

# 磁导航 AGV 分段模糊 PI 控制器设计<sup>\*</sup>

马平<sup>1</sup>, 肖全<sup>1</sup>, 邝锦祥<sup>2</sup>, 张智阳<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006; 2. 东莞台一盈拓科技股份有限公司)

**摘要:** 为了提高 3C 产品的自动化生产效率, 以 STM32F407ZGT6 单片机为系统控制器核心, 对磁敏传感器组寻迹的滚筒式 AGV 设计了 16 位磁敏传感器的阵列布置形式, 并根据此形式以及磁导引滚筒式 AGV 的寻迹约束条件和行走要求提出了路径的识别与轨迹跟踪算法, 即分段模糊 PI 控制算法, 以适应 AGV 小车在直行、转弯和停车三种状态下存在的位置偏差和角度偏差的控制。运用 Matlab 软件中 Simulink 模块搭建模糊控制器的仿真模型, 对 AGV 的轨迹跟踪进行仿真, 并进行了实际行走测试。AGV 行驶时路径偏差保持在 8 mm 以内, 可保证 AGV 稳定准确地跟踪预设路径, 且具有较强的鲁棒性。

**关键词:** STM32F407ZGT6; AGV; 磁导航; 分段; 模糊控制

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## Piecewise Fuzzy PI Controller Design of Magnetic Navigation AGV

Ma Ping<sup>1</sup>, Xiao Quan<sup>1</sup>, Kuang Jinxiang<sup>2</sup>, Zhang Zhiyang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Electrical and Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Dongguan Wintop Tech Co., Ltd.)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of the automated production of 3C product, an array arrangement for sensors about the 16 position magnetic sensor group tracing cylinder sensor of the AGV is designed, which uses STM32F407ZGT6 microcontroller as the core of the system controller. A path identification and trajectory tracking algorithm on the basis of the form are proposed. By using the subsection fuzzy PI control method, the position deviation and angle deviation of the AGV trolley in the three states of straight-line, turning and parking can be controlled. Then the Simulink module is used to build a simulation model of the fuzzy controller to simulate the trajectory tracking of the AGV. Eventually an actual walking test is carried out. The AGV can be kept within 8 mm and can stably track the reference path under various conditions with high accuracy and robustness.

**Key words:** STM32F407ZGT6; AGV; magnetic navigation; piecewise; fuzzy control

## 引 言

AGV 在工业自动化生产线中适应性、柔性好, 可稳定实现生产和搬运功能, 因此被广泛应用<sup>[1]</sup>。为解决 AGV 小车的鲁棒位置偏差控制问题, 模糊控制也被广泛使用<sup>[3-4]</sup>, 但模糊控制器难以根据系统特性进行自适应的调整, 容易产生稳态误差。国内方面, 参考文献<sup>[5]</sup>提出基于 PLC 系统的 PID 控制在仿真和实验分析, 但是具有编程不灵活、价格过高等缺点。本文以磁条作为导引路径, 以 STM32F407ZGT6 单片机作为控制核心, 提出了一种集模糊控制与 PI 控制于一体的分段模糊 PI 控制算法, 解决了滚筒式 AGV 在自动化生产线中路径的准确识别与快速

跟踪精度不高的问题, 使得 AGV 在工业自动化生产线中能够以高精度稳定运行。

## 1 AGV 的基本结构分析

### 1.1 AGV 的结构模型

文中所讨论的为差速六轮滚筒式 AGV, 要求车身尺寸为 1 100 mm × 677 mm × 660 mm, 最大载重为 150 kg, 稳定行驶时保证路径偏差小于 8 mm、停车误差不超过 5 mm。磁传感器采集的偏差和驱动轮中心与磁条偏差同步, 轮系由车体中间两个驱动轮和四个万向轮组成, 以此来增强 AGV 的灵活性。文中磁敏传感器为 16 位 NPN 型开关量传感器, 当磁敏传感器相应的位检测到磁条的有效信号时, 该位输出高电平, 位与位之间的距离  $L = 10$  mm, 若中间 4 个磁敏传感器同时输出高电平, 则表明传

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(50775043); 粤港关键领域重点突破项目(TC08BE33-2)。

传感器在预设的路径中心正上方。磁敏传感器组在 AGV 小车中的具体布置结构模型如图 1 所示。

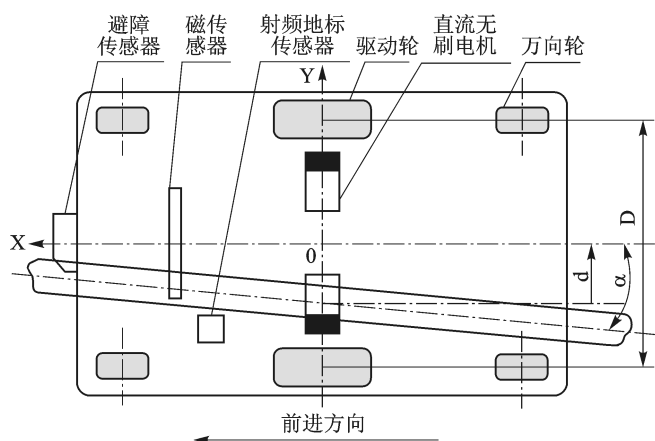


图 1 AGV 小车的结构模型

图 1 中,  $d$  为 AGV 小车在行驶过程中磁传感器获得的路径中心相对磁条的偏移量, 即位置偏差;  $\alpha$  为磁传感器感知的路径中心相对于预设路径中心线的偏转角, 即角度偏差; 在 AGV 行驶过程中, 角度偏差很难通过测量获得, 但可通过磁传感器的磁信号进行一些数据转换后, 得到角度偏差的数值。

## 1.2 磁条中心位置检测

AGV 在运动过程中, 磁条与传感器的相对位置会出现 3 种情形: ① 磁条被传感器完全覆盖, 此时磁条中心位置是传感器连续获取信号的点中心。② 磁条处于传感器边缘, 若此时传感器上检测到磁信号的位数少于 3, 则自动补齐传感器外面的位, 使有效位数为 4, 然后再计算磁条中心位置。③ 磁条超出了传感器的感应距离, 传感器丢线, 此时沿用丢线之前的磁条中心位置作为当前采样周期的磁条中心位置, 若连续丢线达到一定次数, 则认为 AGV 失去自导引能力。

## 1.3 有效磁条选择

AGV 在前进过程中, 同一时刻可能会检测到多块磁条的存在: ① 车子处在无分叉路段, 则会比较当前所有磁条的中心位置, 从多块磁条中选择中心位置最接近历史位置的一块磁条作为有效磁条。② AGV 进入分岔路段, 则会根据 RFID 标签信号选择靠近分岔方向的那块磁条作为有效磁条, 并将其中心位置视为检测到的路径中心位置。

## 1.4 路径跟踪

路径跟踪过程是单片机接收 RFID 读卡器发送过来的 RFID 标签号, 并据此判断 AGV 当前的位置 (根据位置信息执行直行、转弯、加减速、装工件、卸工件等动作), 以及何种路径跟踪模式, 并可依据位置偏差  $d$  和角度偏差  $\alpha$

计算出转向轮的转向角。RFID 即射频识别技术, 无需接触即可通过 RFID 卡获取小车位置信息, 完成信息输入和处理。AGV 行进的最基本控制算法都是基于位置式数字 PID 控制, 其输出如下:

$$U_n = K_p \cdot e_n + K_i \cdot \sum_{j=0}^n e_j + K_d \cdot [e_n - e_{n-1}] \quad (1)$$

式中  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  分别为比例、积分、微分系数,  $e_j$  ( $0 \leq j \leq n$ ) 为第  $j$  次采样的偏差,  $U_n$  为第  $n$  次采样偏差输入后的控制器输出。

针对 3C 产品的自动化生产, AGV 在其中的任务是物料的自动配送供给, 主要流程为: 现场生产管理系统根据任务要求规划 AGV 的行车路线后发送相应的指令给 AGV 小车, 小车从仓库中将工件毛坯沿着规划好的路径运送至相应的工位进行一系列的机加工和视觉检测, 最后再将加工完的成品运送至成品仓库等待下一任务指令。其中, AGV 在直线轨道以高速前进, 保证生产高效; 在转弯轨道以中速前进以保证运行稳定; 在加工和检测工位前慢速停车以保证与接驳台精准对接。轨迹跟踪控制器的精度直接关系到 AGV 小车的安全性和可靠性。控制器的使命就是要实现轨迹的精确控制, 保证小车按预定轨迹安全行驶, 消除位置偏差和角度偏差。

在实际使用过程中, 目前大多应用 PID 控制器的 AGV 小车, 轨迹跟踪能力只能在一定的范围内有效。当初始偏差角度较小时, 小车能在短时间内纠正并消除角度和位置偏差, 并且消除过程收敛曲线平滑, 稳态误差也保持在较小的区间内, 可以满足 AGV 小车的在轨迹跟踪要求不高的场合使用。在 3C 产品自动化生产车间的实际使用过程中, 小车的行驶轨迹环境比较复杂, 对接精度要求较高, 此时 PID 控制器的效果就很难满足自动导航车的轨迹跟踪要求, 无法快速消除位置偏差和角度偏差, 使整个系统无法正常运行。所以针对 AGV 在生产线上三个阶段三种速度的行进特性, 提出了分段模糊 PI 控制。

## 1.5 AGV 运动模型建立

假设经过一小段时间  $t$ , 自动导航车运行时出现了位置偏差  $d$  和角度偏差  $\alpha$ , 则偏差方程为:

$$\Delta d = \frac{V_l + V_r}{2} \cdot \Delta t \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

$$\Delta \alpha = \frac{V_l + V_r}{2R} \cdot \Delta t \quad (3)$$

经过计算, 并对式 (2) 和式 (3) 的时间进行左右分别求导, 就可得出两偏差的相对应的变化率为:

$$\Delta d = \frac{V_l + V_r}{2} \cdot \Delta t \cdot \sin \alpha + u \quad (4)$$

$$\Delta \alpha = \frac{V_l + V_r}{2R} \cdot \Delta t + \theta \quad (5)$$

由上式可以得出 AGV 小车的空间状态方程为：

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta\alpha}{dt} \\ \frac{d\Delta d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ V_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/D \\ 0 \end{bmatrix} \Delta V + \begin{bmatrix} \theta \\ u \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,  $R$  为自动驾驶车的运动半径(即转弯半径),  $D$  为两轮轴距(单位为  $m$ ),  $\Delta t$  为采集周期(单位为  $s$ ),  $V_l$  与  $V_r$  为左右轮线速度(单位为  $m/s$ )。

通过统计出系统的输入端以及输出端的大量数据,根据多目标的改进自适应遗传算法<sup>[6]</sup>,得到了系统数学模型,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.003 \ 137 \ s^2 + 0.16 \ 835 \ s + 0.00 \ 448}{s^2 + 3.556 \ s + 0.978} \quad (7)$$

将磁传感器采集的位置偏差  $d$  和角度偏差  $\alpha$  作为输入量,输出则为两轮的速度差  $\Delta V$ ,最终推导出整个系统的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\Delta V}{dt} \\ \frac{d\Delta\alpha}{dt} \\ \frac{d\Delta d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & 0 & 0 \\ 1/D & 0 & 0 \\ 0 & V_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \alpha \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta U \quad (8)$$

在运动模型的基础上建立了 AGV 的空间状态方程,得到了自动引导车较为理想的驱动系统数学模型的传递函数,为后续小车的路径跟踪仿真研究奠定了基础。

## 2 分段模糊 PI 控制

### 2.1 分段模糊 PI 控制器的结构

单纯的模糊控制系统中缺少积分控制模块,因此系统存在稳态误差,而 PID 控制是基于精确的数学模型,AGV 在生产车间系统环境复杂,存在着非线性、滞后、时变、参数未知以及各种干扰等,导致控制不足,因此要寻找更为合适的控制算法来满足生产线的控制要求。分段模糊 PI 控制器是在常规模糊控制器模型基础上设计的,当输入量发生改变时,控制系统会通过转换开关动态的选择对应的模糊控制器来控制其输出量<sup>[7]</sup>。

分段模糊 PI 控制器的设计原理是:将输入量的大小分成几个区间,输入量经过模糊化处理后在相互独立的常规模糊控制器 1,2,...,N 中选择对应的模糊控制器映射到对应的模糊规则库的对应规则上。其原理图如图 2 所示。

分段模糊 PI 控制相比 PID 控制,不需要对比例积分微分参数整定,从而减少了工作量;相比模糊控制,都不需要控制对象的精确数学模型;由于模糊控制器的控制规则和模糊输入变量论域相互独立,在较大范围的输入量时,可有效避免输入与控制规则映射不完全的问题,相比常规

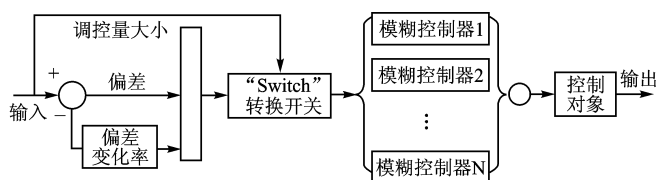


图2 分段模糊 PI 控制器原理图

模糊控制器输出量精度也会大大提高。

### 2.2 轨迹跟踪状态标量模糊化

将偏差  $error$  和偏差变化率  $change\_in\_error$  作为小车的模糊控制器的两个输入变量,速度差  $V_i$  作为输出变量,其中偏差  $error$  由角度偏差  $\alpha$  和位置偏差  $d$  组成。选择权重函数为  $e_k$  进行归一化处理得到偏差  $error$ ,其中  $\alpha$  的权重为  $k$ ,  $d$  的权重为  $(1-k)$ ,而偏差变化率为  $change\_in\_error$ ,即  $e_c$ :

$$e_k = error = k \cdot e + (1-k) \cdot \alpha \quad (9)$$

借用分层理论的方法来确定输入变量的变论域的伸缩因子。随着  $e_k$  和  $e_c$  变化,输入、输出的论域向中心收缩或向外膨胀成矩形或正方形。设  $[-E, E]$ 、 $[-E_c, E_c]$  和  $[-F, F]$  分别为  $e_k$ 、 $e_c$  和  $V_i$  的论域,输入、输出论域的伸缩因子为<sup>[8-9]</sup>:

$$\alpha(e_k, e_c) = \max \left\{ \left( \frac{|e_k|}{E} \right)^{\tau_1}, \left( \frac{|e_c|}{E_c} \right)^{\tau_2} \right\} + \epsilon \quad (10)$$

其中  $0 < \tau_1, \tau_2 < 1$ 。把输入变量和输出变量分别转化到论域为  $[-6, 6]$  的模糊集  $E$ 、 $E_c$  和  $F$ 。输入和输出变量的模糊子集语言变量设置为  $\{nl, nm, ns, zo, ps, pm, pl\}$ ,其模糊子集的隶属度函数取高斯函数和三角函数,如图 3 所示。

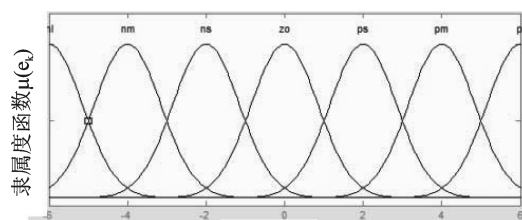
根据 1.5 节中建立的空间状态方程在 Matlab/Simulink 平台上搭建 AGV 的仿真模型,其仿真结构图如图 4 所示。“Fuzzy Logic Controller”模块分别为常规模糊控制器 a, b, c, 当输入量不同时,“switch2”模块选择对应的模糊控制器。模糊控制器 a, b, c 的设计原理一致,只是论域有所改变。模糊控制器的规则语句描述模型是:

if(Error is A) and (Change\_in\_error is B) then( $V_i$  is C)

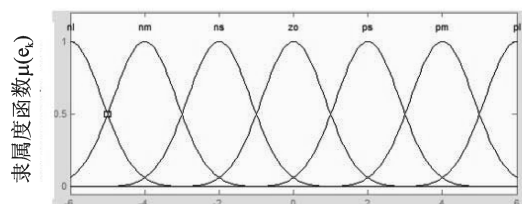
通过总结归纳经验使用常用的一种模糊控制规则,在 Matlab/Fuzzy Logic Controller 模块中建立了对应模糊控制器的 fls 模型和模糊控制器的规则参数表,得到模糊控制器的规则曲面如图 5 所示。

## 3 仿真结果及分析

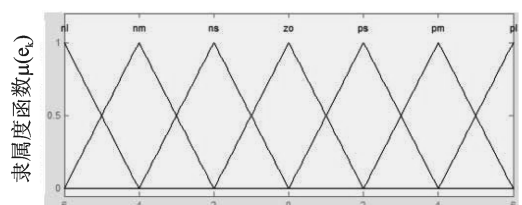
为了验证分段模糊 PI 模糊控制器的有效性和优越性,首先对采用模糊控制和分段模糊 PI 模糊控制的控制效果进行了对比分析,根据式(6)搭建的自动驾驶车的仿



论域E

(a) 偏差 $e_e$ 隶属度函数


论域E\_c

(b) 偏差变化率 $e_c$ 隶属度函数


论域F

(c) AGV小车的速度差 $V_r$ 隶属度函数

图3 输入输出的隶属度函数

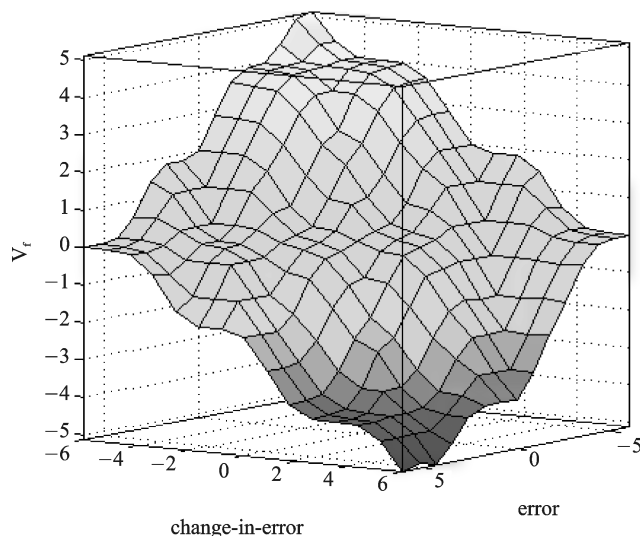


图5 模糊控制器规则曲面图

真模型进行仿真分析。设置小车的初始角度偏差为 $4^\circ$ ，而设置位置偏差初始值为 $-0.4\text{ m}$ ，权重 $k=0.35$ ， $\tau_1=\tau_2=0.9$ 。分别得到图6和图7所示的角度偏差和位置偏差的响应对比图。

由于设置的初始偏差角度为 $4^\circ$ ，图6和图7中的仿真结果表明，在有干扰信号下AGV的运行轨迹在 $2\text{ s}$ 左右自动调整位姿，从偏移位置调整到磁条轨迹并稳定运行，能够看出该控制器系统超调量极小，而且响应速度较快。

## 4 实验测试

为了测试分段模糊PI控制器在AGV小车上的性能，检验仿真结果、结构布局和软件设计是否合理，结合设计数据搭建了AGV硬件平台，分别铺设了直线磁轨道和环形磁轨道进行测试，测试的路径示意图如图8(a)~图8(c)所示。

经过多次测试，在走直道过程中，速度为 $0.7\text{ m/s}$ 时，AGV会有轻微震荡，横向位置偏差在 $8\text{ mm}$ 以内。过弯道时，速度为 $0.34\text{ m/s}$ ，转弯半径为 $1.25\text{ m}$ ，横向位置偏差稳定在 $8\text{ mm}$ 以内，但震荡频率相对走直道略高。以 $0.17\text{ m/s}$ 的速度停车时，与目标停车点的偏差在 $5\text{ mm}$ 以内，横向位置偏差试验曲线如图9所示。

实验结果表明，AGV小车能沿着铺设的磁条稳定直行和转弯，在指定

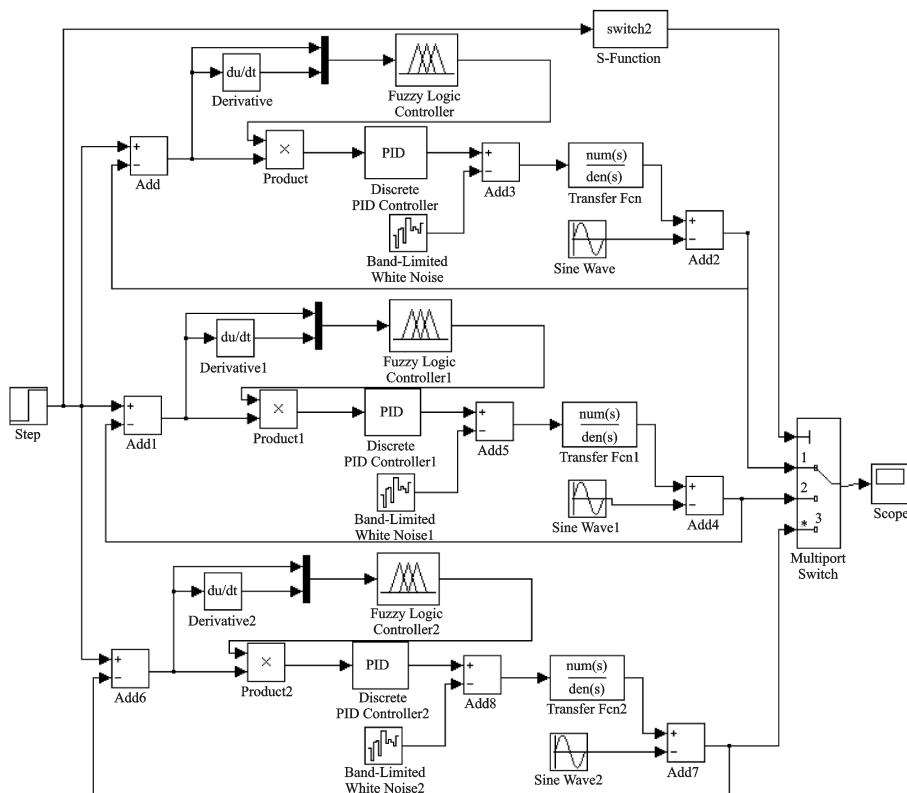


图4 分段模糊PI控制器仿真结构图



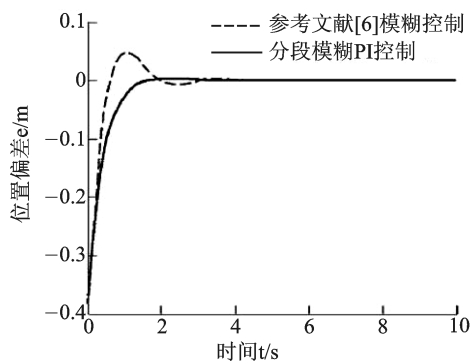


图6 位置偏差响应对比图

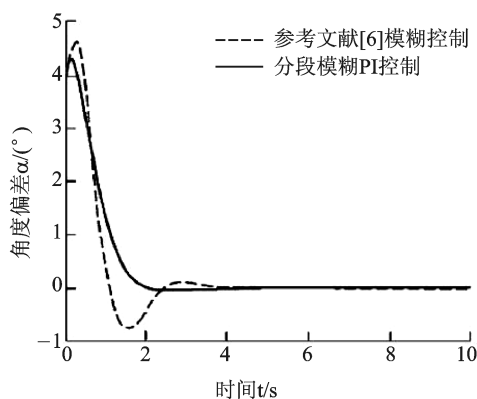


图7 角度偏差响应对比图

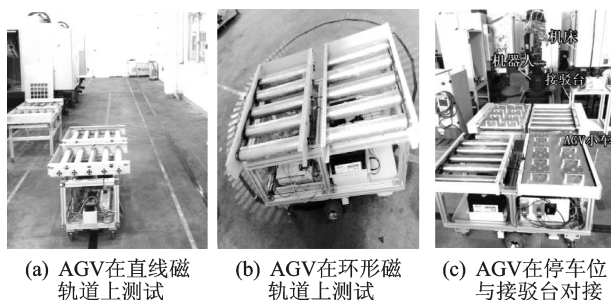


图8 AGV的直线、转弯、停车测试

的工位稳定停车执行工件装卸动作,横向偏差的变化过程也与实际的纠偏过程吻合,表明基于 STM32 的分段模糊 PI 控制器的跟踪性能稳定准确,能够满足 3C 自动化生产线的要求。

## 结 语

针对 3C 产品自动化生产线对 AGV 的要求设计了以 STM32F407ZGT6 单片机为核心的分段模糊 PI 控制器,通过分段模糊 PI 控制算法提高了 AGV 小车的角度偏差和横向位置偏差。以 Matlab 为平台,建立了仿真模型进行轨迹仿真,随后搭建了实验平台进行测试验证,通过实验数据与仿真结果进行对比表明,集模糊控制与 PI 控制

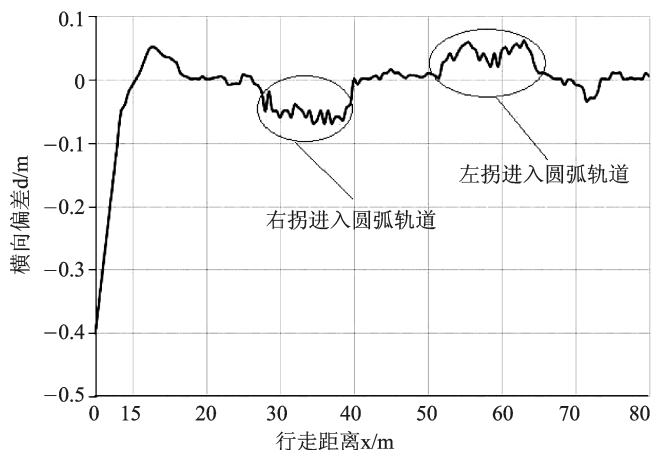


图9 横向位置偏差试验曲线

于一体的分段模糊 PI 控制器能保证路径跟踪的平稳性和鲁棒性,为磁导引滚筒式 AGV 的自动控制提供了一种可供参考的方法。

## 参考文献

- [1] Peters B, Smith J, Venkatesh S. A Control Classification of Automated Guided Vehicle Systems[J]. International Journal of Industrial Engineering, 1996, 3(1): 29-39.
- [2] CREMEAN L B, FOOTE T B. Alice: An information-rich autonomous vehicle for high-speed desert navigation [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(10): 777-810.
- [3] YANG J, ZHENG N N. An expert fuzzy controller for vehicle lateral control[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics Society, November 5-8, 2007, Taipei, Taiwan, China, 2007: 880-885.
- [4] RAIMONDI F M, MELLUSO M. Fuzzy motion control strategy for cooperation of multiple automated vehicles with passengers comfort[J]. Automatica, 2008, 44(11): 2804-2816.
- [5] 黄胃. 基于 PLC 控制的 AGV 技术研究及其应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [6] 程航. AGV 小车轨迹跟踪控制策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [7] 分段模糊 PI 控制在无刷直流电机中的应用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [8] 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. 中国科学, 1998, 28(3): 259-267.
- [9] 李洪兴. 从模糊数学本质看模糊逻辑的成功-关于“关于模糊逻辑似是而非的争论”的似是而非的介入[J]. 模糊系统数学, 1995, 9(4): 1-14.
- [10] 郑炳坤, 赖乙宗, 叶峰. 磁导航 AGV 控制的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2014(3): 6-10.

马平(教授), 主要研究方向为高速数控机床关键技术、自动化装备;  
肖全(硕士研究生), 主要研究方向为机械自动化装备、AGV 控制系统的开发。

(责任编辑: 杨迪娜 收稿日期: 2017-08-07)