

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.01.015

一款 AGV 磁导航传感器的设计

凌俊¹, 黄卓群², 李陶胜¹, 王淑芳¹

(1. 安庆职业技术学院机电工程学院, 安徽 安庆 246003; 2. 安徽电信规划设计有限责任公司, 安徽 合肥 230031)

摘要:在工业自动化的发展过程中, AGV(自动导引车辆)广泛投入使用, 目前应用较广泛的导航方式之一是磁条导航, 它具有对环境要求低、安装简单、易维护、成本低等优点。设计了一款 AGV 磁导航传感器, 该传感器以 ARM Cortex-M3 为核心、RS232C 线驱动和磁导航模拟前端设计硬件实验平台, 实时采集磁导航信号, 采集到的信号通过对数-双曲正切函数的鲁棒自适应滤波算法, 减小 AGV 行驶过程中的偏差, 在 $\mu C/OS$ III 微型操作系统进行任务循环调度, 通过人机交互界面观测传感器实时状态, 对 AGV 的运行轨迹进行修正。根据实验数据和仿真结果表明: 使用该磁导航传感器的 AGV 行驶偏差较小, 车身更加平稳。

关键词: AGV; 磁导航传感器; 模拟前端; $\mu C/OS$ III

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-1891(2023)01-0098-07

Design of an AGV Magnetic Navigation Sensor

LING Jun¹, HUANG Zhuoqun², LI Taosheng¹, WANG Shufang¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Anqing Vocational and Technical College, Anqing, Anhui 246003, China; 2. Anhui Telecom Planning and Design Co. Ltd., Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: In the development process of industrial automation, AGV (automatic guided vehicle) is widely used, and one of the most widely used navigation methods is magnetic stripe navigation, which has the advantages of low environmental requirements, simple installation, easy maintenance and low cost. An AGV magnetic navigation sensor is designed, the sensor is designed with ARM Cortex-M3 as the core, RS232C line drive and magnetic navigation analog front-end design hardware experimental platform, real-time acquisition of magnetic navigation signals, the collected signal through the log-hyperbolic tangent function of the robust adaptive filtering algorithm, reduce the deviation during AGV driving, perform task cycle scheduling in the $\mu C/OS$ III micro-operating system, and observe the real-time status of the sensor through the human-computer interaction interface, the running trajectory of AGV is corrected. The field experimental results show that according to the experimental data and simulation results, the AGV using the magnetic navigation sensor has less driving deviation and a smoother body.

Keywords: AGV; magnetic navigation sensor; analog front-end; $\mu C/OS$ III

0 引言

自动导引车辆 (Automatic Guided Vehicle, AGV) 是轮式移动机器人的一种, 又称为无人驾驶车^[1]。国内 AGV 应用较广泛的导航方式是磁条导航方式, 其导航方式是在地面铺设磁条, 导航传感器通过对磁条磁场的感知来进行导航, 这种导航传感器称为磁导航传感器。具体来说, 磁

导航传感器是通过检测预铺设的磁条或磁钉产生的磁场获得自动导引车的位置或姿态信息, 在智能小车领域得到了广泛的应用, 国内外对其进行了大量的研究^[2]。目前, 市场中的磁条导引 AGV 传感器较多的是霍尔元件的激励电路采用恒压源激励, 对温度的补偿效果差^[3], 且多路 I/O 数字量输出, 不能获得精确偏移距离。本文设计的磁性导航传感器, 采用霍尔元件阵列作为磁场

收稿日期: 2022-08-15

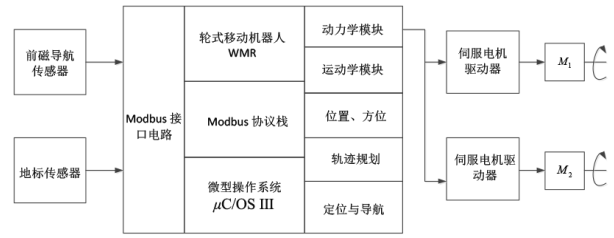
基金项目: 安徽省质量工程教学研究项目 (2018jyxm0645); 安徽省高校自然科学研究项目 (KJ2021A1437、KJ2021A1439)。

作者简介: 凌俊 (1992—), 安徽安庆人, 助教, 学士, 主要研究方向: 移动机器人控制、智能控制。

强度感应器件,成本低、精度高,可对多种磁场强度和宽度的导引磁条进行导航^[4];采用恒流源激励电路,减小温度对传感器的影响,并将收集到的导航信息通过自适应滤波器,降低行驶过程中的偏移量,最后通过 RS232C 总线输出导航数据,具有很高的抗干扰能力。

1 磁导航传感器工作原理

导航控制是整个 AGV 系统能否正常运行的关键^[5]。磁导航的核心是磁传感器。磁传感器是一种将磁场转换成电压或电流信息的传感器件,其中,使用最广泛的磁传感器之一是基于霍尔效应的磁传感器。将霍尔效应和集成电路结合,就可以做成霍尔元件,经过温度补偿电路的霍尔元件经差分放大等获得磁场信息。该磁导航传感器利用 16 路采样点输出,能够检测出磁条上方的磁场强度信号,每一个对应采样点都有其相对应的一路信号输出,磁导引传感器内部垂直于磁条上方进行连续采样,每一个采样点检测到磁条磁场则会输出信号^[6]。AGV 根据 16 位传感器将产生相应信号输出给控制器,计算偏移磁条中心的距离,来差速驱动 AGV,使 AGV 沿着预先规定的轨迹运行^[7],磁导航传感器的工作原理如图 1 所示。



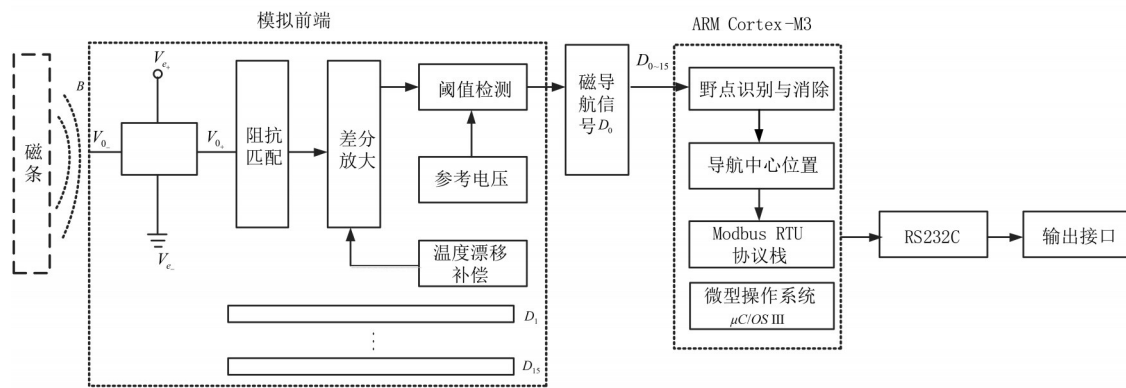
注: M_1 表示 AGV 左轮; M_2 表示 AGV 右轮。

图 1 磁导航传感器工作原理

2 磁导航传感器系统硬件结构

2.1 系统总体框图

系统总体框图如图 2 所示。磁导航传感器位于小车正前方,当传感器经过磁条时,霍尔元件会感应到磁条的强度 $B^{[8]}$,在霍尔原件上加入恒定的激励电压,霍尔元件则会输出霍尔电势,之后通过差分放大模块进行差分放大,输出差分信号。在差分放大模块中,加入温度漂移补偿模块进行补偿。接着在通过阈值检测模块后,输出 16 路的同构磁导航信号 $D_0 \sim D_{15}$ 。将这些信号接入 ARM 中,ARM 中包含了野点识别与消除模块、导航中心位置、Modbus RTU 协议栈和微型操作系统 $\mu C/OS III$,再通过 RS232C 电平转换,最后从输出接口输出共 16 位磁导航信息。



注: V_o 和 V_o 表示霍尔电势; V_e 和 V_e 表示激励电压。

图 2 磁导航传感器系统框图

2.2 模拟前端与磁导航感测电路

模拟前端与磁导航信息感测电路主要是研究霍尔电势的输入输出特性、温度漂移和零点漂移,目的在于抑制动态漂移,以此提高磁导航传感器的灵敏度和线性度。

磁导航传感器的模拟前端由 16 个同构通道 ch0~ch15 组成,每个通道由恒流激励电路、霍尔

元件、动态漂移抑制电路、差分放大、低通滤波器、可编程偏置调节电路、施密特触发器及 TTL/CMOS 接口电路等子模块组成(图 3)。

2.2.1 恒流源激励电路

因恒流源与恒压源相比,具有较多优势(表 1),故霍尔元件的激励电路采用恒流激励的方式,以改善霍尔元件的输出非线性特性。恒流源

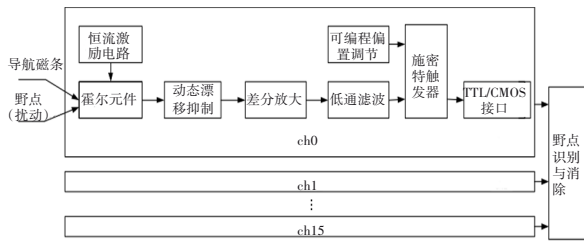


图 3 磁导航传感器的模拟前端

激励电路(图4)主要由运算放大器 LM324 和霍尔传感器 HW-101A 组成,电压经过 LM324 放大之后,产生的磁场被霍尔元件感应到后输出霍尔电势。其中 LM324 是四运放集成电路,具有电源电压范围宽、静态功耗小、可单电源使用等优点。恒流源电路在负载变化的情况下,能够相应地调整其输出电压,使得输出电流保持不变(图5)。

表 1 恒流源与恒压源作用对比

方式	工作原理	零点漂移	温度影响	灵敏度
恒流源	输出电流保持恒定的电流源	补偿效果较好	较小	较高
恒压源	输出电流改变时端电压保持稳定	无补偿作用	较大	较低

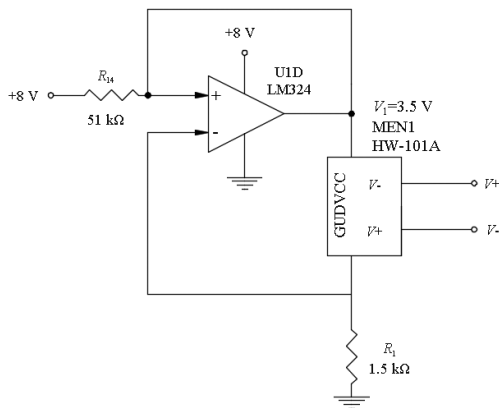


图 4 恒流源激励电路

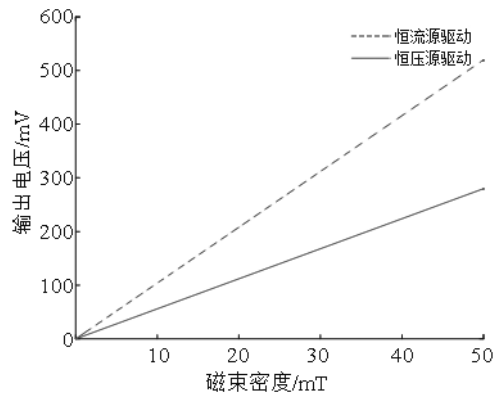


图 6 磁束密度与输出电压关系

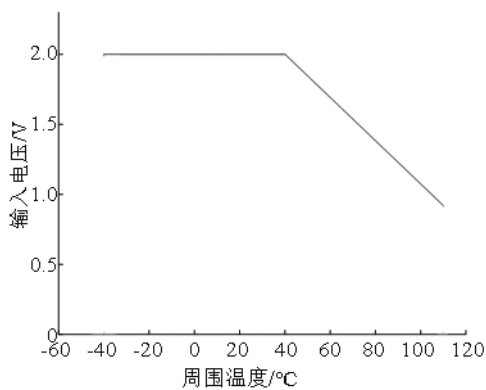


图 5 恒流源电路温度与输入电压关系

统设计采用 3 个四运放 LM324 组成一个具有对称结构的差分放大电路,如图 7 所示。

从图 6 可以看出,在同等的磁束密度情况下,恒流源驱动电路的输出电压高于恒压源驱动电路的输出电压。

2.2.2 霍尔电势差分放大电路

为了对霍尔元件输出的信号进行放大,本系

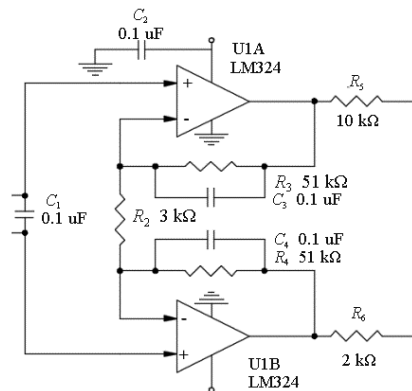


图 7 霍尔电势差分放大电路

差分放大电路的系统传递函数如式(1)所示。

$$G(S) = \frac{(V_{02} - V_{01})}{(V_+ - V_-)} = \frac{(0.390 2s^2 + 673.2s + 11 700)(V_{02} - V_{01})}{((-0.078s^2 - 30.6s - 3 000)V_{01} + (0.078s^2 + 30.6s + 3 000)V_{02}} = \frac{(0.390 2s^2 + 673.2s + 11 700)}{(0.078s^2 + 30.6s + 3 000)} \quad (1)$$

式中: G 为传递函数; S 为拉普拉斯变换; V_{o2} 为等效输出电压; V_{o1} 为等效输出电压; V_i 为输入电压; V_i 为输入电压; s 为电导单位, 值为电阻倒数。

根据计算的传递函数, 可以绘制出如图 8 所示的单位阶跃响应曲线。从图 8 可以看出, 系统在 0.04 s 之后就达到了稳定, 衰减速度很快, 在极短时间内结束, 因此可以知道传递函数的闭环极点的负实部的绝对值是一个较大的数。

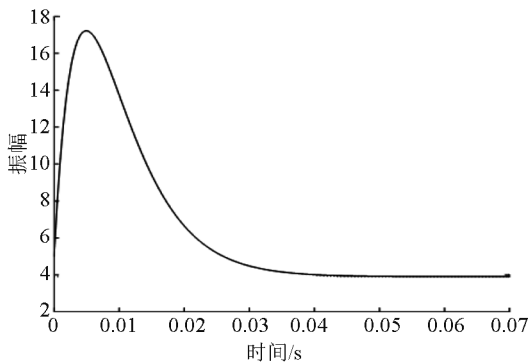
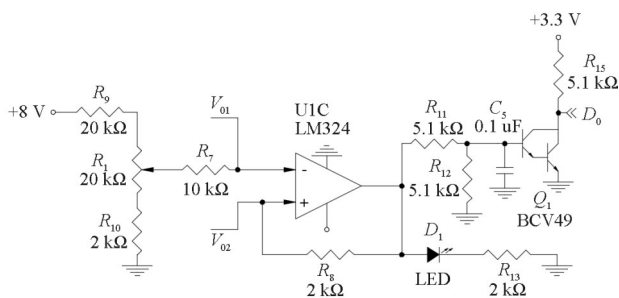


图 8 系统单位阶跃响应曲线

2.2.3 磁场强度阈值检测电路

磁场强度阈值检测电路如图 9 所示, 它是由阈值参考电压电路和比较电路 U1C 构成的, 本文设定阈值为 T_H , 当 $T_H + V_{o1} > V_{o2}$ 时, 输出为高电平; 当 $T_H + V_{o1} \leq V_{o2}$ 时, 输出为低电平。当输出为高电平时, LED 灯会亮; 当输出为低电平时, LED 灯会熄灭, 故可以根据 LED 灯的亮灭来了解到电路中的电压变化, 从而把磁导航信号大于阈值部分检测出来。



注: R_1 为滑动电阻。

图 9 磁场强度阈值检测电路

3 传感器软件设计

系统软件设计流程如图 10 所示。下面就流程中的部分内容做一说明。(1)初始化系统时钟。STM32 包括 2 个高速时钟 (HSE、HSI) 和 2 个低速

时钟 (LSE、LSI), 本文将时钟源选择为 HSE 对时钟初始化。(2)初始化 GPIO。首先应打开管脚对应时钟, 再完成被应用管脚的最高输出速率设置和工作模式选择。(3)初始化 Modbus RTU。主要包含以下几个任务: 首先在 main.c 文件中定义各个模拟寄存器的地址和大小; 然后通过 Modbus 通信中用于串口初始化配置的 portserial.c 文件来配置所需的串口和波特率; 最后在 porttimer.c 文件里配置一个 Modbus 工作时所需要的定时器。

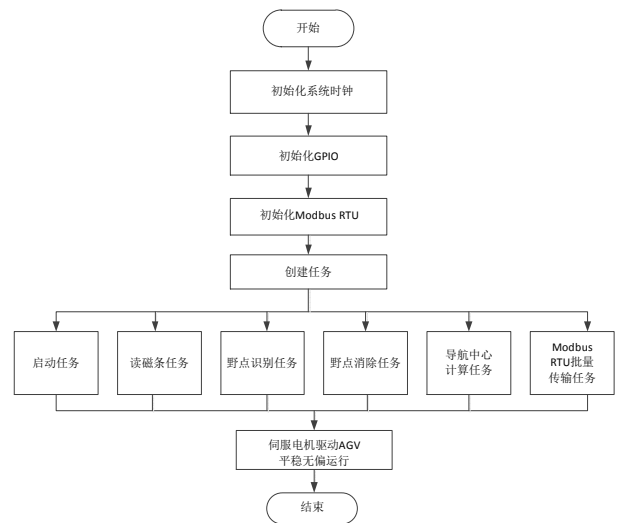


图 10 系统软件设计流程

3.1 软件操作系统

$\mu C/OS III$ 是一种专门为嵌入式系统设计的硬实时内核, 属于抢占式的多任务操作系统, 一共包括 5 种任务状态: 运行态、就绪态、挂起态、睡眠态和中断服务, 它根据就绪列表中任务的优先级高低来运行任务, 总是先运行优先级高的, 任务调度可以完成这 5 种状态之间的转换。先定义启动任务、读磁条、野点识别、野点消除、计算导航中心、Modbus RTU 批量传输共 6 个任务及其堆栈空间; 并根据系统设计需求及任务的重要性, 自定义赋予各个任务不同的优先级, 如表 2 所示。

系统启动后, $\mu C/OS III$ 实时操作系统会进行初始化配置, 接着操作系统开始管理 CPU, 6 大模块的任务都准备就绪, 首先进入优先级最高的启动任务函数 App_TaskStart, 然后在让出对 CPU 的使用权时调用 OSTimeDly() 函数, 转交给下一个任务, 循环该步骤, 进而完成 AGV 的运动控制。

3.2 计算导航中心线

该任务主要是计算导航中心位置和 AGV 行驶过程中相对于磁条中心的偏移量。设 $D_i(k)$ 为

表 2 任务分配堆栈空间及优先级设置

任务名称	堆栈宏名 OS_STK	容量/bt	优先级宏名	优先级
启动任务	App_TaskStartStk	128	TaskStart_PRIOR	1
读磁条任务	App_GuideReadStk	128	GuideRead_PRIOR	2
野点识别任务	App_OutlierRecognitionStk	512	OutlierRecognition PRIOR	3
野点消除任务	App_OutlierCancelStk	512	OutlierCancel_PRIOR	4
计算导航中心	App_GuideOffsetStk	128	GuideOffset_PRIOR	5
Modbus RTU 批量传输	App_ModbusPollStk	512	ModbusPoll_PRIOR	6

第 i 通道的第 k 次二值化采样值,对于 16 位磁导航传感器来说, $i = 0, 1, \dots, 15$ 。第 i 通道的磁场强度超过磁场强度阈值 T_H 时,采样值 D_i 输出为 1; 否则,输出为 0。系统任务流程如图 11 所示。

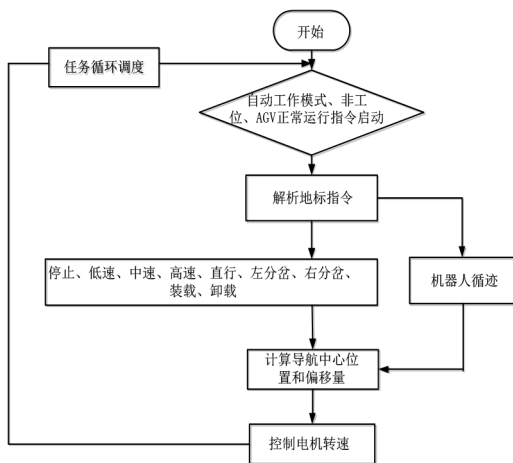


图 11 系统任务流程图

定义 AGV 通过磁条时, $D_i = 1$ 为有效值,则被激活的所有有效值的总和定义为有效位数 $\eta(k)$, 以检测第 k 次采样 $[D_0(k), D_1(k), \dots, D_n(k)]$, 将被激活的有效位数记为 $\eta(k) = \sum_{i=0}^n \{D_i(k) = 1\}$ 。

定义导航中心偏移变量 $\rho(k)$, 检测第 k 次采样 $[D_0(k), D_1(k), \dots, D_n(k)]$ 被激活的偏移量为 $\rho(k) = \sum_{i=0}^n (i + 1) \times D_i(k)$ 。

则第 k 次采样的磁导航的误差为 $\varepsilon(k) = \frac{\rho(k)}{\eta(k)} = \frac{\sum_{i=0}^n (i + 1) \times D_i(k)}{\sum_{i=0}^n \{D_i(k) = 1\}}$ 。

经 Modbus RTU 传输误差 $\varepsilon(k)$, PID 控制器的磁导航循迹如式(2)所示。

$$u(k) = K_p \varepsilon(k) + K_i \sum_{k=0}^n \varepsilon(k) + K_d [\varepsilon(k) - \varepsilon(k - 1)] \quad (2)$$

式中: $u(k)$ 为 PID 控制器的输出; K_p 、 K_i 和 K_d 分别为 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数。

3.3 对数-双曲正切函数的鲁棒自适应滤波算法

为了减少偏移距离,在获取到磁导航信号后,使用自适应滤波器来减小误差,选择基于对数的双曲正切自适应滤波器。将代价函数 $J_T(k)$ 表示为式(3)所示。

$$J_T(k) = J^2(e_k) - \frac{1}{\alpha} \ln [1 + \tanh(\alpha J(e_k))] \quad (3)$$

式中: $J(e_k)$ 为具有高阶统计量的不同自适应滤波的常规代价函数; α 为变量; \tanh 为双曲正切函数。

式(7)中定义的代价函数框架关于权重向量 w_{k-1} 的导数 $\nabla_{w_{k-1}} J_T(k)$ 如式(4)所示。

$$\nabla_{w_{k-1}} J_T(k) = \frac{\partial J_T(k)}{\partial w_{k-1}} = \frac{\partial J_T(k)}{\partial J(e_k)} \frac{\partial J(e_k)}{\partial w_{k-1}} = [2J(e_k) - 1 + \tanh(\alpha J(e_k))] \nabla_{w_{k-1}} J(e_k) \quad (4)$$

式中: $\nabla_{w_{k-1}} J_T(k)$ 为传统代价函数的梯度。其中,

$$w_k = w_{k-1} - \mu \nabla_{w_{k-1}} J_T(k) \quad (5)$$

式(5)中: w_k 为滤波器的权值; μ 是滤波器的步长, $0 < \mu < 1$ 。

本算法主要是对机器人运行过程中的采样信号进行滤波,在实验仿真中主要是为了完成对磁导航信号中的存在的野点扰动进行滤除,以此减小行驶过程中的误差。为了测试该算法的效果,本研究使用 Matlab 软件进行仿真实验,结果如图 12 和 13 所示。

从仿真结果可以看出,对数-双曲正切(LHTLMS)算法的收敛速度和稳定性较好,在进

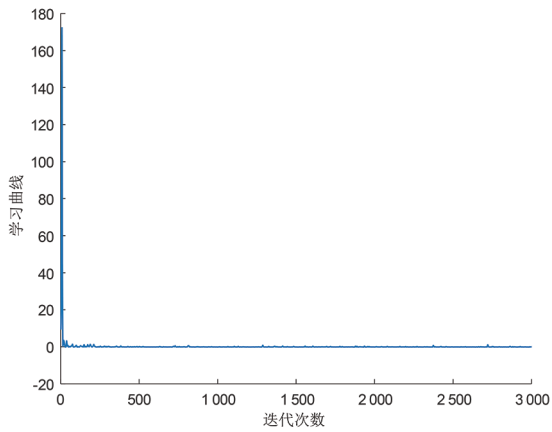


图 12 LHTLMS算法在 $\alpha = 1$ 时的学习曲线

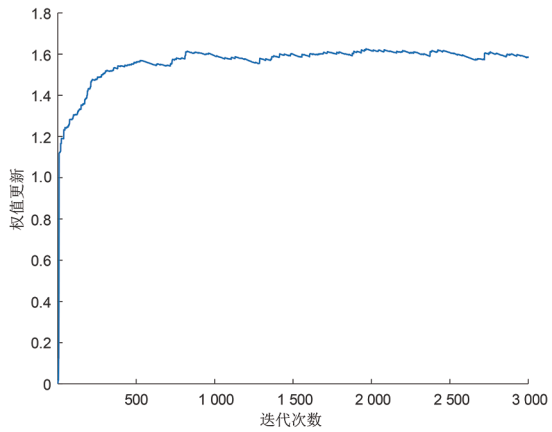


图 13 LHTLMS算法在 $\alpha = 1$ 时的权值更新

行少数迭代之后,学习曲线就能达到稳定状态,不产生任何波动(图 12),并且权值更新的稳定性也更好,曲线更加平稳,接近于直线(图 13)。因此在对磁导航信号的滤波过程中,这类算法能够起到较好的滤波效果,在 AGV 行驶的过程中,能滤除干扰,以达到行驶平稳、偏移中心距离更小的目的。

4 结果与分析

本文设计的磁导航传感器如图 14 所示。利用所设计的磁导传感器进行了现场实验。在现场实验中,实验样机采用的 AGV 由控制器、传感器、人机交互、驱动电机、蓄电池等模块组成,AGV 样机如图 15 所示。

按照图 16 所示的测试路线模拟 AGV 的实际运动情况。该测试路线由 4 条路径组成一个长方形,周长为 4 m;每条路径上设 3 个观测点,其中路径 1 的观测点为 r_{11} 、 r_{12} 和 r_{13} ,路径 2 的观测点为 r_{21} 、 r_{22} 和 r_{23} ,路径 3 的观测点为 r_{31} 、 r_{32} 和 r_{33} ,路径 4 的观

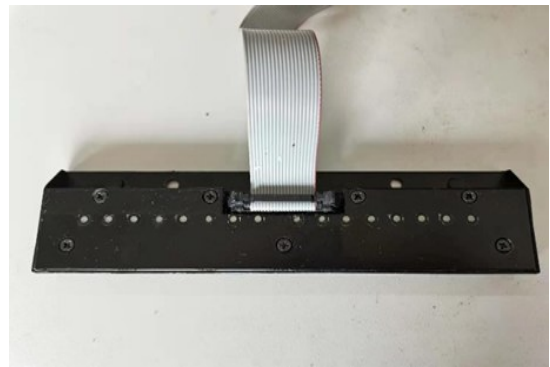
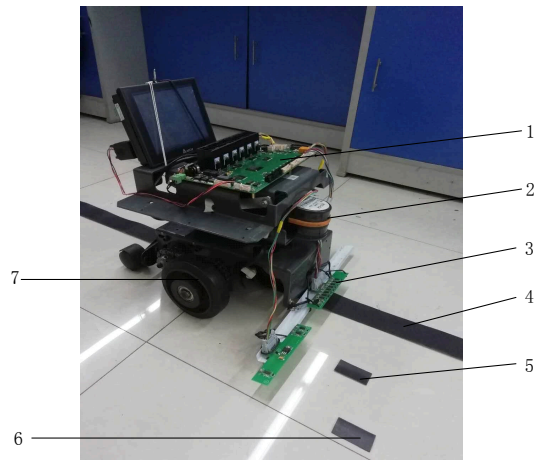


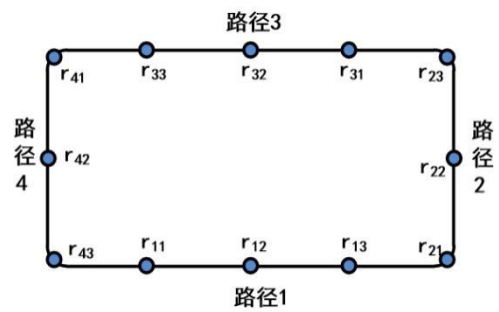
图 14 磁导航传感器



注:1.主控制器主板;2.测距传感器;3.磁导航传感器;4.导航磁条;5.触发地标;6.命令地标;7.驱动单元。

图 15 AGV 样机

测点为 r_{41} 、 r_{42} 和 r_{43} 。



注:“ r_{11} 、 r_{12} 、 \dots 、 r_{41} ”表示观测点。

图 16 AGV 测试路线

AGV 实际运动的偏差距离如表 3 所示。由表 3 可知,AGV 总体是在转弯处的偏差距离稍大,AGV 会出现车身不稳定抖动情况,在其他路线行驶时均处于平稳行驶,基本实现了轨迹跟踪目标。AGV 共行驶 5 周,总共耗时 135 s。每周 4 m,则可以得到 AGV 的平均速率达到了 0.148 m/s,这与本文默认速率基本相同,说明了本文设计的传

表 3 AGV 运动的偏差距离

路径	观测点	偏差距离/cm	备注
路径 1	r_{11}	2.0	
	r_{12}	1.0	
	r_{13}	2.1	
路径 2	r_{21}	2.4	拐弯处
	r_{22}	1.2	
	r_{23}	2.3	拐弯处
路径 3	r_{31}	2.1	
	r_{32}	0.8	
	r_{33}	1.7	
路径 4	r_{41}	2.2	拐弯处
	r_{42}	1.1	
	r_{43}	2.0	拐弯处

感器具有较好的效果。

5 结语

本文设计了一款磁导航传感器,通过霍尔元件式磁导航传感器信号检测单元检测铺设在地面的磁条磁场强度信息,输出端将采集到的信号输入给模拟前端,经过模拟前端对所接收的信号进行差分放大等处理,通过循迹算法对 AGV 偏移距离的数据进行控制,再将处理后的信号通过 Modbus RTU 协议接口发送到 AGV 控制器。现场实验结果表明,所设计的磁导航传感器使用恒流源激励电路改善了霍尔元件的输出非线性特性,且 AGV 基本实现了轨迹跟踪控制目标,对数-双曲正切函数的鲁棒自适应滤波算法,能够减小 AGV 在行驶过程中的误差,使 AGV 保持平稳运行。

参考文献:

- [1] 杜林玉. 智能磁导航传感器研究[D]. 西安:西安石油大学,2019.
- [2] 谭雪,戴更新. 应用于物流 AGV 磁导航传感器的研究[J]. 物流技术,2017(8):37-39+42.
- [3] 张玲娜,马安忠. 霍尔传感器温度补偿方法分析研究[J]. 西部皮革,2016,38(10):22-23.
- [4] 王惠. 磁导航传感器的设计与实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [5] 史雄峰,杨光永,陈跃斌. STM32 单片机的四驱磁导航 AGV 控制器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2018,18(7):80-84.
- [6] 王惠娇. AGV 磁导航数据的高速获取和偏差处理[J]. 工业控制计算机,2017,30(9):91-92+95.
- [7] 陈俊. 基于磁导航的 AGV 转弯和校偏算法研究与设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.
- [8] 陈绍磊. 磁导航 AGV 键技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2015.

(上接第 89 页)

- [18] 张辉,杨雄. 单因子水质标识指数法在巢湖流域水质评价中的应用[J]. 安徽农学通报,2018,24(10):116-119+163.
- [19] 佟霖坤,马倩,张越,等. 基于单因子水质标识指数法的大清河流域府河段水质评价[J]. 绿色科技,2020(2):93-94.
- [20] 周晓雯,安艳玲,吴起鑫,等. 山区河流氮磷空间分布对人类活动的响应——以赤水河一级支流桐梓河为例[J]. 水土保持研究,2021,28(4):179-185.
- [21] 王薇,王中玉,白小晶,等. 北方典型城市不同类型河流的水质空间分布与相关性分析[J]. 环境工程,2019,37(9):50-56.
- [22] VENKATESH K R, RAJENDRAN M, MURUGAPPAN A. A Correlation study on physico-chemical characteristics of domestic sewage[J]. Nature Environment & Pollution Technology, 2009, 8(1):141-145.
- [23] 孔令雪,孔祥瑞,薛晓玲,等. 导致河道水中氨氮和总磷超标的主要污染物成因及防治[J]. 农业开发与装备,2017(11):108.
- [24] 龚云辉,刘云根,杨思林. pH 值对高原山地分散养殖型农村沟渠底泥磷释放的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(4):955-964.
- [25] 尤本胜,张艳红,操庆,等. 太湖流域洗涤剂禁磷政策评估研究[J]. 环境与发展,2022,34(4):219-222.
- [26] 郭树芳,陈安强,刁斌,等. 澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析[J]. 环境科学,2022,43(12):5491-5498.
- [27] 张庆,罗绍河,赵丽,等. 有机氮和“三氮”在西部煤矿区地下水库迁移转化的实验研究[J]. 煤炭学报,2019,44(3):901-906.