doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.007

拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验*

张闻宇　丁幼春　廖庆喜　段　涛
（华中农业大学工学院，武汉 430070）

摘要：2BFQ－6 型油菜精量联合直播机田间自动对行作业时，东方红－LX854 型拖拉机为其配套动力，实现导航功能，针对导航执行机构——电控全液压转向系统导航作业时转向控制稳定性和准确性差的问题，设计了自适应变论域模糊控制器。应用旋升优选法对模糊控制器参数仿真分析，获得了不同波形、幅值和周期激励信号下的最优参数组合，运用窗口 Fourier 变换和自卷积法设计了响应类型的实时识别方法，依据识别的结果和仿真寻优获得的参数优化基础模糊器规则的论域。在拖拉机电控全液压转向系统上试验结果表明：变论域模糊控制器对转向 20°的阶跃响应的调节时间为 2 s，平均稳态误差为 0.18°，无稳态振荡现象；跟踪正弦信号平均延时为 0.3 s；与定论域模糊控制器相比获得了更好的转向性能。

关键词：拖拉机　油菜直播机　导航　液压转向系统　变论域模糊控制
中图分类号：S219.1；TP273^{+}.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2015)03-0043-08

Variable Universe Fuzzy Controller for Tractor Hydraulic Steering

Zhang Wenyu　Ding Youchun　Liao Qingxi　Duan Tao
(*College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: Variable universe fuzzy controller was designed for guaranteeing the quality of full hydraulic steering control on Dongfanghong－LX854 tractor. The basis fuzzy controller was designed according to the characteristics of the system. The optimal basis fuzzy control parameters under different waveforms and amplitude excitation signals were obtained by using rotation up optimization method in Simulink software. The adaptive fuzzy controller parameter turning changed the system to be an optimal control system by adjusting the universe in the basis fuzzy controller according to simulation results. The windowed Fourier transform and self-convolution were used to design online identification system. The experiment results on the Dongfanghong－LX854 tractor indicated that the variable universe fuzzy controller was better than the invariable universe fuzzy controller. The measured 20° step response indicated that the regulation time was 2 s, the largest steady error was 0.18°, and the response without steady state oscillation. The measured sine response showed that the average delay was 0.3 s. The variable universe fuzzy control system lays a foundation for 2BFQ－6 precision planter navigation.

Key words: Tractor　Rape planter　Navigation　Hydraulic steering system　Variable universe fuzzy control

引言

农机智能导航是现代化农业的重要研究方向之一。稳定精准的农田导航作业能最大限度地利用田块资源，同时使农作物规整，对耕作、管理和收获的机械化具有重要意义[1－2]。国内外研究者对农机导航系统进行了大量研究[3－10]。农机导航研究主要集中在路径定位以及跟踪控制方法等方面，对转向

收稿日期：2014－11－03　修回日期：2014－12－15
*国家油菜产业技术体系专项资助项目(CARS－13)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013PY033)
作者简介：张闻宇，博士生，主要从事自动控制、油菜直播机导航研究，E-mail：zhangwy@webmail.hzau.edu.cn
通讯作者：丁幼春，副教授，主要从事自动控制、测试、视觉导航研究，E-mail：kingbug163@163.com

控制方面的研究较少。

转向机构控制系统是农机导航系统的关键执行环节,转向控制的性能对导航精度以及稳定性有直接影响。Nam 等[11]依据系统模型设计的 P(Proportion)控制算法电动机转向系统,获得很好的控制性能,其转向系统结构为电动机直接控制前轮转向,但该方法用于复杂非线性高延时的拖拉机液压转向系统[12]并不能获得良好的控制性能;吴晓鹏等[13]和赵建东等[14]设计了 PD(Proportion differentiation)控制器实现拖拉机前轮转角控制,增加了死区控制算法,提高了稳定性,但稳态时存在振荡现象;常江雪等[15]设计了拖拉机模糊线控液压转向系统,对该系统进行了仿真试验,获得比 PID(Proportion integration differentiation)控制更好的控制性能,然而模糊控制精确性和适应性的提高需要增密模糊变量的细分度,相应的控制规则以几何级数增加,在线优化较困难。

针对拖拉机导航系统执行机构的稳定性和准确性差的问题,本文将基于仿真优化和实时识别的变论域模糊控制方法应用于电控全液压转向控制器设计。并在改装的东方红-LX854 型拖拉机的电控全液压转向系统上进行控制器性能试验。

1 转向控制系统结构

以东方红-LX854 型拖拉机为对象,对其转向系统进行改装,构建并联全液压阀转向控制系统。该系统由液压转向机构、步进电动机驱动装置和控制单元组成。液压转向机构是在拖拉机原有 BZZ1-100 型转向阀系统上并联 1 个由步进电动机控制的 BZZ-80 型转向阀,2 个转向阀均可控制转向油缸,由电磁阀切换,形成手动与电控两用液压转向机构;步进电动机驱动装置由步进电动机及其驱动控制器构成;控制单元由 TPC6000-6100T 型工控机、NI-USB-6216 型多功能数据卡、变论域模糊控制器和 DWQT-BZ-V-60-G 型角度传感器等构成。转向控制系统结构如图 1 所示。图中,θ 为输入角度;θ_o 为实时角度;θ_o' 为传入模糊参数整定器的角度;w 为输出带有方向的转速。

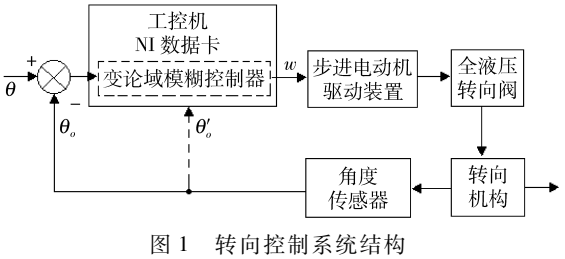

图 1 转向控制系统结构

Fig. 1 Steering control system

2 变论域模糊控制器设计

变论域模糊控制器由基础模糊控制器与自适应模糊参数整定器组成,该控制器由 C++程序实现。自适应模糊参数整定器通过对误差数据进行响应类型识别,根据识别结果调节基础模糊控制器 K_e、K_{ec} 和 K_o 这 3 个参数:K_e 为控制器误差输入量的系数;K_{ec} 为控制器误差变化率输入量的系数;K_o 为控制器电动机转速输出量的系数。通过调节上述系数调整模糊规则的论域从而改变模糊控制规则,使其能适应不同响应状态。变论域模糊控制器结构如图 2 所示。

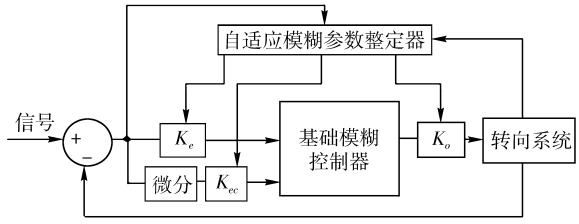

图 2 变论域模糊控制器结构

Fig. 2 Variable universe fuzzy controller

2.1 基础模糊控制器设计

变论域模糊控制器中的基础模糊控制器的输入变量为拖拉机前轮的实测角度与系统输入角度之间的误差 e 和误差的变化率 e_c,输出变量为步进电动机带有方向的转速 w。根据试验中 e、e_c 的分布云图规律,误差 e 的基本论域设为 $E_f=[-4,4]$,e 的模糊子集为{NB, NS, NSS, ZO, PSS, PS, PB},e 的论域比例系数为 K_e;误差变化率 e_c 由误差 e 在 0.1 s 内的变化值计算获得,e_c 的基本论域设为 $E_{C_f}=[-1.6,1.6]$,e_c 的模糊子集为{NB, NS, NSS, ZO, PSS, PS, PB},e_c 的论域比例系数为 K_{ec};输出 w 的基本论域设为 $W_f=[-60,60]$,w 的模糊子集为{NBB, NB, NM, NS, NSS, ZO, PSS, PS, PM, PB, PBB},w 的论域比例系数为 K_o。

模糊控制器采用三角型隶属函数构建。根据转向控制精度和运算量的要求,隶属子集分布方式为:接近中值的密集,远离中值的稀疏。根据人工转向经验和模糊控制器常规方法制定初步规则[16-18]。使用初步规则在拖拉机转向系统上进行了前期试验。在试验数据基础上,对初步规则进行必要调整,调整死区的大小范围以提高稳定性;误差 e 较小时,提高了误差变化率 e_c 对系统输出 w 的影响以减小超调量加速收敛。制定误差 e、误差变化率 e_c 和转速 w 的模糊控制规则(表 1),由该推理规则依据 Mamdani 模糊推理方法可以形成二维查询表[19-20],依据输入可以查询出电动机转速 w。

表 1　w 模糊控制规则

Tab. 1　w fuzzy control rules parameters

e	e_c						
	NB	NS	NSS	ZO	PSS	PS	PB
NB	NBB	NBB	NB	NB	NB	NM	NM
NS	NB	NM	NM	NM	NS	ZO	ZO
NSS	NB	NM	NS	ZO	ZO	PSS	PSS
ZO	NSS	NSS	ZO	ZO	ZO	PSS	PSS
PSS	NSS	NSS	ZO	ZO	PS	PM	PB
PS	ZO	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PB	PM	PM	PB	PB	PB	PBB	PBB

2.2　转向控制系统仿真模型

2.2.1　液压阀转向系统逆辨识

模糊控制器参数的整定需要仿真优化数据作为基础，仿真优化分析则需要系统传递函数模型。由于转向系统结构复杂且受地面、液压以及轮胎等众多因素影响，相关学者从动力学角度直接建立液压转向系统的仿真模型，取得了很好的效果[12]。但该方法需要对整个系统各部件进行全面测试分析获取参数建模，难度较大。从现有测试手段出发，通过获得该系统阶跃响应，进而逆推系统的近似传递函数模型也是一种可行方法。

本文运用阶跃响应面积辨识法对传递函数进行求解，转向系统的近似传递模型通常使用二阶传递函数模型表示。系统的微分方程与传递函数存在着对应关系，通过阶跃响应面积能够计算微分方程的系数 a_1、a_2，从而导出系统近似传递函数系数。

$$a_1 = \int_0^{\infty} (1 - y(t))\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$a_2 = \int_0^{\infty} \left[\int_0^{t} (1 - y(t))\,\mathrm{d}t - a_1 y(t) \right] \mathrm{d}t \tag{2}$$

式中　$y(t)$——阶跃响应函数

系统辨识二阶传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} \tag{3}$$

本文通过给予电动机阶跃转角信号，再实测东方红-LX854 型拖拉机前轮响应的转动角度获得阶跃响应数据 y，然后依据式(1)、式(2)和式(3)求得全液压转向系统的二阶传递函数

$$G(s) = \frac{1}{0.024\,25 s^2 + 0.375\,1 s + 1} \tag{4}$$

2.2.2　转向控制系统 Simulink 仿真模型建立

根据基础模糊控制器控制关系查询表和传递函数(式(4))，建立模糊控制仿真模型。用于仿真优化分析，优化模糊控制器的 K_e、K_{ec}、K_o3 个参数。

使用模糊控制查询表构建仿真模型比相关文献中直接使用模糊推理模块具有更快的仿真速度[15]，同时更接近实际控制程序中基于查询表的模糊控制方法。模型将误差 e 和误差变化率 e_c 传入模糊控制关系查询表，获得电动机转速控制参数 w。w 经过一个积分环节可获得电动机转动的角度。将角度输入传递函数后，经过延时环节和比例环节后得到前轮转角的仿真值。建立的 Matlab/Simulink 仿真模型如图 3 所示。图中，seta 为期望角度信号；Out1 为拖拉机前轮转角；Gain 为比例环节；Quantizer 为阶梯量化环节；Saturation 为限幅宽环节；fuzzy - 2D Lookup Table 为模糊曲面二维查询表；Derivative 为微分环节；Integrator 为积分环节；Transfer Fcn 为系统传递函数；Transport Delay 为延时环节。

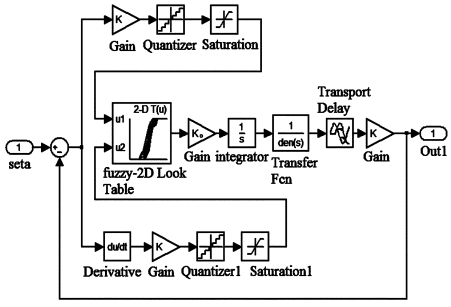

图 3　全液压转向系统模糊控制仿真模型

Fig. 3　Fuzzy control simulation model of full hydraulic steering system

2.2.3　仿真模型验证

在改装的东方红 LX - 854 型拖拉机电控全液压转向试验平台上进行仿真模型验证试验。步骤为：

(1) 将幅值为 4°阶跃信号输入由基础模糊控制器组建的转向反馈系统中，所设参数与仿真模型相同，控制前轮转向。

(2) DWQT - BZ - V - 60 - G 型传感器收集拖拉机前轮实际转角数据，采样频率为 5 000 Hz，每 500 个原始数据求平均值获得转向数据。

(3) 将所得数据结果与仿真模型的 4°阶跃响应结果数据进行对比分析，如图 4 所示。

系统调节时间基本相同为 1.7 s，上升时间相差

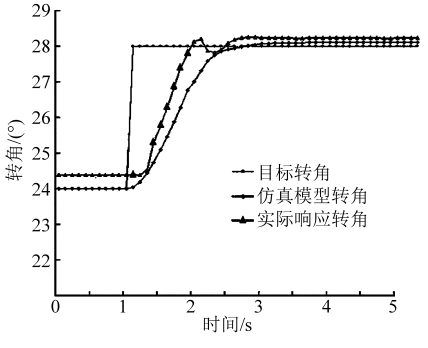

图 4　试验与仿真模型对比图

Fig. 4　Experiments and simulation results

0.4 s,稳态误差小于 4%,稳态误差和调整时间的差异与动力学模型的差异水平接近[12]。满足仿真优化分析的要求。

2.3 自适应模糊参数整定器设计

"可变论域"的模糊控制思想是在不增加模糊变量分度的前提下,使用论域的伸缩改变控制规则,以提高模糊控制适应性和准确性。模糊控制器的 K_e、K_{ec}和 K_o为论域的伸缩参数(式(5))。E_f'、$E_{C_f'}$和 W_f'为变系数的论域,从而影响系统的响应性能[21-22]。当前误差 e 调整模糊控制规则论域的方法针对性差和抗干扰能力较弱,所以本文依据时间窗口误差数据的实时识别结果调整控制器论域

$$\begin{cases} E_f' = [-4/K_e, 4/K_e] \\ E_{C_f'} = [-1.6/K_{ec}, 1.6/K_{ec}] \\ W_f' = [-60K_o, 60K_o] \end{cases} \tag{5}$$

2.3.1 控制器参数仿真优化

为获得设计自适应模糊参数整定器所需的数据基础。本文使用上文建立的转向系统仿真模型进行仿真分析,仿真获得固定输入信号下不同控制参数的响应曲线数据。分析控制效果,从中寻找最优控制参数。

本文把转向跟踪响应状态分为突变响应和渐变周期响应两类,分别采用典型的方波信号和正弦信号做仿真分析。两类信号跟踪性能指标不相同:对于方波信号跟踪性能通过阶跃响应的上升时间、超调量、调整时间等标准进行综合判定;对于正弦信号跟踪性能通过平均延时、平均绝对误差和最大误差等标准进行综合判定。

由于 K_o对应电动机转速,越大则上升时间越短。但电动机转速不能无限上升,且超过额定转速力矩会有明显下降。为此,首先根据电动机情况确定 K_o为 1.2。再使用双因数优化法中的旋升法确定 K_e和 K_{ec}。此方法为:每次单因素优选时,都是将另一个因数固定在前一次优选所得最优因数的水平上。以振幅为 5°的阶跃信号为例:先选取 K_e为 1,对 K_{ec}进行 1、2、…、10 的等差遍历仿真,分别获得 10 组输出曲线数据。按照上升时间、超调量、调整时间的定义获得相应每组值的大小。结果如图 5 所示。在超调量不大于 15%、稳态误差不大于 5%前提下,寻找 K_{ec}的最优值。寻优的原则是在保证收敛的情况下上升时间尽量短,调整时间尽量短。根据原则得 $K_{ec}=4$ 时控制效果较好。再设 K_{ec}为 4,对 K_e进行 0.50、0.75、…、3.00 的等差遍历仿真,获得 11 组输出曲线数据。使用上述相同方法,获得响应曲线特征数据。

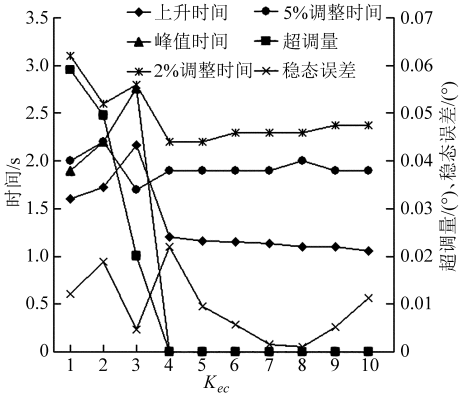

图 5 K_{ec}遍历仿真分析图

Fig. 5 K_{ec} traversal simulation analysis

K_e的遍历仿真的各项指标呈明显的凹函数形状,直接获得最优参数 $K_e=1.25$ 时控制效果较好。根据旋升法原理设 $K_e=1.25$,对 K_{ec}进行 1 至 10 的遍历仿真。分析方法同上,获得 K_{ec}最优参数依然为 4。综合上述结果,幅值为 5°的阶跃信号下,系统的最优参数为 $K_e=1.25$、$K_{ec}=4$。对于选定的阶跃响应,由以上参数决定的论域最为适合。使用相同方法对 2°、10°和 15°进行仿真寻优,结果如表 2 所示。

表 2 阶跃响应控制参数寻优结果

Tab. 2 Optimization results of step response control parameters

振幅 A/(°)	参数	
	K_e	K_{ec}
2	1.00	4
5	1.25	4
10	1.50	3
15	1.50	3

正弦信号的跟踪性能指标定为平均绝对误差和最大误差。平均绝对误差作为主要指标,其他作为辅助指标,能最好地体现跟踪性能。同样使用旋升优选法进行寻优。

对正弦信号的跟踪,信号的周期和振幅均对跟踪效果有影响。对于正弦信号周期为 $T=2\pi/\omega$,角速度 ω 取(0.50,0.75,1.00,1.25,1.50,2.00),其振幅 A 取(1°,2°,3°,4°,6°,8°)。所得结果如表 3、4。

可见不同的响应类型对应的最优模糊控制参数有较大区别。寻优结果将为自适应模糊参数整定器的设计提供数据基础。

2.3.2 信号实时识别分类方法

根据自适应参数整定器的需求设计信号实时识别方法。该方法主要运用窗口 Fourier 变换从能量角度将信号响应分为 2 类:阶跃突变信号响应,包括脉冲信号、阶跃信号等;渐变周期信号响应,包括正

弦波信号、平稳信号和三角波信号等。次级分类方法运用窗口卷积自法识别的周期，幅值确定方法较简单，为输入信号在 10 s 时间窗内最大和最小值之差。

表 3　正弦响应控制参数 K_e 寻优结果

Tab. 3　Optimization results of sine response control parameters K_e

振幅	角速度 ω/(rad·s^{-1})					
A/(°)	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00
1	1.50	2.25	1.00	1.00	1.00	1.50
2	1.50	2.00	1.00	1.00	1.50	1.50
3	2.00	1.00	1.50	1.50	1.70	
4	2.00	1.25	1.75	1.75		
6	2.25	1.25	1.75			
8	2.25	1.25				

表 4　正弦响应控制参数 K_{ec} 寻优结果

Tab. 4　Optimization results of sine response control parameters K_{ec}

振幅	角速度 ω/(rad·s^{-1})					
A/(°)	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00
1	10	10	10	9	9	10
2	9	10	10	7	9	5
3	9	9	10	7	9	
4	8	7	12	7		
6	7	6	9			
8	6	6				

提取特征需要对数据进行必要的降维处理。降维能在不损失重要信息的前提下，减少运算量，以保证分类器的实时性。对该系统输入输出降维的有效方法是使用误差 e 作为样本，既包含了输入和输出的信息，又具有物理意义，便于分析。

原始数据是频率为 10 Hz 的误差数据。本文运用滑动时间窗口获取数据源，小时间滑窗口使用 10 个数据为一组，窗大小为 1 s；大时间滑窗口使用 100 个数据为一组，窗大小为 10 s。

主要识别目标是区分信号响应为突变阶跃响应还是为渐变周期响应。原始误差数据包含噪声和随机信息，特征复杂且区别不明显，直接分类难度较大。本文的分类方法为窗口 Fourier 变换方法，步骤如下：

（1）求 1 s 时间窗内误差数据的标准差 s_e。

（2）求 10 s 时间窗内标准差数据 s_e 的离散傅里叶变换（Discrete Fourier transform，DFT），取对称数据的左半侧数据 x'。

（3）求数据 x' 的偏度 g_1（式（6）），偏度大小与阈值比较来识别控制系统处于突变阶跃响应状态还是渐变周期跟踪状态。

$$g_1 = \frac{N}{(N-1)(N-2)s'^3}\sum_{i=1}^{N}(x_i' - \bar{x}')^3 \tag{6}$$

式中　g_1——频域数据的偏度

N——频域数据个数

s——频域数据的标准差

x'——频域数据的值

$\bar{x}'$——频域数据的平均值

该处理的特点是特征值维数低，包含信号频域内的所需信息。不同类型响应误差的频域数据有明显的差异，突变阶跃响应误差的频域数据能量较为分散，而渐变周期响应误差的频域数据能量则集中在某几个频点。本分类器使用体现聚散度的偏度进行识别能够获得良好的分类效果，分类阈值依据 Matlab 仿真计算和试验识别结果定为 4.9。小于 4.9 的归为突变阶跃响应状态，反之归为渐变周期跟踪状态。由于是频域分析，使该方法对窗口内误差突变引起的能量变化反应迅速，识别及参数调整具有实时性。

由于系统误差信号存在噪声，使用波峰间距、幅频变换法求取周期误差较大。本文使用窗口自卷积法求取基周期，该方法对噪声和扰动不敏感，能够根据信号自相关值计算信号的基周期。求解步骤为：

（1）求 1 s 时间窗内误差数据一阶原点矩 $\boldsymbol{x}_E$。

（2）求 10 s 时间窗内一阶原点矩 $\boldsymbol{x}_E$ 的自卷积数据

$$h(n') = \sum_{i=-n}^{n}\boldsymbol{x}_E(i)\boldsymbol{x}_E(n'-i) = \boldsymbol{x}_E(n') * \boldsymbol{x}_E(n') \tag{7}$$

式中　n——窗口的元素个数

n'——卷积序列号

$\boldsymbol{x}_E$——误差的一阶原点矩数据

依据自卷积数据 $h(n)$ 获得中段极大值点的时间距离 T，求得信号周期（图 6）。图中，T 为所求的原信号周期。

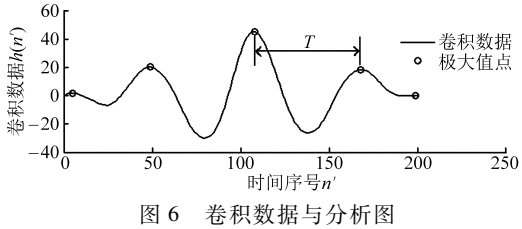

图 6　卷积数据与分析图

Fig. 6　Convolution data and analysis

2.3.3　自适应模糊参数整定器设计

整定 K_e、K_{ec} 的方法为：先对系统误差进行实时响应类型识别，再根据仿真寻优结果建立的延拓表匹配相应的模糊控制论域参数。

转向系统本身具有滞后性，同时易受到外界干

扰。为了提高系统稳定性,在系统接近稳态时对 K_o 进行进一步调整。调整 K_o 可以加速系统收敛,减小渐变信号跟踪的抖动,使跟踪曲线平滑。调整方法为:当误差减小到 ±1.5°以内,开启监视器,监视器对 1 s 时间内的误差方差 s_E 进行判别。方差 s 小于设定值 0.5,就设定 K_o 为优化值的 60%,当误差超过限定值则将 K_o 恢复优化值。综合上述工作设计出自适应模糊参数整定器结构如图 7 所示。

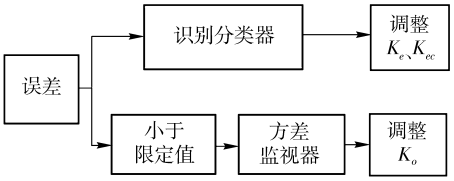

图 7 自适应模糊参数整定器结构图

Fig. 7 Adaptive fuzzy parameter tuner structure

3 转向控制器试验

为检验本文所设计的变论域模糊控制器的控制性能,在东方红-LX854 型拖拉机电控全液压转向平台(图 8)上进行原地试验。首先设计了控制性能试验,根据控制器阶跃响应和正弦响应的各项指标分析转向性能和适应性;然后设计了该控制器与定论域模糊控制器的对比试验,根据两种控制器的性能指标分析本文所设计控制器的优势。

3.1 性能试验

性能试验 1:将周期为 10 s、振幅为 10°的方波信号输入变论域模糊控制器实现前轮转向。通过角度传感器获取前轮实际转角,采样频率为5 000 Hz,每 500 个数据求平均,获得系统响应曲线(图 9a)。上文所述自适应模糊参数整定器对误差进行在线识别,所得频域偏度为 3.89 ~ 4.22,小于阈值 4.9,该响应识别为突变阶跃类型,周期识别结果为 9.7 ~ 10.4 s,振幅计算结果为 ±10°。依据上述结果,参数整定为 $K_e=1.5$,$K_{ec}=3.0$,上升期时 $K_o=1.2$,稳态期时 $K_o=0.6$。在以上参数设定下,该控制器阶跃响应调节时间为 2.0 s,无稳态振荡。平均稳态绝对误差为 0.18°,最大稳态误差为 0.44°。本文控制器

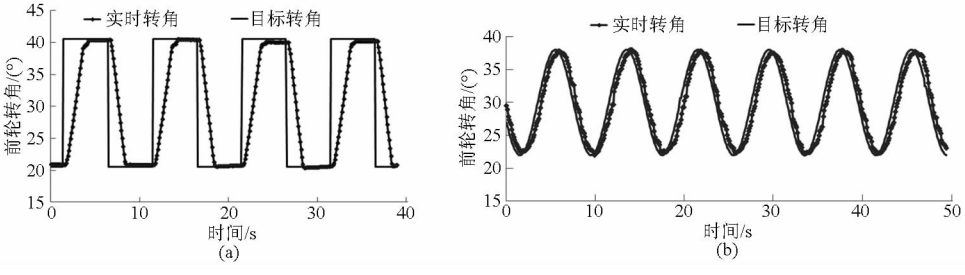

图 9 变论域模糊控制器转向试验结果

Fig. 9 Steering test of variable universe fuzzy controller

(a) 方波信号跟踪 (b) 正弦信号跟踪

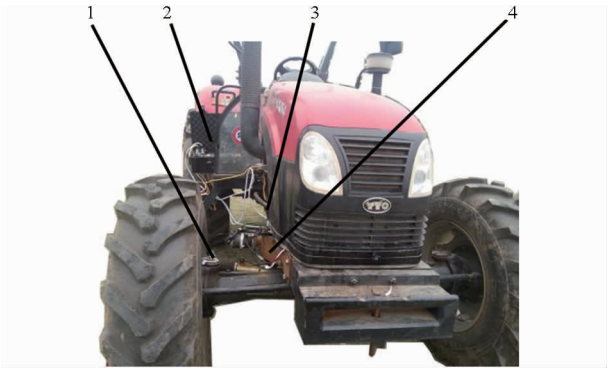

图 8 拖拉机转向试验平台

Fig. 8 Tractor steering test bench

1. 角度传感器 2. 导航控制终端 3. 改装的油路 4. 电控 BZZ-80 全液压转向阀装置

的方波响应与相关文献中使用 PD 控制的相同幅值方波响应相比平均上升时间增加 0.15 s,最大稳态误差减少 0.26°,平均稳态误差减少 0.02°,并没有出现其 PD 控制响应中存在的稳态连续振荡现象[13]。

性能试验 2:将周期为 8 s、振幅为 ±8°的正弦信号输入变论域模糊控制器实现前轮转向,获得系统响应曲线(图 9b)。在线识别的频域偏度为 6.12 ~ 6.80,大于阈值 4.9,该响应识别为渐变周期类型,周期识别结果为 7.6 ~ 8.1 s,振幅计算结果为 ±8°。参数整定结果为 $K_e=1.3$,$K_{ec}=6.4$,$K_o=1.2$。跟踪响应平均延时为 0.3 s,平均绝对误差为 1.5°(9%),最大误差为 2.9°。

3.2 对比试验

本文进行变论域模糊转向控制器与定论域模糊转向控制器控制性能对比试验。定论域模糊控制器由基础模糊控制器构成,按照常规模糊控制规则参数 K_e、K_{ec} 和 K_o 都设置为常数 1。选取具有代表性的输入信号,分别输入变论域模糊控制器与定论域模糊控制器,实现前轮转向,获得响应数据并进行时域分析。

对比试验 1:为阶跃响应性能对比试验,输入振幅为 10°的阶跃信号,2 种控制器响应曲线如图 10a

所示，性能对比结果如表 5 所示。2 种控制器的稳态误差基本相同，变论域模糊控制方法的上升时间较定论域方法缩短 0.4 s、调节时间缩短 0.9 s 且波动更小，说明变论域方法与定论域方法相比具有更好的阶跃响应性能。

对比试验 2：为正弦信号跟踪性能对比试验，输入周期为 8 s、振幅为 ±8°的正弦信号，2 种控制器响应曲线如图 10b 所示，性能对比结果表 6 所示。变论域模糊控制方法较定论域方法的平均延时减少 0.3 s、最大误差减小 1.1°、平均绝对误差减小 0.66°。说明变论域方法与定论域方法相比具有更好的准确性和适应性。

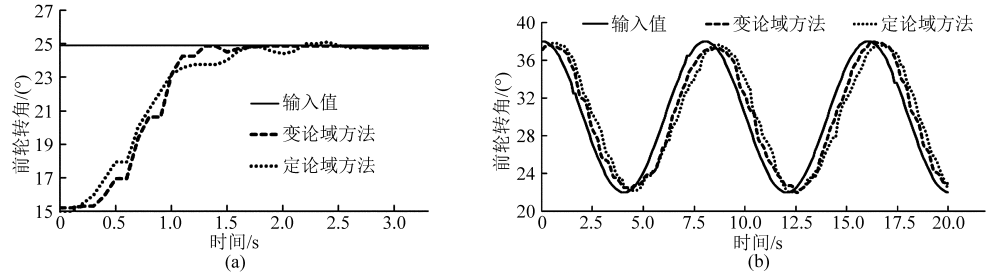

图 10　转向控制器响应曲线

Fig. 10　Steering controller curves

（a）阶跃响应　（b）正弦信号跟踪响应

表 5　阶跃响应性能对比

Tab. 5　Step response performance comparison

控制方法	稳态误差/%	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%
定论域	<2	1.0	2.6	<2
变论域	<1.5	0.6	1.7	<2

表 6　正弦信号响应性能对比

Tab. 6　Sine response performance comparison

控制方法	平均延时/s	最大误差/(°)	平均绝对误差/(°)
定论域	0.6	4.1	2.17
变论域	0.3	3.0	1.51

（3）横向对比试验：该转向系统能够跟踪的信号变化率存在上限，信号变化率过大，系统将失真无法跟踪，该现象的主要影响因素是电动机功率。为排除此因素的影响，本文在输入信号的合理变化率范围内选择了以下 3 种不同振幅、不同周期的正弦信号进行响应性能横向对比试验，分析控制器适应性。输入信号 1 的周期为 6 s、振幅为 ±4°，信号 2 的周期为 8 s、振幅为 ±8°，信号 3 的周期为 16 s、振幅为 ±15°，试验方法与对比试验 2 相同。横向对比试验结果表明（表 7），变论域方法对上述信号响应的平均延时和控制误差均小于定论域方法，对于不同变化率的输入信号变论域模糊控制器转向性能均优于定论域模糊控制器。

表 7　正弦信号响应横向对比

Tab. 7　Sine response performance lateral correlation

信号	控制方法	平均延时/s	最大误差/(°)	平均绝对误差/(°)
1	定论域	0.4	1.6	0.73
	变论域	0.3	1.2	0.61
2	定论域	0.6	4.1	2.17
	变论域	0.3	3.0	1.51
3	定论域	0.4	3.0	1.24
	变论域	0.3	2.3	1.03

4　结论

（1）为了实现油菜直播机自主导航，对配套动力东方红-LX 854 型拖拉机为平台研发的电控全液压转向系统特性进行了研究，提出了基于仿真优化和实时识别的变论域模糊控制方法。采用了旋升优选法并结合仿真分析，获得了不同波形、幅值和周期激励信号下的最优参数组合，并运用窗口 Fourier 变换和自卷积法设计了响应类型的识别方法。拖拉机前轮转向试验结果表明：变论域模糊控制转向系统，阶跃响应无稳态振荡现象，平均绝对稳态误差为 0.18°；跟踪连续正弦信号平均延时为 0.3 s；与定论域控制方法相比，变论域方法缩短了调整时间、减小了平均延时和控制误差，获得更好的适应性。

（2）该控制系统输入连续变化的信号变化率大于 10°/s 时，跟踪响应会出现明显失真。实际作业时可考虑通过增加电动机功率的方式提高电动机额定转速和转矩，从而保证系统响应速度，提升前轮转向跟踪适应性。

参　考　文　献

1　李建平，林妙玲. 自动导航技术在农业工程中的应用研究进展[J]. 农业工程学报，2006，22(9)：232 - 236.
Li Jianping, Lin Miaoling. Research progress of automatic guidance technologies applied in agricultural engineering [J].

Transactions of the CSAE, 2006,22(9):232 - 236. (in Chinese)
2 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报,2014,45(9):44 - 54.
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):44 - 54. (in Chinese)
3 张智刚,罗锡文,李俊岭. 轮式农业机械自动转向控制系统研究[J]. 农业工程学报,2005,21(11):77 - 80.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Li Junling. Automatic steering control system of wheeled model farming machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(11):77 - 80. (in Chinese)
4 陈文良,谢斌,宋正河,等. 拖拉机电控液压动力转向系统的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(10):122 - 125.
Chen Wenliang, Xie Bin, Song Zhenghe, et al. Electro-hydraulic power steering system for tractors[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(10):122 - 125. (in Chinese)
5 Saifia D, Chadli M, Karimi H R, et al. Fuzzy control for electric power steering system with assist motor current input constraints[J]. Journal of the Franklin Institute, http://dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.05.007.
6 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 - 119.
Lü Antao, Song Zhenghe, Mao Enrong. Optimized control method for tractor automatic steering[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8):116 - 119. (in Chinese)
7 丁幼春,廖庆喜,黄海东,等. 联合收获机视觉导航控制器设计[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):239 - 243.
Ding Youchun, Liao Qingxi, Huang Haidong, et al. Design of vision navigation controller for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):239 - 243. (in Chinese)
8 丁幼春,王书茂. 联合收获机视觉导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(5):137 - 142.
Ding Youchun, Wang Shumao. Vision navigation control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 137 - 142. (in Chinese)
9 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J]. 农业机械学报,2010,41(11):148 - 152.
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 148 - 152. (in Chinese)
10 李逃昌,胡静涛,高雷,等. 一种与行驶速度无关的农机路径跟踪方法[J]. 农业机械学报,2014,45(2):59 - 65.
Li Taochang, Hu Jingtao, Gao Lei, et al. Agricultural machine path tracking method irrelevant to travel speeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 59 - 65. (in Chinese)
11 Nam K, Oh S, Fujimoto H, et al. Robust yaw stability control for electric vehicles based on active front steering control through a steer-by-wire system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(7): 1169 - 1176.
12 张成涛,谭彧,吴刚,等. 谷物联合收割机电控全液压转向系统建模与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20) :11 - 17.
Zhang Chengtao, Tan Yu, Wu Gang, et al. Modeling and simulation of electronic control full hydraulic steering system for grain combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(20):11 - 17. (in Chinese)
13 吴晓鹏,赵祚喜,张智刚,等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):1 - 5.
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(Supp.):1 - 5. (in Chinese)
14 赵建东,安秋,姬长英,等. 基于东方红- SG250 拖拉机的自动转向控制系统设计[J]. 江苏农业科学,2013,41(4):349 - 351.
Zhao Jiandong, An Qiu, Ji Changying, et al. Research of electronic hydraulic steering system based on the Dongfanghong - SG250 tractor[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013,41(4):349 - 351. (in Chinese)
15 常江雪,鲁植雄,白学峰. 拖拉机新型线控液压转向系统的研究与仿真[J]. 江西农业学报,2012,24(8):105 - 108.
Chang Jiangxue, Lu Zhixiong, Bai Xuefeng. Study and simulation on new-type wire-controlled hydraulic steering system of tractor [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012,24(8):105 - 108. (in Chinese)
16 Mann G K I, Gosine R G. Three dimensional min max gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005,156(2): 300 - 323.
17 Li Taochang, Hu Jingtao, Ishak A. Adaptive sliding mode control method based on nonlinear integral sliding surface for agricultural vehicle seering control[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 965215:1 - 10.
18 Sebastian Kurczyk, Marek Pawelczyk. Fuzzy control for semi-active vehicle suspension[J]. Artificial Intelligence and Robotics Research, 2014, 32(3):217 - 226.
19 连世江,陈军,贾海政,等. 基于模糊控制的拖拉机转向跟踪控制研究[J]. 西北农林科技大学学报,2009, 37 (9): 224 - 228.
Lian Shijiang, Chen Jun, Jia Haizheng, et al. Heading-following control of tractor based on fuzzy control[J]. Journal of Northwest A&F University, 2009, 37(9):224 - 228. (in Chinese)
20 邹彦艳,吴宇轩,宋振宇,等. 基于改进遗传算法的模糊控制器设计[J]. 自动化技术与应用,2013,32(11):6 - 10.
Zou Yanyan, Wu Yuxuan, Song Zhenyu, et al. Design of fuzzy controllers based on improved genetic algorithms[J]. Control Theory and Applications, 2013,32(11):6 - 10. (in Chinese)
21 李洪兴. 模糊控制的数学本质与一类高精度模糊控制器的设计[J]. 控制理论与应用,1997,14(6):868 - 876.
Li Hongxing. To see the success of fuzzy logic from mathematical essence of fuzzy control[J]. Control Theory & Applications, 1997, 14(6): 868 - 876. (in Chinese)
22 郭海刚. 变论域自适应模糊控制的几种新方法[D]. 大连:大连理工大学,2013.
Guo Haigang. Several novel methods of variable universe adaptive fuzzy control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)