

王佳琪,张 宁,何国田.无人微耕机的自动转向控制器设计[J].江苏农业科学,2018,46(6):200-204.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.06.052

无人微耕机的自动转向控制器设计

王佳琪^{1,2},张 宁¹,何国田²

(1. 长春理工大学光电工程学院, 长春 130022; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院机器人中心, 重庆 400700)

摘要:为实现梯田的无人机械化种植,以传统两轮式微耕机为实验平台,设计了自主耕作的无人微耕机。但在实际工作中该无人微耕机的自动转向控制器极易受复杂环境影响,导致控制精度严重下降。为提高控制器的适应性和实时性,采用逆模型-神经网络算法及模糊控制算法实现的双闭环控制方法,提高了控制器的抗干扰能力,降低了复杂环境对控制器的影响,提高了控制精度。结果表明,方波信号跟踪平均误差为 0.1° ,延时时间为 0.28 s ,正弦信号跟踪平均误差为 1.8° ,三角信号跟踪平均误差为 0.8° ,满足农业环境应用要求。

关键词:无人微耕机;自动转向控制器设计;双闭环控制方法;逆模型-神经网络算法;模糊控制算法;农业环境应用

中图分类号: S222.3;S24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)06-0200-04

梯田的无人机械化种植是我国现代化农业发展的难题,自动转向控制技术是在梯田中实现自主导航、精细耕作的关键环节,无人微耕机的自动转向控制器对实现梯田的精细化、现代化种植有重要意义。

目前,国内外对于无人农用机械的研究方向主要针对于大型农用机械。使用的控制算法主要包括 PID 控制、模糊控制、神经网络控制等。美国 Qiu 等使用加入了前馈的 FPID 算法设计了拖拉机电液转向系统^[1]。张美娜等针对农用机械的 PID 控制算法进行了理论分析^[2],黎永键等针对东方红拖拉机的自动转向控制进行了设计和试验^[3],谢斌等针对电动拖拉机的驱动器进行设计并进行了室内试验^[4],宋春月使用 GPS 和惯导实现了对无人拖拉机的航向控制^[5]。但是无人微耕机的研究尚处于遥控式微耕机阶段,丁向美使用 ARM 芯片设计了微耕机的机上部分和遥操作手持端^[6],通过遥操作控制微耕机的转向。

以上研究使用的控制算法主要针对无人拖拉机进行设计,并不适应于机械结构简单的微耕机,因此,本研究针对无人微耕机单独进行自动转向控制器的设计,采用逆模型-神经网络算法在外环控制转向角度、模糊控制算法在内环控制角速度,使微耕机平稳达到目标角度。

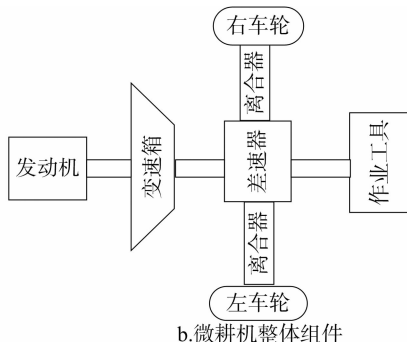
1 自动转向控制器模型

1.1 角度控制模型

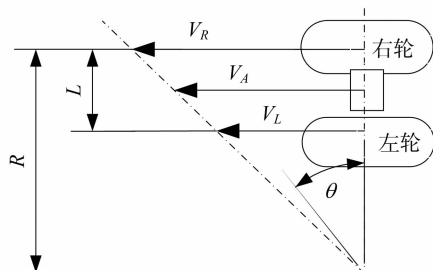
微耕机受结构限制,车轮与输入轴间不发生偏转,因此利用差速原理,采用左右输出轮轴各安装电磁离合器的形式实现转向功能,如图 1-a 所示。通过两轮的速度差实现转向的目的。现假定左轮速度为 V_L ,右轮速度为 V_R ,沿着车辆纵轴线中心的速度为 V_A ,两轮的速度差为 ΔA ,左右两轮轮距为 L ,旋转角度为 θ 。



a.微耕机耕作



b.微耕机整体组件



c.转向运动示意

图1 转向控制机构

收稿日期:2017-06-21

基金项目:服务机器人标准化检测与认证协同创新中心项目(编号: cstc2015yfpt_cyjsxt0008);重庆机器人技术研究院高端平台建设基金项目(编号: cstc2016yfpt_cyjsyj0010)。

作者简介:王佳琪(1993—),男,山东威海人,硕士研究生,主要从事控制算法研究。E-mail:13179776574@163.com。

通信作者:张 宁,博士,副教授,主要从事光电检测方面的研究。E-mail:custzhangning@163.com。

当假定左转时,车辆的旋转角速度为

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{V_R - V_L}{L}; \quad (1)$$

中心线速度为

$$V_A = \frac{V_L + V_R}{2}; \quad (2)$$

车辆的瞬时速度 V 为

$$V = V_A + L \frac{d\theta}{dt}; \quad (3)$$

旋转角度 θ 为

$$\theta = \int \frac{V_R - V_L}{L} dt = \int \frac{\Delta V}{L} dt. \quad (4)$$

根据三角形相似定理可知:

$$\frac{\int (V_R - V_L) dt}{\int V_R dt} = \frac{L}{R} \Rightarrow R = \frac{L \int V_R dt}{\int \Delta V dt}. \quad (5)$$

式中: R 为转弯半径。

由式(5)可知,在轮距 L 为定值时,转弯半径大小与转向时的速度(如 V_R)及两轮的速度差 ΔV 有关。此时,左轴电磁离合器结合,左轮可取 $V_L = 0$,最小转弯半径 R 为 L 。同理,当右转时,右轴电磁离合器结合,右轮可取 $V_R = 0$,最小转弯半径 R 为 L 。又由差速器原理知,左转时, $V_R = 2V_A$,右转时, $V_L = 2V_A$,由公式(4)得转向角度 θ 为

$$\theta = \int \frac{2V_A}{L} dt. \quad (6)$$

由公式(6)可知,在速度一定的条件下,转向角度与电磁离合器的关闭时间有关,通过控制电磁离合器的关闭时间来控制转角。

1.2 速度控制模型

无人微耕机的油门控制原理如图 2 所示,根据转矩生成过程,结合喷油量,运用热力学理论,可以计算发动机的指示功率:

$$P_i = H_\mu \eta_i m_f. \quad (7)$$

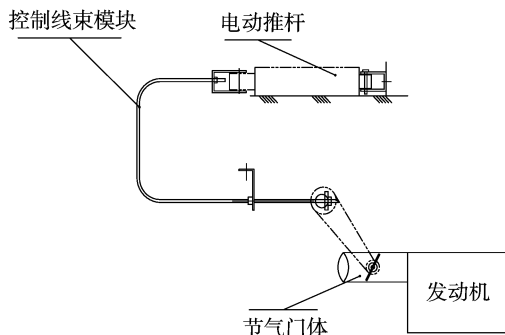


图2 油门控制机构

式中: H_μ 是燃烧低热值, η_i 是指示热效率, m_f 进入气缸的燃油流量。

从而发动机平均指示转矩为

$$T_i = \frac{P_i}{\omega} = \frac{H_\mu \eta_i m_f}{\omega}. \quad (8)$$

式中: ω 是发动机的转速,考虑工作过程的泵气产生的转矩损失 T_p ,曲轴转动产生的摩擦转矩损失 T_f ,可得到平均有效转矩 T_e :

$$T_e = T_i - T_p - T_f. \quad (9)$$

由公式(8)和公式(9)可推导出:

$$P_i = (T_e + T_p + T_f) \omega \Rightarrow H_\mu \eta_i m_f = (T_e + T_p + T_f) \omega. \quad (10)$$

由投影定理可得:

$$m_f = m_0 s_0 (1 - \cos \theta). \quad (11)$$

式中: θ 取 $0 \sim 90^\circ$, m_0 为单位面积的燃油流量, s_0 为节气门板面积。

引入电动推杆后:

$$m_f = m_0 s_0 (1 - \cos \theta k_\theta L). \quad (12)$$

式中: k_θ 为电推杆与油门转角间对应的比例常数, L 为电动推杆的运动行程。

从而,综上所述有:

$$H_\mu \eta_i m_0 s_0 [1 - \cos(k_\theta L)] = (T_e + T_p + T_f) \omega \Rightarrow 1 - \cos(k_\theta L) = \frac{(T_e + T_p + T_f) \omega}{H_\mu \eta_i m_0 s_0}. \quad (13)$$

由公式(13)可知,在油门开度范围内,且有效转矩 T_e 、泵气损失转矩 T_p 、摩擦转矩损失 T_f 不变时,若电动推杆行程 L 增加,则发动机的转速 ω 增加,因此可通过控制推杆的行程来控制发动机的输出转速,从而控制转动角速度。

2 自动转向控制器设计

2.1 逆模型-神经网络控制算法设计

考虑到转向控制器的非线性,本研究设计的转向控制器通过双闭环实现角度控制,提高了控制精度,控制原理如图 3 所示。同时,为提高控制器对复杂环境的适应性,使用逆模型-神经网络算法作为外环实现角度的控制,内环通过模糊控制算法实现角速度的控制。

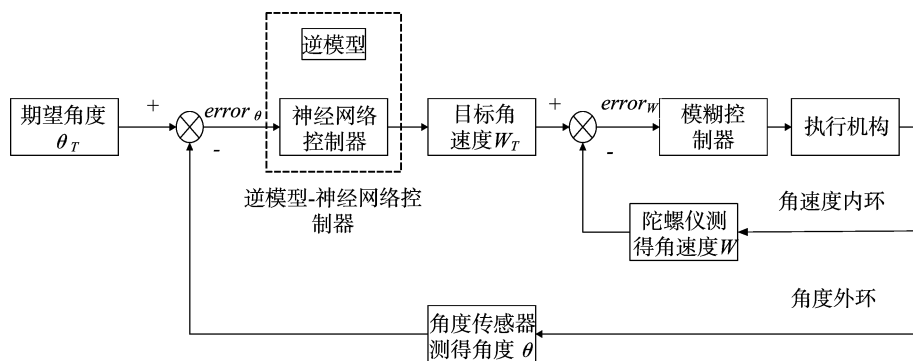


图3 控制系统

无人微耕机实际工作时,期望角度先输入到逆模型中计算得到补偿量,同时单神经元自适应神经网络控制器根据期望转角计算出目标角速度,用逆模型的补偿量进行修正,输出给内环,内环的模糊控制算法通过目标加速度解算出推杆的

行程和挡位的大小,从而实现动作。角度传感器采集微耕机的实际转角,与期望转角求差,作为导师信号对单神经网络进行训练,从而提高了算法的自适应能力。

在逆模型-神经网络模型中,神经网络模型使用的是单

神经元自适应 PID 算法,把图 3 中的内环和执行机构简化得到单神经元自适应 PID 控制结构^[7],如图 4 所示,根据反馈的角度 θ 与期望角度 θ_r 得到 PID 算法的比例项 x_p 、积分项 x_i 、微分项 x_d :

$$\text{error}_k = \theta_r - \theta; \quad (14)$$

$$x_p = \text{error}_k - \text{error}_{k-1}; \quad (15)$$

$$x_i = \text{error}_k; \quad (16)$$

$$x_d = \text{error}_k - 2\text{error}_{k-1} + \text{error}_{k-2} \quad (17)$$

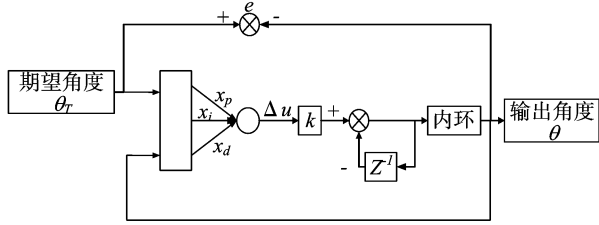


图4 单神经元自适应 PID 控制结构

根据增量式 PID 算法公式有:

$$\Delta u_k = k_p x_p + k_i x_i + k_d x_d \quad (18)$$

式中: k_p 、 k_i 、 k_d 分别表示比例系数、积分系数、微分系数, Δu_k 表示 k 时刻的控制量。

使用改进型学习规则的单神经元学习方式:

$$k_{p,i,d} = \frac{w_{p,i,d}}{w_p + w_i + w_d}; \quad (19)$$

$$\Delta \text{error}_k = \text{error}_k - 2\text{error}_{k-1} + \text{error}_{k-2}; \quad (20)$$

$$w_{p,i,d} = \eta \text{error}_k \Delta \text{error}_k \Delta u_{k-1} \quad (21)$$

式中: w_p 、 w_i 、 w_d 分别表示 k_p 、 k_i 、 k_d 的权重, η 表示学习率。

单神经元通过更改加权系数 w_p 、 w_i 、 w_d 来间接调节 k_p 、 k_i 、 k_d , 针对加权系数的学习单神经元有 Hebb 学习规则、delta 学习规则, 改进的学习规则 3 种学习规则, 传统方法仅仅使用 Δerror_k 进行学习, 没有最大化利用误差信息, 本研究使用改进的学习规则, 使用 Δerror_k 和 error_k 进行神经元的训练, 最大化提取误差信息, 提高神经网络的训练速度和准确度, 提高了算法的动态响应能力。

Hebb 学习规则:

$$w_{p,i,d} = \eta \text{error}_k \Delta u_{k-1} x_{p,i,d} \quad (22)$$

delta 学习规则:

$$w_{p,i,d} = \eta \text{error}_k \Delta u_{k-1} \quad (23)$$

本研究使用的改进学习规则:

$$w_{p,i,d} = \eta \text{error}_k \Delta \text{error}_k \Delta u_{k-1} \quad (24)$$

逆模型使用 BP 神经网络算法对神经网络模型进行修正, BP 神经网络使用工作信号正向传播、误差反向传播的工作方式。本研究使用的控制芯片是 STM32, 因此出于减小运算量的考虑使用 3 个隐层的 BP 神经网络建立逆模型, 预先采集单神经元自适应 PID 控制器实际输出结果和微耕机的实际转角作为逆模型的训练数据, 使用微耕机的实际角度作为逆模型的输入数据, 逆模型计算得到预测的输出结果, 使用预测的输出结果与微耕机的实际转角之差作为导师信号对逆模型进行训练与学习(图 5)。

2.2 模糊控制算法设计

无人微耕机耕作时最大行走速度为 0.3 m/s, 转弯半径 $L = 1$ m, 由公式(6)得转向角速度 $w = 0.6$ rad/s = 34° /s, 因此

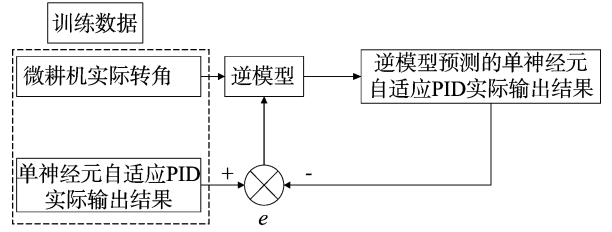


图5 逆模型的训练过程

模糊控制算法中的目标角速度 error_w 的论域为 $[-34, 34]$, 涵盖 error_w 变化范围的 F 子集为 PB(正快)、PM(正中)、PS(正慢)、Z(零)、NB(负快)、NM(负中)、NS(负慢), 其中 Z(零)表示微耕机不进行转向动作, 其隶属度函数如图 6-a 所示。为提高控制精度引入 $\Delta \text{error}_w = \text{error}_w - \text{error}_{w-1}$, 其论域为 $[-34, 34]$, 涵盖 Δerror_w 变化范围的 F 子集为 PB(正快)、PM(正中)、PS(正慢)、Z(零)、NB(负快)、NM(负中)、NS(负慢), 其隶属度函数如图 6-b 所示。推杆最大行程为 30 cm, 微耕机运行过程中的油门需要保持最低开度, 由试验得到此时推杆行程为 10 cm, 因此推杆行程的论域为 $[10, 30]$, 使用 5 等分的 F 子集涵盖推杆行程变化范围: B(长)、MB(较长)、M(中)、MS(较短)、Z(零), 其中 Z(零)表示推杆位于 10 cm 处, 其隶属度函数如图 6-c 所示。根据无人微耕机的控制经验, 确定模糊控制规则, 如图 7-a 所示。最终输出结果如图 7-b 所示。

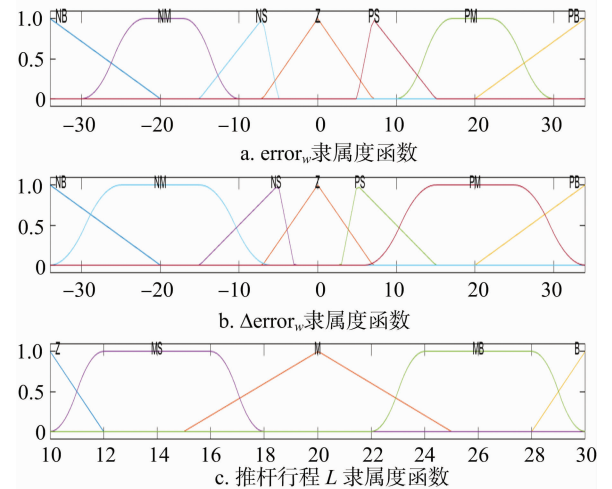


图6 error_w 的隶属度函数

3 试验结果与分析

3.1 算法仿真试验

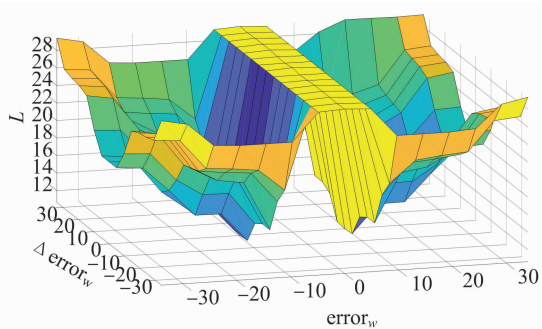
试验目的: 对于已建立的转向系统模型, 使用 Matlab 软件通过仿真试验的方法验证控制器原理上的可行性。

试验方法: 输入信号为 25° 方波信号、正弦信号和三角波信号, 使用 Matlab 辨识被控对象模型, 使用 M 语言描述逆模型-神经网络控制算法和模糊控制算法, 得到整体仿真模型, 运行 M 文件得到仿真结果。

试验结果: 如图 8 所示, 该控制器对阶跃信号、正弦信号、三角波信号在原理上的跟踪性能良好, 其中三角波信号在 0~1 s 处震荡, 通过神经网络控制器学习之后, 震荡减小, 该控制器具有理论可行性。

$\begin{matrix} \Delta error \\ error \end{matrix}$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	B	MB	M	M	M	MB	B
NM	MB	M	MS	MS	MS	M	MB
NS	MB	MS	Z	Z	Z	MS	MB
Z	B	B	B	B	B	B	B
PS	MB	MS	Z	Z	Z	MS	MB
PM	MB	M	MS	MS	MS	M	MB
PB	B	MB	M	M	M	MB	B

a. 模糊控制规则



b. 输出结果

图7 模糊控制规则与输出结果

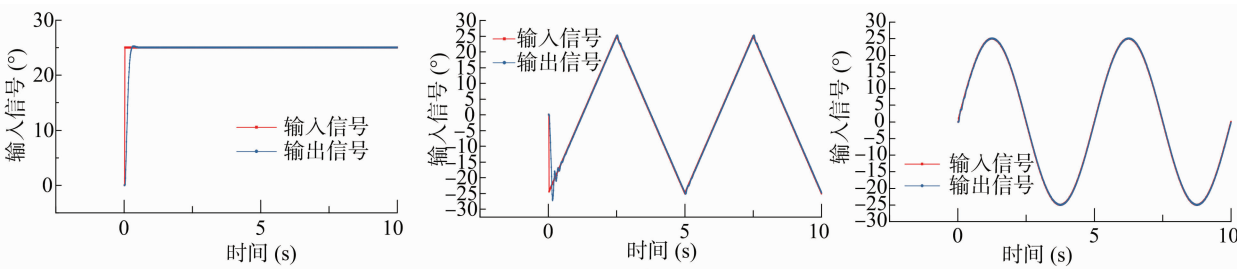


图8 仿真实验结果

3.2 实际转向信号跟踪实验

试验目的:验证本研究设计的控制器在实际环境中能有效地控制转向机构跟踪控制系统的指令达到目标角度。

试验方法:上位机发送指令方波信号,该信号为 10° 阶跃信号,运行本研究设计的控制方法得到数据,使用 Origin 得到响应曲线。

试验结果:图 9 所示为方波信号的跟踪结果,实际曲线与输入方波信号有很好的—致性,最大误差为 5°,平均误差为

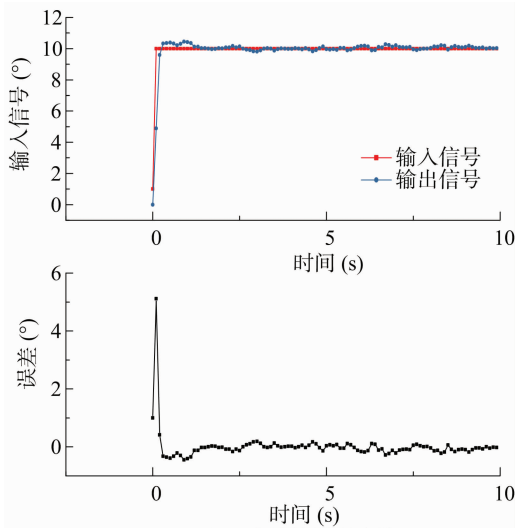


图9 方波信号跟踪结果

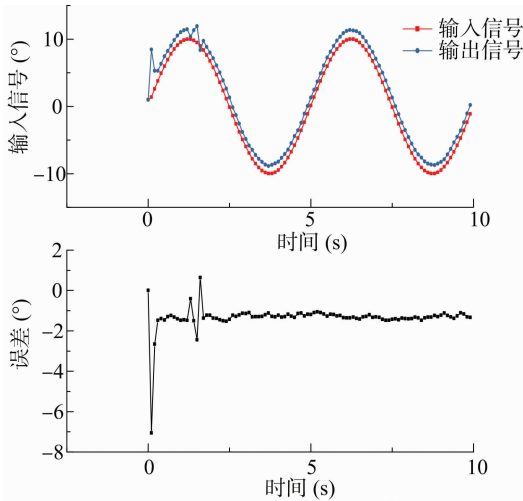


图10 正弦信号跟踪结果

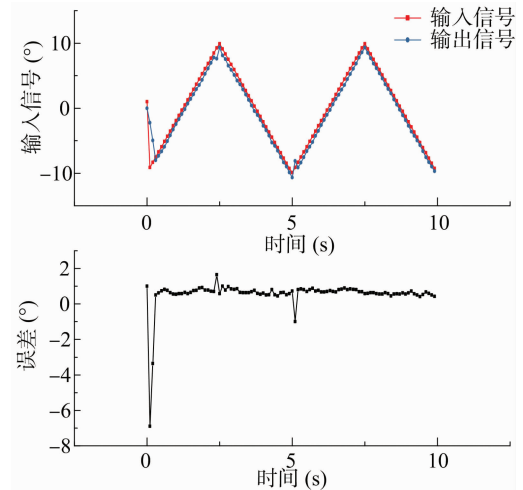


图11 三角信号跟踪结果

0.1°,延时时间为 0.28 s。由图 10 可知,正弦信号最大误差为 7°,平均误差为 1.8°,该控制器对于正弦信号的跟踪在前 1 s 有较大的震荡,2 s 以后误差趋于稳定。由图 11 可知,三角信号最大误差为 7°,平均误差为 0.8°,在三角信号的波峰和波谷处,误差有抖动。

付宇超, 张文毅, 纪 要, 等. 基质块苗移栽机双螺旋传动轴设计及模态分析[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(6): 204–206.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.06.053

基质块苗移栽机双螺旋传动轴设计及模态分析

付宇超, 张文毅, 纪 要, 夏倩倩

(农业部南京农业机械化研究所, 江苏南京 210014)

摘要: 针对油菜基质块育苗的模式设计一种单独的传动机构, 以实现全自动移栽时基质块油菜苗的横向精确传动, 传动方式采用水稻插秧机双螺旋传动凸轮轴的形式, 依据双螺旋传动轴的设计原理进行参数设计。给出该模型应符合的动力学方程, 并通过 ANSYS 仿真软件对设计结果及其结构振型进行模态分析。

关键词: 油菜; 基质块; 双螺旋传动凸轮轴; 结构振型; 动力学方程; 模态分析

中图分类号: S223.92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)06-0204-03

方体基质块苗是异于现有的毯状苗、钵体苗、穴盘苗的一种新型的育苗方式, 与现有的育苗方式相比有较大的优势, 主要特点是出苗整齐、成活率高、整体移栽、不须缓苗、增强肥力、优化土壤等, 目前针对该育苗方式的移栽机具还处在半自动人工喂苗阶段, 效率较低、工作强度较大。每个基质块之间靠基质连接, 有少量的根系交错缠绕, 整盘基质块苗可以看作一个整体, 类似于放大的水稻毯状钵体苗, 所以在设计全自动移栽机时借鉴目前水稻插秧机的原理, 采用分置式移箱机构对每个苗块进行移箱作业, 对适应方体基质块苗农艺特性的移箱机构中双螺旋传动凸轮轴进行设计并使用 ANSYS 软件对其进行模态分析。

1 双螺旋传动凸轮轴结构及参数设计

研究对象为横向 9 块、纵向 14 块的方体基质块, 每个基质块规格为 $(40 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$, 根据此条件确定横向须移箱 9 回, 每回移距为 40 mm, 根据移距首先确定螺旋槽螺距^[1]。

$$b = PZ_{\pm} / Z_{\text{从}} \quad (1)$$

式中: b 表示移距, mm; P 表示螺旋槽螺距, mm; Z_{\pm} 表示主动传动齿轮齿数; $Z_{\text{从}}$ 表示从动传动齿轮齿数。

水稻插秧机一行程的取秧次数通常为 16、18、20、24 次, 而方体基质块苗横向只须取 9 次, 取秧次数少的情况下可令 $P = 2b_m$ ^[1], 其中 b_m 为最小移距, 所以螺旋槽的螺距 P 为 80 mm。根据螺杆扭矩计算公式、耐磨性计算公式等计算双螺旋传动凸轮轴的螺纹中径如下:

$$F = \frac{2T}{d_2 \tan(\lambda + \rho')}; \quad (2)$$

$$\rho' = \arctan f'; \quad (3)$$

$$f' = \frac{f}{\cos \alpha / 2}; \quad (4)$$

收稿日期: 2017-12-11

基金项目: 国家科技支撑计划(编号: 2013BAD08B00); 江苏省重点研发计划(编号: BE2015351-1)。

作者简介: 付宇超(1990—), 男, 山东平度人, 硕士, 主要从事农业机械化工程研究。E-mail: 296524683@qq.com。

结合以上分析可知, 该控制器对于方波信号跟踪良好, 对于三角信号和正弦信号, 第 1 次输入有较大的误差, 之后的波形可以很好地跟随输入信号, 误差平缓趋于稳定。

4 结论

与前人针对拖拉机设计的 PID 控制器相比, 本研究针对无人微耕机设计了专用的双闭环转向控制器, 转向角度作为外环使用神经网络控制, 转向速度作为内环使用模糊控制, 使微耕机平稳转向目标角度, 提出了神经网络和模糊控制的双闭环控制模型适应复杂多变的农业环境, 逆模型神经网络修正单神经元自适应 PID 算法的误差, 针对 STM32 进行了算法优化, 降低了算法复杂度和成本。样机试验结果表明, 方波信号跟踪平均误差为 0.1° , 延时时间为 0.28 s, 正弦信号跟踪平均误差为 2.2° , 三角信号跟踪平均误差为 0.8° , 但在神经网络控制器学习时间内。输出误差较大需进一步优化算法。因此本研究设计的控制器满足农业环境应用要求, 并为进一步试验提供平台。

参考文献:

- [1] Qiu H, Zhang Q. Feedforward - plus - proportional - integral - derivative controller for an off - road vehicle electrohydraulic steering system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D - Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(5): 375-382.
- [2] 张美娜, 林相泽, 丁永前, 等. 基于性能指标的农用车辆路径跟踪控制器设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 40-46.
- [3] 黎永键, 赵喜真, 黄培奎, 等. 东方红拖拉机自动转向控制器设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 93-99.
- [4] 谢 斌, 张 超, 毛恩荣, 等. 基于 myRIO 的电动拖拉机驱动控制器设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 55-62.
- [5] 宋春月. 无人驾驶拖拉机控制系统设计研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2015.
- [6] 丁向美. 基于 ARM 的微耕机远程控制系统的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.