

# 基于模糊控制的拖拉机转向跟踪控制研究

连世江, 陈 军, 贾海政, 张伟华

(西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**【摘要】** 【目的】对拖拉机转向跟踪控制进行研究, 寻求提高转向跟踪控制精度的方法。【方法】以福田欧豹 4040 型拖拉机为研究对象, 以车辆航向角偏差和前轮转角为输入变量, 转向驱动电机转速为输出变量, 设计车辆转向控制模糊控制器, 并用于拖拉机航向角的控制。【结果】拖拉机以 0.53 m/s 的速度行驶时, 航向角偏差可控制在  $1^\circ$  以内; 拖拉机在 50 m 行驶距离内, 最大横向偏差为 0.16 m。【结论】所设计的控制器能够满足拖拉机转向跟踪控制的要求。

**【关键词】** 拖拉机; 模糊控制; 航向跟踪

**【中图分类号】** TP13; S219.032.3

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2009)09-0224-05

## Heading-following control of tractor based on Fuzzy control

LIAN Shi-jiang, Chen Jun, JIA Hai-zheng, ZHANG Wei-hua

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objective】The heading-following control system of FOTON-4040 tractor was studied for improving the performance of heading-following control. 【Method】A fuzzy controller was developed for steering control. The orientation deviation and steering angle of front-wheels were used as the input parameters of the controller. The output parameter of the controller was the rate of the steering motor. 【Result】The orientation error was less than  $1^\circ$  at the speed of 0.53 m/s, and the deviation of lateral offset was less than 0.16 m within the driving distance of 50 m. 【Conclusion】The designed fuzzy controller can satisfy the demand of heading-following control.

**Key words:** tractor; fuzzy control; heading-following

进入 21 世纪以来, 随着信息技术、传感器技术、控制技术和网络技术等的高速发展, 农业生产进入了自动化发展时代。农用车辆自动驾驶技术, 作为农业生产自动化、智能化的一项重要研究内容, 近年来受到人们的普遍关注。国外对农用车辆自动驾驶技术的研究相对较早, 美国、日本和欧洲一些国家对此项技术进行了深入研究<sup>[1-3]</sup>, 并已应用于生产实际中。而国内多为理论性研究, 实用研究相对较少<sup>[4-6]</sup>。根据导航系统中使用传感器的不同, 目前常用的导航方式主要有 GPS 导航、视觉导航、激光导

航、多传感器融合等。导航系统中应用的控制方法也比较多, 如经典控制理论、最优控制理论、模糊控制理论、遗传理论等<sup>[7-8]</sup>。本研究以拖拉机为对象, 利用模糊控制理论设计车辆转向控制器, 通过仿真和实车试验, 对拖拉机转向跟踪控制进行研究, 以期寻求提高转向跟踪控制精度的方法。

### 1 拖拉机控制系统的组成

以福田欧豹 4040 型拖拉机为研究对象, 在拖拉机上分别安装航向角传感器、转角传感器和速度传

\* [收稿日期] 2008-12-04

[基金项目] 西北农林科技大学青年学术骨干支持计划项目(01140301)

[作者简介] 连世江(1983—), 男, 陕西澄城人, 在读硕士, 主要从事现代农业装备技术研究。E-mail: lsj712100@163.com

[通信作者] 陈 军(1970—), 男, 宁夏固原人, 副教授, 博士, 主要从事现代农业装备技术研究。

E-mail: chenjun\_jdxy@nwsuaf.edu.cn

感器。将传感器检测到的信息通过一定的接口输入到车载计算机内,实时获取车辆当前的航向角、前轮转角及车辆速度。计算机根据检测得到的车辆状态信息进行导航决策,并将控制信息发送到转向控制电机,通过对电机转向和转动速度的控制,实现车辆的转向控制。拖拉机转向控制系统的组成结构见图 1。

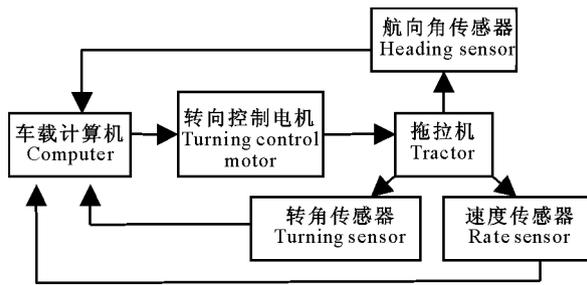


图 1 拖拉机转向控制系统组成框图

Fig. 1 Frame of tractor heading following control system

## 2 模糊控制器的设计

为了实现对车辆航向角的精确控制,满足其快速、准确、稳定的控制要求,设计出性能优越的控制器就显得尤为重要。常规控制器都是建立在被控对象的精确数学模型基础上,但是在很多情况下,被控对象的精确数学模型很难建立,一些控制参数也很难确定,加之农业生产环境的复杂性,利用传统方法对控制器进行设计难度相对较大。模糊控制,作为近代智能控制的一个重要分支,对于那些数学方程难以建立的复杂非线性问题却有着独特的优越性<sup>[9]</sup>。模糊控制系统用自然语言表达控制规则,更接近于人的思维方式和推理习惯,且不依赖于精确的数学模型,对过程参数改变不灵敏,系统稳定性、鲁棒性好,因此,本研究选用模糊控制方法设计车辆转向控制器。

### 2.1 转向跟踪控制原理

前轮转向的拖拉机在行驶过程中,转向偏差的产生主要是由前轮转角引起的,为了实现对车辆转向的精确控制,车辆当前航向角偏差和前轮转角都必须考虑在内。因此,本研究选用双输入单输出的模糊控制器。

将航向角传感器检测到的实际航向角  $\theta$  与预定航向角  $\theta_0$  进行比较,计算出航向偏差  $\Delta\theta$ ,作为模糊控制器的一个输入变量,以转角传感器检测到的前轮角  $\alpha$  作为模糊控制器的另一个输入变量,输出变量则为电机转速  $n$ 。通过电机转速信号,驱动转向

控制电机,实现拖拉机的转向控制,从而达到航向跟踪控制的目的。

但是在实际应用中,由于模糊论域的量化等级有限,当误差控制范围选择过大时,系统存在一定的静态偏差;当范围选择过小时,系统调节时间又会加长。为了解决上述问题,本研究设计了双模糊控制器,在航向偏差比较大或比较小时选用不同的控制器,从而达到减小稳态和调节时间的目的。拖拉机转向跟踪控制原理如图 2 所示;当航向偏差  $|\Delta\theta| > 5^\circ$  时,利用模糊控制器 1 对拖拉机转向进行控制;当航向偏差  $|\Delta\theta| \leq 5^\circ$  时,由模糊控制器 2 对拖拉机进行控制。

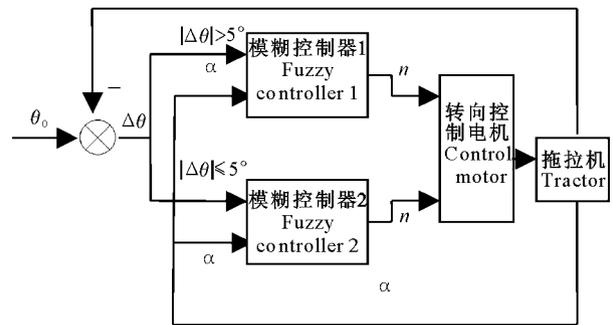


图 2 拖拉机转向跟踪控制原理图

Fig. 2 Chart of tractor heading-following control principle

### 2.2 控制器的设计

根据人类认识事物的习惯,在模糊控制器的算法中选用 7 个语言变量来描述输入输出变量,分别为正大(PB)、正中(PN)、正小(PS)、零(ZE)、负小(NS)、负中(NM)和负大(NB)。对于模糊控制器 1,航向偏差的基本论域取为  $[-30^\circ \ 30^\circ]$ ,前轮转角的基本论域取为  $[-30^\circ \ 30^\circ]$ ,电机转速论域取为  $[-2\ 400 \text{ r/min} \ 2\ 400 \text{ r/min}]$ 。对于模糊控制器 2,航向偏差的基本论域取为  $[-5^\circ \ 5^\circ]$ ,前轮转角的基本论域取为  $[-6^\circ \ 6^\circ]$ ,电机转速论域取为  $[-1\ 200 \text{ r/min} \ 1\ 200 \text{ r/min}]$ 。拖拉机的航向角和前轮转角逆时针为正,电机转速为正表示电机带动方向盘向增大前轮转角的方向转动。

本研究选用三角型隶属函数,控制规则以驾驶员的经验知识为基础,经过多次试验调整,得到模糊控制器 1 和 2 的控制规则(如表 1 所示)。

模糊推理选用 Mamdani 方法,根据控制规则进行模糊推理便可得到控制输出的模糊量,经过反模糊化将模糊量转化为精确量,计算出控制输出的精确值。反模糊化则采用输出相对平滑的重心法进行计算。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Rule table of fuzzy control

转角 $\alpha$ Turning angle $\alpha$	航向偏差 $\Delta\theta$ Heading error						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	NS
NM	PB	PM	PM	PS	PS	NS	NM
NS	PB	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NB
PM	PM	PS	NS	NS	NM	NM	NB
PB	PS	NS	NS	NM	NM	NB	NB

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \cos \theta, \\ \frac{dy}{dt} = V \sin \theta, \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{V}{L} \tan \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

式中： $x, y$  为拖拉机后轮轴中心点的坐标(m)； $t$  为拖拉机行驶时间(s)； $\theta$  为拖拉机的航向角(rad)； $\alpha$  为拖拉机的前轮转角(rad)； $V$  为拖拉机的速度(m/s)； $L$  为拖拉机前后轮的轴距(m)。

### 3 航向跟踪控制仿真

#### 3.1 车辆运动模型

在车辆自动驾驶控制研究中,目前常用的车辆模型主要有车辆运动学模型、动力学模型、神经网络模型等。动力学模型需要考虑的参数较多,且不易获得;而神经网络模型则需要建立在大量试验数据的基础上。因此,选择相对容易建立的运动学模型进行仿真研究。

以前轮导向、后轮驱动的福田欧豹 4040 型四轮拖拉机为研究对象。在不考虑车辆重力和侧滑时,根据车辆的运动学关系(图 3),可以得到拖拉机的运动学方程式为<sup>[10]</sup>：

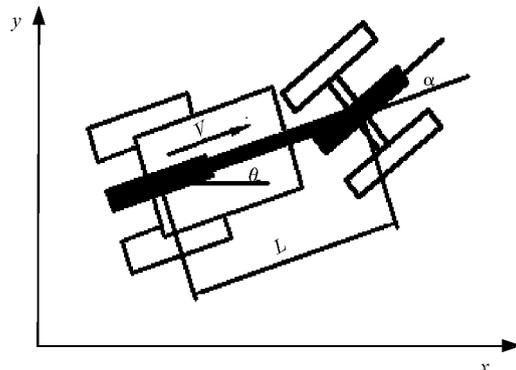


图 3 车辆的运动学模型

Fig. 3 Vehicle kinematical model

#### 3.2 仿真研究

利用车辆运动学模型和模糊控制器,建立 Matlab/Simulink 环境下的航向跟踪控制系统仿真框图(图 4)。

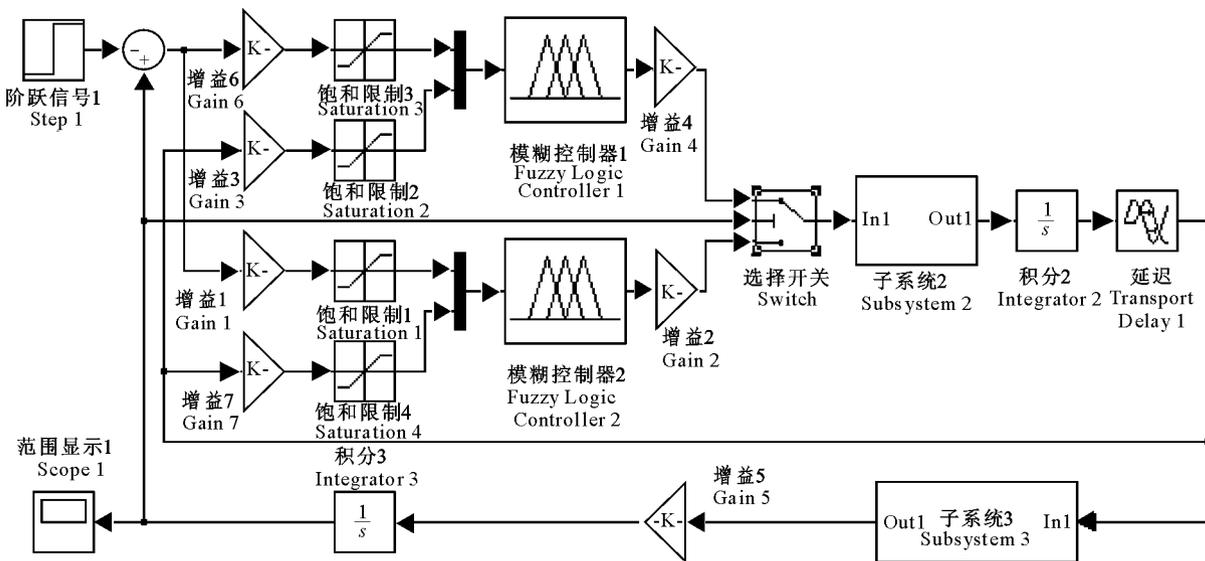


图 4 航向跟踪控制系统的仿真框图

Fig. 4 Simulation frame of heading-following control system

按前后轮轴距为 1.95 m,车辆速度分别取 0.5 和 1 m/s 进行仿真,得到拖拉机跟踪 5°和 20°航向角

时航向角随时间变化的阶跃响应曲线,如图 5 和图 6 所示。当航向偏差为 5°、车辆速度为 0.5 m/s 时,

上升时间大约为 3 s;车辆速度为 1 m/s 时,上升时间缩短,但超调量为 10%。当航向偏差为 20°时,同

样具有比较好的控制效果。

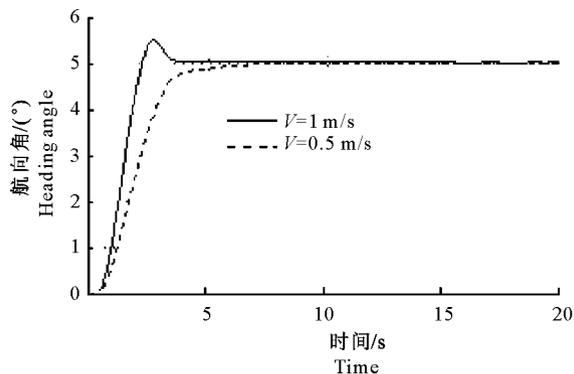


图5 5°航向偏差阶跃的响应曲线

Fig. 5 Simulation result at the orientation deviation of 5°

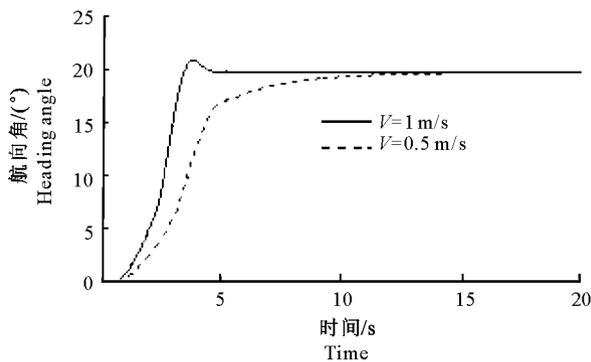


图6 20°航向偏差阶跃的响应曲线

Fig. 6 Simulation result at the orientation deviation of 20° 定的超调量,在后续行驶过程中,航向偏差被控制在 1°以内。

### 4 试验分析

试验车为改造过的福田欧豹 4040 型拖拉机。采用航向角传感器 Mti (Xsens Technologies in Netherlands) 测量车辆航向角,数据通过 USB 接口输入到计算机内;利用位移传感器 (HPS-M-V) 测量前轮转角,检测到的信号经过 A/D 转换进入计算机;通过磁电传感器 (0D9011) 检测车辆速度,信号经过 A/D 板 (PCI-8333) 的 DI 通道输入到计算机内;由计算机发出的控制信号通过串口发送至电机驱动器 (MLDS3805),驱动直流伺服电机 (58SYX-3A) 对车辆转向进行控制。试验在西北农林科技大学机电学院后面的水泥路面上进行,车辆速度为 0.53 m/s。

#### 4.2 初始航向偏差为 -1°时的控制试验

将车辆航向角调至 -1°,可得到车辆航向角偏差随时间的变化曲线(如图 8 所示)。由图 8 可知,初始时刻由于车辆启动产生的震动使航向角产生一定波动,控制器很快将航向角偏差调整到 1°以内,后续行驶过程中,由于地面不平整引起的航向角波动,控制器对其也有很好的控制能力。

#### 4.1 初始航向偏差为 20°时的控制试验

当航向偏差为 20°时,通过试验得到车辆航向角偏差随行驶距离的变化曲线如图 7 所示。

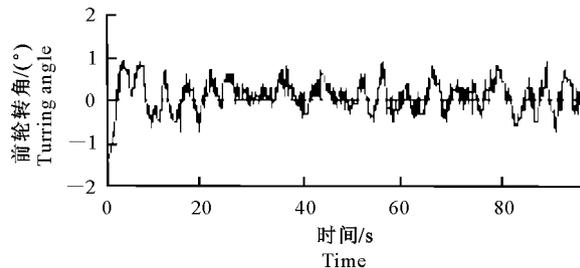


图8 航向偏差为 -1°时的控制曲线

Fig. 8 Navigation performance at the orientation deviation of -1°

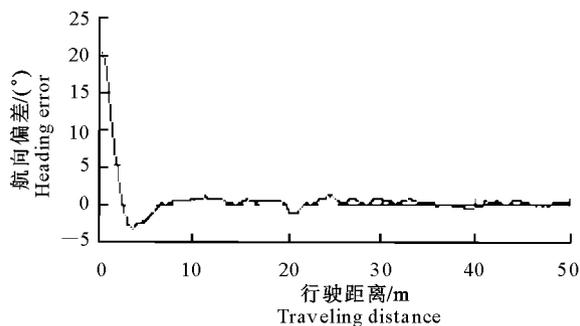


图7 航向偏差为 20°时的控制曲线

Fig. 7 Navigation performance at the orientation deviation of 20°

由于受车辆本身机械特性的影响,转向控制存在一定延迟,使得初始时刻的航向偏差控制产生一

图 9 为车辆转向跟踪控制过程中前轮转角的变化曲线,图 10 为车辆横向偏差随行驶距离的变化曲线。从图 10 可以看出,拖拉机在 50 m 的行驶过程中,最大横向偏差为 0.16 m。在前 25 m 的行驶过程中,由于地面比较平整,所产生的车辆横向偏差相对较小,最大横向偏差仅为 3.4 cm。在后 25 m 的行驶过程中,由于地面上浅坑的影响,拖拉机侧倾角和俯仰角产生 1~2°的变化,使得传感器检测到的车辆航向角产生了较大波动,造成前轮转角发生比较大的偏转,且多数时间处于负角度,从而使得横向偏差不断增大。

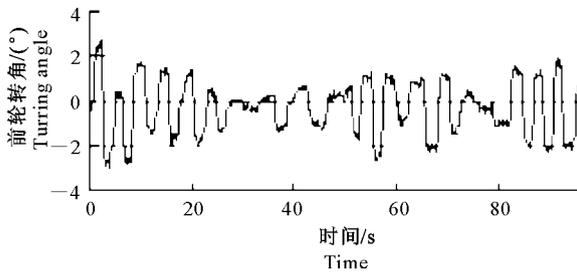


图 9 拖拉机行驶过程中前轮转角的变化曲线

Fig. 9 Steering angle of front-wheels in traveling motion

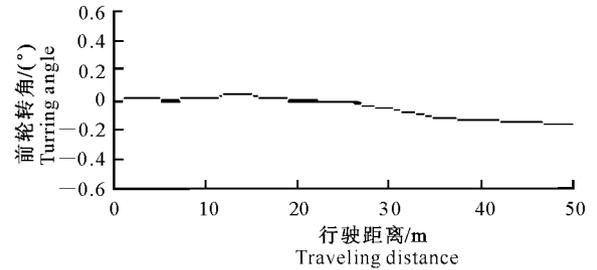


图 10 拖拉机行驶过程中横向偏差的变化曲线

Fig. 10 Lateral offset of the tractor in traveling motion

## 5 结 论

以福田欧豹 4040 型拖拉机为研究对象,利用模糊控制理论,设计了拖拉机转向控制双模糊控制器,并对拖拉机转向跟踪控制系统分别进行了仿真和试验研究。结果表明,当拖拉机在地面存在浅坑的水泥路面上以 0.53 m/s 速度行驶时,航向角偏差可控制在  $1^\circ$  以内;在 50 m 的行驶过程中,拖拉机的最大横向偏差为 0.16 m。

本试验所设计的模糊控制器能够满足拖拉机转向跟踪控制的要求,具有很好的稳定性和准确性,为后续拖拉机横向偏差控制奠定了基础。拖拉机田间作业的相关试验研究,将是下一步研究的主要内容。

### [参考文献]

- [1] Toru Torii. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25: 133-153.
- [2] Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25: 169-194.
- [3] John F Reid, Qin Zhang, Noboru Noguchi, et al. Agricultural automatic guidance research in North America [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25: 155-167.
- [4] 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 Z G, Luo X W, Li J L. Automatic steering control system of wheeled model farming machinery [J]. *Transactions of the*

- Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(11): 77-80. (in Chinese)
- [5] 杨世胜, 张 宾, 于曙风, 等. 电磁诱导农用喷雾机器人路径导航系统的设计与实现 [J]. *机器人*, 2007, 29(1): 78-87.  
Yang S S, Zhang B, Yu S F, et al. Design and implementation of the navigation system for an electromagnetic guided agricultural spraying robot [J]. *Robot*, 2007, 29(1): 78-87. (in Chinese)
- [6] 周 俊, 姬长英, 刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(3): 91-94.  
Zhou J, Ji C Y, Liu C L. Visual navigation system of agricultural wheeled-mobile robot [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005, 36(3): 91-94. (in Chinese)
- [7] Oscar C, Barawid J. Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application [J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(2): 139-149.
- [8] Yoshisada N, Naonobu U, Yutaka K. Automated rice transplanter using global positioning and gyroscopes [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 43: 223-234.
- [9] 王友权, 周 俊, 姬长英, 等. 基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 110-113.  
Wang Y Q, Zhou J, Ji C Y, et al. Design of agricultural wheeled mobile robot based on autonomous navigation and omnidirectional steering [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 110-113. (in Chinese)
- [10] 陈 军, 朱忠祥, 鸟巢凉, 等. 拖拉机沿曲线路径的跟踪控制 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(11): 108-111.  
Chen J, Zhu Z X, Torisu Ryo, et al. On-tracking control of tractor running along curved paths [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 108-111. (in Chinese)