doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.006

考虑轨迹跟踪性能与经济性的无人驾驶 HMCVT 拖拉机分层协同控制策略研究

徐立友[1,2]　陶　源[1]　张俊江[1,2]　温昌凯[3]　王东青[2]　刘孟楠[2]　闫祥海[1]

(1. 河南科技大学车辆与交通工程学院, 洛阳 471003; 2. 中国一拖集团有限公司, 洛阳 471039;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 无人驾驶拖拉机在轨迹跟踪的过程中以跟踪性能为主,忽视作业能耗导致经济性较差。为此提出了一种考虑经济性与轨迹跟踪性能的分层协同控制策略。首先以纵向偏差和横向偏差为目标、以加速度和前轮转角速度为约束,采用模型预测控制算法建立轨迹跟踪系统,其次以发动机燃油消耗率和液压机械无级变速器传动效率比为优化目标,建立基于外部参数优化的二元调节经济性控制策略。在此基础上,以拖拉机下一时刻预测速度和当前拖拉机犁耕阻力为传递变量,融合轨迹跟踪系统、经济性控制策略形成分层协同控制策略。采用纯跟踪算法与一元调节经济性控制策略作为对比策略,基于 Matlab 仿真平台对该分层协同控制策略进行仿真试验,并通过硬件在环试验平台验证了该分层协同控制策略的有效性,结果表明:与对比策略相比,分层协同控制策略有效减小了无人驾驶拖拉机轨迹跟踪偏差,提高了拖拉机经济性,速度方差降低 36.7%,纵向跟踪偏差减小 89.8%,横向跟踪偏差减小 91.7%,拖拉机油耗量减小 11.8%。

关键词: 无人驾驶拖拉机; 液压机械无级变速器; 模型预测控制算法; 轨迹跟踪; 协同控制策略

中图分类号: S219.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0061-12　　**OSID**:

Hierarchical Cooperative Control Strategy of Unmanned HMCVT Tractor Considering Trajectory Tracking Performance and Economy

XU Liyou[1,2]　TAO Yuan[1]　ZHANG Junjiang[1,2]　WEN Changkai[3]　WANG Dongqing[2]
LIU Mengnan[2]　YAN Xianghai[1]

(1. *College of Vehicle and Traffic Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*
2. *YTO Group Co.*, *Ltd.*, *Luoyang* 471039, *China*
3. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Most of the unmanned tractors in the process of trajectory tracking focus on the tracking performance, ignoring the operational energy consumption resulting in poor economy. Aiming at the above problems, a layered collaborative control strategy that considered economy and trajectory tracking performance was proposed. Firstly, the trajectory tracking system was established by model predictive control algorithm with longitudinal deviation and transverse deviation as the target and acceleration and front wheel angular speed as the constraints, and secondly, the binary regulating economic control strategy based on external parameter optimization was established by taking the ratio of engine fuel consumption rate and hydro-mechanical CVT transmission efficiency as the optimization target. On this basis, the trajectory tracking system and economic control strategy were integrated to form a hierarchical cooperative control strategy with the predicted speed of the tractor at the next moment and the current plow resistance of the tractor as the transfer variables. Pure tracking and one-dimensional economic control strategy were used as the comparison strategy, and the cooperative control strategy was simulated based on the Matlab simulation platform, and the effectiveness of the cooperative control strategy was

收稿日期: 2024-10-26　修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001203)、河南省高校科技创新团队支持计划项目(24IRTSTHN029)和中原科技创新领军人才支持计划项目(244200510043)

作者简介: 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

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

verified by the hardware-in-the-loop test platform. The results showed that compared with the comparison strategy, the layered cooperative control strategy effectively reduced the trajectory tracking deviation of the unmanned tractor and improved the tractor's economy, the speed variance was reduced by 36.7%, the longitudinal tracking deviation was reduced by 89.8%, the lateral tracking deviation was reduced by 91.7%, and the tractor fuel consumption was reduced by 11.8%.

Key words: unmanned tractor; hydro-mechanical continuously variable transmission; model predictive control algorithm; trajectory tracking; cooperative control strategy

0 引言

无人驾驶农机是解决农业劳动强度大、劳动力资源短缺问题,实现农业现代化的重要基础[1-2]。近年来,随着农业机械化进程的持续推进,农机的保有量也逐年增加,环境污染和能源问题成为社会与行业关注的焦点[3-4]。液压无级变速器(Hydro-mechanical continuously variable transmission, HMCVT)以其传动效率高、无级调速范围广、传动功率大等特点,被广泛应用于农业机械、工程机械等对载荷要求较高的机械领域[5]。通过设计合理的HMCVT控制策略,提高拖拉机燃油经济性,是缓解环境污染、能源问题的重要方法之一[6]。因此,农机无人驾驶技术与HMCVT控制技术的发展对缓解农业劳动力不足、环境污染以及能源问题具有重要支撑作用。

轨迹跟踪技术作为无人驾驶的重要一环,是当前各大高校与企业的研究热点[7-15]。当前的轨迹跟踪技术主要采用PID、滑膜控制、LQR、MPC等较为成熟的控制算法,并结合模糊控制、深度学习、强化学习等方法对控制器进行优化。

HMCVT的最佳经济性控制策略作为提高拖拉机燃油经济性的重要方法,是HMCVT研究热点。国内外相关学者针对车辆轨迹跟踪方法和HMCVT的经济性控制策略[16-18]进行了大量研究,但是针对装备HMCVT的无人驾驶拖拉机轨迹跟踪过程中轨迹跟踪精度和经济性协同控制的问题鲜有研究。因此,针对无人驾驶拖拉机轨迹跟踪性能与经济性协同控制问题,本文提出一种考虑经济性与轨迹跟踪性能的分层协同控制策略。该控制策略主要包括基于模型预测控制算法的轨迹跟踪系统和基于外部参数优化的二元调节经济性控制策略,基于模型预测控制算法的轨迹跟踪系统提高无人驾驶拖拉机作业时的轨迹跟踪精度,基于外部参数优化的二元调节经济性控制策略减少拖拉机的油耗量,提高拖拉机的经济性,轨迹跟踪系统将所预测的下一时刻拖拉机行驶速度传递给经济性控制策略,提高经济性控制策略的节能效果,以拖拉机下一时刻预测速度和当前时刻拖拉机犁耕阻力为传递变量,融合轨迹跟踪系统、经济性控制策略构建分层协同控制策略。

1 拖拉机模型建立

1.1 拖拉机运动学模型

车辆运动学模型作为最常见的车辆模型之一,是从几何学的角度描述车辆运动状态。由于拖拉机作业时行驶速度较低,因此采用运动学模型设计轨迹跟踪控制器具有良好的可靠性[19]。在大地坐标系 XOY 下拖拉机运动学模型由图1所示。

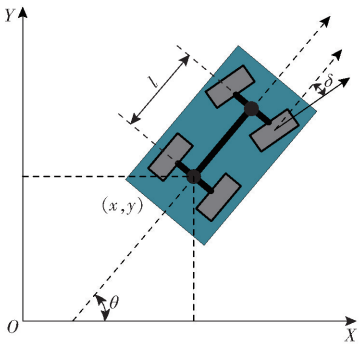

图1 拖拉机运动学模型

Fig. 1 Kinematics model of tractor

因此,通过运动学分析建立拖拉机运动学方程

$$\begin{cases}\dot{x} = v\cos\theta \\ \dot{y} = v\sin\theta \\ \dot{\theta} = v\tan\delta/l\end{cases} \tag{1}$$

式中 x——拖拉机后轴中心横坐标,m

y——拖拉机后轴中心纵坐标,m

θ——拖拉机航向角,rad

v——拖拉机后轴中心速度,m/s

δ——拖拉机前轮转角,rad

l——拖拉机轴距,m

1.2 传动系统模型

拖拉机传动系统主要包括离合器、变速器、传动轴、中央传动器、驱动轮等。通过优化发动机燃油消耗率与HMCVT传动效率提高拖拉机燃油经济性,主要考虑传动比变化对传动效率的影响。

驱动轮输出转矩与发动机转矩的关系为

$$T_w = T_e i_z i_b \eta_b \eta_z \tag{2}$$

式中 T_w——驱动轮输出转矩,N·m

T_e——发动机转矩,N·m

i_z——中央传动比　　i_b——变速器传动比

η_z——中央传动效率

η_b——变速器传动效率

根据拖拉机行驶速度和传动系统各部件的参数可得发动机转速，关系式为

$$\begin{cases} n_e = i_z i_b n_{\text{tire}} \\ n_{\text{tire}} = \dfrac{v_t}{0.337 r \eta_\delta} \\ \eta_\delta = 1 - \zeta \end{cases} \tag{3}$$

式中　n_e——发动机转速，r/min

v_t——拖拉机行驶速度，km/h

n_{tire}——驱动轮转速，r/min

r——驱动轮半径，m

η_δ——拖拉机滑转效率

ζ——滑转率

滑转率与驱动力有关[20]，关系式为

$$\zeta = -\frac{1}{D_a}\ln\left(\frac{1}{D_b}\left(\lambda_{T\max} - \frac{F_t}{F_z}\right)\right) \tag{4}$$

式中　F_t——拖拉机驱动力，N

F_z——驱动轮垂直反力，N

$\lambda_{T\max}$——最大牵引系数

D_a、D_b——经验系数

1.3　HMCVT 模型

采用图 2 所示的 HMCVT 作为研究对象[21]。图中，i_1、i_2、i_3为定轴齿轮副传动比；n_b为系统输出轴转速。

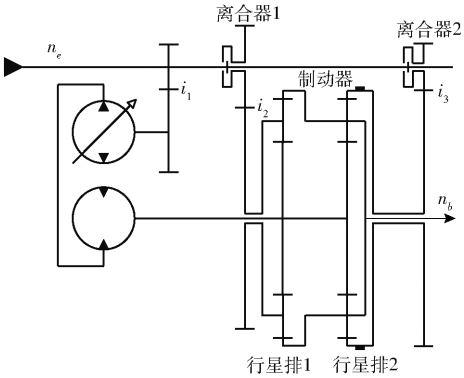

图 2　HMCVT 传动原理图

Fig. 2　Transmission principle diagram of HMCVT

HMCVT 包括纯液压挡位（H 挡位）、液压机械挡位 1（HM1 挡位）、液压机械挡位 2（HM2 挡位）3 种工作挡位。

当 HMCVT 处于 H 挡位时，制动器锁死，离合器 1、离合器 2 均处于分离状态，发动机的动力经过定量马达直接传递给行星排 2，并通过行星排 2 的行星架向后输出。当 HMCVT 处于 HM1 挡位时，制动器松开，离合器 1 处于结合状态、离合器 2 处于分离状态，动力经过行星排 1 汇流后通过行星排 2 的行星架向后输出。当 HMCVT 处于 HM2 挡位时，制动器松开，离合器 2 处于结合状态、离合器 1 处于分离状态，动力经过行星排 2 汇流后通过行星排 2 的行星架向后输出。

HMCVT 通过机械路（发动机仅通过机械齿轮向输出轴传递动力的路线）与液压路（发动机通过泵马达系统向输出轴传递动力的路线）进行功率传递，机械路传递给定量马达的功率流与发动机传递给变量泵的功率流方向相反，造成变速器功率损失为机械结构效率损失的功率循环，例如：当图 2 所示的 HMCVT 处于 HM1 挡位，且功率分流比（液压路传递功率与变速器输出总功率比）小于 0 时，发动机的功率一部分进入液压路，带动变量泵做功，另一部分进入机械路。机械路的功率流一部分经过行星排 1 后通过行星排 2 向后输出功率，另一部分通过行星排 1 的太阳轮带动液压马达做功。此时变量泵与液压马达的转向相反，造成功率损失。因此，功率循环是影响 HMCVT 传动效率重要的因素，而液压路和机械路通过齿轮实现功率耦合，为此本文采用常用的啮合功率法计算 HMCVT 的效率[22-23]。

HMCVT 传动比主要由 HMCVT 排量比和挡位决定，HMCVT 传动效率主要由 HMCVT 排量比、挡位、发动机转速和转矩决定。因此，存在关系式

$$\begin{cases} i_b = f(e, \gamma) \\ \eta_b = f(e, \gamma, n_e, T_e) \end{cases} \tag{5}$$

式中　e——HMCVT 排量比

γ——HMCVT 挡位

1.4　轮胎模型

采用 Duggof 模型作为轮胎模型计算驱动轮的驱动力[24]

$$F_q = \begin{cases} F_z\left[\varphi_r - \varphi_r^2 \dfrac{F_z(1-\zeta)}{4c\zeta}\right] & \left(\dfrac{c\zeta}{1-\zeta} \geqslant \dfrac{\varphi_r F_z}{2}\right) \\ \dfrac{c\zeta}{1-\zeta} & \left(\dfrac{c\zeta}{1-\zeta} < \dfrac{\varphi_r F_z}{2}\right) \end{cases} \tag{6}$$

式中　F_q——对应驱动轮驱动力，N

φ_r——地面附着系数

c——轮胎纵向刚度，N/rad

1.5　行走机构和犁耕机组动力学模型

拖拉机行走机构主要由拖拉机主体和牵引机构组成。其中，犁耕机组是拖拉机常见的牵引机构之一。拖拉机牵引犁耕机组作业时力平衡关系式为

$$F_t = F_f + F_w + F_j + F_g \tag{7}$$

式中　F_f——滚动阻力，N

F_w——空气阻力，N

F_j——加速阻力，N

F_g——耕作阻力,N

拖拉机滚动阻力受到拖拉机质量、地面坡度和滚动摩擦因数的影响,关系式为

$$F_f = mgf\cos\alpha \tag{8}$$

式中 m——拖拉机质量,kg

g——重力加速度,m/s^2

f——滚动摩擦因数

α——地面坡度,(°)

由于拖拉机主要在低速工况下作业,因此一般会忽略空气阻力和加速阻力对拖拉机的影响,但本文涉及轨迹跟踪的精确度和稳定性问题,因此需考虑加速阻力对拖拉机作业的影响。

拖拉机加速阻力受到拖拉机质量、旋转质量换算系数和行驶加速度的影响,关系式为

$$F_j = \sigma_t m a_t \tag{9}$$

式中 σ_t——拖拉机旋转质量换算系数

a_t——拖拉机行驶加速度,m/s^2

通常情况下,拖拉机耕作阻力主要由犁铧数量、单个犁铧宽度、耕深和土壤比阻决定,其关系式为

$$F_g = ZB_l h_k k_l \tag{10}$$

式中 Z——犁铧数量

B_l——单个犁铧宽度,cm

h_k——耕深,cm

k_l——土壤比阻,N/cm^2

根据拖拉机驱动力和拖拉机行驶速度可以得到拖拉机作业时发动机功率,其关系式为

$$P_e = \frac{F_t v_t}{3\,600\eta_T} \tag{11}$$

其中 $$\eta_T = \eta_z\eta_b\eta_f\eta_\delta$$

式中 P_e——发动机功率,kW

η_T——拖拉机牵引效率

η_f——拖拉机行驶滚动效率

1.6 发动机模型

发动机建模主要有理论建模与数值建模 2 种[25]。其中,数值建模是根据发动机试验台架所测得的负荷特性及速度特性曲线,采用插值法拟合得到数值模型。数值模型仅需考虑发动机的输入与输出参数,无需考虑发动机内部的燃烧、传热过程,因此本文的发动机模型采用数值模型,发动机模型 MAP 图如图 3 所示。

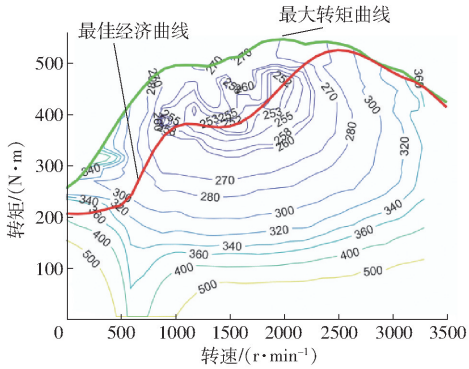

图 3 发动机模型 MAP 图

Fig. 3 MAP of engine model

2 拖拉机控制策略设计

2.1 基于模型预测控制的轨迹跟踪控制系统

模型预测控制算法是一种优化控制算法,具有良好的鲁棒性,被广泛应用于各个领域。基于线性时变模型的模型预测控制算法相较于基于非线性模型的模型预测控制算法,具有计算速度快、实时性强等优点,因此本文采用线性时变模型预测控制算法。

由式(1)可知,将拖拉机后轴中心横坐标、纵坐标、拖拉机航向角作为状态变量,将拖拉机后轴中心速度、拖拉机前轮转角作为控制变量,可得控制系统一般形式[27]

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = f(\boldsymbol{\chi}, \boldsymbol{u}) \tag{12}$$

其中 $$\boldsymbol{\chi} = (x, y, \theta) \qquad \boldsymbol{u} = (v, \delta)$$

式中 $\boldsymbol{\chi}$——控制系统状态变量

$\boldsymbol{u}$——控制系统控制变量

对于给定的参考轨迹,可得参考轨迹一般形式

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_r = f(\boldsymbol{\chi}_r, \boldsymbol{u}_r) \tag{13}$$

其中 $$\boldsymbol{\chi}_r = (x_r, y_r, \theta_r) \qquad \boldsymbol{u}_r = (v_r, \delta_r)$$

式中 $\boldsymbol{\chi}_r$——控制系统参考状态变量

$\boldsymbol{u}_r$——控制系统参考控制变量

x_r——拖拉机后轴中心参考横坐标,m

y_r——拖拉机后轴中心参考纵坐标,m

θ_r——拖拉机参考航向角,rad

v_r——拖拉机后轴中心参考速度,m/s

δ_r——拖拉机参考前轮转角,rad

将式(12)基于参考点位置采用泰勒级数展开且忽略高阶项,并对其进行离散化处理,得

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}}(k+1) = \boldsymbol{A}_{k,t}\tilde{\boldsymbol{\chi}}(k) + \boldsymbol{B}_{k,t}\tilde{\boldsymbol{u}}(k) \tag{14}$$

其中

$$\tilde{\boldsymbol{\chi}}(k) = \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \theta - \theta_r \end{bmatrix} \qquad \tilde{\boldsymbol{u}}(k) = \begin{bmatrix} v - v_r \\ \delta - \delta_r \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{k,t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_r t_d \cos\theta_r \\ 0 & 1 & v_r t_d \sin\theta_r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_{k,t} = \begin{bmatrix} t_d\cos\theta_r & 0 \\ t_d\sin\theta_r & 0 \\ \dfrac{t_d\tan\delta_r}{l} & \dfrac{v_r t_d}{l\cos^2\delta_r} \end{bmatrix}$$

式中 t_d——采样时间

将控制变量转变为控制增量并加入松弛因子，式(12)改写为

$$\boldsymbol{\xi}(k|t)=\begin{bmatrix}\tilde{\chi}(k|t)\\ \tilde{u}(k-1|t)\end{bmatrix} \tag{15}$$

式中　$\boldsymbol{\xi}$——改写后控制系统状态变量

得到新的离散化状态空间表达式

$$\begin{cases}\boldsymbol{\xi}(k+1|t)=\widetilde{\boldsymbol{A}}_{k,t}\boldsymbol{\xi}(k|t)+\widetilde{\boldsymbol{B}}_{k,t}\Delta\boldsymbol{U}(k|t)\\ \boldsymbol{\eta}(k|t)=\widetilde{\boldsymbol{C}}_{k,t}\boldsymbol{\xi}(k|t)\end{cases} \tag{16}$$

其中　$\widetilde{\boldsymbol{A}}_{k,t}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_{k,t} & \boldsymbol{B}_{k,t}\\ \boldsymbol{O}_{N_x\times N_x} & \boldsymbol{I}_{N_u}\end{bmatrix}$　$\widetilde{\boldsymbol{B}}_{k,t}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{k,t}\\ \boldsymbol{I}_{N_u}\end{bmatrix}$

$$\widetilde{\boldsymbol{C}}_{k,t}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0\\0&1&0&0&0\\0&0&1&0&0\end{bmatrix}$$

式中　$\Delta\boldsymbol{U}$——控制系统控制增量

$\boldsymbol{\eta}$——控制系统输出变量

N_x——状态变量维度

N_u——控制变量维度

$\boldsymbol{O}$——零矩阵　　$\boldsymbol{I}$——单位矩阵

为简化计算，假设

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_{k,t}=\boldsymbol{A}_{t,t}\quad(k=1,2,\cdots,t+N-1)\\ \boldsymbol{B}_{k,t}=\boldsymbol{B}_{t,t}\quad(k=1,2,\cdots,t+N-1)\end{cases} \tag{17}$$

系统预测输出表达式为

$$\boldsymbol{Y}(t)=\boldsymbol{\psi}_t\boldsymbol{\xi}(t|t)+\boldsymbol{\Theta}_t\Delta\boldsymbol{U}(t) \tag{18}$$

其中

$$\boldsymbol{Y}(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\eta}(t+1|t)\\ \boldsymbol{\eta}(t+2|t)\\ \vdots\\ \boldsymbol{\eta}(t+N_c|t)\\ \vdots\\ \boldsymbol{\eta}(t+N_p|t)\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{\psi}_t=\begin{bmatrix}\widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}\\ \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^2\\ \vdots\\ \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_c}\\ \vdots\\ \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_p}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Theta}_t=\begin{bmatrix}\widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & 0 & 0 & 0\\ \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & 0 & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_c-1}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_c-2}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \cdots & \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t}\\ \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_c}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_c-1}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \cdots & \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_p-1}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_p-2}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t} & \cdots & \widetilde{\boldsymbol{C}}_{t,t}\widetilde{\boldsymbol{A}}_{t,t}^{N_p-N_c-1}\widetilde{\boldsymbol{B}}_{t,t}\end{bmatrix}$$

$$\Delta\boldsymbol{U}(t)=\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{u}(t|t)\\ \Delta\boldsymbol{u}(t+1|t)\\ \vdots\\ \Delta\boldsymbol{u}(t+N_c|t)\end{bmatrix}$$

式中　N_p——预测时域长度

N_c——控制时域长度

$\Delta\boldsymbol{u}$——控制变量增量

针对系统状态变量和控制变量的优化问题，构建目标函数

$$J(k)=\sum_{i=1}^{N_p}\|\boldsymbol{\eta}(k+i|t)-\boldsymbol{\eta}_{ref}(k+i|t)\|_{\boldsymbol{Q}}^2+\sum_{i=1}^{N_c}\|\Delta\boldsymbol{U}(k+i|t)\|_{\boldsymbol{R}}^2+\rho\varepsilon^2 \tag{19}$$

式中　$\boldsymbol{Q}$——状态变量权重矩阵

$\boldsymbol{R}$——控制变量权重矩阵

ρ——权重系数　　ε——松弛因子

$\boldsymbol{\eta}_{ref}$——控制系统参考输出变量

对控制变量与控制增量设置约束

$$\begin{cases}\boldsymbol{u}_{\min}\leqslant\boldsymbol{u}(t+k)\leqslant\boldsymbol{u}_{\max}\\ \Delta\boldsymbol{u}_{\min}\leqslant\Delta\boldsymbol{u}(t+k)\leqslant\Delta\boldsymbol{u}_{\max}\\ (k=0,1,\cdots,N_c-1)\end{cases} \tag{20}$$

式中　$\boldsymbol{u}_{\max}$、$\boldsymbol{u}_{\min}$——控制变量最大值和最小值

$\Delta\boldsymbol{u}_{\max}$、$\Delta\boldsymbol{u}_{\min}$——控制变量增量最大值和最小值

将式(19)转换为标准二次型进行求解，并将求解所得的下时刻控制增量作为实际输入增量作用于系统。重复上述过程，直至轨迹跟踪结束。

2.2　基于外部参数优化的二元调节经济性控制策略

拖拉机燃油经济性指标主要包括拖拉机每小时油耗量和比油耗，其中比油耗是指拖拉机完成单位作业量时发动机所消耗的燃油质量[16]，比油耗与发动机燃油消耗率关系式为

$$g_T=\frac{g_e}{\eta_T} \tag{21}$$

式中　g_T——比油耗，g/(kW·h)

g_e——发动机燃油消耗率，g/(kW·h)

拖拉机油耗量与发动机燃油消耗率呈正相关，与 HMCVT 传动效率呈负相关，由于在确定的工况下，地面属性和牵引负载无法改变[27]，因此主要通过降低发动机燃油消耗率或提高 HMCVT 传动效率的方式减少拖拉机油耗量，为此本文选择比油耗为优化目标，对发动机燃油消耗率和 HMCVT 传动效率进行优化，使比油耗最小化，提高拖拉机燃油经济性。

比油耗主要受到发动机参数和 HMCVT 参数的影响，由此提出目标函数和约束条件

$$\begin{cases}\min g_T=\min(g_e/\eta_T)=\min f(e,\gamma,n_e,T_e)\\ \text{s.t.}\begin{cases}e_{\min}\leqslant e\leqslant e_{\max}\\ 0\leqslant n_e\leqslant n_{e\max}\\ 0\leqslant T_e\leqslant T_{e\max}\\ n_eT_e\leqslant P_{e\max}\end{cases}\end{cases} \tag{22}$$

式中　$e_{\min}$——HMCVT 排量比最小值

e_{max}——HMCVT 排量比最大值
n_{emax}——发动机最大转速,r/min
T_{emax}——发动机最大转矩,N·m
P_{emax}——发动机最大功率,kW

基于外部参数优化的二元调节经济性控制策略参数选取流程如图 4 所示。

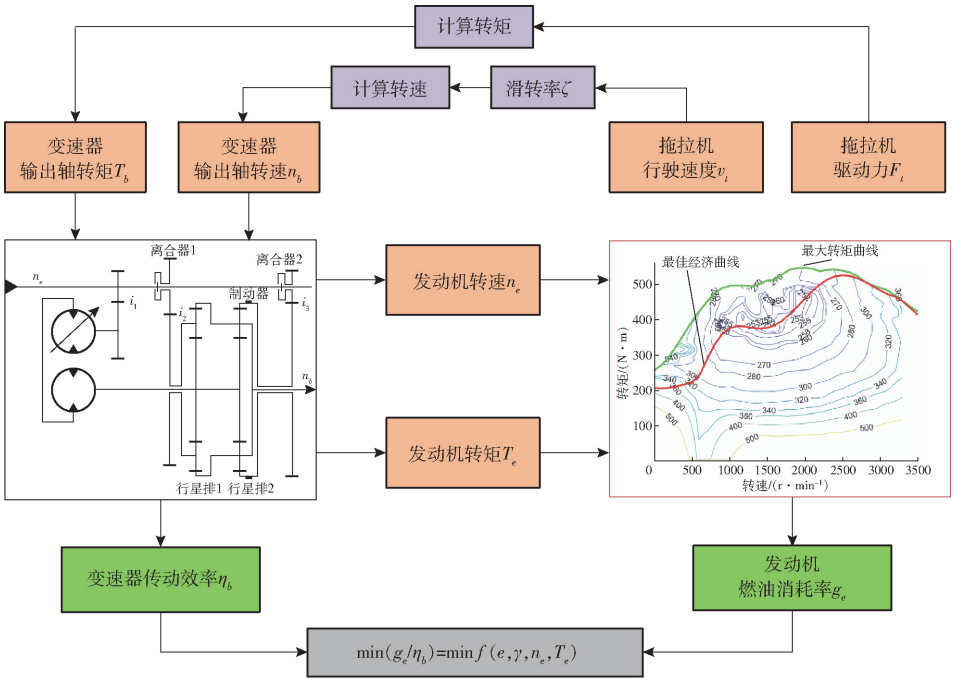

图 4 基于外部参数优化的二元调节经济性控制策略参数选取流程图

Fig. 4 Parameter selection process of binary regulation economic control strategy based on external parameter optimization

在拖拉机作业时,根据拖拉机行驶速度与需求驱动力求得拖拉机在负载特性场内工作点(v_t,F_t),并结合滑转率求得 HMCVT 输出特性场的工作点(v_b,F_b),通过 HMCVT 的参数信息可求得发动机转速、转矩和 HMCVT 传动效率,再根据发动机模型 MAP 求得发动机燃油消耗率,根据目标函数求解得到最佳的 HMCVT 挡位、排量比,实现拖拉机的经济性控制。

采用循环算法对目标函数进行求解,具体求解过程如图 5 所示。图中,$\Delta\lambda$ 为设定的挡位增量,Δe 为设定的排量比增量,ΔT_e 为设定的发动机转矩增量(N·m),T_{need}为发动机需求转矩(N·m)。

2.3 考虑经济性与轨迹跟踪性能的分层协同控制策略

为了减少拖拉机轨迹跟踪偏差和优化发动机、HMCVT 经济性控制的节能效果,本文提出了一种考虑经济性与轨迹跟踪性能的分层协同控制策略。该策略保证了拖拉机轨迹跟踪性能和 HMCVT 经济性控制的节能效果。该分层协同控制策略的控制流程主要包括基于模型预测控制算法的轨迹跟踪控制流程、基于外部参数优化的经济性控制流程、拖拉机状态信息更新流程 3 部分,具体控制流程如图 6 所示。图中,Q_t为发动机油耗量(L)。

基于模型预测控制算法的轨迹跟踪控制流程:获取拖拉机当前时刻 t 的所有实际位姿信息($x_{act}(t)$,$y_{act}(t)$,$\theta_{act}(t)$,$v_{act}(t)$,$\delta_{act}(t)$)、当前时刻 t 的实际犁耕阻力 $F_{P,act}(t)$和 $t+1$ 时刻的实际犁耕阻力 $F_{P,act}(t+1)$,将当前时刻 t 的所有实际位姿信息($x_{act}(t)$,$y_{act}(t)$,$\theta_{act}(t)$,$v_{act}(t)$,$\delta_{act}(t)$)输出至轨迹跟踪控制器,预测出 $t+1$ 时刻拖拉机速度 $v_{pre}(t+1)$与前轮转角 $\delta_{pre}(t+1)$并输出。

基于外部参数优化的经济性控制流程:将当前时刻 t 的实际犁耕阻力 $F_{P,act}(t)$作为下一时刻犁耕阻力的预测值,并结合所预测的 $t+1$ 时刻拖拉机速度 $v_{pre}(t+1)$,计算出下一时刻的拖拉机驱动力 $F_{t,pre}(t+1)$,将下一时刻拖拉机驱动力 $F_{t,pre}(t+1)$输出给 HMCVT 经济性控制策略,计算出$t+1$ 时刻 HMCVT 的挡位 $\gamma(t+1)$和排量比 $e(t+1)$并输出。

拖拉机状态信息更新流程:根据预测出的 $t+1$ 时刻拖拉机速度 $v_{pre}(t+1)$、当前时刻 t 的实际犁耕阻力 $F_{P,act}(t)$、$t+1$ 时刻的实际犁耕阻力 $F_{P,act}(t+1)$计算出 $t+1$ 时刻实际的拖拉机速度 $v_{act}(t+1)$,将 $t+1$ 时刻实际的拖拉机速度 $v_{act}(t+1)$、所预测的 $t+1$ 时刻拖拉机前轮转角 $\delta_{pre}(t+1)$输出至拖拉机动力学模型并更新位姿信息;将 $t+1$ 时刻实际的拖拉机速度 $v_{act}(t+1)$、所预测的 $t+1$ 时刻 HMCVT 挡位 $\gamma(t+1)$和排量比 $e(t+1)$、$t+1$ 时刻的实际犁耕

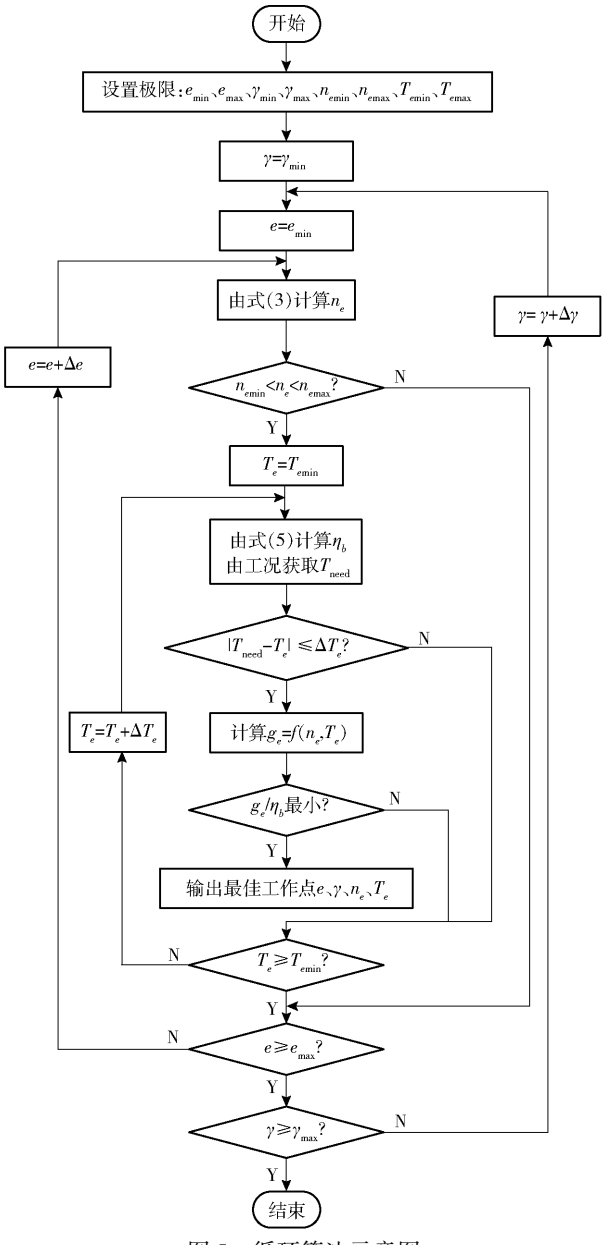

图 5　循环算法示意图

Fig. 5　Schematic of loop algorithm

阻力 $F_{P,\mathrm{act}}(t+1)$ 输出至 HMCVT 模型，计算出 $t+1$ 时刻实际的发动机转速 $n_e(t+1)$ 与转矩 $T_e(t+1)$ 并输出至发动机模型，最终计算出 $t+1$ 时刻实际的拖拉机机油耗量 $Q_{t,\mathrm{act}}(t+1)$。

3　仿真结果分析

为验证考虑经济性与轨迹跟踪性能的分层协同控制策略的优越性，以 82.0 kW 拖拉机为控制对象进行控制策略研究，使用 Matlab 搭建仿真模型，构建纯跟踪算法与一元调节经济性控制策略作为对比策略（纯跟踪—一元调节控制策略），其中一元调节经济性控制策略的参数选取流程与二元调节经济性控制策略的参数选取流程主要区别在于二者的优化目标不同，二元调节经济性控制策略以比油耗为优化目标，一元调节经济性控制策略以发动机燃油消耗率为优化目标。拖拉机主要部件参数如表 1 所示。

测试工况主要有犁耕工况和掉头作业工况，掉头作业时机具抬起，拖拉机无犁耕阻力，具体的仿真参考轨迹如图 7 所示。

3.1　拖拉机轨迹跟踪效果与分析

为了便于计算和分析，仅选取前 100 s 的仿真结果进行分析。设置参考速度为 7.2 km/h，模型预测控制算法与纯跟踪算法实际速度和轨迹跟踪偏差如图 8、9 所示。

从仿真结果可以看出两种算法均可完成作业任务，但纯跟踪算法的速度波动较大，主要集中在 6.9 ~ 7.5 km/h 区间内，而模型预测控制算法的速度波动较小，可稳定在 7.2 km/h 左右；纯跟踪算法最大纵向偏差为 2.32 m、最大横向偏差为 1.61 m、最大航向角偏差为 0.32 rad，而模型预测控制算法最大纵向偏差为 0.13 m、最大横向偏差为 0.09 m、最大航向角偏差为 0.02 rad，可以明显看出模型预测控制算法的优越性。经计算模型预测控制算法相较于纯跟踪算法速度方差降低 36.7%，纵向跟踪偏差减小 89.8%，横向跟踪偏差减小 91.7%，航向角偏差减小 96.0%。

3.2　拖拉机经济性优化效果与分析

在测试工况下，分层协同控制策略与对比策略的经济性优化效果如图 10 所示。

根据仿真结果可以看出，在对比策略控制下，最佳 HMCVT 传动比和传动效率波动较大。在掉头作业工况下，HMCVT 传动比维持在 0.95 左右，传动效率低至 0.25；在犁耕工况下，HMCVT 传动比在 1.36 ~ 1.52 区间内波动，传动效率在 0.85 ~ 0.90 区间内波动。而在分层协同控制策略控制下，最佳 HMCVT 传动比和传动效率较为稳定。在掉头作业工况下，HMCVT 传动比维持在 0.63 左右，传动效率维持在 0.88 左右；在犁耕工况下，HMCVT 传动比在 1.55 ~ 1.65 区间内波动，传动效率在 0.90 ~ 0.92 区间内波动。对比策略在掉头作业工况下，发动机功率约维持在 25.2 kW，发动机燃油消耗率约维持在 275.0 g/(kW·h)，比油耗维持在 1 121.6 g/(kW·h)；在犁耕工况下，发动机功率在 50.1 ~ 59.7 kW 区间内波动，发动机燃油消耗率在 251.2 ~ 260.4 g/(kW·h) 区间内波动，比油耗在 280.6 ~ 309.1 g/(kW·h) 区间内波动。分层协同控制策略在掉头作业工况下，发动机功率在 6.5 ~ 8.1 kW 区间内波动，发动机燃油消耗率在 345.3 ~ 353.7 g/(kW·h) 区间内波动，比油耗在 390.9 ~ 400.0 g/(kW·h) 区间内波动；在犁耕

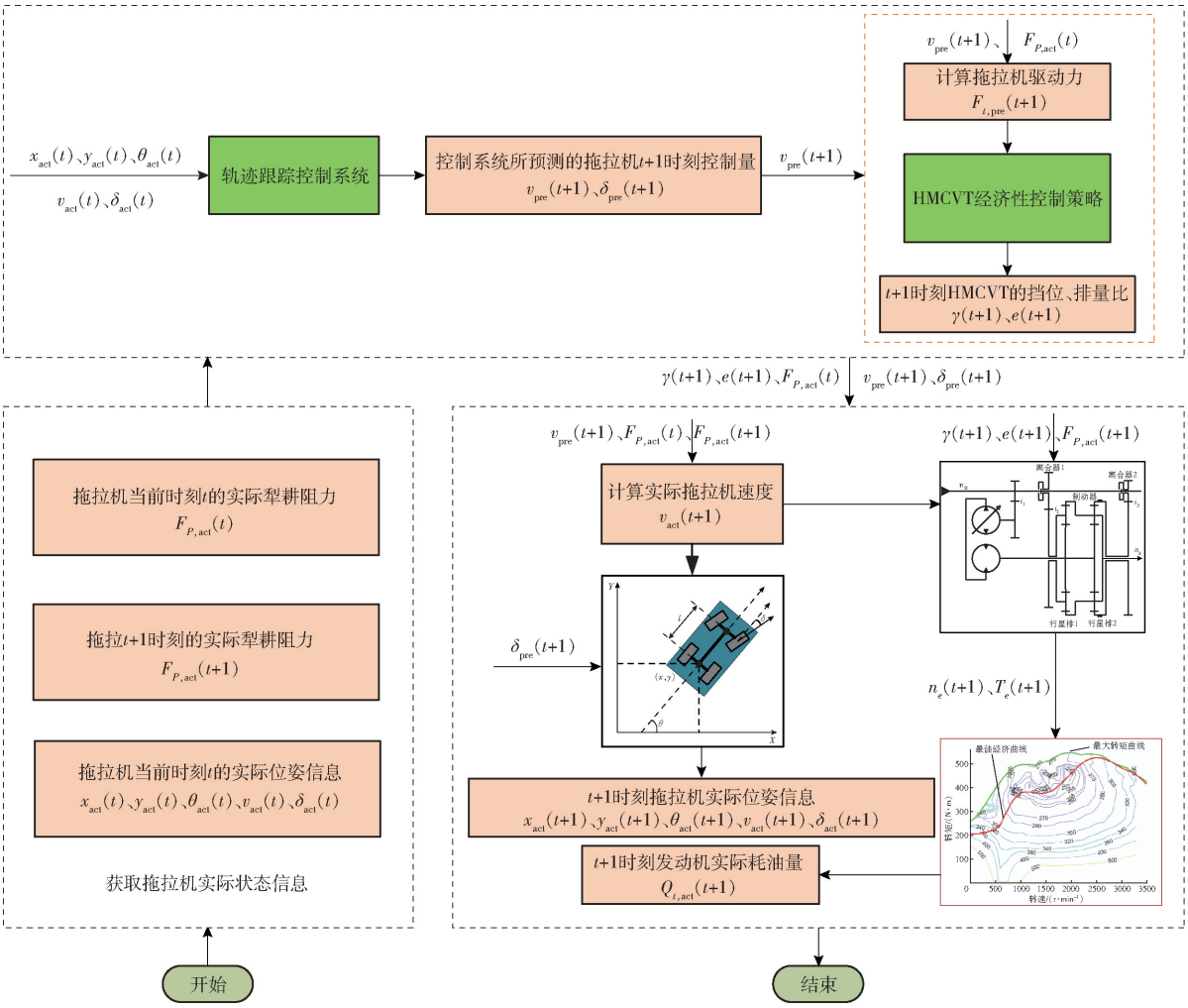

图 6 分层协同控制策略流程图

Fig. 6 Layered collaborative control strategy flowchart

表 1 拖拉机主要部件参数

Tab. 1 Parameters of main components of tractors

部件	参数	数值
整机	整机质量/kg	3 200
	驱动力半径/m	0.875
发动机	额定功率/kW	82.0
	额定转速/(r·min^{-1})	2 200
	最大转矩/(N·m)	534
中央传动	传动比	21.80

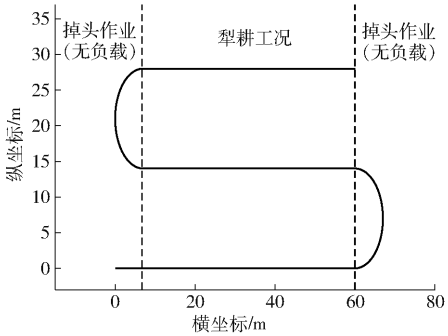

图 7 参考轨迹

Fig. 7 Reference trajectory

工况下,发动机功率在 47.3 ~ 57.8 kW 区间内波动,发

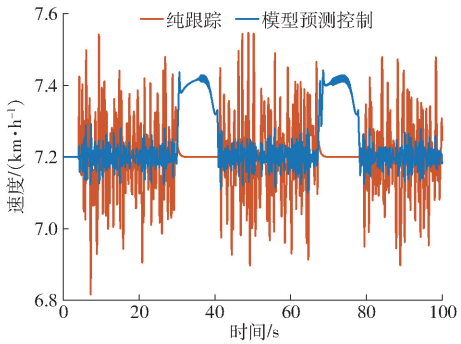

图 8 实际速度曲线

Fig. 8 Actual speed curves

动机燃油消耗率在 251.0 ~ 263.2 g/(kW·h)区间内波动,比油耗在 276.2 ~ 292.2 g/(kW·h)区间内波动。对比策略在 100 s 的仿真测试中总共消耗燃油 0.39 L,而分层协同控制策略在 100 s 的仿真测试中总共消耗燃油 0.35 L。相较于对比策略,分层协同控制策略油耗量减小约 11.8%。

分层协同控制策略与对比策略下的发动机 MAP 工作点分布图如图 11 所示。由图 11 可知,在对比策略的控制下,发动机的工作点始终集中在最

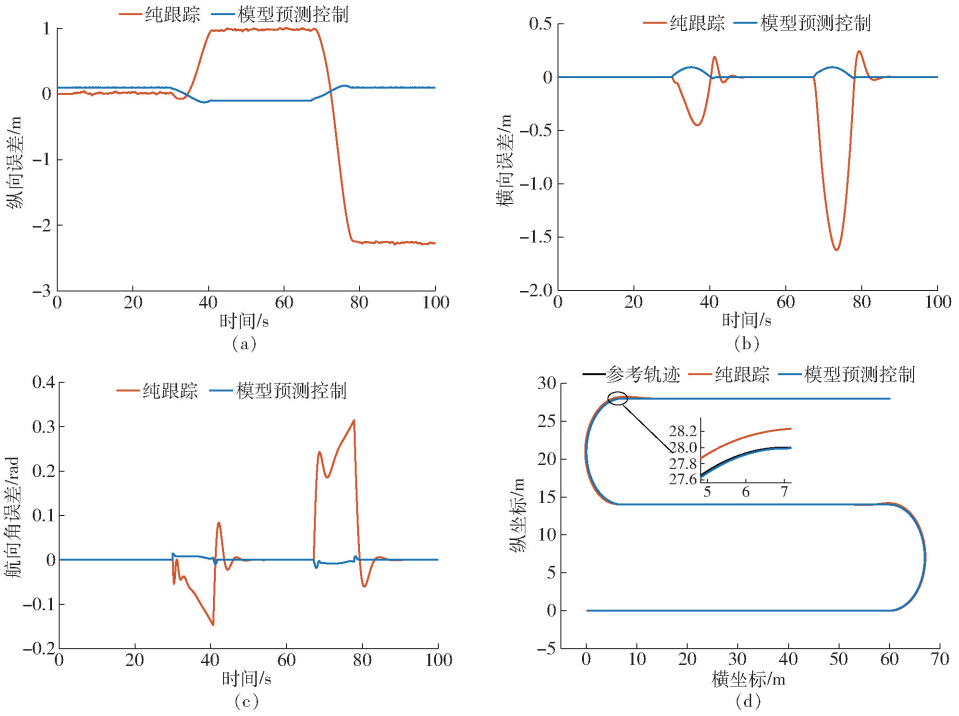

图 9　轨迹跟踪偏差曲线

Fig. 9　Trajectory tracking deviation curves

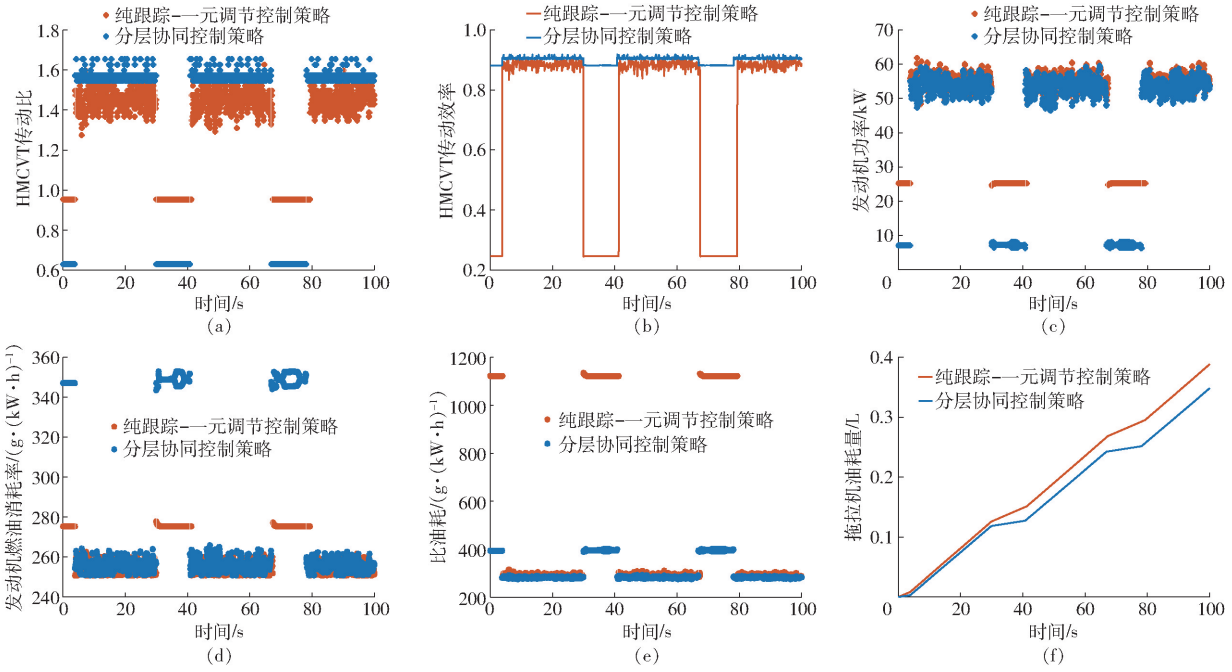

图 10　经济性控制策略效果

Fig. 10　Economy control strategies effects

佳经济曲线附近，而分层协同控制策略控制下的发动机工作点分布较为分散，且距离最佳经济曲线较远。但结合图 10 可以看出，与对比策略相比，分层协同控制策略下 HMCVT 传动效率较高、发动机功率较低，使得比油耗较低。

由仿真结果可得：在轨迹跟踪方面，分层协同控制策略可以良好地完成拖拉机轨迹跟踪任务，相较于对比策略，有效减小了轨迹跟踪偏差；在经济性控制方面，分层协同控制策略同时考虑到了发动机与 HMCVT 的经济性问题，可以保证拖拉机保持在最佳的经济性作业状态，而对比策略仅考虑了发动机的经济性，没有考虑 HMCVT 的传动效率问题，在某些工况下拖拉机效率较低，导致比油耗较高。

4　硬件在环试验

为进一步验证分层协同控制策略的实时性和有效

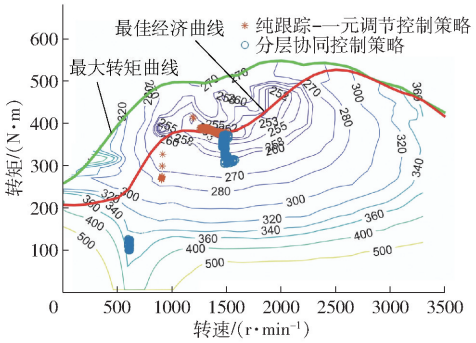

图 11 发动机 MAP 工作点分布图

Fig. 11 Engine MAP work point distribution map

性,采用硬件在环(Hardware-in-the-loop, Hil)试验平台对分层协同控制策略和对比策略进行试验验证。

Hil 试验平台主要由 Hil 测试机柜、PC 上位机、被测控制器等组成,本文采用的 Hil 试验平台具体部件如图 12 所示。其中,Hil 测试机柜主要由电源管理单元、低压可编程电源、断线测试箱、信号调理模块、实时处理器等部件组成,实时处理器采用 NI PXIe - 8880 型控制器;上位机采用 Windows 10 64 bit 操作系统,基于以太网连接 Hil 测试机柜,通过 VeriStand 软件控制 Hil 测试机柜进行测试试验;被测控制器为 Woodward SECM - 70 型控制器,基于 D2P(From development to production)开发平台刷写控制策略,采用 PXIe - 6363 型、PXIe - 6738 型 I/O 板卡与 Hil 测试机柜进行数字信号和模拟量信号通信,采用 PXIe - 8510 型板卡与 Hil 测试机柜进行 CAN 信号通信。

根据实际试验需要通过 PC 上位机配置 Hil 试验环境,并将拖拉机运动学模型、HMCVT 模型加载到实时处理器。将控制策略刷写进被测控制器,通过线束连接控制器与 Hil 测试机柜。通过 PC 上位机的 VeriStand 软件观测并导出 Hil 试验的数据。Hil 试验流程图如图 13 所示。

Hil 试验采样步长设置为 0.05 s,分别对分层协同控制策略与对比策略进行 Hil 试验验证,Hil 验证

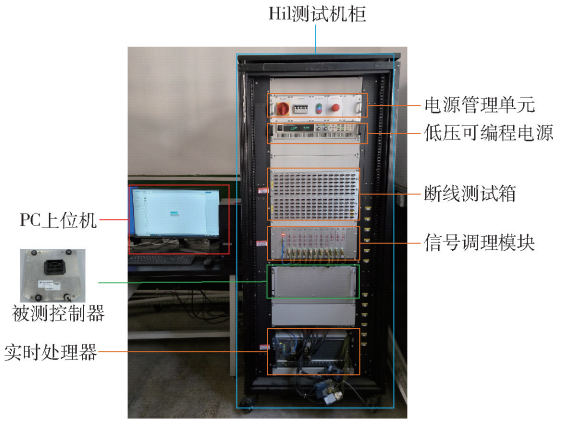

图 12 Hil 试验平台

Fig. 12 Hil test platforms

结果如图 14 所示。根据图 14 可知,Matlab 仿真结果与 Hil 试验结果基本吻合,并且可以明显看出,分层协同控制策略相较于对比策略,在 Hil 试验中同样具有优越性。经计算,两种控制策略下的 Matlab 仿真结果与 Hil 试验结果速度均方根误差均在 0.05 km/h 以内,纵向偏差均方根误差均在 0.06 m 以内,横向偏差均方根误差均在 0.02 m 以内,航向角偏差均方根误差均在 8.2×10^{-3} rad 以内;HMCVT 传动比均方根误差均在 0.08 以内,HMCVT 传动效率均方根误差均在 0.01 以内,发动机功率均方根误差均在 2.04 kW 以内,燃油消耗率均方根误差均在 3.63 g/(kW·h)以内,比油耗均方根误差均在 7.19 g/(kW·h)以内,拖拉机油耗量均方根误差均在 7.1×10^{-4} L 以内。

综上所述,由 Hil 试验验证结果可以得出,分层协同控制策略与对比策略的 Matlab 仿真结果与 Hil 试验结果基本一致,验证了策略的有效性。

5 结论

(1)提出了一种考虑经济性与轨迹跟踪性能的分层协同控制策略。采用纯跟踪算法与一元调节经济性控制策略作为对比策略,基于 Matlab 仿真平台

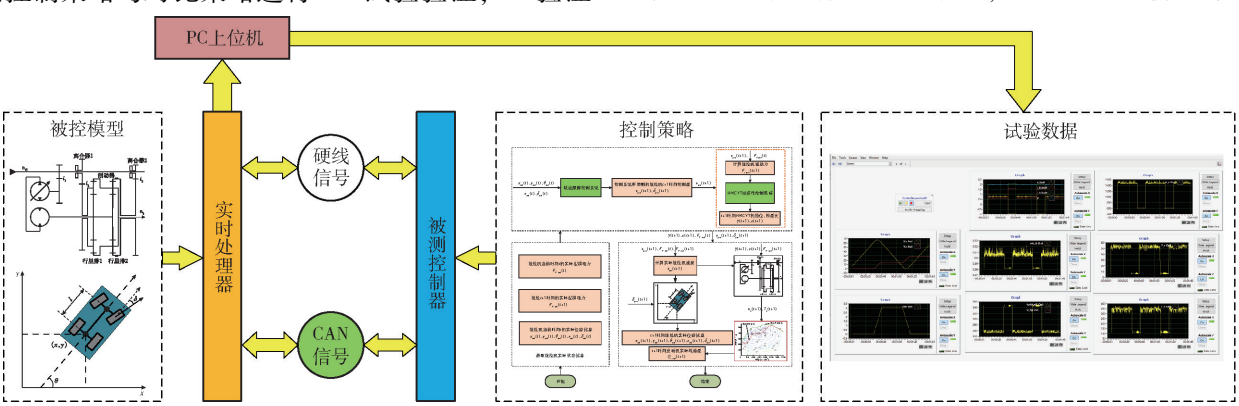

图 13 Hil 试验流程图

Fig. 13 Hil test flowchart

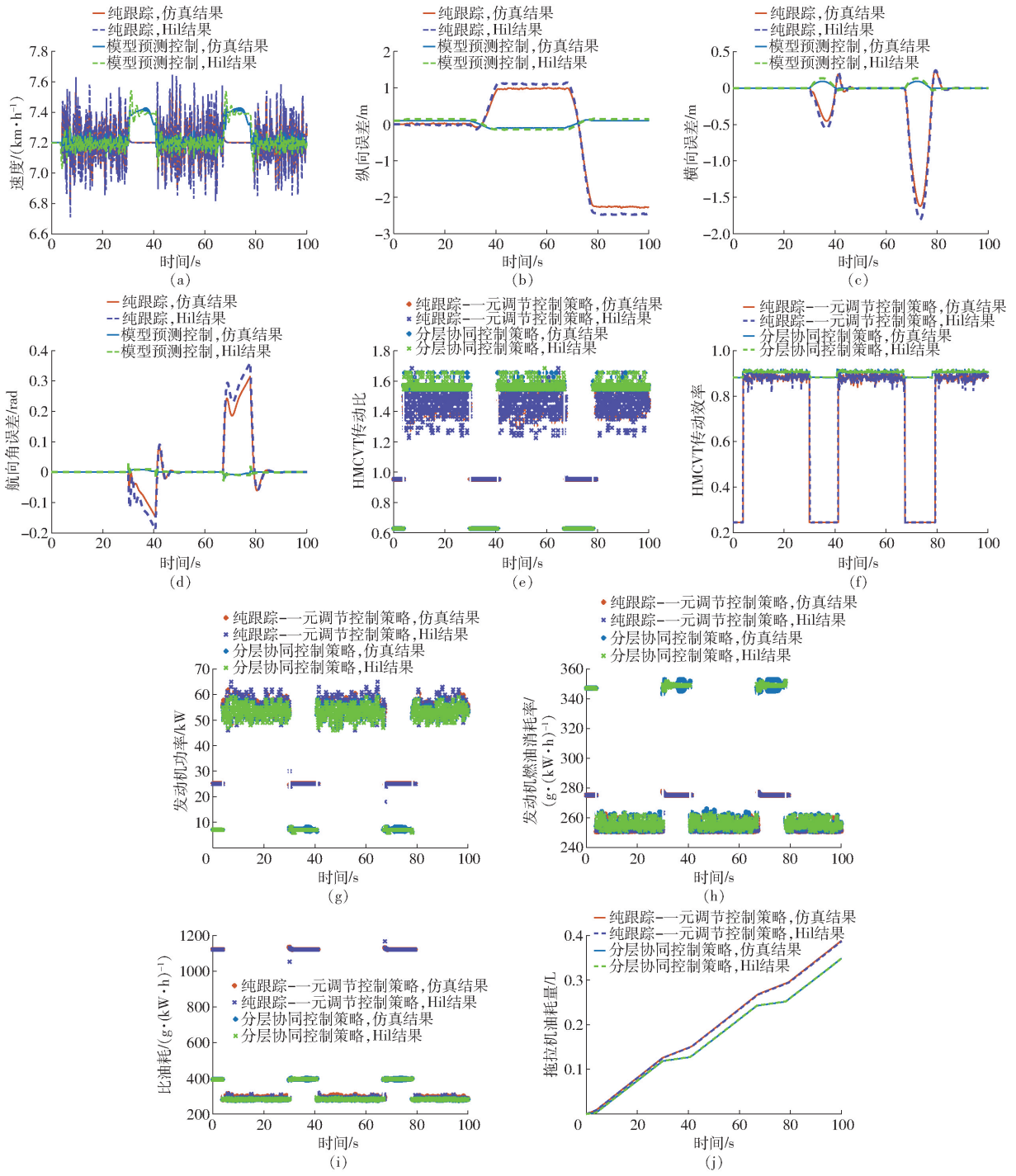

图 14　Hil 试验结果

Fig. 14　Hil test validation results

对该分层协同控制策略进行仿真试验，并通过 Hil 试验平台验证该分层协同控制策略的有效性。

(2)在轨迹跟踪方面，对比策略能够在一定程度上满足无人驾驶拖拉机轨迹跟踪任务的要求，但速度波动较大，轨迹跟踪性能较差，分层协同控制策略相较于对比算法，速度方差降低 36.7%，纵向跟踪偏差减小 89.8%，横向跟踪偏差减小 91.7%。

(3)在经济性方面，对比策略只能保证发动机工作在最佳经济性区域，忽视了 HMCVT 传动效率对拖拉机经济性的影响，而分层协同控制策略 HMCVT 的传动比波动较小，并且传动效率始终保持在较高的区间，在 100 s 的仿真测试中拖拉机油耗量减小约 11.8%。

(4)通过 Hil 试验平台验证了分层协同控制策略与对比策略的 Matlab 仿真结果与 Hil 试验结果基本一致。

(5)提出的分层协同控制策略可以有效降低轨迹跟踪偏差，并且较好地兼顾了拖拉机经济性。

参 考 文 献

[1] 张漫,季宇寒,李世超,等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1 - 18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1 - 18. (in Chinese)

[2] KIM D H,CHOI C H,KIM Y J. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned tractor[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 227 - 231.

[3] SHEN X, CHE H, YAO Z, et al. Real-world emission characteristics of full-volatility organics originating from nonroad agricultural machinery during agricultural activities[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(28): 10308 - 10318.

[4] LIU Y, LI Y, YUAN Z, et al. Identification of two main origins of intermediate-volatility organic compound emissions from vehicles in China through two-phase simultaneous characterization[J]. Environmental Pollution, 2021, 281: 117020.

[5] XIA Y, SUN D. Characteristic analysis on a new hydro-mechanical continuously variable transmission system[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 126: 457 - 467.

[6] CHENG Z, LU Z, QIAN J. A new non-geometric transmission parameter optimization design method for HMCVT based on improved GA and maximum transmission efficiency[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 167: 105034.

[7] 祝青园,程家琪,陈轩伟,等. 无人驾驶铰接转向车辆路径跟踪控制研究综述[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 1 - 21.
ZHU Qingyuan, CHENG Jiaqi, CHEN Xuanwei, et al. Review on path tracking control of unmanned articulated steering vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 1 - 21. (in Chinese)

[8] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 1 - 18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 1 - 18. (in Chinese)

[9] YIN C, WANG S, GAO J, et al. Trajectory tracking for agricultural tractor based on improved fuzzy sliding mode control[J]. Plos One, 2023, 18(4): e0283961.

[10] 周卫琪,赵羿寒,刘擎超,等. 基于改进 LQR 的车辆路径跟踪横向控制策略[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 135 - 141.
ZHOU Weiqi, ZHAO Yihan, LIU Qingchao, et al. Lateral control strategy of vehicle path tracking based on improved LQR [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2024, 52(3): 135 - 141. (in Chinese)

[11] ZHANG Y, PEI W, ZHANG Q, et al. A generalized hamilton robust control scheme of trajectory tracking for intelligent vehicles[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6975.

[12] SHI P, LI L, NI X, et al. Intelligent vehicle path tracking control based on improved MPC and hybrid PID[J]. IEEE Access, 2022, 10: 94133 - 94144.

[13] 谢宪毅,王禹涵,金立生,等. 基于改变控制时域时间步长的智能车轨迹跟踪控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(3): 620 - 630.
XIE Xianyi, WANG Yuhan, JIN Lisheng, et al. Intelligent vehicle trajectory tracking control based on adjusting step size of control horizon[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(3): 620 - 630. (in Chinese)

[14] 赵树恩,王盛,冷姚. 智能汽车轨迹跟踪多目标显式模型预测控制[J]. 汽车工程, 2024, 46(5): 784 - 794, 815.
ZHAO Shuen, WANG Sheng, LENG Yao. Multi-objective explicit model predictive control for intelligent vehicle trajectory tracking[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(5): 784 - 794, 815. (in Chinese)

[15] 汪洪波,王春阳,赵林峰,等. 基于强化学习的智能车辆路径跟踪变参数 MPC 多目标控制[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 157 - 169.
WANG Hongbo, WANG Chunyang, ZHAO Linfeng, et al. Variable-parameter MPC multi-objective control for intelligent vehicle path tracking based on reinforcement learning[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(3): 157 - 169. (in Chinese)

[16] 张明柱,王全胜,白东洋,等. 基于拖拉机整机效率最大化的液压机械无级变速规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(21): 74 - 78.
ZHANG Mingzhu, WANG Quansheng, BAI Dongyang, et al. Speed changing law of hydro-mechanical CVT based on maximum efficiency of tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(21): 74 - 78. (in Chinese)

[17] 胡海峰,史立新,张士庆. 拖拉机液压机械无级变速器控制策略仿真与试验[J]. 控制工程, 2017, 24(11): 2290 - 2295.
HU Haifeng, SHI Lixin, ZHANG Shiqing. Simulation and experiment of hydro-mechanical CVT control strategy for tractors [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(11): 2290 - 2295. (in Chinese)

(下转第 123 页)

ZHANG Wanzhi, ZHAO Wei, LI Yuhua, et al. Path planning of agricultural robots based on improved A* algorithm + LM - BZS algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 81 - 92. (in Chinese)

[21] 潘玉恒,奥日格拉,鲁维佳,等. 基于动态扩展邻域蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2024,55(2): 423 - 432,449.
PAN Yuheng, AORIJE La, LU Weijia, et al. Path planning for mobile robots based on dynamic extended neighborhood ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 423 - 432,449. (in Chinese)

[22] YU X, LUO W. Reinforcement learning-based multi-strategy cuckoo search algorithm for 3D UAV path planning[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 223: 119910.

[23] WANG Y F. Adaptive job shop scheduling strategy based on weighted Q-learning algorithm[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2020, 31(2): 417 - 432.

[24] 时维国,宁宁,宋存利,等. 基于蚁群算法与人工势场法的移动机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2023,54(12):407 - 416.
SHI Weiguo, NING Ning, SONG Cunli, et al. Path planning for mobile robots based on ant colony algorithm and artificial potential field method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 407 - 416. (in Chinese)

[25] HUO F, ZHU S, DONG H, et al. A new approach to smooth path planning of Ackerman mobile robot based on improved ACO algorithm and B-spline curve[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2024, 175: 104655.

(上接第 72 页)

[18] 黄薛凯,鲁植雄,陈雷,等. 基于整机经济性的拖拉机 HMCVT 目标速比优化及控制仿真[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(4): 777 - 787.
HUANG Xuekai, LU Zhixiong, CHEN Lei, et al. Optimization of tractor HMCVT target speed ratio and control simulation based on machine economy[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022, 45(4): 777 - 787. (in Chinese)

[19] KARKEE M, STEWARD B L. Study of the open and closed loop characteristics of a tractor and a single axle towed implement system[J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47(6): 379 - 393.

[20] 翁家昌,赵铨. 拖拉机理论[M]. 北京: 农业机械出版社, 1981.

[21] 曹付义,王越航,冯琦,等. 液压机械传动装置模式切换滚动协调控制[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(3): 136 - 144.
CAO Fuyi, WANG Yuehang, FENG Qi, et al. Rolling coordinated control of mode switching for hydro-mechanical transmission device[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(3): 136 - 144. (in Chinese)

[22] CHENG Z, LU Z, DAI F. Research on HMCVT efficiency model based on the improved SA algorithm[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 2856908.

[23] ZHANG G, ZHANG H, GE Y, et al. Mechanical efficiency of HMCVT under steady-state conditions[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 4275922.

[24] 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 of extended range electric tractor[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2017, 38(3): 80 - 85. (in Chinese)

[25] LIKHANOV V A, ANFILATOV A A. Mathematical model of the formation and burning of smoke-black particles in a motor cylinder during operation on an EFE[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020: 032050.

[26] 龚建伟,姜岩,徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.

[27] 徐锐良,罗跃辉,徐立友,等. 基于松软路面的滑转率对拖拉机性能的影响[J]. 农机化研究, 2014, 36(1): 230 - 233.
XU Ruiliang, LUO Yuehui, XU Liyou, et al. Analysis of wheel slip rate impact on tractor performance base on soft soil[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(1): 230 - 233. (in Chinese)