

熊中刚,贺娟,敖邦乾,等. 基于路径弯曲度动态预瞄搜索算法的车辆路径跟踪控制软件系统设计[J]. 江苏农业科学,2015,43(2):370-373.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.02.119

# 基于路径弯曲度动态预瞄搜索算法的车辆路径跟踪控制软件系统设计

熊中刚,贺娟,敖邦乾,叶振环,令狐金卿,罗素莲  
(遵义师范学院工学院,贵州遵义 563002)

**摘要:**为实现农业机械田间作业时的路径跟踪控制,在无人驾驶高速插秧机硬件系统基础上,采用基于规划路径弯曲度的动态搜索预瞄算法设计了路径跟踪控制软件。该算法以作业机械横向偏差和航向偏差作为航向模糊控制器的输入变量,以前轮转角期望值为输出变量,设计航向模糊控制器,实现航向控制;同时结合转向模糊免疫 PID 控制器对步进电机的 PWM 频率进行控制,实现水田作业机械的方向改变,从而完成作业机械沿规划路径自动行驶跟踪,并用 Matlab/Simulink 仿真平台对所采用的路径跟踪控制原理和所设计的模糊控制器进行了有效性验证,结果表明所采用的控制方法是可行的。经试验,插秧机以 1 m/s 的速度进行直线跟踪时最大的跟踪偏差只有 4 cm,且始终围绕零值附近上下波动,计算平均跟踪偏差为 0.84 cm,能够满足水田作业机械路径跟踪控制的要求。

**关键词:**自动导航;农业机械;软件设计;路径规划;路径跟踪算法

**中图分类号:** U463.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)02-0370-04

随着计算机技术和传感器技术的不断发展,农业机械自动导航技术在很多发达国家和地区已有了很深入的研究,但

收稿日期:2014-04-22

基金项目:贵州省科学技术基金(编号:黔科合 J 字 LKZS[2014]24);  
贵州省科学技术重点项目(编号:黔科合 J 字 LKZS[2014]05);  
贵州省级重点学科资助课题(编号:黔学位办[2013]18);贵州省遵义师范学院教研基金(编号:13-56)。

作者简介:熊中刚(1986—),男,湖南常德人,硕士,讲师,主要从事电气自动化和农业机械智能控制方面的研究。E-mail: xzglsl2013@163.com。

亚洲除了日本、韩国和中国台湾外,其他国家和地区在这一领域研究较少<sup>[1]</sup>。农业机械自动导航技术是精细农业的基础平台,也是当前农业工程领域的研究热点之一<sup>[2]</sup>。然而在自动导航过程中,轮式机械在田间作业时需要实现地头转向和直线行走 2 个动作。地头转向是农业机械完成当前行作业,通过姿态调整以精确进入下一行的重要步骤,大多情况是一种 180°转向动作,与直线行走有着明显不同<sup>[3-4]</sup>。目前,完成上述 2 个动作采用的车辆跟踪控制的方法主要有基于 PID 控制算法和基于模糊控制算法等<sup>[5]</sup>。本设计采用的是基于路径弯曲度动态预瞄搜索算法的车辆路径跟踪方法,该方法不

- [2] 王建楠,谢焕雄,刘敏基,等. 打击揉搓式花生脱壳设备作业质量制约因素与提升对策[J]. 中国农机化,2012(1):57-59,64.
- [3] 高连兴,杜鑫,张文,等. 双滚筒气力循环式花生脱壳机设计[J]. 农业机械学报,2011,42(10):68-73.
- [4] 那雪姣,刘明国,张文,等. 机械脱壳时花生仁损伤特征及规律[J]. 农业工程学报,2010,26(5):117-121.
- [5] 高连兴,张文,杜鑫,等. 花生脱壳机脱出物的漂浮系数试验[J]. 农业工程学报,2012,28(2):289-292.
- [6] 禹山林. 中国花生品种及其系谱[M]. 上海:上海科学技术出版社,2008:41.
- [7] 谢焕雄,彭宝良,张会娟,等. 我国花生脱壳技术与设备概况及发展[J]. 江苏农业科学,2010(6):581-582.
- [8] 李耀明,王智华,徐立章,等. 油菜脱出物振动筛分运动分析及试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):111-114.
- [9] 张之仪. 机械化运输设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1997:138.
- [10] 易军鹏,朱文学,马海乐,等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. 农业机械学报,2009,40(6):103-110.
- [11] 明道绪. 高级生物统计[M]. 北京:中国农业出版社,2006:239-246.
- [12] 郭瑞琴,刘竹丽. 新型食用杏核脱壳装置[J]. 机械设计与研究,2004,20(4):83-84.

- [13] 王军,王敏,于智峰,等. 基于响应曲面法的苦荞麸皮总黄酮提取工艺优化[J]. 农业机械学报,2007,38(7):205-208.
- [14] Bonafaccia G, Marocchini M, Kreft I. Composition and technological properties of the flour and bran from common and tartary buckwheat[J]. Food Chemistry,2003,80(1):9-15.
- [15] 岳田利,赵志华,王燕妮,等. 酿酒酵母菌胞内海藻糖提取工艺参数的优化[J]. 农业机械学报,2007,38(4):93-97.
- [16] 韩清华,李树君,毛志怀,等. 微波真空干燥条件对苹果脆片感官质量的影响[J]. 农业机械学报,2009,40(3):130-134.
- [17] 熊建华,吴琴,林丽萍,等. 响应面分析法优化超声提取樟树籽油的工艺[J]. 中国粮油学报,2013,28(3):65-69.
- [18] 李大婧,宋江峰,刘春泉,等. 超声波辅助提取黑豆皮色素工艺优化[J]. 农业工程学报,2009,25(2):273-279.
- [19] 陈莉,屠康,王海,等. 采用响应曲面法对采后红富士苹果热处理条件的优化[J]. 农业工程学报,2006,22(2):159-163.
- [20] 岳田利,周郑坤,袁亚宏,等. 苹果中有机氯农药残留的超声波去除条件优化[J]. 农业工程学报,2009,25(12):324-330.
- [21] 邵平,孙培龙,朱羽,等. 短程蒸馏处理菜籽毛油和碱催化制备生物柴油工艺研究[J]. 农业工程学报,2007,23(4):228-232.
- [22] 吴洪成,胡卓炎,余恺,等. 速冻薯条制备工艺优化[J]. 农业工程学报,2007,23(5):214-219.

仅可以使作业机械满足直线行走,而且可以提高农业机械换行作业的精度,缩短农业机械在地头转向中的时间,最终提高整个农业机械作业的效率。

## 1 系统总体原理设计

路径跟踪就是车辆在获得已经规划好的目标路径的前提下,根据车辆当时的行驶状态和它与目标路线间的相对位置关系,按照一定的控制法则综合车辆的行驶速度和行驶方向,使车辆的运动轨迹与目标路径的偏离误差满足设计的要求。车辆的路径跟踪控制是根据车辆即时偏离行驶路线的横向偏差决定车辆的行驶方向。车辆的航向跟踪控制是在转向控制的基础上,使车辆沿目标航向角行驶,即实现车辆行驶方向<sup>[6]</sup>。本设计采用的车辆路径跟踪控制方法主要是基于规划路径弯曲度来模糊确定前视距离即预估距离的大小,然后由前视距离找到预瞄点,由预瞄点和车辆当前位置确定目标方向,由目标方向跟当前的航向角之间的差值得出航向偏差,横向偏差就是车辆当前的坐标与预定义路线的投影。

## 2 软件理论设计

### 2.1 基于规划路径弯曲度预瞄前视距离方法

当驾驶员在实际驾驶过程中,不仅要观察车辆当前的道路状况,而且要同时考虑车辆前方一定距离范围内的道路信息,而前方路径的弯曲程度是决定车辆的转弯方向、转角大小及车速大小的重要因素<sup>[7]</sup>。在路径跟踪控制中,预瞄距离的选择原则跟车辆的行驶速度有关,行驶速度快时,需要预瞄的距离就要大些,而车速慢时,距离小些就会达到控制效果。根据这一思想,路径的弯曲率的确定是进行路径预瞄的第一步,弯曲率的确定方法<sup>[8]</sup>如图 1 所示。

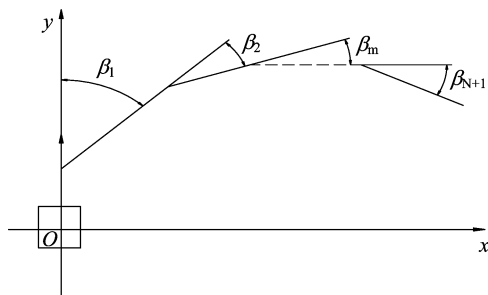


图1 规划路径弯曲度确定

如图 1 所示,图中  $\beta_1$  是路径第 1 条折线和车辆前进方向的夹角改变量,  $\beta_i$  是第  $i$  条折线和第  $i-1$  条折线的方向角改变量。定义  $C$  为所有区域路径的弯曲度和,则有:

$$C = \sum_{i=1}^n |\beta_i|。 \quad (1)$$

路径顺时针方向变化时,  $\beta_i$  为负值,反之为正值。  $\beta_i$  取绝对值的意义是保证路径的弯曲不管是什么变化,其弯曲度是增加的,即弯曲的效果一致。采取文献<sup>[8]</sup>所述的车速  $v$ 、预瞄距离  $d$  确定方法随  $C$  的变化而变化,其变化规律遵循  $C$  越大,  $v$ 、 $d$  越小的原则,方法如下:

$$v = \begin{cases} v_{\max} & C \leq C_1 \\ a_1 (C - C_2)^2 + b_1 & C_1 \leq C \leq C_2 \\ v_{\min} & C \geq C_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$d = \begin{cases} D_{\max} & C \leq C_1 \\ a_2 (C - C_2)^2 + b_2 & C_1 \leq C \leq C_2 \\ D_{\min} & C \geq C_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为常数,且  $a_1$ 、 $a_2$  非负。  $v_{\max}$ 、 $v_{\min}$  为插秧机速度的最大值和最小值,  $C_1$ 、 $C_2$  为  $C$  的 2 个临界值,  $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$  为预瞄距离的最大值和最小值。

又因为  $C_1$ 、 $C_2$  分别对应  $v$  和  $d$  的最大值和最小值,则有:

$$\begin{cases} v_{\max} = a_1 (C_1 - C_2)^2 + b_1 \\ v_{\min} = b_1; \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} D_{\max} = a_2 (C_1 - C_2)^2 + b_2 \\ D_{\min} = b_2 \end{cases}。 \quad (5)$$

通过测试插秧机工作时最大速度  $v_{\max} = 1.5 \text{ m/s}$ ,  $v_{\min} = 0.5 \text{ m/s}$ ;根据参考文献<sup>[7]</sup>,  $C_1 = 10^\circ$ 、 $C_2 = 90^\circ$ ;  $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$  为预瞄距离的最大值和最小值,由仿真及试验测得,  $D_{\max} = 4 \text{ m}$ 、 $D_{\min} = 1.1 \text{ m}$  较为合适。从而由式(4)及式(5)得出  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  的值分别为 0.000 2、0.000 6、0.5、1.1。

预瞄距离确定后,预瞄点及车辆的航向偏差、横向偏差也随之确定,这样就为车辆的转向控制提供参数,实现路径跟踪。在实际预估的前视距离中还应包括车辆的本身轴距长度和车辆行驶的速度。

### 2.2 路径跟踪航向偏差和横向偏差确定

当确定好前视距离后,就可确定跟踪路径上的预瞄点,如图 2 所示。

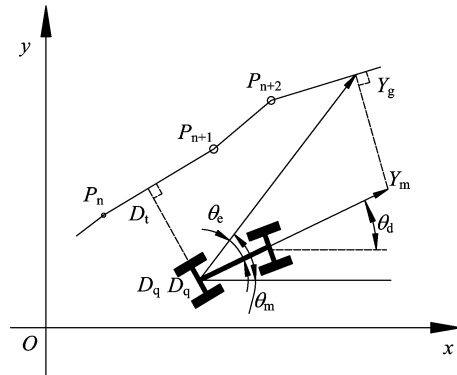


图2 预定义路线与插秧机的位置关系

插秧机当前航向方位  $\theta_d$  上,插秧机当前的位置点  $D_q$  加上前视距离  $L_f$  得到点  $Y_m$ ,点  $Y_m$  在规划路径上的投影点为  $Y_g$ ,即为预瞄点,则当前目标方向  $\theta_m$  为:

$$\theta_m = \overline{D_q Y_g}。 \quad (6)$$

从而得出航向偏差为:

$$\theta_e = \theta_m - \theta_d。 \quad (7)$$

设插秧机当前位置点  $D_q$ ,坐标为  $(x_q, y_q)$ ,在规划路径上的投影点  $D_i$ ,坐标为  $(x_i, y_i)$ ,则横向偏差  $HXE$  为点  $D_q$  与点  $D_i$  的距离:

$$HXE = |D_q D_i| = \sqrt{(x_q - x_i)^2 + (y_q - y_i)^2}。 \quad (8)$$

## 3 软件功能的实现

### 3.1 软件功能设计及工作流程

由于 VB 是一种可视化的、面向对象和采用事件驱动方式的结构化的高级程序语言,本研究以 VB 作为编程工具,进

行控制软件的编写,根据系统设计功能的要求,本研究设计的软件主要由通讯模块、控制决策模块、显示模块、数据存贮模块等组成。通讯模块主要实现对水田作业机械的位置、航向角、前轮转角、速度等模块的信息采集;控制决策模块将所设计的各类模糊控制器、各类控制算法用计算机语言表述,并进行控制决策,实现作业机械的路径跟踪控制;显示模块实时显示作业机械的航向角、前轮转角、横向偏差、车速等信息,并能实时做出作业机械的路径跟踪图与规划路径图,数据存贮模块主要是完成对采集数据的存贮,为以后的数据分析和控制调整提供数据参考,其系统软件功能实现流程图如图 3 所示。

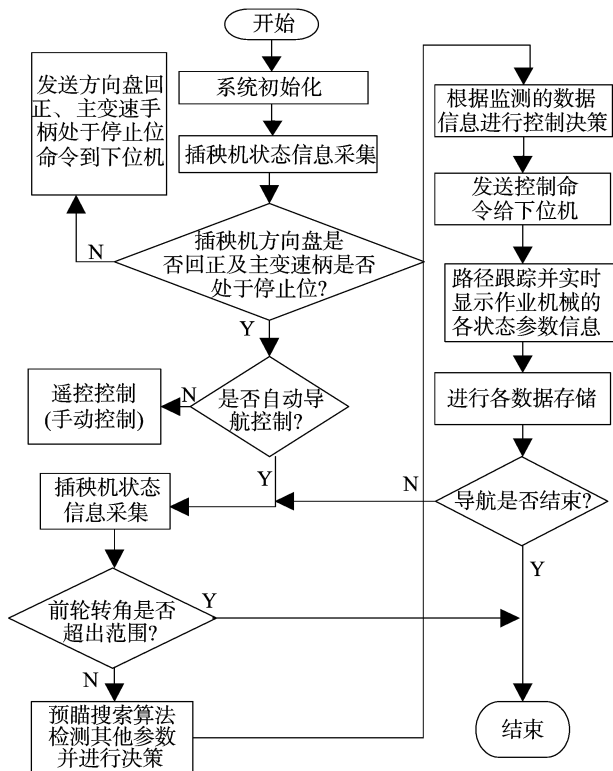


图3 动态预瞄搜索算法路径跟踪控制软件系统流程图

### 3.2 串行通信设计

系统软件采用 SerialPort 控件来进行串行通讯,该控件主要包括 BaudRate、PortName、Parity、DataBitss、StopBit 等属性,这几个属性主要用来设置波特率、端口号、奇偶校验、数据位以及停止位;主要方法有 Read、Write、Open、Close、ReadtoBytes 等用来读数据、写数据、打开端口、关闭端口和读取字节数;主要事件为 DataReceived。串口的初始化主要是对 SerialPort 控件<sup>[9-10]</sup>的属性进行设置。系统软件的通讯参数设置部分主要用来进行串行端口的设置,波特率的设置、奇偶校验设置以及数据位的设置等。串行端口的选择可以根据当前 PC 机上可用串行端口的端口号;波特率是数据传输的速率,在该系统中默认为 9 600 bps,可以根据需要选择其他的波特率;为提高数据的准确率,可使用奇偶校验来进行控制,奇偶校验设置根据需要可从 Odd、Even、Mark、Space、None 等几种方式中选择,本软件系统默认为 None 的方式;数据位的设置用于设置每个字节中数据位的长度通常为 5~8 位,默认为 8 位。所有参数设置完成后利用 SerialPort 控件的 Open 方法就能打开通讯串口。

VisualBasic. net2008 中进行串行通讯时,对于通讯数据的发送采用 SerialPort 的 Write 方法完成。然而所采用的 Write 方法主要分为 3 种形式,它们分别是 Write(String)、Write(Byte(), Offset(), Count()) 和 Write(Char(), Offset(), Count())。发送方式为 SerialPort1. 启动定时器。在 Timer 的 Tick 事件中就可以用 Write(Byte(), Offset(), Count()), 该命令语句中的 Byte() 表示的含义是一个字节型的数组,Offset() 表示的含义是字节数组中从 0 开始的字节偏移量,Count() 表示的含义是所要写进命令语句中的字节数。

该系统串口通信中数据的接收主要可以分为 DataReceived 驱动和利用定时器完成 2 种方式。第 1 种数据接收的方式就是通过 DataReceived 事件驱动的方式,该方式主要是在串行端口初始化的时候,对 ReceivedBytesThreshold 的属性值进行设置,所设置的该属性值即是表示对触发 DataReceived 事件进行设置的时候,其缓冲区所接收到的字节数。系统中默认 ReceivedBytesThreshold 的属性为 1,通过测试实验证明了如果 ReceivedBytesThreshold 的属性设为 1 时,系统不能完全确保 DataReceived 事件被接收到的每个字节都能引发,只有属性值大于 1 的 ReceivedBytesThreshold 能够完全按照要求把 DataReceived 事件进行触发。因此为了获取接收缓冲区中的数据字节数,当 DataReceived 事件产生后须要立即读取 BytesToRead 属性值,然后再根据通信需求将缓冲区中的相应字节读取出来。在 VisualBasic. net2008 中,如果要更改相应控件的属性和处理数据,则须要采用委托的方式进行。因为当数据从 SerialPort 对象上获取时,引发的相应 DataReceived 事件是发生在辅助线程上,如果要将主线程中的控件属性或其他 UI 元素等直接在 DataReceived 过程中进行修改,将会引发线程异常错误。

第 2 种就是利用定时器的进行数据接收的方式。假设任意一串数据的接收时间为 tms,则该定时器 Timer 的 Interval 属性值即为 tms,接着可以在一个 Button 的 Click 事件后,立刻把接收缓冲区中的字节通过 SerialPort 控件的 Read 方法读取出来,而且在 Timer 的 Tick 事件中可以直接对窗体控件的相关属性进行修改,不需要采取委托的方式。在对缓冲区中的数据读取时,因为采取的是字节型的数据传输方式,所以应采用 Read(Byte(), offset(), count()) 的方式完成。

### 4 路径跟踪控制仿真设计

利用插秧机的运动学模型和所设计的路径跟踪算法,在基于航向跟踪控制系统的基础上,应用 Matlab 的 Simulink 环境进行仿真研究<sup>[11]</sup>,建立插秧机路径跟踪控制系统的仿真框图,如图 4 所示。

对直线  $y = 3x$  进行跟踪仿真,所需的基本参数设置如下:由于规划路径为直线,所以  $C = 0$ ,则  $v = 1.5 \text{ m/s}$ ,预瞄距离为 4 m,被控对象在 XOY 坐标系中的初始位置为(0,0),初始航向角指向 y 轴的正方向。由此得出如图 5 的仿真图。从仿真结果图中可以看出在初始的一段距离内存在较大的稳态跟踪误差,研究中发现这是因为模型实际航向与规划路径存在夹角,经过控制器的调整后,完成了之后很平滑的直线跟踪。

### 5 路径跟踪控制试验分析

实现路径跟踪是评价控制系统设计好坏的最终标准,因

此本研究进行了相应的路径跟踪控制试验。

首先人工开动插秧机到不同的两点如 A、B 处获得坐标,并连接 A、B 两点构成一条直线,以此直线为坐标的  $x$  轴,将插秧机的前后轴中心线与基准线重合,航向角与  $x$  轴方向一致。同时在插秧机的后轴中心点挂上一装有白色石灰的漏斗,当插秧机以  $1\text{ m/s}$  的速度自动行驶时,所得的跟踪偏差与

行驶距离变化曲线如图 6 所示。

从图中可以看出,插秧机以  $1\text{ m/s}$  的速度进行直线跟踪时最大的跟踪偏差只有  $4\text{ cm}$ ,且始终围绕零值附近上下波动,计算平均跟踪偏差为  $0.84\text{ cm}$ 。所设计的系统控制器具有良好的控制性能,能满足水田作业机械的直线跟踪控制的要求。

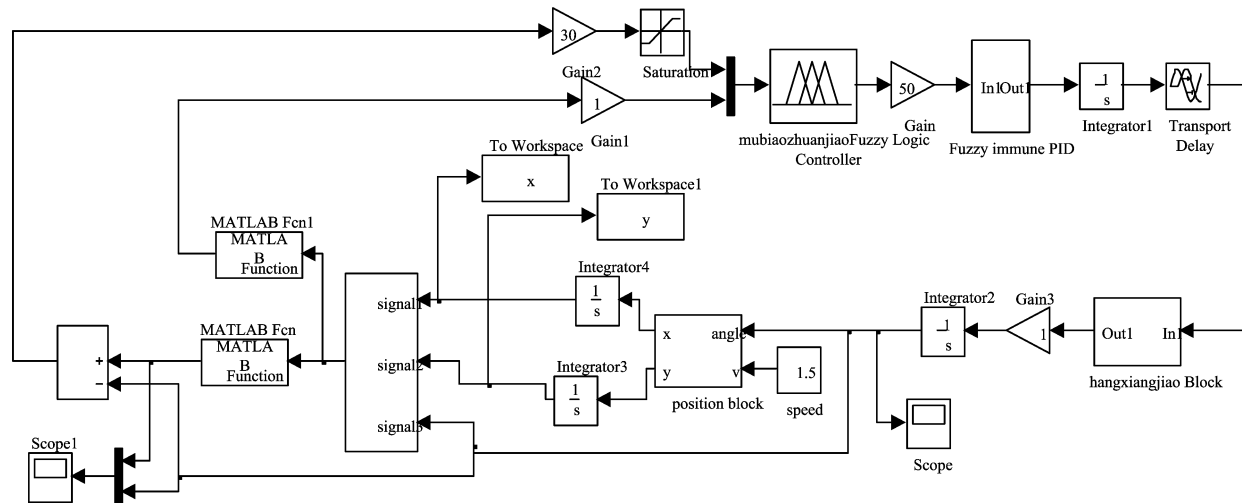


图4 路径跟踪仿真框图

统性能良好,能满足水田作业机械的路径跟踪控制系统要求。

#### 参考文献:

- [1] Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1/2): 155-167.
- [2] Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1/2): 169-194.
- [3] 张智刚, 罗锡文, 李俊岭. 轮式农业机械自动转向控制系统研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 77-80.
- [4] 于海业, 马成林, 并河清, 等. 农用自动引导行走车的实验研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 36-39.
- [5] 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 151-156.
- [6] 张智刚, 罗锡文. 农业机械导航中的航向角度估计算法[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 110-114.
- [7] 李庆中, 顾伟康, 叶秀清, 等. 移动机器人路径跟踪的智能预瞄控制方法研究[J]. 机器人, 2002, 24(3): 252-255.
- [8] 陈无畏, 李进, 王檀彬, 等. 视觉导航智能车辆的路径跟踪预瞄控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 277-282.
- [9] 龚沛曾, 陆慰民, 杨志强. Visual Basic 程序设计简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 218-220.
- [10] 蒋加伏, 张林峰. Visual Basic 程序设计教程[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 128-130.
- [11] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 127-129.

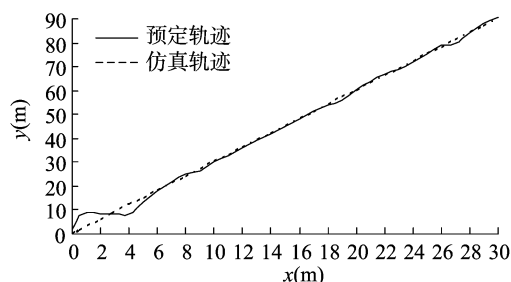


图5 直线路径跟踪图

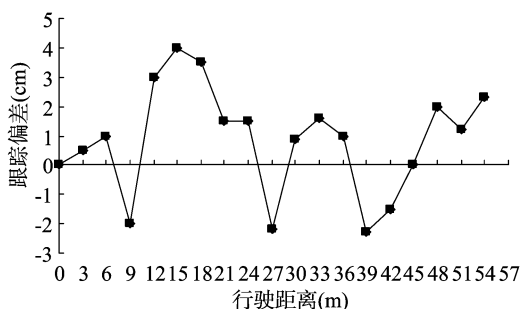


图6 直线跟踪时跟踪偏差与行驶距离变化曲线图

## 6 结论

本研究在分析了作业机械路径跟踪预瞄的原理基础上,设计了基于规划路径弯曲度动态预瞄搜索算法的路径跟踪控制器,为水田作业机械的自动导航控制注入了灵魂。通过对插秧机的路径跟踪控制进行试验研究,结果表明基于自动导航的水田作业机械路径跟踪控制精度较高,所设计的控制系