doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.067

基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机 ECVT 能量管理策略改进方法与验证

张　凯[1]　王　琳[2]　邓晓亭[1]　鲁　杨[1]　鲁植雄[1]　徐晓美[3]　程　准[3]　张渤衢[1]

(1.南京农业大学工学院, 南京 210031; 2.智能农业动力装备全国重点实验室, 洛阳 471039;
3.南京林业大学汽车与交通工程学院, 南京 210037)

摘要: 混联式混合动力拖拉机的行星齿轮式电动无级变速(Electronic continuously variable transmission,ECVT)构型多节点与多动力源布置、旋耕负载输出端(Power take-off,PTO)与拖拉机行驶速度解耦输出特性使得能量管理策略需满足拖拉机变工况的需求,本文以杠杆拓扑法生成的混联式混合动力拖拉机输出分流(Output-split,OS)-ECVT 构型为研究对象,阐述构型工作原理与运动学特性。提出改进的基于庞特里亚金极小值原理(Pontryagin's minimum principle,PMP)能量管理策略,以克服传统基于 PMP 的能量管策略不满足终端极小值判断条件时需重新迭代整个循环工况,进而导致策略无法满足混合动力系统实时求解需求的弊端。首先,建立系统状态方程,保证极小值轨迹受到状态变量约束;然后,根据庞特里亚金极小值原理完成哈密尔顿方程构建;最后,改变策略求解时极小值条件判断位置,并通过数学方法证明改进策略满足庞特里亚金极小值原理求解的必要条件。分别在犁耕与旋耕工况下完成节能控制仿真,结果表明,本文提出的改进策略与传统策略具备相同性与相当性,证明了改进策略具备更大的应用空间;改进策略较最佳经济性曲线(Optimal operating line,OOL)策略犁耕工况下等效燃油消耗量降低约 8.39%,旋耕工况下等效燃油消耗量降低约 15.34%,有效提升了大功率混合动力拖拉机燃油经济性;犁耕工况下驱动电机 MG2 能发挥更大范围调速特性,整机无级变速性能更加优异;犁耕与旋耕工况下,整机能量转换更加经济,保证了整机具备更加高效的功率输出分流性能。

关键词: 混合动力拖拉机; 庞特里亚金极小值原理; 无级变速; 输出分流; 节能控制

中图分类号: TH132.425;S219.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)09-0766-14　　**OSID**:

Improved Method and Verification of Energy Management Strategy of Hybrid Tractor ECVT Based on Pontryagin's Minimum Principle

ZHANG Kai[1]　WANG Lin[2]　DENG Xiaoting[1]　LU Yang[1]　LU Zhixiong[1]　XU Xiaomei[3]
CHENG Zhun[3]　ZHANG Boqu[1]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Luoyang* 471039, *China*
3. *College of Automobile and Traffic Engineering*, *Nanjing Forestry University*, *Nanjing* 210037, *China*)

Abstract: The multi-node and multi-power source arrangement of electronic continuously variable transmission (ECVT) configuration of planetary gear of series-parallel hybrid tractor, and the decoupling output of power take-off (PTO) and tractor speed make the energy management strategy meet the needs of off-design tractor. Therefore, taking the OS (output-split)-ECVT configuration of series-parallel hybrid tractor generated by lever topology method as the research object, the working principle and kinematics characteristics of the configuration were expounded. An improved energy management strategy based on Pontryagin's minimum principle (PMP) was proposed, so as to overcome the disadvantage that the traditional energy management strategy based on PMP cannot meet the terminal minimum judgment condition and needed to iterate the whole cycle condition again, which led to the failure of the strategy to meet the real-time solution requirements of the hybrid power system. Firstly, the state equation of the system was established to ensure that the minimum trajectory was constrained by state variables. Then

收稿日期: 2024-06-15　修回日期: 2024-07-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001202)和智能农业动力装备全国重点实验室开放课题(SKLIAPE2023019)

作者简介: 张凯(1997—),男,硕士生,主要从事混合动力拖拉机构型优选和节能控制研究,E-mail: ZHANG_k1001@163.com

通信作者: 鲁植雄(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事混合动力技术和车辆电子控制技术研究,E-mail: luzx@njau.edu.cn

according to the Pontryagin's minimum principle, the Hamilton equation was constructed. Finally, the judgment position of the minimum condition was changed when the strategy was solved, and it was proved by mathematics that the improved strategy met the necessary conditions for solving the Pontryagin's minimum principle. The simulation of energy-saving control was completed under plough and rotary tillage conditions respectively. The results showed that the improved strategy proposed had the same and equivalent characteristics as the traditional strategy, which proved that the improved strategy had greater application space. Compared with optimal operating line (OOL) strategy, the improved strategy reduced the equivalent fuel consumption by about 8.39% under ploughing conditions and by about 15.34% under rotating tillage conditions, which effectively improved the fuel economy of high-powered hybrid tractors. MG2 can play a wider range of speed regulation characteristics under ploughing conditions, and the stepless speed change performance of the whole machine was more excellent. Under plough and rotating tillage conditions, the energy conversion of the whole machine was more economical, which ensured that the whole machine had more efficient power output and shunt performance.

Key words: hybrid tractor; Pontryagin's minimum principle; variable transmission; output-split; energy-saving control

0　引言

随着能源紧缺、环境污染严重问题的出现，国家对农业动力机械发展提出新的要求，新型农机装备与农业机械节能减排技术已成为农机领域新的发展方向[1-2]。拖拉机由于动力强等优点被作为农业机械领域的主要作业设备[3]，其节能转型技术的发展能直接保证农业机械领域的绿色可持续发展，在此背景下，混合动力拖拉机逐渐兴起[4]。目前，大功率混合动力拖拉机共有串联式、并联式与混联式 3 种架构[5-6]，其中串联式混合动力拖拉机作业过程中，发动机仅用于驱动发电机发电，整机动力均来源于驱动电机，导致大功率串联式混合动力拖拉机需装备大容量动力电池，增大了拖拉机体积；并联式混合动力拖拉机可实现发动机与电机动力的耦合输出，有效增加了拖拉机动力性，但其功率分流与 ECVT 性能仍然较差；而混联式混合动力拖拉机有效融合串联式与并联式的优点，特别是行星齿轮式构型的多节点布置，为满足 PTO 与整机行驶速度解耦输出提供解决方案[7]，同时，具备性能优异的功率分流与无级变速性能[8]。

能量管理策略作为混合动力拖拉机的关键节能减排技术，其性能直接决定整机经济性[9]。目前，能量管理策略一般可分为基于规则与基于优化两类[10]。基于规则的能量管理策略一般通过设置逻辑判断值或控制规则表等方式，进而确定动力部件的运行状态，具备简单、快捷的特点。方树平等[11]以串联式混合动力拖拉机为研究对象，提出了模糊控制的能量管理策略，有效提升了拖拉机的燃油经济性。骆光矩[12]提出了适用于串联式混合动力拖拉机的模糊推理式能量管理策略，并分别与 SOC 功率跟随式、定点式策略进行了对比，结果表明，模糊推理式整机燃油经济性分别提高 20.92% 与 23.37%。XU 等[13]为提升串联式混合动力拖拉机经济性，提出了一种多工作点模糊 PID 控制策略，并分别在犁耕与运输工况下完成了节能控制仿真，结果表明，多工作点模糊 PID 控制策略能取得显著节能效果。李妍颖[14]针对串联式混合动力拖拉机，提出了非线性规划遗传算法优化恒温器式的能量管理策略，有效降低了发动机的累计燃油消耗量。王春光[15]提出了模糊控制策的并联式混合动力拖拉机能量管理策略，仿真结果验证了该策略的正确性。基于规则的能量管理策略虽然具备快速求解的特点，较基于优化的手段，其节能潜力相对有限[16]。目前，基于优化的策略已被广泛应用于混合动力拖拉机中。YAN 等[17]针对串联式混合动力拖拉机，提出了基于动态规划算法的能量管理策略，使发动机运行状态更加合理。ZHANG 等[18]以并联式混合动力拖拉机为研究对象，提出一种基于瞬时优化的能量管理策略，保证了发动机与电机可以工作于高效区。窦海石等[19]针对耦合分流构型，提出了基于马尔科夫决策的能量管理，实现了整机高效节能的目的。以上能量管理策略的研究主要集中于以串、并联式混合动力拖拉机为研究对象，很少针对混联式混合动力拖拉机进行研究。特别是行星齿轮式 ECVT 构型多节点与多动力源布置、PTO 输出转速与拖拉机行驶速度解耦输出需求对能量管理策略求解提出更加复杂的需求。文献[19]虽针对耦合分流构型策略进行了一定研究，但马尔科夫决策模型较复杂，计算量较大，同时，该研究面向犁耕工况，无旋耕作业的 PTO 输出转速与整机行驶速度解耦输出的进一步描述。基于庞特里亚金极小值原理的能量策略通过评价指标与状态方程构造出哈密尔顿方程，进而求解出满足正则方程的最优控制变量序列[20-21]，策略建模简单，便于多阶段决策问题求解。但对于传统基于庞特里亚金极小值原理的能量管理

策略,当系统终端状态变量值不满足极值条件时,策略需重新调整协态变量,并迭代整个循环工况[22],极大程度上增加了求解难度,且策略无法满足实时求解需求。

为此,本文以混联式混合动力拖拉机 OS－ECVT 构型为研究对象,对构型工作原理及动力学特性进行阐述。对基于 PMP 的能量管理策略进行改进,改变传统基于 PMP 能量管理策略的极小值判断条件位置,使得基于 PMP 的能量管理策略在不满足极小值判断条件时无需重新迭代整个工况,保证基于 PMP 能量管理策略可满足实时求解的需求,并完成数学证明。分别在犁耕与旋耕工况下进行节能控制仿真,验证改进基于 PMP 的能量管理策略能有效提升大功率混合动力拖拉机燃油经济性。

1 混合动力拖拉机 OS－ECVT 构型

以杠杆拓扑法生成的混合动力拖拉机输出分流 ECVT 构型为研究对象[23]。首先,将行星齿轮机构等效为一个二维平面杠杆,并将太阳轮、行星架与齿圈分别等效为节点 S、节点 C 与节点 R[24],同时,从混合动力拖拉机动力及作业需求出发,分别考虑发动机节点、电机 MG1 节点、电机 MG2 节点、驱动桥输出轴节点 OUT 及 PTO 节点,利用拓扑学[25],生成不同拓扑方案,优选出最佳的基础拓扑方案,并完成混合动力拖拉机 ECVT 构型最终方案设计。基于杠杆拓扑法生成的混合动力拖拉机拓扑构型如图 1 所示。

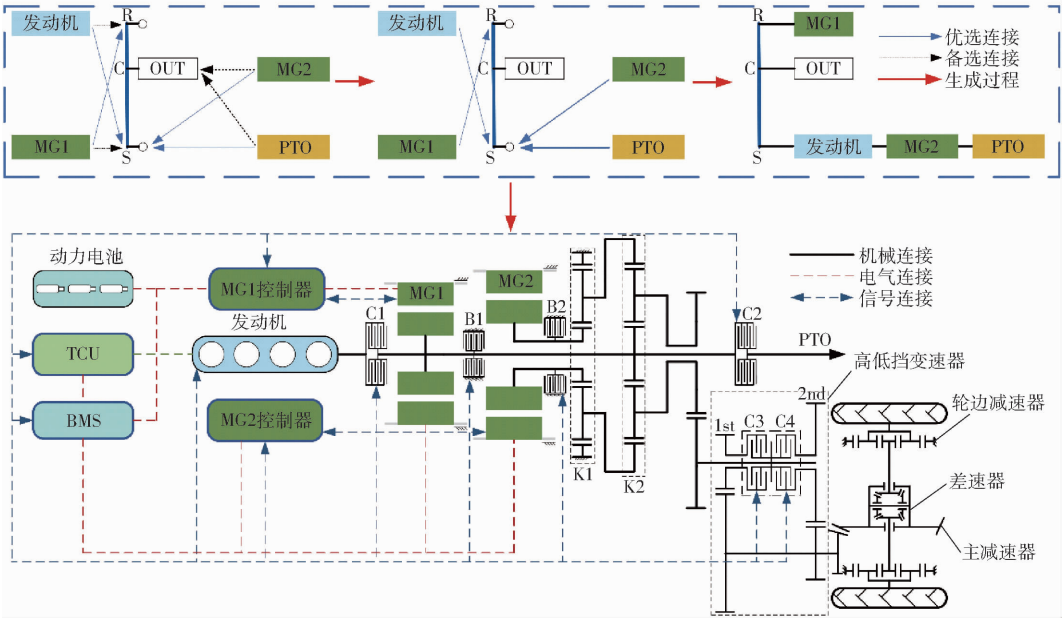


图 1 混合动力拖拉机 OS－ECVT 构型

Fig. 1 OS－ECVT configuration of hybrid tractor

该构型传动系统包括前行星排 K1、后行星排 K2、高低挡变速器、主减速器、差速器与轮边减速器。其中,前行星排 K1 齿圈为固定端,为定轴轮系排,后行星排 K2 为周转轮系排。动力部件主要由发动机、电机 MG1 与驱动电机 MG2 组成,电机 MG1 常处于不工作或发电状态,但在特定工作模式下或发动机输出功率难以平衡负载时,电机 MG1 可为驱动电机。当混合动力拖拉机作业时,发动机输出功率与电机 MG1 输出功率同轴耦合后输入后行星排 K2 的太阳轮,驱动电机 MG2 输出功率输入前行星排 K1 的太阳轮,并经前行星排 K1 行星架输入于后行星排 K2 齿圈,两功率流汇流后由后行星排 K2 输出,因此,构型具备功率输出分流性能。同时,利用后行星排双输入自由度特性,驱动电机 MG2 实时调节发动机转速,进而使得发动机转速与拖拉机需求车速解耦输出,实现电动无级变速(ECVT)。

该构型还包括 4 个离合器与 2 个制动器,分别为发动机离合器 C1、PTO 离合器 C2、低挡离合器 C3、高挡离合器 C4、制动器 B1 与制动器 B2。其中,发动机离合器 C1 决定发动机是否参与构型驱动;PTO 离合器保证了混合动力拖拉机旋耕作业模式的正常开启;低挡离合器 C3 与高挡离合器 C4 则保证了高低挡变速器的正常运行;制动器 B1 与 B2 分别为构型的不同工作模式而设置。

该构型整机控制器 TCU 分别与发动机、电池管理系统 BMS、MG1 控制器、MG2 控制器信号连接,MG1 控制器、MG2 控制器分别与电机 MG1、MG2 信号连接,进而实时输出控制信号,保证动力源的合理运转,提高整机经济性。

该构型共具备 4 种工作模式，分别为纯电动模式 1、纯电动模式 2、发动机直接驱动模式及混合动力模式。纯电动模式 1 时，发动机离合器 C1 断开，制动器 B1 断开，制动器 B2 闭合，由 MG1 输出动力满足负载需求；纯电动模式 2 时，发动机离合器 C1 断开，制动器 B1 闭合，制动器 B2 断开，此时，后行星排 K2 的太阳轮被制动器 B1 锁止，其由周转轮系转化为定轴轮系，混合动力拖拉机的需求动力由驱动电机 MG2 单独满足；发动机直接驱动模式时，发动机离合器 C1 接合，制动器 B1 断开，制动器 B2 闭合，该模式下，发动机为主要动力源，电机 MG1 不工作或处于发电状态，但当发动机不能平衡负载需求时，MG1 可作为驱动电机，与发动机动力同轴耦合后共同平衡负载，同时，该模式具备开启旋耕作业模式的能力，即 PTO 离合器根据作业类型接合或断开；混合动力模式时，发动机离合器 C1、制动器 B1、制动器 B2 均断开，该模式下，由发动机、电机 MG1 与驱动电机 MG2 共同平衡负载需求，其中，驱动电机 MG2 持续调节发动机转速点，电机 MG1 则不断调节发动机输出转矩，使得发动机输出转速、转矩与需求速度和需求转矩解耦，构型具备高效的 ECVT 性能，并提升拖拉机燃油经济性。

动力部件参数如表 1 所示。

表 1　动力部件参数

Tab. 1　Power component parameters

部件	参数	数值
柴油发动机	额定功率/kW	90
	额定转速/(r·min^{-1})	2 200
	最大转矩/(N·m)	520
MG1	额定功率/kW	70
	额定转速/(r·min^{-1})	2 400
	额定转矩/(N·m)	280
MG2	额定功率/kW	70
	额定转速/(r·min^{-1})	2 400
	额定转矩/(N·m)	280

综上所述，各工作模式运动学方程为：

纯电动模式 1

$$\begin{bmatrix} I_{\mathrm{MG2}}+I_{\mathrm{K1}}+I_{R2} & 0 \\ 0 & I_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{\mathrm{MG2}} \\ \dot{\omega}_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}= F\begin{bmatrix} -R_{R2} \\ R_{S2}+R_{R2} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} T_{\mathrm{MG2}} \\ -T_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix} \tag{1}$$

纯电动模式 2

$$\begin{bmatrix} I_{\mathrm{MG1}}+I_{S2} & 0 & 0 \\ 0 & I_{\mathrm{MG2}}+I_{K1}+I_{R2} & 0 \\ 0 & 0 & I_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{\mathrm{MG1}} \\ \dot{\omega}_{\mathrm{MG2}} \\ \dot{\omega}_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}= F\begin{bmatrix} -R_{S2} \\ -R_{R2} \\ R_{S2}+R_{R2} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} T_{\mathrm{MG1}} \\ T_{\mathrm{MG2}} \\ -T_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

发动机直接驱动模式

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_e+I_{\mathrm{MG1}}+I_{S2} & 0 \\ 0 & I_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\omega}_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}= F\begin{bmatrix} -R_{S2} \\ R_{S2}+R_{R2} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} T_e+T_{\mathrm{MG1}} \\ -T_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix} & (\text{非 PTO}) \\ \begin{bmatrix} I_e+I_{\mathrm{MG1}}+I_{S2}+I_{\mathrm{PTO}} & 0 \\ 0 & I_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\omega}_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}= F\begin{bmatrix} -R_{S2} \\ R_{S2}+R_{R2} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} T_e+T_{\mathrm{MG1}}-\dfrac{T_{\mathrm{PTO}}}{i_P} \\ -T_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix} & (\text{PTO}) \end{cases} \tag{3}$$

混合动力模式

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I_e+I_{\mathrm{MG1}}+I_{S2} & 0 & 0 \\ 0 & I_{\mathrm{MG2}}+I_{R2}+I_{\mathrm{K1}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\omega}_{\mathrm{MG2}} \\ \dot{\omega}_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}= F\begin{bmatrix} -R_{S2} \\ -R_{R2} \\ R_{S2}+R_{R2} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} T_e+T_{\mathrm{MG1}} \\ T_{\mathrm{MG2}} \\ -T_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix} & (\text{非 PTO}) \\ \begin{bmatrix} I_e+I_{\mathrm{MG1}}+I_{S2}+I_{\mathrm{PTO}} & 0 & 0 \\ 0 & I_{\mathrm{MG2}}+I_{R2}+I_{\mathrm{K1}} & 0 \\ 0 & 0 & I_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\omega}_{\mathrm{MG2}} \\ \dot{\omega}_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix}= F\begin{bmatrix} -R_{S2} \\ -R_{R2} \\ R_{S2}+R_{R2} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} T_e+T_{\mathrm{MG1}}-\dfrac{T_{\mathrm{PTO}}}{i_P} \\ T_{\mathrm{MG2}} \\ -T_{\mathrm{OUT}} \end{bmatrix} & (\text{PTO}) \end{cases} \tag{4}$$

式中　I_e——发动机输出轴转动惯量，kg·m^2

I_{MG1}、I_{MG2}——MG1、MG2 输出轴转动惯量，kg·m^2

I_{K1}——行星排 K1 转动惯量，kg·m^2

I_{S2}——行星排 K2 太阳轮转动惯量，kg·m^2

I_{R2}——行星排 K2 齿圈转动惯量，kg·m^2

I_{OUT}——输出轴转动惯量，kg·m^2

I_{PTO}——PTO 输出轴转动惯量，kg·m^2

T_e——发动机输出转矩，N·m

T_{MG1}、T_{MG2}——MG1、MG2 输出转矩，N·m

T_{OUT}——输出轴转矩，N·m

T_{PTO}——PTO 输出转矩，N·m

ω_e——发动机角速度,rad/s

ω_{MG1}、ω_{MG2}——MG1、MG2 角速度,rad/s

ω_{OUT}——输出轴角速度,rad/s

R_{S2}——行星排 K2 太阳轮半径,m

R_{R2}——行星排 K2 齿圈半径,m

F——行星排 K2 内力,N

i_P——PTO 齿轮箱减速比

2 混合动力拖拉机动力学建模

2.1 ECVT 传动系统模型

行星齿轮机构运动方程与转矩平衡方程为

$$n_s + k' n_r = (1 + k') n_c \tag{5}$$

$$T_s : T_r : T_c = 1 : k' : [-(1 + k')] \tag{6}$$

式中 n_s——太阳轮转速,r/min

n_r——齿圈转速,r/min

n_c——行星架转速,r/min

T_s——太阳轮转矩,N·m

T_r——齿圈转矩,N·m

T_c——行星架转矩,N·m

k'——行星齿轮机构特征参数

定义行星齿轮机构转速传动比为 i_{sc},其满足

$$\begin{cases} i_{sc} = \dfrac{n_e}{n_{OUT}} \\ n_{OUT} = \dfrac{(1 + k_1) n_e + k_2 n_{MG2}}{(1 + k_1)(1 + k_2)} \end{cases} \tag{7}$$

式中 n_e——发动机输出转速,r/min

n_{OUT}——构型输出轴转速,r/min

n_{MG2}——MG2 输出转速,r/min

k_1、k_2——行星排 K1、K2 特征参数

分别在犁耕作业工况与旋耕作业工况下进行节能控制仿真,犁耕工况与旋耕工况下 ECVT 输出端输出转速与混合动力拖拉机需求车速关系为

$$\begin{cases} v_t = \dfrac{2\pi r_t n_{OUT}}{i_g i_0 i_h} & \text{(犁耕)} \\ \begin{cases} v_t = \dfrac{2\pi r_t n_{OUT}}{i_g i_0 i_h} \\ n_e = n_{PTO} i_P \end{cases} & \text{(旋耕)} \end{cases} \tag{8}$$

式中 v_t——拖拉机纵向行驶速度,km/h

r_t——拖拉机驱动轮半径,m

i_g——机械变速器传动比

i_0——主减速器传动比

i_h——轮边减速器传动比

n_{PTO}——PTO 输出轴转速,r/min

由车辆动力学理论可知,拖拉机作业时需平衡摩擦阻力 F_f、空气阻力 F_w、坡道阻力 F_i 与加速阻力 F_j 与作业阻力,则混合动力拖拉机需求驱动力 F_t 满足

$$\begin{cases} F_t = F_f + F_w + F_i + F_j + F_p & \text{(犁耕)} \\ \begin{cases} F_t = F_f + F_w + F_i + F_j + F_r \\ n_e = n_{PTO} i_P \end{cases} & \text{(旋耕)} \end{cases} \tag{9}$$

其中

$$\begin{cases} F_t = \dfrac{[T_e + T_{MG1} + (1 + k_1) T_{MG2}] i_g i_0 i_h \eta_t}{r_t} \\ F_f = mgf\cos\alpha \\ F_w = \dfrac{1}{2} C_D A \rho v_t^2 \\ F_i = mg\sin\alpha \\ F_j = \delta m a_t \end{cases} \tag{10}$$

式中 F_p——犁耕作业阻力,N

F_r——旋耕作业阻力,N

m——拖拉机使用质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

f——摩擦阻力系数

α——坡度角,(°)

C_D——风阻系数

A——迎风面积,m^2

ρ——空气密度,kg/m^3

δ——拖拉机旋转质量转换系数

a_t——拖拉机加速度,m/s^2

η_t——驱动桥轴间效率

拖拉机作业时速度较低,一般忽略加速阻力的影响,同时,认为田间环境较为平缓。各动力部件输出转矩满足

$$\begin{cases} \begin{cases} T_{MG1} = \dfrac{F_t r_t}{i_g i_0 i_h (1 + k_2) \eta_t} - T_e \\ T_{MG2} = \dfrac{k_2 F_t r_t}{i_g i_0 i_h (1 + k_1)(1 + k_2) \eta_t} \end{cases} & \text{(犁耕)} \\ \begin{cases} T_{MG1} = \dfrac{F_t r_t}{i_g i_0 i_h (1 + k_2) \eta_t} + \dfrac{T_{PTO}}{i_p \eta_p} - T_e \\ T_{MG2} = \dfrac{k_2 F_t r_t}{i_g i_0 i_h (1 + k_1)(1 + k_2) \eta_t} \end{cases} & \text{(旋耕)} \end{cases} \tag{11}$$

式中 η_p——PTO 输出轴轴间效率

2.2 柴油发动机模型

柴油发动机输出功率与柴油发动机输出转速、输出转矩有关,即

$$P_e = \frac{n_e T_e}{9\,549} \tag{12}$$

式中 P_e——发动机输出功率,kW

柴油发动机内部涉及到燃烧、传热等多个复杂的工作过程,为便于能量管理策略快速求解与决策,

一般忽略柴油发动机内部工作过程，采用数值建模法将柴油发动机输出转速、输出转矩与燃油消耗率等效为函数关系，进而通过查表快速求解出柴油发动机的燃油消耗率，最后完成燃油消耗量求解[26]。不同时刻 k 发动机燃油消耗率及发动机油耗满足

$$b_e(k)=f_e(n_e,T_e) \tag{13}$$

$$B_e(k)=\frac{P_e(k)}{1\,000}\frac{b_e(k)}{3\,600\rho_e} \tag{14}$$

式中　b_e——发动机燃油消耗率，g/(kW·h)

B_e——发动机油耗，L

ρ_e——柴油密度，kg/L

采用数值建模法搭建的柴油发动机 MAP 图如图 2 所示。

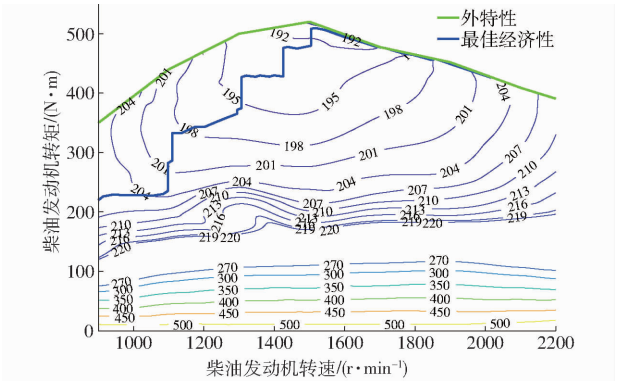


图 2　柴油发动机 MAP 图

Fig. 2　MAP of diesel engine

2.3　电机模型

忽略电机内部复杂的工作过程，采用数值建模法将电机输出转速、输出转矩与效率等效为函数关系[27]

$$\eta_m=f_m(n_m,T_m) \tag{15}$$

式中　η_m——电机效率

n_m——电机输出转速，r/min

T_m——电机输出转矩，N·m

电机输出功率与电机输出转速、输出转矩有关，即

$$P_m=\frac{n_mT_m}{9\,549} \tag{16}$$

式中　P_m——电机输出功率，kW

采用数值建模法搭建的电机 MAP 图如图 3 所示。

2.4　动力电池模型

在能量管理策略求解过程中，需实时观测动力电池荷电状态(SOC)变化状态，根据设定的电池 SOC 极小值条件求解最优控制变量。一阶等效内阻模型包括 1 个理想电压源及与其串联的 1 个一阶等效内阻[28]，模型简单，能直观描述 SOC 动态变化过程，满足快速求解需求。一阶等效内阻模型如图 4 所示。

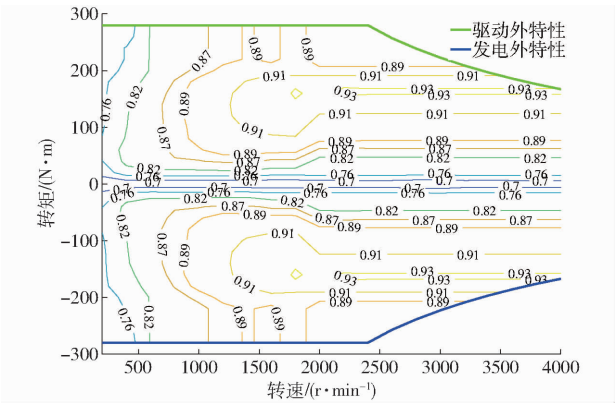


图 3　电机 MAP 图

Fig. 3　MAP of motor

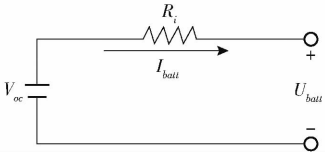


图 4　一阶等效内阻模型

Fig. 4　First-order equivalent internal resistance model

由图 4 可知，动力电池输出功率满足

$$P_{batt}=\frac{V_{oc}I_{batt}-I_{batt}^2R_i}{1\,000} \tag{17}$$

式中　P_{batt}——电池输出功率，kW

V_{oc}——电池开路电压，V

I_{batt}——电池母线电流，A

R_i——电池内阻，Ω

动力电池输出功率与 MG1、MG2 输出功率及工作状态相关，即

$$P_{batt}=\frac{P_{m1}}{\eta_{m1}^{p_1}}+\frac{P_{m2}}{\eta_{m2}^{p_2}} \tag{18}$$

其中

$$\begin{cases}p_1=\mathrm{sign}(n_{\mathrm{MG1}},T_{\mathrm{MG1}})=\begin{cases}1 & (\text{放电})\\ -1 & (\text{充电})\end{cases}\\ p_2=\mathrm{sign}(n_{\mathrm{MG2}},T_{\mathrm{MG2}})=\begin{cases}1 & (\text{放电})\\ -1 & (\text{充电})\end{cases}\end{cases} \tag{19}$$

式中　P_{m1}、P_{m2}——MG1、MG2 输出功率，kW

η_{m1}、η_{m2}——MG1、MG2 充电或放电效率

n_{MG1}——MG1 输出转速，r/min

动力电池输出电流，即母线电流满足

$$I_{batt}=\frac{V_{oc}-\sqrt{V_{oc}^2-4\,000R_iP_{batt}}}{2R_i} \tag{20}$$

基于 Ah 积分法求解动力电池 SOC，计算式为

$$SOC(k)=SOC(k-1)-\frac{\int_k^{k+1}I_{batt}\mathrm{d}t}{3\,600Q_{batt}} \tag{21}$$

式中　$SOC(k)$——k 时刻 SOC

$SOC(k-1)$——$k-1$ 时刻 SOC

Q_{batt}——动力电池容量，A·h

2.5 评价指标

混合动力拖拉机 ECVT 构型动力源包括发动机与电机，即在拖拉机作业过程中不仅需消耗柴油，还需消耗动力电池电能，为直观评价本文提出的能量管理策略的节能效果，将柴油消耗与电能消耗统一为等效燃油消耗量，为

$$J=\sum_{k=1}^{m}\left(B_e(k)+\frac{P_{batt}(k)C_m}{3\,600C_e}\right) \tag{22}$$

式中 J——等效燃油消耗量，L

C_m——电价格，元/(kW·h)

C_e——燃油价格，元/L

m——工况序列点数，个

3 基于 PMP 的混合动力拖拉机 OS-ECVT 能量管理策略改进方法

庞特里亚金极小值原理通过设置极小值条件，使得混合动力拖拉机的发动机、MG1 及 MG2 的最优控制序列组合一定满足极值条件，进而通过求解系统设定条件极值点可求得混合动力拖拉机的最优控制序列，完成各工况阶段动力部件决策。传统基于 PMP 的能量管理策略通过初始化协态变量 λ，并基于打靶法求解满足终端 SOC 极值条件的最优控制序列，即当系统终端 SOC 不满足极值条件时，需重新设置协态变量 λ，并重新迭代整个循环工况，使得求解速度多数取决于对协态变量 λ 的经验设置，且需多次试凑终端 SOC 极小值条件的设置，极大程度上增加了求解难度。为此，本文以混合动力拖拉机输出分流式 ECVT 构型为研究对象，对传统基于 PMP 的能量管理策略进行改进，进而提出改进的基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机能量管理策略。

首先，基于庞特里亚金极小值原理的 ECVT 能量管理策略的求解中，极小值轨迹需受到状态方程的约束[29]。系统状态方程为

$$\dot{x}=\dot{SOC}(k) \tag{23}$$

ECVT 混合动力拖拉机作业过程中，电机消耗电能调节发动机工作点，以实现无级变速性能与功率输出分流性能，因此，需综合考虑电能与柴油的消耗，保证极小值轨迹为柴油消耗与电量消耗综合消耗的表征。根据庞特里亚金极小值原理，引入协态变量 λ，构建哈密尔顿方程[30]

$$H(x,u,\lambda,k)=F(x,u,k)+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}(k)\frac{f(x,u,k)}{3\,600Q_{batt}} \tag{24}$$

式中 $F(x,u,k)$——系统瞬时成本，为发动机燃油消耗率，g/(kW·h)

$f(x,u,k)$——系统状态量瞬时变化量，为电池电流，A

$u(t)$、$x(t)$ 与 $\lambda(t)$ 需满足必要条件[31]

$$\dot{\lambda}=\frac{\partial H(x,u,\lambda,k)}{\partial x} \tag{25}$$

$$\dot{x}=\frac{\partial H(x,u,\lambda,k)}{\partial \lambda} \tag{26}$$

根据庞特里亚金极小值原理，最优控制变量 u_k^* 与最佳成本序列 J_k^* 需满足必要条件

$$\underset{k\in[1,m]}{u_k^*,J_k^*}=\arg\min_{\substack{u_k\in\Omega\\ \lambda=\lambda_k}}(H(x,u,\lambda,k))+\arg\left(\min_{\substack{u_k\in\Omega\\ \lambda=\lambda_k}}|SOC(k_f)-SOC_{\text{target}}|\leqslant\varepsilon_0\right) \tag{27}$$

式中 ε_0——绝对容差，为一相对极小常数

Ω——控制变量与状态变量的容许可达集

SOC_{target}——SOC 目标值

λ_k——k 时刻协态变量

u_k——k 时刻控制序列

在基于 PMP 能量管理策略的求解过程中，由于电池开路电压和等效内阻通过查表方式求得，所以协态变量与哈密尔顿方程无解析表达求解方式[32]，因此，基于庞特里亚金极小值原理的能量管理策略一般采用打靶法求解协态变量，同时，传统基于 PMP 的能量管理策略认为短时间内动力电池开路电压、内阻与动力电池 SOC 的变化可忽略，进而，应用打靶法求解 λ 时，$\lambda(k_0)=\lambda(k_f)=\lambda_0$[33]，该方式虽然求解原理简单，但当系统不满足 SOC 极小值条件惩罚项时，需通过循环迭代的方式重新调整 λ，并利用该 λ 重新迭代整个工况，直至求解出满足终端 SOC 惩罚条件的最优控制变量与最佳成本，进而导致终端条件极值判断的设置需多次试凑，若终端 SOC 极小值条件惩罚项设置不合理或 λ_0 初始化步长设置不合理，则能量管理策略将不断陷入迭代中。为此，本文在满足庞特里亚金极小值原理的前提下，通过改变极小值条件判断位置，进而改进基于庞特里亚金极小值原理的能量管理策略，使得所有工况点均对极小值条件进行判断，避免传统策略必须迭代整个工况才能完成所有阶段点的规划的弊端，即每一阶段点最优控制变量点与最佳成本点满足必要条件

$$\underset{k\in[1,m]}{u_k^*,J_i^*}=\arg\min_{\substack{u_k\in\Omega\\ \lambda=\lambda_k}}(H(x_i,u_i,\lambda_i,k))+\arg\left(\min_{\substack{u_k\in\Omega\\ \lambda=\lambda_k}}|SOC(k)-SOC(k-1)|\leqslant\varepsilon_1\right) \tag{28}$$

式中 ε_1——绝对容差，为一相对极小常数

改进后的能量管理策略同样满足庞特里亚金极小值原理应用的必要条件，证明如下：

系统各阶段 SOC 判断容差为

$$\varepsilon_k = \varepsilon_1 \tag{29}$$

进一步，由于传统基于庞特里亚金极小值原理的能量管理策略终端 SOC 判断容差理论上为一相对数值极小的常数，在算法迭代之前无法预知，由式(29)可知，改进后的基于 PMP 的 ECVT 能量管理策略的最大累计容差满足

$$\varepsilon_{\max} = \sum_{k=1}^{m} \varepsilon_k \tag{30}$$

改进的基于 PMP 的 ECVT 能量管理策略与传统基于 PMP 的策略具备等价性，即最优控制协态变量 λ_i^* 使得改进策略的最优控制序列与最佳成本序列必要条件可等价为隐性条件

$$\begin{aligned} &u_{k\ k\in[1,m]}^{*}, J_k^* = \arg\min_{\substack{u_k\in\Omega \\ \lambda=\lambda_k^*}} (H(x,u,\lambda,k)) + \\ &\arg\left(\left|SOC(k_f) - SOC_{\text{target}}\right| \leqslant \varepsilon\right) \end{aligned} \tag{31}$$

进一步，ε 满足

$$\varepsilon \leqslant \varepsilon_{\max} \tag{32}$$

即改进策略与传统策略具备相同或相当的节能效果，且当传统策略满足式(31)、(32)的必要条件与两种策略同时满足

$$\lambda = \lambda_i^* = \lambda_0 \tag{33}$$

必要条件时，两种策略完全相同，进而节能效果相同：即改进后的策略具备更大应用空间，传统策略为本文改进策略最简单的应用方式，也是庞特里亚金极小值原理最简单的应用方式。

改进后的 PMP 算法利用打靶法求解 λ 时，由于为非解析表达式求解方式，同样，可认为哈密尔顿方程与动力电池 SOC 无直接解析关系，即 $\dot{\lambda}=0$，即协态变量与时间 k 无直接解析关系，因此，认为在每个时间阶段点均以确定的常数直接给出，不随时间变化而为确定变化关系，仅与时间序列呈数量对应关系，此外，当 PMP 算法应用于能量管理策略时，由于非解析查表求解等原因，式(25)所示的必要条件一般做一定的简化处理，简化处理后对于满足式(25)所示的必要条件可容易实现；同理，$\dfrac{\partial H(x,u,\lambda,k)}{\partial\lambda}$ 为电池电流，其始终满足另一个条件(式(26))，因此，改进后的策略满足式(25)、(26)应用的两个必要条件。

综上，改进的基于 PMP 混合动力拖拉机 ECVT 的能量管理策略满足庞特里亚金极小值原理所有应用的必要条件。

4　混合动力拖拉机 ECVT 节能控制策略

4.1　改进的基于 PMP 节能控制策略

ECVT 混合动力拖拉机构型具备多动力源，犁耕时，分别对发动机转矩、MG2 转速进行控制；旋耕时，由于发动机与 PTO 输出轴同轴连接，发动机转速直接满足 PTO 转速，此时，周转轮系自由度唯一确定，因此，对发动机进行转矩控制。改进的基于 PMP 的 ECVT 混合动力拖拉机能量管理策略求解流程如图 5 所示，图中 k_f 表示时间序列终端。

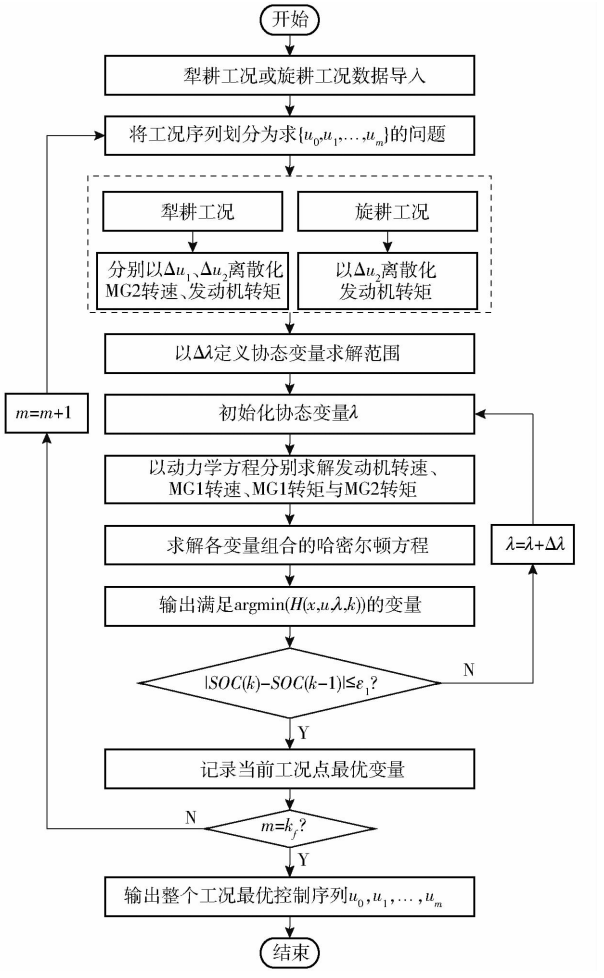


图 5　改进的基于 PMP 策略求解流程

Fig. 5　Improved solution flowchart based on PMP strategy

具体求解流程为：

以时间步长 Δt 将工况序列划分为 m 个多阶段序列，进而将决策问题规划为求取 m 个时间步长的控制序列问题

$$u_k = \{u_0, u_1, \cdots, u_{m-1}\} \tag{34}$$

根据部件外特性，犁耕工况下，以步长 Δu_1、Δu_2 离散化 MG2 转速、发动机转矩；旋耕工况下，以步长 Δu_1 离散化发动机转矩，即

$$\begin{cases} \begin{cases} u_1 = [u_{1\min} : \Delta u_1 : u_{1\max}] \\ u_2 = [u_{2\min} : \Delta u_2 : u_{2\max}] \end{cases} & \text{(犁耕)} \\ u_2 = [u_{2\min} : \Delta u_2 : u_{2\max}] & \text{(旋耕)} \end{cases} \tag{35}$$

以步长 $\Delta\lambda$ 定义 λ 的求解范围

$$\lambda_k = [\lambda_{\min} : \Delta\lambda : \lambda_{\max}] \quad (k=0,1,n-1) \tag{36}$$

对每一工况点的规划采用循环迭代的方式进

行,外层循环为划分的 m 个时间步长循环,内层最大循环边界为协态变量的最大求解范围,根据工况需求,以动力学方程分别求解发动机转速、MG1 转速、MG1 转矩、MG2 转矩,所有动力部件的工作范围均维持于各部件允许工作范围,即控制变量 u 的容许可达控制集与状态变量 x 的容许可达状态集满足

$$u,x\in\Omega=\begin{cases}n_{e\min}\leqslant n_e\leqslant n_{e\max}\\ T_{e\min}\leqslant T_e\leqslant T_{e\max}\\ n_{\mathrm{MG1}\min}\leqslant n_{\mathrm{MG1}}\leqslant n_{\mathrm{MG1}\max}\\ T_{\mathrm{MG1}\min}\leqslant T_{\mathrm{MG1}}\leqslant T_{\mathrm{MG1}\max}\\ n_{\mathrm{MG2}\min}\leqslant n_{\mathrm{MG2}}\leqslant n_{\mathrm{MG2}\max}\\ T_{\mathrm{MG2}\min}\leqslant T_{\mathrm{MG2}}\leqslant T_{\mathrm{MG2}\max}\\ SOC_{\min}\leqslant SOC\leqslant SOC_{\max}\end{cases}\tag{37}$$

求解各变量组合的哈密尔顿方程,即最优控制变量与最佳成本序列满足必要条件

$$\underset{k\in[1,m]}{u_i^*,J_i^*}=\arg\min_{\substack{u_k\in\Omega\\ \lambda=\lambda_k^*}}(H(x,u,\lambda,k))\tag{38}$$

进一步判断满足式(34)的变量是否满足 SOC 判断条件,即最优控制变量、最佳成本序列还需满足

$$\underset{k\in[1,m]}{u_k^*,J_k^*}=\arg\left(|SOC(k)-\underset{\substack{u_k\in\Omega\\ \lambda=\lambda_k^*}}{SOC(k-1)}|\leqslant\varepsilon_1\right)\tag{39}$$

若变量满足该工况点的 SOC 判断条件,则开始下一工况点循环,否则,协态变量 λ 以步长 $\Delta\lambda$ 递增,直至满足该工况点的 SOC 极小值条件,以此类推,完成整个工况的循环迭代。

4.2 节能对比策略设计

文献[33]为验证传统基于 PMP 节能控制策略的节能效果,以发动机最佳经济性曲线为发动机目标工作区间,提出了基于最佳经济性曲线(OOL)的并联式混合动力拖拉机的能量管理策略,通过对比分析验证了基于 PMP 算法的能量管理策略具备更加优异的节能效果。同样,本文基于 OOL 提出了适合于 ECVT 混合动力拖拉机的能量管理策略,进而验证改进的 PMP 算法与基于 OOL 曲线的策略相比同样具有优异的节能效果,进而佐证本文改进方法的可行性。

虽然基于 OOL 的节能策略对于并联式混合动力拖拉机是一种基于规则型的策略,只需通过设计相应判断阈值即可实现动力源的能量分配,但与文献[33]不同的是,犁耕工况时,由于本文构型具有多自由度特性,仅通过设置判断阈值难以确定所有工况阶段点的动力部件转速工作点。因此,需在设定阈值判断的前提下,选取合适的控制变量;而旋耕工况时,由于 PTO 需求转速直接决定发动机输出转速,构型转速自由度由动力学方程限定,通过查表可确定发动机输出转矩,进而完成动力部件转矩分配,因此,无需以动力部件输出量为控制变量。具体求解流程为:

犁耕工况时,控制混合动力拖拉机于低挡运行,设定模式切换判断阈值,进而确定混合动力拖拉机工作模式

$$\begin{cases}v_{mthr1}<v_t<v_{osthr} & (\text{纯电动模式 1})\\ v_{osthr}<v_t<v_{mthr2} & (\text{混合动力模式})\end{cases}\tag{40}$$

式中 v_{mthr1}——纯电动模式 1 最小稳定速度,km/h

v_{osthr}——混合动力模式最小稳定速度,km/h

v_{mthr2}——纯电动模式 2 最大稳定速度,km/h

当混合动力拖拉机处于纯电动模式 1 时,根据需求转速、需求转矩通过动力学方程求得 MG2 的转速与转矩,进而求得动力电池输出功率,最终求得动力电池 SOC;当混合动力拖拉机处于混合动力模式时,以 MG2 转速为控制变量,通过动力学方程求得发动机与 MG1 输出转速,进而以 OOL 曲线为目标工作区域,通过查表得出发动机输出转矩,最后,完成 MG1 输出转矩的求解。

旋耕工况时,控制混合动力拖拉机于低挡运行,由 PTO 需求转速求解发动机与 MG1 输出转速,由混合动力拖拉机需求行驶速度确定 MG2 输出转速,通过查表确定发动机输出转矩,最终确定 MG1 输出转矩。

5 节能控制仿真与结果分析

分别在犁耕与旋耕工况进行节能控制仿真,首先,为验证改进策略与传统策略具备相同性或相当性,对改进策略与传统策略的节能控制仿真结果进行分析,进而验证改进策略相较传统策略具备更大的应用空间,同时佐证本文推导及证明过程的正确性;然后,为验证改进策略的节能效果,分别对犁耕与旋耕工况下改进策略与基于 OOL 能量管理策略的节能控制仿真结果进行分析。

5.1 相同性及相当性验证

在犁耕工况下进行相同性及相当性验证,根据已绘制的犁耕工况载荷谱,完成相同性及相当性验证的节能控制仿真,犁耕工况载荷谱如图 6 所示。

首先,定义两种策略协态变量求解范围,使得求解范围相同,并调整 ε_1 值,保证改进策略对所有工况点的决策中 SOC 判断条件均在第一次打靶被满足,最终设置 ε_1 为 3.1×10^{-4},并根据改进策略 SOC 仿真结果设置传统策略的终端 SOC 判断条件,两种策略等效燃油消耗量均约为 4.437 4 L,发动机、MG1 与 MG2 运行状态完全相同,如图 7 所示,证明传统基于 PMP 的能量管理策略为本文改进的基于

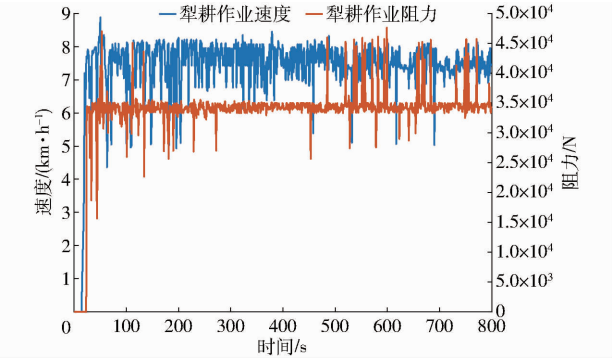


图 6　犁耕作业速度和阻力变化曲线

Fig. 6　Speed and resistance variation curves of ploughing condition

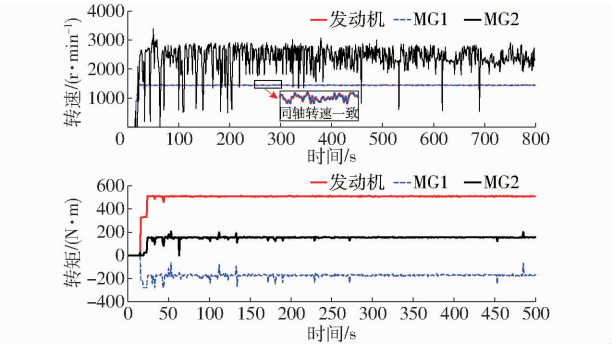


图 7　动力部件运行曲线

Fig. 7　Power component running curves

PMP 混合动力拖拉机能量管理策略最简单的一种应用方式，验证了两种策略的相同性。

然后，收紧 SOC 判断容差 ε_1，保证改进策略可实时调整协态变量值，而不需迭代整个犁耕工况，最终设置 ε_1 为 3×10^{-4}，同样根据该仿真结果设置传统策略的 SOC 终端判断条件，传统策略的等效燃油消耗量不发生变化，而改进策略等效燃油消耗量约为 4.437 6 L，相比传统策略等效燃油箱消耗量上升约 0.004 5%，基本可忽略不计，动力部件运行曲线也与 ε_1 为 3.1×10^{-4} 时几乎一致，证明改进策略与传统策略节能方面具备相当性，同时，改进策略等效燃油消耗量上升的原因则是为了满足每一阶段点更加苛刻的 SOC 判断条件，证明改进策略能关注每一阶段点的 SOC 变化，进而保证整个循环工况的 SOC 变化，已完全进化为一种可实时优化的策略，改进策略具备更大的应用空间，而传统策略虽也能关注整个循环工况的 SOC 变化，但其终端判断条件目标值一般难以确定，需不断调整，一旦该值设置不合理，整体策略将不断迭代整个循环工况，而根据改进策略的仿真结果可容易确定传统策略的终端判断条件的目标值，进一步说明了传统策略为改进策略最简单的应用方式。两种策略协态变量如图 8 所示。

上述验证过程能证明本文证明过程的正确性，

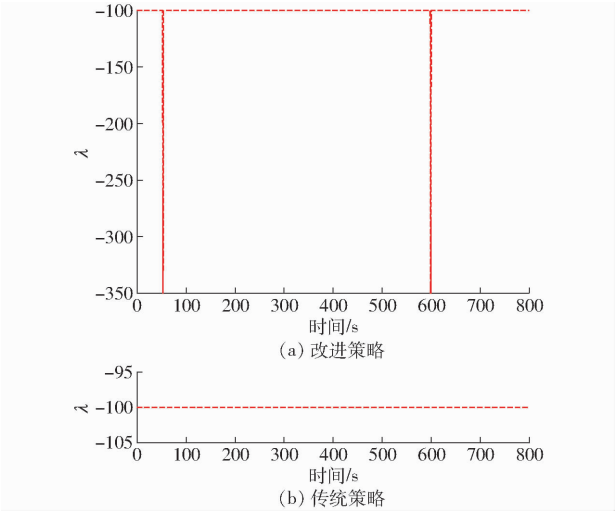


图 8　两种策略的 λ 值

Fig. 8　Values of λ of two strategies

以及改进策略的优越性，而旋耕工况下的验证与上述验证同理，后文不再赘述。

5.2　节能潜力验证

5.2.1　犁耕工况

犁耕工况下，改进策略等效燃油消耗量约为 4.437 6 L，OOL 策略等效燃油消耗量约为 4.843 8 L，改进策略较 OOL 策略等效燃油消耗量下降约 8.39%。

犁耕工况下，发动机工作点 MAP 图如图 9 所示，功率工作点分布如图 10 所示。

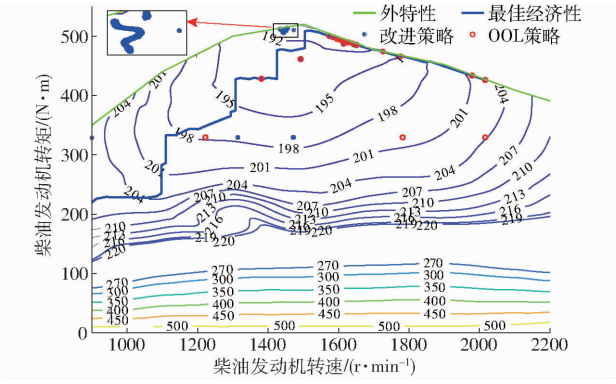


图 9　发动机工作点 MAP 图(犁耕工况)

Fig. 9　MAP of engine working points (ploughing condition)

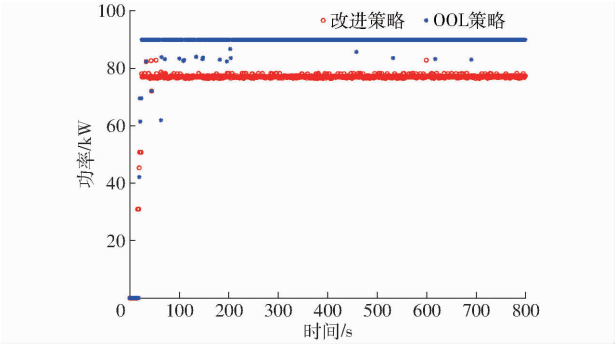


图 10　发动机功率工作点分布图(犁耕工况)

Fig. 10　Distribution diagram of engine power operating points (ploughing condition)

由图 9 可以看出,犁耕工况下,在改进策略控制下,发动机绝大部分工作点集中于 MAP 图最小的燃油消耗率区间,OOL 策略工作点较集中分布于发动机最佳经济性曲线上,且分布于更高转速下,结合图 10 可以看出,相较于改进策略,OOL 策略发动机持续输出更大功率,从而使得发动机燃油消耗量增大。

电机工作点 MAP 图如图 11 所示,MG1、MG2 功率工作点分布如图 12、13 所示。由图 11 可以看出,较 OOL 策略,在改进策略控制下,MG2 于效率更高的区域运行,结合图 9 与图 13 可以看出,MG2 工作点分布范围更大,发挥更大范围的调速特性,从而调节发动机工作点于经济性更高的区域,使得整机无级变速性能更加优异,保证了整机经济性。

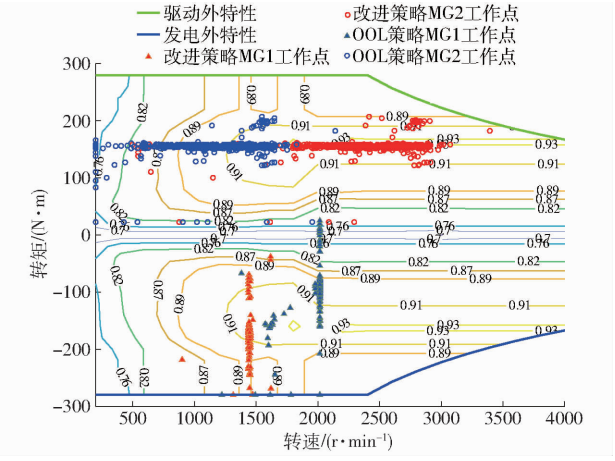


图 11 电机工作点 MAP 图(犁耕工况)

Fig. 11 MAP of motor operating point (ploughing condition)

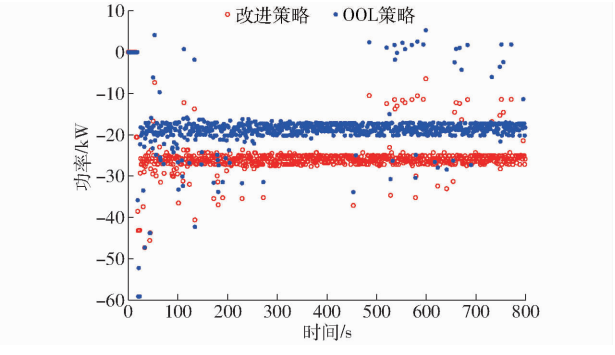


图 12 MG1 功率工作点分布图(犁耕工况)

Fig. 12 Distribution of MG1 power operating points (ploughing condition)

两种策略 SOC 运行曲线如图 14 所示。由图 9 ~ 14 可以看出,虽然 OOL 策略 SOC 下降更加缓慢,但在 OOL 策略控制下,MG1 消耗经济性更差的发动机功率进行发电,且消耗功率更大,使得 MG1 转矩解耦功能持续处于经济性差的能量转换中进行,因此,改进策略功率输出分流性能更加优异。

5.2.2 旋耕工况

旋耕工况如图 15、16 所示。

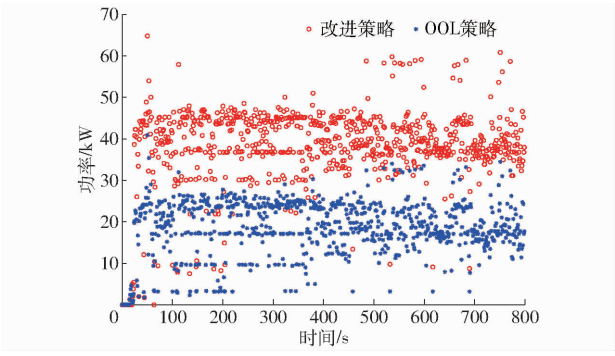


图 13 MG2 功率工作点分布图(犁耕工况)

Fig. 13 Distribution of MG2 power operating points (ploughing condition)

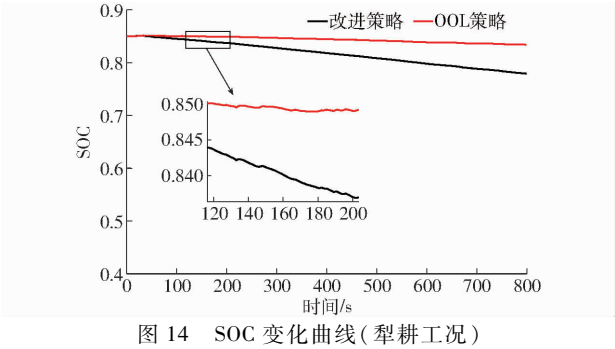


图 14 SOC 变化曲线(犁耕工况)

Fig. 14 SOC change curves (ploughing condition)

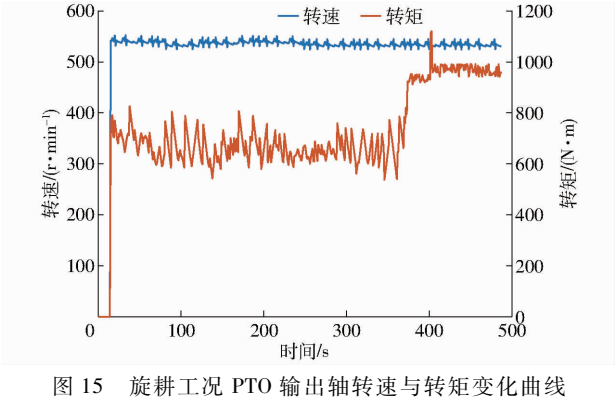


图 15 旋耕工况 PTO 输出轴转速与转矩变化曲线

Fig. 15 Curves of PTO output shaft rotate speed and torque variation under rotating tillage operation

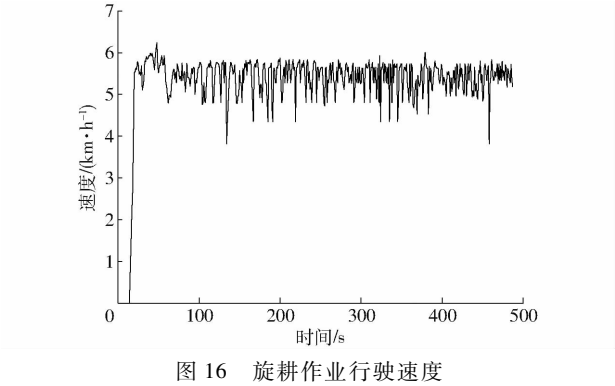


图 16 旋耕作业行驶速度

Fig. 16 Travel speed of rotating tillage operation

旋耕工况下,改进策略等效燃油消耗量约为 1.578 L,OOL 策略等效燃油消耗量约为 1.864 L,改

进策略较 OOL 策略等效燃油消耗量下降约 15.34%。

旋耕工况下，发动机工作点 MAP 图如图 17 所示，发动机功率工作点分布如图 18 所示；电机工作点 MAP 图如图 19 所示；MG1、MG2 功率工作点分布如图 20、21 所示；SOC 变化曲线如图 22 所示。

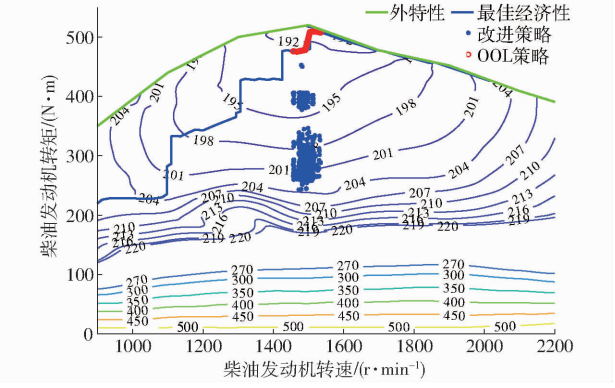


图 17　发动机工作点 MAP 图（旋耕工况）

Fig. 17　MAP of engine operating points (rotating tillage condition)

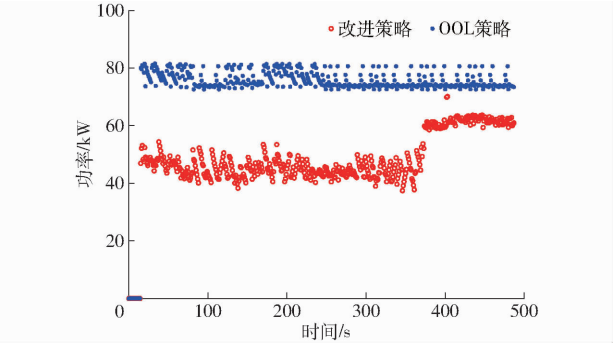


图 18　发动机功率工作点分布图（旋耕工况）

Fig. 18　Distribution diagram of engine power operating points (rotating tillage condition)

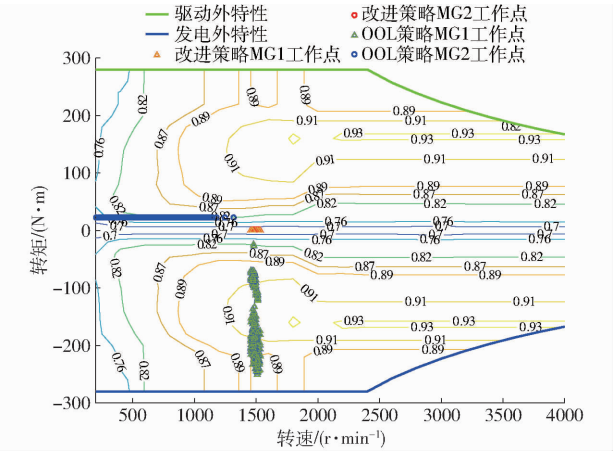


图 19　电机工作点 MAP 图（旋耕工况）

Fig. 19　MAP of motor operating points (rotating tillage condition)

由图 17 可以看出，旋耕工况下，改进策略发动机工作点分布于 195～204 g/(kW·h)区间，OOL 策略发动机工作点分布于 192～195 g/(kW·h)区间，虽然 OOL 策略发动机工作点集中于燃油消耗率更小的区域，但在 OOL 策略控制下，发动机输出更大转矩，结合图 18～22 可以看出，改进策略 MG1 持续处于不工作状态，OOL 策略 MG1 工作点较集中分布于更大的负功率区间，由 SOC 变化曲线可以看出，MG1 持续消耗发动机高油耗的功率进行发电，虽然 SOC 持续处于上升趋势，但各动力部件能量利用不合理，而改进策略 MG1 持续处于不工作状态，从而保证发动机持续处于较低功率区域运行，提升了整机经济性，没有出现不经济能量转换现象，因此，改进策略对发动机、MG1、MG2 与动力电池的能量利用更加合理，系统具备高效的功率输出分流性能。由图 19、21 可以看出，旋耕工况下，由于 PTO 输出转速与整机行驶速度解耦输出的需求，发动机直接控制 PTO 输出轴转速，从而两种策略的 MG2 均只为驱动桥需求动力服务，不断输出动力实现无级变

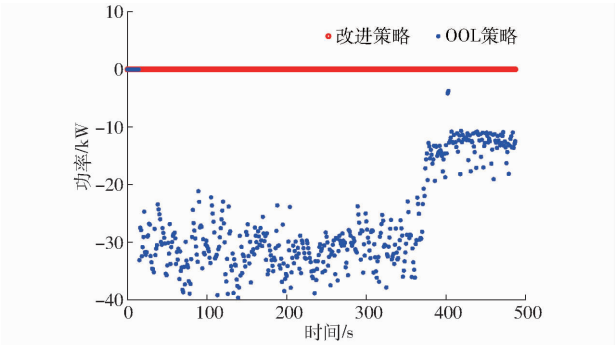


图 20　MG1 功率工作点分布图（旋耕工况）

Fig. 20　Distribution of MG1 power operating points (rotating tillage condition)

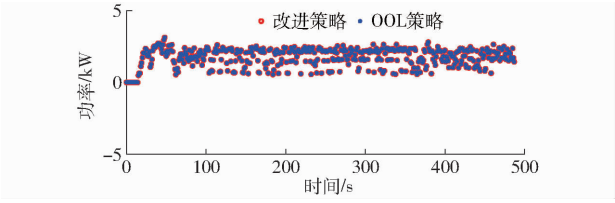


图 21　MG2 功率工作点分布图（旋耕工况）

Fig. 21　MG2 power operating points distribution (rotating tillage condition)

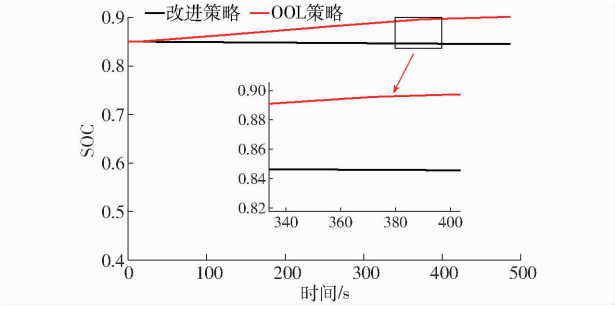


图 22　SOC 变化曲线（旋耕工况）

Fig. 22　SOC change curves (rotating tillage condition)

速功能,进而满足驱动桥需求转速与转矩,因此,两种策略 MG2 工作点分布相同。

6 结论

(1)以混联式混合动力拖拉机输出分流 ECVT 构型为研究对象,分析了该构型工作原理、具备的工作模式与各工作模式运动学特性。

(2)提出了基于庞特里亚金极小值原理的改进方法,并通过数学证明方法证明了改进策略能满足庞特里亚金极小值原理求解的必要条件,进而提出了改进的基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机 ECVT 构型能量管理策略,并提出了基于最佳经济性曲线的节能控制对比策略。

(3)分别在犁耕与旋耕工况下进行了节能控制仿真,结果表明本文提出的改进策略与传统策略具备相同性或相当性,验证了改进策略的优越性;犁耕工况下,改进策略较 OOL 策略等效燃油消耗量降低约 8.39%,MG2 能发挥更大范围的调速特性,整机具备更加优异的无级变速性能;旋耕工况下,改进策略较 OOL 策略等效燃油消耗量降低约 15.34%,两种工况下改进策略的能量转换更加经济,整机具备高效的功率输出分流性能。

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(Supp. 1):348 - 364. (in Chinese)

[3] 谭丕强,王德源,楼狄明,等. 农业机械污染排放控制技术的现状与展望[J]. 农业工程学报,2018,34(7):1 - 14.
TAN Piqiang,WANG Deyuan,LOU Diming,et al. Progress of control technologies on exhaust emissions for agricultural[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(7):1 - 14. (in Chinese)

[4] 鲁植雄,侯辛奋,邓晓亭. 串联式混合动力拖拉机驱动系统设计匹配与牵引试验[J]. 南京农业大学学报,2017,40(5):928 - 935.
LU Zhixiong,HOU Xinfen,DENG Xiaoting. Matching design and traction tests for driving system of series hybrid electric tractor[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2017,40(5):928 - 935. (in Chinese)

[5] 邓晓亭. 混合动力拖拉机动力特性的研究[D]. 南京:南京农业大学,2013.
DENG Xiaoting. Researches on dynamic characteristics of hybrid electric tractor[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2013. (in Chinese)

[6] 徐立友,刘孟楠,周志立. 串联式混合动力拖拉机驱动系设计[J]. 农业工程学报,2014,30(9):11 - 18.
XU Liyou,LIU Mengnan,ZHOU Zhili. Design of drive system for series hybrid electric tractor[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(9):11 - 18. (in Chinese)

[7] ROSSI C,PONTARA D,FALCOMER C,et al. A hybrid-electric driveline for agricultural tractors based on an e-CVT power-split transmission[J]. Energies,2021,14(21):6912.

[8] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023[J]. 中国公路学报,2023,36(11):1 - 192.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's automotive engineering research progress:2023[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(11):1 - 192. (in Chinese)

[9] 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)

[10] 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):1 - 18.

[11] 方树平,周志立,徐立友. 串联式混合动力拖拉机能量管理策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2015,36(6):61 - 66.
FANG Shuping,ZHOU Zhili,XU Liyou. Energy management strategy for series hybrid tractor[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science),2015,36(6):61 - 66. (in Chinese)

[12] 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,2021.
LUO Guangju. Research on energy management strategy of series diesel-electric hybrid tractor[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2021. (in Chinese)

[13] XU L,WANG Y,LI Y,et al. Research on control strategy of APSO-optimized fuzzy PID for series hybrid tractors[J]. World Electric Vehicle Journal,2023,14(9):1 - 17.

[14] 李妍颖. 串联式混合动力拖拉机能量管理策略设计[D]. 洛阳:河南科技大学,2023.
LI Yanying. Design of energy management strategy for series hybrid tractors[D]. Luoyang:Henan University of Science and Technology,2023. (in Chinese)

[15] 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,2015.

WANG Chunguang. Study on energy management strategy for the parallel hybrid electric tractor[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[16] 郭景华,李文昌,王班,等.基于深度强化学习的网联混合动力汽车队列控制[J].机械工程学报,2024,60(2):262-271.
GUO Jinghua, LI Wenchang, WANG Ban, et al. Deep reinforcement learning-based control strategy of connected hybrid electric vehicles platooning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(2): 262-271. (in Chinese)

[17] YAN X, ZHAO Y, LIU X, et al. Research on energy management strategy for series hybrid tractor under typical operating conditions based on dynamic programming [J]. World Electric Vehicle Journal, 2024, 15(4): 156.

[18] ZHANG J, FENG G, XU L, et al. Energy-saving control of hybrid tractors based on tnstantaneous optimization[J]. World Electric Vehicle Journal, 2023, 14(2): 27.

[19] 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)

[20] 李峰. 基于庞特里亚金极小值原理的混合储能型有轨电车能量管理策略在线循环优化[D]. 北京:北京交通大学,2020.
LI Feng. Online cycle optimization of energy management strategy for hybrid energy storage tram based on Pontryagin's minimization principle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)

[21] 李峰,杨中平,王玓,等. 基于庞特里亚金极小值原理的混合储能有轨电车能量管理策略[J]. 电工技术学报,2019,34(增刊 2):752-759.
LI Feng, YANG Zhongping, WANG Yu, et al. Energy management strategy of tram with hybrid energy storage system based on Pontryagin's minimum principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supp. 2): 752-759. (in Chinese)

[22] 田贺. 插电式混合动力客车自学习在线能量管理策略研究[D]. 北京:清华大学,2020.
TIAN He. Self-learning online energy management strategy for plug-in hybrid electric bus[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 秦孔建. 双行星排客车混合动力构型设计、协调控制与能量管理[D]. 北京:清华大学,2020.
QIN Kongjian. Configuration design, coordination control and energy management of a dual planetary gears based hybrid electric bus powertrain[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. (in Chinese)

[25] 裴换鑫. 功率分流式混合动力汽车分层拓扑图建模与构型方案的研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
PEI Huanxin. Modeling and design of power split hybrid electric vehicle using hierachical topological graph theory[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)

[26] 李金凤,张学敏,宋正河,等. 基于 TRIZ 理论的分布式混合动力拖拉机动力系统设计与验证[J]. 吉林大学学报(工学版),2025,55(1):366-381.
LI Jinfeng, ZHANG Xuemin, SONG Zhenghe, et al. Design and experiment of distributed hybrid electric tractor powertrain system based on TRIZ theory[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2025, 55(1): 366-381. (in Chinese)

[27] 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.

[28] DOU H, WEI H, ZHANG Y, et al. Configuration design and optimal energy management for coupled-split powertrain tractor [J]. Machines, 2022, 10(12): 1175.

[29] 马雪瑞. 基于双排行星齿轮机构的多模式混合动力机电耦合方案设计与优化控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
MA Xuerui. Research on design methodology and optimal control of the electromechanical coupling system in hybrid powertrain based on two planetary gearsets configuration[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

[30] 冯坚. 混合动力汽车动态最小等效燃油消耗能量管理策略研究[D]. 上海:同济大学,2022.
FENG Jian. Research on dynamic ECMS energy management strategy for hybrid electric vehicles[D]. Shanghai: Tongji University, 2022. (in Chinese)

[31] 刘永刚,陈峥,张元建. 新能源汽车能量管理与优化控制[M]. 重庆:重庆大学出版社,2021.

[32] 谢海明. 基于工况自适应的增程式城市客车能量管理策略研究[D]. 北京:清华大学,2019.
XIE Haiming. Energy management strategy for extended-range electric city buses based on driving condition adaptation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2019. (in Chinese)

[33] 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)