

# 基于 DSP 的拖拉机电液转向控制系统\*

何 卿 高焕文 李洪文 毛 宁 王树东

**【摘要】** 针对拖拉机的全液压转向系设计了基于 TMS320F2812 DSP 的电液转向控制系统,硬件部分包括 DSP 芯片及 PWM 电控器等接口电路,软件部分设计了带非线性补偿的 PID 控制算法,选用比例电磁换向阀、角位移传感器构建了试验平台,进行了算法参数确定试验和导向信号跟踪转向试验。结果表明控制系统的转向角误差小于 7%,平均滞后时间为 0.15 s,能为自动导向提供理论基础。

**关键词:** 拖拉机 转向控制系统 设计 试验

**中图分类号:** TP273; U463.4

**文献标识码:** A

## Electrohydraulic Steering Control System of Tractor Based on DSP

He Qing Gao Huanwen Li Hongwen Mao Ning Wang Shudong

(China Agricultural University)

### Abstract

An electrohydraulic (E/H) steering control system was designed for tractors with hydraulic steering system. The hardware of system included a TMS320F2812 DSP (digital signal processor) and its interface circuits such as PWM (pulse width modulation) controller and others. The control algorithm adopted was PID (proportional-integral-differential) control with nonlinear compensation method. A TD654L type of tractor was taken as research platform mounted with proportional directional valve and angle sensor. Tests had been taken to identify the parameters of algorithms and implement automatic steering following guidance signal. The results of track test with guidance signal from guidance generator showed that the steering offset was less than 7% and the average of lag time was 0.15 s. It provided a research base for automatic guidance.

**Key words** Tractor, Steering control system, Design, Experiment

### 引言

农业车辆自动导向系统中的转向控制是输出控制信号,驱动执行机构使车辆达到期望状态的重要组成部分,控制系统可采用电动控制或电液控制的方法。电动控制主要利用电动机实现对方向盘等转向操纵机构的控制。为了使电动机输出的转速和转矩满足要求,在电动机输出轴上安装了减速器和齿

轮副等传动机构,但由于齿轮副和转向系的传动部件存在配合间隙,使控制系统的响应性受到影响。电液控制是利用电液阀直接控制转向油缸<sup>[1]</sup>,与转向系传动部件无关,可提高控制系统的响应特性。

以往的转向控制系统选用 8 位、16 位的单片机或车载计算机<sup>[2]</sup>作为控制单元。但是 8 位和 16 位单片机在运算能力方面存在局限性,对复杂的控制算法难以进行实时处理,当转向控制系统作为自动导

收稿日期: 2006-08-07

\* 农业部引进国际先进农业科学技术计划资助项目(项目编号:2004-Q1)

何 卿 中国农业大学工学院 博士生, 100083 北京市

高焕文 中国农业大学工学院 教授 博士生导师 通讯作者

李洪文 中国农业大学工学院 教授 博士生导师

毛 宁 中国农业大学工学院 助理工程师

王树东 中国农业大学工学院 技师

向的研究平台时不易进行扩展。DSP(数字处理器)器件与单片机相比具有较高的集成度和高速的数据运算能力,可以快速处理复杂的控制规律,为系统可靠性、快速性和实时性提供了保证。

本研究针对拖拉机的全液压转向系设计了基于TMS320F2812 DSP的电液转向控制系统。由于电液转向控制系统存在非线性特性,传统的PID控制算法难以获得良好控制效果和较高控制精度。在PID控制的基础上进行非线性补偿能改善控制性能,提高响应特性<sup>[3]</sup>。因此基于DSP的电液转向控制系统采用带有非线性补偿的PID算法,并进行自动转向试验加以验证。

### 1 系统组成

#### 1.1 转向控制系统组成

电液转向控制系统由DSP控制单元、PWM(脉宽调制)电液阀、转向油缸、前轮、角位移传感器和导向信号发生器组成,见图1。其中PWM电液阀、转向油缸和前轮为驱动控制部分,将DSP输出的控制信号转化成转向油缸等被控对象的动作。由导向信号发生器和角位移传感器获得导向输入信号和前轮转向角的反馈信号。

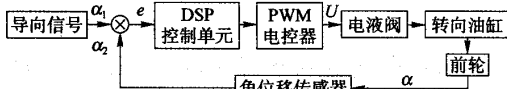


图1 电液转向控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of electrohydraulic steering control system

#### 1.2 工作原理

电液控制系统为闭环控制系统,见图1。导向信号发生器产生导向信号 $\alpha_1$ 输入控制单元,同时角位移传感器检测前轮的实际转角 $\alpha_2$ 作为反馈信号输入控制单元。控制单元DSP的信号采集模块将这2个信号转化成数字量,再进行比较得到偏差 $e$ 。控制算法以 $e$ 为输入量通过分析、计算和判断,由DSP的PWM模块和通用数字输入输出模块(GPIO)输出控制量。PWM电液阀和电磁溢流阀电路将DSP输出的数字量变成能驱动电液阀的电压控制量,实现对转向油缸活塞杆及前轮等转向机构的控制。

### 2 系统硬件部分

基于DSP的电液转向控制系统的硬件包括DSP主电路和控制电路。主电路包括DSP的F2812CPU内核和事件管理器、ADC模块等外设电路。控制电路包括PWM电液阀、溢流阀接口电路、信号采集电路等。图2为硬件结构图,同时指出了本

系统所用的DSP各引脚接线方法。

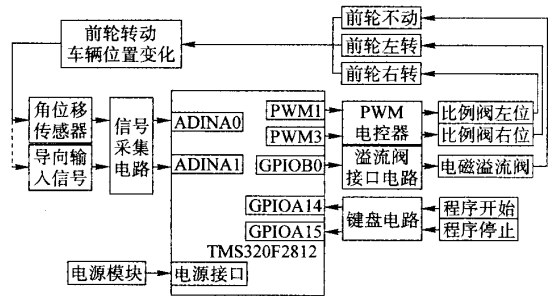


图2 基于DSP的系统硬件结构图

Fig. 2 Architecture diagram of system hardware based on DSP

#### 2.1 DSP芯片

TMS320F2812 DSP具有高性能的32位CPU,能提高运算精度、中断响应和处理能力。主频高达150 MHz。片上集成了达128 KB×16位的Flash存储器和ROM。其外设包括16路12位的ADC模数转换模块、2路SCI、1路SPI、1路CAN、2个事件管理器模块(EVA, EVB)和56个通用目的I/O引脚。

#### 2.2 PWM电液阀

电液阀是将弱电控制信号经功率放大,产生有效信号驱动比例阀的电路。TMS320F2812 DSP的事件管理器利用通用定时器产生PWM波形,输出具有一定占空比的脉宽调制信号,简化了比例阀PWM电液阀的设计。该电路可简化为电源、光电隔离、功率放大等部分,见图3。

#### 2.3 其他接口电路

电磁溢流阀的接口电路将DSP的GPIO开关量信号转化为对继电器开关动作的控制,包括光电隔离、放大等部分,见图4。信号采集电路主要是利用电阻进行分压,使传感器输出的0~5 V电压信号变为DSP中ADC模块要求的0~3 V。

### 3 软件部分

#### 3.1 控制程序

系统软件程序由主程序和中断程序两部分组成。主程序进行系统的初始化、设置GPIO工作方式、初始化中断向量表等。中断程序包括ADC模块、PWM模块和PID算法模块。ADC模块首先进行信号采集和转换,然后将导向输入信号和反馈信号相比较得出偏差值 $e$ ,再根据ADC采集和转换的精度设定偏差的阈值 $e'$ 。PWM模块对偏差值进行分析和判断,输出相应的控制量信号驱动比例阀的2个电磁铁。若 $e > e'$ ,需驱动前轮左转,向比例阀的右位输出右位PWM控制量信号;反之若 $e < -e'$ ,

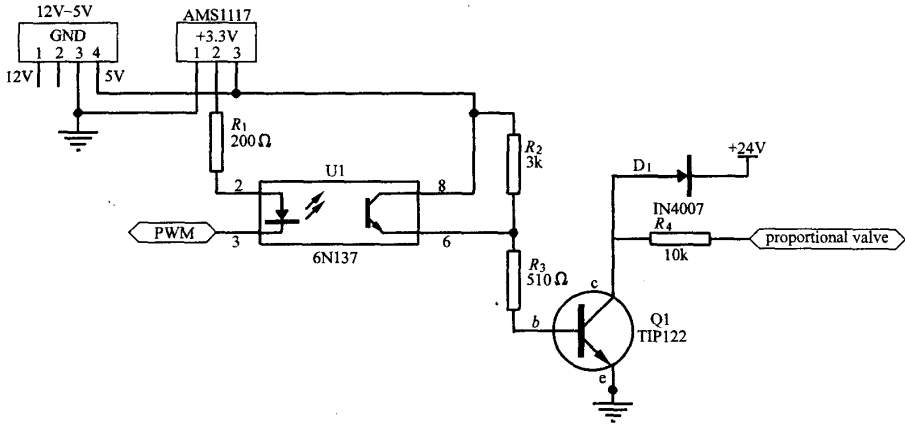


图 3 PWM 电控制器电路图

Fig. 3 Circuit diagram for PWM controller

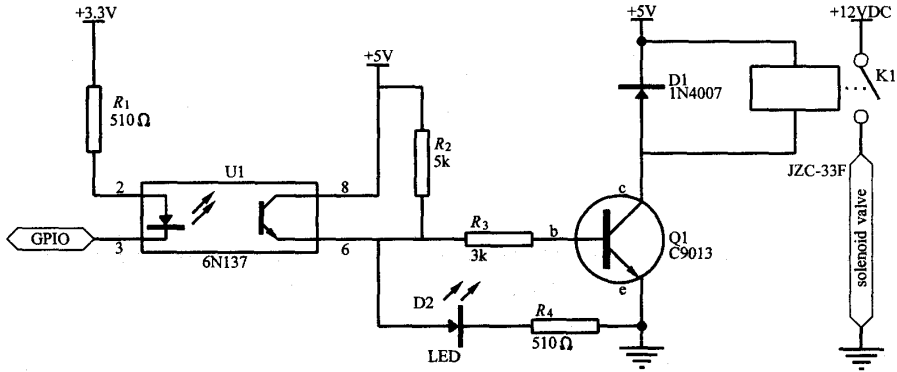


图 4 电磁溢流阀接口电路图

Fig. 4 Diagram of interface circuit for overflow valve

需驱动前轮右转, 则向比例阀的左位输出左位 PWM 控制量信号; 而当  $-e' < e < e'$  时, 无需前轮转动, 比例阀置中位, 因而不输出 PWM 信号。同时 GPIO 输出高电平使电磁溢流阀通电卸荷油压。PID 算法模块首先按设定参数计算输出量, 然后进行非线性补偿得出左位输出量, 再根据比例系数得出右位的输出量。

### 3.2 控制算法

带非线性补偿的 PID 算法采用了分段法, 消除电液控制中存在的死区、饱和及不对称的非线性特性。

$$O_d = \begin{cases} O_1 & (O_d \leq O_1) \\ \frac{O_2 - O_1}{O_2} U_{pid} + O_1 & (O_1 < O_d < O_2) \\ O_2 & (O_d \geq O_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$O'_d = K O_d \quad (2)$$

式中  $O_d$ ——PWM 信号在死区、饱和补偿后的输出量

$U_{pid}$ ——数字 PID 算法输出量

- $O_1$ ——死区脉宽数字量
- $O_2$ ——饱和区脉宽数字量
- $O'_d$ ——不对称补偿后的输出量
- $K$ ——不对称系数

$$\text{其中 } U_{pid} = K_p e + U_{i0} + K_i (e + e_0) + K_d (e - e_0) \quad (3)$$

式中  $K_p$ ——比例系数  $K_i$ ——积分系数

$K_d$ ——微分系数

$U_{i0}$ ——积分前一项  $e_0$ ——误差前一项

当  $O_d < O_1$  时比例阀处于死区, 取  $O_d$  为  $O_1$ ; 当  $O_d > O_2$  时, 比例阀处于饱和区, 取  $O_d$  为  $O_2$ ; 当  $O_1 < O_d < O_2$  时比例阀处于工作区, 为保证工作区的线性取截距的数字量为  $O_1$ ,  $U_{pid}$  前的系数为斜率。

## 4 试验设计

### 4.1 试验条件

铁牛 654L 型拖拉机, 全液压转向系转向油泵为 HLCB-D10/14B 恒流溢流齿轮油泵, 额定压力 10 MPa; 排量 14 mL/r; 最大工作压力 12.5 MPa; 输出流量 10 L/min。

## 4.2 电液阀的选用和安装

采用三位四通比例电磁换向阀与原液压转向系统中的转向器并联,用于控制转向油缸左右腔油液的流量和方向。比例阀的型号为4WRA6E10-10B/24NZ4M,名义流量13 L/min。当比例阀置左位时驱动前轮实现向右转向,反之置右位则使前轮向左转向。而当比例阀处于中位停止转向时,进油口和出油口处于不通状态,利用电磁溢流阀进行油压卸荷。电磁溢流阀的型号为DBW10-2-30-315,通电状态时卸压,断电状态时作为安全溢流阀使用。

## 4.3 传感器的选用和安装

选用无触点角位移传感器(WYH-AT-1)安装在右前轮的转向节立轴中心处,见图5。传感器的转轴与前轮转向节立轴轴心采用软连接方式,防止两轴在不同轴情况下发生干涉而使转角信号采集失真或产生干扰。

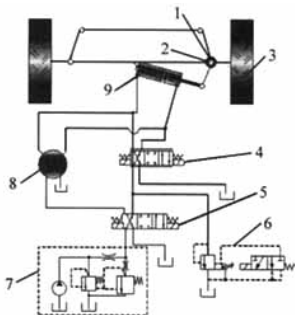


图5 转向控制的液压系统原理图

Fig. 5 Diagram of hydraulic system of steering control

1. 角位移传感器 2. 转向节立轴 3. 前轮 4. 比例电磁换向阀  
5. 电磁换向阀 6. 电磁溢流阀 7. 恒流溢流齿轮油泵 8. 全液压转向器 9. 转向油缸

## 4.4 试验步骤

### (1) 确定 PWM 信号的频率 $f_{\text{PWM}}$

PWM 信号的调制频率与比例阀对 PWM 信号的响应有密切关系。若频率太低,阀对 PWM 信号完全响应,阀芯的运动为完整的“开关”运动,这时被控量的脉动量太大。若频率太高,阀芯的响应特性近似于对模拟信号的响应,只是叠加上脉动幅值很小的颤振信号,频率越大脉动幅值越小,使阀难以响应。因此必须根据比例阀的特性选择合适的调制频率。参考比例阀的特性曲线(-3 dB 下的频率为 6~10 Hz),选取 PWM 信号频率为比例阀频率的 10 倍左右。首先确定  $f_{\text{PWM}}$  初始值为 60~100 Hz,再通过试验确定最佳值。

### (2) 确定非线性补偿算法的参数 $O_1$ 、 $O_2$ 、 $K$

PWM 频率为  $f_{\text{PWM}}$  时,DSP 的 PWM 模块的周期寄存器数字量为 T1PR。根据比例阀的静态特性

确定电流的输入值范围为 40%~95%,相应的 PWM 模块的比较值在  $O_1$ ~ $O_2$  范围内。试验该比较值的不同数字量驱动前轮从左极限位置转到右极限位置,或从右极限位置转到左极限位置,测定该过程所用的时间,选出  $O_1$ 、 $O_2$  和不对称系数  $K$ 。

### (3) 确定 PID 的控制参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$

使用函数信号发生器(型号 E1641B1)输入正弦波、三角波、方波等标准信号为导向信号,检测导向信号和实际转角信号的误差,确定各系数。输入信号频率根据比例阀转向时间范围确定。转向系统的响应性和稳定性是主要的性能,故选取比例和微分环节。而积分环节存在降低系统稳定性的因素,综合考虑  $K_i$  取 0,  $K_p$  取 30~60,  $K_d$  取 0.8~1.2。

### (4) 自动转向跟踪试验

在试验室内,进行零负载自动转向控制台架试验。以导向器产生的导向信号为输入,用数据采集卡(型号为 ZTIC USB7325)显示和存储导向信号和反馈转角信号,获得自动转向控制的转角跟踪误差值。

## 5 试验结果分析

### 5.1 PWM 频率确定

试验确定 PWM 的控制频率  $f_{\text{PWM}}=100$  Hz,该频率下比例阀的动作正常,PWM 信号的占空比与输出电流值呈线性关系。 $f_{\text{PWM}}$  在 DSP 的 PWM 模块中对应的数字量为  $P=5859$ 。

### 5.2 非线性补偿算法的参数确定

在 PWM 信号频率一定的情况下,脉宽越大则占空比越大,因而输出电流和比例阀的开度也越大。图 6 为不同脉宽数字量的 PWM 信号控制前轮从左极限位置转到右极限位置的过程和反向转动的过

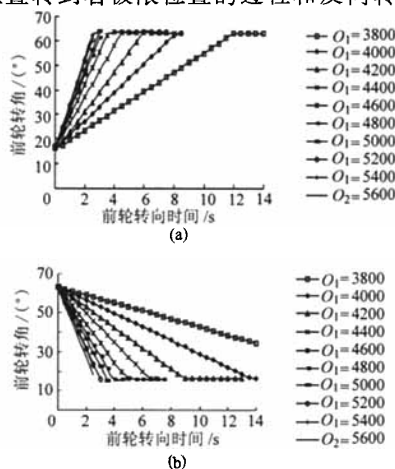


图6 控制前轮转向时 PWM 信号脉宽数字量

Fig. 6 Digital pulse width of PWM signal when front wheels were controlled to steer from left to right

(a) 左转 (b) 右转

程。从图中可以看出，脉宽越大，转向时间越短，但存在临界值。最小脉宽  $O_1=3\ 800$  为死区临界，低于此值比例阀不能启动。最大脉宽  $O_2=5\ 600$  为饱和临界数字量，高于该值转向速度变化不明显。根据相同脉宽下左右转向的时间确定不对称系数  $K=0.97$ ，即右转所需的数字量为左转的 97%。

5.3 PID 算法的参数调定

根据左右转向的时间为 3~8 s，选择输入正弦信号频率为 0.2 Hz，幅值 21°，检测最大误差  $e_{max}$ 。试验确定  $K_p$  为 30~60，若  $K_p$  低于 30 则误差  $e>0.5^\circ$  而不可取；确定  $K_d$  为 0.8、1.0、1.2，当  $K_d<0.8$  或  $K_d>1.2$  时误差  $e>0.5^\circ$  而不可取。表 1 为不同参数的正弦波转向跟踪误差表。

以同样的频率和幅值输入三角波检测最大误差值。同理确定  $K_p$  为 25~50， $K_d$  为 0.8~1.2。表 2 为

表 1 正弦波输入的最大误差  $e_{max}$

Tab. 1 Maximal errors with sine wave as input (°)

$K_p$	$K_d$		
	0.8	1.0	1.2
30	0.3	0.3	0.4
40	0.3	0.4	0.3
50	0.1	0.1	0.1
60	0.3	0.4	0.4

表 2 三角波输入的最大误差  $e_{max}$

Tab. 2 Maximal errors with triangle wave as input (°)

$K_p$	$K_d$		
	0.8	1.0	1.2
25	0.7	0.8	0.8
30	0.7	0.7	0.8
40	0.5	0.5	0.6
50	0.4	0.6	0.7

不同参数的三角波最大误差表。

以同样的频率和幅值输入方波，检测上升时间  $t_p$  和最大稳态误差。见表 3。

表 3 方波输入的上升时间和最大误差

Tab. 3 Raising time and maximal errors with square wave as input

$K_p$	$K_d$	$t_p/s$	$e_{max}$
25	0.8	2.19	0.83
	1.0	2.21	0.6
	1.2	2.28	0.6
30	0.8	2.10	0.5
	1.0	2.16	0.5
	1.2	2.19	0.5
40	0.8	2.11	0.5
	1.0	2.04	0.5
	1.2	2.16	0.6
50	0.8	2.08	0.5
	1.0	2.16	0.6
	1.2	2.12	0.5

根据误差最大值选定 PID 控制算法的参数为  $K_p=50, K_i=0, K_d=0.8$ 。

5.4 标准信号输入的转向角跟踪试验

在选定的 PID 控制算法参数下，以正弦波、三角波、方波的标准信号作为导向信号进行转向角跟踪试验，试验结果见图 7。试验结果为：正弦波跟踪的最大误差为 0.1°，最大滞后时间为 0.18 s；三角波跟踪的最大误差为 0.4°，最大滞后时间为 0.11 s；方波信号跟踪的上升时间为 2.08 s，最大误差为 0.5°。

5.5 导向信号的转向角跟踪试验

为测定系统的响应特性，输入由导向器产生的导向信号进行转向角度跟踪试验，导向信号的频率范围 0.3~0.5 Hz，角度幅值 10°。试验结果如图 8 所示，转向角最大误差 7%，平均滞后时间 0.15 s。

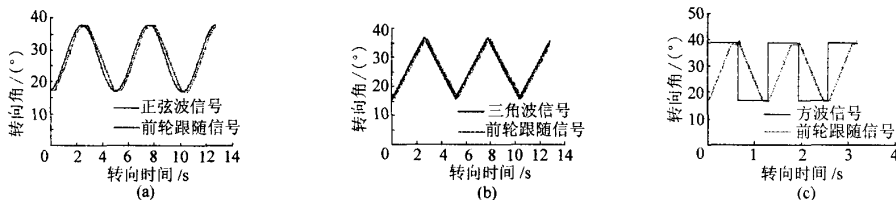


图 7 转向角跟踪信号曲线

Fig. 7 Track curves for steering angle signal

(a) 正弦波信号跟踪 (b) 三角波信号跟踪 (c) 方波信号跟踪

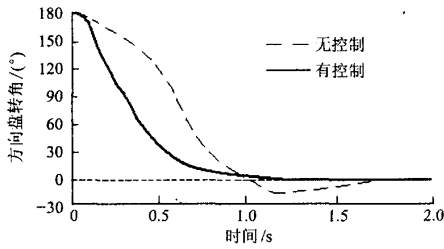


图8 方向盘回正特性曲线

Fig. 8 Return-to-center characteristics of steering wheel

## 5 结论

(1) 通过对转向回正过程分析,选用对方向盘

### 参 考 文 献

- 1 Masahiko K, Shunich W, Takayuki K, et al. A new EPS control strategy to improve steering wheel returnability [J]. SAE Paper 2000-01-0815, 2000.
- 2 Ji-Hoon Kim, Jae-Bok Song. Control logic for an electric power steering[J]. Mechatronics, 2002,12(3):447~459.
- 3 吴文江,季学武. 电动转向控制系统跟踪性能研究[J]. 机械工程学报,2004,40(4):77~80.
- 4 徐建平,何仁,苗立刚. 电动助力转向系统回正控制算法研究[J]. 汽车工程,2004,26(5):557~559.
- 5 冯冬青,谢宋和. 模糊智能控制[M]. 北京:化学工业出版社,1998.
- 6 孙增圻,张效祥. 智能控制理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社,1997.

(上接第5页)

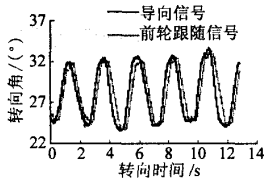


图8 跟踪导向信号的转向角曲线

Fig. 8 Steering track curves with guidance signal

## 6 结论

(1) 基于DSP的拖拉机电液转向控制系统能够实现根据输入的导向信号进行自动转向,为进一步研究自动导向控制系统提供了基础。

### 参 考 文 献

- 1 孙以泽,徐本州,覃朝富. 轮式拖拉机电液转向系统的建模与仿真[J]. 农业机械学报,2003,34(5):32~34.
- 2 Benson E R, Reid J F, Zhang Q. Development of an automated combine guidance system[C]. ASAE Meeting Presentation 003137, 2000.
- 3 Wu D, Zhang Q, Reid J, et al. Model recognition and simulation of an E/H steering controller on off-road equipment [J]. Fluid Power Systems and Technology,1998(5):55~60.

转角的控制方法实现回正控制,采用模糊控制器对PID系数进行在线调整,使控制器在不同工况下达到更好的控制效果。

(2) 使用专家控制系统将常规助力控制和回正控制算法结合,采用控制器的辨识算法和监督算法构成闭环系统,使转向行程的判断准确,实时性编程实现简单。

(3) 设计的新型台架试验台能比较真实地模拟出汽车在真实行驶状态下轮胎回正特性及路面输入对转向机构的影响。

(2) 带非线性补偿的PID控制算法用于电液转向控制是可行的。试验表明转向跟踪过程平稳,转向角误差小,其中最大误差为7%。系统响应性较好,跟踪导向信号的平均滞后时间0.15s,按最大转向偏角计算,在拖拉机正常行驶速度(1.5m/s左右)下,能将偏离距离控制在1.96cm以内,满足实际作业所需。

(3) 控制系统的响应特性存在滞后时间随输入信号频率增加而增加的问题,这与电液阀的动态响应特性紧密相关,因此在实际作业中还需要根据导向信号频率是否高于控制系统最大转向频率对算法进行改进。

# 基于DSP的拖拉机电液转向控制系统

作者: [何卿](#), [高焕文](#), [李洪文](#), [毛宁](#), [王树东](#), [He Qing](#), [Gao Huanwen](#), [Li Hongwen](#),  
[Mao Ning](#), [Wang Shudong](#)  
作者单位: [中国农业大学工学院, 100083, 北京市](#)  
刊名: [农业机械学报](#)   
英文刊名: [TRANSACTIONS OF THE CHINESE SOCIETY FOR AGRICULTURAL MACHINERY](#)  
年, 卷(期): 2007, 38 (5)  
被引用次数: 6次

## 参考文献(3条)

1. [孙以泽](#); [徐本州](#); [覃朝富](#) [轮式拖拉机电液转向系统的建模与仿真](#)[期刊论文]-[农业机械学报](#) 2003 (05)
2. [Benson E R](#); [Reid J F](#); [Zhang Q](#) [Development of an automated combine guidance system](#) 2000
3. [Wu D](#); [Zhang Q](#); [Reid J](#) [Model recognition and simulation of an E/H steering controller on off-road equipment](#) 1998 (05)

## 本文读者也读过(5条)

1. [霍立志](#). [吕新民](#). [郭贵生](#). [Huo Lizhi](#). [Lv Xinmin](#). [Guo Guisheng](#) [拖拉机电液助力转向系统的研究](#)[期刊论文]-[农机化研究](#)2010, 32 (3)
2. [何卿](#). [高焕文](#). [李洪文](#). [He Qing](#). [Gao Huanwen](#). [Li Hongwen](#) [接触式拖拉机导航控制系统](#)[期刊论文]-[农业机械学报](#) 2008, 39 (1)
3. [连世江](#). [陈军](#). [贾海政](#). [张伟华](#). [Lian Shijiang](#). [Chen Jun](#). [Jia Haizheng](#). [Zhang Weihua](#) [基于PID控制的拖拉机自动转向系统](#)[期刊论文]-[农机化研究](#)2009, 31 (6)
4. [陈文良](#). [谢斌](#). [宋正河](#). [毛恩荣](#). [Chen Wenliang](#). [Xie Bin](#). [Song Zhenghe](#). [Mao Enrong](#) [拖拉机电控液压力转向系统的研究](#)[期刊论文]-[农业工程学报](#)2006, 22 (10)
5. [马宪福](#). [庞昌乐](#). [MA Xian-fu](#). [PANG Chang-le](#) [大功率拖拉机作业机组匹配仿真研究](#)[期刊论文]-[拖拉机与农用运输车](#)2009, 36 (2)

## 引证文献(5条)

1. [忻尚军](#). [郑相周](#) [基于DSP和CPLD的振动信号校准采集研究](#)[期刊论文]-[农机化研究](#) 2012 (9)
2. [田丰年](#). [鲁植雄](#). [赵兰英](#). [张东辉](#) [基于PID神经网络算法的新型电控液压力转向系统](#)[期刊论文]-[公路交通科技](#) 2010 (8)
3. [胡炼](#). [罗锡文](#). [赵祚喜](#). [张智刚](#). [胡均万](#). [陈斌](#) [插秧机电控操作机构和控制算法设计](#)[期刊论文]-[农业工程学报](#) 2009 (4)
4. [何卿](#). [高焕文](#). [李洪文](#) [接触式拖拉机导航控制系统](#)[期刊论文]-[农业机械学报](#) 2008 (1)
5. [吴晓鹏](#). [赵祚喜](#). [张智刚](#). [陈斌](#). [胡炼](#) [东方红拖拉机自动转向控制系统设计](#)[期刊论文]-[农业机械学报](#) 2009 (z1)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_nyjxxb200705001.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_nyjxxb200705001.aspx)