

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2015.0011

刁秀永, 鲁植雄, 梅士坤, 龚佳慧, 钟文军. 拖拉机线控液压转向系统的联合仿真[J]. 农业现代化研究, 2015, 36(2): 315-320.

Diao X Y, Lu Z X, Mei S K, Gong J H, Zhong W J. Co-simulation on hydraulic steer-by-wire system of tractor[J]. Research of Agricultural Modernization, 2015, 36(2): 315-320.

拖拉机线控液压转向系统的联合仿真

刁秀永, 鲁植雄*, 梅士坤, 龚佳慧, 钟文军

(南京农业大学工学院/江苏智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031)

摘要:随着农业机械的智能化、自动化程度不断提高,线控转向技术在拖拉机等农用车辆上的应用得到了重视和研究,为了指导拖拉机线控液压转向的研究,缩短开发周期。本文在分析线控液压转向系统的控制算法与结构的基础上,建立其联合仿真模型。基于 AMESim 软件平台建立液压系统模型,以及整车模型;利用 Simulink 分别建立模糊免疫 PID、模糊 PID、常规 PID 的控制器模型,通过 Visual C++ 6.0 实现接口通讯,完成了传动比为 1 时的转角响应、转角跟随的联合仿真,以及在拖拉机车速 15 km/h,方向盘转角 180°,传动比为 9 时的横摆角速度响应、质心侧偏角响应等联合仿真。模糊免疫 PID 控制可以获得 0.272 s 的阶跃响应时间、1.182°的跟随误差、3%的横摆角速度响应超调量、0.85 %/s 的质心侧偏角响应稳态值,均优于常规 PID 与模糊 PID。联合仿真具有较强的参考价值,模糊免疫 PID 控制应用于线控液压转向系统可以获得理想的控制效果。

关键词: 液压转向;线控转向;控制算法;联合仿真;AMESim/Simulink

中图分类号: S219.032.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275(2015)02-0315-06

Co-simulation on hydraulic steer-by-wire system of tractor

DIAO Xiu-yong, LU Zhi-xiong, MEI Shi-kun, GONG Jia-hui, ZHONG Wen-jun

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University / Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: Along with the intelligence and automation improving in agricultural machinery, the application of steering-by-wire technology in agricultural vehicles such as tractors has received concerns and researches. In order to guide the study of hydraulic steering-by-wire of tractor and to shorten the development cycle, a co-simulation model was built based on the analysis of hydraulic steering-by-wire system control algorithm and structure. The hydraulic system and full vehicle model were built on AMESim software platform. Meantime, PID, fuzzy PID and fuzzy immune PID control modeling were constructed by using Simulink software. While Visual C++ 6.0 was chosen to realize interface communication, the angle response and angle following co-simulation were completed with angle transmission ratio 1; as well as the co-simulation of yawing angular velocity response and centroid side-slip angle response under the speed of 15 km/h, the steering wheel Angle 180°, angle transmission ratio 9. The experimental results show that step response time achieves 0.272 s with fuzzy immune PID control, following error of 1.182°, 3% overshoot amount of the yawing angular velocity response, and 0.85°/s steady-state value of centroid side-slip angle response, they both prevail over the performance of common PID and fuzzy PID. In conclusion, co-simulation maintains a strong reference value, and an ideal control effect is able to achieve while fuzzy immune PID control are applied into hydraulic steering-by-wire system.

Key words: hydraulic steering; steer-by-wire; control strategy; co-simulation; AMESim/Simulink

线控转向技术(steer-by-wire, SBW)通过取消转向盘与转向车轮间的机械部分,将转向系统的硬件结构划分为转向盘模块与前轮转向模块两部分。目前研究的线控转向系统的转向动力多为电机,研究的重点主要包括路感电机的控制,变传动比,控制算法,以及容错控制方法等^[1-4]。SBW 技术是汽车底盘线控技术的重要组成,更是汽车无人驾驶技术实现的关键技术。由于相关法规的规定,线控转向技术

尚未投入生产,但许多高校开发了台架或实车实验平台,国内的如吉林大学基于某款紧凑型掀背车改装的 SBW 实验车^[5],吉林大学搭建的装载机线控液压转向实验台^[6],同济大学的“春辉三号”等。国外的如卡特彼勒公司资助美国伊利诺斯州大学研究了 SBW 技术,而澳大利亚昆士兰大学则对 SBW 的硬件在环实验进行了研究。也有部分厂家开发了配有线控转向的概念车,如奔驰的概念车 F400Carving,

基金项目:江苏省科技支撑计划资金项目(BE2012384);江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2010055)。

作者简介:刁秀永(1990-),男,江苏淮安人,硕士研究生,Email: dxyfsc@163.com;通讯作者:鲁植雄(1962-),男,湖北武穴人,教授,博士生导师,Email: luzx@njau.edu.cn。

收稿日期:2014-10-06,修回日期:2015-01-17

宝马的 Z22 概念车等^[7]。

线控液压转向(hydraulic steer-by-wire, HSBW)是以液压缸取代电机作为转向执行部件的线控转向技术。目前国内外的研究大多针对以电机为转向执行部件的 SBW 技术,虽然对 SBW 的许多研究结论可以直接应用到 HSBW 中,但其采取的仿真平台与搭建的实验台架或实验样车都不包含液压模块,不能准确有效的研究 HSBW。同时目前线控转向技术的研究对象多为乘用车,对拖拉机等农用车辆的研究较少,吕安涛等^[8]研究了拖拉机自动转向的最优控制方法。因此,本文针对 HSBW 特点,借鉴对 SBW 技术的研究方法,提出了基于 Simulink/AMESim 软件的联合仿真,分别建立 HSBW 的不同模块,研究不同的控制算法,为寻求 HSBW 最优的控制算法提供参照。

1 建立联合仿真模型

为了缩短研发周期与缩减研发经费,基于各类专业软件的仿真技术得到了广泛的应用,同时计算机技术与软件之间接口技术的发展,拓宽了联合仿真技术的应用范围,使仿真结果更准确更具可靠性,以指导研究^[9-11]。针对线控液压转向系统(图 1),为了缩短研发时间和对比控制算法优劣,基于 AMESim/Simulink 建立了其联合仿真模型。

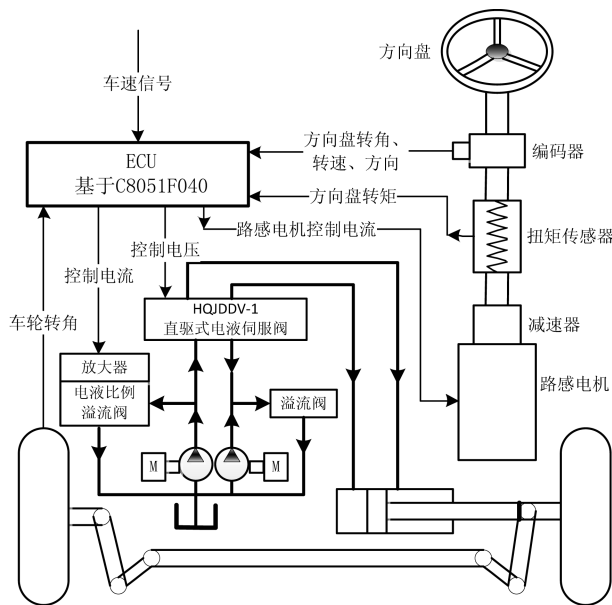


图 1 线控液压转向系统结构图

Fig. 1 The structure diagram of HSBW system

1.1 液压系统模型

油泵是液压转向中的重要动力部件,其额定压力、排量、容积效率等技术参数是转向性能最直接的决定因素。针对研究的拖拉机,选用了 CBN-E310H

型转向油泵。

为了获得对转向轮转向与转速的精确稳定的控制,选用了 HQJDDV 型直驱式电液伺服阀,该伺服阀本身就是典型的电液伺服位置系统,其阀芯位移能稳定、准确、快速地跟随指令信号(电压或电流)正比例的运动。忽略永磁式动圈力马达在工作中线圈发热的问题,以及电磁铁磁滞的影响,根据载流导线在磁场中的受力公式,在只考虑动圈,及其带动的部件质量,而忽略这些部件上的液压力与干扰力的影响^[12],可以得到阀芯位移输出对输入电压的传递函数:

$$\frac{X}{U} = \frac{K_F}{(A+B+C)} \quad (1)$$

其中: $A=(mR+mr+LbK_F)S^2$

$$B=(mR+K_S K_F+K_S K_E)S$$

$$C=LmK_F S^3$$

式中: X 为阀芯位移, U 为输入电压, K_F 为动圈力马达的电流力增益, R 为动圈电阻, L 为动圈电感, m 为动圈组件质量, b 为动圈及其框架的粘性阻尼系数, K_E 为动圈速度感应反电动势常数, K_S 为支撑和纯弹性负载综合弹簧刚度。

研究台架中选用了单杆活塞非对称液压缸,根据负载流量方程、流量连续方程、液压缸负载力平衡方程作拉普拉斯变换得出液压缸输出位移对流量的传递函数^[13]:

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\frac{1}{a}}{S(\frac{S^2}{W_f^2} + \frac{2\varepsilon S}{W_f} + 1)} \quad (2)$$

其中: $W_f = \sqrt{\frac{4\beta a^2}{VM}}$

$$\varepsilon = \frac{k}{a} \sqrt{\frac{\beta M}{V}} + \frac{\delta}{4a} \sqrt{\frac{V}{\beta M}}$$

式中: Y 为液压缸位移, Q 为液压缸流量, a 为液压缸无杆腔有效工作面积, W_f 为液压固有频率, ε 为液压阻尼, β 为油缸有效体积弹性模量, δ 为活塞及负载粘性阻尼系数, k 为流量-压力系数, M 为活塞总质量, V 为总压缩容积。

位移传感器对于系统闭环控制的精度起着关键作用,选用 BWL 直线拉杆式位移传感器,输入为油缸活塞杆的位移信号,输出是电信号,其频宽比液压系统频宽高很多,可视作比例环节,输出位移对输入电压的数学模型为:

$$K_{cf} = \frac{Y}{U_{fc}} \quad (3)$$

式中: K_{cf} 为位移传感器增益, U_{fc} 为反馈电压。

为了实现主油路的压力可调,在主油路中装有电液比例溢流阀,配有蓄能器,以保证主油路压力的稳定,但电液比例溢流阀在压力很小的时候有一个死区,这个死区的压力是不能线性可调的,为此在回油路也装有溢流阀并配有油泵,起背压作用以避免死区^[14]。

根据液压油路的组成在 AMESim 中建立油路模型,并根据油路零部件选型,修改相关参数。液压油路中主要采集两个信号,一是主油路油压用以实现对电液比例溢流阀的闭环控制,二是转向油缸活塞位移,并经过换算后结合整车模型中测得的前轮转角信号,实现对前轮转角的闭环控制。AMESim 中的油路模型(图 2),伺服阀的电压控制信号与溢流阀的电流控制信号是其输入信号。

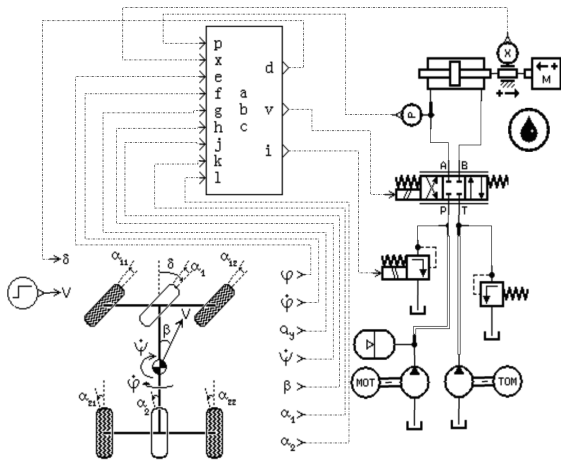


图 2 液压系统模型
Fig. 2 The model of HSBW system

1.2 整车模型

与汽车相比,拖拉机没有悬架系统,机械结构较为简单,除轮胎、液压转向管路外,其余均可以看作

是刚体,不考虑其变形。采用 AMESim 自带的整车模型(图 2)。由于拖拉机所附说明书提供的参数较少,为了获得相关参数,通过实测各主要部件的尺寸,在 CATIA 中建立拖拉机各部件并装配,并通过实车的材料赋予对应零部件的材料属性,然后测得所需的参数。获得拖拉机的模型参数(表 1),质心到前后轴距离是在拖拉机未挂载任何农机具的情况下测得。

表 1 拖拉机模型参数
Table 1 The parameters of the tractor

名称	数值
整车质量(kg)	3260
质心高度(mm)	763
质心至前/后轴距离(mm)	1022/1284
前/后轮距(mm)	1730/1650
前/后轮型号	11.2-28/13.6-38
车速范围(km/h)	2.19-32.83

1.3 控制算法模型

1) 常规 PID 控制算法

常规 PID 控制算法凭借其强鲁棒性、高可靠性、结构简单等优点,在控制领域的许多方面得到了实际应用和验证。模型预测控制的发展要求底层 PID 控制器有良好的整定,而飞速发展的微电子技术进一步推动了 PID 自动整定技术的发展^[15]。针对本文研究的线控液压转向系统的前轮转角的单目标控制,及常规 PID 固有的优点,可优先考虑常规 PID 控制。前轮转角控制采用 PID 控制(图 3),输入输出信号分别为方向盘转角与前轮转角,反馈信号为前轮转角与角传动比的乘积。选用的电液伺服阀其输出流量与控制电压是线性关系,根据液压缸结构参数与伺服阀的输出特性确定其控制电压,并由控制器计算处理获得目标的控制电压,以实现转向轮的转角控制。

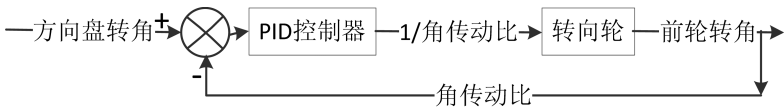


图 3 HSBW 系统常规 PID 控制框图
Fig. 3 The control block diagram of PID for HSBW system

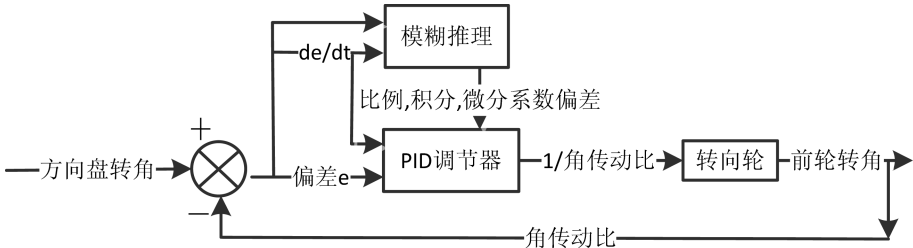


图 4 HSBW 系统模糊 PID 控制框图
Fig. 4 The control block diagram of Fuzzy PID for HSBW system

2) 模糊 PID 控制算法

常规 PID 控制器对于简单线性系统可以获得很好的控制效果,但线控液压转向系统由于液压油路及液压元件的存在,是一个非线性的高阶系统,具有时滞时变特性,而且很难获得精确的数学模型,常规 PID 控制器难以获得有效控制,因此在常规 PID 控制中引入模糊控制(图 4),称为模糊 PID 控制。模糊控制是基于专家经验,因而其不依赖于被控对象的数学模型,而是通过建立模糊规则、模糊推理、解模糊化三步来实现对 PID 控制器的比例、积分、微分参数整定优化,对于线控液压转向系统的非线性具有更好地适应性,以获得更好的控制效果^[16]。

模糊控制器的输入输出变量的隶属函数均采用高斯函数。偏差(e)和偏差变化率(ec)的模糊域均取 $[-1.2, 1.2]$,模糊控制的输出变量比例(k_p)与微分 k_d 的模糊论域均取 $[-2, 2]$,积分 k_i 则取 $[-0.8, 0.8]$,分别定义七个模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。根据经验及参数的作用与相互作用,建立 k_p 的模糊控制规则(表 2),其余不再给出。

表 2 k_p 的模糊规则表

Table 2 Fuzzy rule of k_p

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

3) 模糊免疫 PID 控制算法

生物体的免疫应答机制是生物体维持免疫平衡的重要手段,免疫应答的自我调节功能对控制器设计具有重要的借鉴作用。免疫反馈 PID 控制器是借鉴生物免疫系统的反馈机理而设计的一种非线性控制器,系统具有记忆、学习和自适应调整能力,在处理动态变化环境中起主要作用,且在线控转向系统的前轮转角控制中得到了应用^[17]。免疫控制与常规 PID 控制在控制系统的输入、输出、误差等方面存在着一系列差异(表 3)。

表 3 免疫控制与常规 PID 控制器比较

Table 3 The compare between fuzzy immune PID and common PID

项目	免疫控制	常规 PID 控制
输入	繁殖的第 k 代抗体抗原	离散采样系统的第 k 个采样时刻
误差	$\varepsilon(k)$ 第 k 代的抗原浓度	$E(k)$ 第 k 个采样时刻给定值的误差
输出	$S(k)$ 第 k 代的 B 细胞接受的总刺激	$u(k)$ 第 k 个采样时刻的控制器

基于免疫系统的反馈调整原理的免疫 PID 控制器在控制液压伺服系统方面,即使系统存在大扰动,以及系统特性发生变化后,仍可以获得很好的控制效果^[18]。为进一步提高控制器对 HSBW 系统的自适应能力,因此将免疫反馈引入模糊 PID 控制中(图 5)。

制效果^[18]。为进一步提高控制器对 HSBW 系统的自适应能力,因此将免疫反馈引入模糊 PID 控制中(图 5)。

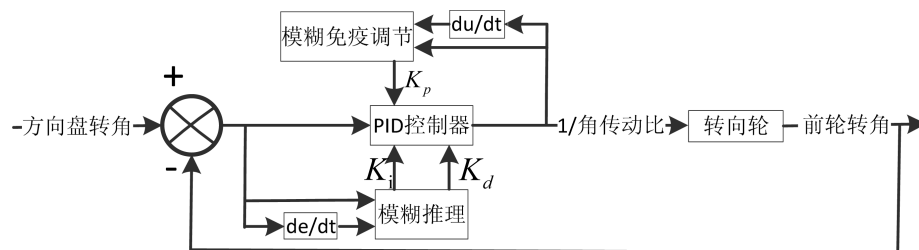


图 5 HSBW 系统模糊免疫 PID 控制器框图

Fig. 5 The control block diagram of Fuzzy immune PID for HSBW system

1.4 联合仿真模型

分别在 Simulink 中建立三种控制器与 AMESim 的联合仿真模型(图 6),仿真中分别设置控制为常规 PID、模糊 PID、模糊免疫 PID 控制器。通过 AMESim/Simulink Standard Interface 进行数据交换^[19],以实现联合建模与仿真。AMESim 模型在 Simulink 环境中以 S 函数的形式存在。为了完成仿真还需安

装 Visual C++ 6.0 软件,具体参考文献^[19]。

2 联合仿真结果与分析

评价控制算法优劣的指标选取转向轮转角控制效果,以及横摆角速度与质心侧偏角响应。当忽略转向系统中硬件执行机构的性能时,转向轮响应能力的好坏只取决于控制算法^[20]。

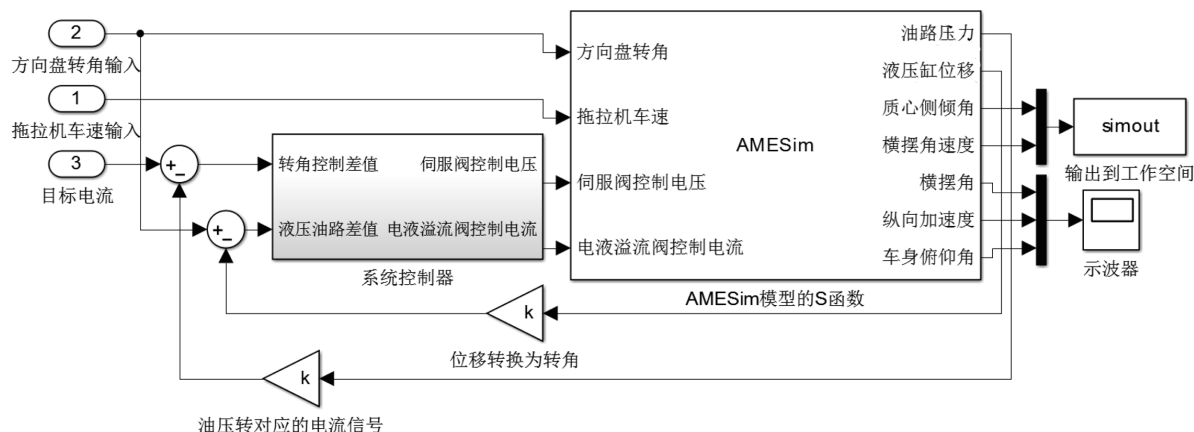


图6 HSBW系统联合仿真模型

Fig. 6 The co-simulation model of HSBW system

转向轮转角控制仿真中,设置角传动比为定值1,得到转向轮的阶跃响应与跟随响应的仿真结果。阶跃响应的仿真结果,常规PID、模糊PID、模糊免疫PID的稳定时间分别为1.75、0.750和0.272 s(图7),模糊免疫控制具有更快的响应速度和稳定时间更短。跟随响应的仿真结果三者相差较小,从局部放大图可以看出模糊免疫PID的跟随误差为 1.182° ,小于模糊PID的 1.225° ,以及常规PID的 1.323° (图8),效果最好。由于模糊PID和模糊免疫PID在控制过程中PID的参数是变动的,所以可以更好地适应动态的控制,特别是液压系统的非线性。

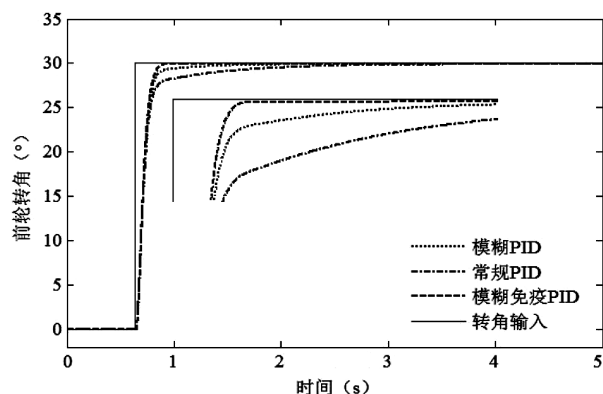


图7 车轮转角阶跃响应曲线

Fig. 7 Measuring curves of front wheel corner with step signal input

我国相关法规规定拖拉机的时速不能超过40 km/h,一般在公路或其他硬路面非作业时可以达到此速度,拖拉机田间作业时的车速普遍不高,一般为1.8~10.8 km/h^[21]。本文研究的拖拉机车速范围为2.19~32.83 km/h,所以选择仿真车速为15 km/h。

当方向盘转角为 180° ,角传动比为9时,横摆角速度瞬态响应中常规PID控制超调量最大,为10.3%,模糊PID与模糊免疫PID相差不大,分别为

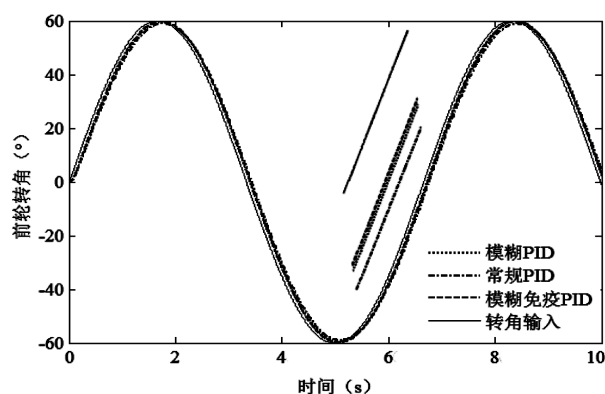


图8 车轮转角跟随响应曲线

Fig. 8 Measuring curves of front wheel corner with sin signal input

5.3%与3%(图9);同时模糊免疫PID的上升时间与稳定时间分别为1.614 s和5.626 s,均小于常规PID与模糊PID,可以获得更好地控制效果。

质心侧偏角的瞬态响应中模糊免疫PID可以获得最小的质心侧偏角,约为 $0.85^\circ/\text{s}$,小于常规PID的 $3.65^\circ/\text{s}$ 和模糊PID的 $1.55^\circ/\text{s}$ (图10),拖拉机转向更稳定。同时在质心侧偏角的响应过程中,模糊免疫PID的超调量与响应时间均为最小值。由上可知

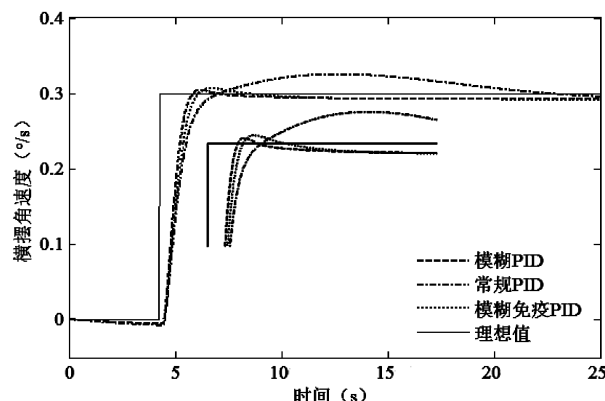


图9 横摆角速度响应曲线

Fig. 9 Step response curves of yaw rate

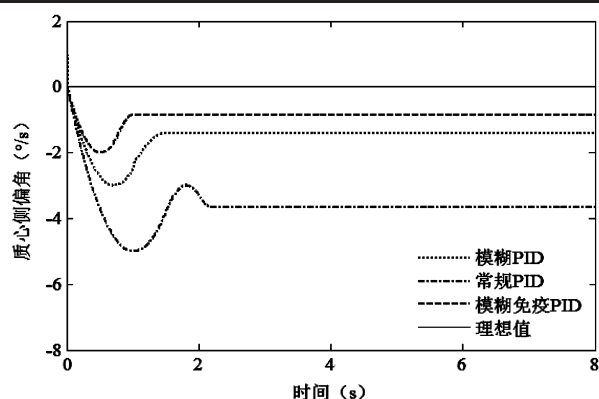


图 10 质心侧偏角响应曲线

Fig. 10 Step response curves of steady slip angle gain

模糊免疫 PID 可以获得最优的控制效果。

3 结论

模糊免疫 PID 控制器不仅具有常规 PID 控制器不依赖于对象模型,控制结构简单,可靠性高,易于实现等优点,而且克服了常规 PID 控制器对线控液压转向系统强干扰,及其高度非线性和不确定性等调节随动性差的缺点,大大改善了控制器的性能,对 HSBW 可以获得更优的控制效果。

基于 Simulink/AMESim 建立了包含整车模型的线控液压转向系统模型,仿真得到了转向轮转角阶跃响应、跟随响应,以及在车速 15 km/h 时,方向盘转角 180°, 传动比为 9 时的车辆横摆角速度响应,以及质心侧偏角响应。对于研究 HSBW 系统的控制算法,具有一定可信度和参考价值。

参考文献:

- [1] 杨胜兵. 线控转向系统控制策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [2] Jae S, Fuminori O, Tae K. Model-based fault detection and isolation in steer-by-wire vehicle using sliding mode observer[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(8): 1991-1999.
- [3] 田承伟. 线控转向汽车容错控制方法研究[D]. 长春: 吉林大学,

2010.

- [4] 于蕾艳, 林逸, 施国标. 线控转向系统的角传动比研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 191-194.
- [5] 王祥. 汽车线控转向系统双向控制及变传动比特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [6] 王同建. 装载机线控转向技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [7] 于蕾艳, 林逸, 施国标. 汽车线控转向技术概述[J]. 农业装备与车辆工程, 2007, 35(3): 3-6.
- [8] 吕安涛, 宋正河, 毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 116-120.
- [9] 谷娜. 基于 AMESim 和 Simulink 的汽车电动助力转向系统的联合仿真[D]. 成都: 西华大学, 2008.
- [10] Xie F, Wang J, Wang Y. Modeling and Co-simulation Based on AMESim and Simulink for Light Passenger Car with Dual State CVT[J]. Procedia Engineering, 2011, 16: 363-368.
- [11] Xu M, Ni J, Chen G J. Co-simulation of Energy regulation based variable-speed electrohydraulic drive[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 1103-1109.
- [12] 满珍. 并联型先导控制电液伺服阀的数学模型及控制算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [13] 郝前华, 何清华, 贺继林. 非对称液压缸的动态特性仿真研究[J]. 广西大学学报, 2010, 35(6): 985-989.
- [14] 常江雪. 拖拉机线控液压转向系统的转向控制策略研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [15] 杨智, 朱海锋, 黄以华. PID 控制器设计与参数整定方法综述[J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(5): 1-7.
- [16] 赵苗苗. 基于模糊 PID 的线控液压转向系统路感控制研究与实现[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [17] 曹庆梅, 谭光兴, 高远, 等. 基于模糊免疫 PID 的前轮线控转向系统控制策略[J]. 广西科技大学学报, 2014, 25(1): 88-93.
- [18] 张健民. 免疫 PID 在液压位置伺服系统中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(1): 1-5.
- [19] 江玲玲, 张俊俊. 基于 AMESim 与 Matlab/Simulink 联合仿真技术的接口与应用研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(1): 148-149.
- [20] 姚江云, 孔峰, 吴方园. 基于变传动比的线控转向轮转角控制[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(8): 2108-2112.
- [21] 韩科立, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 基于最优控制的导航拖拉机速度与航向联合控制方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 165-170.

(责任编辑: 童成立)