电动叶菜收获机自动对行控制系统研究

繆 鹏, 左志宇, 毛罕平, 韩绿化, 王天宇, 魏丰瑞, 石 旭

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室,江苏镇江 212013)

摘 要:为提高叶菜收获机智能化控制性能、降低劳动强度,设计了一套电动叶菜收获机自动对行控制系统。通 过建立电动叶菜收获机转向机构数学模型和设计对行探测机构,采用 PID 和模糊控制技术建立了自动对行系统 控制策略,并进行了仿真试验和田间试验。试验结果表明:在叶菜行发生偏移时,系统能及时调整行走轨迹,实 现自动对行功能,提高了电动叶菜收获机的自动化水平。

关键词:自动对行;转向机构;探测机构;模糊 PID 控制;电动叶菜收获机

中图分类号: S225.92 文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2022)03-0084-06

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2022.03.015

0 引言

目前,国内叶菜收获机多数为人工操作转向并实现对行^[1],若地势变化或叶菜行在种植过程中出现偏移等情况,需要操作人员对作业方向进行实时调整, 劳动强度大、收获效率低及质量差^[2-3]。

在自动对行控制系统方面,针对叶菜收获机的研 究较少,多集中在玉米、根茎类作物收获机方面。张 凯良设计了玉米收获机自动对行系统,根据对行传感 器触杆的偏转角度,应用模糊控制动态调整转向轮的 转向角度^[1]。陈刚设计了玉米收获机自动对行方向 自校正系统,通过触发开关^[3],应用 PID 控制策略进 行自动校正对行^[4]。王申莹对甜菜收获机自动对行 探测机构进行了仿真,研究了复位弹簧刚度和预紧力 对漏挖率的影响;设计了甜菜收获机自动对行液压纠 偏执行系统总体结构,确定了液压流量和压力的取值 范围^[6],并对其设计的甜菜收获机自动对行控制系统 进行了仿真和试验。在甜菜收获机自动对行探测机 构方面,吴惠昌等设计了一种叉形随摆式结构^[8];高 飞扬设计了一种双臂式结构^[9]。

笔者将采用模糊控制与 PID 算法,针对 4GGE-3500 型电动叶菜收获机建立转向机构模型,设计对行

收稿日期: 2020-05-24

基金项目: 国家大宗蔬菜产业技术体系岗位专家任务项目(CARS-23 - 02A); 江苏省农机新装备新技术研发与推广项目 (NJ2018-14); 江苏省农业科技自主创新项目(CX(18) 1007)

通讯作者: 左志宇(1977-),男,湖南湘乡人,副教授,博士生,(Email) zuozy@ujs.edu.cn。 探测机构,提出自动对行控制策略,开发自动对行控制系统,实现电动叶菜收获机的自动对行功能。

1 系统组成及原理

自动对行控制系统由主控制器 S7-1200 系列 PLC、人机交互界面(触摸屏)、转向轮角度传感器、作 业速度传感器、探测杆角度传感器、转向机构和伺服 电机及其驱动器等组成,如图1所示。其中,转向机 构由齿轮、齿条、摇杆、拉杆和转向轮等组成,如图2 所示。



图1 系统原理框图

Fig. 1 System block diagram



作者简介: 繆 鹏(1994-),男,江苏南通人,硕士研究生,(E-mail) miaopengly@163.com。

作业过程中,因地势变化或叶菜行在种植过程中 出现偏移等因素,将使收获机前进方向与叶菜行产生 偏移;探测杆与叶菜接触,角度传感器将探测杆偏移 角度信号传递给S7-1200 PLC;通过模糊 PID 算法得 出控制量,将对应控制量传输至伺服电机驱动器,控 制伺服电机带动齿轮转动,使齿条产生位移,带动转 向轮偏转;转向轮角度传感器采集转向轮偏角信息、 作业速度传感器采集收获机前进速度信息,并反馈到 S7-1200 PLC 中。

2 转向机构模型

转向系统主要包含伺服电机、齿条、两侧摇杆、拉 杆和齿轮,建模过程中将其简化,如图3所示。定义 初始状态为转向轮相对于车身前进方向偏角为0°。 其中 A、C 代表齿条左右两端的连接点; C、E 代表拉 杆两端的连接点; E、C 代表为摇杆两端的连接点。



以向右转向为例说明建模方法:在工作过程中, 当齿条从初始位置 $A \ C$ 移动至 $A' \ C'$ 位置时,摇杆由 初始位置 E旋转至 E'位置,记此时摇杆的角位移为 δ , 4GGE-3500 型电动叶菜收获机的转向轮偏角等于摇 杆从初始位置开始的角位移,即此时转向轮偏角等于 δ ,如图 3(b)所示。过 C点向桥体作垂线,垂足为 B; 过 C'点向桥体作垂线,垂足为 D; 过 E'点向 DC'作垂 线,垂足为 H; 过 G点向 HE'作垂线, 垂足为 F; J为 DG延长线上一点。根据各杆件几何关系和运动原理,在 $\Delta C'HE'$ 和 $\Delta GFE'$ 中可得

$$\begin{cases} (L_{CE'} \cdot \cos \angle HE'G + L_{CB} - L_{CC'})^2 + L_{HC'}^2 = {L_{CE'}}^2 \\ L_{HD} = L_{GE'} \cdot \sin \angle HE'G \\ L_{HC'} + L_{HD} = L_{BC} \\ \angle HE'G = \angle E'GJ = \beta - \delta \end{cases}$$
(1)

其中 L_{GE} 、为摇杆长度; L_{GB} 为摇杆连接点 G 至垂 足 B 的距离; L_{CC} 、为齿条移动距离; L_{HC} 、为齿条移动后 右端点至垂足 H 的距离; L_{CC} 、为拉杆长度; L_{HD} 为垂足 $D \setminus H$ 间距离; L_{BC} 为 C 点到桥体垂直距离; $\beta = \angle EGJ$ 。

消去式(1) 中 $\angle HE^{C} C_{\lambda} L_{HC} \land L_{HD}$,可得齿条移动距 离 L_{cc} ,与转向轮偏角 δ 的关系,即

$$\begin{bmatrix} L_{BC} - \sqrt{L_{CE'}^{2}} - [L_{GE'} \cdot \cos(\beta - \delta) + L_{GB} - L_{CC'}]^{2} \end{bmatrix}^{2} + \begin{bmatrix} L_{GE'} \cdot \cos(\beta - \delta) \end{bmatrix}^{2} = L_{GE'}^{2}$$
(2)

其中 L_{BC} 、 $L_{C'E'}$ 、 L_{CE} 、 β 、 L_{CB} 和 $L_{CE'}$ 等与转向机构 结构初始状态及结构参数有关 均为已知量。

3 对行探测原理

为获取作业过程中叶菜收获机与叶菜行的偏移 量,设计了一种基于角度传感器的对行探测机构,如 图4所示。



 空心球 2. 探测杆 3. 回位弹簧 4. 基座总成 5. 角度传感器 图 4 探测机构结构图

Fig. 4 Prototype drawing of detection mechanism structure

探测机构前端为可绕轴旋转的空心球,保证其在 行进探测过程中较为顺畅,且不伤害待收获的叶菜。 当叶菜行相对于收获机前进方向无偏移时,探测杆置 于叶菜行中间;当叶菜行相对于收获机发生偏移时, 带动探测杆偏转,通过探测机构角度传感器采集角度 信息。基座给探测杆提供支撑、限位,同时通过弹簧 进行回位。探测机构安装于割台前部,如图5所示。

当探测杆偏角为 α、转向轮偏角为 δ 时,由于收获 机在作业过程中处于低速运行状态,且每次预测时间 间隔很小,可以认为收获机在偏转 δ 角度方向行驶。 收获机横向偏移量计算过程为

$$\begin{cases} y_o = |b_k| + L \cdot \sin\varphi \\ \varphi = \alpha - \theta \\ \theta = \arcsin\left(\frac{d/2 - y_o}{L}\right) \\ v_x = v \cdot \sin\gamma \\ \gamma = \delta - \varphi \end{cases}$$
(3)

其中 y_a 为收获机前端中心与叶菜行中心偏移距 离; b_k 为当前时刻的收获机横向偏移量; L 为收获机质 心至前端中心距离; φ 为收获机车身与叶菜行方向夹 角; α 为探测杆偏角; θ 为探测杆与叶菜行方向夹角; d为行间距; v 为收获机行驶速度 v_y 为其在叶菜行方向 分量 p_x 为其在叶菜行垂直方向上分量 p 与 v_y 夹角为 $\gamma; \delta$ 为转向轮偏角。

由式(3)可得

$$y = \arcsin \frac{d - 2[|b_k| + L\sin(\delta - \gamma)]}{2L} - \alpha + \delta (4)$$

其中 $d_{s}b_{k}, L_{s}\alpha$ 均为已知量。

$$b_{k+1} = v_x \cdot \Delta t + b_k \tag{5}$$

其中 b_{k+1} 为下一时刻的收获机预测横向偏移量; Δt 为采样时间。将 γ 代入 $v_x = v \cdot \sin \gamma$ 中可得 v_x ,将 v_x 代入式(5) 中,可计算出 b_{k+1} 。



图 5 探测机构工作原理图

Fig. 5 Working principle diagram of the detection mechanism

4 控制策略建立

根据探测杆偏角的变化量 e 及其变化率 ec,采用 模糊控制 PID 算法以控制伺服电机两端的电压值。 探测杆偏角变化量基本论域为[-14,14] 模糊论域为 [-7,7],量化等级为{ 负大,负中,负小,零,正小,正 中,正大} = { NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}; 其变化率 基本论域为[-7,7],模糊论域为[-7,7]量化等级为 { 负大, 负中, 负小,零, 正小,正中,正大} = { NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}, 伺服电机控制电压基本论域为 [-12,12] 模糊论域为[-6,6],量化等级为{ 负大, 负 中, 负小,零, 正小,正中,正大} = { NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB}。

定义转向轮右偏时偏角为正值,左偏时偏角为负 值;探测杆向右偏离其中心线时偏角 α 为正,向左偏 时为负值;叶菜行向右偏移为正,向左偏移为负。*KP*/ *KD*模糊规则如表1所示。

偏移量较大的情况: 当 *e* 为 NB 时,即收获机向右侧偏移很大距离。若此时 *ec* 为 NB,表明收获机向右侧偏离的趋势很大,则此时需要转向

表1 KP/KD 模糊控制规则表

fable 1	KP/KD	fuzzy	$\operatorname{control}$	rules	table	
---------	-------	-------	--------------------------	-------	-------	--

	ec							
e	NB	NM	NS	ZE	PS	РМ	РВ	
NB	NB/PB	NB/PB	NB/PM	NB/ZE	NB/ZE	NM/ZE	NM/PS	
NM	NB/PB	NB/PM	NB/PM	NM/ZE	NM/ZE	NM/PS	NM/PM	
NS	NB/PM	NB/PM	NM/PS	NS/ZE	PS/PS	PM/PM	PM/PB	
ZE	NB/ZE	NM/ZE	NS/ZE	ZE/ZE	NS/ZE	PM/ZE	PB/ZE	
PS	NM/PB	NM/PB	NS/PM	PS/ZE	PM/PS	PB/PS	PB/PM	
PM	PM/PB	PM/PM	PM/PS	PM/ZE	PB/PS	PB/PM	PB/PB	
РВ	PM/PM	PM/PS	PM/PS	PB/ZE	PB/PM	PB/PB	PB/PB	

轮向左偏转的趋势非常大,需要齿条向左快速移动,伺服电机快速反转,控制电压为反向最大,*KP*为NB、*KD*为PB。反之,当*e*为PB时,收获机向左侧偏移很大距离。若此时*ec*为PB表明收获机向左侧偏离的趋势很大,则此时需要转向轮向右偏转的趋势非常大,需要齿条向右快速移动,伺服电机快速正转,控制电压为正向最大,*KP*为PB、*KD*为PB。

偏移量较小的情况: 当 e 为 NS 时,即收获机向右侧偏移很小距离。若此时 ec 为 PS ,表明收获机有向左 偏离的小趋势,此时可以慢慢回正,即齿条缓慢向右移动,伺服电机加载正向小电压,缓慢正转;为防止超调, *KP* 为 PS *KD* 为 PS。反之,当 e 为 PS 时,即收获机向 左侧偏移很小的距离。若此时 ec 为 NS 表明收获机有 向右侧偏离的小趋势,可以慢慢回正,齿条缓慢向左移动,伺服电机加载反向小电压,缓慢反转;为防止超调, KP为NS KD为PM。

当 *e* 为 ZE *ec* 为 ZE 时 *,KP* 为 ZE *,KD* 为 ZE ,收获 机保持在叶菜行间行进。

5 控制模型建立及仿真

控制模型如图6所示。



Fig. 6 Simulink simulation model

根据前述建立的规则和模型,在 MatLab/Simulink 中建立模糊 PID 控制模型,包括模糊控制模块、PID 模 块、转向系统传递函数和状态更新等模块,采集叶菜 收获机在自动对行工作中的探测杆偏角、转向轮偏角 等数据。下面,针对叶菜行横向定值偏移和横向波动 偏移两种情况进行仿真。

1) 叶菜行横向定值偏移情况: 叶菜行在前进方向 发生左/右侧偏移,偏移量达到最大值后保持恒定。 叶菜行横向定值偏移的仿真: 叶菜收获机以 0.5m/s 的速度在田间作业,假设叶菜行在 2m 处开始发生左 侧偏移,横向偏移量为 15cm ,3m 处结束偏移。叶菜行 走向如图 7 所示,收获机前进方向为 X 轴正方向。仿 真结果如图 8 所示。叶菜行发生左侧偏移后,探测杆 迅速左偏,最大偏角为-9.8°。相应地,转向轮迅速左 偏进行作业方向调整,在 2.01s 后开始回正方向,此过 程中收获机前进 1.005m,转向轮在回正后继续右偏, 最大右偏角度为 5.67°;随后系统进行微调,转向轮偏 角向 0°逼近且无震荡,此时收获机横向偏移距离与叶 菜行偏移情况相吻合,系统表现稳定。









 Fig. 8 Simulation results of horizontal deviation of leaf vegetable row

 2) 叶菜行横向波动偏移情况: 叶菜行在前进方向

发生左/右侧偏移,偏移量达到最大值后往反方向偏 移,然后归零。叶菜行横向波动偏移的仿真:叶菜收 获机以0.5m/s的速度在田间作业,假设叶菜行在2m 处开始发生右侧偏移,在3m处横向偏移量达到最大 10cm Am 处结束偏移。叶菜行走向如图9所示,收获 机前进方向为X轴正方向,仿真结果如图10所示。 叶菜行先向右侧偏移再向左侧偏移,系统产生两次大 幅调整:叶菜行发生右侧偏移后,探测杆迅速右偏,最 大偏角为9.1°。相应地,转向轮迅速右偏进行作业方 向调整,在3m处叶菜行向左侧偏移,转向轮迅速向左 偏转,最大左偏角度为20.5°,在8.01s时开始回正方 向,并在回正后继续右偏,最大右偏角度为4.94°;随 后系统进行微调,转向轮偏角向0°逼近,无振荡,此时 收获机横向偏移距离与叶菜行偏移情况相吻合,跟踪 效果良好。



6 自动对行试验

试验在江苏大学温室进行,叶菜栽培行距为 10cm,设置作业速度为1.8km/s(0.5m/s),打开自动 对行系统,调整试验车架初始位置正对叶菜行,开始 对行试验。试验结束后,导出探测杆偏移角度、转向 轮偏转角度与叶菜行中心线走向曲线,分析自动对行 控制系统的可靠性。

图 11(a) 为叶菜行中心线走向,叶菜行总长 8m, 左右两行皆在 2~2.5m 处发生横向偏移,向左偏移 0.05m,其余位置未发生偏移。

试验结果如图 11(b) 所示。从导出的探测杆角度 传感器数值来看,探测杆在 4.1s 时角度开始发生偏 移,最大左偏角度达到 6.8°;随后开始回正,在归零后 继续向右偏移,在 5.1s 时最大右偏移角度达到 4.7°; 回正并继续左偏,最大左偏角度为 3.5°;随着对行动 作完成,探测杆复位,其偏转角度逐渐趋向于 0°。相 应地,转向轮在4.3s处开始发生变化,最大左偏角度为14.9°,回正后继续右偏,最大右偏角度为8.4°;此后,向左偏转进行微调,最大左转角度为4.5°,随后逐渐回正,完成一次前进方向调整。



Fig. 10 Simulation results of lateral fluctuation of leafy vegetable row



• 88 •



综上所述,当叶菜行发生偏移时,对行探测机构 能迅速进行检测,控制系统通过模糊 PID 算法调节转 向轮偏转角度,调整试验车架行走轨迹,实现自动对 行功能。

7 结论

 1)设计了电动叶菜收获机对行探测机构,建立了 转向机构数学模型,开发了采用模糊 PID 控制技术的 自动对行控制系统。

2) 试验结果表明: 系统在叶菜行发生偏移时 能及

时调整作业方向,控制效果良好。

参考文献:

- [1] 张凯良,胡勇,杨丽,等.玉米收获机自动对行系统设计 与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):103-114.
- [2] 糜南宏,赵映,秦广明,等.叶菜全程机械化研究现状与 对策[J].中国农机化学报,2014,35(3):66-69.
- [3] 陈刚,李青龙,孙宜田,等.玉米联合收获机自动对行控 制系统的研究[J].中国农机化学报,2016,37(3):191 -194,280.
- [4] 陈刚,孙宜田,李青龙,等.玉米收获机自动对行方向自 校正系统的研究[J].农机化研究,2019,41(8):191-195.
- [5] 王申莹,胡志超,彭宝良,等.基于 ADAMS 的甜菜收获 机自动对行探测机构仿真[J].农业机械学报,2013,44 (12):62-67.
- [6] 王申莹,胡志超,吴惠昌,等.甜菜收获机自动对行液压 纠偏执行系统设计与试验[J].农机化研究,2016,38
 (3):155-162.
- [7] 王申莹,胡志超,吴惠昌,等.基于 Proteus 的甜菜收获 机自动对行控制系统设计仿真与试验[J].中国农机化 学报,2014,35(3):35-40.
- [8] 吴惠昌,胡志超,彭宝良,等.牵引式甜菜联合收获机自动对行系统研制[J].农业工程学报,2013,29(12):17 -24.
- [9] 高飞扬,王卓,白晓平,等.自走式甜菜联合收获机自动 对行检测装置的设计[J].农机化研究,2020,42(5): 69-76.

Research on Automatic Alignment Control System of Electric Leaf Vegetable Harvester

Miao Peng Zuo Zhiyu ,Mao Hanping ,Han Lvhua ,Wang Tianyu ,Wei Fengrui ,Shi Xu

(Ministry of Education ,Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology ,Jiangsu University , Zhenjiang 212013 ,China)

Abstract: In order to improve the intelligent control performance of the leaf vegetable harvester and reduce the labor intensity, a set of electric leaf vegetable harvester automatic alignment control system is developed. By establishing the mathematical model of the steering mechanism of the electric leaf vegetable harvester and designing the alignment detection mechanism, the control strategy of the automatic alignment system was established using PID and fuzzy control technology, and the simulation test and field test were carried out. The test results show that the control system can adjust the walking trajectory in time when the leaf vegetable row is shifting. It realizes the automatic alignment function and improves the automation level of the electric leaf vegetable harvester

Key words: automatic alignment; steering mechanism; detection mechanism; fuzzy PID control; electric leaf vegetable harvester