

水田激光平地机非线性水平控制系统*

陈君梅¹ 赵祚喜² 陈嘉琪² 俞龙² 叶娟¹

(1. 广东科学技术职业学院, 广州 510640; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备省部共建教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为使水田激光平地机的平地铲在受到干扰偏离水平位置时能够迅速回复水平, 设计了基于角速度-偏差角度的非线性 PID 控制器的平地铲调平控制系统, 使平地铲零角速度渐近回到水平位置, 实现零超调, 提高了平地机水平控制精度和稳定性。根据平地机的机械液压系统结构搭建了平地铲调平系统动力学模型, 推导了传递函数, 基于剩余路径确定允许最小角度的非线性控制, 设计了水平调平闭环控制系统方案。采用标准姿态航向参考系统 AHRS 检测平地铲实时倾角与角速度, TMS320F28035 芯片作为控制器, 设计制作了水平控制系统电路, 依据传感器数据通过非线性 PID 位置控制算法计算出控制量, 并通过 PWM 驱动电路实现平地铲水平控制。在华南农业大学研制的水田激光平地机上, 进行了实验室测试与田间试验验证。测试结果表明, 水平控制系统响应迅速, 实现了平地铲渐进逼近水平位置的控制效果, 超调小, 稳态误差趋于零, 平地铲基本控制在水平位置 $\pm 1^\circ$ 以内, 平地铲工作稳定。

关键词: 水田激光平地机 水平控制 非线性 PID 位置控制

中图分类号: F323.3; S222.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0079-06

引言

农田表面平整状况对灌溉质量和效率有着重要影响, 世界范围内的大量研究表明, 土地被平整后可提高作物产量 20% ~ 30%, 可节水 30% ~ 50%, 水田土地利用率提高 7%, 并可减少农药、化肥和除草剂的使用量^[1-5]。

激光平地技术是目前最先进、最有效的土地精平技术, 该技术利用激光控制安装在拖拉机上的铲运设备的升降, 实现农田精细平整^[1]。水田表面往往为松软的泥浆层, 难以直接承受平地铲质量, 不宜像旱地平地机一样用牵引连接方式, 而是适宜采用悬挂方式^[6-7]。水田硬底层通常高低不平, 会导致平地铲及拖拉机机体倾斜, 平地铲在工作过程中难以保持水平; 悬挂方式的平地铲与拖拉机本身之间的运动易相互影响, 因此水田平地机具有特殊性, 其平地铲控制难度高于旱地用途的平地机。水田平地机除了平地铲入土深度调节控制(即高程控制)外还需要一种带自动调平功能的水平控制系统^[7-8], 以保证机身颠簸时平地铲仍能保持水平。因此, 水田激光平地机既要保证平地铲高低可调, 又要保证平地铲水平可控, 才能达到最佳的平地效果。

华南农业大学研发的水田激光平地机水平控制

系统采用 MEMS 陀螺仪和加速度计通过信息融合检测平地铲的水平倾角, 通过脉冲宽度调节普通电磁阀实现平地铲水平闭环控制。为了避免平地铲在水平位置振荡, 融合方案的水平控制系统采用了带死区的 PD 控制^[7], 以增加稳定性, 虽然算法简单有效, 但死区的存在难以进一步提高水平控制精度。在水田激光平地机推广试验过程中发现, 当平地机长时间振动时, 陀螺仪长时间积分会产生较大的测量误差, 融合算法对加速度计和陀螺仪的切换算法也不能很好地确定。因此, 融合方案的水平控制系统仍存在控制精度及稳定性问题, 亟待解决。

水田激光平地机水平控制系统的控制要求是: 平地铲在非水平位置时能够迅速回位且尽量减少超调和避免振荡。若能消除超调和振荡, 则无须设置控制死区, 设置控制死区带来的控制精度问题便不复存在。传统的 PID 控制算法, 有成熟的参数整定方法, 实现简单, 但从理论上很难实现无超调效果^[9-10]。非线性 PID 控制器可以改善传统 PID 控制器的快速性和稳定性, 已经得到越来越广泛的应用^[11]。本文借鉴文献[10]电机位置控制中的非线性 PID 控制算法, 在水田激光平地机上设计并实现基于非线性 PID 控制器的水平控制系统, 对平地铲受到的干扰快速响应, 并控制平地铲快速回位渐进

逼近水平位置,稳态误差趋于零,提高系统的水平控制精度及稳定性。

1 平地铲水平机构动力学模型搭建

本文设计的水平控制系统应用于如图1所示的水田激光平地机,采用拖拉机或插秧机作为平地机的动力。平地机包括水平控制系统、高程控制系统和平地铲折叠系统3部分。水平控制系统主要由机械、液压、电控3部分组成:机械结构包括可折叠的平地铲、四杆连接机构;液压部分由油泵、液压油缸、比例换向阀、卸荷阀、背压阀、溢流阀等组成;电控单元安装在水平控制器安装盒中,由主控芯片、水平倾角测量传感器、驱动电路等组成。高程系统主要包括高程接收器和高程油缸,平地铲折叠系统包括平地铲伸展油缸等。

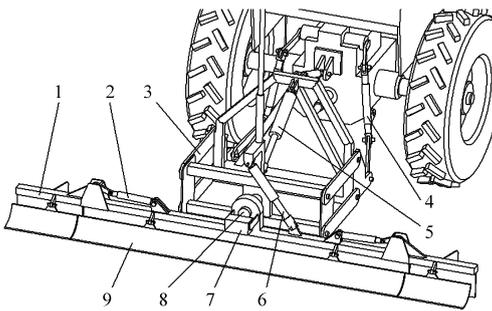


图1 水田激光平地机总体结构简图

Fig. 1 Overall structure of the laser-controlled paddy field leveler

1. 平地铲 2. 平地铲伸展油缸 3. 中间框架连接机构 4. 拖拉机悬挂及提升机构 5. 高程油缸 6. 水平控制油缸 7. 水平控制器安装盒 8. 平地铲心轴 9. 拖板

平地铲的水平控制、高程控制和折叠系统均采用液压控制,该3条控制回路均利用卸荷溢流阀和蓄能器组成的蓄能器卸荷回路同时提供液压^[12]。其中水平控制系统使用比例换向阀为水平油缸提供油路换向,比例换向阀油路系统主要由比例换向阀、卸荷阀、背压阀、溢流阀等4部分组成,如图2所示。

根据水田激光平地机的机械液压系统结构搭建平地铲水平机构动力学模型,如图3所示。

2 基于非线性PID位置控制器的水平控制系统方案设计

2.1 平地铲物理系统传递函数推导

伺服阀闭环控制系统通常有2个较低的谐振频率(二阶系统)限制了系统的动态响应速度,一处是阀本身,另一处就是油缸-负载处。一般来说阀本身谐振频率较高(即响应较快,可简单视为线性环节),因此制约系统动态响应特性的主要因素就是

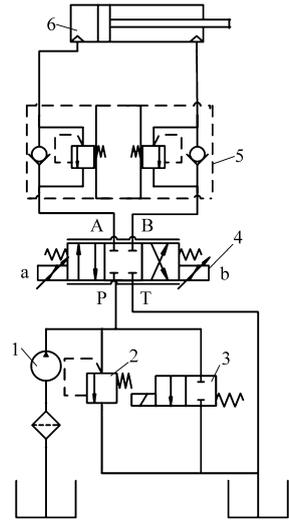


图2 比例换向阀油路系统

Fig. 2 Hydraulic system of proportional reversing valve

1. 油泵 2. 卸荷阀 3. 溢流阀 4. 比例换向阀 5. 背压阀 6. 油缸

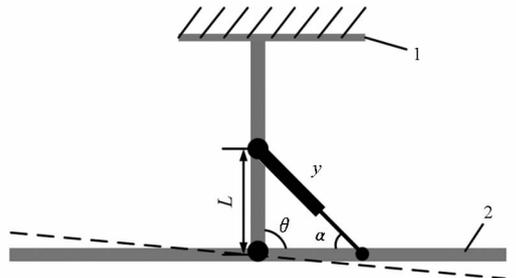


图3 平地铲水平机构动力学模型示意图

Fig. 3 Diagram of the physical model of land-leveling plow

1. 机身 2. 平地铲

油缸-负载^[13]。对于平地机水平控制系统也是如此。

将系统分为阀与油缸-负载2个串联环节进行分析。阀本身视为比例环节(输入电流*i*,输出液压油流量 Q_L),增益记为 k_o ,记油缸-负载环节的传递函数为 $G_2(s)$ (输入为 Q_L ,输出为平地铲倾角 θ ,图3中 θ 与实际倾角有 90° 之差,不影响结果)。当不考虑油缸-负载动态特性影响时, $G_2(s) = 1/(As)$ 即为积分环节,其中 A 为油缸活塞面积, s 是拉普拉斯算子。由于平地铲转动惯量大,结构原因又致使橡胶油管较长,且控制要求高,实践表明不能这样简单处理。当考虑油缸-负载动态特性影响时,则须考虑液压油的压缩性,即有效体积弹性模量 β_e ^[14]。参考图3平地铲动力学模型,可列出微分方程为

$$\begin{cases} \frac{dp_L}{dt} = \left(Q_L - A \frac{dy}{dt} \right) \frac{\beta_e}{V_1 + Ay} \\ A p_L L \sin \alpha = J \ddot{\theta} + c \dot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$p_L = p_1 - p_2$$

$$Q_L = (Q_1 + Q_2) / 2$$

式中 p_L ——压力 Q_L ——流量
 p_1 ——油缸活塞左侧压力
 p_2 ——油缸活塞右侧压力
 A ——活塞面积 y ——油缸伸缩量
 V_1 ——阀至油缸入口之间的容积
 β_e ——油压体积弹性模量
 J ——平地铲转动惯量 c ——阻尼系数

L 、 α 、 θ 如图 3 所示。

假定工作中平地铲倾角只围绕平衡位置作小范围摆动,以水平位置为平衡点,根据平地铲动力学模型,可以推导出 y (油缸伸缩量)与 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\theta$ 呈线性关系,于是将式(1)进行拉氏变换可以求得平地铲机械液压系统传递函数为

$$G_2(s) = \frac{k}{s^2(J's^2 + c's + 1)} \quad (2)$$

式中 J' 、 c' —— J 、 c 乘上变换系数得到的结果
 k ——增益系数

2.2 基于非线性控制器的水平控制方案设计

平地机平地铲水平控制系统是机电液一体闭环控制系统。为了提高平地铲水平控制精度,减少机器磨损,控制算法需确保其工作过程中响应迅速,超调量尽量小。本文设计的非线性 PID 水平控制方案,目标是优化设置 PID 参数,使闭环阶跃响应实现严格渐进逼近目标 θ_{ref} ,另一方面在大干扰情况下(例如平地铲一端碰到硬底层,另一侧悬空等)仍需保证尽量不超调。前者是线性控制问题,后者则涉

及非线性控制问题。

阶跃输入时平地铲渐近逼近目标属于线性优化控制问题,目的是优化设置 P、I、D 控制参数,使响应时间最短。有了闭环传递函数(P、I、D 作为参数),通过阶跃响应时间曲线,其水平渐近线及 Y 轴之间包围面积最小即可求得,如保证闭环归一化传递函数的根为(0,1)之间,即可求得优化的 P、I、D 控制参数^[10]。

设计的第 2 步要求是在大干扰情况下仍无超调,涉及非线性算法。文献[10]提出一种基于剩余路径(即距目标位置之差 $\Delta\theta$ 的绝对值)确定允许速度最大值 ω_M 的控制方法,即 $|\omega_M| = f(|\Delta\theta|)$, f 是根据电机拖动系统传递函数确定的均方根曲线

$$|\omega_M| = f(|\Delta\theta|) = \sqrt{\frac{2T_{MAX}|\Delta\theta|}{J_M}} \quad (3)$$

式中 J_M ——电机拖动系统转动惯量
 T_{MAX} ——电机容许扭矩

式(3)的出发点是保证足够的制动距离以实现零超调^[10]。

结合本设计控制要求和建立的物理系统模型及平地铲机械液压系统传递函数,基于剩余路径确定允许最小角度原则设计的非线性控制,使阶跃响应为严格非周期(响应最快),大干扰时响应尽量无超调,故设计基于角速度-偏差角度非线性关系的 PID 位置控制器的水平闭环控制系统方案,其框图如图 4 所示。为方便起见图中仍用 J 、 c 表示 J' 与 c' 。

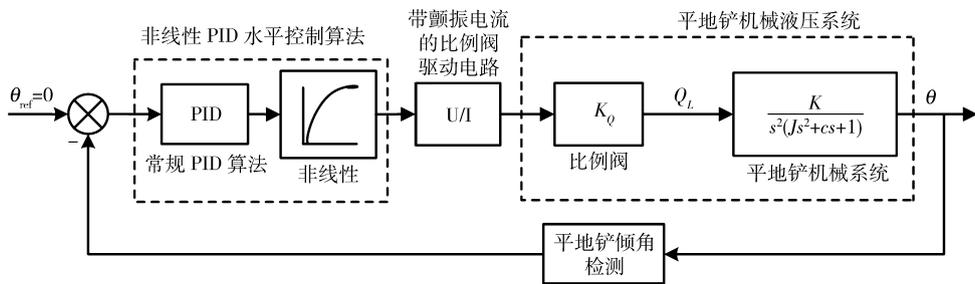


图 4 基于非线性 PID 位置控制器的水平控制系统方案框图

Fig. 4 Diagram of level control system based on nonlinear PID position controller

3 水平控制系统的设计与实现

3.1 水平控制系统电路设计

水平控制系统需完成水平控制算法、倾角测量算法以及数据采集存储、人机交互等功能。设计平地机平地铲水平控制系统结构框图如图 5 所示。

选用美国 TI 公司的 TMS320F28035 芯片^[15] 作为控制器,通过串口连接姿态航向参考系统 AHRS, AHRS 传感器可测量被安装物体的欧拉方位角(航向、俯仰与横滚角),数字输出,高速高精度^[16]。将

AHRS 传感器的 Y 轴顺着平地铲长度方向安装,测得的俯仰角即为平地铲水平倾角。依据这些传感器数据通过非线性 PID 位置控制算法计算出控制量,并通过 PWM 驱动电路实现平地铲水平控制。

比例阀电磁铁的阀心位移或推力正比于流经线圈的电流,若该电流固定不变,阀心位置也固定不动。当电流改变时,阀心要克服静摩擦,从静止状态开始动作,会产生所谓的“粘滞”效应,增大了滞后,降低了响应速度和灵敏度^[17]。为此,需给阀心施加一个一定频率和幅度的振动信号,即颤振信号,使其

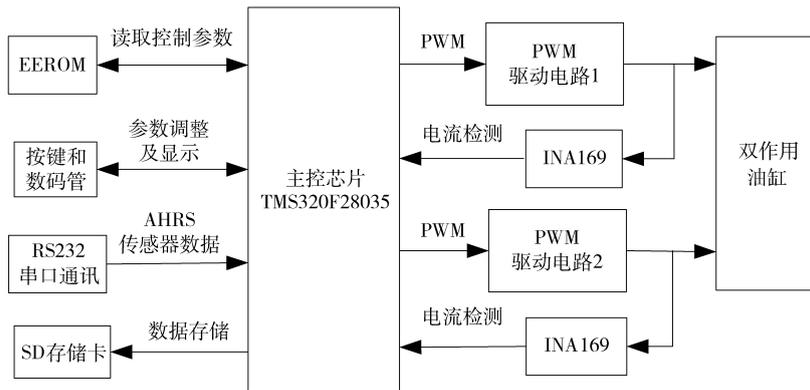


图5 水平控制系统结构框图

Fig. 5 Structural diagram of the leveling control system

始终处于微小的运动状态,将静摩擦转换为动摩擦,从而改善其响应速度和响应灵敏度,减小滞后。完整的带颤振电流的比例换向阀驱动电路如图6所示。

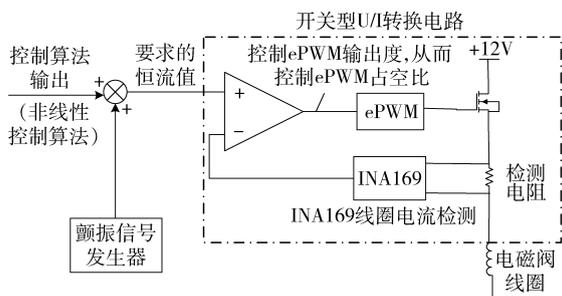


图6 带颤振电流的比例换向阀驱动电路

Fig. 6 Driving circuit of proportional flow valve with flutter current

比例换向阀电磁线圈电流决定了允许的液压油流量,因此电磁线圈需输入受控电流源。利用F28035内部自带比较器和PWM发生器,根据PWM斩波稳流控制电路原理,利用INA169测量比例阀线圈电流,作为反馈,输入到内部比较器负端,与内部比较器正端电流设置信号值进行比较,输出触发PWM发生器的脉冲输出,控制PWM的占空比,从而控制场效应开关管的开闭,使电路输出稳定电流。这种开关型的U/I转换电路结构简单,效率高。

EEROM用于储存数据,开机后从中读取控制参数;数码管用于显示当前测量角度和控制参数等,通过按键改变显示模式和参数调整,两者组成简单的人机界面;SD存储卡用于数据存储,实时记录测量和控制的数据,便于分析;RS232串口主要用于接收AHRS传感器发送的数据。

3.2 水平控制系统硬件实现

根据水平控制系统结构框图,制作水平控制系统电路板,如图7所示。

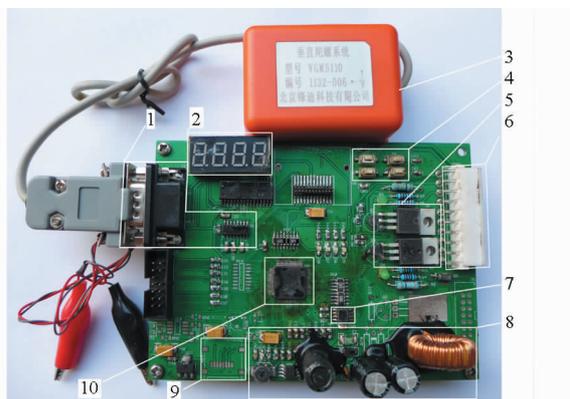


图7 水平控制系统实物图

Fig. 7 Picture of leveling control system

- 1. 串口 2. 数码管 3. AHRS传感器 4. 按键 5. 电磁阀驱动
- 6. 接头 7. EEROM 8. 电源 9. SD卡座 10. TMS320F28035

3.3 水平控制系统算法流程

结合以上设计,编写水平控制系统算法流程,如图8所示。

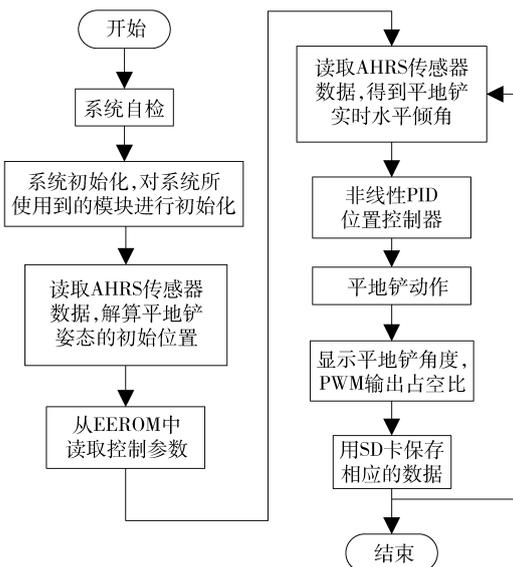


图8 水平控制系统算法流程

Fig. 8 Algorithm program flowchart of the leveling control system

4 水平控制系统试验

4.1 平地铲室内悬空阶跃试验

选取室内阶跃响应试验来检验水平控制系统的性能。设置好非线性位置控制算法的相应控制参数,将平地铲升高悬空离地一定高度(保证试验过程中平地铲离地),控制系统采样频率为 10 Hz。将平地铲由 10° 阶跃调至 20° (可以是其他阶跃输入),相当于闭环系统加上 10° 的阶跃输入,用高精度 AHRS 测量闭环系统调节过程平地铲实际倾角。试验过程中用控制系统直接进行实时数据记录,图 9 为一次典型的试验结果。

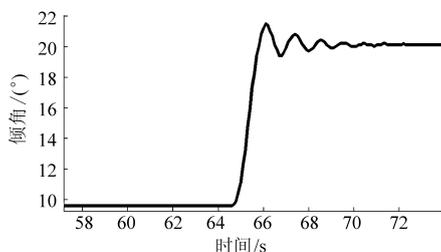


图 9 阶跃响应试验结果

Fig. 9 Test results of step response

由图 9 可见,平地铲稳态误差较小,小于 0.1° 。由于试验中阶跃输入较大、机身有振动、各铰接处有间隙等原因,阶跃响应仍有几次衰减超调出现,呈现欠阻尼的二阶系统的阶跃响应波形,最大超调率约 10%,过渡时间(到终值的 5% 范围所耗的时间)约 2 s。考虑到本试验过程中为悬空状态,而实际工作时水田中受到泥土的阻尼作用,实践证明振荡现象将有所减轻。以上结果表明,本文设计的非线性位置控制算法,非线性振荡较小,超调较小,稳态误差趋于零。

4.2 水平控制系统水田作业试验

将本文设计的水平控制系统安装在华南农业大学研制的水田激光平地机上,于 2013 年 2 月在华南农业大学试验田进行平地作业试验。图 10 所示曲线为平地机平地作业过程中约 1 min 的平地铲水平倾角记录结果,图中数据均值约为 0° ,均方差约 0.7° 。从长期记录结果来看,本设计的水平控制系统可以保持平地铲倾角在 $\pm 1^\circ$ 以内。平地机的平地铲幅宽为 3 m,则平地铲起伏度为 2.6 cm,可保证田面起伏不超过 3 cm,符合平地机平地要求。此后,安装该水平控制系统的水田激光平地机在广东海丰的海纳现代有机农业园区、海南三亚的隆平高科南

繁基地有限公司,湖南株洲的现代农装株洲联合收割机有限公司、湖北潜江的海纳白鹭湖农业有限公司和泰国的稻米司下属公司等推广示范区进行了约 200 hm^2 水田的生产与推广试验。图 11 为水田激光平地机于 2013 年 3 月在广东海丰示范区进行生产试验。生产试验结果表明,水平控制系统工作稳定,激光平地机比人工平地效率提高数倍,平地精度提高 50% 以上。

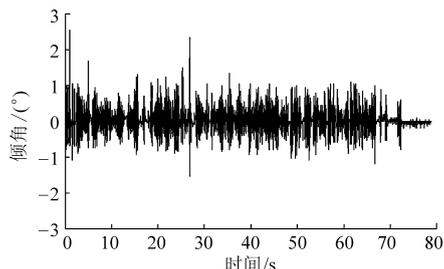


图 10 水田作业的平地铲倾角曲线

Fig. 10 Angle curve of working land-leveling plow on paddy field



图 11 示范中的水田激光平地机

Fig. 11 Laser-controlled paddy field leveler in action

5 结论

(1) 实现了基于非线性 PID 位置控制的水平控制系统设计,平地铲超调小,稳态误差趋于零,提高了水平控制系统的精度和稳定性。

(2) 设计的水平控制系统已应用在水田激光平地机上,并在南方地区的多个推广示范区使用,水田作业时平地铲基本控制在水平位置 $\pm 1^\circ$ 以内,平地铲工作稳定。

(3) 推导的平地铲机械液压系统传递函数模型做了一些简化假设,例如拖拉机机身是无振动的,且拖拉机行走为匀速直线运动等,这样可将机身视为固定不动,以便简化模型推导,实际上这一点是难以保证的,这导致模型有一定误差。

参 考 文 献

- 1 刘效勇,卢佩. 激光平地技术在农业生产中的应用[J]. 现代农林科技, 2010(23): 56 - 57.
- 2 苏焱,王永辉. JGP-2500 型激光平地机工作机理研究[J]. 农业科技与装备, 2012(6): 36 - 37.

- Su Yan, Wang Yonghui. Research on the mechanism of JGP-2500 laser land scraper[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(6): 36-37. (in Chinese)
- 3 Rickman J F. Manual for laser land leveling[R]. Rice-Wheat Consortium Technical Bulletin Series 5, 2002.
- 4 白玉,张浩宇. 激光平地机的应用[J]. 农业机械, 2008(6B): 68.
- 5 刘刚,林建涵,司永胜,等. 激光控制平地系统设计与试验分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 71-74.
Liu Gang, Lin Jianhan, Si Yongsheng, et al. Development and experiment on laser controlled leveling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 71-74. (in Chinese)
- 6 李庆,罗锡文,赵祚喜,等. 采用倾角传感器的水田激光平地机设计[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 88-93.
Li Qin, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Design of a laser land leveler for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 88-93. (in Chinese)
- 7 赵祚喜,罗锡文,李庆,等. 基于 MEMS 惯性传感器融合的水田激光平地机水平控制系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 119-124.
Zhao Zuoxi, Luo Xiwen, Li Qing, et al. Leveling control system of laser-controlled land leveler for paddy field based on MEMS inertial sensor fusion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 119-124. (in Chinese)
- 8 黎永键,赵祚喜. 水田激光平地机平地铲姿态测量系统的设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 69-75.
Li Yongjian, Zhao Zuoxi. Design of attitude measurement system for flat shovel of laser-controlled land leveler for paddy field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 69-75. (in Chinese)
- 9 Katsuhiko Ogata. Modern control engineering (English edition)[M]. 5th ed. 北京:电子工业出版社, 2011.
- 10 Vukosavić S N. Digital control of electrical drives[M]. New York: Springer Science Business Media, LLC, 2007.
- 11 Zhang C J, Wang Y H. Fuzzy PID controller of high precision and its application in the temperature control[J]. Automatic Instruments, 2002, 23(7): 21-23.
- 12 孙迎远,郭国选. 液压系统卸荷回路的分析[J]. 煤矿机械, 2008, 29(8): 71-72.
Sun Yingyuan, Guo Guoxuan. Unloading loop hydraulic system analysis[J]. Coal Mine Machinery, 2008, 29(8): 71-72. (in Chinese)
- 13 Chapple P J. Principles of hydraulic system design[M]. Oxford: Coxmoor Publishing Company, 2003.
- 14 Akers A, Gassman M, Smith R. Hydraulic power system analysis[M]. London: Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- 15 Texas Instruments. TMS320F28035 user's manual [M]. Texas Instruments, 2009.
- 16 Innalabs Holding Inc. INNALABS AHRS user's manual, Revision 1.2[M]. Innalabs Holding, Inc., 2007.
- 17 朱玉田,唐兴华. 脉宽调制中的颤振算法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 214-218.
Zhu Yutian, Tang Xinghua. Dither algorithm in pulse width modulation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 214-218. (in Chinese)

Design of Nonlinear Leveling Control System for Paddy Land Leveler

Chen Junmei¹ Zhao Zuoxi² Chen Jiaqi² Yu Long² Ye Juan¹

(1. Guangdong Institute of Science and Technology, Guangzhou 510640, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A leveling control system is necessary for keeping the plow level during the laser-controlled paddy field leveler's operation. A nonlinear double closed-loop control scheme is proposed to minimize the overshooting in the controlled inclination angle, where the angular speed control and inclination angle of the plow are controlled in the inner and outer loop, respectively. The overshooting minimization is achieved by manipulating the angular speed of the plow according to the remaining path nonlinearly to the level position so that the plow approaches to the level position with zero angular speed. Also included are the hydro-mechanical plant's transfer function analysis for the leveler and the overall control system design. Such a control system was implemented incorporating AHRS (heading and heading reference system) and TMS320F28035 microcontroller, and lab and field tests with a prototype paddy land leveler show that the plow would respond to leveling error quickly, returning to the level position asymptotically with a maximum leveling deviation within $\pm 1^\circ$.

Key words: Laser-controlled paddy field leveler Leveling control Nonlinear PID position control