doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.041

基于庞特里亚金极小值原理的混合动力拖拉机节能控制

张俊江[1,2]　冯港辉[1]　徐立友[1,2]　王　伟[3]　闫祥海[1,2]　刘孟楠[2,3]

（1.河南科技大学车辆与交通工程学院，洛阳 471003；2.智能农业动力装备全国重点实验室，洛阳 471039；
3.中国一拖集团有限公司，洛阳 471004）

摘要：以某并联式柴电混合动力拖拉机为研究对象，分析其拓扑结构特点及工作特性，构建拖拉机旋耕、犁耕耦合动力学模型，以整机等效燃油消耗量最小为目标，电机功率和柴油机功率为控制变量、电池荷电状态为状态变量，建立基于庞特里亚金极小值原理的节能控制策略，基于 Matlab 仿真平台对该节能控制策略进行仿真试验。结果表明：与基于最佳经济性曲线的节能控制策略相比，所制定的基于庞特里亚金极小值原理节能控制策略能够合理控制柴油机和电机的运行状态，使柴油机、电机工作在高效率区，有效降低了拖拉机田间作业时的等效燃油消耗量。旋耕工况下，等效燃油消耗量降低 10.44%；犁耕工况下，等效燃油消耗量降低 11.20%。

关键词：混合动力拖拉机；庞特里亚金极小值原理；节能控制；等效油耗

中图分类号：S219.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2023)05-0396-11　　**OSID**：

Energy-saving Control of Hybrid Tractor Based on Pontryagin's Minimum Principle

ZHANG Junjiang[1,2]　FENG Ganghui[1]　XU Liyou[1,2]　WANG Wei[3]　YAN Xianghai[1,2]　LIU Mengnan[2,3]

(1. *College of Vehicle and Traffic Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*
2. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Luoyang* 471039, *China*
3. *YTO Group Corporation*, *Luoyang* 471004, *China*)

Abstract: A parallel diesel-electric hybrid tractor was taken as the research object. By analyzing the topological characteristics and working characteristics of hybrid tractors, the coupling dynamic model of tractor rotary tillage unit and ploughing unit was constructed. With the goal of minimizing the equivalent fuel consumption of the whole machine, the motor power and diesel engine power were the control variables, and the state of charge (SOC) of the battery was the state variable, and the energy-saving control strategy based on Pontryagin's minimum principle (PMP) was established. Finally, the Matlab simulation platform was used to simulate the energy-saving control strategy based on the Pontryagin's minimum principle for the two typical working conditions of the tractor. The control strategy based on the optimal economic curve was used as a comparison strategy to verify the control effect based on the Pontryagin's minimum principle. The analysis and comparison of the results of these two control strategies showed that: under rotary tillage conditions, the SOC value based on the optimal economic curve control strategy was decreased rapidly, while the SOC value based on the PMP control strategy was decreased slowly. Under the ploughing condition, the SOC value based on the optimal economic curve control strategy was both increased and decreased by a large margin, while the SOC value based on the PMP control strategy was only decreased. It was shown that the energy management strategy based on the Pontriagin minimum principle can reasonably control the operating state of diesel engine and motor, so that diesel engine and motor work in high-efficiency areas. It effectively reduced the equivalent fuel consumption of tractors in the field. Under rotary tillage, the equivalent fuel consumption was reduced by 10.44%; under the ploughing condition, the equivalent fuel consumption was reduced by 11.20%.

Key words: hybrid tractor; Pontryagin's minimum principle; energy-saving control; equivalent fuel consumption

收稿日期：2023-01-19　修回日期：2023-03-03

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2001203)、农业农村部补短板专项(NK202216010103)、国家重点实验室开放课题(SKT2022001)和河南省科技攻关计划项目(222102240088)

作者简介：张俊江(1990—)，男，讲师，博士，主要从事电动车辆设计与控制研究，E-mail：zhangjunjiang2020@163.com

通信作者：徐立友(1974—)，男，教授，博士生导师，主要从事车辆传动理论与控制技术研究，E-mail：xlyou@haust.edu.cn

0　引言

国家“十四五规划和 2035 年远景目标纲要”提出 2030 年碳达峰、2060 年碳中和的目标[1]，而现阶段农业机械主要以柴油机为主要动力，在作业过程中不仅耗油量大，而且气体排放性差。在全球面临能源危机和环境污染的双重压力下，设计研发节能环保的农业机械车辆显得尤为重要[2-6]。随着混合动力汽车技术的成熟，混合动力拖拉机也逐渐发展起来，它同时具有传统燃油拖拉机和纯电动拖拉机的优点[7-9]。其中，串联式混合动力拖拉机作业过程中能量多次转换，能量利用效率较低；并联式混合动力拖拉机可由柴油机直接提供动力或者电机、柴油机共同提供动力输出，无能量的二次转换，能量利用效率高。

节能控制策略作为混合动力拖拉机的核心控制策略，它直接影响混合动力拖拉机的整机性能。目前节能控制策略主要有两类：基于规则的控制策略和基于优化的控制策略[10-12]。基于规则的控制策略开发成本低、易于实现，被广泛用于各种类型的混合动力车辆。骆光炬[13]针对串联式柴电混合动力拖拉机提出一种模糊推理式节能控制策略，发动机需求功率根据自设的模糊推理规则表确定，结果表明，与功率跟随式控制策略相比，燃油经济性提高 20.92%。XU 等[14]针对增程式电动拖拉机提出一种预定义节能控制策略，结果表明，在连续转场作业模式下，燃油消耗下降 34.22%。方树平等[15]在串联式混合动力拖拉机基础上，针对电动汽车与电动拖拉机的不同提出了一种基于模糊控制式节能控制策略，结果表明，采用模糊控制式节能控制策略时，动力电池荷电状态(State of charge，SOC)曲线变化最为平缓。然而基于规则的控制策略是确定的，且是根据设计者的经验确定，不具有良好的工况适应性[16]。基于优化的控制策略以某代价函数的最小化或最大化进行求解，代价函数一般是控制目标的度量。LEE 等[17]基于动力传动系统仿真模型，建立功率分流比策略，采用确定性动态规划算法(DDP)优化了混合动力拖拉机的动力分配策略，通过仿真试验证明所提出的控制策略可节省混合动力拖拉机燃油消耗。李同辉等[18]设计了一种基于随机动态规划 + 极值搜索算法(SDP_PESA)的实时自适应节能控制策略，利用随机动态规划离线生成的状态反馈控制表作为控制输入参考，保证近似全局最优，并引入自适应寻优算法-极值搜索算法动态搜索系统输出的局部极大值，来反馈校正 SDP 的控制输入，整机驱动效率得到了提高，有效增加了拖拉机作业里程。然而，确定性动态规划算法的解决方案需要提取控制规则，计算量比较大，该过程耗费时间长；基于随机动态规划 + 极值搜索算法的实时自适应节能控制只保证近似全局最优，且控制策略较复杂。

本文以柴电并联式混合动力拖拉机为研究对象，提出一种基于庞特里亚金极小值原理(Pontryagin's minimum principle，PMP)的全局优化节能控制策略[19-23]。通过优化分配柴油机和电机两者的功率，在保证动力性的同时，降低整机的等效燃油消耗量。阐述混合动力拖拉机的整机拓扑结构、性能参数，对其主要部件进行仿真建模，在整机模型基础上设计基于庞特里亚金极小值原理的节能控制策略，并与基于最佳经济性曲线的节能控制策略进行对比。

1　拖拉机动力结构及主要参数

1.1　混合动力拖拉机拓扑结构

图 1 为并联式柴电混合动力拖拉机的拓扑结构，该拖拉机拥有柴油机和电机两套驱动系统，以柴油机为主动力源，电机为辅助动力源。发动机和电机输出力矩通过转矩耦合器输送到变速器输入轴上，变速器输出动力，分别作为中央传动装置、PTO 动力输出轴的动力输入。

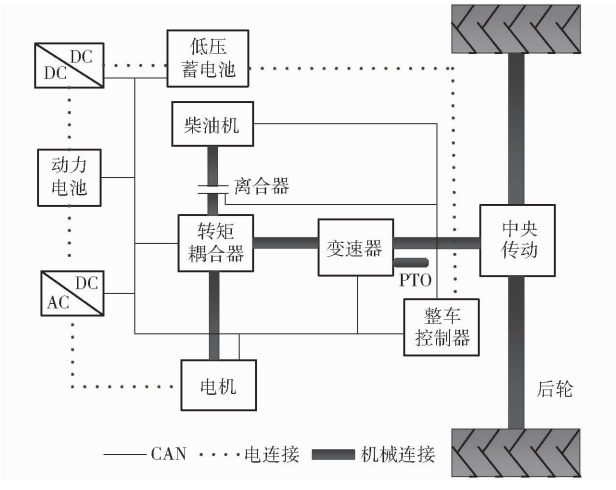

图 1　并联式柴电混合动力拖拉机拓扑结构图

Fig. 1　Topology of diesel-electric parallel hybrid tractor

整车控制器与动力电池、低压蓄电池、柴油机、离合器、驱动电机、变速器、AC/DC 模块、DC/DC 模块分别通过 CAN 总线连接，根据整机总需求功率、动力电池 SOC 状态，按照整机控制策略和算法，动态分配柴油机和电机功率，从而使拖拉机获得最佳的动力性能和经济性能。

1.2　混合动力拖拉机主要部件性能参数

以 162 kW 混合动力拖拉机为对象进行节能控

制策略研究,根据其工作条件选取该混合动力拖拉机的主要部件[24],具体参数见表 1。

表 1 混合动力拖拉机主要部件参数

Tab. 1 Parameters of main components of hybrid tractors

部件	参数	数值
柴油机	额定功率/kW	162
	额定转速/(r·min^{-1})	2 500
	最大转矩/(N·m)	800
电机	额定功率/kW	30
	额定转矩/(N·m)	96
	额定转速/(r·min^{-1})	3 000
动力电池	能量容量/(A·h)	70
	额定电压/V	360
	SOC	0.25 ~ 0.90

1.3 理论速度与传动比确定

根据拖拉机工作特性、拖拉机各种作业工况的速度范围、混合动力拖拉机耦合系统输出特性,设计中央传动比和变速箱传动比,并计算拖拉机各挡理论速度[25-26]。

旋耕作业时,拖拉机行进速度为 4 ~ 5 km/h,PTO 转速理论值为 540 r/min,由此确定中央传动速比 i_0 为 19.10;共设计 7 个前进挡位,其中运输挡位 3 个、作业挡位 2 个、缓行挡位 2 个[27-28]。对应的变速器传动比依次增加,理论速度依次递减,具体参数见表 2。

表 2 混合动力拖拉机传动比及其理论速度

Tab. 2 Hybrid tractor transmission ratio and its theoretical speed

参数	运输Ⅲ挡	运输Ⅱ挡	运输Ⅰ挡	作业Ⅱ挡	作业Ⅰ挡	缓行Ⅱ挡	缓行Ⅰ挡
传动比	0.864	1.377	2.307	3.296	4.963	7.405	11.208
理论速度/(km·h^{-1})	39.980	28.668	17.164	11.977	7.654	5.231	3.522

2 混合动力拖拉机模型构建

根据混合动力拖拉机拓扑结构,建立了其主要部件模型,包括:传动系统模型、旋耕机组动力学模型、犁耕机组动力学模型、轮胎模型、电机模型、柴油机模型、动力电池模型,最后搭建了整机仿真模型。

2.1 混合动力拖拉机传动系统模型

混合动力拖拉机需求功率来源于电机和柴油机,以转矩耦合器输入端求取整机需求功率,即

$$P_{req} = P_m\eta_m + P_e\eta_e \tag{1}$$

式中 P_{req}——转矩耦合器输入端功率,kW

P_m——电机功率,kW

η_m——电机效率

P_e——柴油机功率,kW

η_e——柴油机效率

根据拖拉机作业速度和各部件参数计算动力源转速,以柴油机转速为动力源转速,计算式为

$$n_e = n_{req} = n_{tire}i_t i_0 \tag{2}$$

其中

$$n_{tire} = \frac{v}{0.377r} \tag{3}$$

式中 n_{tire}——驱动轮转速,r/min

v——拖拉机作业速度,km/h

n_e——柴油机转速,r/min

n_{req}——需求转速,r/min

r——驱动轮半径,m

i_t——变速器传动比

2.2 旋耕机组动力学模型

混合动力拖拉机牵引旋耕机组作业时机组功率平衡关系为

$$P_{req} = \left(\frac{P_{drive}}{\eta_{zy}\eta_b} + \frac{P_r}{\eta_b}\right) \Big/ \eta_o \tag{4}$$

其中

$$P_{drive} = \frac{\left(mgf\cos\alpha + mg\sin\alpha + m\delta\dot{v} + \dfrac{C_d A v^2}{21.15}\right)v}{3\,600} \tag{5}$$

$$P_r = \frac{P_c + P_{th} + P_a + P_h}{\eta_r} \tag{6}$$

式中 P_{drive}——拖拉机行驶功率,kW

P_r——旋耕机消耗功率,kW

m——拖拉机使用质量,kg

f——滚动阻力系数

α——坡度,(°)

C_d——拖拉机风阻系数

A——拖拉机迎风面积,m^2

δ——拖拉机质量换算系数

P_c——切土消耗功率,kW

P_{th}——抛土消耗功率,kW

P_a——旋耕机前进消耗功率,kW

P_h——克服土壤水平反力的消耗功率,kW

η_r——旋耕机组机械传动效率

η_{zy}——中央传动效率

η_b——变速器传动效率

η_o——转矩耦合器效率

当拖拉机低速作业时,可以忽略空气阻力、加速度阻力对拖拉机的影响[27]。

该混合动力拖拉机装配双作用离合器,可实现 PTO 动力的独立控制,旋耕作业时机组存在关系[28]

$$\begin{cases} P_r = P_{PTO} = \dfrac{n_{PTO}T_{PTO}}{9\,550} \\ v = v_r \end{cases} \tag{7}$$

式中　P_{PTO}——动力输出轴消耗功率，kW

n_{PTO}——动力输出轴转速，r/min

T_{PTO}——动力输出轴转矩，N·m

v_r——旋耕机前进速度，km/h

2.3　犁耕机组动力学模型

拖拉机工作时，其驱动力需克服拖拉机本身滚动阻力以及其他行驶阻力，驱动力 F_{TN} 与各种阻力的平衡关系为

$$F_{TN} = F_g + F_f + F_p + F_{Af} + F_i \tag{8}$$

式中　F_g——耕作阻力，N

F_f——滚动阻力，N

F_p——坡度阻力，N

F_{Af}——空气阻力，N

F_i——加速阻力，N

通常情况下，拖拉机驱动力 F_{TN} 主要由其配套农具工作时的耕作阻力 F_g 来确定。其计算式为

$$F_g = Zb_l h_k k \tag{9}$$

式中　Z——犁铧个数

b_l——单个犁铧宽度，cm

h_k——耕深，cm

k——土壤比阻，N/cm^2

混合动力拖拉机牵引犁耕机组作业时转矩耦合器输入端需求功率为

$$P_{req} = \frac{F_{TN} v}{\eta_{zy} \eta_b \eta_o} \tag{10}$$

2.4　轮胎模型

Duggof 模型属于理论模型，适用于车辆动力学控制算法的研究，故采用 Duggof 轮胎模型计算驱动轮的驱动力[29]

$$F_q = \begin{cases} F_Z \left[\varphi - \varphi^2 \dfrac{F_Z(1-\zeta)}{4c\zeta} \right] & \left(\dfrac{c\zeta}{1-\zeta} \geqslant \dfrac{\varphi F_Z}{2} \right) \\ \dfrac{c\zeta}{1-\zeta} & \left(\dfrac{c\zeta}{1-\zeta} < \dfrac{\varphi F_Z}{2} \right) \end{cases} \tag{11}$$

式中　F_q——对应驱动轮驱动力，N

F_Z——对应驱动轮载荷，N

φ——对应驱动轮滑转率，%

ζ——对应驱动轮附着因数

c——挂钩牵引力作用点与后轮中心水平距离，mm

2.5　电机模型

选取性能优越的永磁同步电机作为拖拉机的电力驱动系统，其功率与转速、转矩三者之间关系为

$$P_m = \frac{n_m T_m}{9\,550} \tag{12}$$

式中　n_m——电机转速，r/min

T_m——电机转矩，N·m

电机模型采用数值模型法建立，通过电机效率试验数据，采用样条插值方法得到电机系统效率、转矩与转速的关系，其关系确定且唯一，适用于控制策略研究，电机效率数值模型如图 2 所示。

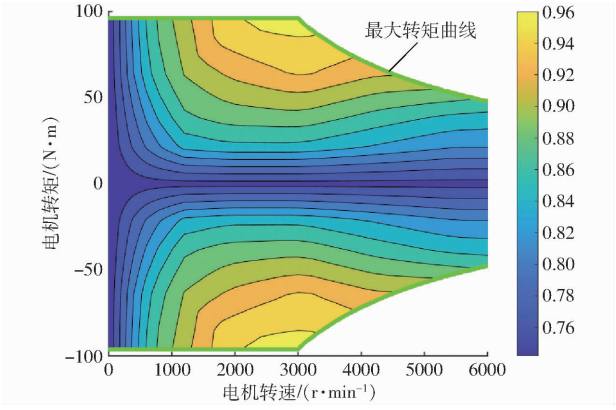

图 2　电机模型 MAP 图

Fig. 2　MAP diagram of motor model

2.6　柴油机模型

根据混合动力拖拉机使用条件选取相应功率的柴油发动机，只考虑发动机各输入输出参数间的关系

$$P_e = \frac{n_e T_e}{9\,550} \tag{13}$$

式中　n_e——柴油机转速，r/min

T_e——柴油机转矩，N·m

柴油机建模方法主要分为理论建模法和数值建模法两种[30]。理论建模法是基于发动机结构参数，采用热力学理论、燃烧理论、流体力学及传热学理论，建立发动机工作过程的数学模型；而数值建模法是通过搭建发动机的试验台架，测试发动机负荷特性及速度特性曲线，然后用插值拟合的方法构建数值模型。在仿真过程中只关心发动机的输入输出参数，对发动机内部的燃烧、传热过程可忽略，因而此处采用数值建模法得到柴油机燃油消耗率的数值模型，如图 3 所示。

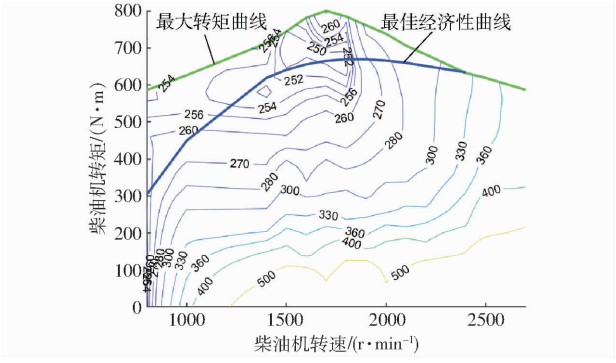

图 3　柴油机模型 MAP 图

Fig. 3　MAP diagram of diesel engine model

2.7 动力电池模型

描述动力电池工作时的外特性模型为动力电池模型,目前大多采用等效电路模型,因其对动力电池的各种工作状态有较好的适用性,且可以推导出模型的状态方程,故此处采用等效电路模型中的等效内阻模型,将动力电池等效为一个理想电压源和一个电阻串联的电路模型,数学方程简单,便于计算建模。

根据欧姆定律可知,动力电池电压特性方程为

$$U_b = E_0 - I_b R_0 \tag{14}$$

式中 U_b——动力电池输出电压,V

E_0——动力电池端电压,V

I_b——动力电池输出电流,A

R_0——动力电池内阻,Ω

忽略动力电池内阻及放电因素对电动势 E_0 的影响,设 E_0 为常数,则动力电池输出功率 $P_{b\max}$ 为

$$P_{b\max} = \frac{U_b I_b}{1\,000} = \frac{(E_0 - I_b R_0) I_b}{1\,000} \tag{15}$$

动力电池需求功率 P_{bat} 为

$$P_{bat} = \frac{P_m}{\eta_{bat}} \tag{16}$$

式中 η_{bat}——电池充电、放电效率

采用安时积分法计算动力电池 SOC 值的变化,计算式为

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_0^t I_b(t)\,\mathrm{d}t}{Q_b} \tag{17}$$

式中 SOC_0——SOC 初始值

Q_b——动力电池额定容量,A·h

2.8 整机仿真模型

结合混合动力拖拉机整机传动系统特点,基于 Matlab 搭建整机仿真模型,如图 4 所示。仿真模型包括机组(旋耕、犁耕)动力学模型、电机模型、柴油机模型、传动系统模型、电池模型和轮胎模型等部分。根据拖拉机作业工况,控制器采集信号,依据式(3)、(4)、(10)等计算处理得到整机需求功率和需求转速(P_{req}、n_{req}),在控制器内部,按照既定的控制策略(包括本文提出和对比策略)分配整机的需求功率,然后输出相应的电机需求功率(P_{mreq})和柴油机需求功率(P_{ereq})作为电机模型和柴油机模型的输入,电机需求功率和柴油机需求功率计算式为

$$\begin{cases} P_{mreq} = P_m \eta_m \\ P_{ereq} = P_e \eta_e \end{cases} \tag{18}$$

电机模型和柴油机模型按照指令工作,输出相应的需求功率和需求转速(P_{mreq}、n_{mreq}、P_{ereq}、n_{ereq}),经传动系统模型将动力传递到轮胎模型(T_v、n_{tire})和机组(旋耕、犁耕)动力学模型(F_{TN}),同时电池模型依据电机模型的需求功率进行能量传递(P_{bat})。

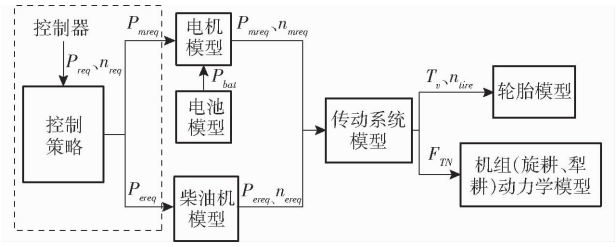

图 4 整机仿真模型简图

Fig. 4 Simulation model of whole machine

3 节能控制策略设计

3.1 基于庞特里亚金极小值原理节能控制策略

3.1.1 节能控制优化模型

混合动力拖拉机有电能和燃油两种能量源,为统一能量,采用等效燃油消耗量作评价。节能控制的目标是通过优化合理分配柴油机和电机之间的运行状态使得等效燃油消耗量最小。混合动力拖拉机作业过程中的等效燃油消耗量可表示为

$$Q_c(t) = \int_0^{t_f} \left(Q_f(t) + \frac{j_m P_b(t)}{j_e \eta_{bat}} \right) \mathrm{d}t \tag{19}$$

其中

$$Q_f(t) = \frac{f_e P_e}{1\,000 \times 3\,600 \times 0.84} \tag{20}$$

式中 $Q_c(t)$——等效燃油消耗量,L

t_f——终端时刻

j_e——油价格,元/L

j_m——电价格,元/(kW·h)

$Q_f(t)$——t 时刻消耗燃油量,L

$P_b(t)$——t 时刻电池充放电功率,放电时大于 0,充电时小于 0,kW

f_e——t 时刻发动机油耗,g/(kW·h)

根据式(17)电池 SOC 值的计算可得系统状态方程

$$\dot{SOC}(t) = -\frac{I_b(t)}{Q_b} = -\frac{U_b(t) - \sqrt{U_b^2 - 4P_b(t)R_0(t)}}{2R_0(t)Q_b} \tag{21}$$

由于各部件工作能力受到现实条件的限制,故需要满足约束条件

$$\begin{cases} P_{m\min} \leqslant P_m(t) \leqslant P_{m\max} \\ P_{e\min} \leqslant P_e(t) \leqslant P_{e\max} \\ SOC_{\min} \leqslant SOC(t) \leqslant SOC_{\max} \end{cases} \tag{22}$$

式(22)构成了控制变量的容许可达集 R。

3.1.2 Hamilton 函数建立

针对上述节能控制的优化问题,采用庞特里亚金极小值原理进行求解,以动力电池 SOC 值为状态变量,以柴油机功率 P_e、电机功率 P_m 为控制变量,引

入协态变量 λ，构建 Hamilton 函数为

$$H(x,u,\lambda,t)=Q_f(t)-\lambda(t)\frac{j_m}{j_e\eta_{bat}}\dot{SOC}(t)=$$

$$Q_f(t)-\lambda(t)\frac{j_m}{j_e\eta_{bat}}\frac{U_b(t)-\sqrt{U_b^2-4P_b(t)R_0(t)}}{2R_0(t)Q_b} \tag{23}$$

式中　x——状态变量

u——控制变量

$\lambda(t)$——待定的拉格朗日乘子

正则方程为

$$\dot{\lambda}(t)=-\frac{\partial H(SOC,u,\lambda)}{\partial SOC}=\lambda(t)\frac{j_m}{j_e\eta_{bat}}\frac{\partial SOC(t)}{\partial SOC} \tag{24}$$

一般情况下，电池电压、电阻特性与电池本身相关，短时间内对 SOC 的依赖性可忽略不计，本文假设动力电池电流变化率近似为 0，即 $\dot{\lambda}(t)=0$，则由正则方程求解可得

$$\lambda(t)=\lambda(t_0)=\lambda_0 \tag{25}$$

状态方程为

$$x(t)=\dot{SOC}(t) \tag{26}$$

边界条件为

$$\begin{cases}SOC(t_0)=SOC_0\\SOC(t_f)=SOC_f\end{cases} \tag{27}$$

极小值条件为

$$H[x^*(t),\lambda(t),u^*(t)]=\min_{u\in R}H[x^*(t),\lambda(t),u(t)] \tag{28}$$

最优控制变量为

$$u^*=\arg\min_{u\in R}[x(t),\lambda(t),u(t)] \tag{29}$$

3.1.3　庞特里亚金极小值原理控制策略求解

基于庞特里亚金极小值原理控制策略采用循环迭代的方法对柴油机和电机的工作功率进行合理寻优，以使整机等效油耗最小，其求解流程如图 5 所示。首先初始化整机参数和拉格朗日因子 λ_0，然后通过整机动力学方程求解整机车轮处的需求功率，整机采用极小值原理进行柴油机、电机功率分配，具体步骤为

（1）根据整机车轮处的需求功率，求取中央传动需求功率为

$$P_{zy}(t)=\frac{P_v(t)}{\eta_{zy}} \tag{30}$$

式中　$P_v(t)$——整机车轮处需求功率，kW

$P_{zy}(t)$——中央传动需求功率，kW

（2）求取变速器输入端需求功率 $P_{bsq}(t)$。首先根据中央传动需求功率和拖拉机车速查表获取变速器传动比，在已知传动比的基础上计算变速器输出端转矩，然后通过变速器传动比和转矩查表获取变速器效率，再通过变速器传动比和效率计算变速器输入端转矩，最后由转矩和传动比计算变速器输入端需求功率。

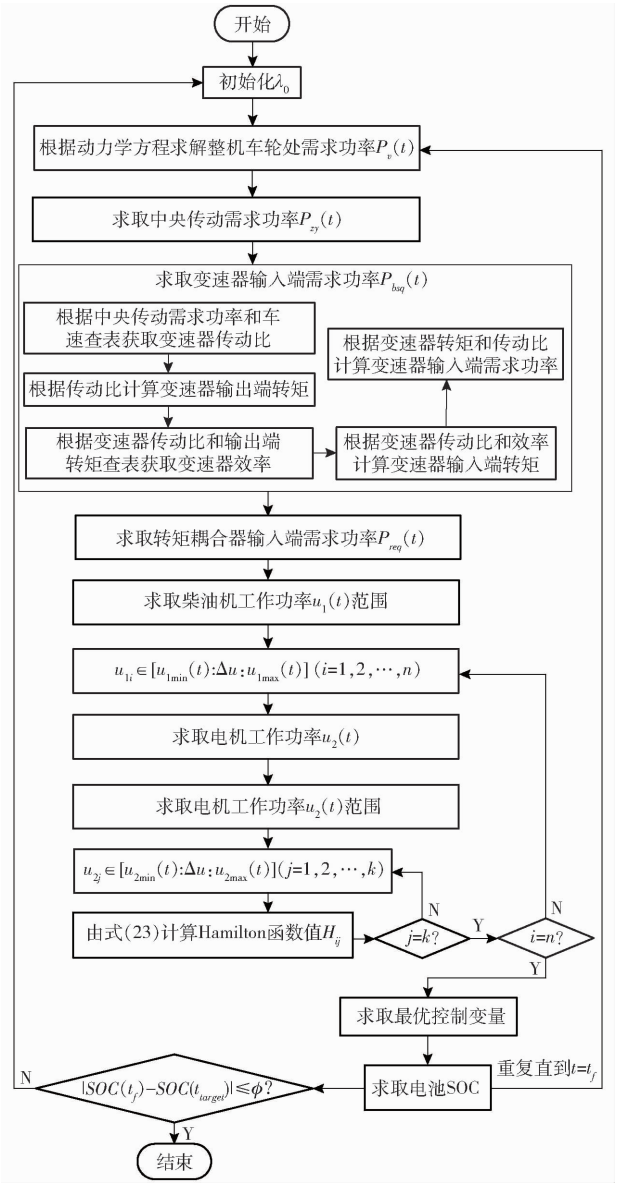

图 5　基于庞特里亚金极小值原理控制策略求解流程图

Fig. 5　Control strategy solving process based on Pontryagin's minimum principle

（3）求取转矩耦合器输入端需求功率 $P_{req}(t)$。根据变速器输入端转矩和转速，查表获取转矩耦合器效率，然后通过变速器传动比和效率计算变速器输入端转矩，最后由转矩和传动比计算转矩耦合器输入端需求功率。

（4）根据转矩耦合器输入端功率，求取柴油机工作功率的取值范围为

$$\begin{cases}u_{1\max}=P_{e\max}\\u_{1\min}=0\end{cases} \tag{31}$$

式中 P_{emax}——柴油机最大功率,kW

(5)在取值范围内,以步长 Δu 对柴油机的工作功率进行离散,即

$$u_{1i} \in [u_{1\min}(t):\Delta u:u_{1\max}(t)] \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{32}$$

(6)求取电机工作功率,并确定其取值范围,即

$$u_2(t) = P_{req}(t) - u_{1i} \tag{33}$$

$$\begin{cases} u_{2\max} = \min(P_{req}(t), P_{m\max}) \\ u_{2\min} = \max(P_{req}(t) - P_{e\max}, -P_{m\max}) \end{cases} \tag{34}$$

式中 P_{mmax}——电机最大功率,kW

(7)在取值范围内,以步长 Δu 对电机工作功率进行离散,即

$$u_{2j} \in [u_{2\min}(t):\Delta u:u_{2\max}(t)] \quad (j=1,2,\cdots,k) \tag{35}$$

(8)根据式(23)计算每个候选控制变量(u_{1i}, u_{2j})所对应的 Hamilton 函数值 $H(t, u_{1i}, u_{2j})$,直到 i 和 j 循环结束。

(9)求取最优控制变量

$$[u_1, u_2]^* = \text{argmin}(H(t, u_{1i}, u_{2j})) \tag{36}$$

(10)根据最优控制变量,求取动力电池状态值。判断是否满足条件,即

$$|SOC(t_f) - SOC(t_{target})| \leqslant \phi \tag{37}$$

式中 ϕ——数值极小的常数

如果满足,则循环结束;否则重新选取 λ_0,直到满足条件为止。

3.2 基于最佳经济性曲线的控制策略

3.2.1 基于最佳经济性曲线的控制原理

基于最佳经济性曲线的控制策略作为对比控制策略,也是一种基于规则的控制策略。它以柴油机的最佳经济性曲线为目标工作区域,使柴油机尽可能保持在经济高效区域工作。当柴油机提供的功率无法满足混合动力拖拉机所需的功率时,电机开始工作,补偿那部分不足的功率;当柴油机提供的功率大于拖拉机所需功率时,过剩部分的功率分流给电机,电机运转、发电来给动力电池充电。在动力电池 SOC 值低于设定的最低工作 SOC 值时,电机停止工作,仅有柴油机工作,提供全部需求功率。

3.2.2 模型搭建

由拖拉机行驶速度 v 和驱动力 F_{TN}可以求得拖拉机需求功率 P_{req}和柴油机转速 n_e,进而得到柴油机的转矩 T_e和功率 P_e。柴油机以最佳经济性曲线工作,且动力电池 SOC 值在允许使用范围内时:当 $P_{req} \geqslant P_e$ 时,$P_m = P_{req} - P_e$,若 $P_m \geqslant 30$ kW,则 $P_m = 30$ kW,$P_e = P_{req} - P_m$;当 $P_{req} \leqslant P_e$ 时,$P_m = P_{req} - P_e$,若 $P_m \leqslant -30$ kW,则 $P_m = -30$ kW。

约束条件为

$$\begin{cases} P_{m\min} \leqslant P_m(t) \leqslant P_{m\max} \\ P_{e\min} \leqslant P_e(t) \leqslant P_{e\max} \\ SOC_{\min} \leqslant SOC(t) \leqslant SOC_{\max} \end{cases} \tag{38}$$

如果动力电池不在允许使用范围内,则仅柴油机工作,提供拖拉机作业需求功率。

4 结果分析

4.1 旋耕工况

拖拉机在旋耕作业时,PTO 独立工作,不受拖拉机行驶状况的影响,根据田间旋耕作业试验,将实测数据输入到仿真模型中,其转矩转速如图 6 所示,作业行进速度如图 7 所示。

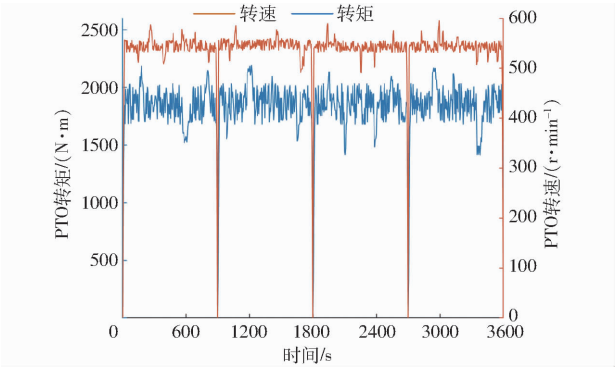

图 6 PTO 转矩、转速曲线

Fig. 6 PTO torque and speed curves

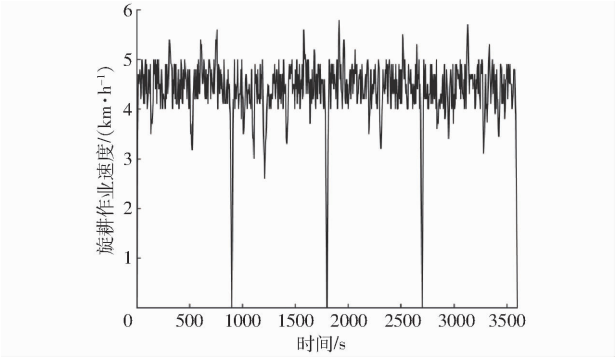

图 7 旋耕作业行进速度

Fig. 7 Travel speed of rotary tillage operation

拖拉机旋耕作业时,在两种控制策略下,电机功率如图 8 所示;柴油机功率如图 9 所示;电池 SOC 状态值变化如图 10 所示。

由图 8 ~ 10 可知,在旋耕工况下,混合动力拖拉机的整机负荷达到 150 kW。在基于庞特里亚金极小值原理(PMP)控制策略下,电机工作功率一直为正;柴油机工作功率较集中在 120 kW;SOC 曲线呈直线下降,没有出现上升;等效燃油耗油量 29.09 L。在基于最佳经济性曲线的控制策略下,电机工作功率有正有负;柴油机工作功率区间相对较大;SOC 曲线整体呈下降趋势,但存在上升阶

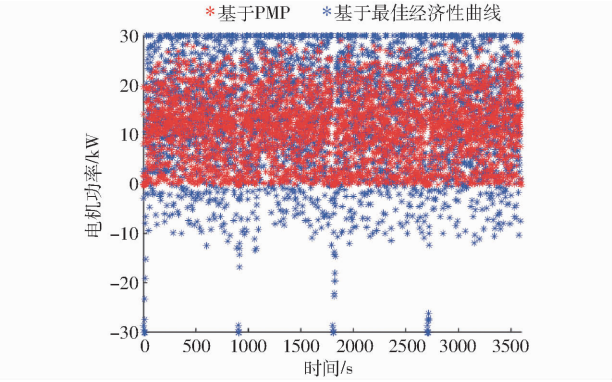

图 8　两种控制策略下电机功率(旋耕)

Fig. 8　Motor power under two control strategies

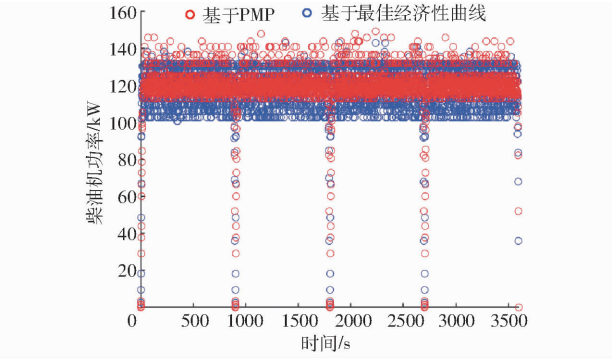

图 9　两种控制策略下柴油机功率(旋耕)

Fig. 9　Diesel engine power under two control strategies

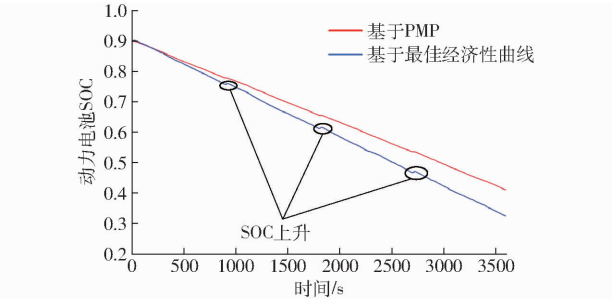

图 10　两种控制策略下 SOC 变化曲线(旋耕)

Fig. 10　Plot of SOC value change under two control strategies

段;等效燃油消耗量 32.48 L。基于庞特里亚金极小值原理(PMP)控制策略下,等效燃油消耗量下降 10.44%。

旋耕作业工况下两种控制策略的柴油机、电机 MAP 图如图 11、12 所示。

由图 11 可得,基于最佳经济性曲线的控制策略下,柴油机一直在最佳经济性曲线附近工作,而基于 PMP 的控制策略下,柴油机工作范围较大。当整机需求功率较小时,PMP 控制策略下的柴油机功率随之降低,而基于最佳经济性曲线控制策略下,柴油机功率无法降低。由图 12 可得,特别是黑色框区域,基于最佳经济性曲线的控制策略下,电机出现负转矩,该部分负转矩对应图 10 中 SOC 上升部分,而基于 PMP 的控制策略下,电机没有出现负转矩,避免

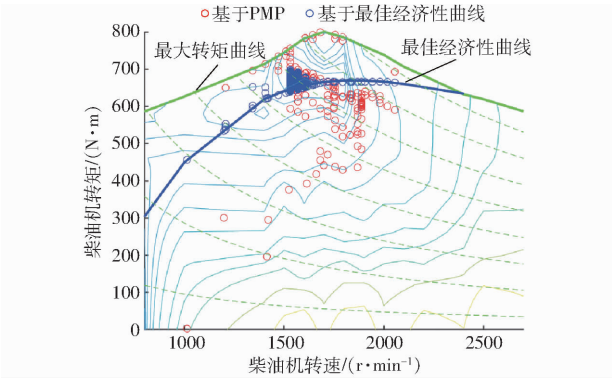

图 11　旋耕作业柴油机 MAP 图

Fig. 11　MAP diagram of diesel engine in rotary tillage operation

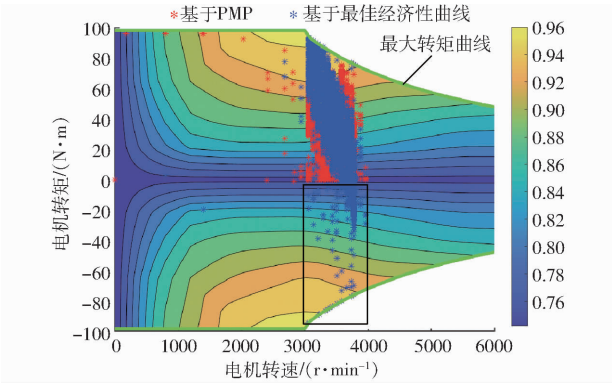

图 12　旋耕作业电机 MAP 图

Fig. 12　MAP diagram of rotary tillage operation motor

了能量的二次转换。

4.2　犁耕工况

根据拖拉机的田间犁耕作业试验,将实测数据输入到仿真模型中,其作业行进速度如图 13 所示,犁耕阻力如图 14 所示。

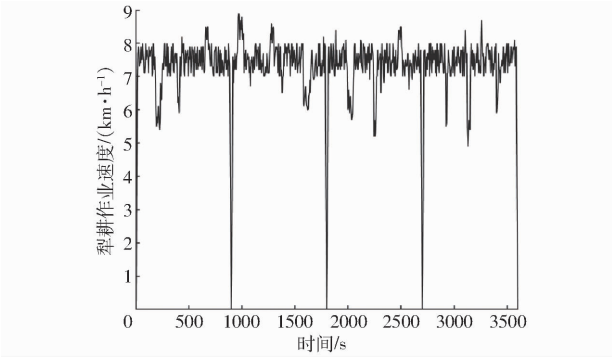

图 13　犁耕作业速度曲线

Fig. 13　Speed curve of travel of ploughing operations

拖拉机犁耕作业时,两种控制策略下,电机功率如图 15 所示;柴油机功率如图 16 所示;电池 SOC 状态值变化如图 17 所示。

由图 15~17 可知,基于 PMP 的控制策略下,约前 3 450 s,电机在一直输出功率,没有出现负功率,约 3 450 s 后,电池 SOC 达到预设工作最低值,电机不再输出功率,处于吸收功率、发电状态,此时柴油

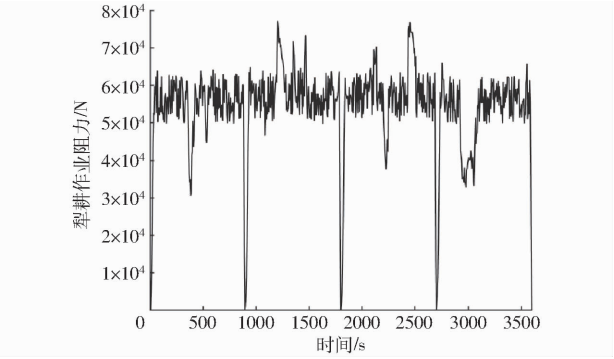

图 14 犁耕阻力曲线

Fig. 14 Curve of ploughing resistance

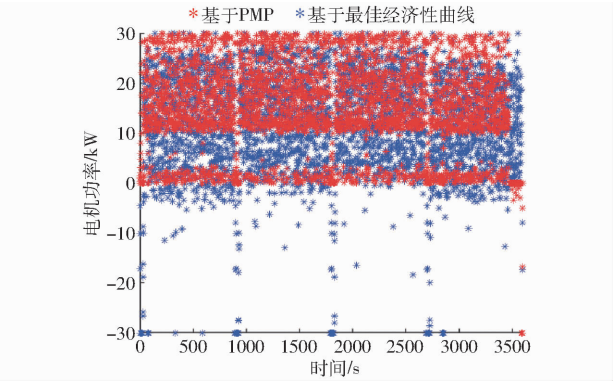

图 15 两种控制策略下电机功率(犁耕)

Fig. 15 Motor power under two control strategies

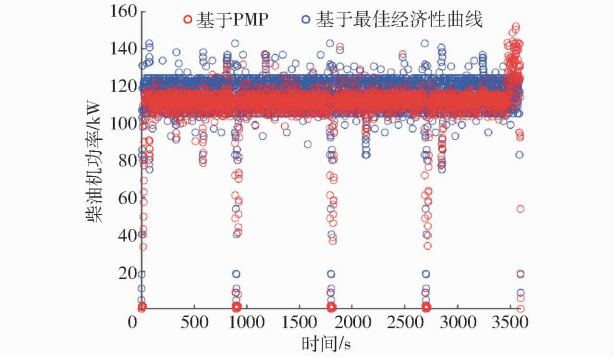

图 16 两种控制策略下柴油机功率(犁耕)

Fig. 16 Diesel engine power under two control strategies

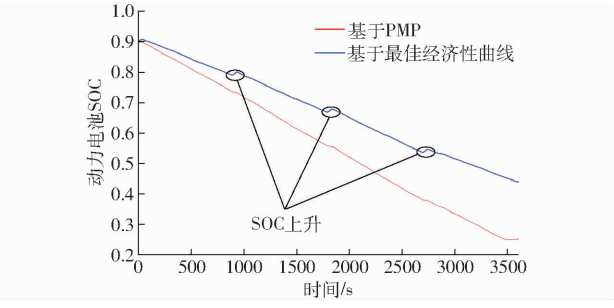

图 17 两种控制策略下 SOC 变化曲线(犁耕)

Fig. 17 Plot of SOC value change under two control strategies

机工作功率突然增加;SOC 曲线呈下降趋势,没有出现上升;等效燃油消耗量 26.79 L。基于最佳经济性曲线的控制策略下,电机工作功率有正有负;SOC 曲线整体呈下降趋势,但存在上升阶段;等效燃油消耗量 30.17 L。基于庞特里亚金极小值原理(PMP)控制策略下,等效燃油消耗量下降 11.20%。

犁耕作业工况下两种控制策略的柴油机、电机 MAP 图如图 18、19 所示。

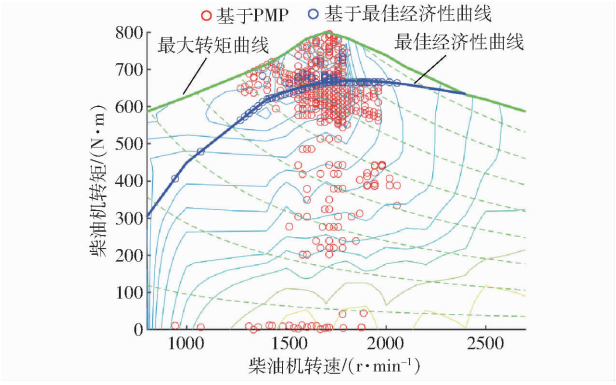

图 18 犁耕作业柴油机 MAP

Fig. 18 MAP diagram of ploughing operation diesel engine

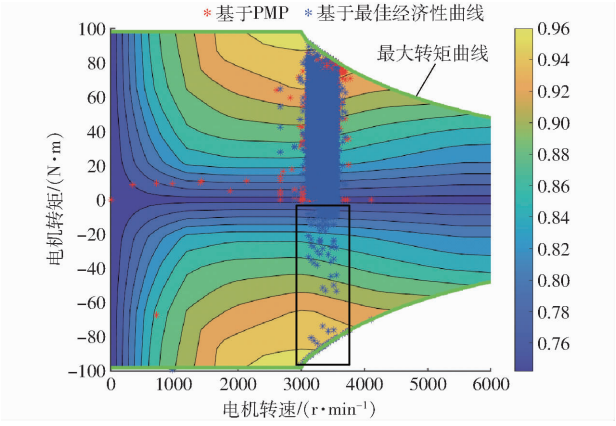

图 19 犁耕作业电机 MAP 图

Fig. 19 MAP diagram of ploughing operation motor

由图 18 可得,基于最佳经济性曲线的控制策略下,柴油机一直在最佳经济性曲线上工作,而基于 PMP 的控制策略下,柴油机工作范围较大。由图 19 可得,特别是黑色框区域,基于最佳经济性曲线的控制策略下,电机出现负转矩,该部分负转矩对应图 17 中SOC 上升部分,而基于 PMP 的控制策略下,电机没有出现负转矩,避免了能源的二次转换。

综上,通过对拖拉机旋耕和犁耕作业工况的仿真结果分析可得:基于极小值原理的控制策略能够同时保证电机和柴油机工作在最佳经济性区域,不会出现电池的反复充电、放电。而基于最佳经济性曲线的控制策略只能保证柴油机工作在最佳经济性区域,柴油机功率受到最佳经济性曲线的限制,无法任意降低。当整机需求功率较低时,柴油机功率过大,多余功率就会分配给电机发电,以致电机出现负转矩,SOC 曲线出现上升波动,电池多次充电、放电,忽视了电机的工作效率,且能量二次转换,整机能量利用率较低。

5　结论

(1)在旋耕工况作业下,基于最佳经济性曲线控制策略等效燃油消耗量 32.48 L,基于庞特里亚金极小值原理的节能控制策略等效燃油消耗量 29.09 L,等效燃油消耗量下降 10.44%。

(2)在犁耕工况作业下,基于最佳经济性曲线控制策略等效燃油消耗量 30.17 L,基于庞特里亚金极小值原理的节能控制策略等效燃油消耗量 26.79 L,等效燃油消耗量下降 11.20%。

(3)基于庞特里亚金极小值原理节能控制策略可以根据具体工况进行自适应调整,合理分配功率,能够同时保证电机和柴油机工作在高效区域,很好地控制电池 SOC 变化,提高能量利用率;而基于最佳经济性曲线的控制策略只能保证柴油机工作在最佳经济性区域,忽视了电机的工作效率。

参　考　文　献

[1] “十四五”规划和 2035 年远景目标纲要(全文)[EB/OL]. (2021-03-13)[2023-01-13]. https://www.guancha.cn/politics/2021_03_13_583945.shtml.

[2] MS I, AQ A, MSK S. Energy crisis in bangladesh: challenges, progress, and prospects for alternative energy resources[J]. Utilities Policy, 2021, 71: 101221.

[3] 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)

[4] 张亚萍. 混合动力用于拖拉机的研究与思考[J]. 农业工程技术, 2021, 41(11): 56-57.
ZHANG Yaping. Hybrid power for tractor research and thinking[J]. Agricultural Engineering Technology, 2021, 41(11): 56-57. (in Chinese)

[5] 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 tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 348-364. (in Chinese)

[6] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.
ZHOU Ji. Smart manufacturing—the main direction of “Made in China 2025”[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284. (in Chinese)

[7] 解少博, 辛宗科, 李会灵, 等. 插电式混合动力公交车电池配置和能量管理策略协同优化的研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(6): 625-631.
XIE Shaobo, XIN Zongke, LI Huiling, et al. A study on coordinated optimization on battery capacity and energy management strategy for a plug-in hybrid electric bus[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(6): 625-631. (in Chinese)

[8] 邓晓亭, 朱思洪, 钱忠祥, 等. 混合动力拖拉机动力耦合装置的研制[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 29-34.
DENG Xiaoting, ZHU Sihong, QIAN Zhongxiang, et al. Research and development on power coupling device of hybrid electric tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 29-34. (in Chinese)

[9] 王小冰. 新型混合动力拖拉机驱动系统设计及仿真[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
WANG Xiaobing. Design and simulation of new hybrid tractor drive system[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[10] 何洪文, 孟祥飞. 混合动力电动汽车能量管理技术研究综述[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(8): 773-783.
HE Hongwen, MENG Xiangfei. A review on energy management technology of hybrid electric vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(8): 773-783. (in Chinese)

[11] 张风奇, 胡晓松, 许康辉, 等. 混合动力汽车模型预测能量管理研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 86-108.
ZHANG Fengqi, HU Xiaosong, XU Kanghui, et al. Status and prospects for model predictive energy management in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 86-108. (in Chinese)

[12] ENANG W, BANNISTER C. Modelling and control of hybrid electric vehicles (a comprehensive review)[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 1210-1239.

[13] 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)

[14] XU L, ZHANG J, LIU M, et al. Control algorithm and energy management strategy for extended range electric tractors[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(5): 35-44.

[15] 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 tandem hybrid tractors[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 36(6): 61-66. (in Chinese)

[16] 高锋阳，张浩然，王文祥，等. 规则控制与行驶工况相结合的现代有轨电车能量管理策略[J/OL]. 机械工程学报，http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220602.1958.058.html.

[17] 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]. Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech., 2016, 3: 231 – 237.

[18] 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(Supp. 2): 530 – 543. (in Chinese)

[19] 李锡云. 基于极小值原理的燃料电池混合动力汽车能量管理方法研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2020.
LI Xiyun. Research on energy management method of fuel cell hybrid vehicle based on minimum principle[D]. Heifei: University of Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)

[20] 吴铁洲，王越洋，许玉姗，等. 基于 PMP 算法的 HEV 能量优化控制策略[J]. 自动化学报，2018，44(11)：2092 – 2102.
WU Tiezhou, WANG Yueyang, XU Yushan, et al. Energy optimal control strategy of HEV with PMP algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2092 – 2102. (in Chinese)

[21] XU Liangfei, YANG Fuyuan, LI Jianqiu, et al. Real time optimal energy management strategy targeting at minimizing daily operation cost for a plug-in fuelcell city bus[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37: 15380 – 15392.

[22] 王哲，谢怡，臧鹏飞，等. 基于极小值原理的燃料电池客车能量管理策略[J]. 吉林大学学报(工学版)，2020，50(1)：36 – 43.
WANG Zhe, XIE Yi, ZANG Pengfei, et al. Energy management strategy of fuel cell bus based on the principle of minimum value[J]. Journal of Jilin University (Engineering Science), 2020, 50(1): 36 – 43. (in Chinese)

[23] 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)

[24] 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)

[25] 李贤哲，刘孟楠，徐立友，等. 拖拉机串联式液力机械复合传动系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(1)：406 – 413.
LI Xianzhe, LIU Mengnan, XU Liyou, et al. Design and test of tractor serial hydraulic and mechanical hybrid transmission system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 406 – 413. (in Chinese)

[26] 华中农业大学. 拖拉机汽车学：拖拉机汽车理论[M]. 北京：中国农业出版社，2001.

[27] 周志立，倪倩，徐立友. 并联混合动力拖拉机传动系参数设计及性能分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2016，37(6)：9 – 15.
ZHOU Zhili, NI Qian, XU Liyou. Parallel hybrid tractor drive train parameter design and performance analysis[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 37(6): 9 – 15. (in Chinese)

[28] 刘孟楠，徐立友，周志立，等. 增程式电动拖拉机及其旋耕机组仿真平台开发[J]. 中国机械工程，2016，27(3)：413 – 419.
LIU Mengnan, XU Liyou, ZHOU Zhili, et al. Establishment of extended range electric tractor and its rotary cultivator's simulation platforms[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(3): 413 – 419. (in Chinese)

[29] 徐立友，张俊江，刘孟楠. 增程式四轮驱动电动拖拉机转矩分配策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版)，2017，38(3)：80 – 85.
XU Liyou, ZHANG Junjiang, LIU Mengnan. Torque distribution strategy for extended-range four-wheel drive electric tractor [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 38(3): 80 – 85. (in Chinese)

[30] LIK V, AN A. Mathematical model of the formation and burning of smoke[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 862(3): 032050.