

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.024

重载复合机器人自导引纠偏 PID 算法与实验研究*

杨前明, 王俊基, 崔克克

(山东科技大学 机械电子工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 针对重载棉桶搬运专用复合机器人纠偏控制过程存在的问题, 对复合机器人本体机构、纠偏控制系统组成、纠偏控制关键电子检测元件、PID 控制算法进行了阐述, 对棉桶搬运专用 AGV 的电子纠偏原理、电子纠偏 PLC 实现方法、纠偏控制模型进行了研究, 探讨了采用 PID 算法理论实现自导引车实时纠偏的控制方法; 建立了 AGV 运动纠偏数学模型, 运用 Matlab 软件进行仿真, 获得 PID 纠偏算法响应曲线规律; 设计了现场实际测试原理与方法, 并进行实验样机的现场实地运行与测试, 获得 AGV 运行实际轨迹与磁条中心线轨迹的偏差数据。研究表明: PID 纠偏算法能够稳定快速地校正 AGV 的轨迹偏差, 纠偏过程无超调、无振荡, 纠偏精度 $\leq \pm 10$ mm, 达到国标设计规范要求, 复合机器人整体运行平稳可靠。

关键词: 复合机器人; 实时纠偏; PID 算法; 实验测试

中图分类号: TP242; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1208-06

Experimental study and rectifying deviation PID algorithm for self-guided heavy-duty compound robot

YANG Qian-ming, WANG Jun-ji, CUI Ke-ke

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Aiming at the rectification control of the special compound robot for heavy-duty cotton barrel handling, the structure of the robot body, the composition of the rectification control system, the key electronic detection element of the rectification control and the PID algorithm were expounded. The electronic rectification principle, the realization method of PLC and the rectification model of the special AGV for cotton barrel handling were studied. The control method of PID algorithm to realize real-time correction of AGV were also discussed. The mathematical model of the AGV based on the motion correction was established and the response law of PID rectification algorithm was also obtained through simulation using the Matlab software. To carry out the field operation and testing of the experimental prototype the principle and method of testing was designed and the deviation data of the actual trajectory and magnetic center line trajectory were obtained. The results indicate that the PID algorithm can be used to correct the trajectory deviation of AGV rapidly and steadily. There is no overshoot and oscillation in the rectification process. The accuracy of rectification is within the range of ± 10 mm, which meets the requirements of national standard. The overall operation performance of the compound robot is stable and reliable.

Key words: the compound robot; real-time correction; PID algorithm; the experimental testing

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 青岛市科学计划资助项目 (QDKJX-201305-066)

作者简介: 杨前明 (1960-), 男, 江苏如皋人, 博士, 教授, 主要从事机电一体化控制方面的教学与研究工作。E-mail: yqm8396@163.com

0 引言

为棉纺车间定制的复合式搬运机器人是一种解决棉纺车间前纺工序棉桶自动化搬运与更换的有效手段^[1]。复合机器人专用 AGV 在背负机械手进行作业任务时惯性较大, 在转弯处易出现脱轨异常现象。当车间地面平整度不够理想时, 车轮可能出现打滑以致脱轨现象。另一方面, 传动机构误差与电机同步误差也会导致车体偏离预定的轨迹, 因此如何实现精确的纠偏控制是该技术领域研究的难点问题之一^[2]。

根据 AGV 运动控制特点, 彭光清等人^[3]提出了一种基于模糊逻辑的纠偏控制算法, 该算法适应于双电机驱动 AGV 运动的场合, 能够提高系统的稳定性。针对 AGV 纠偏过程中出现的问题, 郑炳坤等人^[4]提出了一种基于模糊自整定 PD 算法实现纠偏控制的方法, 该方法以 PD 算法为核心, 利用模糊控制实时修正 PD 算法的各参数, 改善 AGV 的纠偏控制性能。

有鉴于此, 本文将针对棉桶搬运复合机器人运载工况特点, 探讨采用 PID 算法进行实时纠偏控制, 改善复合机器人纠偏过程中的稳定性等问题。

1 本体结构与纠偏控制系统

1.1 本体结构

复合机器人三维图如图 1 所示。

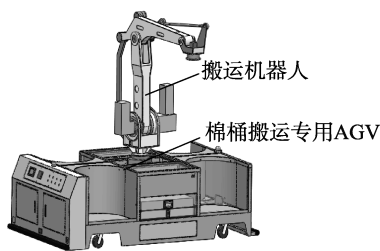


图 1 重载棉桶复合机器人

它由双驱潜伏式 AGV 与 4 轴机器人复合而成, 通过磁条导引, 实现站点停靠进行作业。

复合机器人控制系统原理功能框图如图 2 所示。

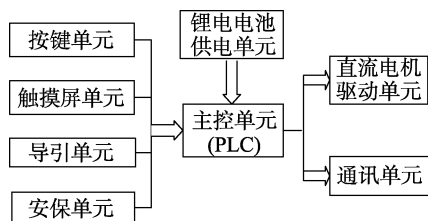


图 2 功能原理框图

它主要由 PLC 主控单元、磁带导引单元、直流无刷电机双驱双向差速驱动单元、通讯单元、供电单元以及安全与保护单元等部分组成。

通讯单元选用 RF 无线通讯模块, 采用 433 MHz 频段进行通讯, 实现复合机器人与监控计算机的通讯。选用锂电池供电、配备光电传感器、障碍物传感器和机械防撞结构进行安全保护。主控单元 PLC 是控制系统的核心, 它可以接收按键单元、触摸屏单元的信号, 进行逻辑运算或数据处理, 驱动直流电机驱动单元产生相应动作。

1.2 电子纠偏原理

8 通道磁导航传感器 (magnetic navigation sensor, MNS) 如图 3 所示。

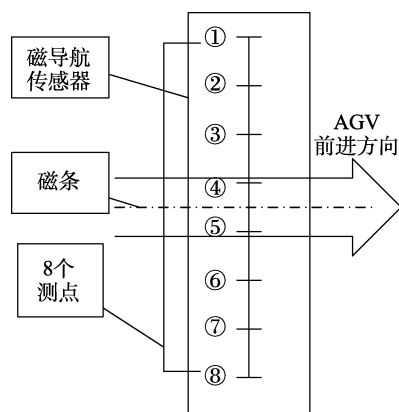


图 3 8 通道磁导航传感器

它是实现复合机器人纠偏控制的关键电子检测元件。磁导航传感器内置 8 个检测点, 分别对应输出信号。检测点感应到磁场信号后, 对地导通输出低电平; AGV 行驶时, 磁条正上方 1~4 个检测点有输出信号, PLC 采集这几路输出信号, 判断 AGV 与磁条的偏差, 进行纠偏控制。

当 AGV 行驶方向与磁条轨迹重合时, 磁导航传感器中间 4 个检测点输出低电平信号, PLC 通过判断得出 AGV 与磁条无偏差, AGV 保持该行驶方向; 当 AGV 行驶方向偏离预定磁条轨迹时, 此时 PLC 采集处理该输出信号, 并控制直流电机驱动器, 实现 AGV 差速纠偏, 迅速回归到磁条轨迹。

复合机器人纠偏控制系统由上位机 PC、下位机 PLC 组成。上位机接收磁导航传感器获取的当前复合机器人 AGV 车体与预定轨迹的偏差值, 并通过计算向下位机发送 AGV 下一步的运动控制指令^[5]。下位机通过无线模块接收上位机发送的运动控制指令与相关数据, 控制驱动器实时调整 2 台直流无刷电机的速度, 完成

AGV 纠偏控制^[6]。

1.3 PID 纠偏算法

AGV 运动控制已经从简单控制转向控制算法的研究,研究发现 AGV 纠偏控制采用的算法包括 PID 控制算法和模糊控制算法。模糊控制算法处于试验研究阶段,在工业用 AGV 上的应用不多。

PID 控制算法经过多年发展,理论与应用成熟,本文选用 PID 控制算法作为纠偏算法^[7-8]。采用 PID 控制算法,只需要调整比例、积分和微分这 3 个参数。比例系数的作用是当偏差出现时立即做出反应,使控制量的变化方向沿着减小偏差的方向发展;积分常数的作用是消除系统输出的稳态误差;微分常数的作用是阻止偏差的变化,减小系统超调量,克服系统振荡,提高系统稳定性^[9-11]。

2 PID 纠偏控制模型与仿真

2.1 AGV 纠偏控制数学建模

2.1.1 AGV 数学模型

复合机器人采用磁导引方式,沿直线铺设的磁条行驶。为实现 AGV 纠偏控制,采用了两个磁导航传感器,分别安装在车体的前后部,根据磁导航传感器输出点的信息,可以计算出 AGV 纵向中心线与磁条的偏移距离及 AGV 与磁条的偏移角度。

磁导航传感器检测偏移距离和偏移角度示意图如图 4 所示。

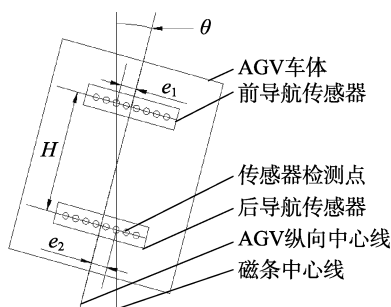


图 4 磁导航传感器检测简图

笔者选用 XGS-19006 磁导航传感器,其检测点间距为 10 mm,所用磁条宽度为 30 mm。

假设车体向右偏离磁条时偏移距离与偏移角度为正,由图 4 可得,磁导航传感器检测到的偏移距离 e 可由前后磁导航传感器与磁条的偏差距离 e_1 、 e_2 得到:

$$e = |e_1| + |e_2| \quad (1)$$

AGV 运行偏移角度 θ :

$$\theta = \tan^{-1} \frac{e}{H} \quad (2)$$

式中: e —偏移距离; H —前后磁导航传感器的距离。

初始位置时, AGV 处于磁条正上方,即磁导航传感器中心线(AGV 车体纵向中心线)与磁条中心线重合,磁导航传感器中间四个点会检测到磁场信号,偏移角度 $\theta=0^\circ$;

当 AGV 车体偏离磁条时,偏移角度会发生变化,磁导航传感器能检测到磁条的右极限位置为 +50 mm,左极限位置为 -50 mm。

当车体处于右偏极限位置时, $e_{1\max}=50$ mm, $|e_{2\max}|=50$ mm, $H=800$ mm,由公式(2)可得 $\theta=8^\circ$,故车体右偏偏移角度范围是 $[0^\circ, 8^\circ]$;同理可得车体左偏偏移角度范围是 $[-8^\circ, 0^\circ]$ 。

2.1.2 位置式 PID 纠偏算法

AGV 采用的纠偏算法属于数字 PID 控制算法,包括位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。位置式 PID 控制算法输出与执行机构过去的状态有关,运算过程中偏差不断积累,且工作量大,内存占用率高;增量式 PID 控制算法将控制增量作为输出,控制增量只与最近 3 次采集的误差有关,多用于步进电机作为执行机构的场合^[12]。选择位置式 PID 控制算法,其公式如下^[13]:

$$u(k) = K_p e(k) + K_p \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + K_p \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] + u_0 = K_p e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(i) + K_D [e(k) - e(k-1)] + u_0 \quad (3)$$

式中: K_p —比例系数; T_I —积分常数; T_D —微分常数; K_I —积分系数; K_D —微分系数; $e(k)$ —第 k 次采样周期的误差值; $u(k)$ —控制量输出值; u_0 —控制量输出初始值。

PID 纠偏算法输入为 AGV 车体纵向中心线与磁条中心线的偏移角度,输出为两驱动电机的控制电压差 ΔU ,由公式(3)可得第 k 次采样周期控制电压差 $\Delta U(k)$ 的计算公式:

$$\Delta U(k) = K_p e_\theta(k) + K_I \sum_{i=0}^k e_\theta(i) + K_D [e_\theta(k) - e_\theta(k-1)] \quad (4)$$

式中: $e_\theta(k)$ —第 k 次采样周期时 AGV 车体纵向中心线与磁条中心线的偏移角度。

2.2 PID 纠偏实现算法

直流无刷电机驱动轮轮速与控制电压关系可描述如下^[14]:

$$V = \frac{b}{1 + T_m s} U \quad (5)$$

式中: V —驱动轮轮速, m/s; b —与直流无刷电机反电动势系数相关的常数; T_m —直流无刷电机与负载的机电时间常数; U —驱动电机的控制电压, V。

根据公式(4~5)可得两驱动轮的速度差 Δv 的计算公式为:

$$\Delta v = \frac{b}{1+T_ms} \Delta U \quad (6)$$

由此可知, 在获得两驱动轮速度差 Δv 后, AGV 控制器(PLC)通过驱动电机驱动器调节驱动轮当前速度。PLC 纠偏编程技术关键如下:

(1) 当偏移角度 θ 的取值范围在 $(0^\circ, 8^\circ]$ 时, 两驱动轮的速度为:

$$V_L(k) = V_L(k-1) - \frac{\Delta v(k)}{2} \quad (7)$$

$$V_R(k) = V_R(k-1) + \frac{\Delta v(k)}{2} \quad (8)$$

式中: V_L —第 k 次采样周期左驱动轮的速度; V_R —第 k 次采样周期右驱动轮的速度。

(2) 当偏移角度 θ 的取值范围在 $[-8^\circ, 0^\circ)$ 时, 两驱动轮的速度为:

$$V_L(k) = V_L(k-1) + \frac{\Delta v(k)}{2} \quad (9)$$

$$V_R(k) = V_R(k-1) - \frac{\Delta v(k)}{2} \quad (10)$$

(3) 当偏移角度 $\theta=0^\circ$ 时, 即 AGV 车体纵向中心线与磁条中心线重合, 此时前后磁导航传感器中间 4 个检测点有信号输出, 两驱动轮的速度为:

$$V_L(k) = V_R(k) = V_0 \quad (11)$$

式中: V_0 —AGV 车体初始速度。

2.3 电子纠偏 PLC 实现方法

选用 PLC 作为 AGV 核心控制单元, 直流无刷电机选择 0-5 V 模拟量输入进行调速。

AGV 运行 PLC 调速程序框图如图 5 所示。

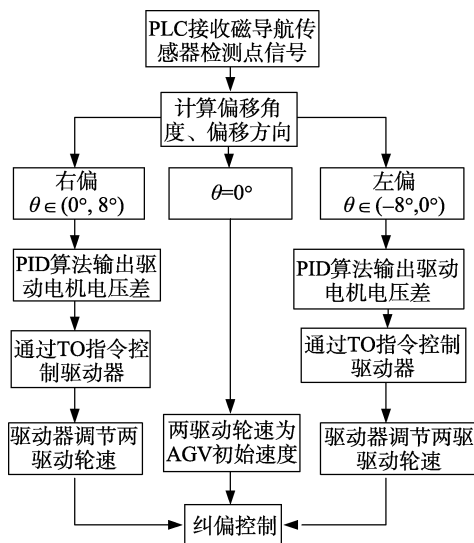


图 5 PLC 调试程序框图

图 5 中, PLC 接收磁导航传感器检测的测点位置信号, 计算偏移角度 θ 并判断偏移方向。以偏移角度 θ 作为 PID 算法的输入, 计算求得两驱动电机电压差; PLC 通过 DA 模块, 利用 TO 指令控制直流无刷电机驱动器, 调整两直流无刷电机的控制电压, 通过直流无刷电机驱动器调节两驱动轮轮速, 实现纠偏控制。

2.4 仿真分析

2.4.1 数学模型

AGV 运行纠偏示意图如图 6 所示。

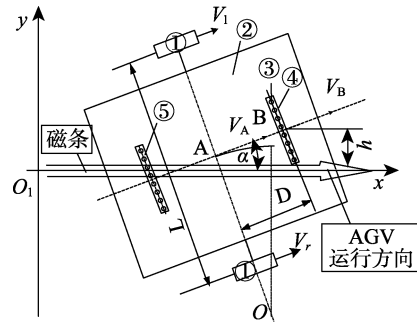


图 6 AGV 运行纠偏分析示意图

①-驱动轮; ②-AGV 车体; ③-检测点; ④-磁导航传感器; ⑤-磁条中心线; A—两驱动轮连线中点; B—车体纵向中心线与磁导航传感器检测点连线的交点; L—两驱动轮距离; D—A、B 两点间的距离

以磁条中心线为 x 轴建立坐标系。

假设 AGV 沿 x 轴方向行驶, 实际运行方向与 x 轴产生了偏移, α 为偏移角度, h 为偏差距离。AGV 车体纵向中心线是 AGV 运行瞬时轨迹线, A 点瞬时速度 V_A 方向为 AGV 行驶方向。AGV 沿 x 轴方向行驶发生偏差时, 其瞬时运动为以 O 圆心的曲线运动。

设 AGV 左右驱动电机转速分别为 ω_l 、 ω_r , 驱动轮直径为 d 。初始位置为 $[A(x_{A0}, y_{A0})、B(x_{B0}, y_{B0})]$, 偏移角度 α_0 , 偏差距离 $h_0=y_{B0}$, 可得:

$$\begin{cases} V_l = \omega_l \times \frac{d}{2} \\ V_r = \omega_r \times \frac{d}{2} \\ V_A = \frac{(V_l + V_r)}{2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: V_l , V_r —左右驱动轮线速度; V_A —A 点瞬时速度。

V_A 在 x 方向的速度分量 V_{Ax} 与 y 方向的速度分量 V_{Ay} :

$$\begin{cases} V_{Ax} = V_A \times \cos \alpha \\ V_{Ay} = V_A \times \sin \alpha \end{cases} \quad (13)$$

由图 6 几何关系, 计算 A 点在 t 时刻的坐标:

$$\begin{cases} x_A = x_{A0} + \int_0^t V_{Ax} dt \\ y_A = y_{A0} + \int_0^t V_{Ay} dt \end{cases} \quad (14)$$

以上求解过程,将 AGV 看作运动在平面上的刚体, A、B 间相对位置不变, 求得 B 点在 t 时刻的坐标:

$$\begin{cases} x_B = x_A + D \times \cos \alpha \\ y_B = y_A + D \times \sin \alpha \end{cases} \quad (15)$$

偏差距离 h :

$$h = y_B - y_A + D \times \sin \alpha \quad (16)$$

将式 (12~14) 代入 (16), 可得 AGV 在 t 时刻的偏差 $h(t)$:

$$h(t) = \int_0^t \frac{(\omega_l + \omega_r) d \sin \alpha}{4} dt + h_0 + D(\sin \alpha + \sin \alpha_0) \quad (17)$$

根据系统辨识法求得 AGV 纠偏模型参数, 得到 AGV 时域内纠偏模型为:

$$h(t) = \cos(3.8t) - \frac{e^{3.6t} \sin(3.8t)}{50} - \frac{1}{110} \quad (18)$$

由此可推导出 AGV 纠偏控制一般传递函数为^[15]:

$$G(s) = \frac{w}{s^2 + 2\zeta ws + w^2} \quad (19)$$

式中: ω —自然频率; ζ —阻尼比。

AGV 行驶速度一般为 20 m/min, 驱动轮直径为 150 mm, 可得 $\omega=4.4$, 取 $\zeta=0.4$, 采样周期为 1 ms。故该 AGV 纠偏模型的传递函数为:

$$G(s) = \frac{4.4}{s^2 + 3.52s + 19.36} \quad (20)$$

2.4.2 参数整定与仿真

PID 纠偏算法的关键是参数整定, 它直接影响纠偏控制误差与系统运行品质。工程整定法中的现场凑试法是确定 PID 纠偏控制算法中各参数的有效方法。据此仿真得到 PID 算法的 AGV 纠偏轨迹响应曲线, 如图 7 所示^[16]。

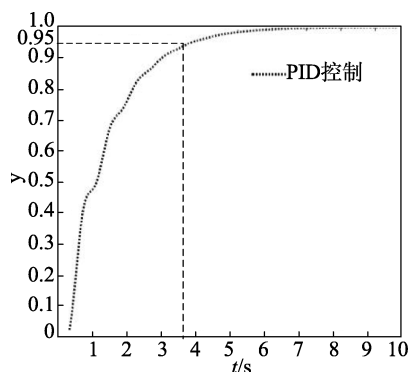


图 7 PID 控制纠偏误差仿真曲线

图 7 中横坐标表示响应时间, 单位: 秒; 纵坐标表示到达响应稳态值 1 的百分数。分析图 7 可知, 在 AGV 偏差纠正整个过程中, 纠偏误差相应无超调、无振荡, 调节速度快, 调节时间约为 3.6 s, AGV 纠偏过程稳定

快速, 满足纠偏性能要求。

3 实验与分析

3.1 实验原理

为验证纠偏算法, 笔者设计了现场实验测试轨迹如图 8 所示。

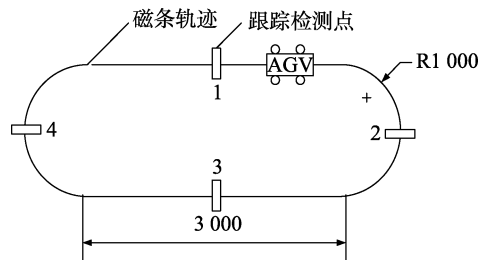


图 8 AGV 运行沿轨迹误差测试示意图

本研究选择 4 个跟踪检测点测试 AGV 纠偏精度, 在 4 个检测点上粘贴 A4 白纸, 并使白纸纵向中心线与磁条中心线重合。AGV 沿磁条轨迹行驶, 固定在 AGV 车体前部纵向中心线处的记号笔会在白纸上绘出实际行驶路径, 测量检测点处实际路径与磁条中心线的偏差距离, 规定磁条中心线以外的偏差距离为正。

3.2 实验测试与分析

为全面客观评价纠偏误差, 本研究让 AGV 沿磁条轨迹分别顺时针和逆时针各运行 5 圈, 记录每圈各检测点处的偏差距离值如表 1 所示。

表 1 AGV 偏差(σ)距离表

检测点及 运行方向	每圈检测点处偏差值/mm				
	1 圈	2 圈	3 圈	4 圈	5 圈
1 顺时针	4	5	3	-6	5
1 逆时针	3	5	-4	-3	2
2 顺时针	-8	8	9	10	7
2 逆时针	9	7	-7	-8	10
3 顺时针	-1	-2	4	5	3
3 逆时针	-4	2	3	5	3
4 顺时针	-10	9	-8	9	-7
4 逆时针	9	-7	-10	10	8
偏差统计	所有偏差 $\sigma \leq \pm 10$				

分析表 1 可知, 在 AGV 顺时针与逆时针运行过程中, 对于每圈 4 个跟踪测点的偏差测量结果是每个测点偏差值均在 ± 10 mm 之内, 满足 AGV 导航定位精度要求 (GB/T 20721-2006 规定导航定位精度 $\leq \pm 10$ mm); 对于路面上 AGV 实际行驶路径的观察发现, AGV 与铺设的磁条轨迹基本重合。

4 结束语

针对基于磁导航传感器的重型棉桶复合机器人关键组件 AGV 运行纠偏问题, 采用 PID 控制纠偏的仿真结果表明, 纠偏过程无超调量、无振荡、调节速度快; 设计并实施了实验测试方案, 对于给定跟踪测试的全部偏差分析表明, 全部偏差均 $\leq \pm 10 \text{ mm}$, 满足其运行定位精度设计规范。

理论分析与实验研究表明, 本研究所建 AGV 运动数学模型合理, 采用的 PID 纠偏算法正确有效。本文探索性解决了重载复合机器人运行纠偏问题, 其研究思想与方法为本课题后续研究及同类技术问题提供了借鉴。

参考文献(References):

- [1] 刘金珠, 李颖新, 罗 丹, 等. 基于智能技术打造无人化数字棉纺工厂[J]. 纺织导报, 2014(1): 47-51.
- [2] 黄大志, 周庆贵, 刘明芹, 等. 三轮移动机器人直线行进数字 PID 控制的研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(12-2): 199-200.
- [3] 彭光清, 楼佩煌. 磁导航 AGV 模糊控制器的研究[J]. 工业控制计算机, 2012, 25(9): 43-44.
- [4] 郑炳坤, 赖乙宗, 叶 峰. 磁导航 AGV 控制系统的设计与实现[J]. 自动化与仪表, 2014, 29(3): 6-10.
- [5] 李 强, 胡 泽, 葛 亮. 利用电磁导航的 AGV 设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(12): 79-81.
- [6] FAN K, YANG Q, YAN W, et al. Fuzzy-PID based deviation-correcting control system for laser guided AGV[C]. Proceeding of 2012 International Conference on Modeling Identification and Control, Wuhan: IEEE, 2012.
- [7] 孟文俊, 刘忠强. 视觉导引 AGV 的路径跟踪控制研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 321-325.
- [8] ZOU W, LE D T, BERGER U, et al. Integration of a PID control system for a mobile system for manufacturing task on continuous conveyor[J]. IFAC-Papers OnLine, 2016, 49(12): 162-167.
- [9] 曹其新. 轮式自主移动机器人[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- [10] 郭小宝 赵 振 陈落根. 基于能量法重载码垛机器人重力平衡分析与设计[J]. 包装与食品机械, 2015(6): 43-46.
- [11] ZHAO Y M, XIE W F, TU X W. Performance-based parameter tuning method of model-driven PID control systems[J]. Isa Transactions, 2012, 51(3): 393-399.
- [12] 吴 强, 韩震宇, 李 程. 基于增量式 PID 算法的无刷直流电机 PWM 调速研究[J]. 机电工程技术, 2013, 42(3): 63-65.
- [13] 刘文定, 王东林. Matlab/Simulink 与过程控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [14] 倪维晨, 高 强, 吕东瀚, 等. AGV 数学模型的建立及控制分析[J]. 起重运输机械, 2012(3): 50-53.
- [15] 罗 哉, 刘慧平, 胡晓峰, 等. 视觉导引 AGV 纠偏控制算法研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(1): 373-377.
- [16] 朱天宇, 谭 琳. 激光导引四轮驱动型 AGV 小车模糊控制的研究[J]. 机电工程, 2013, 30(8): 1025-1028.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

杨前明, 王俊基, 崔克克. 重载复合机器人自导引纠偏 PID 算法与实验研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1208-1213.

YANG Qian-ming, WANG Jun-ji, CUI Ke-ke. Experimental study and rectifying deviation PID algorithm for self-guided heavy-duty compound robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1208-1213.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1207 页)

- [7] 陈春飞. 一种锂离子电池组充放电管理方式的研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2011.
- [8] 郑杭波. 新型电动汽车锂电池管理系统的研究与实现[D]. 北京: 清华大学机械工程学院, 2006.
- [9] 尹安东, 张万兴, 赵 韩, 等. 基于神经网络的磷酸铁锂电池 SOC 预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(5): 433-437.
- [10] AMIR V, MARAL P, MOHAMMAD T B. A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications[J]. Journal of Power Sources, 2007, 17(4): 31-40.
- [11] DUONG V H, HANY A B, KAICHIN L. Online state of charge and model parameters estimation of the LiFePO₄ battery in electric vehicles using multiple adaptive forgetting factors recursive least-squares[J]. Journal of Power Sources, 2015, 29(6): 215-224.
- [12] MANIKTALA S, 著. 精通开关电源设计[M]. 王志强, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
- [13] 汪 洋, 林海青, 常 越. 反激式准谐振开关电源工作频率确定及电源研制[J]. 电力电子技术, 2005, 39(3): 92-94.
- [14] IONEL, DAN J. High efficiency flyback converter using synchronous rectification[J]. IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition, 2002(2): 867-871.
- [15] 刘 谦, 何明前, 范世军, 等. 基于 LTC6804 的电池参数采集系统设计[J]. 工业控制计算机, 2015(1): 144-145.
- [16] LI Yu-heng, SUN Ze-chang, WANG Jia-yuan. Design for battery management system hardware-in-loop testplatform[C]. International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Beijing: IEEE, 2009.
- [17] LEE Y S, CHENG Ming-wang. Intelligent control battery equalization for series connected lithium-ion battery string[J]. Industrial Electronics IEEE Transactions, 2005, 52(5): 1297-1307.

[编辑: 周昱晨]