doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.17.037

融合遗传算法与动态规划的混合动力拖拉机等效燃油消耗最小策略优化方法

朱　镇[1,2]　刘佳龙[1]　张宏伟[2]　王德海[2]

（1.江苏大学汽车工程研究院，镇江 212013；2.特种车辆设计制造集成技术全国重点实验室，包头 014030）

摘要：针对混合动力拖拉机工况适应性差的问题，提出一种融合动态规划与遗传算法的分层优化策略。通过构建全局优化与瞬时控制协同决策框架，采用动态规划离线生成电池荷电状态（State of charge，SOC）全局参考轨迹，为等效燃油消耗最小策略（Equivalent consumption minimization strategy，ECMS）建立基准目标；利用遗传算法对初始等效因子进行多目标寻优，生成初始等效因子映射表，结合动态规划生成的 SOC 轨迹，通过比例-积分（Proportional-Integral，PI）控制实现等效因子的在线修正；通过全局轨迹跟踪与实时偏差调节的机制，缓解全局优化目标与瞬时工况的矛盾。结果表明，与传统 ECMS 方法相比，通过遗传算法对等效因子进行优化可使能耗降低 10.24%，进一步引入 SOC 参考轨迹实时修正后，油耗额外降低 1.59%，验证了优化策略的有效性。

关键词：混合动力拖拉机；等效消耗最小策略；遗传算法；动态规划；PI 控制

中图分类号：U481　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)17-0404-10　　**OSID**：

ECMS Optimization Method for Hybrid Tractor Based on Genetic Algorithm and Dynamic Programming

Zhu Zhen[1,2]　Liu Jialong[1]　Zhang Hongwei[2]　Wang Dehai[2]

(1. *Automotive Engineering Research Institute*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*

2. *National Key Laboratory of Special Vehicle Design and Manufacturing Integration Technology*, *Baotou* 014030, *China*)

Abstract: Aiming to address the issue of poor working condition adaptability in hybrid electric tractors by proposing a hierarchical optimization strategy that integrated dynamic programming and genetic algorithms, a collaborative decision-making framework combining global optimization and instantaneous control was established, where dynamic programming was employed to offline generate a global reference trajectory of battery SOC, providing a benchmark objective for the equivalent fuel consumption minimization strategy. When the actual working conditions differed in duration from those used in the dynamic programming for the reference SOC trajectory, a fitted approximate optimal SOC trajectory was adopted as the reference. Genetic algorithm was utilized to perform multi-objective optimization of initial equivalent factors, generating an initial equivalent factor map. A PI dynamic compensator was designed in combination with SOC tracking deviation to realize online correction of equivalent factors. The conflict between global optimization objectives and instantaneous working conditions was alleviated through a mechanism integrating global trajectory tracking and real-time deviation adjustment. Results demonstrated that compared with traditional ECMS methods, the genetic algorithm-optimized equivalent factors reduced energy consumption by 10.24%. After further introducing real-time SOC reference trajectory correction, an additional 1.59% fuel consumption reduction was achieved, which validated the effectiveness of the optimization strategy.

Key words: hybrid tractors; equivalent consumption minimization strategy; genetic algorithms; dynamic programming; PI control

收稿日期：2026-02-22　修回日期：2026-05-29

基金项目：国家自然科学基金项目（52272435）和特种车辆设计制造集成技术全国重点实验室开放课题（GZ2023KF007）

作者简介：朱镇（1985—），男，教授，博士，主要从事车辆传动系统动力学（混合动力、复合传动）研究，E-mail：1000004750@ujs.edu.cn

0　引言

在全球能源危机与环境污染的背景下，我国积极推进农业机械向绿色化、智能化、可持续化方向发展。大功率拖拉机作为关键动力机械，其燃油经济性差、排放高的问题亟待解决，新型农机装备与农业机械节能减排技术成为农机领域新的发展方向[1-2]，研究混合动力拖拉机能量管理策略意义重大。

近年来，国内外学者对能量管理策略进行了广泛研究，主要分为基于规则的能量管理策略、基于优化的能量管理策略和基于学习的能量管理策略[3]。基于规则的控制策略通过预设工况参数与动力源特性间的逻辑关系实现功率分配优化，如 Kang 等[4]构建的分段控制架构、王春光[5]开发的模糊转矩分配模型，以及骆光炬[6]提出的多模式管理方案。此类方法虽然具备工程实施便捷性，但其控制精度受限于规则库完备性，虽然可通过融合动力参数[7]与工况特征匹配[8]来提升燃油经济性，但参数调优仍然依赖经验积累。

基于优化的控制策略涵盖全局优化与瞬时优化两类方法。全局优化以动态规划为代表，可在旋耕工况中实现 16.89% 的油耗降低[9]，但其需预知完整工况信息且计算复杂度高，制约了动态规划的应用。瞬时优化以等效燃油消耗最小策略为核心，张俊江等[10]在柴电并联系统中验证其节油率超过 10%，周润东[11]在串联架构中实现 32.91% 的油耗降幅。虽然可通过模糊控制[12]、边界估计[13]等动态调节机制调节等效因子，但仍存在工况适应性不足的问题。

基于学习的能量管理策略通过数据驱动突破传统优化方法的模型依赖瓶颈。Zhang 等[14]开发的预测-优化复合控制模式通过嵌入工况预测模块，使油耗降低 14.96%，窦海石等[15]基于马尔科夫链的滚动优化策略则实现 7.2% 的燃油经济性提升。强化学习方法展现出接近动态规划最优解的潜力[16]，融合特征识别的分级控制框架通过算法动态切换可使燃油效率提升 10%[17]。此类方法虽然在非线性系统适应性方面优势显著，但仍需解决实时运算效率低等关键问题。结合行驶工况信息和车辆节能技术开展混合动力车辆能量管理策略的研究，建立行驶工况与工作模式间的能量管理适用机制，实现多模式能量管理策略的集成，成为近期研究的热点[18-20]。

因此，本文结合混合动力和无级变速技术，提出一种油电混合-机液复合动力传动系统，并进行能量管理策略的设计。通过动态规划获取 SOC 参考轨迹，结合动力电池当前 SOC，通过 PI 控制实时修正等效因子，提出一种自适应等效消耗最小策略，旨在减少燃油消耗，提高燃油经济性。

1　系统构型与工况设定

1.1　动力系统结构

为了提高拖拉机的燃油经济性，本文结合混合动力技术与液压机械复合传动技术的优势[21]，提出了一种油电混合-机液复合动力传动系统[22]。该系统如图 1 所示，主要包括动力源部分和传动装置部分。其中动力源包含发动机和电机，传动装置主要包含行星齿轮组和液压传动机构，以及相应的离合器和制动器组件。通过控制离合器和制动器的状态来实现驱动模式的切换，通过调节液压传动的排量比来控制变速器的传动比。其主要参数如表 1 所示。

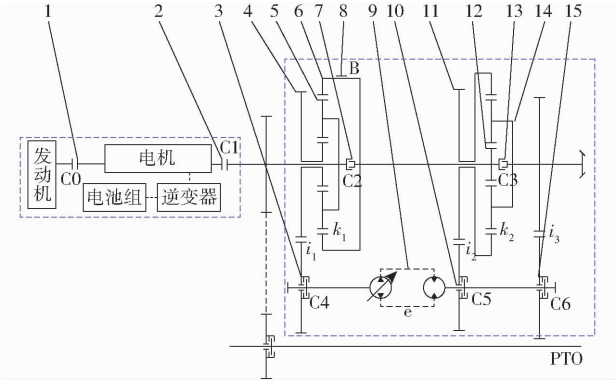

图 1　油电混合-机液复合动力传动系统原理图

Fig. 1　Schematic diagram of fuel-electric hybrid and mechanical-hydraulic composite power transmission system

1. 离合器 C0　2. 离合器 C1　3. 离合器 C4　4. 前排行星齿轮太阳轮　5. 前排行星齿轮行星架　6. 前排行星齿轮齿圈　7. 离合器 C2　8. 制动器 B　9. 液压传动系统　10. 离合器 C5　11. 后排行星齿轮齿圈　12. 后排行星齿轮太阳轮　13. 离合器 C3　14. 后排行星齿轮行星架　15. 离合器 C6

表 1　拖拉机主要参数

Tab. 1　Main parameters of tractor

部件	参数	数值
整车	质量/kg	8 200
	驱动轮半径/m	0.875
柴油机	额定功率/kW	132
	额定转速/($r \cdot min^{-1}$)	2 300
	最大转矩/(N·m)	750
电机	最大功率/kW	85
	额定功率/kW	45
	最大转矩/(N·m)	250
	额定转矩/(N·m)	130
电池	额定容量/(A·h)	300
	额定电压/V	366
传动系统	HMCVT 传动比	1.00 ~ 3.57
	主减速器减速比	3.70
	轮边减速器减速比	6.40

1.2 作业工况

德国农业协会(DLG)根据拖拉机的实际使用要求设定了 14 种试验工况,其中 100% 负载的重载工况 4 种,60% ~70% 负载的中负载工况 5 种,40% 负载的轻载工况 3 种,以及 1 种 100% 负载的重载运输工况和 1 种 25% 负载的轻载运输工况[23]。由于大功率的拖拉机适合匹配深松深翻的大型犁具、大型旋耕以及联合整地之类的大型机具进行重负载作业,因此国内的大功率拖拉机一般用于进行深松、犁耕等大负载的牵引作业[24]。根据美国环保署公布的农用拖拉机工况数据[25],结合试验标准和拖拉机犁耕作业时的设计行驶速度,建立了拖拉机在犁耕工况下的速度循环工况。考虑到拖拉机在犁耕作业时的牵引阻力受多种因素影响,因此在耕深为 0.26 m 的情况下进行犁耕作业试验,利用张力传感器获取牵引阻力数据,随后根据 DLG 的测试标准对其进行分析,得出本文研究的混合动力拖拉机的循环工况,单个循环工况如图 2 所示。犁耕工况持续 600 s,其中平均牵引阻力为 36.60 kN,平均作业车速为 8.86 km/h。

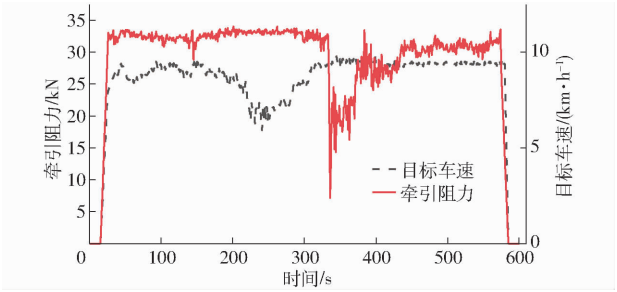

图 2 作业工况

Fig. 2 Operating conditions

2 自适应等效消耗最小策略

2.1 控制策略框架

动态规划是一种全局优化算法,能够求解出能量管理问题的最优解,但严重依赖行驶工况的准确预知且计算实时性差,因此不适合实时应用,一般用于提供理论上的最优结果,对比并评价其他能量管理策略并提供参考[26-28]。

等效燃油消耗最小策略通过引入“油电等效因子”的概念,将电池消耗等效为发动机油耗,以瞬时总油耗最小为目标,计算最优的发动机功率和电机功率分配组合。对于 ECMS,关键问题是如何选择合适的等效因子,传统 ECMS 等效因子固定,无法满足复杂的实际情况,混合动力拖拉机工作时,电池的 SOC 会随着工作时间不断变化,当等效因子设置值偏大时,会使系统更偏向使用发动机;当等效因子设置偏小时,会使系统更偏向使用电机。为使能量管理系统能够更好地提高拖拉机的燃油经济性,需要在线实时调整等效因子。

针对这些问题,提出基于 PI 控制的自适应等燃油消耗最小策略,结合近似最优 SOC 和实际 SOC 之间的差值对等效因子进行实时调整,从局部优化角度对动力源转速进行自适应分配。通过动态规划获取近似最优 SOC 作为参考,并通过遗传算法获取最优初始等效因子。从全局规划和局部优化两个角度实现多模式能量管理策略的集成。整个策略包含基于遗传算法的初始等效因子优化、基于工况的参考 SOC 轨迹生成和基于 PI 控制的等效因子实时修正 3 部分。能量管理策略流程如图 3 所示。

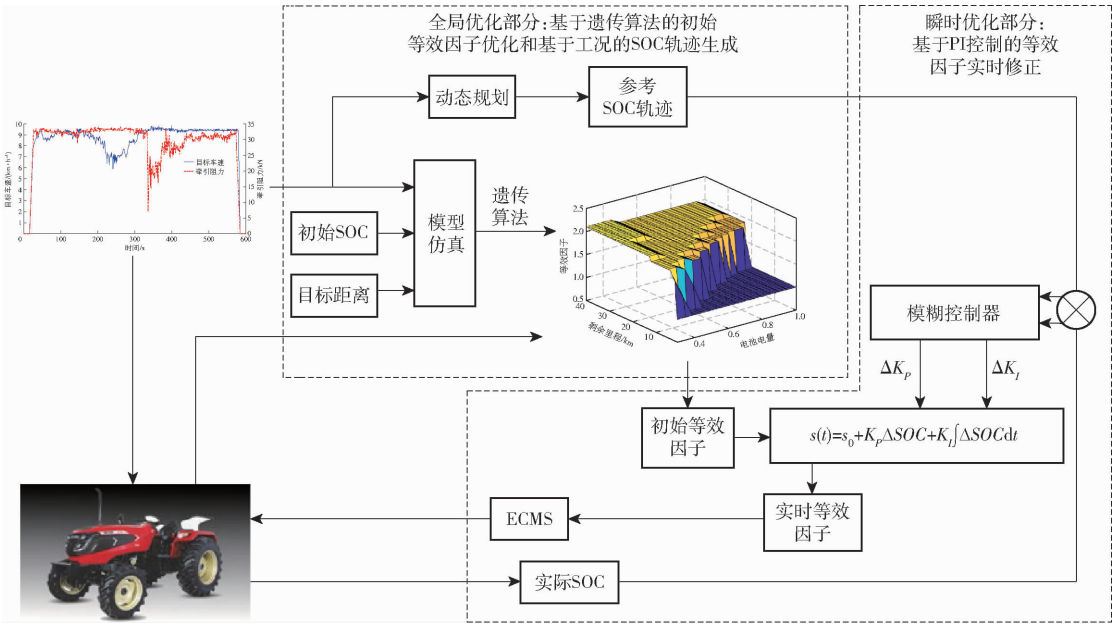

图 3 能量管理策略流程图

Fig. 3 Energy management strategies flowchart

2.2　基于遗传算法的初始等效因子离线优化

ECMS 是典型的瞬时优化策略，该策略是基于庞特里亚金极小值原理的能量管理策略。ECMS 通过引入等效因子将车辆的电耗折算为油耗，以每个时刻下总油耗最小为优化目标进行最优控制，其数学模型为

$$\begin{cases} \dot{m}_{eq} = \dot{m}_f + \dot{m}_{bat} \\ \dot{m}_f = \dfrac{P_{eng}(t)}{\eta_{eng} Q_{LHV}} \\ \dot{m}_{bat} = \dfrac{s(t)}{Q_{LHV}} P_{bat}(t) \end{cases} \tag{1}$$

式中　$\dot{m}_{eq}$——总瞬时等效燃油消耗，g/s

$\dot{m}_f$——发动机瞬时油耗，g/s

$\dot{m}_{bat}$——电池瞬时等效油耗，g/s

$P_{eng}(t)$——t 时刻发动机功率，kW

η_{eng}——发动机效率

$s(t)$——油电等效因子

$P_{bat}(t)$——t 时刻电池输出功率，kW

Q_{LHV}——燃油低热值，kJ/kg

图 4 为等效燃油消耗最小策略的求解流程图。

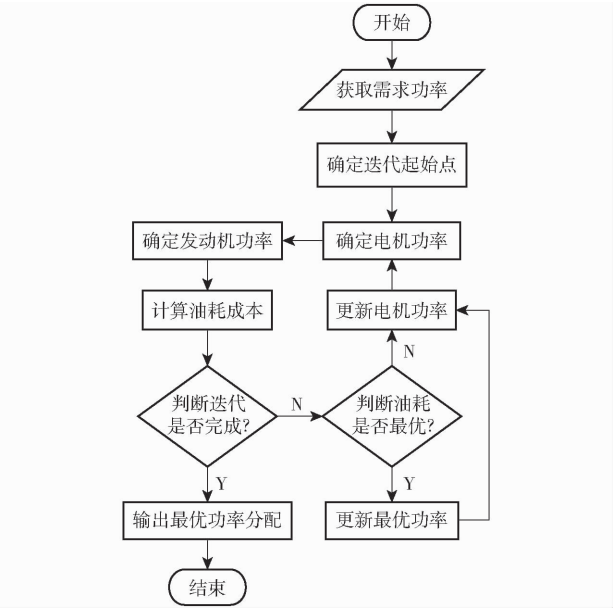

图 4　ECMS 求解流程图

Fig. 4　ECMS solution process flowchart

系统还需满足约束条件

$$\begin{cases} P_{eng_min} \leqslant P_{eng}(t) \leqslant P_{eng_max} \\ P_{mot_min} \leqslant P_{mot}(t) \leqslant P_{mot_max} \\ SOC_{\min} \leqslant SOC \leqslant SOC_{\max} \end{cases} \tag{2}$$

式中　P_{eng_min}——发动机功率的下限，kW

P_{eng_max}——发动机功率的上限，kW

P_{mot_min}——电机功率的下限，kW

P_{mot_max}——电机功率的上限，kW

$SOC_{\min}$——电池 SOC 的下限

$SOC_{\max}$——电池 SOC 的上限

$P_{mot}(t)$——t 时刻电机功率，kW

SOC——电池荷电状态

从式(1)中可以看出，等效因子的取值仅影响电池瞬时等效油耗的计算，而总瞬时等效燃油消耗为发动机瞬时油耗与电池瞬时等效油耗之和，当等效因子取值较小时，电池瞬时等效油耗较小，为满足总瞬时等效燃油消耗最小的目标，系统会趋向使用电机进行驱动；相反，当等效因子取值较大时，系统会趋向使用发动机进行驱动。所以不同的等效因子会对最终的燃油消耗产生明显的影响。

由于等效因子的全局寻优是一个非线性全局优化问题，因此选择遗传算法对等效因子进行优化。遗传算法模仿生物进化的机理，通过变异、交叉、选择来搜索系统优化的最优解或近似最优解。因此以遗传算法建立等效因子 s 的全局优化模型，其适应度函数 L 为

$$L = \min \int_0^t \dot{m}_{eq} \mathrm{d}t \tag{3}$$

使用遗传算法进行等效因子优化的参数设置如下：最大迭代次数设为 100，种群规模为 64 个个体，每代保留的精英个体数量为 10 个。遗传操作中交叉概率和变异概率均设置为 0.2。

在对种群的个体选择上采用轮盘赌选择法，即根据个体计算得到的适应度值进行概率选择，其概率为

$$P_i = \frac{L_{ki}}{\sum_{i=1}^{n} L_{ki}} \tag{4}$$

式中　P_i——第 i 个个体被选中的概率

L_{ki}——第 i 个个体的适应度

n——种群个体总数，取 64

根据上述理论，建立遗传算法优化流程如图 5 所示。

首先初始化种群，对等效因子进行赋值并运行 Simulink 模型，计算其适应度函数，进一步，通过交叉变异选择产生下一代种群直至迭代终止，此时等效因子寻优结束。

为了得到不同条件下的最优等效因子，以上文所建立的循环工况为基础，在不同的工作里程和电池电量下使用遗传算法对等效因子进行优化，得到如图 6 所示的不同条件下的最优等效因子。可以看出，随着工作里程的增加或电池电量的降低，等效因子的取值逐步变大，系统趋向使用发动机；相反，工作里程较短或电池电量较高时，等效因子取值相对较低，系统趋向于使用电机。说明在电池

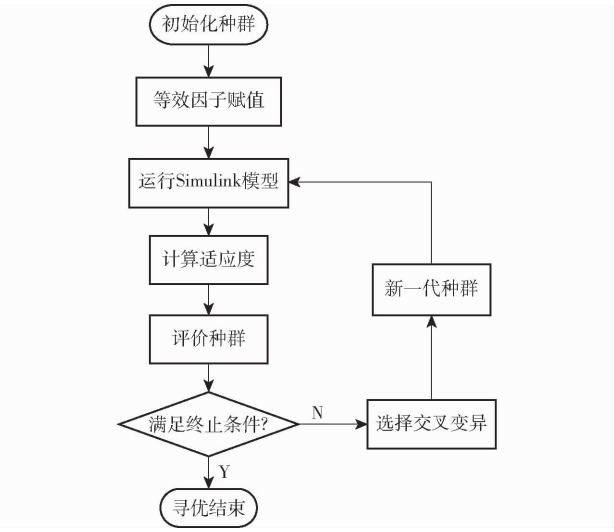

图 5 遗传算法优化流程图

Fig. 5 Genetic algorithm optimization flowchart

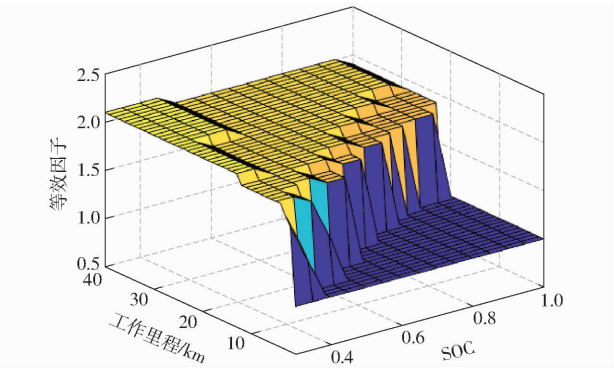

图 6 不同条件下最优等效因子 MAP 图

Fig. 6 Optimal equivalence factor MAP graph under different conditions

功率充足的情况下,电能的利用效率高于燃料的利用效率。

优化前后电池 SOC 和燃油量如图 7 所示,可以看出,使用遗传算法对等效因子进行优化后,电池 SOC 下降较慢,进入电量维持阶段的时间延后,整个工作时长基本处于电量消耗阶段;虽然优化前的燃油量在前期更低,但是可以看到,当电池电量下降到 0.2 进入电量维持阶段后,其燃油量明显提升。在整个仿真完成后,燃油量从 63.91 kg 下降到 57.97 kg,燃油经济性提高 10.24%。

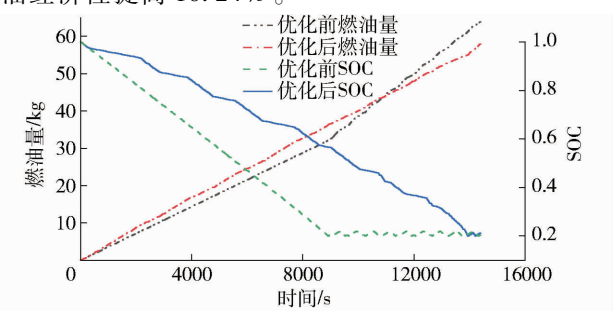

图 7 仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of simulation results

在整个运行周期/循环工况中,每个时刻发动机和电机转矩如图 8、9 所示,优化后的等效因子可以更合理地分配发动机和电机的转矩。

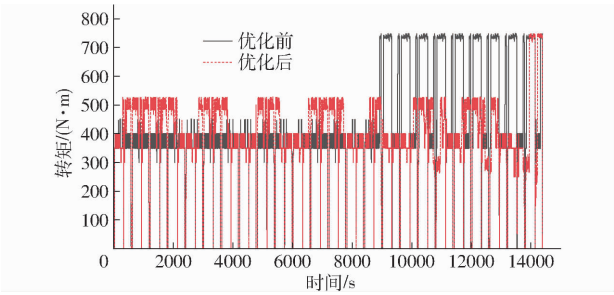

图 8 发动机转矩变化曲线

Fig. 8 Engine torque variation curves

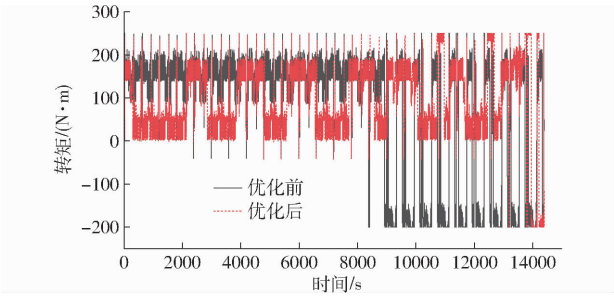

图 9 电机转矩变化曲线

Fig. 9 Motor torque variation curves

优化前后发动机工作点位如图 10、11 所示,可以看出,虽然优化前发动机工作点位大部分处于高效区,但是与优化后的工作点位相比,优化后的工作点位明显处于更加高效的区域,也证明了优化等效因子的方法是有效的。

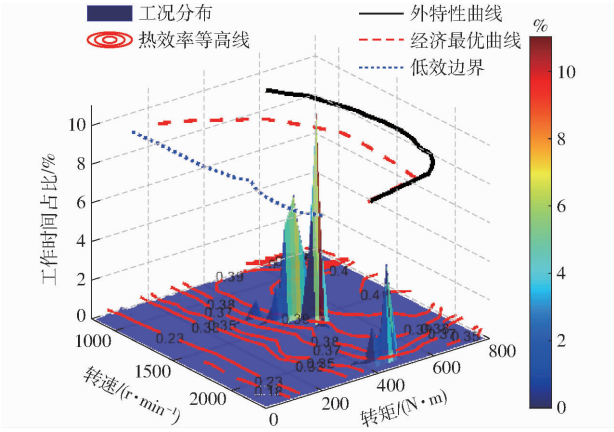

图 10 优化前发动机工作点位分布

Fig. 10 Engine working points before optimization

2.3 基于动态规划的等效因子优化

动态规划可以为复杂的问题提供最优的解决方案,属于多阶段决策,其具备最优性原则:不论初始状态和初始决策如何,剩余的决策都必须对第一个决策产生的状态构成最优策略。换言之,从最优轨迹的任意一点来看,剩余轨迹对于由该点出发的相应问题仍是最优的。

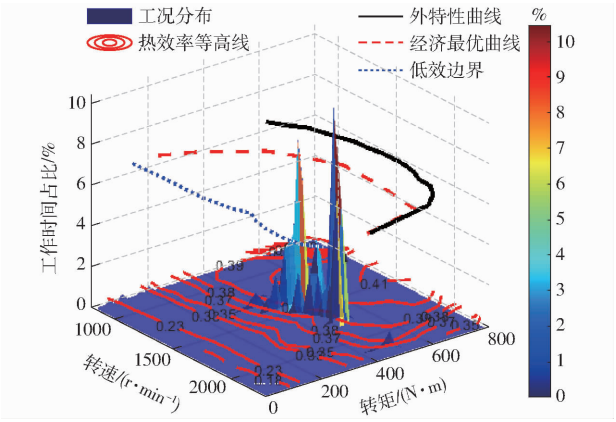

图 11　优化后发动机工作点位

Fig. 11　Engine condition distribution after optimization

基于所采用的油电混合-机液复合动力传动系统，选取发动机输出功率与峰值功率的比值作为控制变量 u，电池 SOC 为状态变量 x。如图 12 所示，x 和 u 是离散的，将连续行驶工况分为 k 个时间片段，每个片段时长为 Δk，时间间隔设定为 1 s。此时能量优化问题可转化为在 k 个时间片段内求解非线性离散系统最优解的过程，从而实现动态工况下的能量管理策略优化。

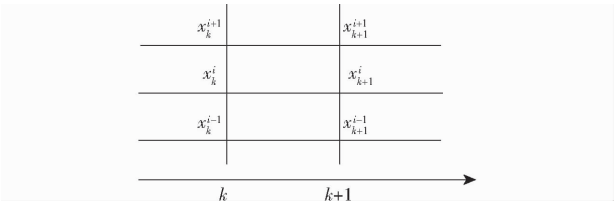

图 12　离散状态变量

Fig. 12　Discrete state variables

考虑 N 个时间步长的控制策略为

$$u = \{u_0, u_1, \cdots, u_{N-1}\} \tag{5}$$

从初始条件 x_0 开始，在控制变量 u 作用下的成本函数 $J(x_0, u)$ 为

$$J(x_0, u) = L_N(x_N) + \sum_{k=1}^{N-1} L_k(x_k, u_k) \tag{6}$$

式中　$L_k(x_k, u_k)$——瞬时成本函数

$L_N(x_N)$——N 时刻成本

采用最优策略获得的成本函数 $J^*(x_0)$ 为

$$J^*(x_0) = \min_u J(x_0, u) \tag{7}$$

对应的最优策略 u^* 为

$$u^* = \{u_1^*, u_2^*, \cdots, u_{N-1}^*\} \tag{8}$$

根据最优性原则，逆向求解第 k 阶段最优目标函数 $J^*(x_k)$ 为

$$J^*(x_k) = \min J^*(x_k) = \min(L(x_k, u_k) + J^*(x_{k+1})) \tag{9}$$

则在第 k 阶段，计算每个状态点 x_k^i 对应的最优目标函数 $J_k^*(x_k^i)$ 及最优控制量 y_{k+1} 的公式为

$$\begin{cases} J_k^*(x_k^i) = \min(L(x_k^i, u(x_k^i)) + J_{k+1}^*(y_{k+1})) \\ y_{k+1} = f(x_k^i, u(x_k^i)) \end{cases} \tag{10}$$

式中，y_{k+1} 为在离散时间系统中，当系统处于 k 时刻的状态量 x_k^i，受控制 $u(x_k^i)$ 输入作用后将演化为 $k+1$ 时刻的新状态，其状态转移过程如图 13 所示。值得注意的是，即便对 SOC 进行精细离散化处理，无论离散化步长如何缩小，实际计算值仍难以精确匹配预设的离散网格。为解决这种非精确对应问题，通常采用插值计算方法进行处理。

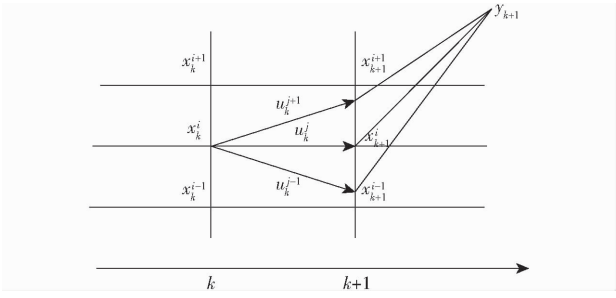

图 13　状态转移示例

Fig. 13　Example of state transition

根据式(10)可知，在逆向求解过程中，在计算最后一个阶段的最优目标函数时，因为不存在下一个阶段，因此瞬时成本即为目标函数，以此类推，即可求得其余阶段最优目标函数。

如图 14 所示，由于 k 阶段状态量 x_k^i 在控制量 $u(x_k^i)$ 作用下迁移的新状态量 y_{k+1} 难以落在提前划分好的离散状态网格上，此时，y_{k+1} 对应的最优目标函数 $J_{k+1}^*(y_{k+1})$ 可以通过 y_{k+1} 邻近状态量 x_{k+1}^{i+1} 和 x_{k+1}^i 对应的最优目标函数 $J_{k+1}^*(x_{k+1}^{i+1})$ 和 $J_{k+1}^*(x_{k+1}^i)$ 插值获得。以此类推即可获得全部状态点对应的最优目标函数及相应的控制量，逆向求解过程结束。

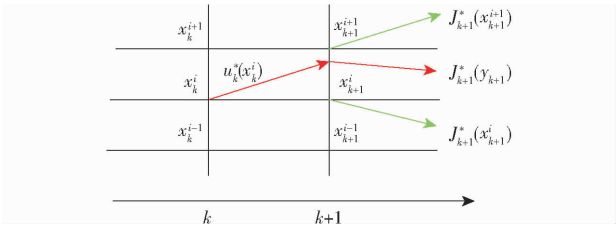

图 14　最优目标函数

Fig. 14　Optimal objective functio

由于逆向求解过程中保存了所有状态点对应最优控制量，则以初始荷电状态 SOC(0) 为起点，可通过计算求得下一时刻状态量 SOC(1)，公式为

$$\begin{cases} I = \dfrac{V - \sqrt{V^2 - 4RP_{bat}}}{2R} \\ P_{bat} = IV \\ SOC(k+1) = SOC(k) - \dfrac{\int_0^t I(t)\,\mathrm{d}t}{Q} \end{cases} \tag{11}$$

式中 I——电流,A V——电池电压,V

R——电池内阻,Ω

SOC——电池电量

P_{bat}——电池功率,W

Q——电池容量,A·h

如图15 所示,新状态 y_{k+1}并未精确落在预设的离散网格点上,而是位于 x_{k+1}^{i+1}和 x_{k+1}^{i}相邻两个离散节点构成的区间内。与动态规划逆向计算过程类似,y_{k+1}的最优控制量仍通过插值方法获得。

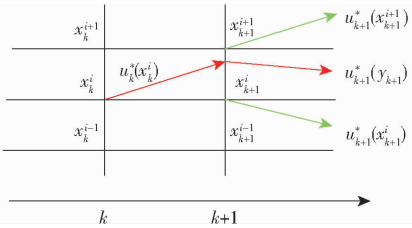

图 15 最优控制量

Fig. 15 Optimal control quantity

以此类推即可获得完整的控制序列及 SOC 轨迹,正向计算过程结束。将电池 SOC 的初始值设置为 1,工况为在上文中制定的工况下进行 24 次循环,仿真的时间为 14 400 s(相当于半个工作日的工作时间),得到参考 SOC 轨迹如图 16 所示。

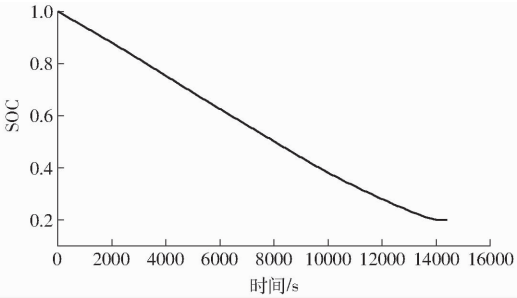

图 16 参考 SOC 曲线

Fig. 16 Referred SOC curve

在获取近似最优 SOC 曲线后,以此作为参考,计算实际 SOC 与其偏差并通过 PI 控制对等效因子进行调节,其公式可表示为

$$\begin{cases} s(t) = s_0 + s_{\text{add}} \\ s_{\text{add}} = K_P \Delta SOC + K_I \int \Delta SOC \mathrm{d}t \\ \Delta SOC = SOC_{\text{ref}}(t) - SOC(t) \end{cases} \tag{12}$$

式中 s_0——初始等效因子

s_{add}——修正等效因子

K_P——比例系数

ΔSOC——实际 SOC 与参考 SOC 的差值

K_I——积分系数

$SOC_{\text{ref}}(t)$——参考 SOC

$SOC(t)$——实际 SOC

优化前后电池 SOC 和燃油量变化如图 17 所示,可以看出,使用动态规划作为参考的优化方法在整个周期的燃油量都比优化之前低,在整个仿真完成后,燃油量从 57.97 kg 下降到 57.06 kg,燃油经济性提高 1.59%。证明了能量管理策略的有效性。而 SOC 同样在周期快要结束时进入电量维持阶段,避免了电量维持阶段过长。

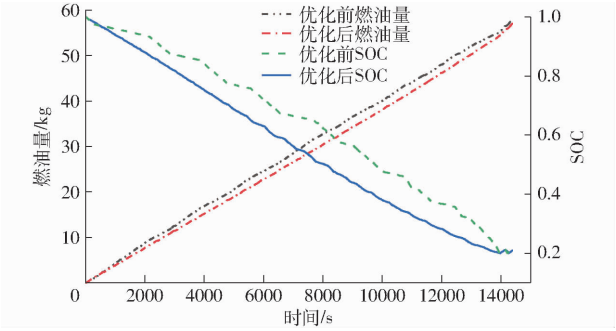

图 17 优化前后仿真结果对比

Fig. 17 Comparison of simulation results before and after optimization

在整个运行周期后,每个时刻发动机和电机转矩如图 18、19 所示,优化后的等效因子可以使 ECMS 控制电机在整个运行周期内更好地辅助柴油机实现高效输出。

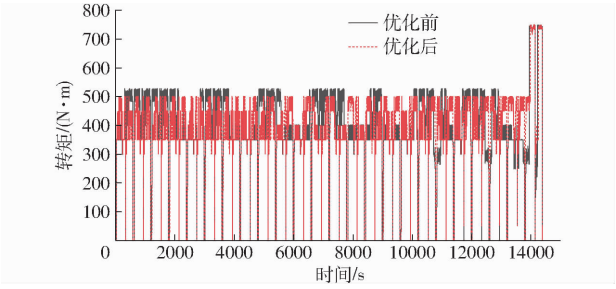

图 18 发动机转矩优化前后变化曲线

Fig. 18 Curves of engine torque variation before and after optimization

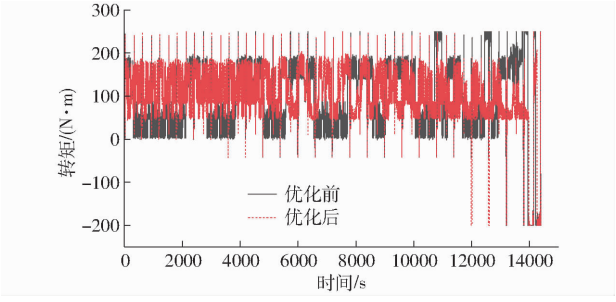

图 19 电机转矩优化前后变化曲线

Fig. 19 Curves of motor torque variation before and after optimization

优化前后发动机工作点位如图 11、20 所示。可以看出,优化后发动机工作点位基本处于热效率 0.39 ~ 0.40 之间,而优化前有部分点位处于 0.37 ~ 0.38 之间,优化后有更多发动机工作点位处于高效区域。

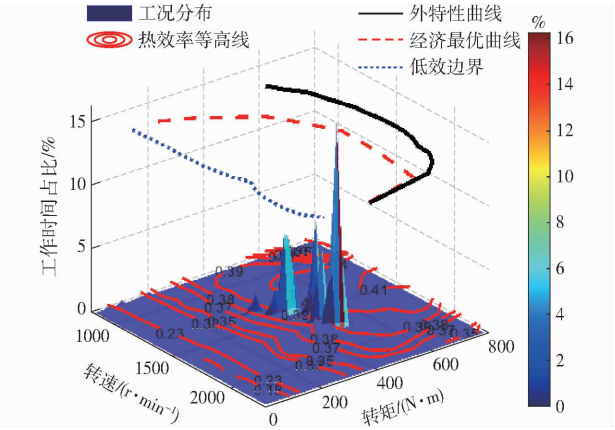

图 20　融合动态规划后发动机工作点位

Fig. 20　Engine condition distribution after optimization

然而，动态规划依赖已知信息，在实际工作时长与参考 SOC 时长不同时，难以直接应用。因此，探究动态规划获取最优 SOC 轨迹的规律。通过对不同循环次数的工况进行动态规划处理，得到不同循环次数下参考 SOC，如图 21 所示。

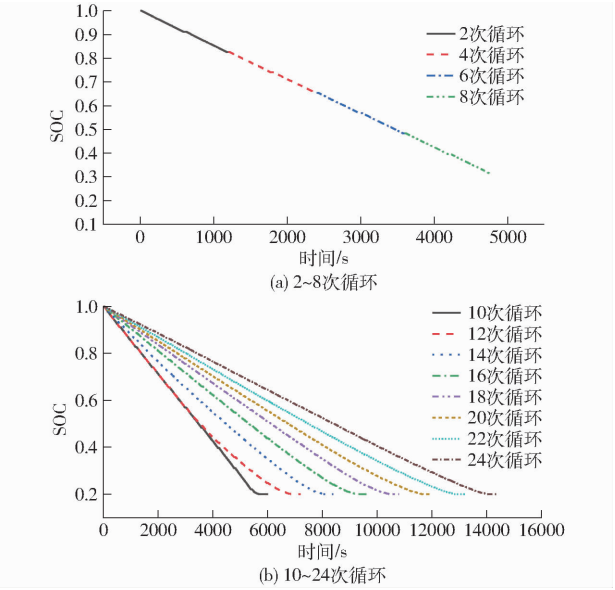

图 21　不同循环次数下 SOC 轨迹

Fig. 21　SOC trajectories at different cycle numbers

本研究通过分析混合动力系统在不同工作时长下的能量管理特征，发现 SOC 轨迹呈现一定规律。当工作周期较短时（t 小于 10 次循环），SOC 维持近似恒定的运行轨迹，这归因于电池储能单元具备充足的荷电容量，系统控制策略优先采用全电驱动模式；而当工作周期延长至临界阈值以上（t 大于 10 次循环），SOC 轨迹则演变为从初始值至终值的准线性衰减模式，此时能量管理系统通过动态协调发动机与电机双动力源的功率分配，实现系统效率的全局优化。

基于上述运行规律，当实际工作时长与仿真时长不同时，本研究提供一种 SOC 参考轨迹构建方法：对于短周期工况，直接采用动态规划算法生成的最优 SOC 轨迹；对于长周期工况，则建立连接 SOC 初始值和终值的线性参考曲线作为近似最优解。为验证该方法的有效性，对其进行仿真对比，结果如表 2 所示。

表 2　不同方法燃油量对比

Tab. 2　Comparison of fuel consumption across different methods

循环次数	燃油量/kg		
	遗传算法	近似动态规划	动态规划
10	24.58	19.32	18.29
12	29.40	25.46	24.31
14	34.09	30.34	28.64
16	38.66	35.59	34.13
18	43.48	41.07	39.61
20	48.04	46.32	45.24
22	52.78	52.60	51.27
24	57.97	57.71	57.06

可以看出，建立连接 SOC 初始值和终值的线性参考曲线作为近似最优解的方法虽然节油效果不如动态规划，但优于仅使用遗传算法优化的方法。

3　结论

（1）根据混合动力拖拉机的初始电量以及拖拉机的作业里程，采用遗传算法对等效因子进行全局离线优化，使用优化后的等效因子实施等效消耗最小策略，可实现 10.24% 的燃油经济性提升，且更多发动机的工作点分布在高效区域。

（2）通过结合遗传算法和动态规划提出的混合动力拖拉机自适应等效消耗最小策略，根据 SOC 动态调整等效因子全局优化模型，无须考虑等效因子和行驶工况之间的关系，避免离线确定的等效因子只在单一驾驶条件下有效的问题，通过 SOC 参考轨迹对等效因子进行动态修正，实现额外 1.59% 的油耗降低，提高了等效因子对不同工况的适应性。

（3）当实际作业工况与参考 SOC 轨迹动态规划所用工况时长不同时，采用拟合的近似最优 SOC 轨迹作为参考，燃油经济性接近原效果。所设计的混合动力拖拉机能量管理策略能够更加合理地分配发动机和电机的转矩，提高燃油经济性。

参　考　文　献

[1]　谢斌，武仲斌，毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报，2018，49(8)：1－17.

Xie Bin, Wu Zhongbin, Mao Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):1 - 17. (in Chinese)

[2] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1):348 - 364.
Liu Mengnan, Lei Shenghui, Zhao Jinghui, et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(S1):348 - 364. (in Chinese)

[3] 尤国贵,卢剑伟,张国军,等. 插电式混合动力汽车能量管理策略研究综述[J]. 机械工程学报, 2025,61(4):195 - 218.
You Guogui, Lu Jianwei, Zhang Guojun, et al. Review of research on energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025,61(4):195 - 218. (in Chinese)

[4] Kang H, Jung D, Kim M, et al. Study of energy management strategy considering various working modes of plug-in hybrid electric tractor[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers—B,2013,37(2):181 - 186.

[5] 王春光. 并联式混合动力拖拉机能量管理策略研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
Wang Chunguang. Study on energy management strategy for the parallel hybrid electric tractor[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology,2014. (in Chinese)

[6] 骆光炬. 串联式柴电混合动力拖拉机的能量管理策略研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
Luo Guangju. Research on energy management strategy of series diesel-electric hybrid tractor[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[7] Lee H, Kim J, Park Y, et al. Rule-based power distribution in the power train of a parallel hybrid tractor for fuel savings[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing—Green Technology, 2016, 3: 231 - 237.

[8] Vu N, Messier P, Nguyễn B, et al. Energy-optimization design and management strategy for hybrid electric non-road mobile machinery: a case study of snowblower[J]. Energy, 2023, 284: 129249.

[9] Zhang J,Feng G, Liu M, et al. Research on global optimal energy management strategy of agricultural hybrid tractor equipped with CVT[J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(5):127.

[10] 张俊江,冯港辉,徐立友,等. 基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机节能控制[J]. 农业机械学报,2023,54(5):396 - 406.
Zhang Junjiang, Feng Ganghui, Xu Liyou, et al. Energy-saving control of hybrid tractor based on Pontryagin's minimum principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(5):396 - 406. (in Chinese)

[11] 周润东. 不同工况下串联式混合动力拖拉机能量分配策略研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
Zhou Rundong. Study on distribution strategy of tandem hybrid tractor under working conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[12] Wang S, Huang X, Lopez J M, et al. Fuzzy adaptive-equivalent consumption minimization strategy for a parallel hybrid electric vehicle[J]. IEEE Access, 2019, 7: 133290 - 133303.

[13] Amir R, Jeffrey B, Zhou B. Estimation of the ECMS equivalent factor bounds for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(6): 2198 - 2205.

[14] Zhang J,Feng G, Yan X, et al. Cooperative control method considering efficiency and tracking performance for unmanned hybrid tractor based on rotary tillage prediction[J]. Energy, 2024, 288: 129874.

[15] 窦海石, 张幽彤, 艾强,等. 面向耦合分流动力构型的拖拉机犁耕工况控制策略[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 41 - 49.
Dou Haishi, Zhang Youtong, Ai Qiang, et al. Control strategy for hybrid tractor plow conditions oriented to coupled-split dynamic configuration[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 41 - 49. (in Chinese)

[16] Yang N, Han L, Bo L, et al. Real-time adaptive energy management for off-road hybrid electric vehicles based on decision-time planning[J]. Energy, 2023, 282: 128832.

[17] Amin G,Hossien M, Sousso K, et al. An intelligent energy management strategy for an off-road plug-in hybrid electric tractor based on farm operation recognition[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2021, 11(4): 333 - 347.

[18] Hyukjoon K, Monkia I. System characteristics analysis for energy management of power-split hydraulic hybrids[J]. Energies, 2020,13(7):1387.

[19] 曾小华, 杨南南, 王庆年, 等. 商用车混合动力系统关键技术[M]. 北京:机械工业出版社,2019.

[20] 朱镇, 蔡英凤, 陈龙, 等. 多模式机液复合传动装置设计方案分析[J]. 中国公路学报,2020,33(8):51 - 62.
Zhu Zhen,Cai Yingfeng, Chen Long, et al. Design schemes analysis of multi-mode hydro-mechanical composite transmission devices[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(8):51 - 62. (in Chinese)

[21] 张明柱,王界中,王建华,等.提高燃油经济性的拖拉机变速控制策略[J]. 农业工程学报,2020,36(1):82 - 89.
Zhang Mingzhu, Wang Jiezhong, Wang Jianhua, et al. Speed changing control strategy for improving tractor fuel economy[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 82 - 89. (in Chinese)

[22] 朱镇, 蔡英凤, 陈龙, 等. 一种混合动力多模式切换的无级变速传动系统:CN109723789B[P]. 2021 - 07 - 20.

[23] Pieke C, Stark W, Pfister F, et al. DLG power mix on the dynamometer[J]. ATZ Offhighway Worldwide, 2017, 10(2): 26 - 31.

[24] 卢绰, 郭振杰, 刘洪波,等. 国内市场国外品牌 177 ~ 198 kW 拖拉机技术特点及应用[J]. 拖拉机与农用运输车,

2023，50(4)：1－6.
Lu Chuo，Guo Zhenjie，Liu Hongbo，et al. Technical characteristics of foreign brands of tractor above 177 ~ 198 kW and application in the domestic market[J]. Tractor & Farm Transporter，2023，50(4)：1－6.（in Chinese）
[25] EPA Nonregulatory Nonroad Duty Cycles[EB/OL].（2023－10－17）[2026－02－22]. https：//www.epa.gov/moves/epa-nonregulatory-nonroad-duty-cycles.
[26] Kong Y，Xu N，Liu Q，et al. A data-driven energy management method for parallel PHEVs based on action dependent heuristic dynamic programming（ADHDP）model[J]. Energy，2023，265：126306.
[27] 李同辉，谢斌，王东青，等.双电机驱动电动拖拉机实时自适应能量管理策略研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊2)：530－543.
Li Tonghui，Xie Bin，Wang Dongqing，et al. Real-time adaptive energy management strategy for dual-motor-driven electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(S2)：530－543.（in Chinese）
[28] 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）

（上接第 356 页）

[16] Kapdi D，Bhavsar N，Rudakiya D. Developing sustainable and energy efficient process to obtain high purity cellulose and its value-added chemicals from rice straw[J]. Bioresource Technology，2024，25：101732.
[17] Segal L，Creely J J，Martin A E，et al. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the x-ray diffractometer[J]. Textile Research Journal，1959，29(10)：786－794.
[18] Scherrer P. Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen[J]. Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen，Mathematisch-Physikalische Klasse，1918，2：98－100.
[19] Zhang S，Lin Q，Wang X，et al. Bamboo cellulose fibers prepared by different drying methods：structure-property relationships[J]. Carbohydrate Polymers，2022，296：119926.
[20] Shinde S D，Meng X，Kumar R，et al. Recent advances in understanding the pseudo-lignin formation in a lignocellulosic biorefinery[J]. Green Chemistry，2018，20(10)：2192－2205.
[21] 高崇风，韩鲁佳. 超微粉碎/NaOH 同步处理麦秸纤维素分离特性研究[J]. 农业机械学报，2024，55(2)：346－352，371.
Gao Chongfeng，Han Lujia. Effect of ultrafine-grinding/NaOH synchronous treatment on the separation of wheat straw cellulose[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(2)：346－352，371.（in Chinese）
[22] Lu H，Zhang L，Yan M，et al. Screw extrusion pretreatment for high-yield lignocellulose nanofibrils（LCNF）production from wood biomass and non-wood biomass[J]. Carbohydrate Polymers，2022，277：118897.
[23] Chen X，Yu J，Zhang Z，et al. Study on structure and thermal stability properties of cellulose fibers from rice straw[J]. Carbohydrate Polymers，2011，85(1)：245－250.
[24] Jiang F，Hsieh Y L. Chemically and mechanically isolated nanocellulose and their self-assembled structures[J]. Carbohydrate Polymers，2013，95(1)：32－40.
[25] Wohlert M，Benselfelt T，Wågberg L，et al. Cellulose and the role of hydrogen bonds：not in charge of everything[J]. Cellulose，2022，29(1)：1－23.
[26] 艾文可，高崇风，蒋蘋，等. NMMO 溶胀-挤压处理对稻秸纤维解构及其材料性能的影响[J]. 农业工程学报，2026，42(5)：330－340.
Ai Wenke，Gao Chongfeng，Jiang Ping，et al. Effects of NMMO swellingextrusion treatment on the structural deconstruction and material properties of rice straw fibers[J]. Transactions of the CSAE，2026，42(5)：330－340.（in Chinese）
[27] Wei J，Long Y，Li T，et al. Exploring hydrogen-bond structures in cellulose during regeneration with anti-solvent through two-dimensional correlation infrared spectroscopy[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，267：131204.
[28] Ai W，Gao C，Jiang P，et al. Effect of NMMO swelling-extrusion treatment on rice straw microfiber separation under different component conditions[J]. Cellulose，2026，33：2729－2747.
[29] Ding Q，Rao J，Lv Z，et al. Efficient preparation of holocellulose nanofibers and their reinforcement potential[J]. Cellulose，2022，29(15)：8229－8242.