doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.037

基于时变扰动抑制的动力换挡拖拉机起步控制方法

傅生辉[1,2]　杨子涵[1,2]　杜岳峰[1,2]　李　臻[1,2]　毛恩荣[1,2]　朱忠祥[1,2]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对拖拉机起步工况复杂,起步控制系统存在建模不确定性、参数摄动和时变扰动等问题,为提高动力换挡拖拉机起步品质和驾驶员操作舒适性,提出了基于时变扰动抑制的拖拉机起步控制方法。首先,以动力换挡变速箱(Power shift transmission,PST)为研究对象,通过分析拖拉机起步过程的动态特性建立 PST 起步动力学模型,以冲击度和滑摩功作为换挡品质评价指标,构建起步控制的性能泛函;然后,引入高阶扰动观测器(High-order disturbance observer,HDO)估计起步控制系统中的扰动及其各阶导数,结合哈密尔顿函数对线性二次型调节器(Linear quadratic regulator,LQR)推导求得最优控制律;最后,基于 Matlab/Simulink 和 AMESim 构建大功率拖拉机 PST 的联合仿真模型,并与 PIO 观测器(Proportional integral observer,PIO)进行对比,验证本文方法的有效性。算例验证表明,HDO 能够准确估计系统时变扰动,通过与 LQR 的结合可有效抑制系统时变扰动。仿真结果表明,中等起步,运输工况和犁耕工况下,HDO 冲击度分别为 12.25、11.32 m/s^3,比 PIO 分别降低了 21.92%、22.20%,滑摩功比 LQR 分别减少 0.49、0.11 kJ。在不同工况和起步意图下,本文方法可有效降低动力换挡拖拉机起步过程中的冲击度和滑摩功,具有较好的换挡品质和控制鲁棒性。

关键词: 动力换挡变速箱; 起步控制; 高阶扰动观测器; 线性二次型最优控制; 冲击度; 滑摩功

中图分类号: S219.032.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)02-0371-10　　**OSID**:

Starting Control Method for Power Shift Tractor Employing Time-varying Disturbance Rejection

FU Shenghui[1,2]　YANG Zihan[1,2]　DU Yuefeng[1,2]　LI Zhen[1,2]　MAO Enrong[1,2]　ZHU Zhongxiang[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Due to the complex starting conditions of the power shift tractor, there are many problems such as modeling uncertainty, parameter perturbation and time-varying disturbance in the system. Therefore, a novel starting control method employing the time-varying disturbance rejection was proposed to improve the starting performance of the power shift tractor and the drivers' operating comfort. Firstly, the power shift transmission (PST) starting dynamic model was established by analyzing the dynamic characteristics of the starting process. Using the starting jerk and slipping friction work as the evaluation indicators to construct the performance function of the controller. Then a high-order disturbance observer (HDO) was introduced to estimate the time-varying disturbance and its derivatives in the starting process. The linear quadratic regulator (LQR) was used to obtain the optimal starting control law. The results of numerical calculation showed that HDO could effectively estimate the time-varying disturbance, and it could effectively suppress the influence of the disturbance and improve the robustness of the system combining with LQR. Finally, a co-simulation model of high-power tractor driveline was built based on Matlab/Simulink and AMESim, and proportional integral observer (PIO) was introduced as the comparison to verify the effectiveness of the starting control strategy. Taking 60% throttle as the example, the results showed that the maximum starting jerk by HDO were 12.25 m/s^3 and 11.32 m/s^3 in transportation and ploughing conditions, respectively, which were 21.92% and 22.20% lower than that by LQR, respectively. Besides, the slipping friction work by HDO were 0.49 kJ and 0.11 kJ lower than that by LQR in transportation and ploughing conditions, respectively. In different starting intentions and working

收稿日期: 2020-09-21　修回日期: 2020-12-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700101)

作者简介: 傅生辉(1989—),男,博士生,主要从事农业装备智能化设计理论与车辆控制技术研究,E-mail: fush89@cau.edu.cn

通信作者: 毛恩荣(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农业装备智能化设计及流体传动技术研究,E-mail: gxy15@cau.edu.cn

conditions, the proposed method could effectively reduce the starting jerk and friction work of the power shifting tractor during the starting process, and had better starting quality and control robustness.

Key words: power shift transmission; starting control; high-order disturbance observer; linear quadratic regulator; starting jerk; slipping friction work

0 引言

动力换挡变速箱(Power shift transmission,PST)因换挡过程动力不中断、起步性能好、工况适应性强等特点而逐渐成为大功率拖拉机的主流配置[1]。起步控制作为 PST 关键技术之一,直接影响拖拉机起步性能和驾驶品质,对 PST 性能提升具有重要意义。

目前,PST 研究多集中在液压系统仿真、换挡过程优化、换挡控制策略等方面[2-8],对起步控制的研究相对较少。常见的车辆起步控制主要包括发动机恒转速控制和优化控制。前者简单实用,但开发效率低,工况适应性差;后者通过平衡换挡时间和滑摩等起步需求可实现车辆快速平稳起步,是当前研究的热点[9]。韩玲等[10]提出一种基于离合器执行机构鲁棒性的模型预测控制算法,可有效降低 CVT(Constantly variable transmission)起步冲击度。LI 等[11]设计了液体粘性传动装置(Hydro-viscous drive,HVD),实现了拖拉机在不同意图下的平稳起步。耿国盛等[12]和周康[13]基于台架试验实现了拖拉机液压无级变速器在不同负载和起步意图下的起步控制。文献[14-16]在驾驶意图的终端约束下,采用最优控制实现了起步离合器转矩协调控制,有效保证了车辆起步品质。在试验条件和设计成本等诸多因素限制下,多领域协同仿真、机-电-液联合仿真等技术已成为拖拉机设计和性能优化的重要手段[17]。考虑起步控制的时变非线性、不确定性、工况复杂性等特点,杨阳等[18]提出了基于数据驱动的 DCT 车辆起步预测控制方法,通过结合发动机恒转速控制和模型预测控制算法实现了不同意图下的起步控制。GAO 等[19]提出了带有建模误差观测器的线性二次型输出调节器,将扰动误差作为线性反馈控制律的派生形式,用于中型客车起步控制。

针对拖拉机起步过程建模不确定性、工况复杂多变和时变干扰等问题,本文提出一种基于高阶扰动观测器(High order disturbance observer,HDO)的动力换挡拖拉机起步控制方法。该方法在分析拖拉机起步特性基础上,利用 HDO 对模型的不确定性和时变扰动等进行观测,并作为线性二次型最优调节器(Linear quadratic regulator,LQR)的补偿输入,得到起步离合器的最优摩擦转矩;在文献[4]的基础上,采用无模型自适应预测控制(Model free adaptive predictive control,MFAPC)算法将控制转矩转换为离合器压力的最优轨迹,实现离合器压力的实时控制;通过 Matlab/Simulink 和 AMESim 平台构建拖拉机动力传动系统模型,分析不同起步意图和作业工况下的拖拉机起步性能,通过仿真试验验证本文方法的有效性。

1 动力换挡变速箱建模与起步过程分析

以某 PST 拖拉机为例进行起步过程分析,其动力学模型如图 1 所示。

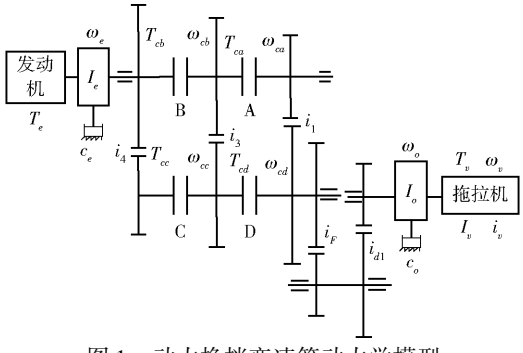

图 1 动力换挡变速箱动力学模型

Fig. 1 Dynamical model of PST for high-power tractor

图 1 中,I_e、I_o、I_v分别表示发动机飞轮、PST 输出轴及整机的等效转动惯量,kg·m^2;T_e、T_{ca}、T_{cb}、T_{cc}、T_{cd}、T_v分别为发动机输出转矩,离合器 A、B、C、D 摩擦转矩及阻力矩,N·m;ω_{ca}、ω_{cb}、ω_{cc}、ω_{cd}、ω_e、ω_o、ω_v分别为离合器 A、B、C、D 以及发动机、变速箱输出轴、驱动轮角速度,rad/s;c_e、c_o分别为发动机和 PST 输出轴等效旋转粘性阻尼系数;i_1、i_3、i_4、i_F、i_{d1}、i_v分别为 PST 变速箱 LL、M、H 挡位、前进挡、副变速箱 1 挡及中央传动和最终传动的传动比。以 LL 挡起步为例,拖拉机通过控制湿式离合器 A、B 的接合过程实现平稳起步,其动力学模型可简化为

$$\begin{cases} I_e\dot{\omega}_e = T_e - T_{cb} - c_e\omega_e \\ I_o\dot{\omega}_o = T_{cb}i_1i_Fi_{d1} - \dfrac{T_v}{i_v} - c_o\omega_o \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} T_v = \left[M_sg(f_g\cos\alpha' + \sin\alpha') + \right. \\ \qquad \left. \dfrac{1}{2}C_dA_{air}\rho v^2 + k_1k_tz_tb_th_t\right]r_q \\ T_{cb} = \dfrac{2}{3}\mathrm{sign}(\Delta\omega_{cb})\mu pSz_1\dfrac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2} \end{cases} \tag{2}$$

式中　α'——道路坡度，rad

f_g——滚动阻力系数

r_q——驱动轮动力半径，m

C_d——空气阻力系数

v——拖拉机行驶速度，m/s

A_{air}——迎风面积，m^2

ρ——空气密度，kg/m^3

k_1——动力储备系数

k_t——土壤比阻，N/m^2

z_t——犁铧个数

b_t——单体犁铧宽度，m

h_t——耕深，m

M_s——拖拉机使用质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

μ——摩擦因数

S——摩擦副有效作用面积，m^2

p——摩擦副间的正压力，Pa

$\Delta\omega_{cb}$——离合器 B 主、从件角速度差，rad/s

z_1——摩擦副面数

R、r——摩擦片外、内半径，m

2　时变扰动抑制输出控制系统设计

由于拖拉机作业环境和挂载农机具类型复杂多样，受时变参数（如离合器摩擦因数、滚动阻力系数、田间坡度等）的影响，其起步过程中存在建模不确定性、参数摄动和时变扰动等问题，易造成起步冲击过大、离合器滑摩时间过长，降低拖拉机动力性和驾驶品质。因此，本文提出一种基于时变扰动抑制的 LQR 控制器（图 2），利用 HDO 估计系统的时变扰动，通过对 LQR 的动态补偿实现时变扰动的抑制。

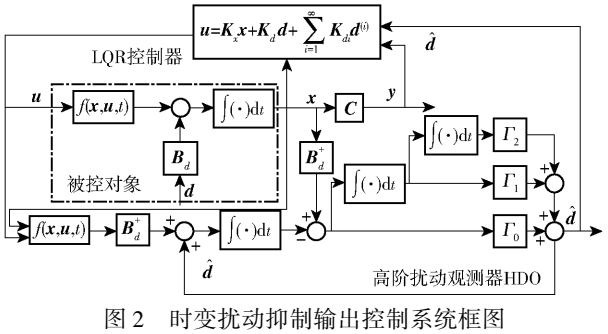

图 2　时变扰动抑制输出控制系统框图

Fig. 2　Block diagram of linear control system with time-varying disturbance

2.1　线性二次型调节器设计

假设某系统为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{u}+\boldsymbol{B}_d\boldsymbol{d}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\end{cases}\tag{3}$$

式中　$\boldsymbol{x}$——状态向量，$\boldsymbol{x}\in\mathbb{R}^{n\times1}$

$\boldsymbol{u}$——控制向量，$\boldsymbol{u}\in\mathbb{R}^{m\times1}$

$\boldsymbol{d}$——时变扰动向量，$\boldsymbol{d}\in\mathbb{R}^{l\times1}$

$\boldsymbol{y}$——系统输出向量，$\boldsymbol{y}\in\mathbb{R}^{s\times1}$

$\boldsymbol{A}$——状态矩阵，$\boldsymbol{A}\in\mathbb{R}^{n\times n}$

$\boldsymbol{B}_u$——控制矩阵，$\boldsymbol{B}_u\in\mathbb{R}^{n\times m}$

$\boldsymbol{B}_d$——扰动矩阵，$\boldsymbol{B}_d\in\mathbb{R}^{n\times l}$

$\boldsymbol{C}$——系统输出矩阵，$\boldsymbol{C}\in\mathbb{R}^{s\times n}$

输出调节器性能泛函为

$$\min J=\frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty}(\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u})\,\mathrm{d}t\tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{Q}$、$\boldsymbol{R}$——正定矩阵

为求解最优控制问题，构造哈密尔顿函数

$$H(\boldsymbol{x},\boldsymbol{u},\boldsymbol{\lambda})=\frac{1}{2}(\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{y}+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u})+\boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{u}+\boldsymbol{B}_d\boldsymbol{d})\tag{5}$$

式中　$\boldsymbol{\lambda}$——协态矢量

由此可得

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=-\dfrac{\partial H}{\partial\boldsymbol{\lambda}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}-\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}+\boldsymbol{B}_d\boldsymbol{d}\\ \dot{\boldsymbol{\lambda}}=-\dfrac{\partial H}{\partial\boldsymbol{u}}=-\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}\\ u^*(t)=-\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}\end{cases}\tag{6}$$

传统乘子函数 $\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}$ 计算最优解不能有效抑制时变扰动，因此，引入包含扰动 $\boldsymbol{d}$ 及其各阶导数的乘子函数

$$\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{h}_0\boldsymbol{d}+\boldsymbol{h}_1\dot{\boldsymbol{d}}+\cdots+\boldsymbol{h}_n\boldsymbol{d}^{(n)}\tag{7}$$

式中　$\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{h}_i$——待定时不变系数矩阵

由式(6)和式(7)可得

$$(\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{C}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P})\boldsymbol{x}+(-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_0+\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_d+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_0)\boldsymbol{d}+\sum_{i=1}^{\infty}(\boldsymbol{h}_{i-1}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_i+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_i)\boldsymbol{d}^{(i)}=0\tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{P}$ 由黎提卡(Riccati)方程求解

$$\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{C}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}=0\tag{9}$$

由此可得

$$\begin{cases}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_0+\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_d+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_0=0\\ \boldsymbol{h}_{i-1}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_i+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_i=0\end{cases}\tag{10}$$

求解式(10)可得

$$\begin{cases}\boldsymbol{h}_0=(\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_d\\ \boldsymbol{h}_i=(\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{h}_{i-1}\quad(i=1,2,\cdots)\end{cases}\tag{11}$$

最终控制律为

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{K}_x\boldsymbol{x}+\boldsymbol{K}_d\boldsymbol{d}+\sum_{i=1}^{\infty}\boldsymbol{K}_{di}\boldsymbol{d}^{(i)}\tag{12}$$

其中
$$\begin{cases}\boldsymbol{K}_x = -\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\\ \boldsymbol{K}_d = -\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_0\\ \boldsymbol{K}_{di} = -\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}_u^{\mathrm{T}}\boldsymbol{h}_i\end{cases} \tag{13}$$

2.2 高阶扰动观测器设计

高阶扰动观测器[20]不仅能估计时间序列中的扰动信息,还可观测扰动的多阶导数,有效提高系统扰动抑制能力。假设系统中存在时变扰动 d,表示为

$$d(t) = \sum_{k=0}^{q} d_i t^k \tag{14}$$

式中 d_i——未知常数

扰动观测器设计为

$$\hat{d}(t) = \Gamma_0 g_0(t) + \Gamma_1 g_1(t) + \cdots + \Gamma_q g_q(t) = \sum_{k=0}^{q} \Gamma_k g_k(t) \tag{15}$$

其中
$$\begin{cases} g_k(t) = \begin{cases} \boldsymbol{B}_d^{+}\boldsymbol{x} - z & (k=0)\\ \int_0^t g_{k-1}(\tau)\mathrm{d}\tau & (k\geqslant 1)\end{cases}\\ \dot{z} = \boldsymbol{B}_d^{+}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}_u\boldsymbol{u}) + \hat{d}\end{cases} \tag{16}$$

$$\Gamma_k = \mathrm{diag}(\gamma_{k1}, \gamma_{k2}, \cdots, \gamma_{kd}) \tag{17}$$

式中 $\hat{d}$——时变扰动估计值

$\boldsymbol{B}_d^{+}$——扰动矩阵的 Moore - Penrose 伪逆

z——高阶扰动估计参数

γ_{ij}符合 Routh - Hurwitz 稳定,计算式为

$$p_j(s) = s^{q+1} + \gamma_{0j}s^q + \cdots + \gamma_{(q-1)j}s + \gamma_{qj} \tag{18}$$

观测器估计误差为

$$\dot{e}_d = \dot{d} - \dot{\hat{d}} = \dot{d} - \sum_{k=0}^{q} \Gamma_k \dot{g}_k(t) \tag{19}$$

多次求导后,可得

$$e_d^{(q+1)} + \Gamma_0 e_d^{(q)} + \cdots + \Gamma_{q-1} e_d^{(1)} + \Gamma_{q-1} e_d = d^{(q+1)} \tag{20}$$

2.3 算例验证

为验证时变扰动抑制 LQR 控制器的有效性,利用式(3)所示算例进行时变扰动估计,其参数取值为

$$\begin{cases}\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -5 & 10\\ 0 & 0\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{B}_u = [0 \quad 1]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{B}_d = [1 \quad 0]^{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{C} = [1 \quad 0]\\ d = 5\sin t\mathrm{e}^{-0.5t}\end{cases} \tag{21}$$

此外,引入 PI 观测器(Proportional integral observer,PIO)[21-22]与不同扰动导数阶次下的 HDO 进行观测性能对比分析。图 3 为 HDO 和 PIO 扰动观测结果对比,其中,HDO 各阶次观测器参数为 HDO0:$\gamma_0 = 10$;HDO1:$\gamma_0 = 20, \gamma_1 = 100$;HDO2:$\gamma_0 = 8, \gamma_1 = 15, \gamma_2 = 50$。

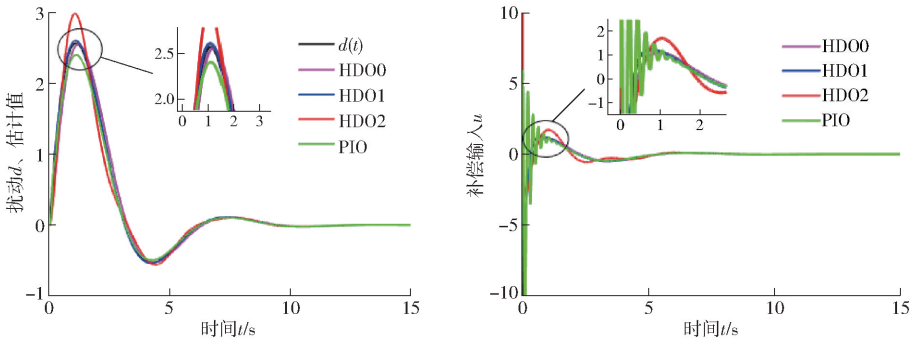

图 3 HDO 和 PIO 扰动观测性能仿真结果

Fig. 3 Performance comparison of HDO and PIO for time-varying disturbance

由图 3a 可知,HDO 与 PIO 均能有效观测扰动变化,但随着扰动 d 导数阶次的增加,HDO 对扰动的观测效果越来越有限。d 的 2 阶导数观测器(HDO2)最大观测误差较 d、HDO0、HDO1 及 PIO 分别高 16.73%、14.28%、1.89%、6.59%。与 PIO 相比,HDO1 观测响应快,且具有较好的渐进稳定性和估计鲁棒性。图 3b 为多种观测器的补偿输入对比。由图可知,受观测器结构影响,PIO 为恒定观测器($\dot{\hat{d}}\to 0$),加入干扰补偿后,u 振荡较剧烈,系统干扰抑制能力较差。与传统 PIO 相比,HDO 通过多项式对扰动建模,并运用扩张状态的方式来估计扰动,完全独立于系统状态和干扰观测器状态,扰动估计误差与系统状态完全解耦,大大简化了系统的时域分析,误差估计更简单易于实现。

图 4 为基于 HDO 的 LQR 控制器在不同阶次的仿真对比。其中,$Q = 10, R = 1$。由图 4b 可知,不同控制输入阶次下系统均能快速稳定且具有良好的扰动抑制能力。加入扰动 d 的导数信息后,系统输出能够快速收敛,$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{K}_x\boldsymbol{x} + \boldsymbol{K}_d\boldsymbol{d} + \boldsymbol{K}_{d1}\dot{\boldsymbol{d}}$ 和 $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{K}_x\boldsymbol{x} + \boldsymbol{K}_d\boldsymbol{d} + \boldsymbol{K}_{d1}\dot{\boldsymbol{d}} + \boldsymbol{K}_{d2}\ddot{\boldsymbol{d}}$ 的扰动抑制效果最佳。$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{K}_x\boldsymbol{x} + \boldsymbol{K}_d\boldsymbol{d} + \boldsymbol{K}_{d1}\dot{\boldsymbol{d}} + \boldsymbol{K}_{d2}\ddot{\boldsymbol{d}} + \boldsymbol{K}_{d3}\boldsymbol{d}^{(3)}$ 虽响应较快,但由于扰动导数信息增多,u(图 4a)在初期调节频繁,指标 J

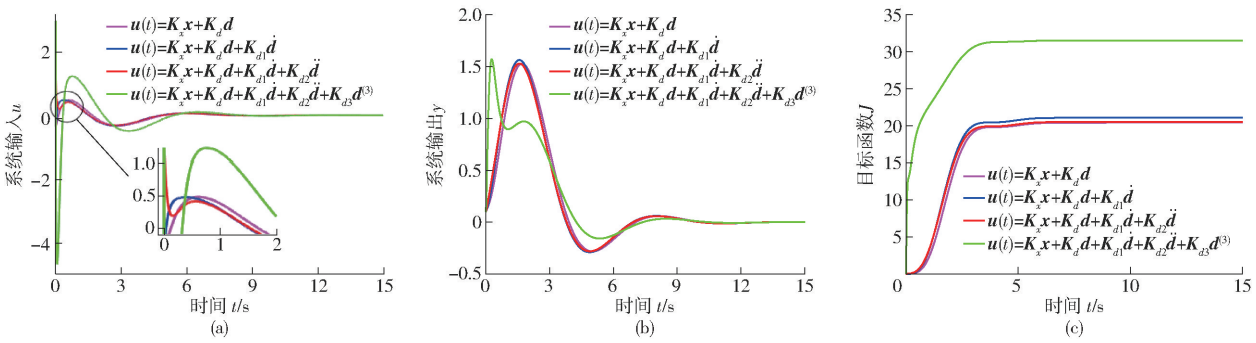

图 4　不同阶次的 LQR 控制器性能仿真对比曲线

Fig. 4　Performance comparison of LQR controller under different orders

(图 4c) 显著增加,较其他阶次分别高 54.33%、49.43%及 53.58%。由此可知,一定控制输入阶次下,加入 d 的导数信息对扰动具有显著抑制作用,但随着扰动阶次的增加,其抑制能力也越来越有限。

3　动力换挡拖拉机起步控制仿真分析

3.1　换挡品质评价指标

换挡品质是指在保证拖拉机动力传动系统动力性和可靠性前提下迅速、平稳换挡的程度,一般非道路车辆换挡品质最直观的评价指标为冲击度、滑摩功等[23]。

(1)冲击度

冲击度 j(m/s^3)指拖拉机纵向加速度的变化率。j 越大,换挡平顺性越差。计算式为

$$j=\frac{\mathrm{d}^2 v}{\mathrm{d}t^2} \tag{22}$$

(2)滑摩功

滑摩功 W_{fc} 用来衡量离合器接合过程中主动和从动件摩擦做功的大小,计算式为

$$W_{fc}=\int_0^{t_j} T_c \Delta\omega_c \mathrm{d}t \tag{23}$$

式中　t_j——滑摩结束时间,s

T_c——离合器摩擦转矩,N·m

$\Delta\omega_c$——离合器主、从件角速度差,rad/s

3.2　起步控制器设计

为消除动力换挡拖拉机起步控制系统的不确定性和时变扰动对起步品质造成的影响,本文将起步中时变扰动和建模不确定性集成为外部扰动项 $\boldsymbol{d}=[d_1 \quad d_2]$,则起步方程为

$$\begin{cases}\Delta\dot{\omega}_{cb}=\left(\dfrac{c_o}{I_o}-\dfrac{c_e}{I_e}\right)\omega_e-\dfrac{c_o}{I_o}\Delta\omega_{cb}+\dfrac{1}{I_e}T_e-\\ \qquad\left[\dfrac{(i_1 i_F i_{d1})^2}{I_o}+\dfrac{1}{I_e}\right]T_{cb}+\dfrac{i_1 i_F i_{d1}}{I_o i_v}T_v+d_1\\ \dot{\omega}_e=\dfrac{T_e}{I_e}-\dfrac{T_{cb}}{I_e}-\dfrac{c_e\omega_e}{I_e}+d_2\end{cases} \tag{24}$$

选取 $x_1=\Delta\omega_{cb}$、$x_2=\omega_e$、$x_3=T_{cb}$ 为状态变量,$u=\mathrm{d}T_{cb}/\mathrm{d}t$ 为控制变量,T_e、T_v 为可测扰动向量 $\boldsymbol{p}$,基于线性二次型最优控制理论,可得到起步控制系统的状态空间模型

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}_u\boldsymbol{u}+\boldsymbol{B}_p\boldsymbol{p}+\boldsymbol{B}_d\boldsymbol{d}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\end{cases} \tag{25}$$

其中

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}-\dfrac{c_o}{I_o} & \dfrac{c_o}{I_o}-\dfrac{c_e}{I_e} & -\left(\dfrac{i_c^2}{I_o}+\dfrac{1}{I_e}\right)\\ 0 & -\dfrac{c_e}{I_e} & -\dfrac{1}{I_e}\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\boldsymbol{B}_u=[0 \quad 0 \quad 1]^{\mathrm{T}} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{B}_d=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{28}$$

$$\boldsymbol{B}_p=\begin{bmatrix}\dfrac{1}{I_e} & \dfrac{1}{I_e} & 0\\ \dfrac{i_1 i_F i_{d1}}{I_o} & 0 & 0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{29}$$

$$\boldsymbol{C}=[1 \quad 0 \quad 0] \tag{30}$$

综合考虑冲击度和滑摩功计算性能泛函,最终控制律为

$$u=\boldsymbol{K}_x\boldsymbol{x}+\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{p}+\boldsymbol{K}_d d+\boldsymbol{K}_{d1}\dot{d}+\boldsymbol{K}_{d2}\ddot{d} \tag{31}$$

3.3　起步控制仿真分析

为验证本文起步控制方法的有效性,基于 Matlab/Simulink 与 AMESim 联合仿真构建了动力换挡拖拉机传动系统仿真模型,如图 5 所示。拖拉机主要参数如表 1 所示。

选取运输、犁耕 2 种典型工况对不同意图下的拖拉机起步过程进行仿真分析。3 种起步意图(缓慢、中等和快速)如图 6 所示。此外,为体现本文算法优越性,以 LQR、PIO + LQR 作为对照进行拖拉机起步控制仿真。其中,$Q=1.3$,$R=1$,LQR 控制参数为

$$\begin{cases}\boldsymbol{K}_x=[1.1165 \quad -0.0058 \quad -3.6976]\\ \boldsymbol{K}_p=[0.9260 \quad 0.5784]\\ \boldsymbol{K}_d=[0.6035 \quad -0.0016]\\ \boldsymbol{K}_{d1}=[0.1631 \quad -0.0264]\end{cases} \tag{32}$$

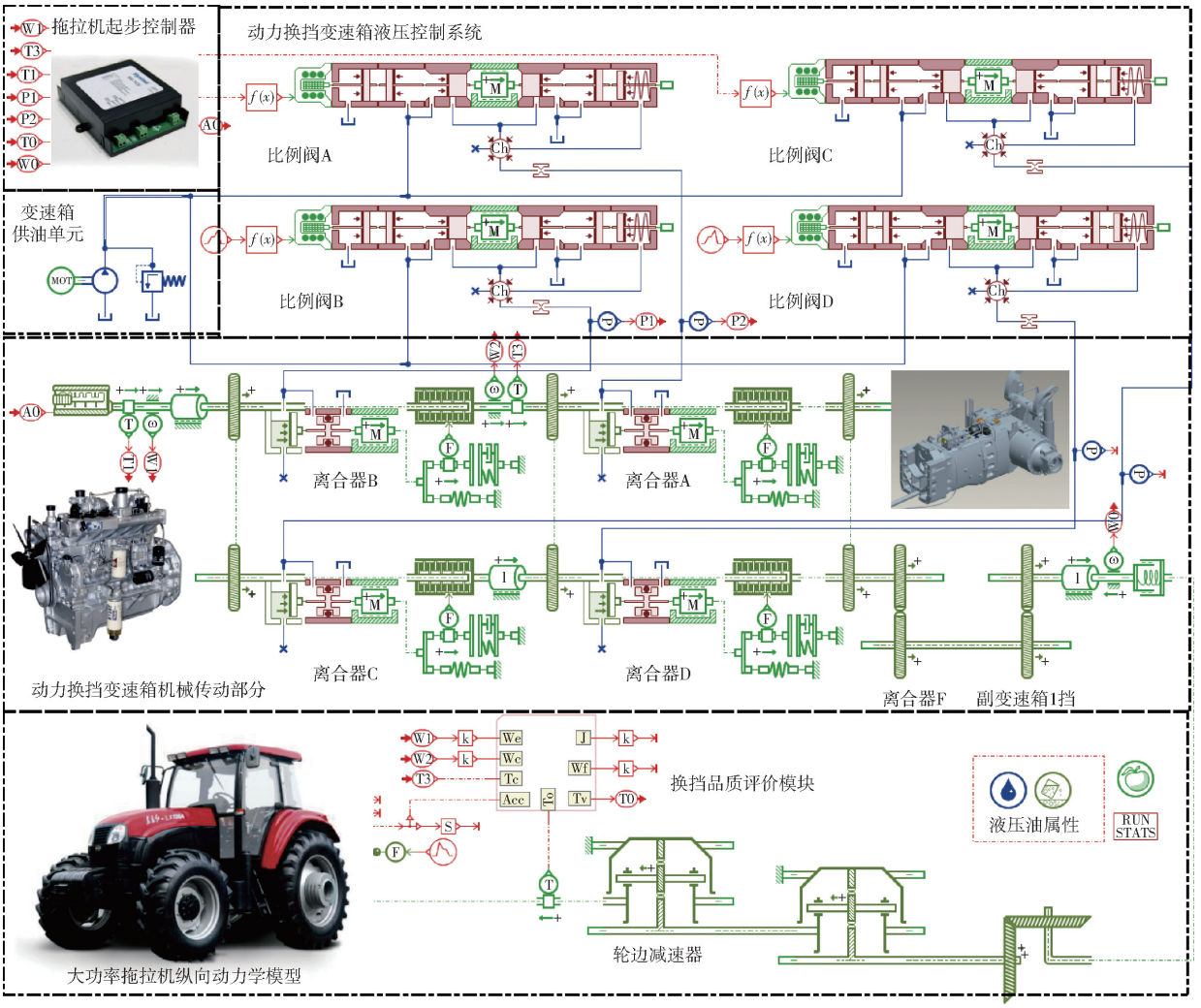

图 5 拖拉机传动系统 AMESim 仿真模型

Fig. 5 AMESim model of tractor powertrain system

表 1 拖拉机整机主要参数

Tab. 1 Parameters of tractor

参数	数值
发动机及飞轮等效转动惯量 I_e/(kg·m^2)	0.65
变速箱输出轴等效转动惯量 I_o/(kg·m^2)	5
发动机等效阻尼系数 c_e/(N·m·s·rad^{-1})	0.016
变速箱输出轴等效阻尼系数 c_o/(N·m·s·rad^{-1})	0.016
驱动轮动力半径 r_q/m	0.904 6
滚动阻力系数 f_g	0.08
拖拉机使用质量 M_s/kg	12 000
中央传动和最终传动传动比 i_v	49.949 4

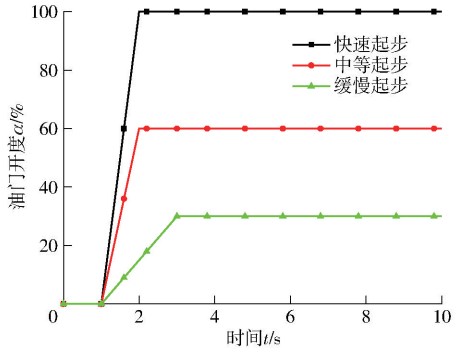

图 6 驾驶员 3 种不同的起步意图

Fig. 6 Three different kinds of driver starting intentions

图 7 为 3 种起步意图(油门开度 30%、60%、100%)下拖拉机运输工况起步性能仿真对比。由图 7a 可知,不同起步意图下,发动机转速与离合器从动盘转速同步时间为 1.5 ~ 3.1 s,标志着起步离合器结束滑摩阶段进入同步阶段。油门开度越大,起步时间越短。同一意图下,PIO 离合器接合速度最快。3 种起步意图下,PIO 接合时间分别为 2.52、1.74、1.66 s,比 HDO 分别快 3.08%、9.38%、11.23%。LQR 起步时间最长,分别为 3.10、2.26、2.18 s。此外,受离合器充油和 MFAPC 算法滞后影响[4],在起步初期存在约 0.2 s 延时,对离合器接合时间产生一定影响。由图 7b 可知,起步初期发动机转速波动较小,但离合器摩擦转矩急剧抖动,主要原因是离合器油缸压力在初期超调引起的转矩变化[4],其中,超调压力约 0.035 MPa。由图 7c、7d 可知,不同起步意图下,3 种方法的最大冲击度均符合相关标准要求($j \leqslant 17$ m/s^3)。3 种起步意图下,PIO

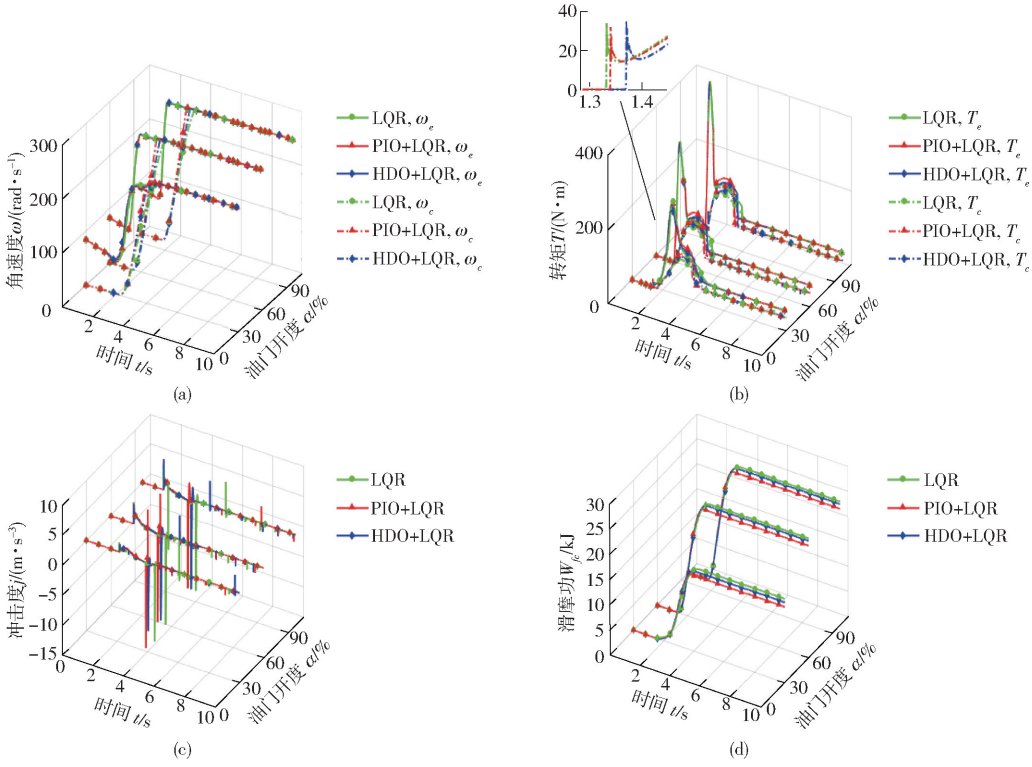

图 7　运输工况下拖拉机起步性能仿真对比

Fig. 7　Simulation comparison of tractor starting up during transporting

最大冲击度分别为 13.49、15.69、16.85 m/s^3，比 LQR 分别高 6.81%、3.09% 及 8.71%，比 HDO 分别高 29.09%、28.08% 及 8.71%。

图 8 为运输工况下观测器扰动估计值对比。由图可知，换挡初期 PIO 扰动估计值较大，可对扰动 d 进行快速补偿，虽然一定程度上增加了冲击度，但滑摩功显著降低。30% 油门开度下 W_{fc} 仅 15.13 kJ，比 LQR、HDO 分别降低 9.56%、5.56%。HDO 在起步初期扰动观测值较小，但其变化趋势与离合器传递转矩大致相同，得益于 HDO 对 d 的前馈补偿，3 种起步意图下 HDO 最大冲击度分别为 10.45、12.25、15.5 m/s^3，冲击度控制效果最好，且能兼顾滑摩功控制需求，60%、100% 油门下 W_{fc} 比 LQR 分别降低 0.49、0.52 kJ，一定程度上减少了摩擦片滑摩，提高离合器使用寿命。

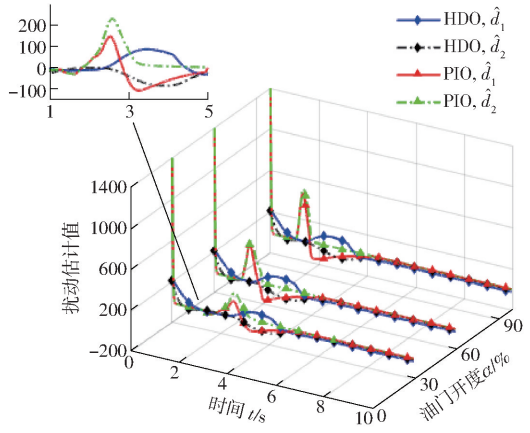

图 8　运输工况下观测器扰动估计值对比

Fig. 8　Comparison of disturbance estimator of different observers during transporting

为客观评估拖拉机起步性能，本文利用试验测定的犁耕牵引力作为拖拉机机组信号进行犁耕工况下的起步仿真。其中，试验拖拉机型号为东方红 LX2204 型轮式拖拉机，标定功率为 162 kW（图 9a），试验场为河南省洛阳市某地试验田。采集的牵引力部分数据如图 9b 所示。

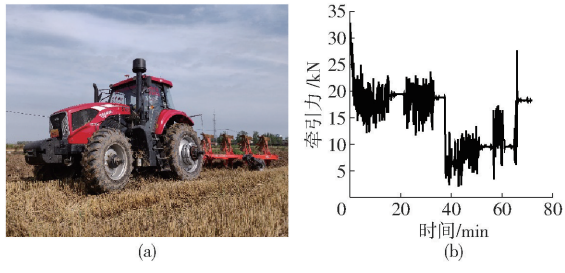

图 9　大功率拖拉机犁耕作业牵引力采集试验

Fig. 9　Tractive force of high-power tractor during ploughing

图 10 为 3 种意图下拖拉机犁耕工况起步性能仿真结果对比。由图可知，随着负载的增加，拖拉机起步时间逐渐延长。3 种方法的仿真结果变化趋势与运输工况结果基本一致。PIO 起步时间最短，HDO 次之，LQR 起步时间最长。3 种意图下 HDO 的转速同步时间分别为 3.56、2.72、2.64 s，较运输工况分别多 0.96、0.80、0.77 s。此外，由于作业机组阻力的增大和起步时间延长，3 种方法的摩擦转

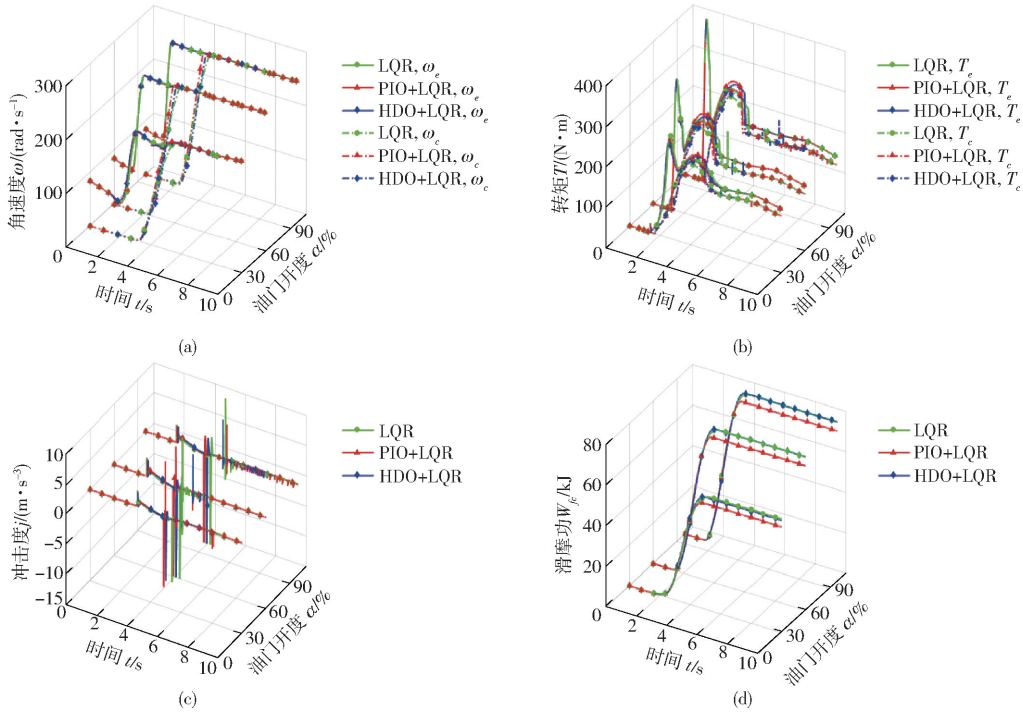

图 10 犁耕工况下拖拉机起步性能仿真对比

Fig. 10 Simulation comparison of tractor starting up during ploughing

矩在起步初期变化较小(图 10b)。同一起步意图下,犁耕工况的扰动观测值也远小于运输工况(图 11)。

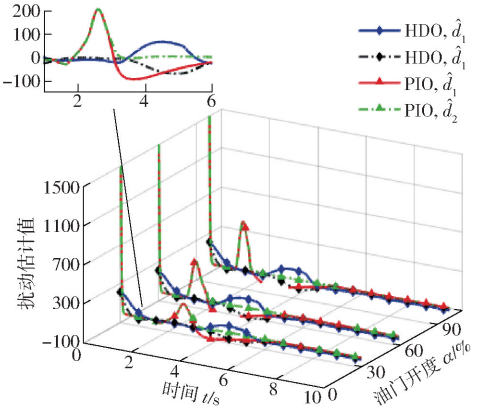

图 11 犁耕工况下观测器扰动估计值对比

Fig. 11 Comparison of disturbance estimator of different observers during ploughing

由图 10c、10d 可知,虽然起步时间较短,牵引力变化并不明显,但对拖拉机起步品质仍产生较大影响。受牵引力变化影响,起步冲击度波动更剧烈,且滑摩功远大于运输作业。其中,3 种起步意图下 HDO 最大冲击度分别为 10.20、11.32、14.39 m/s³,均低于运输工况,且比 PIO、LQR 犁耕下的冲击度降低 3.32% ~22.20%。在起步过程后期,离合器油压升至系统压力,仍造成一定冲击。以犁耕下的缓慢起步为例,3 种方法在此阶段的冲击度分别为 10.55、11.83、10.20 m/s³,滑摩功分别为 55.93、52.12、55.30 kJ。犁耕作业下 PIO 滑摩功仍最小,油门开度 60% 的滑摩功仅 71.20 kJ,较 HDO、LQR 分别降低 5.85%、5.98%。但快速起步意图下,HDO 的最大冲击度为 14.39 m/s³,较 PIO 降低 12.47%,但比 LQR 提高 4.43%;HDO 滑摩功为 78.82 kJ,较前两者增加 6.83%、0.70%。其主要原因在于 HDO 建立在扰动假设模型基础上,观测器参数的设定影响了 LQR 对时变扰动的抑制能力。

3 种方法在不同工况和起步意图下的起步品质评价指标如表 2 所示。HDO 在一定程度上实现了拖拉机起步过程中时变干扰和建模不确定性的准确

表 2 不同工况下 3 种方法的起步仿真结果对比

Tab. 2 Simulation results of tractor starting up with three different methods

工况		评价指标	LQR	PIO	HDO
运输工况	缓慢起步	同步时间 t/s	3.10	2.52	2.60
		滑摩功 W_{fc}/kJ	16.73	15.13	16.02
		冲击度 j/(m·s⁻³)	12.63	13.49	10.45
	中等起步	同步时间 t/s	2.26	1.74	1.92
		滑摩功 W_{fc}/kJ	23.82	22.36	23.33
		冲击度 j/(m·s⁻³)	15.22	15.69	12.25
	快速起步	同步时间 t/s	2.18	1.66	1.87
		滑摩功 W_{fc}/kJ	24.59	23.16	24.07
		冲击度 j/(m·s⁻³)	15.50	16.85	15.50
犁耕工况	缓慢起步	同步时间 t/s	4.04	3.48	3.56
		滑摩功 W_{fc}/kJ	55.93	52.12	55.30
		冲击度 j/(m·s⁻³)	10.55	11.83	10.20
	中等起步	同步时间 t/s	3.00	2.56	2.72
		滑摩功 W_{fc}/kJ	75.73	71.20	75.62
		冲击度 j/(m·s⁻³)	13.26	14.55	11.32
	快速起步	同步时间 t/s	2.91	2.47	2.64
		滑摩功 W_{fc}/kJ	78.27	73.78	78.82
		冲击度 j/(m·s⁻³)	13.78	16.44	14.39

估计，通过 LQR 控制器能有效抑制时变扰动对起步品质的影响，显著提高了不同工况下的起步性能，且具有一定鲁棒性。

4　结论

（1）提出了一种基于时变扰动抑制的 LQR 控制器，利用 HDO 实现了扰动估计误差与系统状态完全解耦，可有效解决建模不确定性和外部时变扰动带来的不利影响，提高了控制系统的鲁棒性。HDO 操作简单，且易于实现。

（2）依托 Matlab/Simulink 及 AMESim 联合仿真平台，构建大功率动力换挡拖拉机传动系统仿真模型，在不同作业工况和起步意图下进行了起步性能仿真分析。结果表明，HDO 实现了对拖拉机起步时变扰动的有效观测，通过 LQR 控制器的扰动补偿控制有效降低了起步过程的冲击度和滑摩功。以中等起步为例，HDO 运输工况和犁耕工况下的冲击度分别为 12.25、11.32 m/s^3，较 PIO 分别降低了 21.92%、22.20%，滑摩功分别为 23.33、75.62 kJ，较 LQR 分别降低了 2.1%、0.15%，在一定程度上提高了拖拉机换挡品质，具有较好的控制鲁棒性。

参　考　文　献

[1] 席志强，周志立，张明柱，等. 拖拉机动力换挡变速器换挡特性与控制策略研究[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(11)：350－357.
XI Zhiqiang，ZHOU Zhili，ZHANG Mingzhu，et al. Shift characteristics and control strategy of power shift transmission on tractor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(11)：350－357. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161147&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.047.（in Chinese）

[2] 曹青梅. 拖拉机 PST 控制系统关键技术研究[D]. 西安：西安理工大学，2018.
CAO Qingmei. Research on key technology of tractor power shift transmission control system[D]. Xi'an：Xi'an University of Technology，2018.（in Chinese）

[3] 魏列江，李维，刘增光，等. 车辆换挡系统调压阀优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2019，50(10)：360－366.
WEI Liejiang，LI Wei，LIU Zengguang，et al. Optimum design of pressure regulating valve in vehicle shift system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(10)：360－366. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191042&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.042.（in Chinese）

[4] 傅生辉，顾进恒，李臻，等. 基于 MFAPC 的动力换挡变速箱湿式离合器压力控制方法研究[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(12)：367－376.
FU Shenghui，GU Jinheng，LI Zhen，et al. Pressure control of wet clutch for PST of high-power tractor based on MFAPC algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(2)：367－376. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201240&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j-issn.1000-1298.2020.12.040.（in Chinese）

[5] LI Baogang，SUN Dongye，HU Minghui，et al. Coordinated control of gear shifting process with multiple clutches for power-shift transmission[J]. Mechanism and Machine Theory，2019，140：274－291.

[6] KIM S，CHOI S. Control-oriented modeling and torque estimations for vehicle driveline with dual-clutch transmission[J]. Mechanism and Machine Theory，2018，121：633－649.

[7] LI Guoqiang，GÖRGES D. Optimal control of the gear shifting process for shift smoothness in dual-clutch transmissions[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2018，103：23－38.

[8] 孙冬野，陈旭东，李宝刚，等. 基于遗传算法的拖拉机动力换挡过程动态控制方法[J]. 重庆大学学报，2019，42(8)：1－14.
SUN Dongye，CHEN Xudong，LI Baogang，et al. Dynamic control method of tractor powershift process based on genetic algorithm[J]. Journal of Chongqing University，2019，42(8)：1－14.（in Chinese）

[9] 洪金龙. AMT 起步及换挡过程的驾驶品质优化控制[D]. 长春：吉林大学，2019.
HONG Jinlong. AMT drivability optimization control during launch and gear shift process[D]. Changchun：Jilin University，2019.（in Chinese）

[10] 韩玲，刘鸿祥，赵聪聪，等. 基于鲁棒控制 Lyapunov 函数的 CVT 离合器起步非线性控制研究[J]. 振动与冲击，2019，38(21)：210－215，235.
HAN Ling，LIU Hongxiang，ZHAO Congcong，et al. Nonlinear control of CVT start clutch based on robust control Lyapunov function[J]. Journal of Vibration and Shock，2019，38(21)：210－215，235.（in Chinese）

[11] LI B，SUN D，HU M，et al. Automatic starting control of tractor with a novel power-shift transmission[J]. Mechanism and Machine Theory，2019，131：75－91.

[12] 耿国盛，周康，肖茂华，等. 拖拉机液压机械无级变速箱的起步特性研究[J]. 南京农业大学学报，2016，39(2)：332－340.
GENG Guosheng，ZHOU Kang，XIAO Maohua，et al. Research on starting process of hydro-mechanical continuously variable transmission for tractor[J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2016，39(2)：332－340.（in Chinese）

[13] 周康. 液压机械无级变速箱的特性与起步控制研究[D]. 南京：南京农业大学，2016.
ZHOU Kang. Research on characteristics and starting control of hydro-mechanical continuously variable transmission[D]. Nanjing：Nanjing Agricultural University，2016.（in Chinese）

[14] 戴丰. 基于驾驶员起步意图的 AMT 控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
DAI Feng. Study on control of automated mechanical transmission based on driver's starting intentions[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
[15] 陈海军, 赵治国, 王琪, 等. 干式 DCT 双离合器联合起步最优协调控制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(22):150 - 164.
CHEN Haijun, ZHAO Zhiguo, WANG Qi, et al. Dry dual clutch transmission' optimal and coordinating launching control with two clutches based on the minimum principle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(22):150 - 164. (in Chinese)
[16] ZHAO Zhiguo, HE Lu, YANG Yunyun, et al. Estimation of torque transmitted by clutch during shifting process for dry dual clutch transmission[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016,75:413 - 433.
[17] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9):1 - 17.
DU Yuefeng, FU Shenghui, MAO Enrong, et al. Development situation and prospects of intelligent design for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(9):1 - 17. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190901&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.001. (in Chinese)
[18] 杨阳, 王蒙蒙, 刘永刚, 等. DCT 车辆起步数据驱动预测控制[J/OL]. 重庆大学学报, 2020.
YANG Yang, WANG Mengmeng, LIU Yonggang, et al. Data-driven predictive control for DCT vehicles starting process[J/OL]. Journal of Chongqing University, 2020. https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20200610.1208.004.html. (in Chinese)
[19] GAO B, HONG J, QU T, et al. Linear-quadratic output regulator for systems with disturbance: application to vehicle launch control[C]//Youth Academic Conference of Chinese Association of Automation. IEEE, 2016:135 - 140.
[20] KIM K S, REW K H, KIM S. Disturbance observer for estimating higher order disturbances in time series expansion[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(8): 1905 - 1911.
[21] 刘蕾, 闫晓峰, 韩存武, 等. 基于 PI 观测器的奇异摄动系统故障诊断和最优容错控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(10):1867 - 1872.
LIU Lei, YAN Xiaofeng, HAN Cunwu, et al. Fault diagnosis and optimal fault-tolerance control of singularly perturbed system based on PI observer[J]. Control and Decision, 2016, 31(10): 1867 - 1872. (in Chinese)
[22] KOENIG D, MAMMAR S. Design of proportional-integral observer for unknown input descriptor systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 47(12):2057 - 2062.
[23] 徐立友, 刘海亮, 周志立, 等. 拖拉机双离合器自动变速器换挡品质评价指标[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):48 - 53.
XU Liyou, LIU Hailiang, ZHOU Zhili, et al. Evaluation indexes of shifting quality for dual clutch transmission for tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8):48 - 53. (in Chinese)

(上接第 339 页)

[24] 孙诗文. 智慧牧业中基于深度学习的羊分娩场景识别算法应用研究[D]. 鄂尔多斯:内蒙古工业大学,2019.
SUN Shiwen. Application research of sheep delivery scene recognition algorithm based on deep learning in wisdom animal husbandry[D]. Erdos: Inner Mongolia University of Technology, 2019. (in Chinese)
[25] 杨阿庆, 薛月菊, 黄华盛, 等. 基于全卷积网络的哺乳母猪图像分割[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 219 - 225.
YANG Aqing, XUE Yueju, HUANG Huasheng, et al. Lactating sow image segmentation based on fully convolutional networks[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 219 - 225. (in Chinese)
[26] 赵世达,王树才,李振强,等. 基于 U 型卷积神经网络的羊肋排图像分割[J]. 食品与机械,2020, 36(9):116 - 121.
ZHAO Shida, WANG Shucai, LI Zhenqiang, et al. Image segmentation of shep ribs based on U-shaped convolutional neural network[J]. Food & Machinery, 2020, 36(9):116 - 121. (in Chinese)
[27] 李振强,王树才,赵世达,等. 基于机器视觉和机器学习的羊骨架自动分割方法[J]. 食品与机械,2020, 36(6):125 - 132.
LI Zhenqiang, WANG Shucai, ZHAO Shida, et al. The calculation methods of goat trunk's segmentation trajectory based on machine vision and machine learning[J]. Food & Machinery, 2020, 36(6):125 - 132. (in Chinese)
[28] RADFORD A, METZ L, CHINTALA S. Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks [EB/OL]. [2020 - 06 - 06]. https://arxiv.org/pdf/1511.06434.pdf.
[29] ZHAO H, QI X, SHEN X, et al. ICNet for real-time semantic segmentation on high-resolution images[C]// European Conference on Computer Vision. Munich, Germany, 2017. arXiv: 1704.08545.
[30] GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al. Generative adversarial nets[C]// Advances in Neural Information Processing Systems, 2014: 2672 - 2680.
[31] RATLIFF L J, BURDEN S A, SASTRY S S. Characterization and computation of local nash equilibria in continuous games[C]// 2013 51st Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton). IEEE, 2013:917 - 924.