

一种 AGV 改进惯性导航系统的设计及实现

张东^{1a,2}, 江亚峰^{1a,1b}, 姜烽^{1a}, 袁明新^{1a,1b,2}, 李贵阳^{1a}

(1. 江苏科技大学 a. 机电与动力工程学院; b. 张家港江苏科技大学 产业技术研究院, 江苏 张家港 215600; 2. 张家港香樟树众创空间, 江苏 张家港 215600)

摘要:为提高惯导式自动导引车(AGV)的导航精度,设计了一种改进惯性导航系统。该系统以单片机为核心,将基于差速驱动模型求得的 AGV 航向角作为状态量,将由惯导单元测量的角度值作为观测量,通过 Kalman 滤波来优化航向角;同时基于模糊 PID 算法进行 AGV 驱动轮的转速控制来提高航向角的控制精度。针对惯导系统易产生的累积误差,设计了磁钉纠偏模块进行有效消除。实验测试结果表明,该系统能够进行偏航角的准确测量和控制,实现了惯导式 AGV 的精确导航;与常规惯导系统相比,其导航误差平均减少近 50%,验证了改进系统的有效性和优越性。

关键词:自动导引车;惯性导航;Kalman 滤波;模糊 PID;磁钉

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)04-0192-04

Design and Implementation of Improved Inertial Navigation System for AGV

ZHANG Dong^{1a,2}, JIANG Yafeng^{1a,1b}, JIANG Feng^{1a}, YUAN Mingxin^{1a,1b,2}, LI Guiyang^{1a}

(1. a. School of Mechanical and Power Engineering, and b. Zhangjiagang Industrial

Technology Research Institute, Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China;

2. Service Center of Zhangjiagang Camphor Tree Makerspace, Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: To improve the navigation accuracy of the inertial guidance automatic guided vehicle (AGV), an improved inertial navigation system is designed. In this system, the STC15W4K56S4 MCU is used as the control core. The direction angle achieved based on the AGV differential drive model is taken as the state quantity, and the angle value measured by the inertial navigation module is taken as the observation quantity, and then the direction angle is optimized using the Kalman filter. Then, the AGV driving wheel speed is controlled based on the fuzzy PID algorithm to improve the control precision of the direction angle. Finally, aiming at the cumulative error produced by the inertial navigation system, a magnetic nail correction module is designed to effectively eliminate it. The experimental results show that the proposed system can be used to accurately measure and control the yaw angle and achieve the accurate navigation of the inertial AGV. Compared with the conventional inertial navigation system, the navigation error of the improved inertial navigation system is reduced near to the average value of 50%. Its validity and superiority are verified.

Keywords: automatic guided vehicle; inertial navigation; Kalman filter; fuzzy PID; magnetic nails

0 引言

AGV 是现代车间物流的重要组成部分,主要通过物料的自动配送来提高生产线的效率。目前,AGV 的导航方式主要有磁导航、激光导航和惯性导航等^[1]。磁导航虽然简单稳定,但存在磁条容易被碾压和老化失磁等问题;激光导航虽然精度高,但价格昂贵且不易在遮挡物较多的环境中实施;而惯性导航具有成本低、应用方便,可以与其他导航方式灵活结合的优点。惯性导航是指通过获取载体的加速度计和陀螺仪数据,然后计算出载体的位移和姿态角等信息,进而实现载体自主导航的技术。因其应用简便、短时导航精度高的优点而在导航系统中广泛应

用。但也由于加速度计零偏和陀螺仪漂移等因素的存在而造成累积误差,从而降低了长时间导航的精度。为此,李媛媛等^[2]将陀螺仪与加速度计测量数据加权平均并设计出惯导测量融合算法,该方法主要应用于动态环境,对传感器精度要求较高。Henrik 等^[3]在常规惯性导航的基础上进行了姿态测量算法改进,有效降低了传感器精度的需求,但复杂路径下的累积误差问题依旧存在。贺海鹏等^[4]提出了一种基于欧拉角的迭代扩展 Kalman 姿态角测量方法,该方法得出的姿态角精度较高,累积误差显著减小,但算法计算量大、可移植性不高,在实际工程应用中受到一定的限制。

针对于上述惯导系统所存在的不足,文中从航向角的精确解算、速度稳定控制和航向辅助纠偏这 3 个方面进行

基金项目:张家港江苏科技大学产业技术研究院对港质量提升工程和共性技术项目(549916011;559916004);张家港香樟树众创空间项目(501117001);江苏科技大学本科创新项目(2018zjgbc)

作者简介:张东(1995—),男,江苏连云港人,研究方向为移动机器人系统导航。

了改进惯性导航系统的设计,并最终通过多种路径下的导航实验验证了文中系统的有效性。

1 航向角精确解算

1.1 AGV 运动学模型

本文研究对象为两轮差速转向 AGV,其简化运动模型如图 1 所示。前轮为驱动轮,由两侧直流电机分立驱动,后轮为自由轮。 O_1 、 O_2 分别为左右驱动轮的中心, R 为驱动轮半径, D 为轴距, V_1 、 V_2 为左右驱动轮速度, L_1 、 L_2 分别为 T 时间内左右驱动轮转动的距离。

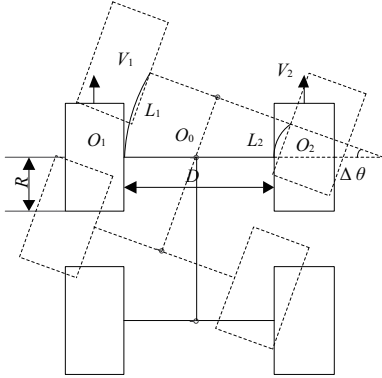


图 1 AGV 运动模型

由运动模型可得 AGV 在 T 时间内的角度变化量 $\Delta\theta$ 与左右轮角速度 ω_1 、 ω_2 关系:

$$\Delta\theta = \frac{L_1 - L_2}{D} = \frac{V_1 T - V_2 T}{D} = \frac{RT}{D}(\omega_1 - \omega_2) \quad (1)$$

1.2 卡尔曼滤波器的设计

为了优化 AGV 惯性导航过程中航向角的测量值,从而抑制外部因素对偏航角精确测量的影响,文中引入了 Kalman 滤波算法^[5]。不失一般性,以 k 时刻角度值 X_k 优化过程为例,若已知初始时刻的协方差矩阵 P_0 、量测矩阵 H_0 ,则滤波处理步骤如下:

第 1 步,建立系统的离散状态模型^[6],预测 k 时刻状态量:

$$X_k = A \cdot X_{k-1} + B \cdot U_{k-1} \quad (2)$$

式中: A 为航向角状态转移矩阵, B 为系统参数, X_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的状态量, U_{k-1} 为 $\Delta\theta$ 状态控制量。令:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$U_{k-1} = \begin{bmatrix} \frac{R}{D}(\omega_1 - \omega_2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

第 2 步,协方差矩阵预测:

$$P_k = A \cdot P_{k-1} A^T + Q \quad (6)$$

式中: A^T 为偏航角状态转移矩阵 A 的转置, Q 为系统噪声矩阵, P_{k-1} 为 $k-1$ 时刻的协方差矩阵。

第 3 步,卡尔曼增益计算:

$$K_k = P_k H_k^T [H_k P_k H_k^T + R]^{-1} \quad (7)$$

式中: H_k^T 为系统量测矩阵 H_k 的转置, R 为系统量测噪声。

第 4 步,修正计算:

$$X_k = X_k + K_k (Z_k - H_k X_k) \quad (8)$$

式中 Z_k 是观测值,为惯导模块获取的角度。

第 5 步,状态协方差矩阵的更新:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k \quad (9)$$

式中 I 为单位矩阵。

为了验证 Kalman 滤波器应用性能,文中采用了高精度的电磁跟踪装置 Long Ranger,并将其测量值作为 AGV 航向角的参照基准。实验中,AGV 以缓慢转向、急转弯和直线相互交替的方式运动。图 2 为截取的某时间段 Kalman 滤波效果。从图中可以看出,单独使用惯导单元测得的航向角数值波动较大,解算误差最大已达到 5° ,而经本文算法补偿后,惯导航向角测量发散的情况得到有效抑制,航向角测量准确度得到提高,其解算误差缩小在 1° 以内,体现了 Kalman 滤波器的有效性和准确性。

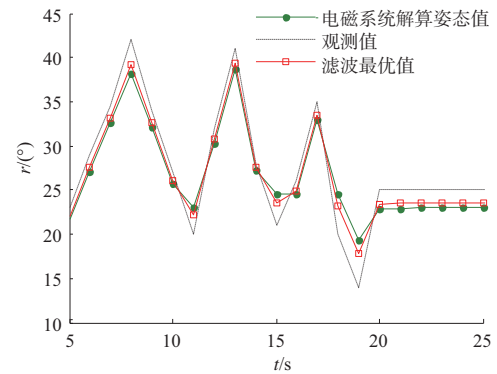


图 2 航向角输出曲线

2 转速的模糊 PID 控制

由式(1)可知,AGV 导航姿态与驱动轮的转速密切相关。转速的稳定控制不仅有助于航向角的精准调控,而且有助于惯性导航精度的提高。因此,引入了模糊 PID 来精确控制车辆的轮速,从而进一步减小惯导累积误差(图 3)。

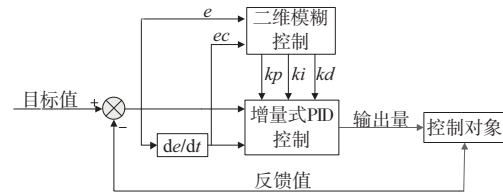


图 3 模糊 PID 控制结构

如图 3 所示,目标值 $u(k)$ 为 k 时刻的驱动轮转速, e 、 ec 分别为驱动轮转速差和转速偏差变化率。若 k 时刻转速差和转速差变化率记为 $e(k)$ 、 $ec(k)$,则增量式 PID 控制^[7]可描述如下:

$$u(k) = u(k-1) + kp \cdot (e(k) - e(k-1)) + ki \cdot e(k) + kd \cdot (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (10)$$

式中 kp 、 ki 、 kd 分别为 PID 比例值、积分值和微分值。

在转速的模糊 PID 控制过程中,PID 参数的动态优化

结果将直接影响 AGV 的调速性能。为此,文中采用二维模糊控制方式对 k_p 、 k_i 、 k_d 进行整定。主要过程描述如下:首先,初始化参数、建立模糊规则表^[8],限于篇幅,文中仅给出如表 1 所示的 k_p 模糊规则控制表, k_i 、 k_d 模糊规则控制表不再赘述;然后采用如图 4 所示的三角形隶属度函数进行模糊化,模糊语言集合为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$;最后运用最大隶属度法解模糊得到整定好的 PID 参数。

表 1 k_p 的模糊规则控制表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB	NB

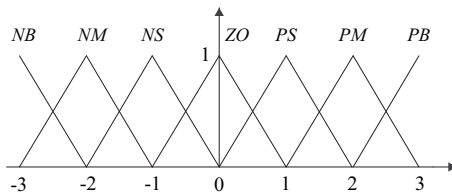


图 4 三角隶属度函数

为了验证模糊 PID 算法的优越性,文中进行了电机响应性能测试,并与普通 PID 算法进行比较,设定目标转速为 1000 r/min,获取电机响应曲线如图 5 所示,获取动态性能指标如表 2 所示。

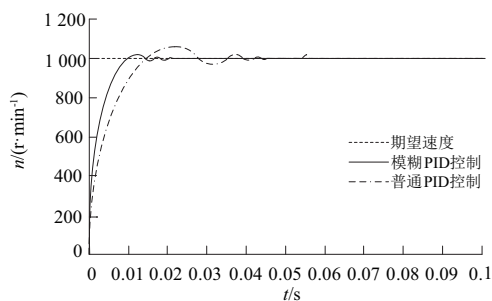


图 5 两种速度控制方式响应曲线

表 2 两种速度控制方式动态性能指标

速度控制方式	超调量/(%)	调节时间/s	上升时间/s
模糊 PID 控制	2.38	0.017	0.008
普通 PID 控制	9.84	0.035	0.013

实验结果表明,相比普通 PID,模糊 PID 可有效抑制超调现象,超调量减少了 7.46%,调节时间和上升时间明显缩短,分别缩短 0.018 s 和 0.005 s,且调速过程中抗干扰能力增强,调速系统的稳定性、快速性等性能^[9]显著提高。

3 航向辅助纠偏

虽然航向角的精确测量以及速度的稳定控制能有效提高惯导系统的导航精度,但在长距离导航过程中,系统累积误差依然存在。为此,文中设计了磁钉纠偏模块,即通过磁阻检测传感器获取车辆与辅助磁钉的相对位姿关系,从而获取偏航位姿信息并实现实时调整。图 6 为 AGV 纠偏示意图,图中①号和③号为面积相同的两块磁钉,②号磁钉面积相对较小。两块线性磁阻传感器位于 AGV 车辆前方,其核心为 HMC1022 磁阻芯片^[10],具有精度高、线性度好的特点。

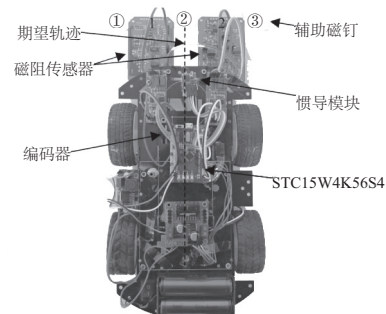


图 6 AGV 纠偏示意图

AGV 导航偏移量计算过程简要描述如下:

第 1 步,获取电压偏差值 ΔU :

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (11)$$

式中, U_1 、 U_2 分别为 AGV 两侧 1 号和 2 号磁阻传感器的测量值。

第 2 步,AGV 偏移量计算:

$$\Delta d \approx k^* \Delta U \quad (12)$$

式中: Δd 为导航偏移量; k^* 为偏航线性比例参数,文中通过实验归纳法获取。

在上述轨道偏移量计算的基础上,AGV 偏航信息可及时获取,从而通过姿态调整促使 AGV 回归预定轨迹,进而有效地消除由偏航产生的累积误差。

4 实验测试分析

4.1 实验环境与过程分析

为了验证文中改进惯导系统的性能,文中以图 6 所示的四轮小车为 AGV 模型,进行了多种路径下的惯导性能对比实验,实验环境如图 7a) 和图 7b) 所示,分别为闭合梯形和曲线。

设定起点坐标为原点,路径上各时刻拐点坐标分别记为 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 $\dots$ 、 (X_k, Y_k) 。假设 $k-1$ 时刻 AGV 的坐标为 (X_{k-1}, Y_{k-1}) 和航向角为 θ_{k-1} ,则根据运动模型,可推导出 AGV k 时刻的坐标 (X_k, Y_k) 和航向角 θ_k :

$$X_k = X_{k-1} + d_{k-1} \sin \theta_{k-1} \quad (13)$$

$$Y_k = Y_{k-1} + d_{k-1} \cos \theta_{k-1} \quad (14)$$

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \Delta \theta_k \quad (15)$$

式中 d_{k-1} 为 AGV 从 $k-1$ 时刻到 k 时刻的位移量。

4.2 实验记录与分析

为了验证改进惯性导航系统的优越性,在如图 7 所示

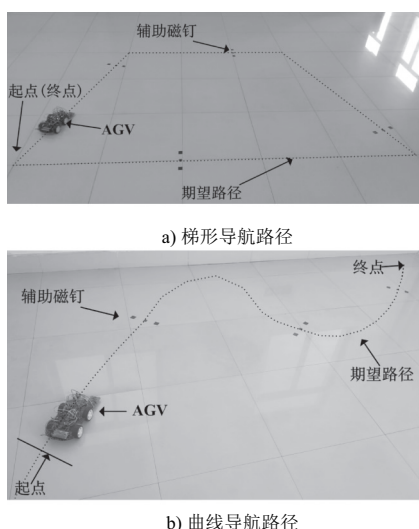


图 7 实验环境

的两种环境中分别进行了改进惯导系统和常规惯导系统的对比实验。实验结果如图 8、图 9 所示。初始时刻,两种导航系统的精度都较高,但随着导航路径的增加,常规惯导累积误差影响明显,AGV 运动轨迹均偏移预定轨道。而改进惯导系统一方面由于其角度测量更精确,速度控制更稳定,使得其偏移误差增长缓慢;另一方面由于通过磁钉纠偏系统实现了 AGV 偏移量的定期校准,因此其轨迹偏移量比常规惯导系统要小,整体轨迹与期望轨迹更贴合。

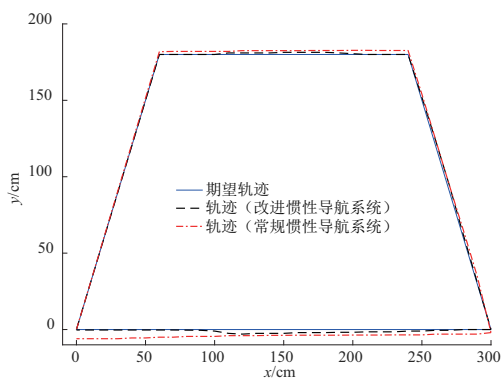


图 8 梯形路径导航比较

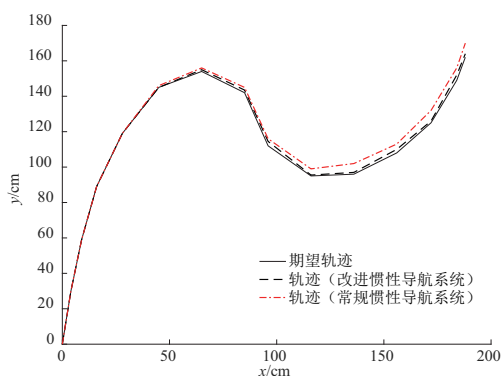


图 9 曲线路径导航比较

表 3 为 AGV 两种导航方式的偏差比较。由表可以看出,在梯形路径中,相比起常规惯导系统,文中改进惯导系统在 x 轴和 y 轴方向的偏差均值分别减少 1.7 cm 和 2.1 cm,在曲线路径中, x 轴和 y 轴方向的偏差均值分别减少 1.5 cm 和 1.8 cm,导航精度提高了近 50%,充分显示了其导航的优越性。

表 3 两种导航方式偏差比较

实验环境	导航系统	x 轴偏差均值/ cm	y 轴偏差均值/ cm
梯形路径	改进惯导系统	1.5	1.7
	常规惯导系统	3.2	3.8
曲线路径	改进惯导系统	2.2	2.4
	常规惯导系统	3.7	4.2

5 结语

为了提高 AGV 自主导航精度,消除惯性导航的累积误差,文中从 3 个方面出发设计了一种改进惯性导航系统。通过理论分析和实验研究可以得出如下结论:

- 1) 通过引入 Kalman 滤波算法,融合差速轮模型的解算值和惯导模块测量值,可以有效地提高航向角的测量精度;
- 2) 通过引入模糊 PID 控制算法,能精确、稳定地控制驱动轮转速,从而更准确地实现航向角变化的控制;
- 3) 通过设计磁钉纠偏系统来对 AGV 航向定期纠偏,能有效消除累积误差,使 AGV 能准确地回归预定轨迹,提高了导航精度。

参考文献:

- [1] 张伟,张秋菊. 电商仓储中 AGV 研究与实现[J]. 机械制造与自动化,2017,46(6):197-200.
- [2] 李媛媛,张立峰. 多传感器自适应加权融合算法及其应用研究[J]. 自动化仪器仪表,2008(2):10-13.
- [3] Henrik Rehinder, Xiaoming Hu. X. Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies[J]. Automatica, 2003,40(4):653-659.
- [4] 贺海鹏,阎研,马良,等. 基于 IEKF 的四旋翼无人机姿态测量方法研究[J]. 计算机仿真,2015(4):653-659.
- [5] 邹峰,陈则王. 基于改进扩展卡尔曼滤波算法的锂离子电池荷电状态估计[J]. 机械制造与自动化,2017,46(5):130-133.
- [6] Chenjian Ran, Zili Deng. Self-tuning weighted measurement fusion Kalman filtering algorithm[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2012, 56(6): 2112-2128.
- [7] 梅真,赵熙临. 基于增量式 PID 智能车调速系统的设计[J]. 湖北工业大学学报,2015,30(2):72-76.
- [8] 徐伟,屈百达,徐保国. 基于模糊 PID 模型的无刷直流电机调速控制[J]. 科学技术与工程,2010,10(32):7926-7929.
- [9] 崔鹏. 基于模糊控制算法的 PLC 直流电动机调速系统研究[J]. 电气应用,2015,34(16):126-131.
- [10] 张政霖,袁明新,凌和强,等. 磁导航中的磁检测传感器设计及实现[J]. 仪表技术与传感器,2017(11):6-9.

收稿日期:2018-03-13