doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.040

电液并联轮式装载机行驶速度-能量管理协同优化方法

张浩翔[1]　王　峰[2]　郭　伟[1]　赖俊斌[1]　李松霖[1]　徐向阳[1]
(1.北京航空航天大学宁波创新研究院，宁波 315800；2.浙江万里扬股份有限公司，金华 321000)

摘要：在“双碳”战略背景下，农业领域对高效、低排放的散料搬运装备需求不断增加。电动轮式装载机凭借其环保、节能等优势，逐渐在农业生产中得到推广应用。本文针对电液并联混合动力装载机，以降低电池老化和能量消耗为综合目标，提出行驶速度-能量管理策略协同优化方法。首先建立混合动力系统数学模型和电池使用寿命评估模型；然后构建行驶速度和能量管理策略协同优化数学模型，并使用动态规划算法实现协同优化问题的离线数值求解。根据离线结果表现的结构特征与规律，设计了基于规则的在线协同优化方法，实时规划装载机行驶速度和电液功率分配方式。仿真结果表明，提出的在线协同优化算法在电池寿命与整机能耗方面均接近离线最优结果。

关键词：电动轮式装载机；电池使用寿命；电液并联混动行走系统；能量管理策略；行驶速度优化
中图分类号：TH137　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)09-0419-08　　**OSID**：

Co-optimization of Driving Speed and Energy Management for Parallel Electro-hydraulic Hybrid Wheel Loaders

ZHANG Haoxiang[1]　WANG Feng[2]　GUO Wei[1]　LAI Junbin[1]　LI Songlin[1]　XU Xiangyang[1]
(1. *Ningbo Institute of Technology*, *Beihang University*, *Ningbo* 315800, *China*
2. *Zhejiang Wanliyang Co.*, *Ltd.*, *Jinhua* 321000, *China*)

Abstract: Under the “dual-carbon” strategy, the demand for efficient and low-emission bulk material handling equipment in the agricultural sector has been steadily increasing. Electric wheel loaders, owing to their environmental friendliness and energy efficiency, are gradually adopted in agricultural operations for material handling and field logistics. As the core energy-storage component of electric wheel loaders, the battery is subjected to large charge-discharge currents and frequent cycling under high-intensity and high-duty working conditions. These operating characteristics lead to accelerated battery degradation, reduced driving range, and increased operating costs. Targeting parallel electro-hydraulic hybrid (PEHH) wheel loaders, a coordinated optimization method for travel-speed planning and energy-management control was proposed, aiming to simultaneously mitigate battery aging and reduce overall energy consumption. Firstly, a mathematical model of the hybrid powertrain system and a battery lifetime prediction model were established. Subsequently, a coordinated optimization framework for travel speed and energy-management strategy was formulated, and the offline optimal solution was obtained by using a dynamic programming (DP) algorithm. Based on the structural characteristics and regularities observed in the offline optimal results, a rule-based online coordinated optimization strategy was developed to realize real-time travel-speed planning and electro-hydraulic power-split control. Simulation results demonstrated that the proposed online coordinated optimization algorithm achieved performance in battery life extension and energy consumption reduction that was close to the offline optimal benchmark.

Key words: electric wheel loader; battery life; parallel electric-hydraulic hybrid powertrain; energy management strategy; driving speed optimization

收稿日期：2025-12-06　修回日期：2025-12-18
基金项目：国家自然科学基金项目(52305047)和宁波市青年科技创新领军人才项目(2024QL053)
作者简介：张浩翔(1994—)，男，博士后，主要从事车辆动力系统设计与混动系统能量管理策略优化研究，E-mail：haoxiangzhang@buaa.edu.cn
通信作者：郭伟(1984—)，男，研究员，博士，主要从事传动系统控制与混动系统能量管理研究，E-mail：guoweigreat@buaa.edu.cn

0 引言

轮式装载机作为典型散料搬运设备,在农业生产中可承担物料搬运、装卸和堆放等任务,具有机动性强、适应性广的特点。电动轮式装载机凭借低排放、高能效和经济性优势,近年来在农业相关作业中逐渐得到应用[1]。电池作为电动轮式装载机唯一的能量来源,其使用寿命直接影响了整机性能。从整机全寿命周期角度看,电池寿命衰减与能量消耗共同构成影响经济性的关键综合成本[2]。

为降低电动轮式装载机的综合使用成本,一种方法是采用电液并联混合驱动系统,使用液压系统作为第二动力源回收刹车能量,并在装载机加速时与电系统共同驱动车辆,从而降低电池充放电流并减少电池使用频次[3]。能量管理策略是混合动力系统的核心控制模块,用于协调各能量源之间的功率分配,可分为基于规则、基于优化和基于学习三大类。基于规则的方法结构简单、实现成本低,但难以在复杂工况下保持全局最优[4-6];基于优化的方法(如动态规划、模型预测控制)能够得到最优控制序列,但计算量较大,实时应用受限[7-8];基于学习的方法(如强化学习)具备自适应与模型独立特性,可在高维或不确定环境下学习近似最优策略,但训练数据需求高、收敛与安全性难以保障[9-11]。目前的能量管理策略设计普遍以人为驾驶条件下的行驶速度作为输入,而面向未来自动驾驶装载机的行驶速度由车机自主规划,因此传统基于驾驶员速度的能量管理策略已不再适用[12]。

延长电池寿命的另一种方法是对装载机典型行驶工况的行驶速度轨迹进行优化,即在给定装载机运行路线和时间下,通过优化各时刻机器速度,延长电池寿命[13-16]。现有行驶速度优化主要在轨道交通和乘用车领域,还未有学者针对农用装载机开展研究。并且目前的速度轨迹优化方法均基于单一动力源系统,对于多动力源的混动系统,还需要在优化轨迹的同时考虑多动力源之间能量分配问题。

本文以降低电动轮式装载机电耗和延长电池使用寿命为目标,提出一种面向电液混动装载机的行驶速度-能量管理策略协同优化方法。首先建立混合动力系统数学模型和电池使用寿命评估模型。然后构建行驶速度和能量管理策略协同优化数学模型,并使用动态规划算法实现协同优化问题的离线数值求解。根据离线结果表现的结构特征与规律,设计基于规则的在线协同优化方法,实时规划装载机行驶速度和电液功率分配方式,并验证在线协同优化算法的机器使用成本能够实现接近离线最优结果。

1 动力系统及电池老化数学模型

1.1 电液并联混动轮式装载机行走系统

在电直驱轮式装载机行走系统的基础上,并联由液压蓄能器与液压泵/马达组成的第二储能系统,则构成电液并联混动系统,构型示意图如图 1 所示。其中液压系统主要由高压蓄能器、低压蓄能器和变量液压泵/马达组成,能够回收刹车能量,储存在液压蓄能器中,并在装载机加速或铲装时与电系统共同驱动车辆。由于液压蓄能器具有功率密度高、响应速度快的特点,因此能够在工况剧烈变化作业场景实现对电系统输出功率的“削峰填谷”,从而降低电池输出功率和充放电次数,延长电池使用寿命[17]。

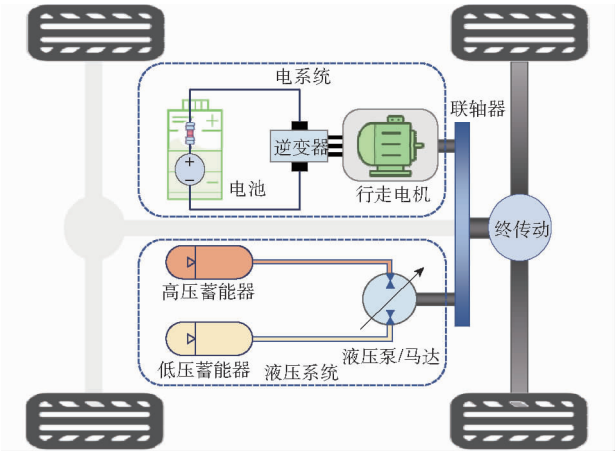


图 1 电液并联混动装载机行走系统构型示意图

Fig. 1 Configuration of walking system for PEHH wheel loaders

1.2 行走系统数学建模

行走系统数学建模包括装载机动态模型、电机模型、电池模型、变量液压泵/马达模型和液压蓄能器模型。其中装载机动态模型可以表示为[18]

$$T_m + T_h - \frac{1}{k_f}\left(\mu mg + \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A_v\right) r_w = I\dot{\omega}_m \quad (1)$$

式中 T_m——电机驱动转矩

T_h——液压驱动转矩

k_f——终传动传动比

μ——滚动摩擦因数

ρ——空气密度

m——装载机质量

g——重力加速度

v——装载机速度

C_d——风阻系数

A_v——车辆正投影面积

r_w——轮胎半径

I——车辆等效转动惯量

ω_m——驱动轴角速度

电机使用一阶模型描述其动态特性，时间常数则根据电机内阻、电感、转子惯量和反电动势常数确定。电池的等效电路模型由理想电压源和考虑焦耳损耗的电阻组成，电池输出电流 i_b 可表示为

$$i_b = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4r_b P_b}}{2r_b} \tag{2}$$

式中　U_{oc}——电池开路电压

r_b——电池内阻

P_b——电池输出功率

变量液压泵/马达可以通过调节斜盘倾角 x_h 改变排量大小。当 $-1 \leqslant x_h \leqslant 0$ 时，液压泵/马达作为液压泵使用；当 $0 \leqslant x_h \leqslant 1$ 时，液压泵/马达在马达模式下工作。液压驱动转矩 T_h 和高压口流量 Q_h 可表示为

$$T_h = x_h D_h \eta_m^{\alpha} \tag{3}$$

$$Q_h = \frac{x_h D_h \omega_m}{\eta_v^{\alpha}} \tag{4}$$

式中　D_h——液压泵/马达排量

η_m^{α}——液压泵/马达机械效率

η_v^{α}——液压泵/马达容积效率

当液压泵/马达作为液压泵使用时液压泵/马达工作模式系数 $\alpha = 1$，当液压泵/马达在马达模式工作下 $\alpha = -1$。

液压蓄能器中气体压缩采用等温模型[19]，压力 p 的动态方程可表示为

$$\dot{p} = -\frac{p^2 Q_h}{p_0 V_0} \tag{5}$$

式中　p_0——初始气体压力

V_0——气体初始体积

使用 SOC_a 描述液压蓄能器压力水平，SOC_a 定义为

$$SOC_a = \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \tag{6}$$

式中　$p_{\max}$、$p_{\min}$——蓄能器最大、最小压力

1.3　电池使用寿命建模

锂离子电池在使用过程中会发生老化，表现为输出功率下降和容量衰减。电池老化可分为循环老化和日历老化，使用过程中的总容量损失 Q_{loss} 可表示为

$$Q_{loss} = Q_{cal,loss} + Q_{cyc,loss} \tag{7}$$

式中　$Q_{cal,loss}$——电池日历老化容量损失

$Q_{cyc,loss}$——电池循环老化容量损失

本文选用文献[20-21]提出的电池老化模型，循环老化容量损失模型使用电池等效循环次数 F_{EC} 作为模型自变量参数，量化不同放电倍率和电池 SOC 时的容量衰减行为。等效循环次数 F_{EC} 可表示为

$$F_{EC} = \frac{\int_0^t |i_b(t)| \mathrm{d}t}{2Q_b} \tag{8}$$

循环老化容量损失模型可表示为

$$Q_{cyc,loss} = k_c k_{cyc,soc} F_{EC}^z \tag{9}$$

其中　$k_c = aI_c + b$　$k_{cyc,soc} = c(0.4 - SOC_b)^3 + d$

式中　k_c——放电倍率影响因子

$k_{cyc,soc}$——循环老化 SOC 影响因子

t——放置时间

I_c——电池充放电倍率

SOC_b——电池荷电状态

a、b、c、d、z——模型参数

日历老化容量损失模型可以表示为

$$Q_{cal,loss} = k_T k_{cal,soc} \sqrt{t} \tag{10}$$

其中　$k_T = k_{ref} \exp\left(k\left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$

$k_{cal,soc} = e(SOC_b - 0.5)^3 + f$

式中　k_T——温度影响因子

$k_{cal,soc}$——日历老化 SOC 影响因子

k_{ref}——参考老化速率

T_b——电池电芯温度

T_{ref}——参考温度

e、f、k——模型参数

2　协同优化数学模型及求解算法

2.1　协同优化方法框架

对于自动驾驶装载机，其行驶速度不再受驾驶员操作习惯限制，能够基于给定装载距离和目标作业时间，动态规划行驶速度。针对电液并联混合动力系统构型，装载机可根据实时负载状态和行驶需求，在不同运行阶段灵活分配电驱系统与液压系统的输出功率，使整机按照最优行驶速度运行。

行驶速度-能量管理策略协同优化框架如图 2 所示，输入包含行驶工况和装载机自身状态，其中行驶工况涵盖由感知系统或驾驶员规划的目标行驶路径和行驶时间，装载机自身状态则包括整车质量、地面附着系数、坡度信息、轮胎阻力等关键车辆动力学参数，以及电液混合动力系统参数如蓄能器压力、电池荷电状态等。通过“行驶速度-能量管理策略”协同优化方法，同步求解车辆行驶速度和能量管理策略。

2.2　协同优化数学模型

为便于描述距离相关变量，将各变量由时间相关函数转为装载机位置（相对加速起点的距离）相

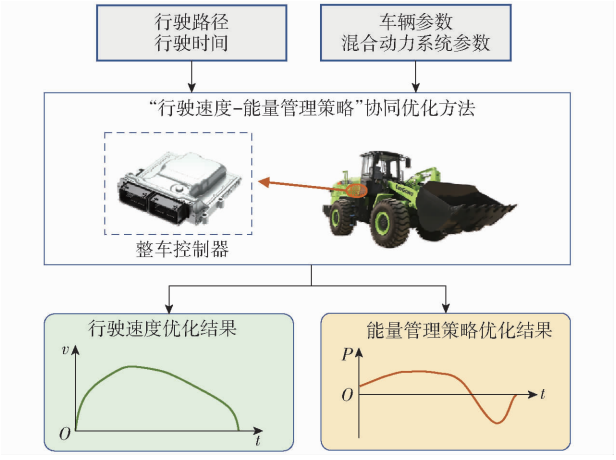


图 2 行驶速度-能量管理策略协同优化方法框架

Fig. 2 Framework diagram of co-optimization method for speed and energy management strategy

关函数。对于协同优化问题,控制变量为电机驱动转矩,状态变量为液压蓄能器、装载机速度和运行时间。动力系统状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{t} = \dfrac{1}{v} \\ \dot{v} = \left[\dfrac{k_f}{mr_w}(T_m + T_h) - \mu g - \dfrac{\rho v^2 C_d A_v}{2m}\right]\dfrac{1}{v} \\ \dot{SOC}_a = \dfrac{[SOC_a(p_{\max} - p_{\min}) + p_{\min}]T_h\omega}{p_0 V_0 (p_{\max} - p_{\min})} \end{cases} \tag{11}$$

电池使用工况决定了电池老化现象,引入电池充放电强度系数 σ 表征电池在不同放电倍率和 SOC 工作时的老化严重程度,其表达式为

$$\sigma = \frac{\Gamma}{\gamma} = \left(\frac{k_c k_{cyc,soc}}{k_{c,nom} k_{cyc,soc,nom}}\right)^{\frac{1}{z}} \tag{12}$$

式中 Γ——标称使用工况下电池充放电循环次数

γ——以实际电流倍率和 SOC 工作时电池总充放电循环次数

$k_{c,nom}$——标称使用工况下的充放电倍率影响因子

$k_{cyc,soc,nom}$——标称使用工况下循环老化 SOC 影响因子

基于充放电强度系数 σ,机器综合使用成本 J 可表示为

$$J = \int_0^{s_f} \left(c_e P_b + c_b \frac{\sigma}{2Q_b\Gamma}|i_b|\right)\frac{1}{v}\mathrm{d}s \tag{13}$$

式中 c_e——电价

c_b——电池价格

s_f——目标行驶距离

P_b——电池充放电功率

式(11)和式(13)构建的最优控制问题包含 3 个状态变量和 1 个控制变量,优化空间为四维空间,搜索范围大、求解时间长。为提高最优控制问题求解速度,将装载机的运行时间加入最优控制目标函数中,并增加权重因子 λ 分配优化目标中机器综合使用成本和车辆运行时间权重,优化后的最优控制问题可表示为

$$\begin{cases} J' = \displaystyle\int_0^{s_f} \left[\left(c_e P_b + c_b \frac{\sigma}{2Q_b\Gamma}|i_b|\right)\frac{1}{v} + \lambda\frac{1}{v}\right]\mathrm{d}s \\ \text{s.t.} \begin{cases} \dot{v} = \left[\dfrac{k_f}{mr_w}(T_m + T_h) - \mu g - \dfrac{\rho v^2 C_d A_v}{2m}\right]\dfrac{1}{v} \\ \dot{SOC}_a = \dfrac{[SOC_a(p_{\max} - p_{\min}) + p_{\min}]T_h\omega}{p_0 V_0 (p_{\max} - p_{\min})} \\ v(0) = 0 \\ v(s_f) = 0 \\ SOC_a(0) = SOC_a(t_f) = SOC_{a,0} \\ v \in [0, v_{\max}] \\ T_m \in [T_{m,\min}, T_{m,\max}] \\ T_h \in [T_{h,\min}, T_{h,\max}] \end{cases} \end{cases} \tag{14}$$

式中 J'——优化后成本

在给定权重因子 λ 时,能够通过最优控制问题求解算法确定车辆运行时间和与之对应的车辆最低综合使用成本。由于运行时间与权重因子 λ 呈负相关,即权重因子 λ 越大,轮式装载机的运行时间越短,因此能够通过反复给定权重因子 λ,寻找使得车辆实际运行时间接近目标运行时间的 λ。此时,对应的最低综合使用成本、行驶速度和能量管理策略即为在当前运行路径和时间下的最优解。

2.3 最优控制问题动态规划求解算法

动态规划是一种广泛应用于多阶段决策最优控制问题的数学优化方法,在工程实践中,常被用作离线策略生成工具,用于为实时控制器提供参考轨迹或策略边界[22-23]。本文基于动态规划算法求解速度轨迹和能量管理策略。

行驶速度-能量管理策略协同优化问题包含 2 个状态变量和 2 个控制变量,可统一表示为:状态变量 $\boldsymbol{x}_k = \begin{bmatrix} v \\ SOC_a \end{bmatrix}_k$,控制变量 $\boldsymbol{u}_k = \begin{bmatrix} T_m \\ T_h \end{bmatrix}_k$。状态转移方程可表示为

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = f_k(\boldsymbol{x}_k, \boldsymbol{u}_k) \quad (k = 0, 1, \cdots, N-1) \tag{15}$$

其中 $$\boldsymbol{u}_k \subseteq \boldsymbol{U}_k$$

式中 $\boldsymbol{U}_k$——控制变量可行空间集合

f_k——状态转移函数

在距离域中,在预定权重因子 λ 后,动态规划算法求解行驶速度-能量管理策略协同优化问题的状态转移过程如图 3 所示。

动态规划算法通过反向迭代方法计算自步长 $N-1$ 开始至 1 每一个位置时各个离散状态 $\boldsymbol{x}_k^i$ 的最

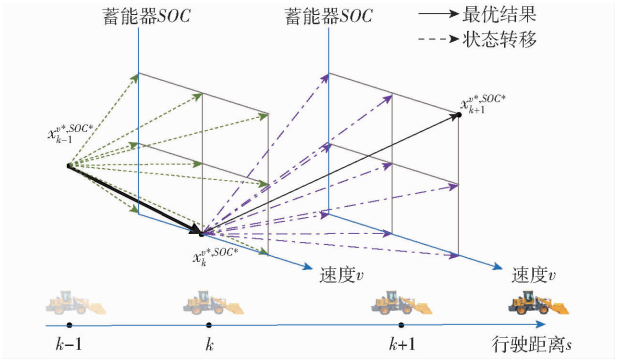


图 3　动态规划状态转移过程

Fig. 3　Dynamic programming state transition process

优成本函数 J_k，即

$$J_k(\boldsymbol{x}_k^i)=\min_{\boldsymbol{u}_k\subseteq U_k}\{g_k(\boldsymbol{x}_k^i,\boldsymbol{u}_k)+J_{k+1}(f_k(\boldsymbol{x}_k^i,\boldsymbol{u}_k))\} \tag{16}$$

式中　g_k——第 k 步成本函数

对于第 N 步，其成本函数为 $J_N(\boldsymbol{x}_N^i)=g_N(\boldsymbol{x}_N^i)$，终点成本函数 $g_N(\boldsymbol{x}_N^i)$ 表示为

$$g_N(\boldsymbol{x}_N^i)=\begin{cases}0 & (\boldsymbol{x}_N^i=\boldsymbol{x}_0)\\ \infty & (\boldsymbol{x}_N^i\neq\boldsymbol{x}_0)\end{cases} \tag{17}$$

在通过反向迭代获得各状态的成本函数后，通过正向计算得到装载机在给定初始状态 $\boldsymbol{x}_0$ 时各位置点的最优状态值，即最优状态序列 $\boldsymbol{x}_k^*=\{\boldsymbol{x}_1^*,\boldsymbol{x}_2^*,\cdots,\boldsymbol{x}_N^*\}$，以及对应的最优输入序列 $\boldsymbol{u}_k^*=\{\boldsymbol{u}_0^*,\boldsymbol{u}_1^*,\cdots,\boldsymbol{u}_{N-1}^*\}$，其表达式为

$$\boldsymbol{u}_k=\operatorname{argmin}\{g_k(\boldsymbol{x}_k^i,\boldsymbol{u}_k)+J_{k+1}(f_k(\boldsymbol{x}_k^i,\boldsymbol{u}_k))\} \tag{18}$$

通过反向迭代加正向计算，完成了动态规划的计算过程。

3　离线协同优化结果分析

以工作质量 19 t 的电动轮式装载机为研究对象开展研究，装载机轮胎半径为 0.789 m，摩擦因数为 0.06，传动系统传动比为 59，液压泵/马达最大排量为 125 cm^3/r，蓄能器容积为 56 L，初始压力为 17.5 MPa，最小压力和最大压力分别为 20、30 MPa。电池电量为 282 kW·h，电池容量为 456 A·h，使用的电价和电池价格分别为 0.525 元/(kW·h)和 1 057 元/(kW·h)。

优化过程针对装载机从卡车向折返点运行的单一过程，运行距离为 20 m。为保证结果准确，选择平均速度为 2.75、2.50、2.25 m/s 工况，分别表示装载机高速运行工况、中速运行工况和低速运行工况。运行过程中装载机最高速度为 3.6 m/s，电机驱动转矩上限为 1 200 N·m，液压泵/马达驱动转矩网格取值范围上下限为 596 N·m。离线优化软件平台为 Matlab R2021b，基于 Miretti 开发的动态规划算法工具 DynaProg[24] 做二次开发，实现最优行驶速度和能量管理策略的求解。

采用离线协同优化方法同时求解装载机行驶速度和电液驱动转矩，并将各个变量从距离域转为时域。不同平均运行速度下的装载机速度如图 4 所示，电机转矩和液压泵/马达转矩如图 5 所示。可以看到装载机速度、电机转矩和液压泵/马达转矩在不同平均运行速度下存在明显规律性：在起步与加速初期，电机输出接近最大转矩并在达到额定功率后转入恒功率区，液压泵/马达以最大转矩参与驱动，加速车速提升；当车速升高至约最高车速的 85% 后，电机转矩逐渐减小，车辆以较小加速度提升至最高车速。进入匀速阶段后，电机保持适当转矩维持恒速行驶，液压泵/马达处于待机状态。在随后的轻减速与滑行阶段，电机转矩依次降低直至为零，车辆依靠惯性与路面阻力逐渐减速。最终在制动阶段，电机转矩保持为零，液压泵/马达切换至接近最大负排量状态，以高转矩回收车辆的制动能量。

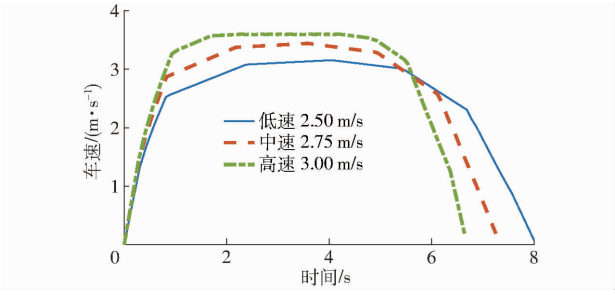
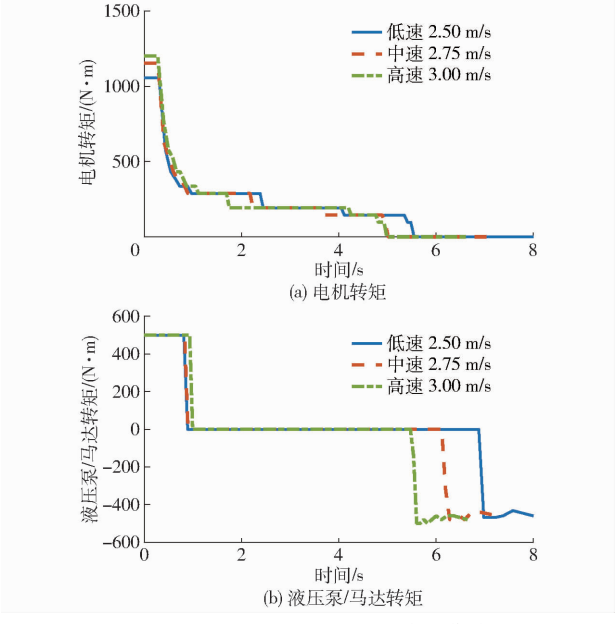


图 4　装载机速度曲线

Fig. 4　Driving speed of wheel loader



(a) 电机转矩

(b) 液压泵/马达转矩

图 5　电机和液压泵/马达转矩曲线

Fig. 5　Torque of electric motor and hydraulic pump/motor

行驶速度-能量管理策略离线协同优化方法使用动态规划迭代求解行驶速度和能量管理策略，耗

时长,计算资源要求高,无法在工况多变的实际工作场合运行。然而离线优化结果表现出较强规律性,因此可以基于最优结果设计实时协同优化策略,在线实现接近最优结果的行驶速度和能量管理策略设计。

4 在线协同优化方法及结果分析

基于行驶速度-能量管理策略离线协同优化结果,本节提出在线协同优化方法。在线协同优化方法在时间域内设计,状态转移流程如图 6 所示,共包含 6 个阶段:

(1)混合加速阶段:装载机由静止启动并加速。电机满转矩启动,当达到额定功率时转为恒功率加速,液压泵/马达在马达模式下工作,助力装载机加速。

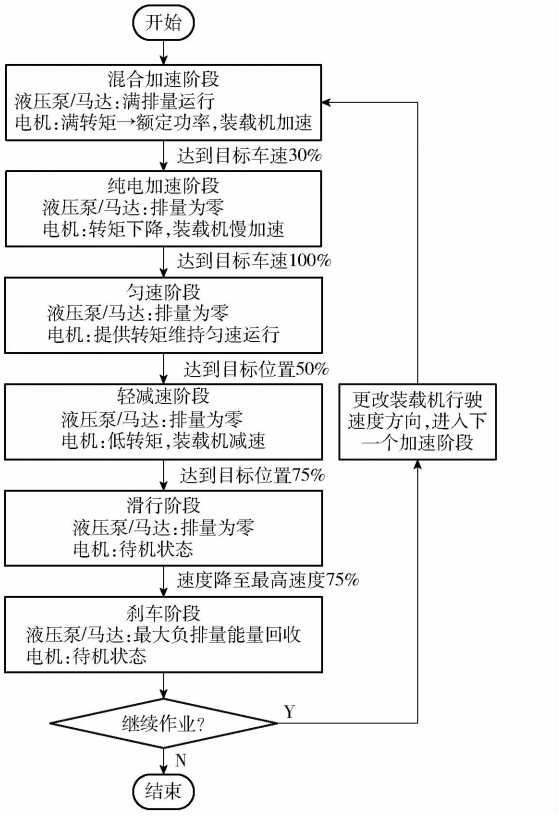


图 6 在线协同优化方法状态转移流程图

Fig. 6 State transition diagram of online co-optimization method

(2)纯电加速阶段:当液压蓄能器 SOC 下降到设定阈值时,液压系统停止工作,由电机独立驱动装载机加速;当装载机速度达到最大车速的 85%时,电机驱动转矩降低,装载机以较小加速度加速至最高转速。

(3)匀速阶段:在此阶段装载机使用电机提供驱动转矩克服行驶阻力,液压泵/马达处于待机状态,排量为零。

(4)轻减速阶段:当装载机行驶距离达到目标距离的 50%时,电机提供转矩进一步降低,并低于行驶阻力,装载机行驶速度逐渐降低。

(5)滑行阶段:当装载机行驶距离达到目标距离的 75%时,电机不再输出转矩,电机与液压泵/马达均不工作,装载机在行驶阻力作用下滑行。

(6)刹车阶段:当装载机行驶速度降至最高速度的 75%时,液压泵/马达在泵模式下工作,以满排量回收刹车动能,直至装载机速度为零,此阶段电机不工作。

根据在线协同优化方法,电液混合驱动装载机在 2 个规划周期内的运行状态如图 7 所示。当装载机速度为正时,电机在混合加速、纯电加速、匀速和轻减速阶段输出转矩分别为 $T_{m,\max}$、T_{stage2}、T_{stage3} 和 T_{stage4},液压系统在混合加速模式中以最大转矩 $T_{h,\max}$ 输出转矩,在刹车时按反向最大转矩 $-T_{h,\max}$ 回收刹车动能。当装载机速度为负时,各转矩大小不变,方向变为负向。在电系统和液压系统共同驱动下,装载机按设计的 6 个阶段运行过程完成加速-匀速-减速的行驶工况,液压蓄能器反复放能-充能,实现加速助力与能量回收。

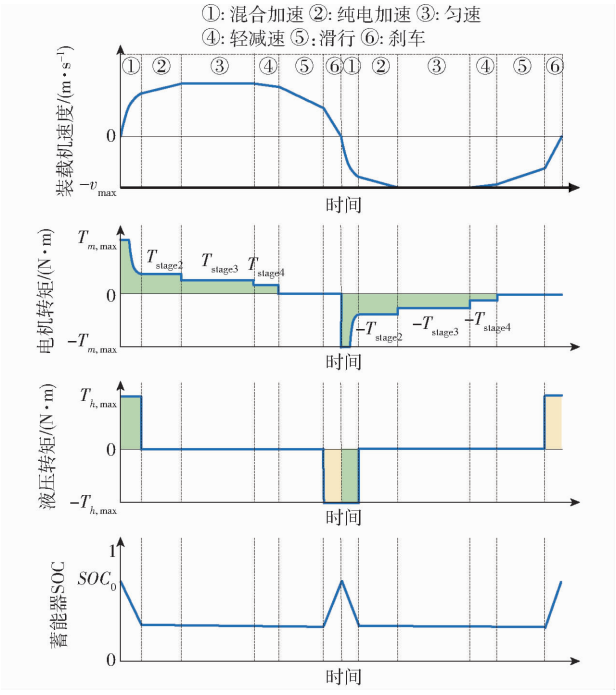


图 7 在线协同设计下装载机运行状态

Fig. 7 Operating conditions of wheel loader under online co-optimization design

为对比离线和在线协同优化方法的性能差异,在相同的行驶工况进行对比测试,并分别评估电池容量损失和装载机能耗。仿真中,使用工作质量 19 t 的电动轮式装载机连续运行 32 s 工作循环,每天工作 7 h,充电两次,连续工作 1 年。仿真结果见表 1 所示。使用离线优化方法,装载机电池容量损失为 7.51%,能耗为 16 263 kJ,机器综合使用成本为 133 010 元;使用在线优化方法的电池容量损失为

7.53%，能耗为 16 371 kJ，机器综合使用成本为 133 610 元。在线优化方法和离线优化方法的机器综合使用成本误差为 0.45%，表明设计的行驶速度-能量管理策略在线协同优化算法能够实现接近最优控制策略的功率分配和速度轨迹求解。

表 1　电池容量损失和装载机能耗对比

Tab.1　Comparison of battery capacity loss and loading mechanism energy consumption

参数	电池容量损失/%	能耗/kJ	综合成本/元
离线优化结果	7.51	16 263	133 010
在线优化结果	7.53	16 371	133 610
误差/%	0.27	0.66	0.45

5　结论

(1)针对电液并联混合动力装载机在典型农业散料搬运工况下的高能耗与电池寿命快速衰减问题，本文提出了一种行驶速度与能量管理策略协同优化方法，并对其性能进行了系统评估。基于建立的整机动力学模型与锂离子电池寿命评估模型，构建了以电池老化与能量消耗为综合目标的协同优化问题，并采用动态规划算法获得了全工况下的离线最优解。基于离线最优控制规律设计了在线协同优化方法，实时规划装载机行驶速度和电液功率分配方式。

(2)研究结果表明，在典型作业工况下，所提出的在线协同优化策略在整机综合使用成本与离线最优结果的相对误差仅为 0.45%，表明该方法在保证实时性的同时，能够有效逼近离线最优性能，具备工程实现可行性，为电液并联混合动力装载机的能量管理策略设计及智能化作业优化提供了定量依据和方法支撑。

参　考　文　献

[1] 叶月影，吴瑕，林添良. 电动装载机电液复合制动协同控制策略研究[J]. 农业机械学报，2024，55(6)：442－450.
YE Yueying, WU Xia, LIN Tianliang. Collaborative control strategy of composite braking for electric loader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(6)：442－450. (in Chinese)

[2] 刘增鹏. 电动装载机集成热管理系统设计与仿真分析[D]. 襄阳：湖北文理学院，2024.
LIU Zengpeng. Design and simulation analysis of integrated thermal management system for electric loader[D]. Xiangyang: Hubei University of Arts and Science，2024. (in Chinese)

[3] 吴昊. 高能效电液混合驱动装载机行走系统特性分析[D]. 太原：太原理工大学，2024.
WU Hao. Characteristic analysis of walking system of high energy efficiency electro-hydraulic hybrid drive loader[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology，2024. (in Chinese)

[4] ECKERT J J，BARBOSA T P，SILVA F L，et al. Optimum fuzzy logic controller applied to a hybrid hydraulic vehicle to minimize fuel consumption and emissions[J]. Expert Systems with Applications，2022，207：117903.

[5] DELGADO FERNÁNDEZ O，HENTUNEN A，JENU S，et al. A rule-based energy management system integrating a semi-empirical battery model for hybrid wheel loaders[J]. Journal of Energy Storage，2025，114：115721.

[6] MAZOUZI A，HADROUG N，ALAYED W，et al. Comprehensive optimization of fuzzy logic-based energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicle using genetic algorithm[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2024，81：889－905.

[7] YANG Y L，PEI H X，HU X S，et al. Fuel economy optimization of power split hybrid vehicles：a rapid dynamic programming approach[J]. Energy，2019，166：929－938.

[8] 解少博，张涛，张风奇，等. 考虑路口车辆排队影响的混动汽车速度规划与能量管理分层优化[J]. 机械工程学报，2025，61(14)：197－211.
XIE Shaobo，ZHANG Tao，ZHANG Fengqi，et al. Hierarchical optimization of speed planning and energy management for hybrid electric vehicles considering the impact of vehicle queuing at intersections[J]. Journal of Mechanical Engineering，2025，61(14)：197－211. (in Chinese)

[9] TANG D，ZHANG Z，HUA L，et al. Prediction of cold start emissions for hybrid electric vehicles based on genetic algorithms and neural networks[J]. Journal of Cleaner Production，2023，420：138403.

[10] LIU W，YAO P，WU Y，et al. Imitation reinforcement learning energy management for electric vehicles with hybrid energy storage system[J]. Applied Energy，2025，378：124832.

[11] ZHANG H L，PENG J K，DONG H X，et al. Integrated velocity optimization and energy management strategy for hybrid electric vehicle platoon：a multiagent reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2024，10(2)：2547－2561.

[12] WANG B，CHENG F R，TANG X Z. Research on the complete vehicle control strategy of the composite accumulator hydraulic hybrid power system[J]. Journal of Energy Storage，2023，74：109384.

[13] MELLO E F，BAUER P H. Energy-optimal speed trajectories between stops[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems，2020，21(10)：4328－4337.

[14] XIAO Z，FENG X Y，WANG Q Y，et al. Eco-driving control for hybrid electric trams on a signalised route[J]. IET Intelligent

Transport Systems,2020,14(1):36 – 44.
[15] WANG X X,WU J,ZHANG C,et al. Multi-objective online driving strategy optimization for energy storage tram considering battery life[J]. Journal of Energy Storage,2024,100:113498.
[16] YE Z Q,LI K L,STAPELBROEK M,et al. Variable step-size discrete dynamic programming for vehicle speed trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2019,20(2):476 – 484.
[17] 石荣玲,赵继云,孙辉. 液压混合动力轮式装载机节能影响因素分析与优化[J]. 农业机械学报,2011,42(3):31 – 35.
SHI Rongling, ZHAO Jiyun, SUN Hui. Energy-saving potential and influencing factors for hydraulic hybrid wheel loader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3):31 – 35. (in Chinese)
[18] 邹乃威,魏建伟,段传栋,等. 装载机混合动力系统电力变矩控制策略[J]. 机械工程学报,2023,59(24):251 – 261.
ZOU Naiwei,WEI Jianwei,DUAN Chuandong,et al. Wheel loader hybrid system electric torque converting control strategy[J]. Journal of Mechanical Engineering,2023,59(24):251 – 261. (in Chinese)
[19] POURMOVAHED A,BEACHLEY N H,FRONCZAK F J. Modeling of a hydraulic energy regeneration system: Part Ⅰ. analytical treatment[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control,1992,114(1):155 – 159.
[20] NAUMANN M,SCHIMPE M,KEIL P,et al. Analysis and modeling of calendar aging of a commercial $LiFePO_4$/graphite cell [J]. Journal of Energy Storage,2018,17:153 – 169.
[21] NAUMANN M,SPINGLER F B,JOSSEN A. Analysis and modeling of cycle aging of a commercial $LiFePO_4$/graphite cell[J]. Journal of Power Sources,2020,451:227666.
[22] BERTSEKAS D. Dynamic programming and optimal control:volume I[M]. Athena Scientific,2012.
[23] ELBERT P,EBBESEN S,GUZZELLA L. Implementation of dynamic programming for n-dimensional optimal control problems with final state constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2013,21(3):924 – 931.
[24] MIRETTI F, MISUL D, SPESSA E. Dynaprog: deterministic dynamic programming solver for finite horizon multi-stage decision problems[J]. SoftwareX,2021,14:100690.

(上接第 394 页)

[28] 丁世飞,齐丙娟,谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报,2011,40(1):2 – 10.
DING Shifei, QI Bingjuan, TAN Hongyan. Review on support vector machine theory and algorithm[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(1): 2 – 10. (in Chinese)
[29] 方匡南,吴见彬,朱建平,等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛,2011,26(3):32 – 38.
FANG Kuangnan, WU Jianbin, ZHU Jianping, et al. Review on random forest method[J]. Statistics & Information Forum, 2011, 26(3): 32 – 38. (in Chinese)
[30] 郝勇,孙旭东,高荣杰,等. 基于可见/近红外光谱与 SIMCA 和 PLS – DA 的脐橙品种识别[J]. 农业工程学报,2010,26(12):373 – 377.
HAO Yong, SUN Xudong, GAO Rongjie, et al. Navel orange variety identification based on visible/near-infrared spectroscopy with SIMCA and PLS – DA[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 373 – 377. (in Chinese)
[31] 王鑫,吴际,刘超,等. 基于 LSTM 循环神经网络的故障时间序列预测[J]. 北京航空航天大学学报,2018,44(4):772 – 784.
WANG Xin, WU Ji, LIU Chao, et al. Fault time series prediction based on LSTM recurrent neural network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(4): 772 – 784. (in Chinese)
[32] 汪生,张树森,杨健,等. 基于 GCN 与 LSTM 的多频段复杂频谱动态预测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2025,23(10):1045 – 1050,1059.
WANG Sheng, ZHANG Shusen, YANG Jian, et al. Dynamic prediction of multi-band complex spectrum based on GCN and LSTM[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(10): 1045 – 1050, 1059. (in Chinese)
[33] HE H, LUO H. An improved lightweight method based on EfficientNet for birdsong recognition[J]. Scientific Reports,2025,15(1):23727.
[34] JIANLOU L,XUAN X,GUANG H, et al. CSASNet—a crop leaf disease identification method based on improved ShuffleNetV2 [J]. Automatic Control and Computer Sciences,2024,58(4):408 – 419.