doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.008

串联式混合动力拖拉机全生命周期成本研究

王　建[1]　贺东升[1]　朱亚辉[2]　尹必峰[1]　黄幼林[3]
(1.江苏大学汽车与交通工程学院,镇江 212013;2.江苏沃得农业机械股份有限公司,镇江 213000;
3.广西玉柴机器股份有限公司,玉林 537000)

摘要:为研究大功率混合动力拖拉机电池容量配置对系统效率、全生命周期成本(Life cycle cost, LCC)影响规律,以 190 kW 串联式混合动力拖拉机为研究对象,构建包含设备购置、电池更换、燃油油耗等在内的 LCC 评价体系。提出一种基于枚举法与动态规划(Dynamic programming, DP)结合的两层级电池容量配置优化方法,外层研究能源、电池价格时变权重下电池容量对 LCC 的影响规律并通过枚举法全局搜索进行寻优,内层通过 DP 算法对混合动力拖拉机能量管理策略进行最优控制。基于 Matlab/Simulink 搭建拖拉机整机仿真平台,在拖拉机全生命周期内量化分析电池容量与能量管理策略对系统效率的耦合影响机制。仿真结果表明:在 2.2~110 A·h 的电池容量区间内,随电池容量的增加,有利于整机油耗降低和电池寿命延长;电池容量为 24.2 A·h 时为整机油耗拐点,增大电池容量对整机油耗的改善极小;当电池容量达到 52.8 A·h,电池按循环寿命无需更换,但电池容量与 LCC 呈现非线性关系,22 A·h 配置可使全生命周期成本最小化至390.93 万元。本文建立的"技术参数-全生命周期成本"优化框架,可为农机装备混合动力系统设计提供理论范式和参考。

关键词:混合动力拖拉机;全生命周期成本;电池容量配置;动态规划;能量管理策略
中图分类号:S219.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)12-0099-11　　**OSID**:

Life Cycle Costs of Series Hybrid Tractors

WANG Jian[1]　HE Dongsheng[1]　ZHU Yahui[2]　YIN Bifeng[1]　HUANG Youlin[3]
(1. *School of Automotive and Traffic Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*
2. *Jiangsu Wode Agricultural Machinery Co.*, *Ltd.*, *Zhenjiang* 212300, *China*
3. *Guangxi Yuchai Machinery Co.*, *Ltd.*, *Yulin* 537000, *China*)

Abstract: Aiming to investigate the impact of battery capacity configuration on system efficiency and life cycle cost (LCC) for high-horsepower hybrid tractors, thereby addressing the research gap in battery capacity optimization design for hybrid tractors, taking a 190 kW series hybrid tractor as the research object, an LCC evaluation system encompassing equipment procurement, battery replacement, and fuel consumption was established. A two-level battery capacity optimization method combining enumeration and dynamic programming (DP) was proposed: the outer layer investigated the influence of battery capacity on LCC under time-varying weights of energy and battery prices through global search via enumeration method, while the inner layer employed DP algorithm for optimal control of energy management strategies in hybrid tractors. A tractor simulation platform was developed by using Matlab/Simulink to quantitatively analyze the coupling mechanism between battery capacity and energy management strategies on system efficiency throughout the tractor's lifecycle. Simulation results indicated that within the 2.2~110 A·h battery capacity range, increasing battery capacity benefited fuel consumption reduction and battery lifespan extension; the 24.2 A·h configuration represented the fuel consumption inflection point, beyond which capacity increase yielded minimal efficiency improvement; when battery capacity reached 52.8 A·h, no replacement was required based on cycle life, but the nonlinear battery capacity-LCC relationship showed 22 A·h configuration minimized LCC to 3.909 3 million yuan. The proposed "technical parameters - life cycle cost" optimization framework established theoretical paradigms and provided valuable references for hybrid system design in agricultural machinery.

Key words: hybrid tractors; life cycle cost; battery capacity configuration; dynamic programming; energy management strategy

收稿日期:2025-05-28　修回日期:2025-05-29
基金项目:广西科技重大专项基金项目(2024AA03005)
作者简介:王建(1978—),男,教授,博士,主要从事节能与新能源动力系统研究,E-mail: wangjian@ujs.edu.cn

0 引言

现代农业生产对绿色农机装备的需求愈发迫切。随着我国农田集中化和规模化发展,适用于大田作业的中大功率拖拉机的需求急速增加,传统农业机械的电动化转型成为提升农业生产效率和减少环境污染的关键途径。近年来,电动化技术在大功率拖拉机领域得到广泛应用[1]。在多种电动化技术途径中,混合动力拖拉机能够有效避免纯电动技术在续航上的不足,同时减少油耗与排放,已成为研究热点。

目前,研究人员针对混合动力拖拉机研究已取得诸多进展,主要集中在构型设计与能量管理策略(Energy management strategy, EMS)方面。张凯等[2]提出大功率混合动力拖拉机 ECVT 构型设计的杠杆拓扑法并形成构型方案。朱镇等[3]提出融合工况预测的自适应等效燃油消耗最小策略,降低油耗的同时具有更好的电量维持性能。汪珍珍等[4]基于动态规划算法对增程式电动拖拉机进行旋耕作业仿真和台架试验,验证了其合理性。

电池容量与 EMS 密切相关,电池容量的合理配置对混合动力系统的燃油经济性、使用寿命和运营成本具有重要影响[5]。SONG 等[6]提出一种基于 Pontryagin 极小值原理的优化方法,同时优化了三源系统中电池和超级电容器的容量以及 EMS,显著降低插电式混合动力电动公交车的运营成本。ANKAR 等[7]通过 NSGA-Ⅲ和模糊逻辑控制优化混合储能系统容量,显著提高电池寿命并降低系统生命周期成本。LIU 等[8]提出一种结合 CMOPSO 算法和 DP 的优化方法,用于燃料电池混合动力车辆的动力系统配置,提高了系统性能。NIU 等[9]提出一种结合 NCR 和 LTO 电池的半主动混合电池系统优化方法,通过分层式优化和基于 DDPG 的能量管理策略,实现在多种驾驶周期下的实时控制与成本最小化。BELIGOJ 等[10]针对并联式混合动力拖拉机提出一种基于全生命周期成本的评估方法,针对发动机尺寸进行优化,但未分析不同电池容量对全生命周期成本的影响。目前动力电池技术成本仍居高不下,而拖拉机复杂作业环境与剧烈负载波动,要求在设计优化过程中需权衡电池容量优化带来的燃油经济性提升与购置维护成本的增加。现有的研究很少从拖拉机全生命周期成本的角度分析电池容量优化的经济效益。

本文以全生命周期成本最低为目标,以 190 kW 串联式混合动力拖拉机为研究对象,建立其 LCC 计算模型,提出一种电池容量设计与能量管理控制相结合的两层结构电池容量优化方法。该结构外层采用枚举算法寻找使 LCC 最低的电池容量配置,内层通过动态规划算法优化发动机与电池之间的功率分配,旨在最大限度地减少燃油消耗并延长电池的使用寿命。

1 串联式混动拖拉机模型建立

1.1 串联式混动拖拉机构型与参数

研究对象为江苏沃得 DK2604 型串联式混合动力拖拉机,其构型如图 1 所示,其中 VCU、ECU、BMS、GCU、MCU、TCU 和 PTO 分别表示整车控制器、发动机控制器、电池管理系统、发电机控制器、驱动电机控制器、变速箱控制器和动力输出轴。六缸柴油机与发电机机械连接组成增程器,作为整机主要能量来源,柴油机输出端与动力输出轴通过中间轴直接机械连接。电池作为辅助能量源,能够动态调节增程器的功率输出。发电机与驱动电机电气连接,驱动电机通过变速箱传递动力至后桥。为满足拖拉机在多种作业工况下的动力需求,传动系采用两挡变速箱,两挡速比分别对应田间作业与道路运输工况,满足整机在重载(低速、高扭矩)与轻载(高速、低扭矩)不同工况需求。拖拉机主要参数如表 1 所示。

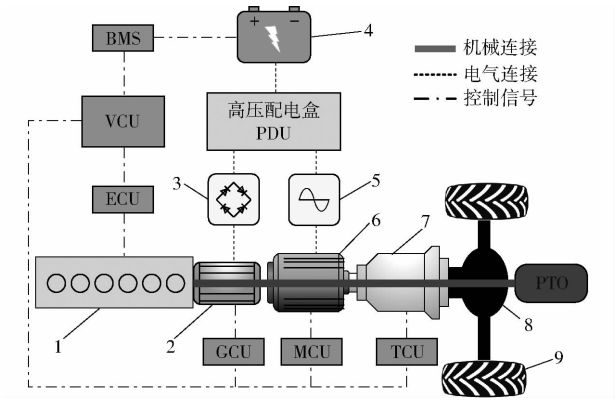

图 1 串联式混合动力拖拉机构型

Fig. 1 Configuration of series hybrid tractor

1. 发动机 2. 飞轮发电机 3. 整流器 AC/DC 4. 电池 5. 逆变器 DC/AC 6. 驱动电机 7. 两挡变速箱 8. 后桥 9. 车轮

1.2 增程器模型

增程器由发动机与发电机组成,通过试验数据建模的方法建立发动机准静态模型,通过数据插值拟合构建发动机有效燃油消耗率与发动机转速和转矩的关系,公式为

$$T_e = \alpha T_{e_max}(n_e) \tag{1}$$

$$b_e = f(T_e, n_e) \tag{2}$$

式中 T_e——发动机输出转矩,N·m

α——加速踏板开度,%

表 1　拖拉机主要部件参数

Tab. 1　Parameters of key components for tractor

名称	参数	数值
柴油机	最大转矩/(N·m)	1 250
	最大功率/kW	220
	最高转速/(r·min^{-1})	2 200
发电机	最大转矩/(N·m)	1 500
	额定功率/kW	211
	最高转速/(r·min^{-1})	2 200
驱动电机	最大转矩/(N·m)	2 370
	额定功率/kW	200
	最高转速/(r·min^{-1})	3 600
电池	额定电压/V	600
传动系统	变速器 1 挡(作业)速比	2.263
	变速器 2 挡(运输)速比	0.792
	后驱动桥速比	35.68
拖拉机	质量/kg	13 000
	迎风面积/m^2	8.915 5
	轮胎滚动半径/m	0.89
犁具	犁铧数/个	5
	犁体工作幅宽/cm	50
	耕深/cm	25 ~ 35

T_{e_max}——发动机当前转速最大转矩,N·m

b_e——有效燃油消耗率,g/(kW·h)

n_e——发动机转速,r/min

在串联式混合动力构型中,发动机与轮胎转速和转矩解耦,为提高系统效率,发动机运行在最佳燃油经济性曲线上。发动机的有效燃油消耗率(Brake specific fuel consumption, BSFC)曲线及最佳燃油经济性曲线如图 2 所示,其中有效燃油消耗率曲线上的数值表示发动机在该工况下,输出每小时单位有效功率(1 kW·h)所消耗的燃料质量(g),是衡量发动机燃油经济性的核心指标。

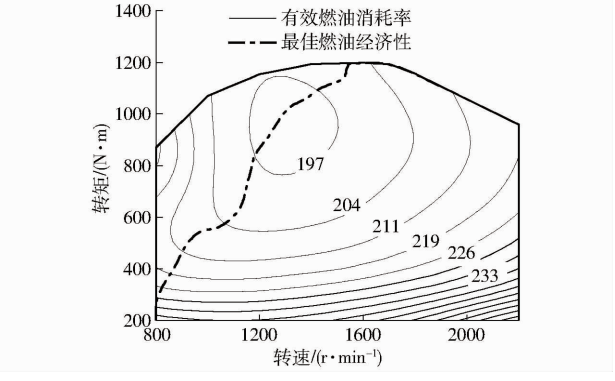

图 2　发动机有效燃油消耗率及最佳燃油经济性曲线

Fig. 2　BSFC and optimal operating line of engine

发电机与发动机机械相连,将发动机的机械能转化为整机所需电能,发电机输出功率计算公式为

$$\frac{P_g}{\eta_g}=\frac{T_g n_g}{9\,550} \tag{3}$$

式中　P_g——发电机输出功率,kW

T_g——发电机输入转矩,N·m

n_g——发电机输入转速,r/min

η_g——发电机效率

发电机效率如图 3 所示,其中曲线上的数值表示发电机在该工况下将输入机械能转换成输出电能的效率(%)。

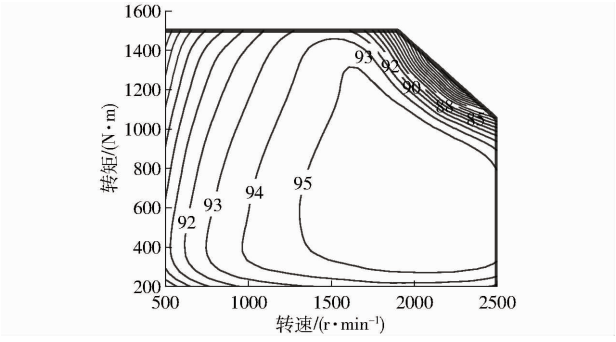

图 3　发电机效率图

Fig. 3　Efficiency of generator

1.3　驱动电机模型

驱动电机特性数据由台架试验测得,由转矩需求计算电功率公式为

$$P_{elec}=\frac{P_{mech}}{\eta_{em}(T_{em},n_{em})}=\frac{T_{em}n_{em}}{9\,550\eta_{em}(T_{em},n_{em})} \tag{4}$$

式中　P_{elec}——驱动电机电功率,kW

P_{mech}——驱动电机机械输出功率,kW

T_{em}——驱动电机输出转矩,N·m

n_{em}——驱动电机输出转速,r/min

η_{em}——驱动电机效率

驱动电机效率如图 4 所示,其中曲线上的数值表示驱动电机在该工况下将输入电能转换成输出机械能的效率(%)。

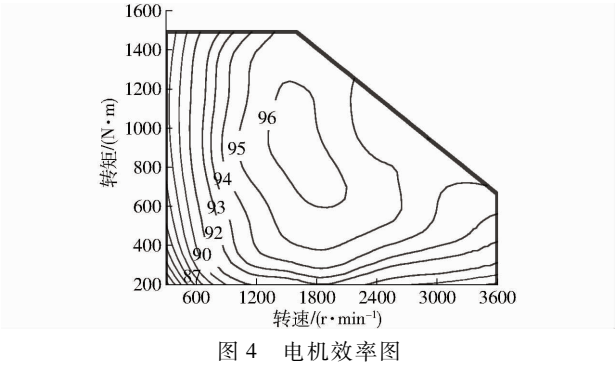

图 4　电机效率图

Fig. 4　Efficiency of electrical motor

1.4　电池模型

1.4.1　电池等效电路模型

电池采用等效电阻模型,为简化计算,本文将单个电芯等效为理想电压源 U_{oc} 和内阻 R_0 串联的电路,等效电路图如图 5 所示。图 6 为电池电芯的开路电压和内阻随荷电状态(State of charge, SOC)变

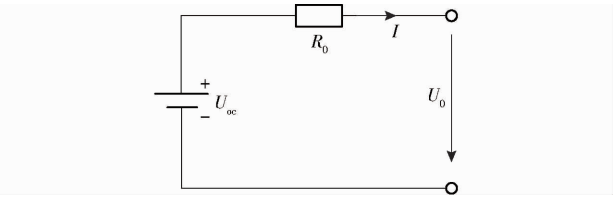

图 5 电池等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit of simplified battery model

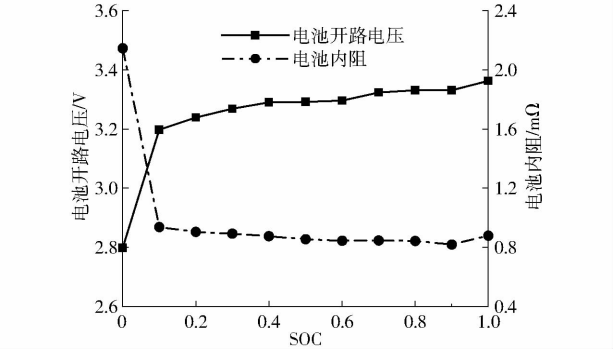

图 6 电池开路电压、内阻与 SOC 关系曲线

Fig. 6 Relationship between battery open circuit voltage, internal resistance, and SOC

化的关系。

电池 SOC 动态方程为

$$\dot{S}_{oc} = -\frac{\eta_{batt}^{sign(I)}}{Q_{batt}}\left[\frac{U_{oc}}{2R_0} - \sqrt{\left(\frac{U_{oc}}{2R_0}\right)^2 - \frac{P_{batt}}{R_0}}\right] \tag{5}$$

式中 P_{batt}——电池功率,W

Q_{batt}——电池额定容量,A·h

$\eta_{batt}^{sign(I)}$——电池充放电效率,$sign(I>0)=1$ 电池放电,$sign(I<0)=-1$ 电池充电,I 表示电池充放电流

1.4.2 电池容量衰减模型

拖拉机全生命周期工作场景中,电池的寿命损耗主要分为静置状态下的日历损耗与充放电循环引发的循环损耗[11]。研究基于 10 a 日历寿命阈值假设,构建半经验电池容量衰减模型以预测因循环损耗产生的电池更换需求,该模型将电池容量衰减量描述为电池容量吞吐量、放电倍率和温度的幂律方程[12-15],公式为

$$Q_{loss} = M(c)\exp\left(-\frac{E_a(c)}{RT_{batt}}\right)A_h^z \tag{6}$$

其中 $$E_a(c) = 31\,700 - 370.3c$$

$$c = |I|/Q_{batt}$$

式中 Q_{loss}——电池老化衰减的容量,A·h

$M(c)$——指数前因子,与放电倍率有关

$E_a(c)$——电池活化能,J/mol

c——放电倍率

R——理想气体常数,取 8.314 J/(mol·K)

T_{batt}——电池温度,取 298 K

z——幂律因子,取 0.55

A_h——电池容量吞吐量,A·h

其中指数前因子 M 在放电倍率 c 取0.5、2、6 和 10 时测得分别为 31 630、21 681、12 934 和 15 512,其余放电倍率下数值通过插值获取。

电池生命周期内的理论总吞吐量计算公式为

$$A_{tol}(c,T_{batt}) = 2N_p\left[\Delta Q \Big/ \left(M(c)\exp\left(-\frac{E_a(c)}{RT_{batt}}\right)\right)\right]^{\frac{1}{z}} \tag{7}$$

式中 A_{tol}——电池总容量吞吐量,A·h

ΔQ——电池容量最大损耗百分比,取 20%

N_p——电池组并联数

当驱动过程从 t_0 开始,到 t_f 结束时,使用过程的电池容量吞吐量 A_{use} 计算式为

$$A_{use} = \frac{\int_{t_0}^{t_f}|I(t)|\,dt}{3\,600} \tag{8}$$

当 $A_{use} = A_{tol}$ 时即视为电池寿命耗尽,需进行更换。

1.5 拖拉机纵向动力学模型

拖拉机纵向动力学模型[16]为

$$F_q = F_r = F_f + F_w + F_i + F_j + F_d \tag{9}$$

$$F_f = mgf\cos\beta \tag{10}$$

$$F_w = \frac{C_d A v^2}{21.15} \tag{11}$$

$$F_i = mg\sin\beta \tag{12}$$

$$F_j = \delta_m m\frac{dv}{dt} \tag{13}$$

$$F_d = k_n B_n = 0.1k_0 Z b_n h \tag{14}$$

式中 F_q——拖拉机的驱动力,N

F_r——拖拉机的阻力之和,N

F_f——滚动阻力,N

F_w——迎风阻力,N

F_i——爬坡阻力,N

F_j——加速阻力,N

F_d——犁耕作业时的机具阻力,N

m——整机总质量,kg

g——重力加速度,m/s²

f——滚动阻力系数

β——坡道倾斜角,(°)

C_d——空气阻力系数

A——迎风面积,m²

v——车速,km/h

δ_m——旋转质量系数

k_n——机具单位幅宽的阻力,N/m

B_n——机具工作幅宽,m

k_0——土壤比阻，kPa
Z——犁铧数
b_n——犁体工作宽幅，cm
h——耕深，cm

2　基于全生命周期成本的两层级电池容量优化

为了综合评估不同电池容量对混合动力拖拉机经济性的影响，基于 Matlab 设计以全生命周期成本最低为优化目标的两层级电池容量参数配置优化程序，优化逻辑如图 7 所示。外层为电池容量寻优，在预设的电池容量可行域内遍历取值点，通过 Simulink 拖拉机整机模型进行多工况耦合仿真，同步构建包含能源价格时变特性的全生命周期成本模型。内层能量管理优化以拖拉机动力系统能量分配为核心，采用动态规划算法对增程器与电池组成的双源系统能量管理策略进行优化，确保在当前电池容量下取得理论最低的能源消耗成本与电池更换成本，进而公平地比较不同电池容量下的全生命周期成本[17]。

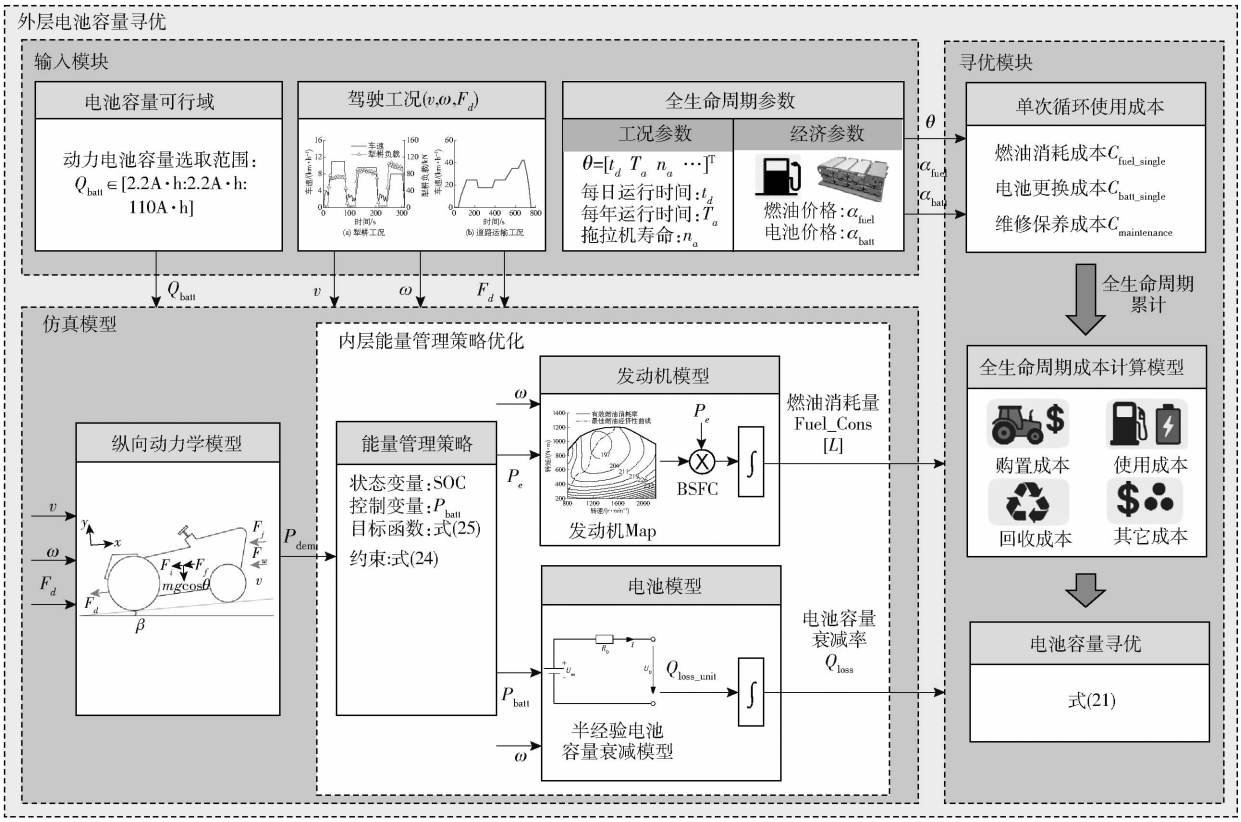

图 7　拖拉机两层级优化逻辑

Fig. 7　Two-level optimization logic of tractor

2.1　全生命周期成本计算模型

拖拉机全生命周期成本是其在服役年限内产生的成本合计值。混合动力拖拉机的全生命周期成本的计算公式为

$$C_{life_cycle} = C_{initial} + C_{operate} - C_{recycle} \tag{15}$$

式中　C_{life_cycle}——全生命周期总成本，元
$C_{initial}$——初始购置成本，元
$C_{operate}$——生命周期运营成本，元
$C_{recycle}$——报废回收成本，元

2.1.1　整机初始购置成本

本文以电池容量作为核心变量，其余部件的初始购置成本均设为固定值。整机初始购置成本计算公式为

$$C_{initial} = C_{others} + C_{batt} = C_{others} + C_{batt_unit} N_s N_p Q_{batt} U_{oc_unit}/1\,000 \tag{16}$$

式中　C_{batt}——电池初始购置成本，元
C_{others}——其余部件初始购置成本，元
C_{batt_unit}——单位电芯价格，元/(kW·h)
N_s——电池组串联数
U_{oc_unit}——电芯标称电压，V

其中电池为可变参数，其他组件成本项固定[18]。

2.1.2　拖拉机运营成本

拖拉机运营成本主要包括燃油成本、电池更换成本以及保养(更换机油、滤清器等)成本。全生命周期内的燃料成本计算公式为

$$C_{fuel} = TNF_{annual}\alpha_{fuel} \tag{17}$$

式中　C_{fuel}——生命周期内总燃料成本，元
T——拖拉机寿命，a

N——一年内循环次数

F_{annual}——拖拉机运行一年燃油消耗量,L

α_{fuel}——燃油单价,元/L

全生命周期内的电池更换成本计算公式为

$$C_{batt_deg} = E_{batt} N_{EOL} \alpha_{batt} \tag{18}$$

式中 C_{batt_deg}——电池更换成本,元

E_{batt}——电池能量,kW·h

N_{EOL}——全生命周期内更换电池次数

α_{batt}——电池单价,元/(kW·h)

全生命周期内,混合动力拖拉机总运营成本计算公式为

$$C_{operate} = C_{fuel} + C_{batt_deg} + C_{maintenance} \tag{19}$$

式中 $C_{maintenance}$——整机保养费用,元

2.1.3 报废回收成本

因拖拉机部件报废回收利用率低且难以统计,而电池容量衰减至 80% 后仍可回收给二线储能机构,因此本研究仅考虑电池的回收成本,公式为

$$C_{recycle} = \beta_{batt} E_{batt} (N_{EOL} + 1) \tag{20}$$

式中 β_{batt}——电池单位回收价格,元/(kW·h)

2.2 外层以 LCC 为目标函数的电池容量优化

优化变量参数选取范围相对较小,因此外层选取枚举法作为寻优算法。本文以电池组并联数为优化参数以改变电池容量。则电池容量优化公式为

$$\begin{cases} C^*_{life_cycle} = \min\{C_{life_cycle}(N_p)\} \\ \text{s.t. } N_p \in S_{batt,p} \end{cases} \tag{21}$$

式中 $C^*_{life_cycle}$——最优全生命周期成本

$S_{batt,p}$——电池并联数可行集

2.3 内层基于 DP 算法的能量管理策略

拖拉机工作过程中负载变化频繁,增程器和电池之间不同的功率分配会影响整机的油耗和电池老化,进而影响全生命周期成本。由增程器与电池构成的混合动力系统功率分配可以看作以时间为阶段的多阶段决策问题,而动态规划算法能将多阶段决策问题转化为一系列单阶段决策子问题,利用各阶段之间的关系从后向前逆向求解,因此适用于混合动力系统的能量管理策略[19]。

将拖拉机运行时间 t 以 1 s 为间隔划分为多个阶段,则控制模块在每一阶段接收到总负载电功率需求 P_{dem},其由增程器功率和电池功率响应,公式为

$$P_{dem} = P_g + P_{batt} \tag{22}$$

由式(22)可看出通过控制电池输出功率即可调节增程器的输出功率,因此以电池输出功率 P_{batt} 作为系统决策变量。在 k 时刻改变 P_{batt} 后,系统状态变量 SOC 按式(5)进行状态转移。系统在决策后由当前阶段状态转移到下一阶段状态,其过程中产生相应的燃油消耗,同时电池也会有相应的损耗。系统状态变量与控制变量公式为

$$\begin{cases} x(k) = S_{oc}(k) \\ u(k) = P_{batt}(k) \end{cases} \tag{23}$$

式中 x——状态变量 u——控制变量

混合动力系统在动态工况下的运行约束由发动机最大功率、电机峰值扭矩及电池组 SOC 区间共同构成,约束条件为

$$\begin{cases} S_{min} \leqslant S_{oc} \leqslant S_{max} \\ P_{e_min} \leqslant P_e \leqslant P_{e_max} \\ P_{batt_min} \leqslant P_{batt} \leqslant P_{batt_max} \end{cases} \tag{24}$$

式中 P_e——发动机输出功率

混合动力拖拉机燃油消耗最小与电池容量衰减最小组成多目标函数,通过组合瞬时油耗成本与瞬时电池容量衰减成本,将其转化为瞬时运营成本最小的单一目标函数。根据油耗计算公式,结合电池容量衰减率计算公式,目标函数为

$$\begin{cases} L(k) = \int_{t_0}^{t_f} [c_{fuel}(x(k),u(k)) + c_{batt}(x(k),u(k))]\,dt \\ c_{fuel}(x(k),u(k)) = \dfrac{P_{ice}(k) b_e(k) \alpha_{fuel}}{3\,600 \rho_{fuel} \times 1\,000} \\ c_{batt}(x(k),u(k)) = \dfrac{|I| \Delta t E_{batt} \alpha_{batt}}{3\,600 A_{tol}} \end{cases} \tag{25}$$

式中 L——瞬时使用成本,元/s

c_{fuel}——瞬时燃油消耗成本,元/s

c_{batt}——瞬时电池容量衰减成本,元/s

ρ_{fuel}——燃油密度,g/L

P_{ice}——发动机输出功率,kW

DP 算法核心思想是先逆向寻优再正向求解,即在离散的状态空间中,将瞬时消耗成本从后向前叠加,使每一阶段到最终阶段的叠加成本最小,即得到最低的消耗成本及决策变量序列,该过程表示为

$$\begin{cases} J(x(0),u) = T_N(x(N)) + \sum_{k=1}^{N-1} L(k) \\ u^* = \text{argmin}\{J\} \end{cases} \tag{26}$$

式中 J——系统成本函数

T_N——终值成本函数

u^*——最优控制序列

通过逆向求解获取子问题的最优控制序列,将其正向排列即为最优控制序列,即电池功率最优控制序列 $\boldsymbol{P}^*_{batt} = (P^*_{batt}(1), P^*_{batt}(2), P^*_{batt}(3), \cdots, P^*_{batt}(N-1))$。

3　仿真结果与分析

3.1　仿真工况设置

(1)驾驶循环工况设置

本文构建拖拉机全生命周期工况以最常使用的犁耕作业工况及道路运输工况为主。由于大功率拖拉机缺乏标准测试工况,因此犁耕作业数据针对犁具入土加速、匀速作业、减速作业、减速掉头、减速停车等作业过程,以实车、实地采集的牵引阻力为基础,结合式(14)对所搭载 550 型犁具的犁耕阻力估算进行构建[20]。道路运输工况考虑到拖拉机远离城市,加减速频率低,故通过改造乘用车的新欧洲驾驶循环(New European driving cycle, NEDC)中郊区循环获得,最高车速设定为 40 km/h,循环工况如图 8 所示。依据拖拉机工作时间的研究数据[21-23],拖拉机全生命周期工况仿真条件如表 2 所示。

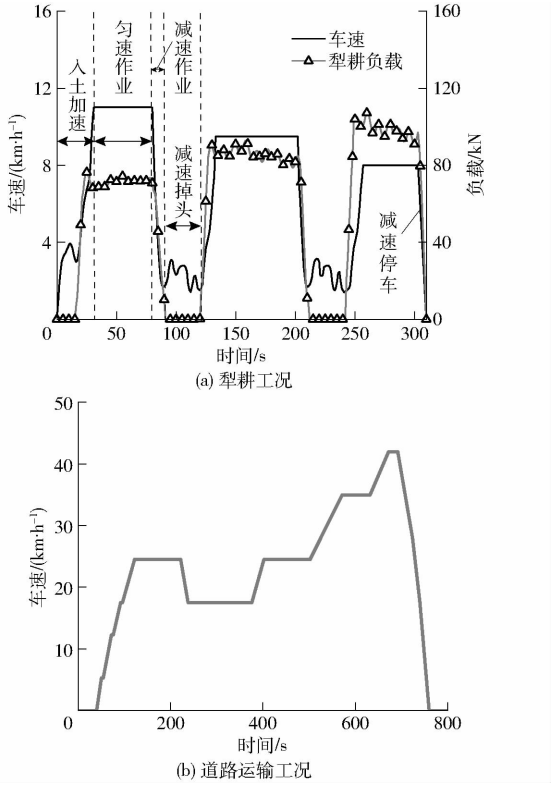

图 8　拖拉机犁耕作业速度、阻力变化与道路运输作业速度变化曲线

Fig. 8　Variation curves of tractor plowing speed, resistance, and road transport speed

表 2　仿真条件

Tab. 2　Simulation conditions

参数	数值
每日运行时间/h	15
每年运行时间/d	60
拖拉机寿命年限/a	15[24]
犁耕时间、运输时间、怠速时间比	55∶40∶5[25]
电池容量选取范围/(A·h)	2.2 ~ 110
电池废止容量损耗率/%	20[26]

(2)价格参数设置

柴油价格方面,由于近年来原油价格动荡、地缘政治影响及环保政策趋严等因素影响,成品油价格不确定性增加[27]。本文中,当前柴油价格按照 7.41 元/L 计算,其单价按照每年约 4.3% 增势上涨[28]。电池价格根据《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》[29]获得。价格参数如表 3 所示。

表 3　价格参数预测

Tab. 3　Price parameters forecasting

参数	当前值	2030 年预测值	2035 年预测值
柴油价格/(元·L⁻¹)	7.41	9.15	11.30
电池价格/(元·kW⁻¹·h⁻¹)	1 200	1 000	800

3.2　典型工况性能分析

3.2.1　犁耕作业工况

研究电池的容量覆盖范围从 2.2 A·h 至110 A·h,容量梯度为 2.2 A·h。为系统评估不同电池容量配置的性能差异,特选取具有代表性的小容量(2.2 A·h)、中等容量(22 A·h)和大容量(110 A·h)3 种配置方案进行具体量化分析,结果如图 9 所示。

根据图 9a 可知,在犁耕作业工况下,搭载 3 种不同电池容量的混合动力拖拉机均能实现参考车速的准确跟踪,验证了能量管理策略的车速跟随有效性。图 9b 显示,不同电池容量下的发动机工作点虽都分布在最佳燃油经济性曲线上,但小容量电池(2.2 A·h)在低效区(BSFC 大于 200 g/(kW·h))的工况占比达 75.6%,相比 110 A·h 配置仅为6.43%(图 9c),其发动机高效区运行占比提升 69.17 个百分点。该差异导致搭载小容量电池配置累计燃油消耗量相比大容量电池增加 5.38%,见图 9d。搭载大容量电池通过浅充放策略将累计容量衰减率降至 4.93×10^{-6},相比小容量电池(1.24×10^{-5})降低 60.1%(图 9e、9f),可见大容量电池配置在同样满足作业需求前提下,可通过优化能量分配降低放电深度(Depth of discharge, DOD),因此有效降低了电池循环损耗、延长电池寿命。

3.2.2　道路运输工况

根据图 10a 可知,在道路运输工况下,搭载 3 种容量电池的混合动力拖拉机同样能实现参考车速的准确跟踪。图 10b 显示大容量电池配置(110 A·h)可使发动机工作点更集中分布于高效经济区,相比犁耕工况,运输工况因负载率降低而显著提升纯电动驱动模式的适用性。具体而言,小容量电池配置(2.2 A·h)因功率输出受限,迫使发动机持续运行

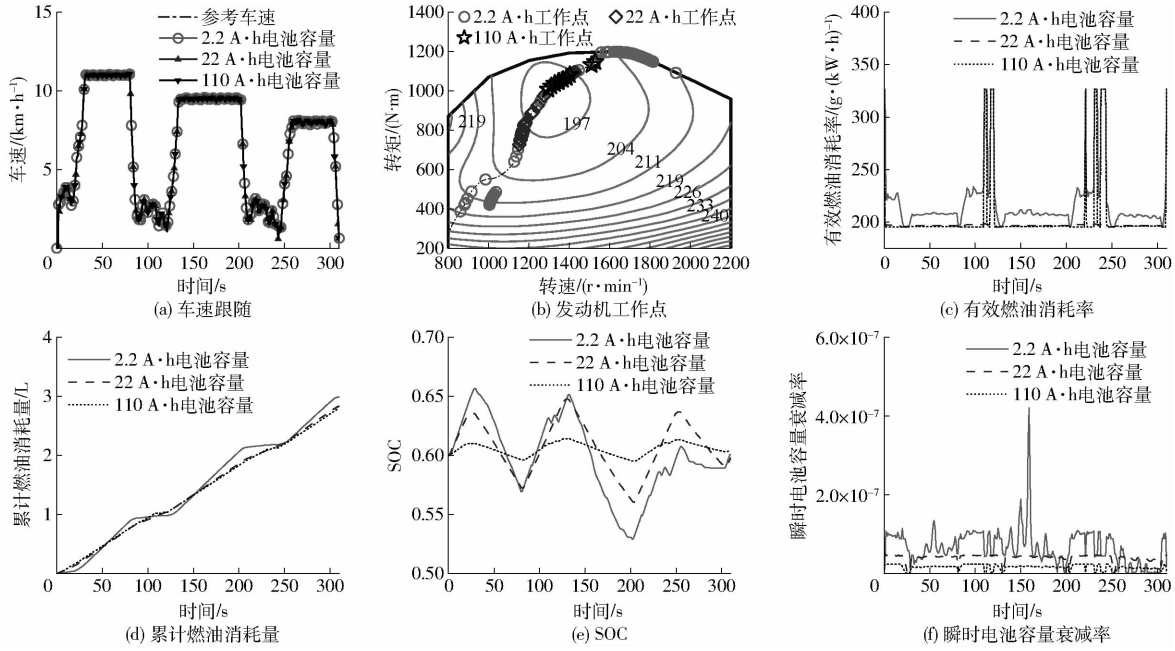

图 9 犁耕工况仿真结果对比图

Fig. 9 Comparison chart of plowing operation condition simulation results

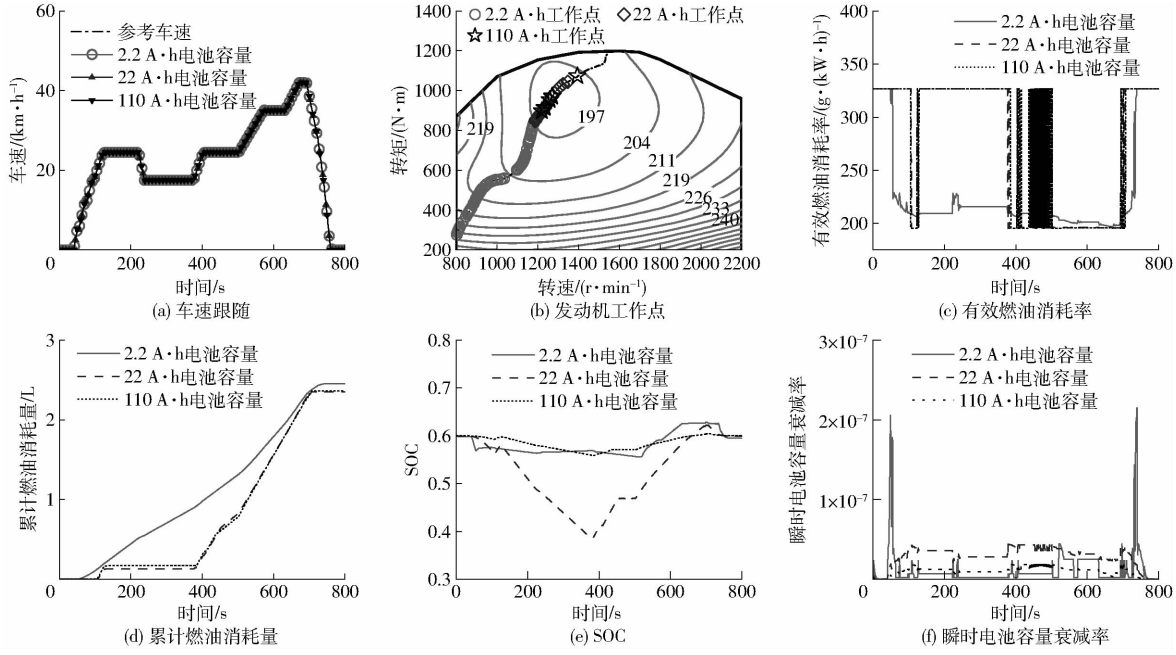

图 10 道路运输工况仿真结果对比图

Fig. 10 Comparison chart of road transport operating conditions simulation results

于高油耗的非经济区(图 10c),导致其累计燃油消耗量较 110 A·h 配置增加3.51%(2.451 L 相比 2.365 L)。这种差异在低速阶段(125 ~ 382 s)更为显著,如图 10d 所示,中等容量和大容量电池配置具有更优的燃油经济性。

进一步通过图 10e 的 SOC 曲线分析发现:小容量配置受限于放电倍率,无法充分参与能量分配;中等容量配置需承受更高的放电深度;而大容量配置放电深度小,降低了电池容量损耗。根据图 10f 的电池容量衰减率曲线可知,110 A·h 电池组一次循环后累计电池容量衰减率为8.14×10^{-6},优于 2.2 A·h 电池组的9.23×10^{-6},降低 11.8%,这表明大容量电池具有更强的容量衰减抗性。

3.3 电池容量对全生命周期成本影响

基于工况循环模型推演的长期运营结果如图 11 ~ 14 所示。

由图 11 可看出,大容量电池配置(110 A·h)凭借其优化的能量管理策略,年均燃油消耗量较小容量配置(2.2 A·h)降低 4.46%。这种差异随运行年限呈放大趋势,15 a 运营周期内累计节油量达 13 901 L,基于未来柴油价格假设,折合燃油成本节

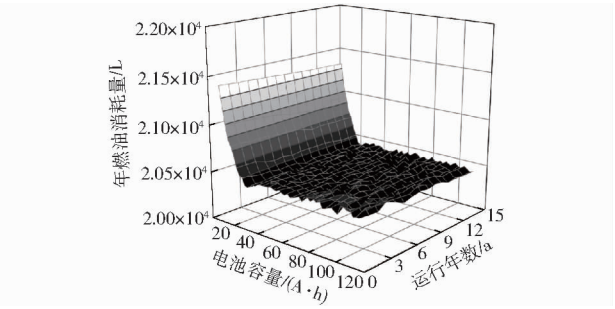

图 11　不同电池容量配置拖拉机年燃油消耗量随运行年数变化对比图

Fig. 11　Comparison of annual fuel consumption of tractors with different battery capacity configurations and number of years of operation

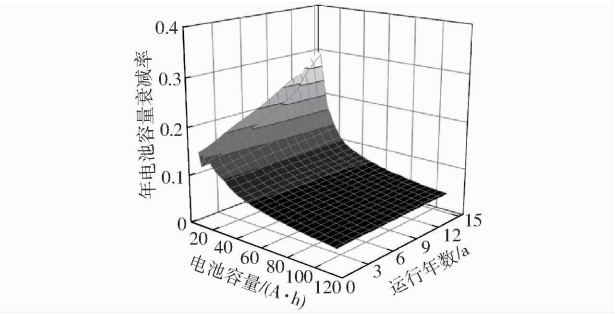

图 12　不同电池容量配置拖拉机年电池容量衰减率随运行年数变化对比图

Fig. 12　Comparison of annual battery capacity degradation rate of tractors with different battery capacity configurations and number of years of operation

省约 14 万元。

由图 12 电池容量衰减分析显示，小容量电池配置因深度循环导致容量保持率加速下降，其年衰减率(0.144 3)为大容量配置(0.038 9)的 3.71 倍。如图 13 所示，在 15 a 生命周期内，2.2 A·h 配置需进行3次更换；4.4 ~ 15.4 A·h 配置需更换2次；17.6 ~ 50.6 A·h 配置仅需更换1次；52.8 ~ 110 A·h 配置按循环寿命无需补充更换，但根据日历寿命阈值需在第 10 年更换 1 次。

随运行年数增加，燃油价格上涨与电池价格下降对式(25)能量管理策略产生偏向性影响，使得拖拉机工作时更倾向于使用电池而减少发动机参与。

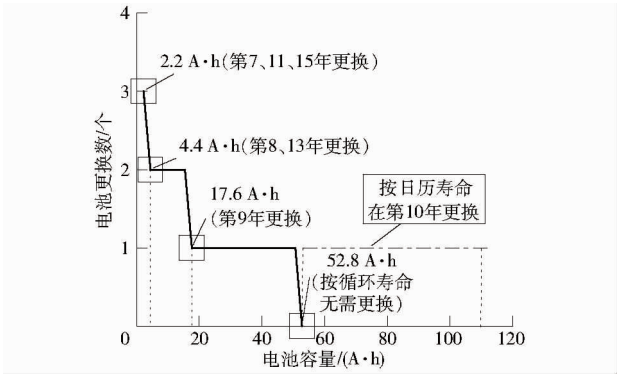

图 13　不同电池容量电池更换次数对比图

Fig. 13　Comparison of number of battery replacements with different battery capacity configurations

因此图 11 中年燃油消耗量随运行年数增加呈减少趋势；图 12 中年电池容量衰减率呈增长趋势；图 13 中电池更换频率增加，如 2.2 A·h 配置首次更换时间为7 a，第 2 次更换时间为 4 a。

不同容量电池配置混合动力拖拉机全生命周期成本及子成本构成如图 14 所示。

由图 14a 购置阶段可看出，电池初始成本随电池容量增加呈线性增加趋势，110 A·h 电池容量配置的初始成本较2.2 A·h 配置高7.76 万元(7.92 万元相比 0.16 万元)。图 14b 燃油成本与图 14a 电池更换成本组成运营阶段成本呈现差异化变化规律，燃油成本随电池容量增加呈现先降低后平稳特征，在 24.2 A·h 配置时达到最低值(308.80 万元)，较 2.2 A·h 配置(323.08 万元)降低 4.43%；而电池更换成本则因循环寿命衰减率差异呈现非线性增长，大容量组受益于浅充放策略，其更换频率降低，致使更换成本有一定程度减少。但相同更换频率下，电池更换成本仍与电池容量正相关。

分析图 14c 全生命周期总成本可看出，当电池能量超过 22 A·h 时，购置成本增量(720 元/(A·h))开始超越运营成本降幅(684.5 元/(A·h))，导致总成本曲线出现拐点(390.93 万元)，全生命周期总成本相较 2.2 A·h 配置降低 3.19%。该现象揭示了混合动力系统电池容量选型的经济临界值——22 A·h 配置通过两层级优化模型达到成本最优平衡：燃油

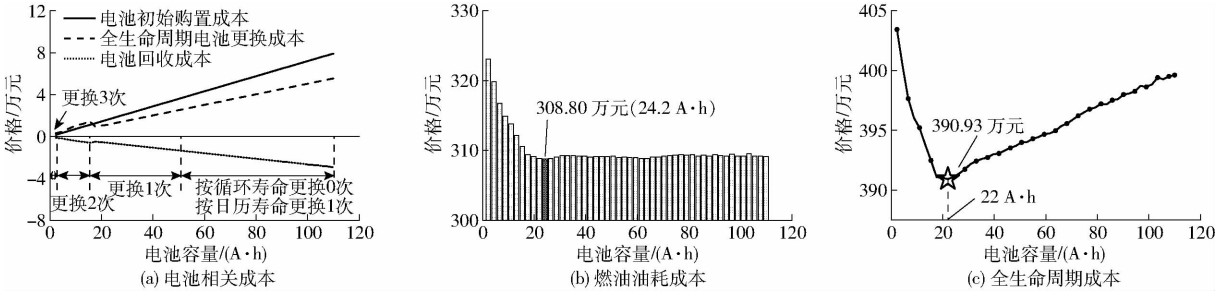

图 14　不同电池容量全生命周期成本及子成本对比

Fig. 14　Life cycle costs and sub-costs curves of different battery capacity configurations

效率提升带来的年均燃油消耗成本降低 4.41%;电池更换周期延长至 10 a,更换次数由 3 次降至 1 次。

4 结论

(1)建立了融合全生命周期成本评价体系的基于枚举法与动态规划结合的两层级优化模型,实现电池容量与能量管理策略协同优化。研究了电池容量与全生命周期成本及其子成本之间的关系,结果表明,电池容量的增加有利于降低整机油耗并延长电池寿命,但存在整机油耗拐点,过大电池容量对油耗的改善效果不明显。

(2)采用枚举法以全生命周期成本最低为目标对电池容量进行优化,结果显示,采用 22 A·h 电池容量配置可使拖拉机在15 a 服役周期内实现最低,综合成本 390.93 万元,较 2.2 A·h 配置降低 3.19%,其中年均燃油消耗成本减少 4.41%,电池更换次数由 3 次降为 1 次。

(3)犁耕作业工况下,大容量配置相较于小容量,发动机高效区运行占比提升 69.17 个百分点,油耗降低 5.38%,同时浅充放策略使电池容量衰减率降低 60.1%;道路运输工况下,同等策略下油耗降低 3.51%,电池容量衰减率降幅达 11.8%。

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] 张凯, 鲁植雄, 王琳, 等. 基于杠杆拓扑法的混合动力拖拉机 ECVT 构型设计与节能控制[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 505 - 518, 538.
ZHANG Kai, LU Zhixiong, WANG Lin, et al. ECVT configuration design and energy-saving control of hybrid tractor based on lever topology method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 505 - 518, 538. (in Chinese)

[3] 朱镇, 曾令新, 林勇刚, 等. 融合工况预测的混合动力拖拉机自适应能量管理策略[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(12): 201 - 210.
ZHU Zhen, ZENG Lingxin, LIN Yonggang, et al. Adaptive energy management strategy for hybrid tractors based on condition prediction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(12): 201 - 210. (in Chinese)

[4] 汪珍珍, 周俊, 王旭. 增程式电动拖拉机旋耕机组能量管理模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 428 - 438.
WANG Zhenzhen, ZHOU Jun, WANG Xu. Research on energy management model for extended-range electric rotary-tilling tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 428 - 438. (in Chinese)

[5] HUANG Y, WANG H, KHAJEPOUR A, et al. A review of power management strategies and component sizing methods for hybrid vehicles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 96: 132 - 144.

[6] SONG Z, ZHANG X, LI J, et al. Component sizing optimization of plug-in hybrid electric vehicles with the hybrid energy storage system[J]. Energy, 2018, 144: 393 - 403.

[7] ANKAR S J, PINKYMOL K P. Optimal sizing and energy management of electric vehicle hybrid energy storage systems with multi-objective optimization criterion[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(8): 11082 - 11096.

[8] LIU Y, SUN Z, WANG Y, et al. Capacity configuration of fuel cell hybrid vehicles using enhanced multi-objective particle swarm optimization with competitive mechanism[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 321: 119039.

[9] NIU J, ZHUANG W, YE J, et al. Optimal sizing and learning-based energy management strategy of NCR/LTO hybrid battery system for electric taxis[J]. Energy, 2022, 257: 124653.

[10] BELIGOJ M, SCOLARO E, ALBERTI L, et al. Feasibility evaluation of hybrid electric agricultural tractors based on life cycle cost analysis[J]. IEEE Access, 2022, 10: 28853 - 28867.

[11] 温可瑞, 李卫东, 韩松, 等. 考虑日历寿命的电池储能系统参与一次调频服务配置容量与控制参数协同优化[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2185 - 2193.
WEN Kerui, LI Weidong, HAN Song, et al. Optimization of deployment with control for battery energy storage system participating in primary frequency regulation service considering its calendar life[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2185 - 2193. (in Chinese)

[12] 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.

[13] SONG Z, LI J, HAN X, et al. Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles[J]. Applied Energy, 2014, 135: 212 - 224.

[14] PEREZ H E, HU X, DEY S, et al. Optimal charging of Li-ion batteries with coupled electro-thermal-aging dynamics[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 7761 - 7770.

[15] WANG Y, MOURA S J, ADVANI S G, et al. Power management system for a fuel cell/battery hybrid vehicle incorporating fuel cell and battery degradation[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(16): 8479 - 8492.

[16] 朱镇，赖龙辉，王登峰，等. 油电混合机械液压式拖拉机动力系统节能性[J]. 农业工程学报，2022，38(17)：52－60.
ZHU Zhen，LAI Longhui，WANG Dengfeng，et al. Energy saving characteristics of the mechanical hydraulic tractor power system with oil electric hybrid power[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(17)：52－60.（in Chinese）

[17] MASIH-TEHRANI M，HA'IRI-YAZDI M R，ESFAHANIAN V，et al. Optimum sizing and optimum energy management of a hybrid energy storage system for lithium battery life improvement[J]. Journal of Power Sources，2013，244：2－10.

[18] POURABDOLLAH M，MURGOVSKI N，GRAUERS A，et al. An iterative dynamic programming/convex optimization procedure for optimal sizing and energy management of PHEVs[J]. IFAC Proceedings Volumes，2014，47(3)：6606－6611.

[19] HU X，HAN J，TANG X，et al. Powertrain design and control in electrified vehicles：a critical review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2021，7(3)：1990－2009.

[20] 王建，朱孝凯，谢太林，等. 重型拖拉机全动力换挡变速箱自动换挡策略研究[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：444－455.
WANG Jian，ZHU Xiaokai，XIE Tailin，et al. Automatic shift strategy of full power shift transmission for heavy duty tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(10)：444－455.（in Chinese）

[21] RESCH R. Leistungsverzweigte mehrbereichs-fahrantriebe mit kettenwandlern[D]. München：Technischen Universität München，2004.

[22] RENIUS K T. Traktoren technik und ihre anwendung[M]. München：BLV verlagsgesellschaft，1987.

[23] 李宝刚. 动力换挡传动箱挡位设计方法及控制策略研究[D]. 重庆：重庆大学，2020.
LI Baogang. Study on gear design method and control strategy of power-shift transmission[D]. Chongqing：Chongqing University，2020.（in Chinese）

[24] 全国拖拉机标准化技术委员会. 拖拉机禁用与报废：GB/T 16877—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[25] LIU W，YANG R，LI L，et al. Energy and environmental evaluation and comparison of a diesel-electric hybrid tractor，a conventional tractor，and a hillside mini-tiller using the life cycle assessment method[J]. Journal of Cleaner Production，2024，469：143232.

[26] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用动力蓄电池循环寿命要求及试验方法：GB/T 31484—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[27] 李慧，李威龙，胡一鸣，等. 2024 年成品油价格分析与趋势预测[J]. 北京理工大学学报(社会科学版)，2024，26(2)：59－67.
LI Hui，LI Weilong，HU Yiming，et al. Analysis and trend prediction of refined oil price in 2024[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)，2024，26(2)：59－67.（in Chinese）

[28] 曾小华，宋大凤，吴西涛，等. 基于理论油耗模型的轻混重卡全生命周期成本分析[J]. 吉林大学学报(工学版)，2018，48(5)：1313－1323.
ZENG Xiaohua，SONG Dafeng，WU Xitao，et al. Life cycle cost analysis of mild hybrid heavy truck based on theoretical fuel consumption model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2018，48(5)：1313－1323.（in Chinese）

[29] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0[M]. 北京：机械工业出版社，2020.