

# 基于模糊控制的 AGV 差速转向控制算法研究

张 坤,许伦辉

(华南理工大学 土木与交通学院,广州 510641)

**摘要:**针对磁导航自动引导小车转向控制问题,该文建立了AGV差速转向运动学模型,该模型主要是通过将转弯圆弧划分为若干个小圆弧分段求解得到。由于AGV转向控制模型具有非线性和非完整约束特性,传统的PID控制会使车辆偏差产生较大的跳变,影响小车转向的稳定性和准确性,而采用模糊控制可以有效改善这种情况。最后,运用Matlab/Simulink进行模型仿真。结果表明,采用模糊控制可以提高AGV车转向的快速性和准确性,提高了模型的实用性。另外,模糊控制算法在单片机控制系统上易实现,有利于实际工程应用。

**关键词:**磁导航AGV;模糊控制;差速转向;Matlab/Simulink

**中图分类号:**TP273.4 **文献标志码:**A

## Research on Magnetic Navigation AGV Differential Steering Control Algorithm Based on Fuzzy Control

ZHANG Kun, XU Lun-hui

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The AGV differential steering kinematics model, which was obtained by dividing the turning arc into several small circular arc segment, was built for the magnetic navigation automatic guided vehicle steering problem. Since the non-linear and the nonholonomic of the AGV steering control system constraint characteristics, greater jump would happen to the vehicle deviation by using the traditional PID control system. However this situation could be improved effectively by adopting fuzzy controller. Finally, the model was simulated by Matlab/Simulink. Simulation results show that the speed and accuracy of turning would be improved by adopting fuzzy controller. Practicability of the model was improved. In addition the fuzzy control algorithm was easy to implement on the single-chip control system, which was conducive to practical application engineering.

**Key words:** magnetic navigation automated guided vehicle (AGV); fuzzy control; differential steering; Matlab/Simulink

自动引导小车 AGV(automated guided vehicle)属于一种轮式机器人,目前广泛地应用于智能仓储、物流搬运系统、港口物流、危险运输等行业。AGV 的特点是无人驾驶,其实现主要依托导航和导引系统。目前 AGV 的导航技术主要包括视觉导航、GPS 导航、激光导航、磁带导引等方式<sup>[1]</sup>。其中磁带

导引是指在地面铺设磁带作为 AGV 的路径,通过车体上的磁导航传感器感应磁条的位置,传感器将信号传输到控制系统完成 AGV 的路径跟踪过程。磁带导引凭借其稳定性高、抗干扰性强、成本较低的优点被广泛应用于工程领域。

AGV 的负载一般较大,因此自身存在较大的惯

收稿日期:2016-05-26;修订日期:2016-08-10

作者简介:张坤(1991—),男,硕士研究生,研究方向为智能控制理论及应用;许伦辉(1965—),男,教授,博士生导师,研究方向为智能控制理论及应用、智能交通系统等。

性。工业现场的路径均存在各种类型的转弯,如何实现快速、安全地转向是 AGV 路径跟踪的一个主要内容。由于磁导航传感器的精确度有限以及 AGV 本身的非完整约束特性和非线性,传统的控制方法要实现良好的转向性能需要的算法很复杂,在单片机控制系统上很难实现。故本文采用模糊控制<sup>[2]</sup>来设计 AGV 的差速转向系统。

## 1 AGV 运动学模型

本文设计的磁导航 AGV 采用四轮式结构,车身前部 2 个轮子为万向轮,后部 2 个轮子为驱动轮。驱动轮分别由 2 个独立的直流电机驱动,通过控制 2 个驱动轮的转速,利用二者之间的差速实现转向,即差速转向控制<sup>[3]</sup>。

AGV 运动学模型<sup>[4]</sup>的建立基于以下几点假设:

- (1)AGV 轮子与地面之间不发生相对滑动;
- (2)AGV 所在平面是平整的,即 AGV 模型的建立基于基准坐标系  $xOy$ ,只有二维空间的运动;
- (3)万向轮可以完全跟随驱动轮的运行状态;
- (4)铺设的磁道是连续的,宽度的精确度在误差允许范围之内。

路径引导示意如图 1 所示。图中弧线是 AGV 转向的路径,A 点是 2 个驱动轮的中心点,B 点是磁导航的中心位置, $H$  是 2 个驱动轮之间的距离, $R$  是驱动轮的半径, $L$  是车体的有效转向长度, $\alpha$  角是车体偏离转弯路径切线方向的角度。

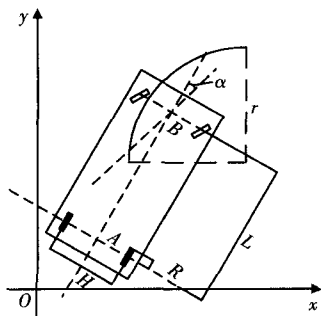


图 1 路径引导示意

Fig.1 Schematic view for route guidance

设  $\omega_l$  为左驱动轮的角速度, $\omega_r$  为右驱动轮的角速度,则车体转向时的角速度为

$$\omega = (\omega_l - \omega_r)R/H \quad (1)$$

$t$  时刻车体运行相对于路径切线方向的角度为

$$\alpha = \alpha_0 + \int_0^t \omega dt \quad (2)$$

式中: $\alpha_0$  是车体转弯  $t=0$  时的角度。

两驱动轮中心点 A 在车体转弯时的瞬时线速度为

$$V = (\omega_l + \omega_r)R/2 \quad (3)$$

某时刻 A 点在  $xOy$  平面两坐标轴的速度分量为

$$V_{ax} = V \sin \alpha \quad (4)$$

$$V_{ay} = V \cos \alpha \quad (5)$$

设 A 点的  $t=0$  时刻坐标为  $(x_{a0}, y_{a0})$ ,则  $t$  时刻 A 点的坐标为  $(x_a, y_a)$ :

$$x_a = x_{a0} \cos \alpha + \int_0^t V_x dt \quad (6)$$

$$y_a = y_{a0} \sin \alpha + \int_0^t V_y dt \quad (7)$$

则  $t$  时刻传感器中心点 B 点的坐标为  $(x_b, y_b)$ :

$$x_b = x_a + L \sin \alpha \quad (8)$$

$$y_b = y_a + L \cos \alpha \quad (9)$$

圆弧段都可以分割为若干个圆形的一段圆弧,模型中为简便设当前的一段圆弧是半径为  $r$  的圆的一段圆弧,圆的圆心设为  $(x_r, y_r)$ ,则 B 点  $t$  时刻偏离规定路径的距离为

$$\Delta E_b = \sqrt{(x_b - x_r)^2 + (y_b - y_r)^2} - r \quad (10)$$

假设轨迹的圆心为  $(0, 0)$ ,代入式(10)可得

$$\Delta E_b = \sqrt{x_b^2 + y_b^2} - r \quad (11)$$

## 2 AGV 路径跟踪模糊控制器

### 2.1 AGV 路径跟踪控制系统描述

本文 AGV 路径跟踪采用的传感器是 JH-16 型磁导航传感器,传感器安装在 AGV 的前部。传感器检测路径的原理如图 2 所示,磁导航传感器上有间隔 10 mm 的平均排列的 16 个采样点,采样点可以感应地面上磁条的磁场输出为一个 16 位的二进制数,通过对这个 16 位数字的左右 8 位数进行分析可以得到当前车辆相对地面磁条的位置偏离。

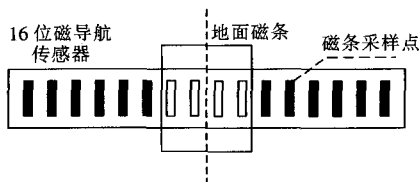


图 2 磁导航传感器路径检测示意

Fig.2 Schematic diagram of path detection based on magnetic navigation sensor

通过对磁导航传感器的输出的分析转化得到当前 AGV 偏离磁条的实际距离  $\Delta E$ ,  $\Delta E > 0$  时车体轴向相对磁条切向偏右,  $\Delta E < 0$  时车体轴向相对磁条切向偏左,  $\Delta E = 0$  时车体轴向与磁条切向一致。故  $\Delta E$  作为控制系统的输出量来反映 AGV 路径跟踪的情况。AGV 差速转向控制系统框图如图 3 所示。检测输出的  $\Delta E$  与给定值进行比较, 通过模糊控制器计算后给出针对目前偏离要调整的  $\omega_l$  和  $\omega_r$  作为 AGV 数学模型的输入。

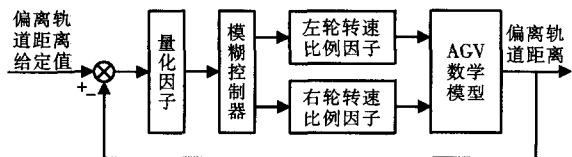


图 3 AGV 差速转向控制系统

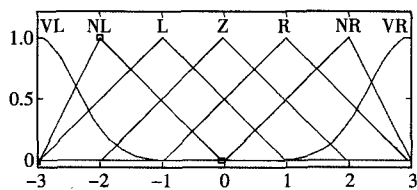
Fig.3 Block diagram of differential steering control system

## 2.2 AGV 路径跟踪模糊控制器的设计

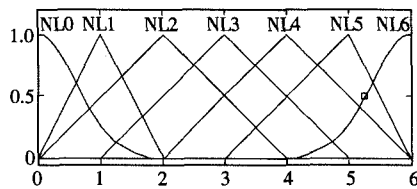
模糊控制器的输入变量为偏差  $\Delta E$ , 输出变量为左、右驱动轮的角速度  $\omega_l$  和  $\omega_r$ 。由 JH-16 磁导航传感器的参数可得  $\Delta E$  的基本论域为  $-8 \sim 8$  cm。根据工程经验 AGV 安全运行的速度应不超过 65 m/min, 结合本论文所采用的 AGV 小车的轮子半径  $R=7$  cm 计算得  $\omega_l$  和  $\omega_r$  的基本论域为  $0 \sim 35$  rad/s。输入语言变量  $X$  的基本论域为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 输出语言变量  $Y, Z$  的基本论域为  $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。量化因子是指输入变量基本论域和输入语言变量之间进行论域变化的转换系数, 故输入变量  $\Delta E$  的量化因子为  $k_x = \frac{6}{16}$ 。比例因子是指输出语言变量基本论域与输出变量基本论域之间进行论域变换的转换系数, 故输出变量  $\omega_l$  和  $\omega_r$  的比例因子分别为  $k_y = k_z = \frac{35}{6}$ 。

语言变量值用来描述语言变量的模糊等级。本文输入语言变量值  $X$  选取 7 个: 极偏左 (VL), 非常偏左 (NL), 偏左 (L), 正常 (Z), 偏右 (R), 非常偏右 (NR), 极偏右 (VR); 输出语言变量值  $Y$  选取 7 个: 左轮速度 0 (NL0), 左轮速度 1 (NL1), 左轮速度 2 (NL2), 左轮速度 3 (NL3), 左轮速度 4 (NL4), 左轮速度 5 (NL5), 左轮速度 6 (NL6)。输出语言变量值  $Z$  选取 7 个: 右轮速度 0 (NR0), 右轮速度 1 (NR1), 右轮速度 2 (NR2), 右轮速度 3 (NR3), 右轮速度 4 (NR4), 右轮速度 5 (NR5), 右轮速度 6 (NR6)。建立

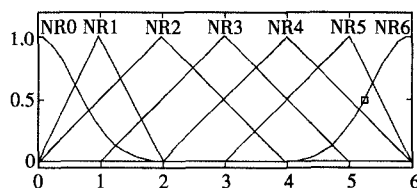
模糊隶属函数如图 4 所示。



(a) 输入模糊隶属函数



(b) 输出  $\omega_l$  模糊隶属函数



(c) 输出  $\omega_r$  模糊隶属函数

图 4 模糊隶属函数

Fig.4 Fuzzy membership function

根据差速转向原理以及实验规律确定模糊控制规则, 系统具有 1 个输入量 2 个输出量, 且 2 个输出量之间是与的关系, 模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy control rule table

$X$	$Y$ and $Z$
VL	NL0 and NR 6
NL	NL0 and NR 6
L	NL2 and NR4
Z	NL0 and NR0
R	NL4 and NR2
NR	NL5 and NR1
VR	NL6 and NR0

## 3 仿真结果及分析

AGV 路径跟踪模糊控制器设计完成后, 根据工程采用的 AGV 车体确定运动学模型的参数。车体宽度  $H=40$  cm, 车身长度  $L=150$  cm, 车轮半径  $R=5$  cm, 转弯半径  $r=60$  cm, 车体初始角度  $\alpha_0=0^\circ$ , A 点的初始坐标为  $(-20, -150)$ 。结合本文所建立的 AGV 运动学模型在 Matlab 的 Simulink 里搭建仿真系统。系统输入信号给定为一个阶跃信号, 通过阶跃信号的跳变过程来模拟 AGV 小车偏离轨道的  $\Delta E$ , 而阶跃的初始和最终信号都代表  $\Delta E=0$  的情况。本文对

AGV 不同运行速度的转弯情况进行了模拟仿真,结果如图 5 所示。

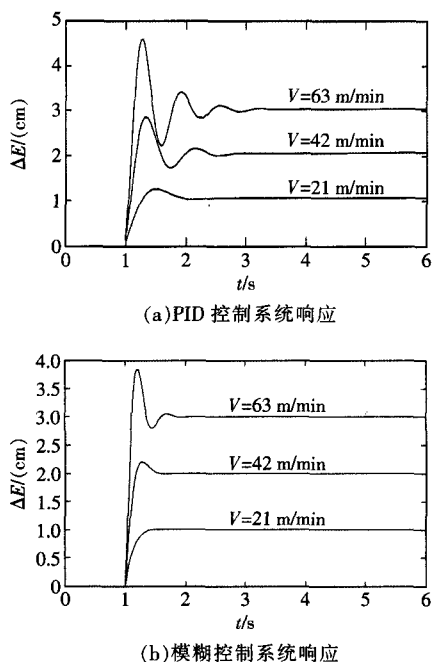


图 5 差速转向控制系统响应

Fig.5 Differential steering control system response

通过对二者的对比可以得出采用模糊控制器后系统的稳定性和快速性得到了巨大的提高,表现的结果就是 AGV 小车可以准确、快速地实现转弯。图 5(b)反映了 3 种速度情况下系统的响应,可以看出速度越高系统的波动越大,但是波动范围小于 2 cm,在实际允许范围内。通常情况下 AGV 小车的运动速度控制在 20~60 m/min 范围内,因为 AGV 一般都是负载运行的,车体的惯性比较大,速度太快会存在安全隐患。故在正常运行速度范围内,仿真结果表明本次的模糊控制器的设计是成功的。

3 种不同速度情况下的转向控制过程中左右轮的角速度变化情况如图 6 所示,其中  $\omega_l$  和  $\omega_r$  分别代表左右轮的角速度。角速度是通过  $V = \frac{\omega R}{2}$  计算得到的,其中  $R$  为 AGV 小车轮子的半径,  $V$  为小车当前转向的速度,即车轮的线速度。  $V=63$  m/min、 $V=42$  m/min、 $V=21$  m/min 3 种速度分别对应  $\omega=30$  rad/s、 $\omega=20$  rad/s、 $\omega=10$  rad/s。

通过图 6 可以看出 AGV 两轮差速转向的过程,响应时间和波动情况都可以和系统响应图中的速度等级相对应,差速转向过程左右轮的速度并不是完全对称的,根据车身速度和偏离轨道情况的不

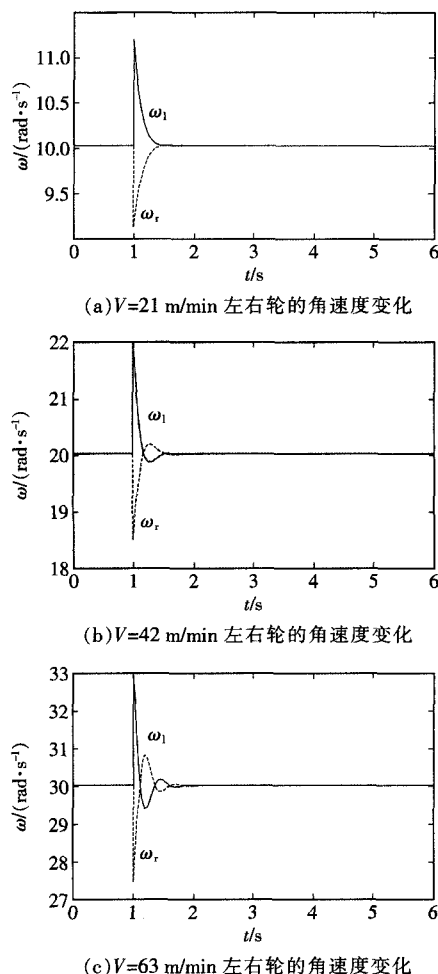


图 6 差速转向左右轮转速变化曲线

Fig.6 Speed variation curve of the left and right wheels during the differential steering

同,左右轮可以做出相应的转速的改变,从而使 AGV 可以准确、快速地实现转向的过程。

## 4 结语

磁导航 AGV 差速转向控制简单、实用。转向过程中的准确性和稳定性至关重要,而磁导航传感器只能粗略地反映车辆跟踪轨迹的情况,AGV 小车本身具有非完整约束特性和非线性,因此对传感器的输入量进行模糊化有利于对模糊量的准确控制。本文通过对 AGV 转向过程进行数学建模,采用模糊控制器来改善差速转向系统的稳定性和准确性。针对 AGV 小车运行过程中不同速度等级进行 Matlab 仿真,仿真结果与传统 PID 控制仿真结果对比表明采用模糊控制器后,AGV 小车转向时的波动变小,系统响应时间变短。结果表明, (下转第 66 页)

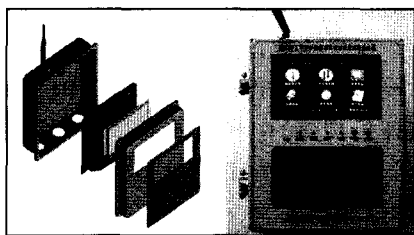


图5 监测终端机械结构及实物

Fig.5 Mechanical structure and physical device of the monitoring terminal

## 6 试点应用

本文研制的监测终端在杭州某医院的锅炉房开展试点应用,监测对象为1台4t燃气锅炉,型号为WHS4-1.0-YQ。针对该锅炉,采用外加传感器监测方式,在主蒸汽管道上布置蒸汽温度、蒸汽压力监测点,在排烟管道上布置排烟温度、排烟氧含量监测点,在给水管道上布置冷水温度、热水温度、水质硬度监测点,在锅炉房布置环境温度监测点,在锅炉控制柜内布置相关开关量监测点,提取运行、点火、高低水位报警、超压报警、综合报警、熄火故障等开关信号,监测终端样机安装在锅炉房墙面上,经过调试试运行,该终端样机成功与杭州市工业锅炉节能减排远程监测与服务平台实现数据对接。截至2016年4月,试点终端样机已连续稳定运行达18个月,运行效果良好。

## 7 结语

采用嵌入式技术、无线通信技术研制了工业锅

炉远程监测智能物联网终端,该终端采用STM32F103 ARM微处理器及SIM900A无线模块为硬件核心,采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式操作系统为控制软件内核,集成7寸液晶触摸屏,以高性价比方式实现混合信号数据采集、GPRS无线透明传输、现场人机触控交互、串行通信、在线能效计算、远程配置管理等功能,试点应用效果表明所研制终端能有效实现工业锅炉节能与安全状态的实时监测与诊断,具有结构紧凑、集成度高、稳定可靠、通用性好、成本低等特点,市场推广前景良好。

### 参考文献:

- [1] 赵钦新,王善武.我国工业锅炉未来发展分析[J].工业锅炉,2007(1):1-9.
- [2] 赵钦新,周屈兰.工业锅炉节能减排现状、存在问题及对策[J].工业锅炉,2010(1):1-6.
- [3] 全营,顾新建,纪建建,等.基于物联网和云计算的工业锅炉在线监测[J].计算机集成制造系统,2016,22(1):213-219.
- [4] 李飞翔,杨笑峰,王泓,等.基于物联网的锅炉能效测试集成系统的研发[J].工业锅炉,2013(4):34-38.
- [5] 任强,赵辉.物联网技术在锅炉运行管理中的应用实践[J].工业锅炉,2014(1):50-54.
- [6] 邓式阳,李耀明.工业锅炉安全远程多点监控系统[J].计算机工程,2010,36(17):255-257.
- [7] 霍凤财,任伟建,康朝海,等.基于组态王和PLC的工业锅炉监控系统设计[J].化工自动化及仪表,2013,40(9):1103-1105.
- [8] 松井邦彦.传感器应用技巧141例[M].北京:科学出版社,2007.
- [9] 王永虹,徐炜,郝立平.STM32系列ARM Cortex-M3微控制器原理与实践[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- [10] 霍涛,贾振堂.基于STM32和SIM900A的无线通信模块设计与实现[J].电子设计工程,2014,22(17):106-110.

(上接第4页)本文的模糊控制器设计是正确的,而且本文采用的数学模型和模糊控制器模型算法易实现,可以在AGV的单片机控制系统中通过编程实现,具有工程实际应用价值。

### 参考文献:

- [1] 叶菁.磁导式AGV控制系统设计与研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.
- [2] 王立新.模糊系统与模糊控制教程[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 钱华.基于模糊控制的移动机器人导航系统设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [4] 刘金琨.智能控制[M].2版.北京:电子工业出版社,2010.
- [5] 毕胜.AGV控制器设计与融合[D].吉林:吉林大学,2004.

- [6] 武星,楼佩煌.基于运动预测的路径跟踪最优控制研究[J].控制与决策,2009,24(4):566-600.
- [7] 马海涛.非完整轮式移动机器人的运动控制[D].北京:中国科学技术大学,2009.
- [8] Hidaka K.Holonomic automated guided vehicle control based on adaptive inverse dynamics Control[C]//International Conference on Control, Automation and Systems,2008.
- [9] O Mohareri,R Dhaouadi,M M Shirazi.Intelligent neural network based controllers for path tracking of wheeled mobile robots:A comparative analysis[J].IEEE International Workshop on Robotic & Sensors Environments,2010:1-6.
- [10] M Yue,Y Zhang,F Y Tang.Path following control of a two-wheeled surveillance vehicle based on sliding mode technology [J].Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2013(35):212-218.