

张 轩,李志伟,郑德聪,等. 基于模糊 PID 两轮拖拉机控制系统抗干扰分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):216-222.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.045

基于模糊 PID 两轮拖拉机控制系统抗干扰分析

张 轩¹,李志伟¹,郑德聪¹,徐 苗²

(1. 山西农业大学工学院,山西晋中 030801; 2. 山西农业大学信息科学与工程学院,山西晋中 030801)

摘要:利用陀螺力矩效应建立了两轮自平衡拖拉机动力学模型,针对拖拉机机体控制系统,提出了一种基于模糊自适应理论的侧倾角控制器/旋进角控制器 PID 控制算法。在 Matlab/Simulink 环境下,分别搭建了拖拉机侧倾角控制系统、陀螺旋进角控制系统仿真模型,并加入随机干扰进行仿真研究。仿真结果表明,应用在两轮自平衡拖拉机控制系统的模糊自适应 PID 控制系统在加外干扰后消除响应振荡现象、加快响应速度、提高响应精度方面明显优于传统 PID 控制系统。

关键词:两轮自平衡拖拉机;力矩陀螺;BLDCM;模糊自适应 PID;Simulink 仿真

中图分类号:S219.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)12-0216-06

拖拉机作为农业生产的一种多用途重要牵引动力装置,与各种牵引式、悬挂式作业机具连接后可对作物进行各种加工^[1],而作物狭窄的植株行距限制了四轮拖拉机的应用,本研究提出可应用于狭窄田间的两轮拖拉机。两轮车的力学模型为非线性欠驱动非完整约束系统^[2],在车速低于 5 km/h 情况下难以保持车身平衡^[3],而田间土壤的复杂性加剧了两轮拖拉机的不平衡,相关研究针对两轮车平衡问题提出了方向转向、重量平衡、力矩陀螺等控制方案^[2-7],而力矩陀螺以其具备控制精准、侧倾调控范围较大的特点^[5]成为研究重点。

针对两轮自平衡拖拉机侧倾角度动态响应问题,采用部分反馈线性化方法将拖拉机机体非线性系统转化为线性系统,为拖拉机控制系统设计出基于模糊自适应理论的侧倾角控制器、旋进角控制器,使用 Matlab/Simulink 对两控制器动态性能进行仿真,同时在模型中加入高斯白噪声,表明在外界干扰不确定的情况下,自适应模糊 PID 控制系统能有效地保证两轮自平衡拖拉机的稳态精度。

1 两轮自平衡拖拉机模型

在两轮间安装一组高速自转的力矩陀螺,并通过两陀螺间的驱动电机控制陀螺自转轴线的朝向,

产生矫正拖拉机侧倾角的控制力矩(图 1)。

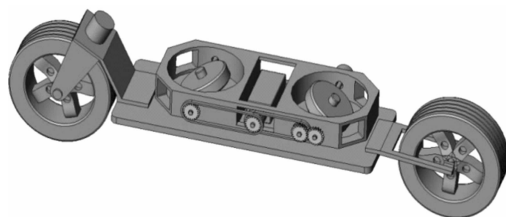


图1 两轮自平衡拖拉机平衡系统机械结构

1.1 陀螺力矩效应原理

从图 2 可以看出,转动惯量为 J_0 的陀螺以 ω_0 围绕 z 轴高速旋转,当陀螺本身围绕 x 轴以 ω_1 旋转时,陀螺将产生一个沿 y 轴方向的力矩^[8]:

$$M = J_0 \cdot \omega_0 \cdot \omega_1. \quad (1)$$

当陀螺以定值 ω_0 高速自转,通过电机控制陀螺的旋进方向,产生平衡力矩。

1.2 两轮自平衡拖拉机动力学建模

建立直角坐标系见图 3,在两轮自平衡拖拉机未发生侧倾时,以 A 、 B 点连线作为 x 轴,以通过 B 点的铅垂线作为 y 轴, x 轴与 y 轴相交于 B 点,通过右手法则建立 z 轴。当两轮拖拉机发生侧倾时截取 yOz 平面(图 4),由角动量守恒原理可得,以 x 轴为旋转主轴的方程为:

$$J \ddot{\theta} = mgh \sin \theta. \quad (2)$$

式中: J 为两轮拖拉机相对于 x 轴的转动惯量。

1.3 陀螺力矩自平衡原理

由公式(2)可知,需引入控制力矩 u 使车体侧倾角恢复为 0° :

收稿日期:2019-04-25

基金项目:山西农业大学校青年科技创新基金(编号:J141802151)。

作者简介:张 轩(1989—),男,山西晋中人,硕士,助教,主要从事农业装备控制研究。E-mail:zhangxuan727@126.com。

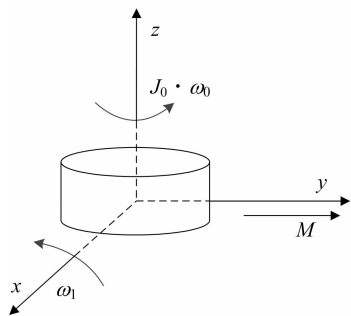


图2 陀螺力矩效应示意

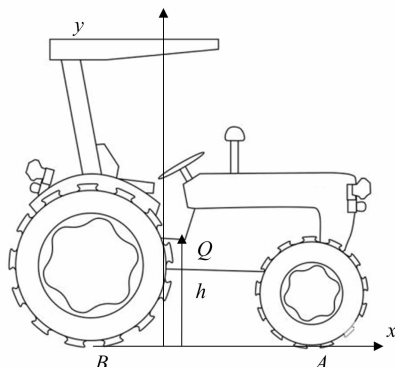


图3 直角坐标

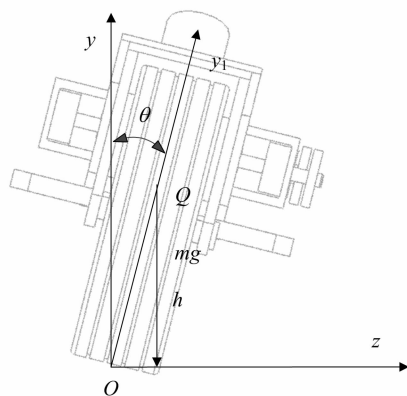


图4 侧倾示意

$$J \ddot{\theta} = mgh \sin \theta + u. \quad (3)$$

以图4为例,当车体发生右倾时, $mgh \sin \theta$ 方向为 x 轴负向,控制力矩需为 x 轴正向。截取力矩陀螺所在的平面 xOy , ω_1 、 ω_2 为前陀螺、后陀螺的自转角速度,以陀螺自转轴与 y_1 、 y_2 的夹角模 φ 为陀螺旋进角, $\dot{\varphi}$ 为旋进角速率(图5、图6)。为使两陀螺 x 方向的力矩叠加, y 方向的力矩抵消,需保证两陀螺转动惯量、自转角速率、旋进角速率均相等,自转方向及旋进方向均相反,结合公式(1)得出,陀螺控制力矩:

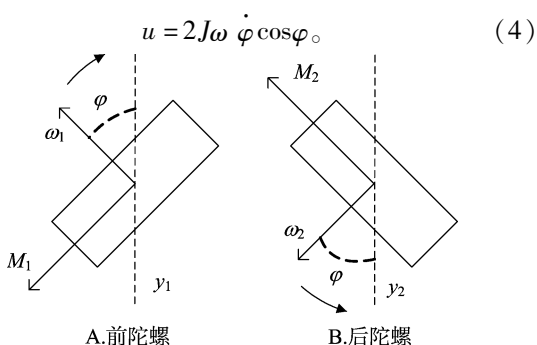


图5 工作状态下某时刻双陀螺示意

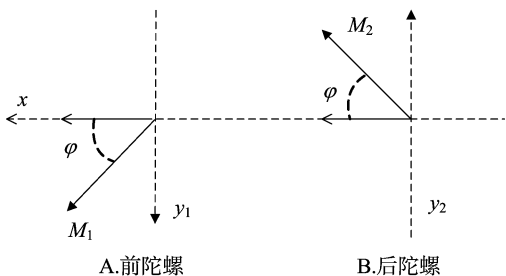


图6 控制力矩分解示意

2 控制方案设计

将公式(4)代入公式(3):

$$J \ddot{\theta} = mgh \sin \theta + 2J\omega \dot{\varphi} \cos \varphi. \quad (5)$$

由此可见,两轮自平衡拖拉机为非线性二阶系统。

2.1 拖拉机机体侧倾角控制方案设计

θ 为拖拉机机体侧倾角, $\dot{\theta}$ 为拖拉机机体侧倾角角速率,可由倾角传感器实时测得(图7)。采用反馈线性化控制方法^[4],在陀螺控制力矩中引入 $-mgh \sin \theta$, u_1 为控制力矩中线性部分。

$$\text{令 } u = -mgh \sin \theta + u_1. \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(3):

$$J \ddot{\theta} = u_1. \quad (7)$$

构造输入为理论 $\theta_{\text{ref}}(0^\circ)$ 与 θ 之间的线性二阶系统:

$$u_1 = J(-K \dot{\theta} - \theta + \theta_{\text{ref}}). \quad (8)$$

将公式(8)代入公式(7):

$$\ddot{\theta} = -K \dot{\theta} - \theta + \theta_{\text{ref}}. \quad (9)$$

式中: K 为角速度反馈系数。

2.2 陀螺旋进角控制方案设计

φ 为力矩陀螺的旋进角,可由倾角传感器实时测得。联立公式(4)、公式(6)、公式(8)可得陀螺实时应达到的旋进角角速率 $\dot{\varphi}_{\text{ref}}$ 。以 $\dot{\varphi}_{\text{ref}}$ 为陀螺旋进角参考输入量、 $\dot{\varphi}$ 为最终响应值建立旋进角控制系统(图8)。因永磁无刷直流电机(BLDCM)具备体积小、结构简单、成本低廉、效率高、控制效果良好、控制策略方便等优点,选用BLDCM作为力矩陀螺旋进角调速电机。

3 模糊自适应PID控制器的设计

拖拉机工作环境恶劣、工况复杂,还需匹配不同的农用机具进行作业,往往存在作业时载荷不均

匀、载荷扰动、强振动冲击的问题,在控制领域中体现为不同程度地非线性、时变性、模型不确定性,而模糊 PID 控制方式既具有 PID 控制器快速响应、稳定性高的特点,又具有模糊控制方式降低超调量、抗扰动能力强的特点,因此将模糊 PID 控制方式引入到拖拉机机体侧倾角控制系统及力矩陀螺螺旋进角控制系统中。

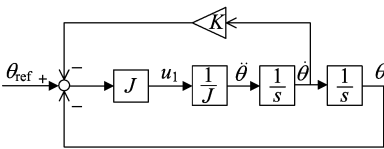


图7 拖拉机机体侧倾角控制系统框

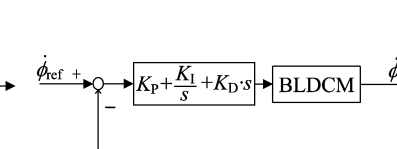


图8 力矩陀螺螺旋进角控制系统框

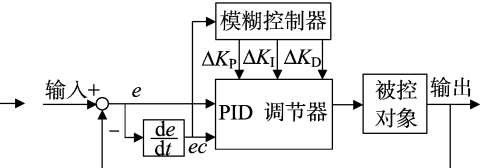


图9 模糊PID控制器

模糊集定义为: {PB 正大, PM 正中, PS 正小, ZO 零, NS 负小, NM 负中, NB 负大}。对于侧倾角控制器,输入信号为拖拉机的实际侧倾角和理论输入量,输入域 e, ec 为 $[-6, 6]$, 输出域 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为 $[-300, 300], [-10, 10], [-10, 10]$ 。对于旋进角控制器,输入信号为电机的实际旋进角和理论输入量,输入 e 为 $[-6, 6]$, 输入 ec 为 $[-1, 1]$, 输出域 ΔK_p 为 $[-6, 6], \Delta K_i$ 为 $[-0.3, 0.3], \Delta K_d$ 为 $[-0.03, 0.03]$ 。对于各个输入及输出域模糊集, NB 及 PB 均选取 gaussmf 型隶属度函数,其余各语言值均选取 trimf 型隶属度函数(图 10)。

3.2 模糊 PID 控制器模糊规则表

对于模糊 PID 控制器,当 e 较大时,需取较大的 K_p ,以加快系统的响应速度,同时适当调整 K_d ,使系

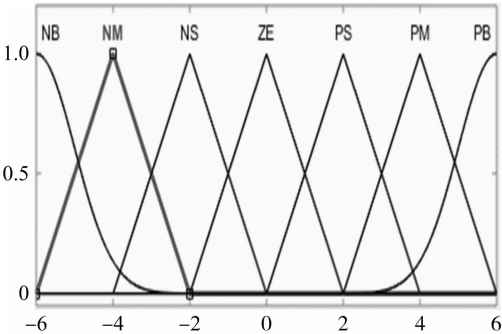


图10 隶属度函数

3.1 模糊集及论域定义

模糊控制器以误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,误差变化率为误差对时间的一阶导数^[9],经过模糊控制规则表推理,使用“Mamdani”解模糊法,以 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 作为输出量,输出信号实时调整 PID 控制器各参数,实现系统自适应调整功能,其控制原理见图 9。

统具有一定的响应性,消除静态误差;当 e 较小时,应适当调整 K_p, K_d ,加快系统动作,减少调节时间^[10]。由此可得输出变量 K_p, K_i, K_d 的模糊控制规则(表 1、表 2)。

表 1 侧倾角模糊控制器参数 $K_p/K_i/K_d$ 模糊规则

e/ec	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PN/NB/Z	PM/NM/Z	PS/NM/NS	PS/Z/PB	NS/Z/PB
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PS/NM/Z	PS/NS/NS	PS/Z/NS	Z/Z/PB
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	NS/NS/NS	Z/Z/Z	NS/Z/PS	NM/PS/PM
Z	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/Z	NM/PS/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NS	Z/Z/NS	Z/Z/NS	NS/PM/Z	NM/PM/PS	NB/PM/PS
PM	Z/NS/NM	Z/NS/NS	NS/PS/Z	NS/PS/NS	NM/PM/Z	NB/PM/PM	NB/PS/PS
PB	Z/Z/PS	NS/Z/Z	NM/PM/Z	NM/PM/Z	NM/PB/Z	NB/PB/PB	NB/PB/PB

3.3 仿真模型

利用 Matlab/Simulink 将模糊自适应 PID 控制器加入拖拉机机体侧倾角控制系统及力矩陀螺螺旋进角控制系统,仿真模型见图 11、图 12、图 13。

其中,力矩陀螺螺旋进角控制系统包含电流内

环、转速外环,转速外环使用模糊 PID 控制。仿真中,车体 $J = 100 \text{ kg/m}^2$, BLDCM 参数设定为: $R_s = 0.5 \text{ } \Omega, L_s = 0.01 \text{ H}$, 转子磁链 $\varphi_f = 0.1194 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 0.0027 \text{ kg/m}^2$, 摩擦系数 $B = 0$, 极对数 $n_p = 1$, 初始转速 $\omega_i = 0$, 初始转子角度 $\theta = 0^\circ$ 。

表 2 旋进角模糊控制器参数 $K_P/K_I/K_D$ 模糊规则

e/ec	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/PS	PM/NB/Z	PM/NM/Z	PS/NM/Z	PS/Z/PB	Z/Z/PB
NM	PB/NB/NS	PB/NB/NS	PM/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NS/Z	Z/Z/PB	Z/Z/PB
NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NS	Z/Z/Z	NS/PS/PS	NM/PS/PM
Z	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/Z	NM/PS/PS	NM/PM/PM
PS	PS/NS/NB	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z	NM/PM/PS	NM/PM/PS
PM	Z/Z/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/Z	NM/PB/PS	NB/PB/PS
PB	Z/Z/PS	Z/Z/Z	NS/PS/Z	NM/PM/Z	NM/PB/Z	NB/PB/PB	NB/PB/PB

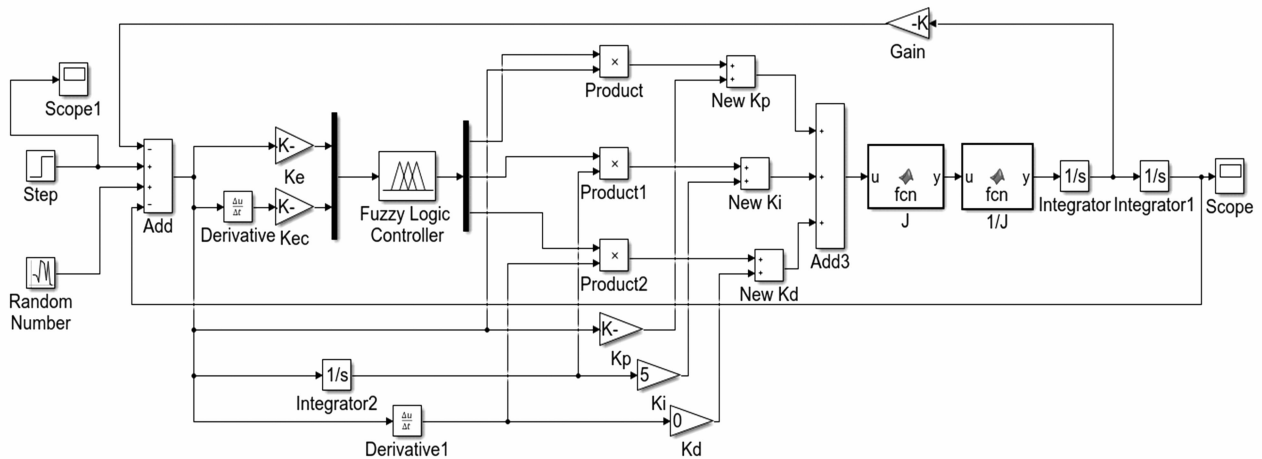


图 11 拖拉机机体侧倾角控制系统及侧倾角控制器仿真模型

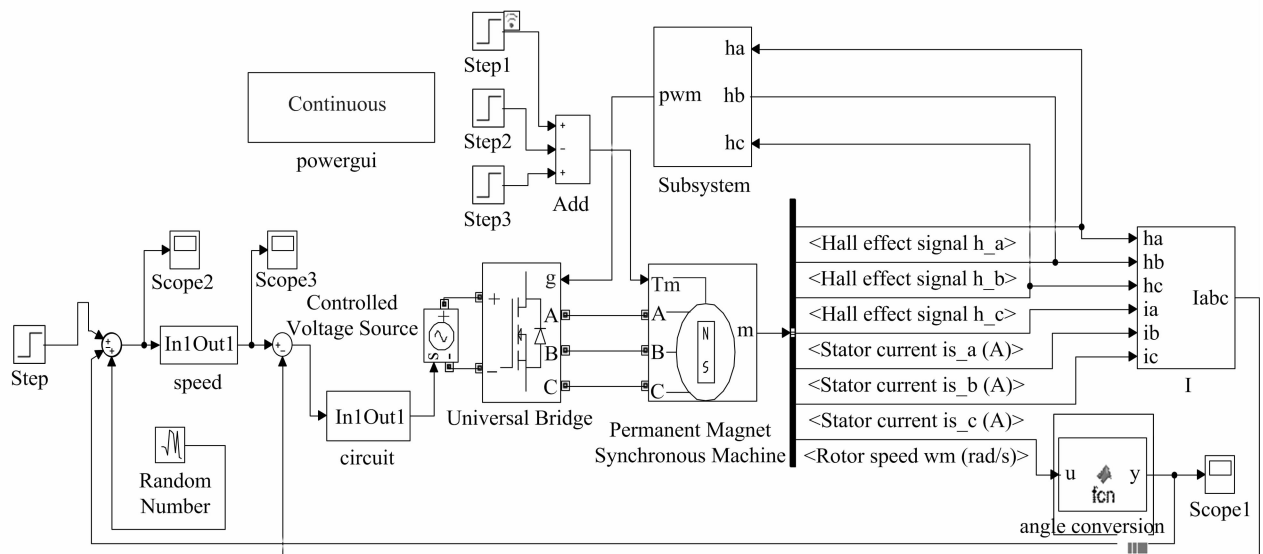


图 12 力矩陀螺进角控制系统仿真模型

4 仿真及抗干扰分析

在 Matlab/Simulink 中对拖拉机机体侧倾角控制系统仿真,采样时间为 1×10^{-4} s,仿真时间为 2 s,设置初始侧倾角度为 15° ,初始输入角度为 0° (平衡位置)。在 Matlab/Simulink 中对力矩陀螺螺旋

进角控制系统仿真,采样时间为 1×10^{-4} s,仿真时间为 0.4 s。设置初始输入转速 1 000 r/min,初始负载 0.3 N,在 0.2 s 处将输入转速变更为 2 000 r/min。设置初始输入转速 1 000 r/min,初始负载 1 N,在 0.1 s 将负载减至 0.3 N,在 0.3 s 将负载加至 2 N。

表 4 转速突变后旋进角速率重要参数对比

项目	控制策略	上升时间 (s)	超调量 (%)	峰值时间 (s)	调节时间 (s)	振荡持续时间 (s)
BLDCM 速度环(0 ~ 1 000 r/min)	PID	0.017	23.00	0.043	0.075 2	无
	模糊 PID	0.020	10.45	0.039	0.045 2	无
	PID(noise 3)	0.036	7.20	0.063	0.066 7	0.17
	模糊 PID(noise 3)	0.026 7	7.90	0.047 6	0.051 0	无
BLDCM 速度环(1 000 ~ 2 000 r/min)	PID	0.033	-1	0.250	0.045 0	0.06
	模糊 PID	0.034	0	0.252	0.046 8	无
	PID(noise 3)	0.217	1.5	×	0.077 0	0.077 s 后持续
	模糊 PID(noise 3)	0.040	0	×	0.055 0	无

从图 16、表 5 可以看出,对于力矩陀螺螺旋进角角速率,在外干扰作用及 0.1 s 及 0.3 s 发生负载突变的情况下,模糊 PID 最大偏移量绝对值较 PID 少了 27%,且相比于 PID 基本消除了振荡现象。

综上所述,对于拖拉机机体侧倾角控制系统、力矩陀螺螺旋进角控制系统,模糊 PID 控制器相比于 PID 控制器具有更高的准确性、快速性及稳态精度。

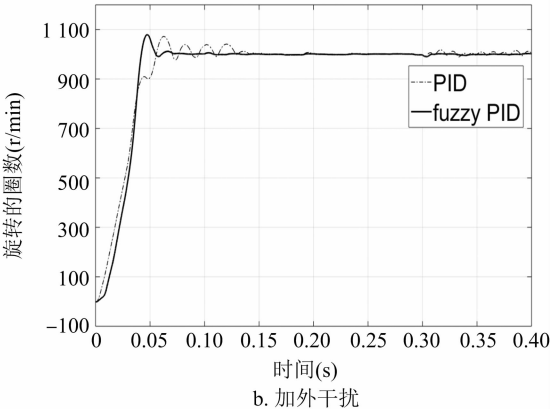
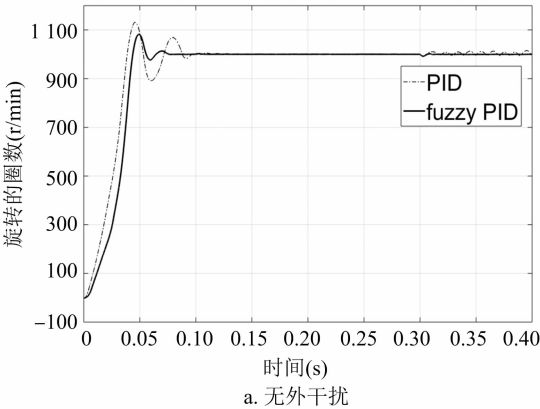


图16 负载突变后的转速对比曲线

表 5 负载突变后旋进角速率重要参数对比

项目	控制策略	无外干扰		noise 3	
		最大偏移量 (r/min)	振荡持续时间 (s)	最大偏移量 (r/min)	振荡持续时间 (s)
BLDCM 速度环(1 ~ 0.3 N)	PID	5	0.045	39	0.045
	模糊 PID	3	无	6	无
BLDCM 速度环(0.3 ~ 2 N)	PID	11	持续	18	持续
	模糊 PID	-8	0.01	-10	0.01 s 后消失

5 结论

本研究设计了一种基于反馈线性化方法的两轮自平衡拖拉机控制方法,针对所设计的响应过程,为拖拉机机体侧倾角控制系统、力矩陀螺螺旋进角控制系统设计了模糊 PID 控制器,并进行 Matlab/Simulink 模型仿真,仿真结果表明,在存在外界干扰的情况下,所设计的模糊 PID 控制器能有效地保证拖拉机控制系统的稳态精度,提高控制系统的鲁棒

性,为研究两轮自平衡拖拉机控制系统提供了方向。

参考文献:

[1] 高辉松,王珊珊,朱思洪. 电动拖拉机驱动力与传动效率特性试验[J]. 农业机械学报,2008,39(10):40-43,58.
[2] 黄用华. 前轮驱动自行车机器人建模与几种平衡运动控制研究[D]. 北京:北京邮电大学,2011.
[3] Åström, Karl J, Klein R E, et al. Bicycle dynamics and control: adapted bicycles for education and research[J]. IEEE Control Systems Magazine,2005,25(4):26-47.

姚永亮,沈 鹏,魏光程,等. 基于 Creo 的仿生马铃薯培土器设计及仿真分析[J]. 江苏农业科学,2020,48(12):222-225.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.12.046

基于 Creo 的仿生马铃薯培土器设计及仿真分析

姚永亮¹, 沈 鹏¹, 魏光程¹, 沈东华¹, 郑美英^{1,2}, 孔 皓¹, 宁旺云¹

(1. 云南农业大学机电工程学院, 云南昆明 6502012; 2. 辽宁工程职业学院, 辽宁铁岭 112000)

摘要:针对云南省丘陵山地中马铃薯种植区地形复杂、土壤黏性较大、培土阻力大等特点,在现有市场培土器的基础上对其进行仿生优化设计,目的是为了减小培土过程中的阻力,降低微耕机功率消耗。前期工作包括对马铃薯种植区的耕作条件及土壤相关数据的采集,以及农机市场的调研等。然后利用 Creo 软件对培土器进行三维建模,进行导曲线拟合优化,添加仿生凸包。该培土器的设计适用于 60~75 cm 的垄距作业,通过仿生优化之后,有效减小了土壤的黏附,降低了 450 N 的培土阻力,减阻率达到 37.5%,培土效果符合相关的马铃薯种植农艺要求。

关键词:Creo 建模;导曲线拟合;仿生凸包;培土器;马铃薯

中图分类号:S224.1⁺6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)12-0222-04

马铃薯是我国继小麦、水稻、玉米之后的第四大作物^[1-2],也是云南省传统的种植作物。在马铃薯的种植过程中,中耕培土作业是必不可少的环节,培土质量的好坏直接关系着马铃薯的生长和质量^[3]。云南省农用地多为丘陵山地,马铃薯种植区表现地块小、地形复杂等特点,兼之云南省黏重土壤面积高达 245 hm²,这种土壤因其含水率的不同而表现出不同的性状:当含水率高时,土壤黏性增大,容易产生壅土,同时使得培土部件的黏附增大;当土壤干燥时,容易结块,又使得挖掘碎土阻力增大^[4]。这些因素使得大型农机无法适用,而小型农机却又存在动力不足等问题。因此对马铃薯培土器进行优化设计,以实现培土过程中的减黏降阻就

显得尤为重要。

云南省马铃薯栽培模式也不尽相同,依据不同区域特点、种植习惯等因素主要形成了垄作、平作、单垄单行、单垄多行等种植模式,并且人工起垄占很大比重,垄行也很难有统一标准,因此培土器很难有固定的类别。笔者所在课题组设计了一种马铃薯培土器,适用于单垄单行、垄距为 60~75 cm 的种植模式。

1 整体结构及工作原理

1.1 总体结构设计

马铃薯培土器结构如图 1 所示。该培土器主要由左右侧板、仿生凸包、支撑板、底板以及深度调节杆组成。整体结构简单紧凑,各零件之间通过焊合连接在一起。培土器通过深度调节杆与微耕机的牵引机架相连接。

1.2 工作原理

马铃薯培土器主要用于马铃薯的中耕管理阶段,一般来说整个中耕管理阶段需要 1~2 次培土。

收稿日期:2019-07-19

基金项目:云南省重大科技专项(编号:2018ZC001-303)。

作者简介:姚永亮(1994—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事农业机械方面的研究。E-mail:970523449@qq.com。

通信作者:宁旺云,教授,硕士生导师,主要从事农业机械方面的研究。E-mail:wangyunn@126.com。

[4]熊宇聪,张 猛. 基于反馈线性化的两轮自平衡汽车侧倾动态响应控制[J]. 制造业自动化,2018(7):138-143,153.

[5]Tamayo-León S, Pulido-Guerrero S, Coral-Enriquez H. Self-stabilization of a riderless bicycle with a control moment gyroscope via model-based active disturbance rejection control[C]//2017 IEEE 3rd colombian conference on automatic control (CCAC). IEEE, 2017:1-6.

[6]李 勇,耿建平,林群熙,等. 基于双飞轮陀螺效应的两轮自平衡机器人的研制[J]. 机电产品开发与创新,2015,28(6):14-

16,28.

[7]李 静. 前轮驱动自行车机器人建模与自适应控制策略研究[D]. 北京:北京邮电大学,2017.

[8]周龙加. 一种基于陀螺进动效应的稳定装置研制[J]. 机电信息,2016(24):100-101.

[9]刘慧博,王 静,吴彦合. 无刷直流电机模糊自适应 PID 控制研究与仿真[J]. 控制工程,2014,21(4):583-587.

[10]王 蔚,张永科,刘鹏鹏,等. 无刷直流电机模糊 PID 控制系统研究与仿真[J]. 计算机仿真,2012,29(4):196-199,254.