

马铃薯联合收获机车身调平系统设计与试验

孙永佳^{1,2} 周军¹ 李学强³ 孙宜田² 张志起² 陈刚²

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 山东省农业机械科学研究所, 济南 250100;

3. 山东思代尔农业装备有限公司, 德州 253000)

摘要: 针对马铃薯联合收获机作业时车身不能随地形起伏变化自适应平衡, 导致作业安全性低、收获损伤大、收获品质差的问题, 设计了一种马铃薯联合收获机车身调平系统, 该系统采用融合一阶惯性滤波的倾角传感器监测车身横向倾斜角度, 干扰和抖动被有效抑制; 通过车身调平机构动力学分析, 建立了系统的数学模型; 采用基于一阶惯性滤波的模糊 PID 算法控制比例阀驱动升降液压缸运动, 从而实现马铃薯联合收获机车身自动调平。对车身调平系统进行仿真分析, 结果表明: 与传统 PID 算法相比, 模糊 PID 具有更好的控制性能, 系统调节时间缩短 51.77%, 上升时间缩短 53.57%, 最大超调量减小 6.25%; 对整机控制系统进行静态和动态试验测试, 结果表明: 在坡度 $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 范围内, 系统自动调平时间小于 4 s, 最大调平误差小于 1° ; 车身在倾斜角 10° 工况下, 使用模糊 PID 控制算法自动调平时间缩短约 50%, 静态试验结果与仿真分析结果相符; 在起伏变化较大的路面以速度 3.6 km/h 行驶时, 车身倾斜角误差控制在 $\pm 3^{\circ}$ 以内, 较好地实现了马铃薯联合收获机车身自动调平控制, 满足实际作业需求。

关键词: 马铃薯联合收获机; 车身调平系统; 模糊 PID 算法; 仿真; 试验

中图分类号: S225.7⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0298-09

Design and Experiment of Body Leveling System for Potato Combine Harvester

SUN Yongjia^{1,2} ZHOU Jun¹ LI Xueqiang³ SUN Yitian² ZHANG Zhiqi² CHEN Gang²

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China

3. Shandong Sidaier Agricultural Equipment Co., Ltd., Dezhou 253000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the body of potato combine harvester cannot self-adaptive balance with the change of terrain, which leads to low operation safety, big harvest damage and poor harvest quality, a body leveling system of potato combine harvester was designed. In this system, the inclination sensor of the first-order inertial filter was used to monitor the lateral inclination of potato combine harvester body, and the interference and jitter were effectively suppressed. The mathematical model of the system was established through the dynamic analysis of the body leveling system mechanism. The fuzzy PID algorithm based on the first-order inertia filter was used to control the electromagnetic proportional valve to drive the lifting hydraulic cylinder to realize the automatic leveling of the potato combine harvester body. The simulation results of the body leveling system showed that fuzzy PID algorithm had better control performance than traditional PID algorithm, which can effectively shorten the system regulation time by 51.77%, the rise time by 53.57% and reduce the maximum overshoot by 6.25%. The static and dynamic experiment results of the whole control system showed that in the range of $-10^{\circ} \sim 10^{\circ}$ slope, the automatic leveling time of the system was less than 4 s, and the maximum leveling error was less than 1° . Under the condition of 10° incline, the auto leveling time using the fuzzy

收稿日期: 2020-07-20 修回日期: 2020-09-10

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ012)、山东省重点研发计划项目(2018CXGC0215)和山东省农机装备研发创新计划项目(2018YZ002)

作者简介: 孙永佳(1985—),男,博士生,山东省农业机械科学研究所工程师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: max212@163.com

通信作者: 周军(1975—),男,教授,主要从事智能控制系统研究,E-mail: zhoujun@sdu.edu.cn

PID control algorithm was reduced by about 50%. The static test results were consistent with the simulation results. When driving at 3.6 km/h speed on the road with great fluctuation, the error of vehicle body tilt angle was controlled within $\pm 3^\circ$. Therefore, the automatic leveling control of potato combine harvester was well realized, which met the actual operation requirements.

Key words: potato combine harvester; body leveling system; fuzzy PID algorithm; simulation; experiment

0 引言

马铃薯是我国继水稻、小麦、玉米后的第 4 大主粮,目前中国是世界上马铃薯种植面积和产量最大的国家^[1]。使用马铃薯联合收获机,不仅可以提高收获效率、缩短收获时间,而且可以减轻劳动强度、降低种薯成本^[2]。但目前的马铃薯联合收获机在收获作业时车身无法随地形起伏变化而自动调平,在坡度较大的地面作业甚至会出现翻车事故。当收获机倾斜时,马铃薯薯群向振动筛一侧挤压,使得薯群破损率变大,薯土分离效果变差,从而导致收获品质下降^[3-8]。因此,研究高效轻便、地形适应能力高的马铃薯联合收获机车身自动调平装置具有重要意义。

现有农机装备的自动调平主要通过机械、电液控制和姿态感知等技术联合实现^[9-20],如美国 John Deere 公司的坡地联合收割机^[21],采用检测装置检测车身是否倾斜,采用控制调平油缸的电液换向阀线圈通电的方式,实现车身平衡。文献[22]设计的果园升降平台自动调平控制系统,通过卡尔曼滤波处理倾角传感器实时采集的工作台倾角,采用模糊 PID 控制电磁阀驱动调平油缸运动保持工作台水平。文献[23]采用 TMS320F28035 设计调平系统控制器,通过非线性 PID 位置控制算法实现激光平地机水平控制。文献[24]设计了基于双闭环 PID 算法的丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统,通过左右摆角传感器和车身水平传感器检测车身状态,建立了系统动力学模型,并进行了仿真分析,对于液压控制的调平机构建模具有一定的参考价值。而国内的山地马铃薯联合收获机,如青岛洪珠农业机械有限公司的 4U-90LH 型马铃薯联合收获机、黑龙江德沃科技开发有限公司的 4UMS-180 型马铃薯联合收获机,在车身调节方面采用手动调节方式,收获过程中驾驶员需要根据地形情况不断调整车身状态,劳动强度大、收获效率低。

针对马铃薯收获机面临的坡地作业问题和使用现状,本文以山东省农业机械科学研究院与山东希成农业机械科技有限公司联合研制的马铃薯联合收获机为平台,设计基于模糊 PID 算法的马铃薯联合收获机车身调平系统,并通过仿真分析和试验验证

该系统性能,以期为实现马铃薯高效低损收获奠定基础。

1 系统组成及工作原理

马铃薯联合收获机车身调平系统主要由车身调平机构和电液控制系统组成,车身调平机构如图 1 所示,液压缸缸筒端的上铰点安装在右侧车架底部,活塞端的下铰点安装在右侧支撑横梁上,通过车架升降液压缸的伸缩,控制车架的倾斜角度,从而实现马铃薯联合收获机车身调平。

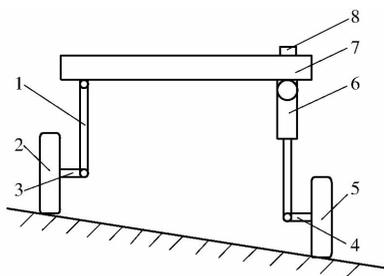


图 1 车身调平机构结构图

Fig. 1 Attitude adjustment mechanism diagram

1. 左侧支撑架 2. 左侧地轮 3. 左侧支撑横梁 4. 右侧支撑横梁 5. 右侧地轮 6. 车架升降液压缸 7. 马铃薯联合收获机车架 8. 倾角传感器

液压系统如图 2 所示,系统启动后,拖拉机液压油泵将液压油通过过滤器泵入马铃薯联合收获机的液压系统,控制系统通过倾角传感器判断车身是否倾斜。当车身保持水平时,电磁比例阀阀芯位于中位,锁住油腔,液压油通过常开的二位二通电磁换向阀流回油箱;当判断出车身处于倾斜状态需要进行调平控制时,控制系统输出信号电流控制三位四通电磁比例阀开口方向和大小,并关闭电磁换向阀,液压油从液压缸无杆腔(有杆腔)流入,从有杆腔(无杆腔)流回油箱,推动液压缸向上(向下)运动,从而控制车身朝左(右)倾斜方向运动,实现马铃薯联合收获机车身自动调平。

2 硬件系统设计

控制系统的 ECU 选用意法半导体 STM32F4 系列的 STM32F407 作为微处理器,该芯片采用 Cortex-M4 内核,集成硬件 FPU 单元以及 DSP 指令集,主频高达 168 MHz,内置 DMA 控制器、CAN 总线控制器、

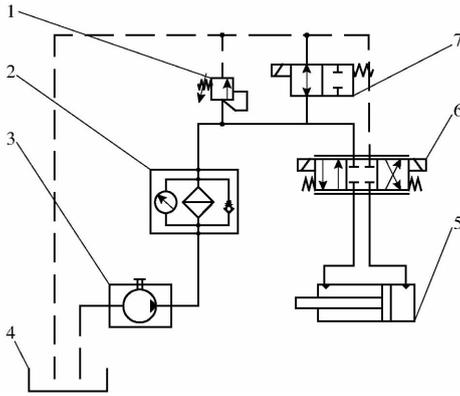


图2 液压系统图

Fig. 2 Hydraulic system diagram

1. 溢流阀 2. 过滤器 3. 液压油泵 4. 液压油箱 5. 车架升降液压缸 6. 电磁比例阀 7. 电磁换向阀

12位 ADC/DAC、看门狗电路等^[25], 满足系统对倾角传感器信号快速采样和电磁阀精准驱动的需求, 控制系统的核心硬件电路包括倾角传感器采样电路和电磁阀驱动电路。

2.1 倾角传感器采样电路

马铃薯联合收获机作业过程中, 车身会随着地形起伏变化而左右倾斜, 为建立准确的车身调平控制模型, 选用北京瑞芬星通科技有限公司的 HCA510T 型单轴电压输出型倾角传感器, 通过将倾角传感器安装在右侧升降液压缸上方的车架来测量车身相对于水平地面的倾斜角度, 传感器的角度测量范围为 $\pm 30^\circ$, 输出电压范围为 $0 \sim 5\text{ V}$, 水平 0° 时输出 2.5 V , 分辨率可达 0.001° , 响应时间为 0.02 s 。

对传感器信号的采样处理通过 STM32F407 处理器的内部 ADC 模块来实现, 选用长电科技的 CJ431 芯片提供 ADC 采样需要的 2.5 V 参考电压, 因此需要把倾角传感器输出的电压进行采样处理。采样电路如图 3 所示, 运算放大器为 LM258, 电阻 R1、R2、R3 和 R4 的阻值分别为 $1\text{ k}\Omega$ 、 $1\text{ k}\Omega$ 、 $2\text{ k}\Omega$ 和 $2\text{ k}\Omega$, 比例缩小系数为 $1/2$ 。STM32F407 内部 ADC 的精度为 12 位, 结合倾角传感器的角度测量范围, 最终建立采样数字值与马铃薯联合收获机车身倾斜角之间的关系模型为

$$\alpha = \frac{60}{5} \left(5 \frac{D}{2^{12}} - 2.5 \right) \quad (1)$$

式中 D ——ADC 采样处理后的数字值

马铃薯联合收获机在田间行驶时, 由于地面坑洼以及机器本身振动等因素, 造成倾角传感器输出信号值波动较大, 需要引入滤波算法对采样值进行滤波处理, 本研究采用一阶惯性滤波算法进行倾角传感器采样数据处理, 其公式为

$$Y(n) = aX(n) + (1 - a)Y(n - 1) \quad (2)$$

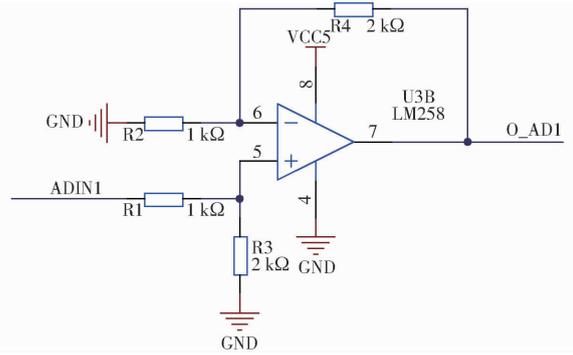


图3 ADC 采样电路

Fig. 3 ADC sample circuit

式中 $Y(n)$ ——本次滤波输出值

a ——滤波系数

$X(n)$ ——本次采样值

$Y(n - 1)$ ——上次滤波输出值

滤波处理的灵敏度和平稳度由滤波系数决定, 滤波系数较小时, 滤波较平稳, 但是灵敏度较低, 为验证一阶惯性滤波算法的效果, 通过对前期试验获取的车身倾角传感器角度原始数值进行对比处理, 分别选取滤波系数 a 为 0.3 、 0.5 、 0.7 , 滤波效果如图 4 所示, 可以发现滤波系数 $a = 0.5$ 时, 经滤波处理后倾角传感器数值曲线变得平滑, 可同时兼顾灵敏度和平稳度, 干扰和抖动被有效抑制, 满足控制需求。

2.2 电磁阀驱动电路

本文设计的车身调平机构的液压系统包含 1 个

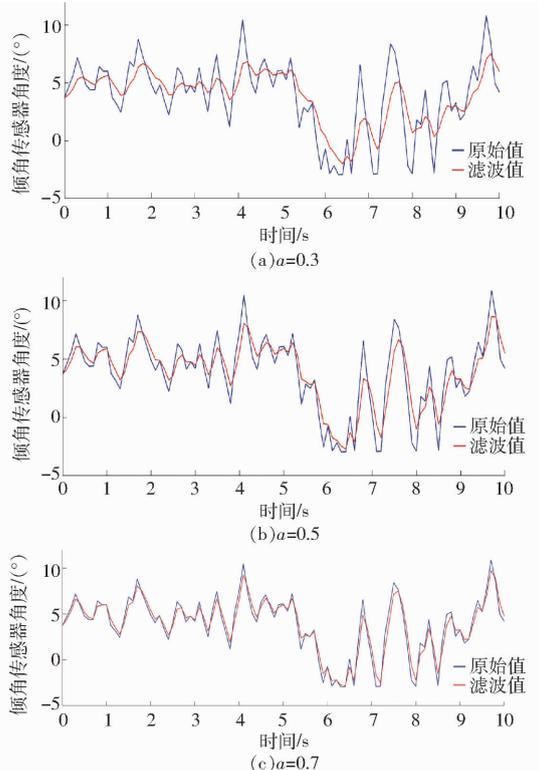


图4 传感器滤波效果对比

Fig. 4 Contrast diagram of sensor filtering effect

二位二通电磁换向阀和 1 个三位四通电磁比例阀，控制系统需要输出 1 路开关电流和 2 路比例电流，选用 ST 公司的 L9352B 作为电磁阀驱动芯片，该芯片内部集成了分立元件的驱动和监测功能，可以控制 2 路电磁开关阀和 2 路电磁比例阀，具有输出斜坡控制、短路保护、过温关闭、开路负载监测等功能^[26]，电磁阀驱动电路如图 5 所示，由于 STM32F407 处理器为 3.3 V 供电，而 L9352B 驱动芯片为 5 V 供电，因此两者之间连接时需要进行电平

转换，选用 AD 公司的四通道数字隔离器 ADUM1402 实现电平转换和信号隔离，STM32F407 处理器输出两路频率为 2 kHz 的 PWM 脉冲信号 OPWM1、OPWM2，经 ADUM1402 转换后连接到驱动芯片 L9352B 的 IN3、IN4 引脚，用于控制电磁比例阀，K1、K2 经转换后连接到 IN1、IN2 引脚，用于控制电磁开关阀，外部 8 MHz 有源晶振 U8 经过 12 位计数器 74HC4040 分频后输出 250 kHz 时钟信号到驱动芯片 L9352B 的 CLK 引脚。

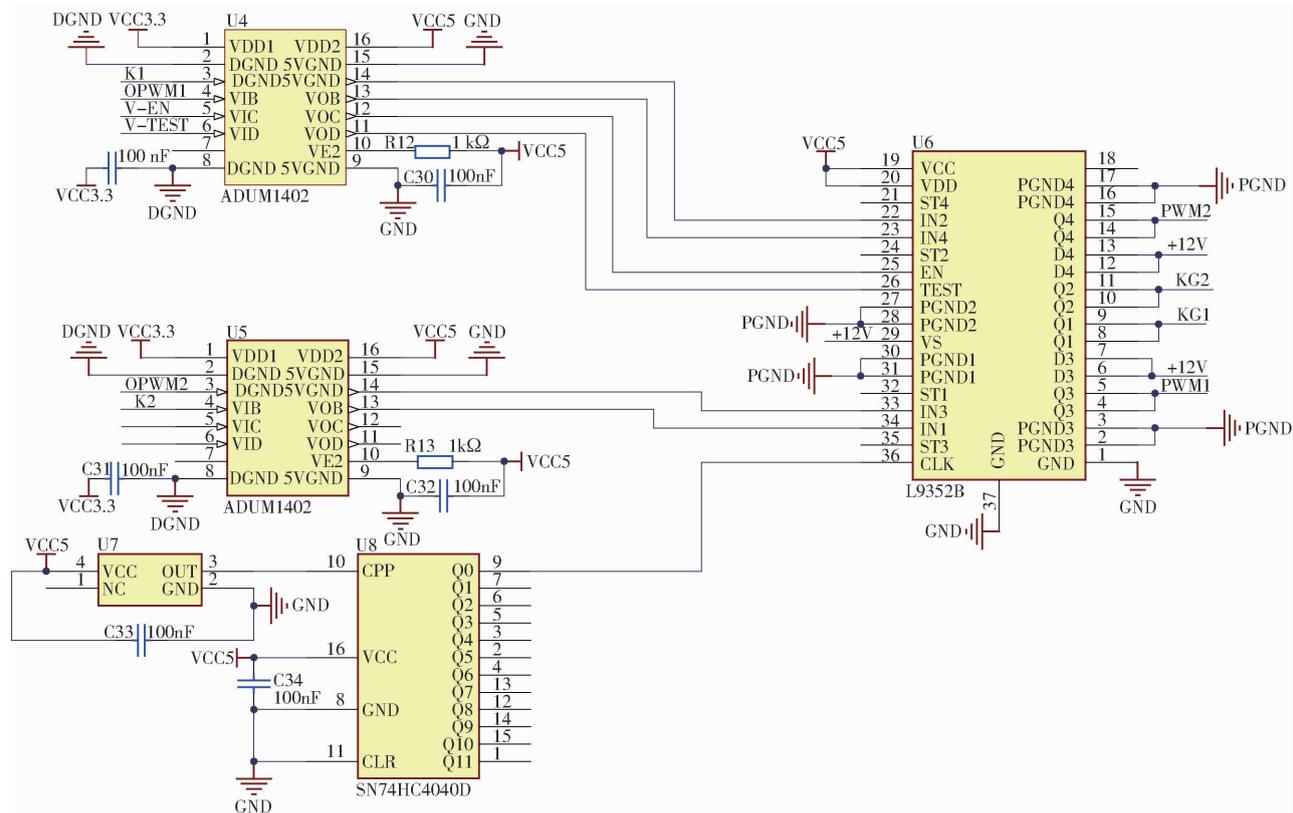


图 5 电磁阀驱动电路

Fig. 5 Solenoid drive circuit

3 系统建模

3.1 车身调平机构动态方程

忽略铰接点间隙，车身调平机构为刚性系统，其结构简化模型如图 6 所示，其中 A 点为左侧支撑架与车架的铰接点，B 点为升降液压缸的活塞端与右

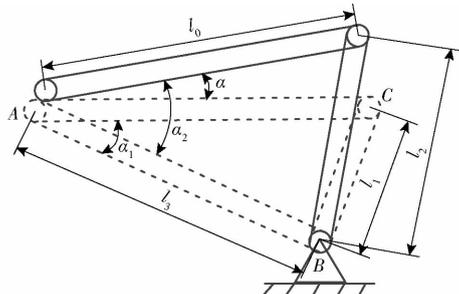


图 6 车身调平机构简化模型

Fig. 6 Simplified model of body leveling mechanism

侧支撑横梁的铰接点，C 点为升降液压缸的缸筒端与车架的铰接点。

当马铃薯联合收获机车身处于水平时，由余弦定理得

$$\alpha_1 = \arccos \frac{l_0^2 + l_3^2 - l_1^2}{2l_0l_3} \quad (3)$$

式中 α_1 ——车身处于水平时车架与 A、B 铰接点连线的夹角，($^\circ$)

l_0 ——车架长度，m

l_1 ——车身处于水平时液压缸长度，m

l_3 ——车身处于水平时 A、B 铰接点间的距离，m

当车身出现倾斜需要调平时，液压缸动作，液压缸长度由 l_1 变为 l_2 ，由余弦定理得

$$\alpha_2 = \arccos \frac{l_0^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_0l_3} \quad (4)$$

式中 α_2 ——车身倾斜时车架与 A、B 铰接点连线的夹角, ($^\circ$)

l_2 ——车身倾斜时液压缸长度, m

由式(3)、(4)可得, 马铃薯收获机车身倾斜角与车身升降液压缸的位移之间的关系式为

$$\alpha = \arccos \frac{l_0^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_0l_3} - \arccos \frac{l_0^2 + l_3^2 - l_1^2}{2l_0l_3} \quad (5)$$

3.2 液压系统微分方程

(1) 电磁比例阀线性化流量方程为

$$Q_L = K_q X_V - K_c P_L \quad (6)$$

式中 K_q ——电磁比例阀流量增益系数

X_V ——电磁比例阀阀芯开口位移, m

K_c ——流量压力系数

P_L ——液压缸油压差, Pa

(2) 车架升降液压缸流量方程为

$$Q_L = A_m \frac{dx_m}{dt} + C_{im} P_L + \frac{V_i}{4\beta_e} \frac{dP_L}{dt} \quad (7)$$

式中 A_m ——液压缸活塞有效面积, m^2

x_m ——液压缸活塞位移, m

C_{im} ——液压总泄漏系数

V_i ——液压缸进回油侧总容积, m^3

β_e ——油液有效体积弹性模量, Pa

(3) 当液压缸的输出力与负载力平衡时, 满足方程

$$A_m P_L = M_t \frac{d^2 x_m}{dt^2} + B_p \frac{dx_m}{dt} + G x_m + F_L \quad (8)$$

式中 M_t ——活塞以及与活塞相联的负载折算到活塞上的总质量, kg

B_p ——液压缸活塞和负载的粘性阻尼系数

G ——负载的弹簧刚度, N/m

F_L ——作用在液压缸活塞上的负载力, N

对式(6)~(8)进行拉普拉斯变换可得

$$x_m(s) =$$

$$\frac{K_q X_V - \frac{K_{ce}}{A_m^2} \left(1 + \frac{V_i}{4\beta_e K_{ce}} s\right) F_L(s)}{A_m}$$

$$\frac{V_i M_t}{4\beta_e A_m^2} s^3 + \left(\frac{M_t K_{ce}}{A_m^2} + \frac{V_i B_p}{4\beta_e A_m^2}\right) s^2 + \left(\frac{B_p K_{ce}}{A_m^2} + \frac{V_i G}{4\beta_e A_m^2} + 1\right) s + \frac{G K_{ce}}{A_m^2} \quad (9)$$

式中 K_{ce} ——流量总压力系数

假设系统无弹性负载, 负载的弹簧刚度 $G = 0$, 并忽略系统的阻尼, 则式(9)可简化为

$$x_m(s) = \frac{K_q X_V - \frac{K_{ce}}{A_m^2} \left(1 + \frac{V_i}{4\beta_e K_{ce}} s\right) F_L(s)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (10)$$

其中

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_m^2}{V_i M_t}}$$

$$\zeta_h = \frac{K_{ce}}{A_m} \sqrt{\frac{M_t \beta_e}{V_i}} + \frac{B_p}{4A_m} \sqrt{\frac{V_i}{M_t \beta_e}}$$

式中 ω_h ——系统液压固有频率

ζ_h ——系统液压阻尼比

由式(10)可知, 电磁比例阀阀芯开口位移和作用在液压缸活塞的负载力决定了车身调平液压缸活塞位移, 由式(10)确定的液压系统控制框图如图7所示。

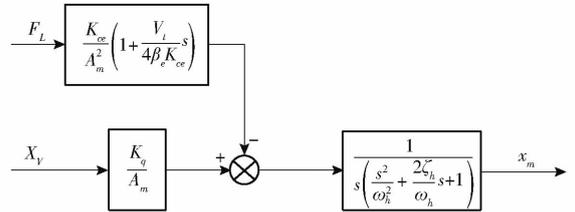


图7 液压系统控制框图

Fig. 7 Hydraulic system control block diagram

3.3 车身调平系统状态空间模型

根据马铃薯联合收获机车身调平机构动态方程和液压系统微分方程, 以液压缸活塞位移(x_1)、活塞位移变化率(x_2)和液压缸油压差(x_3)作为系统的状态变量, 电磁比例阀阀芯开口位移(u_1)和作用在液压缸活塞上的负载力(u_2)为系统输入, 液压缸活塞位移(y)为系统输出, 令

$$\begin{cases} \mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3)^T \\ \mathbf{U} = (u_1, u_2)^T \end{cases} \quad (11)$$

由式(6)~(8)得车身调平系统的状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{G}{M_t} & -\frac{B_p}{M_t} & \frac{A_m}{M_t} \\ 0 & -\frac{4\beta_e A_m}{V_i} & -\frac{4\beta_e K_{ce}}{V_i} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{M} \\ \frac{4\beta_e K_q}{V_i} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0 \quad 0]^T$$

式中 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} ——系数矩阵

\mathbf{C} ——输出矩阵

3.4 模糊 PID 控制器

由于马铃薯联合收获机电液系统是一种非线性不确定性系统, 设计中采用模糊控制与 PID 控制结

合的控制算法,既可消除模糊控制下的残差问题,又可解决 PID 控制存在的车身调平时间长、超调量较大的问题。模糊 PID 控制^[27-28]就是在传统 PID 离散化控制算法的基础上,以车身倾角误差和误差变化率为输入,以 PID 参数的调整量作为输出,通过模糊控制规则实现 PID 参数在线自整定,其控制器结构如图 8 所示。

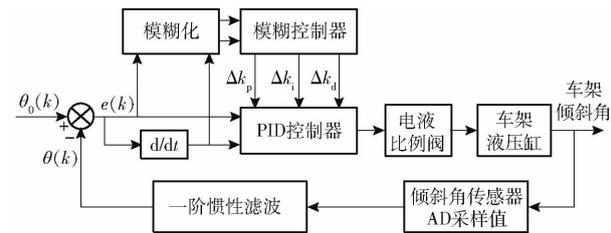


图 8 模糊 PID 控制器结构图

Fig. 8 Structure diagram of fuzzy PID controller

马铃薯联合收获机车身倾角误差 $e(k)$ 对应语言变量 E ,其基本论域为 $[-3.6, 3.6]$;倾角误差变化率 $e_c(k)$ 对应语言变量 E_c ,其基本论域为 $[-0.2, 0.2]$;PID 参数修正量 $\Delta k_p(k)$ 、 $\Delta k_i(k)$ 和 $\Delta k_d(k)$ 对应的语言变量分别为 K_p 、 K_i 、 K_d ,基本论域分别为 $[-0.8, 0.8]$ 、 $[-0.05, 0.05]$ 、 $[-0.1, 0.1]$ 。设定控制器输入输出对应论域均为 $[-6, 6]$,考虑到控制精度的要求,模糊子集设定为 $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$,分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大 7 个模糊状态。因此误差 $e(k)$ 、误差变化率 $e_c(k)$ 的量化因子分别为 $K_e = 1.67, K_{ec} = 30$; $\Delta k_p(k)$ 、 $\Delta k_i(k)$ 和 $\Delta k_d(k)$ 的量化因子分别为 $K_{\Delta k_p} = 7.5, K_{\Delta k_i} = 120, K_{\Delta k_d} = 60$ 。为了增强系统的鲁棒性和灵敏度,隶属度函数采用三角函数,根据 PID 控制器的比例系数 k_p 、积分系数 k_i 、微分系数 k_d 对系统性能的影响,并结合实际工程经验把 k_p 、 k_i 、 k_d 的模糊规则用表格表示,以 k_p 为例,如表 1 所示。

表 1 k_p 模糊规则

Tab. 1 Fuzzy control rule of k_p

E	E_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

4 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 分别建立基于 PID 控制

算法和基于模糊 PID 控制算法的马铃薯联合收获机车身调平系统模型,假设马铃薯联合收获机行驶在水平路面上,作用在液压缸的负载力为恒定值,对比 2 种 PID 算法的控制性能,所需的模型参数如表 2 所示。

表 2 模型参数

Tab. 2 Parameters of model

参数	数值
K_q	0.33
A_m/m^2	3.9×10^{-4}
M_t/kg	180
V_t/m^3	1.28×10^{-4}
K_{ce}	1.1
β_c/Pa	1.5×10^9
l_0/m	2.2
l_3/m	3.4

马铃薯联合收获机的作业环境多为 10° 以内的斜坡,因此给定幅值为 10° 车身倾角阶跃信号,系统在此阶跃信号输入下的时域响应仿真曲线如图 9 所示,图中, t_r 为上升时间, t_s 为调节时间, t_p 为峰值时间, M_p 为系统超调量。PID 控制下的系统上升时间为 1.12 s,调节时间为 5.64 s,超调量为 1.6° ,模糊 PID 控制下的系统上升时间为 0.52 s,调节时间为 2.72 s,超调量为 1.5° 。模糊 PID 算法与 PID 相比,系统上升时间缩短 53.57%,调节时间缩短 51.77%,超调量减小 6.25%,可见,模糊 PID 控制下系统的灵敏度和平稳度较好。

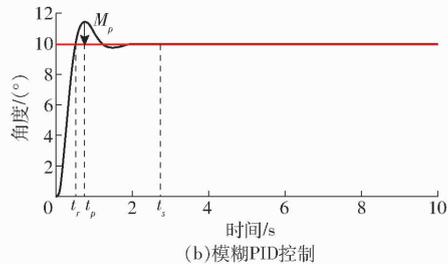
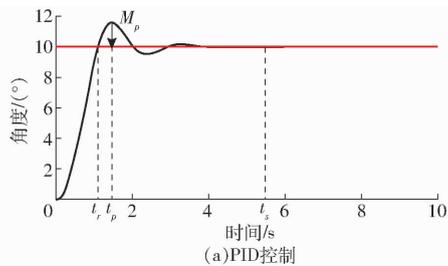


图 9 10° 阶跃信号时仿真结果

Fig. 9 Simulation results of step signal at 10°

5 试验与分析

将本文设计的车身调平系统安装在山东希成农业机械科技有限公司 4ULZ-170 型马铃薯联合收获机上,如图 10 所示,并在其公司试验场内进行试

验,试验时间为 2019 年 7 月,试验牵引拖拉机为雷沃 1254 型,采用北京瑞芬星通科技有限公司的 DMI820 型数显倾角仪(精度 0.01°)测量并显示车身实际倾角,采用成都亿佰特电子科技有限公司的 E62-DTU 型全双工无线数传电台,传输倾角传感器采集的角度数据。



图 10 试验机型实物图

Fig. 10 Experiment machine physical picture

5.1 系统调平时间试验

系统调平时间试验采用人工模拟的方式进行,根据安装在机身横梁上的数显倾角仪,人为调整马铃薯联合收获机,使其车身分别处于 -10° 、 -7° 、 -4° 、 4° 、 7° 和 10° 的倾斜状态,并启动车身调平程序,使车身自动调节到水平状态,记录调平后的数显倾角仪显示角度,同时使用秒表记录车身调平时间,当启动调平程序时计时开始,车身调整到水平静止状态时计时结束,每组试验 5 次,试验结果如表 3 所示。

由表 3 可知,在 6 种倾斜角下,车身调平系统的调平误差和调平时间随着车身倾斜角的增大而增大,最大调平误差为 -0.62° ,最大调平时间为 3.85 s ,最大均方根误差为 0.034° ,离散程度较低。车身朝左侧倾斜和朝右侧倾斜进行车身调平时的倾斜角误差均在 $\pm 1^\circ$ 以内,满足马铃薯联合收获机车身横向调平需求。在左右倾斜角一致的情况下,车身朝左侧倾斜时调平时间小于朝右侧倾斜,这主要是由于液压缸推程和回程的差异性造成的。

5.2 静态试验

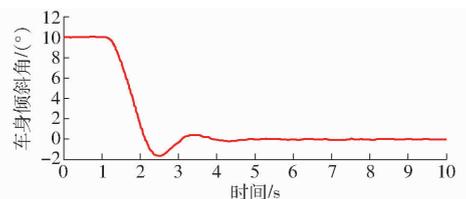
静态试验时,手动调整马铃薯联合收获机,使其车身倾斜角为 10° ,分别启动传统 PID 算法和模糊 PID 算法的自动调平程序,采集试验过程中的车身倾斜角,试验结果如图 11 所示。

图 11 为传统 PID 算法和模糊 PID 算法控制下的车身倾斜角情况,对比 2 组试验结果可以发现,模糊 PID 控制下系统的调节时间更短,调平时间大约为 3 s ,缩短 50% 左右,最大超调量为 1.5° 左右,与

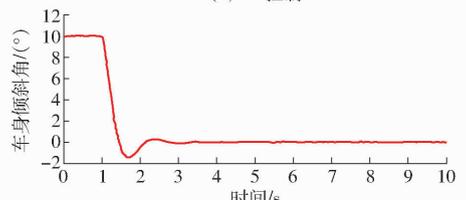
表 3 系统调平时间试验结果

Tab. 3 System leveling time experiment results

车身倾斜角/ $^\circ$	调平后倾斜角/ $^\circ$	调平时间/s	平均误差/ $^\circ$	误差均方根/ $^\circ$	调平时间平均值/s
-10	-0.59	3.54	-0.62	0.024	3.49
	-0.60	3.48			
	-0.62	3.44			
	-0.63	3.51			
	-0.65	3.47			
-7	-0.51	3.12	-0.52	0.012	3.13
	-0.54	3.11			
	-0.52	3.15			
	-0.51	3.15			
	-0.52	3.14			
-4	-0.37	2.82	-0.34	0.032	2.81
	-0.36	2.78			
	-0.29	2.79			
	-0.35	2.84			
	-0.35	2.81			
4	0.33	3.16	0.34	0.034	3.13
	0.29	3.17			
	0.38	3.10			
	0.35	3.11			
	0.36	3.11			
7	0.52	3.42	0.51	0.009	3.43
	0.51	3.34			
	0.50	3.41			
	0.51	3.51			
	0.52	3.46			
10	0.59	3.88	0.61	0.021	3.85
	0.62	3.86			
	0.61	3.82			
	0.64	3.85			
	0.59	3.84			



(a)PID控制



(b)模糊PID控制

图 11 静态试验结果

Fig. 11 Static experiment results

仿真结果相一致。

5.3 动态试验

在试验场内量取长度为 250 m 的高低起伏变化

路面,模拟实际作业的恶劣工况,标记好起点和终点,将控制器采集的车身倾角数值通过 E62 - DTU 型无线数传电台发送到计算机端。先不启用车身调平程序,拖拉机带动马铃薯联合收获机以快 1 挡(速度 3.6 km/h)行驶在该路面,记录接收的车身倾斜角数值,得到该路面实际坡度,然后启用车身调平程序,拖拉机以同样速度从起点行驶到终点,记录接收的车身倾斜角,2 种试验结果如图 12 所示。

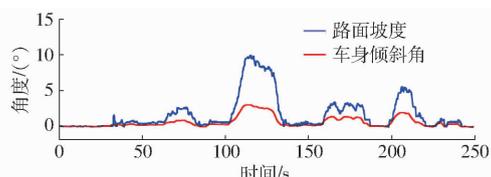


图 12 动态试验结果

Fig. 12 Dynamic experiment results

由图 12 可知,试验路面的最大坡度为 10° 左右,且路面有明显的高低起伏变化,在基于模糊 PID 算法的车身调平控制方法下,马铃薯联合收获机车身倾斜角控制在 $\pm 3^\circ$ 范围内,且在路面平稳时,车身倾斜角基本维持在 0° 左右,能够满足马铃薯收获作业需求。

6 结论

(1) 设计了基于模糊 PID 算法的马铃薯联合收获机车身调平系统,通过倾角传感器采集车身横向倾斜角并进行一阶惯性滤波处理,控制器根据算法处理结果控制电磁比例阀驱动升降液压缸运动,实现马铃薯联合收获机车身自动调平。

(2) 通过动力学分析,建立系统模型,运用 Matlab 对车身调平控制系统进行仿真分析,结果表明,采用模糊 PID 控制算法相比于传统 PID 算法,系统上升时间缩短 53.57%,调节时间缩短 51.77%,超调量减小 6.25%,系统的灵敏度和平稳度较好。

(3) 对整机控制系统进行试验验证,结果表明,在倾斜角 $\pm 10^\circ$ 范围内,自动调平时间最大为 3.85 s,系统响应快,静止时的倾斜角误差控制在 $\pm 1^\circ$ 以内;车身在倾斜角 10° 工况下,使用模糊 PID 控制算法的自动调平程序与传统 PID 算法相比,调平时间缩短 50% 左右,静态试验结果与仿真分析结果相符;以速度 3.6 km/h 行驶在高低起伏变化路面时,倾斜角误差控制在 $\pm 3^\circ$ 以内。可见,所设计的基于模糊 PID 控制算法的车身调平系统能够满足马铃薯联合收获机的作业要求。

参 考 文 献

- [1] 窦青青,孙永佳,孙宜田,等.国内外马铃薯收获机械现状与发展[J].中国农机化学报,2019,40(9):206-210. DOU Qingqing, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Current situation and development of potato harvesting machinery at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 206-210. (in Chinese)
- [2] 万恩超,尚书旗,王东伟,等.牵引式马铃薯联合收获机的设计与试验[J].农机化研究,2019,41(7):80-84. WAN Enchao, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and test of tractive potato combined harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(7): 80-84. (in Chinese)
- [3] 冯斌,孙伟,石林榕,等.收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J].农业工程学报,2017,33(13):50-57. FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 50-57. (in Chinese)
- [4] KEMPENAAR C, STRUIK P C. The canon of potato science: haulm killing[J]. Potato Research, 2008, 50(3): 341-345.
- [5] BENTINI M, CAPRARA C, MARTELLI R. Harvesting damage to potato tubers by analysis of impacts recorded with an instrumented sphere [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(1): 75-85.
- [6] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等.基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(1): 129-140. WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuazhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 129-140. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190114&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.014. (in Chinese)
- [7] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等.拨棍推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(7):119-126. YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119-126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160717&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)
- [8] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等.低位铺放双重缓冲马铃薯收获机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(9):140-152. WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Design and experiment of potato harvester using double cushions for low laying separation technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 140-152. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190916&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.016. (in Chinese)
- [9] 汪少华,窦辉,孙晓强,等.电控空气悬架车高调节与整车姿态控制研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(10):335-342,356. WANG Shaohua, DOU Hui, SUN Xiaoqiang, et al. Vehicle height adjustment and attitude control of electronically controlled air suspension electronically controlled air suspension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 335-342, 356. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151045&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.045. (in Chinese)

- [10] PIJUAN J, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain[J]. *Journal of Terramechanics*, 2012, 49(3): 161 - 171.
- [11] OJADOS GONZALEZ D, MARTIN GORRIZ B, IBARRA BERROCAL I, et al. Development of an automatically deployable roll over protective structure for agricultural tractors based on hydraulic power: prototype and first tests [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 124:46 - 54.
- [12] 刘平义, 王春燕, 李海涛, 等. 丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 74 - 81. LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 74 - 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.010. (in Chinese)
- [13] 刘平义, 彭凤娟, 李海涛, 等. 丘陵山区农用自适应调平底盘设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 42 - 47. LIU Pingyi, PENG Fengjuan, LI Haitao, et al. Design and experiment of adaptive leveling chassis for hilly area[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 42 - 47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.005. (in Chinese)
- [14] 张连岭. 现代农业机械化新技术应用手册[M]. 北京: 中国机械出版社, 2009: 97 - 99.
- [15] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 117 - 123. ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 117 - 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s018&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.018. (in Chinese)
- [16] 刘大为, 谢方平, 李旭, 等. 果园采摘平台行走机构的研究现状及发展趋势[J]. *农机化研究*, 2013, 35(2): 249 - 252. LIU Dawei, XIE Fangping, LI Xu, et al. Research status and development trend of running gear in orchard picking platform [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(2): 249 - 252. (in Chinese)
- [17] 陈端凤. 番茄收获机电液调平系统设计研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013. CHEN Duanfeng. Design and research of hydromechanics leveling system for tomato harvester [D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese)
- [18] 施新. 自走式玉米联合收获机车身调平系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. SHI Xin. Study on the leveling system of the body in a sel-propelled corn combine harvester[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [19] 王涛, 杨福增, 王元杰, 等. 山地拖拉机机身自动调平控制系统的设计[J]. *农机化研究*, 2014, 36(7): 232 - 235. WANG Tao, YANG Fuzeng, WANG Yuanjie, et al. Design of body automatic leveling control system of hillside tractor[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2014, 36(7): 232 - 235. (in Chinese)
- [20] 夏长高, 杨宏图, 韩江义, 等. 山地拖拉机调平系统的研究现状及发展趋势[J]. *中国农业大学学报*, 2018, 23(10): 130 - 136. XIA Changgao, YANG Hongtu, HAN Jiangyi, et al. Research status and development trend of hilly mountain tractor leveling system [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(10): 130 - 136. (in Chinese)
- [21] 吴清分. 国外联合收割机的最新发展趋势[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2019, 46(4): 1 - 4, 10. WU Qingfen. Latest development trend of foreign combine harvesters [J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2019, 46(4): 1 - 4, 10. (in Chinese)
- [22] 樊桂菊, 王永振, 张晓辉, 等. 果园升降平台自动调平控制系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11): 38 - 46. FAN Guiju, WANG Yongzhen, ZHANG Xiaohui, et al. Design and experiment of automatic leveling control system for orchards lifting platform[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(11): 38 - 46. (in Chinese)
- [23] 陈君梅, 赵祚喜, 陈嘉琪, 等. 水田激光平地机非线性水平控制系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 79 - 84. CHEN Junmei, ZHAO Zuoxi, CHEN Jiaqi, et al. Design of nonlinear leveling control system for paddy land leveler[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 79 - 84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140713&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.013. (in Chinese)
- [24] 齐文超, 李彦明, 陶建峰, 等. 丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 381 - 388. QI Wenchao, LI Yanming, TAO Jianfeng, et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 381 - 388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190742&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.042. (in Chinese)
- [25] 意法半导体(中国)投资有限公司. STM32F4xx 中文参考手册[M]. 上海: 意法半导体(中国)投资有限公司, 2010.
- [26] 翁寅生. 基于 L9352B 的电磁阀控制电路设计与实现[J]. *电子技术应用*, 2012, 38(4): 53 - 55. WENG Yinsheng. Design and implementation of solenoid valve control circuit based on L9352B [J]. *Application of Electronic Technique*, 2012, 38(4): 53 - 55. (in Chinese)
- [27] 苗中华, 李闯, 韩科立, 等. 基于模糊 PID 的采棉机作业速度最优控制算法与试验[J/OL]. *农业机械学报* 2015, 46(4): 9 - 14, 27. MIAO Zhonghua, LI Chuang, HAN Keli, et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 9 - 14, 27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150402&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.002. (in Chinese)
- [28] 陈满, 鲁伟, 汪小昆, 等. 基于模糊 PID 的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(2): 71 - 76. CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 71 - 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.010. (in Chinese)