24 号地中, 采用复合电源供电, 在

3 000 r/min 的转速下进行试验, 耕深约为 15 cm, 耕作长度 5 m, 耕宽 0.6 m, 记录电池参数变化。

将约 400 m² 表面平整的 B 号地分成 6 块, 每块长为 35 m, 宽为 1 m, 并依次进行编号。在 1,3,5 号地中, 采用锂电池单独供电, 在 2,4,6 号地中, 采用复合电源供电, 在 3 000 r/min 的转速下进行试验, 耕深约为 15 cm, 耕作长度 30 m, 耕宽 0.6 m, 记录电池参数变化。试验通过 APN1211E-U 功率分析仪记录电池相关数据(包括功率、电压、电流、Wh 和 Ah 等), 通过 USB 接口数据线与计算机连接, 记录试验数据, 操作界面如图 5 所示。采用优利德非接触式转速计 UT372 测量电机输出轴转速, 通过 USB 接口数据线与试验计算机连接, 记录试验数据, 采样界面如图 6 所示。通过电池内置 NTC 热敏电阻温度传感器记录电池温度变化, 通过 ADC 采集的热敏电阻两端的电压数值计算出热敏电阻的阻值, 再通过 Simulink Lookup Table 模块查表即可得到此时测量的磷酸铁锂电池温度, 磷酸铁锂电池 Simulink 温度采样记录界面如图 7 所示; Arduino Due 实物图与 Simulink 温度测量模型分别如图 8 和图 9 所示。通过双向 DC/DC 变换器与库仑计显示面板记录超级电容端电压变化以及超级电容放电量变化。田间试验现场如图 10 所示。

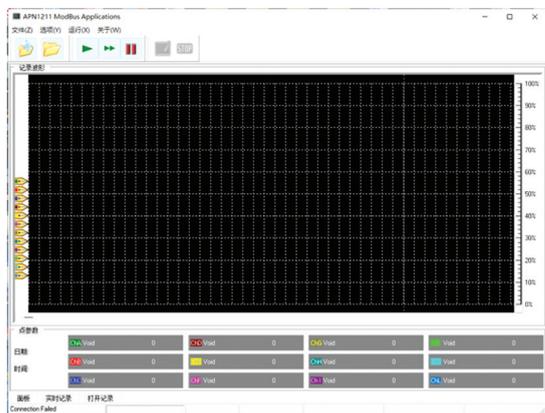


图 5 功率分析仪采样界面

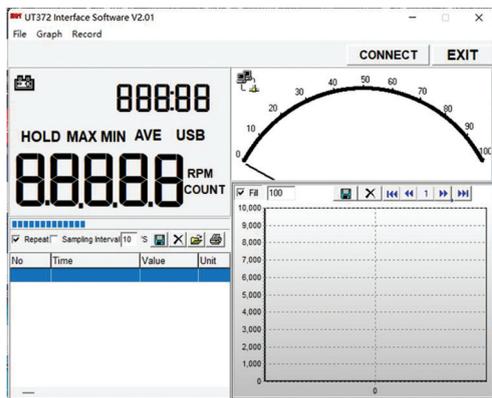


图 6 转速计测量界面

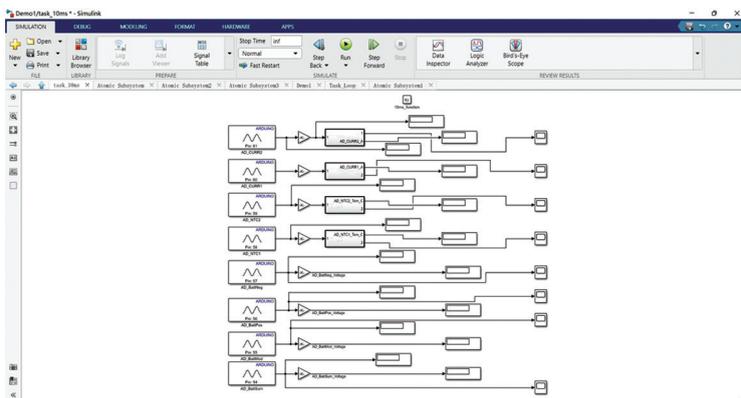


图 7 Simulink 电池温度监测界面



图 8 Arduino Due 实物图

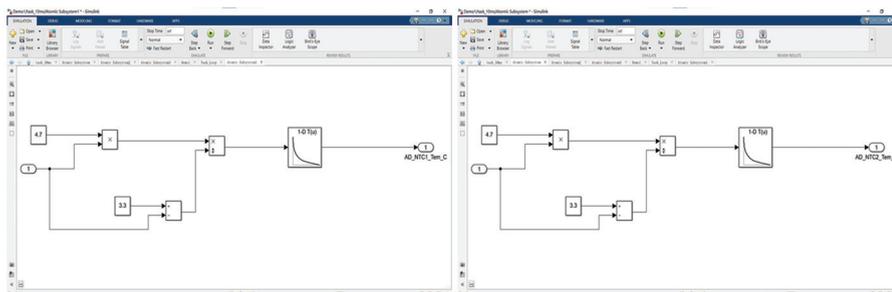


图 9 Simulink 温度测量模型



(a) A号地



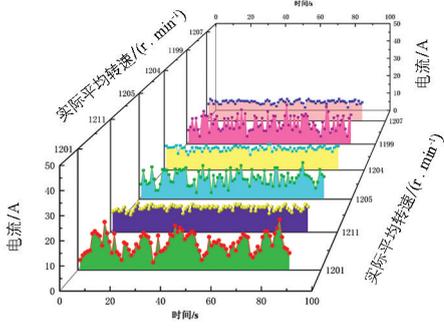
(b) B号地

图 10 田间试验

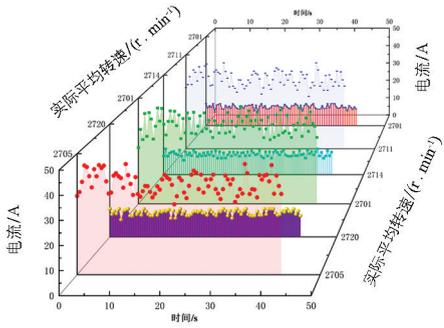
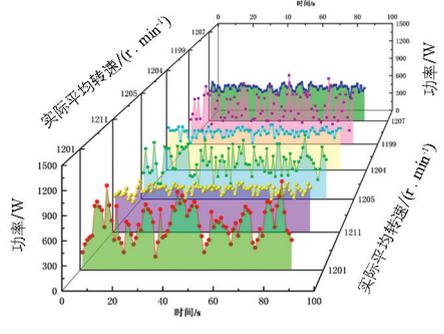
试验中单一电源与复合电源电池部分参数变化如图 11 所示。采集试验数据后并求平均值,最大限度降低不同地块条件对试验结果的影响,电池平均放电功率、电池电流波动最大范围与电池峰值功率等数据如表 2 所示,单一电源和复合电源电池放电量变化如表 3,单一电源和复合电源电池温升变化如表 4:

表 2 试验数据

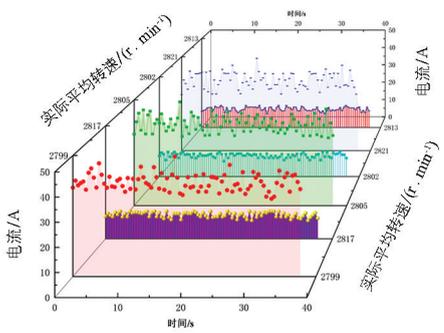
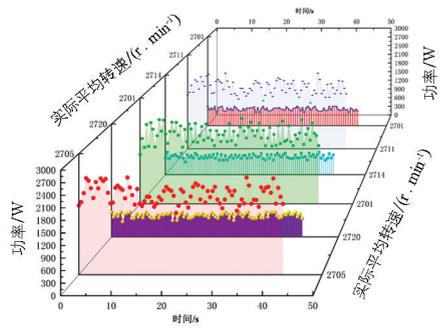
地块	编号	环境温度/ ℃	平均转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	电池平均放 电功率/kW	电池电流波动 最大范围/A	电池峰值 功率/kW
A 号地	1	9.1	1 200.6	0.593	16.2	1.081
	3	9.1	1 205.1	0.632	15.7	1.012
	5	9.1	1 198.9	0.612	17.8	1.132
	2	9.1	1 210.8	0.535	2.3	0.653
	4	9.1	1 203.5	0.524	1.8	0.627
	6	9.1	1 206.7	0.531	2.5	0.539
	7	9.1	2 705.3	1.914	15.1	2.391
	9	9.1	2 701.4	1.875	14.2	2.214
	11	9.1	2 711.3	1.894	17.3	2.325
	8	9.1	2 720.2	0.541	3.1	0.571
	10	9.1	2 714.2	0.518	2.4	0.563
	12	9.2	2 700.7	0.526	1.9	0.582
	13	9.3	2 798.7	1.98	13.2	2.611
	15	9.3	2 804.5	1.914	15.9	2.552
	17	9.3	2 820.7	1.954	20.6	2.579
	14	9.3	2 817.1	0.533	2.6	0.591
	16	9.3	2 801.6	0.524	1.9	0.575
	18	9.3	2 813.4	0.537	2.3	0.584
	19	9.4	3 000.3	2.01	16.7	2.621
	21	9.5	3 001.6	2.124	16.9	2.574
	23	9.5	3 014.2	2.154	19.1	2.613
	20	9.4	3 015.3	0.554	2.1	0.637
	22	9.5	3 021.3	0.547	2.2	0.608
	24	9.5	3 005.2	0.533	2.7	0.596
B 号地	1	9.7	3 020.1	0.91	17.3	1.577
	3	9.7	3 010.9	0.935	18.1	1.651
	5	9.8	3 033.4	0.928	16.3	1.71
	2	9.7	3 007.3	0.571	3.8	0.678
	4	9.7	3 046.8	0.58	3.7	0.643
	6	9.8	3 019.1	0.566	2.9	0.637



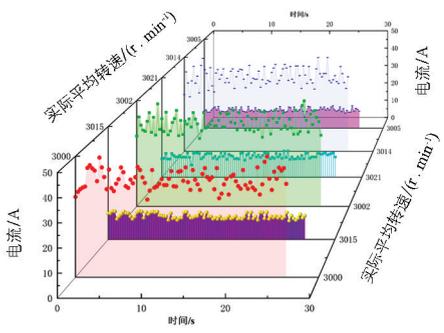
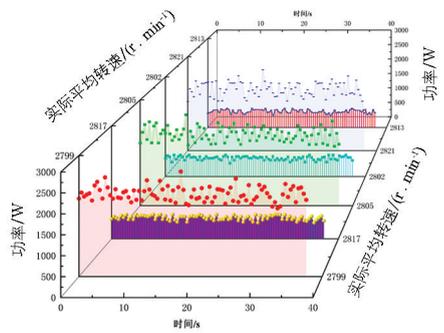
(a) 1 200 r/min



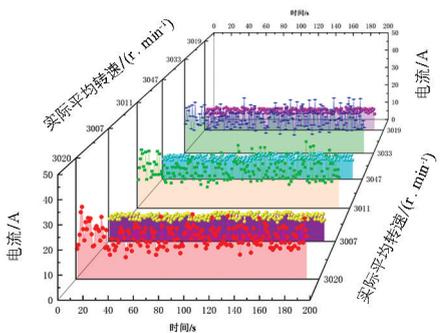
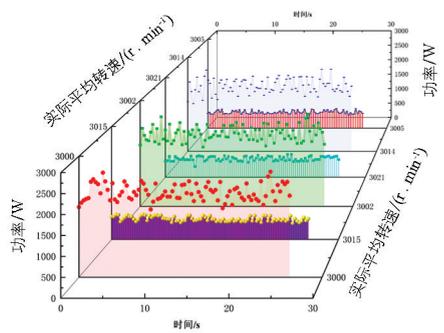
(b) 2 700 r/min



(c) 2 800 r/min



(d) 3 000 r/min



(e) 3 000 r/min(30 m)

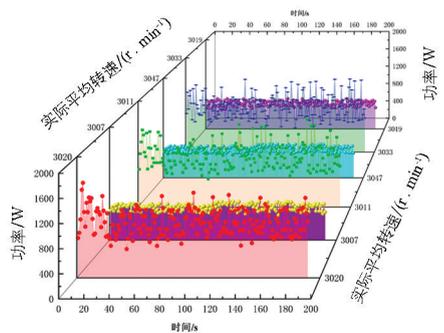


图 11 单一电源与复合电源电池部分参数变化

表 3 单一电源和复合电源电池放电电量变化对比

转速/(r·min ⁻¹)	单一电源电池平均放电量/Ah	复合电源电池平均累计放电量/Ah
1 200	0.312	0.335
2 700	0.322	0.344
2 800	0.319	0.34
3 000(A 号地)	0.317	0.342
3 000(B 号地)	1.327	1.576

与单一锂电池电源给电机供电相比,复合电源系统中超级电容的所有能量都来自于电池,复合电源系统工作过程中增加了双向 DC/DC 变换器转换这个能耗过程.因此,复合电源虽然降低了电池的放电倍率,却增加了电池的累计放电量,与表 3 试验数据得到的结论保持一致.

表 4 单一电源和复合电源电池温升变化

转速/(r·min ⁻¹)	单一电源电池平均温升/°C	复合电源电池平均温升/°C
1 200	0.32	0.19
2 700	1.63	0.15
2 800	1.81	0.14
3 000(A 号地)	2.37	0.11
3 000(B 号地)	4.18	0.73

结合图 11 和表 2 分析得到,在 A 号地 4 种不同电机转速作业下,相较于单一电池供电,复合电源系统中磷酸铁锂电池组放电电流平均最大波动范围分别缩减 14.37,13.07,14.3,15.23A, B 号地缩减 13.77A; A 号地平均峰值功率分别下降了 43.6%,75.2%,77.4%,76.4%, B 号地下降了 60.3%.磷酸铁锂电池放电电流大幅度降低,超出阈值部分的大电流由超级电容提供,使磷酸铁锂电池组免受突变大电流的冲击.由表 4 计算得到, A 号地复合电源系统电池组平均温升相较于单一电源电池组分别下降 0.13 °C, 1.48 °C, 1.67 °C, 2.26 °C, B 号地下降 3.45 °C; 结合图 11 和表 3 分析得到,复合电源系统工作过程中,电池的电流和输出功率变化变得相对平缓,但电池所需要累计放电量变大.

根据美国休斯研究中心 John 等人^[17-19]的大量实验表明,对于因充放电造成的电池容量衰退,在环境温度一定的前提下,其衰退速率与电池放电电流瞬时值大小 I_{rate} 和电池累计放电量 Q_{through} 密切相关.在复合电源系统中电池电流减小有助于减小电池容量衰退速率,但是电池所需要累计放电量变大会促使电池容量衰退,因此我们需要分析这两种因素综合影响下的电池容量衰退变化.锂电池因充放电导致衰退的经验公式如下^[17-19]:

$$Q_{\text{LOSS},\%} = (a \cdot T^2 + b \cdot T + c) \exp[(d \cdot T + e) \cdot I_{\text{rate}}] \times Q_{\text{through}} \quad (11)$$

其中, $a=8.61\text{E-}6$, 单位为 $1/(\text{Ah} \cdot \text{K}^2)$; $b=-5.13\text{E-}3$, 单位为 $1/(\text{Ah} \cdot \text{K})$; $c=7.63\text{E-}1$, 单位为 $1/\text{Ah}$; $d=-6.7\text{E-}3$, 单位为 $1/(\text{K} \cdot \text{C})$; $e=2.35$, 单位为 $1/\text{C}$; I_{rate} 是电流的放电倍率, 单位为 C; T 是绝对温度, 单位为 K; Q_{through} 表示锂电池累计放电量, 单位为 Ah. 通过公式(11)分别计算得到单一电源和复合电源的电池衰退率如表 5 所示.

在 A 号地块 4 种不同电机转速下,相较于单一电池电源,复合电源中锂电池组平均容量衰退速率分别下降 2.1%,9.1%,9.7%,9.2%, B 号地块电机转速 3 000 r/min 下降 4.4%; 结合图 11、表 3 和表 5 分析得到,相较于单一电源,复合电源中电池放电电流减小,电池所需要放电累计电量会变大,但最终电池容量衰退速率减小,说明电池放电倍率要比电池放出的累计电量对电池容量衰退速率的影响更大.

表5 单一电源和复合电源电池衰退率变化

转速/(r·min ⁻¹)	单一电源电池平均衰退速率/%	复合电源电池平均衰退速率/%
1 200	0.049 71	0.048 68
2 700	0.053 62	0.048 73
2 800	0.053 81	0.048 59
3 000	0.053 89	0.048 91
3 000(B号地)	0.051 23	0.048 97

5 结论

针对单一锂电池电动微耕机在田间作业大倍率放电导致锂电池组使用安全性变差和循环寿命变短的问题,本文采用锂电池组和超级电容器组成复合电源系统作为电动微耕机的动力来源,采用合理的能量管理控制策略来减小核心部件锂电池的衰退速率。

1) 基于超级电容辅能的复合电源电动微耕机能够稳定工作,工作模式切换迅速,能够满足丘陵山地耕作需求。

2) 所制定的控制策略能够对超级电容和锂电池组的能量进行合理分配,超级电容的高比功率能够更加充分地发挥其优势,降低锂电池输出电流与输出功率波动范围,使电池的输出电流更加平滑,减少了短时大电流对锂电池的冲击,有效改善锂电池的放电状态,降低了电池放电倍率,使得电池容量衰退率减小,达到了预期的控制目标。

参考文献:

- [1] 王磊,陈建,胡陈君,等. 电动微耕机的研究现状及分析 [J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 229-236.
- [2] 金政宏,陈建,王炎林,等. 电动微耕机振动特性分析与减振研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(10): 92-99.
- [3] 陈建,陈川,陈洪. 西南地区微耕机面临的三大新挑战及对策探讨 [J]. 农机化研究, 2014, 36(10): 245-248.
- [4] 郑延莉. 电动微耕机电池组温度场研究与风冷散热仿真分析 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [5] 王卓. 电动微耕机电池组散热系统设计与研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [6] MARONGIU A, SAUER D U. On-Board Aging Estimation Using Half-Cell Voltage Curves for LiFePO₄ Cathode-Based Lithium-Ion Batteries for EV Applications [J]. International Journal of Automotive Technology, 2016, 17(3): 465-472.
- [7] 李哲. 纯电动汽车磷酸铁锂电池性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [8] 周放. 车载复合电源系统参数优化及能量管理策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [9] 刘秀田. 电动汽车复合电源储能系统设计及实验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [10] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 238.
- [11] 管春松,胡松,陈永生,等. 温室用小型电动拖拉机研究 [J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 67-69, 76.
- [12] 郭晨星. 电动微耕机的分析与设计研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [13] 杜昌盛. 棚室电动微耕机设计 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- [14] 郝国亮. 超级电容荷电状态计算方法的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [15] 张聪. 纯电动汽车用复合电源匹配与控制理论研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [16] 曾百功,叶进,杨仕,等. 微耕机土壤耕作部件田间测试平台的研制 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 456-459.
- [17] JOHN W, JUSTIN P, PING L, et al. Degradation of Lithium Ion Batteries Employing Graphite Negatives and Nickel-Cobalt-Manganese Oxide+Spinel Manganese Oxide Positives; Part1, Aging Mechanisms and Life Estimation [J]. Journal of Power Sources, 2014, 269: 937-948.
- [18] JOHN W, PING L, JOCELYN H, et al. Cycle-Life Model for Graphite-LiFePO₄ Cells [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [19] JUSTIN P, JOHN W, JASON G, et al. Degradation of Lithium Ion Batteries Employing Graphite Negatives and Nickel-Cobalt-Manganese Oxide+Spinel Manganese Oxide Positives; Part 2, Chemical-Mechanical Degradation Model [J]. Journal of Power Sources, 2014, 272: 1154-1161.