

全向重载 AGV 多轴协同运动控制研究

张德政¹, 汪步云^{1,2}, 杨 鸥³, 陈 龙³

- (1. 安徽工程大学 机械工程学院, 安徽 芜湖 241000;
2. 芜湖安普机器人产业技术研究院, 安徽 芜湖 241007;
3. 衡阳合力工业车辆有限公司, 湖南 衡阳 421000)

摘要: 针对四舵轮式全向重载 AGV 的多电机伺服控制系统, 转向时在外界负载的影响下, 4 个转向电机易出现不协同的现象; 为实现 4 个转向电机高效协同, 通过分析转向工况下, 四舵轮式 AGV 中各个舵轮实时的转角关系, 建立协同的 4 个转向电机数学模型; 采用天牛须搜索算法 (BAS) 与 PID 控制方法融合, 对单电机 PID 控制器寻求最优 PID 参数; 运用交叉耦合控制策略, 分别设计 4 台转向电机的位置补偿器; 最后通过 Matlab/Simulink 仿真平台, 验证运动控制算法的可行性; 实验结果表明, 该运动控制算法具有较高的同步稳定性, 当受到外界负载扰动时, 能在 0.394 s 内修正偏差, 引起的最大波动仅为无交叉耦合控制的 34.8%, 扩大了全向重载 AGV 的应用范围。

关键词: 重载 AGV; 协同控制; 天牛须搜索算法; 跟踪误差; 交叉耦合控制

Research on Multi-axis Cooperative Motion Control of Omnidirectional Heavy-duty AGV

ZHANG Dezheng¹, WANG Buyun^{1,2}, YANG Ou³, CHEN Long³

- (1. School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;
2. Wuhu Anpu Robot Industry Technology Research Institute, Wuhu 241007, China;
3. Hengyang Heli Industrial Vehicle Co., Ltd, Hengyang 421000, China)

Abstract: For the multi-motor servo control system of four-wheeled omnidirectional heavy-duty automated guided vehicle (AGV), the four steering motors are prone to incoordination by the influence of external load in steering condition. In order to realize the efficient coordination of four steering motors, the real-time rotation angle relationship of each steering wheel is analyzed in the four-wheel AGV under the steering conditions, a mathematical model for the four steering motors is established; the Beetle Antennae search algorithm (BAS) is fused with PID control method, the optimal PID parameters for the single-motor PID controller is sought; the cross-coupling control strategy is used to design the position compensator of 4 steering motors respectively; the feasibility of the motion control algorithm is finally verified through MATLAB/Simulink simulation platform. The experimental results show that the motion control algorithm has high synchronization stability. When the external load is disturbed, the deviation can be corrected within 0.394 s, and the maximum fluctuation is caused by only 34.8% of the non-cross-coupling control, and the application for omnidirectional heavy-duty AGV is expanded.

Keywords: heavy-duty AGV; cooperative control; BAS (beetle antennae search algorithm); tracking error; cross-coupling control

0 引言

重型材料的自动搬运一直是物流行业的技术难点, 特别是在生产车间、仓库等空间有限的工作条件下, 迫切需要解决重载 AGV (automated guided vehicle) 灵活的运动并且在转向时实现高效的协同^[1]。

在发达国家中, 美国、日本、德国、瑞典等多国家都发布支撑移动机器人发展的战略文件, 其移动机器人种类齐全, 技术水平处于领先地位^[1]。中国的移动机器人技术

起步较晚, 但是关于移动机器人的研究正在迅速发展, 在近几年取得了较大的突破。基于麦克纳姆轮结构设计, G. Bayar 等设计了新型的悬架机构, 减小了麦克纳姆轮产生的高频振动, 运用多传感器数据融合的方法, 实现了灵活的转向。谢永良等^[3-4]推导出了 AGV 基于 Ackermann 转向的数学模型, 运用 PID 控制算法, 在转向时, 从动轮能快速响应, 实现了高精度转向。

目前, 在重载、高精度、存在较大负载扰动的系统中,

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-11-01。

基金项目: 安徽工程大学一鸠江区协同创新项目 (2021cyxtal); 安徽省属公办普通本科高校领军骨干人才项目; 安徽工程大学创新团队。

作者简介: 张德政 (1997-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事 AGV 运动控制方向的研究。

通讯作者: 汪步云 (1984-), 男, 湖北云梦人, 博士, 副教授, 主要从事机器人信息感知方向的研究。

引用格式: 张德政, 汪步云, 杨 鸥, 等. 全向重载 AGV 多轴协同运动控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 91-97.

多电机协同控制是最核心的问题^[5]。同步控制算法直接影响着系统的稳定性、准确性及工作效率，故一部分学者对其进行了更为深入的研究。Q. Sun^[6]等采用了改进的偏差耦合控制，并验证了在四电机转速相同时具有较高的同步性。谷雨等^[7]提出加权交叉耦合控制算法，同时验证了算法的稳定性，仿真结果表明对多个功率不同的电机具有较好的同步性。张承慧等^[8]运用最小相关轴数目的同步思想，结合环形耦合控制，结果表明在受到干扰时误差收敛速度快。王慧霞等将迭代学习和交叉耦合结构相结合的控制策略运用于伺服数控系统中，提高了零件的加工精度。王丽梅等^[9]将经验模态分解算法与交叉耦合控制策略相结合以提高控制的精度。

全向 AGV 在结构上多采用麦克纳姆轮式的和双舵轮式，麦克纳姆轮承载能力相对较弱，适用的环境有限^[10]；双舵轮式重载 AGV 灵活程度不高^[11]。在多电机控制策略上，交叉耦合控制策略对双电机系统具有较高的协同性和抗干扰能力^[12-13]。故本文基于四舵轮式全向重载 AGV 机械结构，在转向工况下，采用 BAS 算法对单轴控制系统进行 PID 参数整定^[14-21]，运用交叉耦合控制策略，设计多电机协同的运动控制算法，可以抵抗负载扰动能力强，灵活程度高，实现了全向重载 AGV 在狭小的空间内灵活的转向。

1 硬件控制系统构建

1.1 全向重载 AGV 的底盘机械结构

底盘三维结构如图 1 所示。全向重载 AGV 的底盘机械结构主要由车身、舵轮安装板及舵轮 3 部分组成。车身由中间两道工字钢、两侧的槽钢及横向放置的钢板组成，通过横向放置的钢板将工字钢和槽钢焊接为一体，舵轮安装板焊接于工字钢上，舵轮由螺栓连接安装于舵轮安装板上。全向重载 AGV 的主要设计参数如表 1 所示。

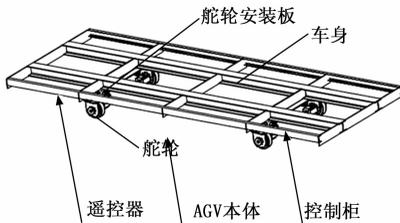


图 1 全向重载 AGV 的车身结构

表 1 全向重载 AGV 设计主要参数

性能指标	参数大小
轴距(2L)/m	3.0
轮距(2H) /m	1.3
车身总重/kg	2 000
额定载重/kg	5 000
行驶速度/(m/s)	0.3~1.2
电源	48 V 锂电池
行走电机功率/kW	3
转向电机功率/kW	0.75
最大爬坡角度/(°)	10

1.2 控制系统硬件设计

本文基于四舵轮式重载 AGV，根据 AGV 欲完成的动作、输入输出接口需求及通讯协议等，设计了全向重载 AGV 控制系统的硬件部分，使 8 个电机电流畅地完成预定转向动作。

如图 2 所示，控制系统主要由 3 部分组成，包括信号输入、控制信号分析以及控制信号执行。在左前轮和右前轮中心处安装有磁导航传感器，磁导航传感器通过 RS485 总线将 AGV 实际位置与预定位置的偏差量输入到 CM-1241 模块，再送至 CPU1214C。控制信号分析主要负责信息的汇聚、分析及分类发送等任务，由 CPU1214C 模块和 CM-CANOPEN 模块组成。CPU1214C 对输入的信号分析处理，再由 CM-CANOPEN 模块将信号以 CANOPEN 协议输送到伺服电机驱动器。控制信号执行为转向电机接收到指令后完成相应的动作，再由编码器反馈动作实际完成的情况。

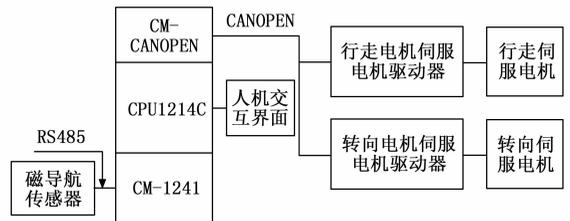


图 2 全向重载 AGV 控制系统

1.3 全向重载 AGV 转向数学模型

在前后轮同角度转向的这种典型工况下（假设绕着瞬时逆时针转向），如图 3 所示，图 3 中主要参数说明如表 2 所示，4 个轮子的转角应满足：

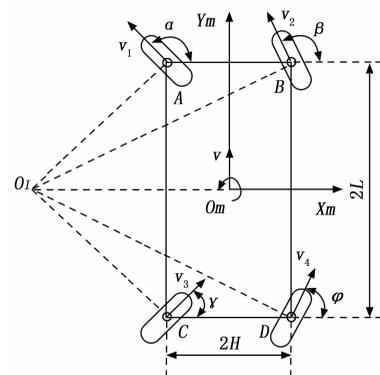


图 3 前后轮同角度转向示意图

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \\ \frac{\pi}{2} < \beta < \pi \\ 0 < \gamma < \frac{\pi}{2} \\ 0 < \varphi < \frac{\pi}{2} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中， α 为左前轮转角， β 为右前轮转角， γ 为左后轮转角， φ 为右后轮转角。

$$F = \int_0^{\infty} (\omega_1 |e(t)| + \omega_2 u^2(t) + \omega_3 |e(t)|) dt \quad (9)$$

式中, ω_3 为权值, 且 $\omega_3 \gg \omega_1$, 选取 $\omega_1 = 0.999, \omega_2 = 0.001, \omega_3 = 100$ 。

2.4 BAS-PID 融合算法

将 BAS 与常规 PID 算法相融合, 能有效解决常规 PID 控制器容易出现超调且难以将参数调至最优等问题^[17]。

将 BAS 算法与 PID 控制器融合过程如图 6 所示, 参数选取如表 4 所示, 主要融合步骤为:

表 4 BAS-PID 算法参数选取

参数	参数选取
种群规模	100
最大迭代次数	100
最小适应值	0.1
天牛须两须之间的距离	2
初始步长为	2
K_p 范围	0~100
K_i 范围	0~50
K_d 范围	0~50

Step 0: 产生粒子群并初始化粒子群, 确定粒子的数量、最大迭代次数、天牛须两须之间的距离及初始步长等。

Step 1: 由 BAS 算法随机产生的 K_p 、 K_i 、 K_d 的值赋给 PID 控制器并计算适应度值。

Step 2: 将每个粒子现在的适应度值与其历史最佳适应度值对比, 若现在的适应度值优于历史, 则将现在的适应度值记录为最优状态。

Step 3: 将每个粒子的最佳适应度值与种群历史最优适应度值比较, 若粒子的最佳适应度值优于种群历史最优适应度值, 则将粒子的最佳适应度值记录群体最佳适应度值。

Step 4: 对粒子位置进行更新。

Step 5: 满足输出条件则输出, 若不满足则继续搜索。

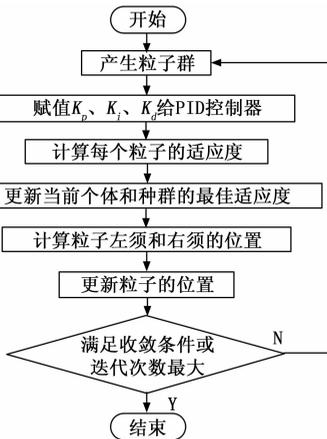


图 6 BAS-PID 融合算法流程图

3 转向电机交叉耦合控制器设计

对于 4 台转向电机的转向运动控制系统中, 设第 i 个电

机的位置跟踪误差为:

$$e_i(t) = \theta_i^d(t) - \theta_i(t) (i = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

式中, $e_i(t)$ 表示第 i 台电机位置跟踪误差, $\theta_i^d(t)$ 表示第 i 台电机由转向数学模型得到的期望转角, $\theta_i(t)$ 表示第 i 台电机实际转角。其中 $\theta_i^d(t)$ 与 AGV 各轮转角之间的关系为 (转向电机连接 50 : 1 减速器)。

$$\begin{cases} \theta_1^d = 50(\alpha - \frac{\pi}{2}) & \theta_2^d = 50(\beta - \frac{\pi}{2}) \\ \theta_3^d = 50(-\gamma + \frac{\pi}{2}) & \theta_4^d = 50(-\varphi + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad (11)$$

可以得到 4 个转向电机期望转角的关系为:

$$\begin{cases} \theta_1^d = 50(\alpha - \frac{\pi}{2}) \\ \tan\theta_2^d = \frac{1.5 \tan\theta_1^d}{1.5 + 1.3 \tan\theta_1^d} \\ \theta_3^d = \theta_1^d \\ \tan\theta_4^d = \frac{1.5 \tan\theta_1^d}{1.5 + 1.3 \tan\theta_1^d} \end{cases} \quad (12)$$

可以得到 4 个转向电机的同步误差为:

$$\begin{cases} \epsilon_1(t) = e_1(t) - e_4(t) \\ \epsilon_2(t) = e_2(t) - e_3(t) \\ \epsilon_3(t) = e_3(t) - e_2(t) \\ \epsilon_4(t) = e_4(t) - e_1(t) \end{cases} \quad (13)$$

如图 7、图 8 所示, 为实现 4 个转向电机的协同控制, 分别将跟踪误差及同步耦合误差输入到位置补偿器中, 对 4 个转向电机进行耦合误差控制。其控制过程如下:

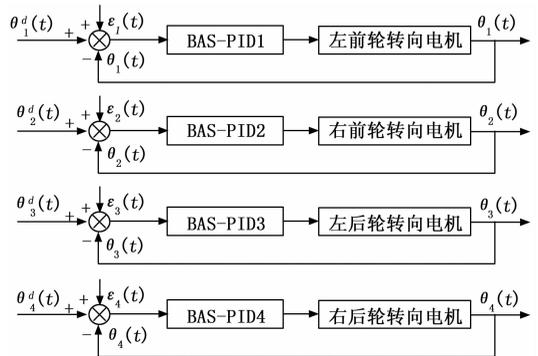


图 7 转向电机控制原理框图

1) 将 CPU1214C 求得各个转向电机的预期转角 $\theta_i^d(t)$ 分别与各个转向电机的编码器实时反馈实际的转角 $\theta_i(t)$ 作差, 从而得到各个电机的位置跟踪误差 $e_i(t)$ 。如图 7 所示, 将各个转向电机的位置跟踪误差 $e_i(t)$ 输入到各转向电机的 BAS-PID 控制器中。

2) 如图 8 所示, 将每个转向电机的位置跟踪误差分别与对角 (左前轮和右后轮为一个对角, 右前轮和左后轮为一个对角) 转向电机的位置跟踪误差作差得到同步误差 $\epsilon_i(t)$ 。

3) 如图 7 所示, 同步误差 $\epsilon_i(t)$ 输入到各转向电机的位置补偿器中。

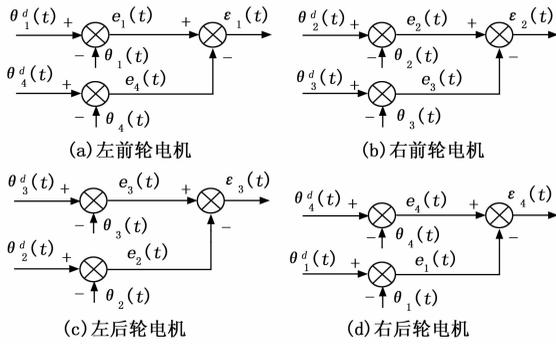


图 8 四电机同步耦合误差关系图

4 实验

4.1 BAS_PID 融合算法优化效果验证

本文分别选取天牛须搜索算法 (BAS)、人群搜索算法 (SOA) 及粒子群算法 (PSO) 进行性能比较, 将 3 种智能算法相同的初始化参数均设为一致。

在 Matlab/Simulink 软件中, 以左前轮电机为研究对象, 用 3 种算法对 PID 参数进行寻优, Simulink 仿真如图 9 所示。由于 3 种算法都产生了随机矩阵, 故每次结果有所不同。分别对 3 种算法各试验 5 次, 以加入单位阶跃信号上升时间最短为评价标准, 选取最优结果, 结果如图 10 和表 5 所示, t 为时间, 结果表明 BAS-PID 寻优结果在上升时间和调整时间上优于其他两种算法, BAS-PID 寻优结果的上升时间为 SOA-PID 寻优结果的 79.7%, 为 PSO-PID 寻优结果的 81.0%。

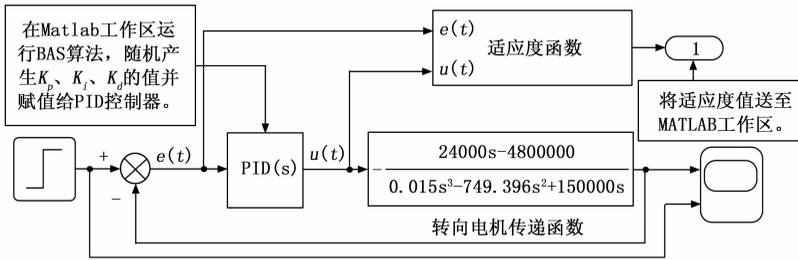


图 9 Matlab 与 Simulink 联合仿真

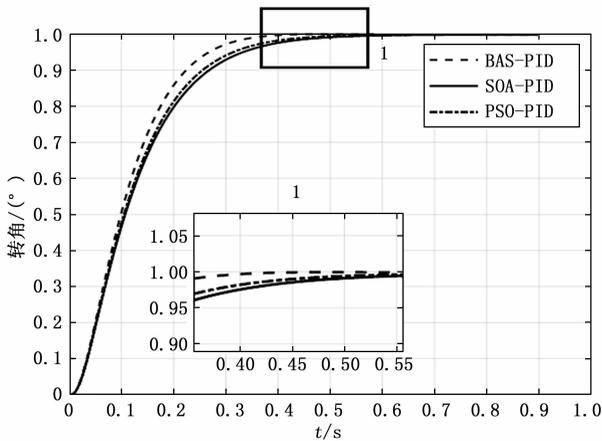


图 10 3 种寻优算法单位阶跃信号的响应

表 5 3 种寻优算法的性能指标

优化方案	K_p	K_i	K_d	适应度值	上升时间/s	调整时间/s
BAS-PID	34.575 3	2.252 4	0.007 9	1.304 0	0.401	0.276
SOA-PID	29.520 6	1.926 0	0.008 1	1.325 0	0.503	0.328
PSO-PID	29.689 4	1.934 3	0	1.313 9	0.495	0.320

在 Matlab 软件中画出 BAS-PID 优化系统的 Bode 图, 如图 11 所示。由图 11 可知, 幅值裕度 (G_m) 为 10.5 dB, 幅值裕度 (P_m) 为 54° , 幅值裕度和相角裕度均大于 0, 故系统稳定。

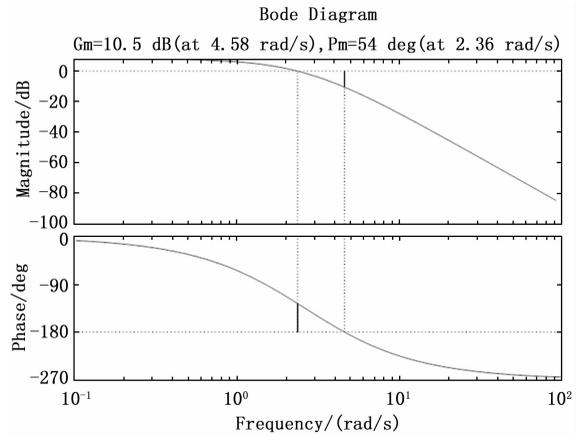


图 11 BAS-PID 优化系统的 Bode 图

以左前轮转向电机为研究对象, 设置目标转角随时间的函数为, 仿真时间为 2 s。将表 5 的 3 组 PID 参数分别代入 Simulink 中仿真, 结果如图 12 所示, t 为时间, 转角跟踪误差如表 6 所示。由图 12 和表 6 可以得出:

- 1) 运用 BAS-PID 优化的系统在正弦信号下的响应比 SOA-PID、PSO-PID 优化的系统更快。
- 2) BAS-PID 优化的系统在正弦信号下的跟踪误差范围 SOA-PID、PSO-PID 优化的系统小。

表 6 3 种优化方案正弦信号下跟踪误差范围度

优化方案	误差范围
BAS-PID	-4.681~4.681
SOA-PID	-5.113~5.113
PSO-PID	-4.985~4.985

4.2 多轴协同效果验证

现对前文所述控制策略进行 Simulink 仿真验证, 仿真时间为 5 s。以左前轮转向电机为研究对象, 设定电机转角为 10 度, 均在 2 s 时设置外界加入 4 N·m 负载干扰, 对比有交叉耦合控制和无交叉耦合控制时左前轮电机实际运行的转角 (有交叉耦合和无交叉耦合仿真模型中 PID 参数均设为 $K_p=34.573 5$, $K_i=2.252 4$, $K_d=0.007 9$)。

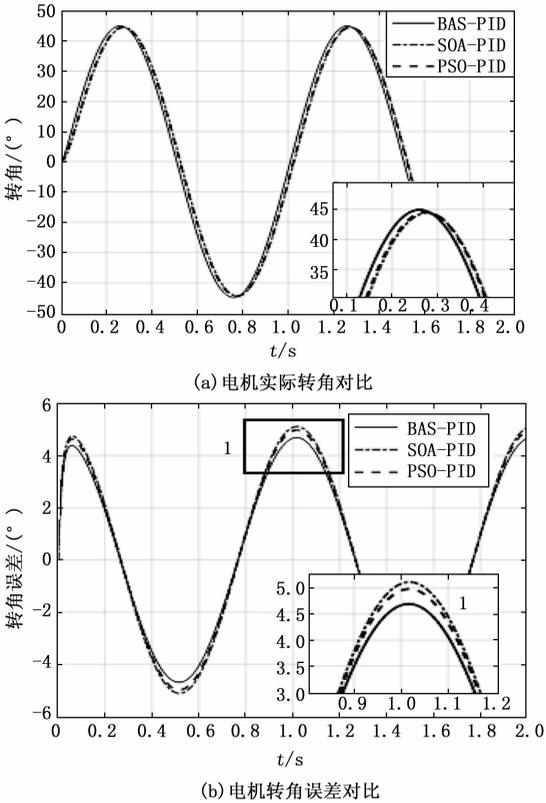


图 12 3 种寻优算法效果对比图

表 7 有无交叉耦合控制的瞬态响应比较

有无交叉耦合控制	启动时上升时间/s	启动时调整时间/s	加入负载最大波动	加入负载调整时间/s
有交叉耦合控制	0.323	0.276	6.3	0.394
无交叉耦合控制	0.412	0.363	18.1	0.517

结果如图 13 所示，图中 t 表示时间，瞬态响应比较如表 7 所示。结合图 13 和表 7 可以得出：

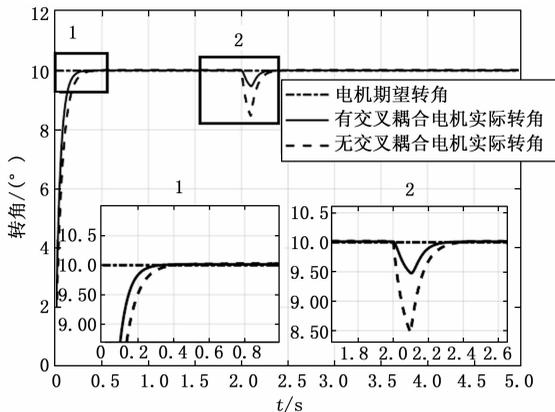


图 13 转向电机存在干扰效果对比图

1) 在相同的条件下，有交叉耦合控制效果优于无交叉耦合。在启动时瞬态响应上，有交叉耦合控制上升时间和

调整时间均小优于无交叉耦合控制，有交叉耦合控制的上升时间为无交叉耦合控制的 78.4%，调整时间为 76.0%。

2) 在突然受到外界负载的作用下，有交叉耦合控制转角最大波动仅为无交叉耦合控制最大波动的 34.8%，故有交叉耦合控制抗干扰能力强；有交叉耦合控制的调整时间为无交叉耦合控制的调整时间的 76.2%，调整时间仅为 0.394 s，故该运动控制算法收敛速度快。

为了更好地模拟电机实际运行的状态，将目标转角设置为变幅值，在 2.5 s 加入干扰信号，分别得到 4 个转向电机的转角跟踪图 14、跟踪误差图 15 和同步误差图 16。如图 14 所示，转向电机响应快，无超调，抗干扰能力强。如图 15 和 16 所示，误差能在很快的时间内收敛到 0，当电机受到外界干扰时，4 个电机能在 0.2 s 内修正误差并能降低干扰信号对系统的影响，实现 4 个转向电机协同控制且控制系统具有较高的同步性和很强的抗干扰能力。

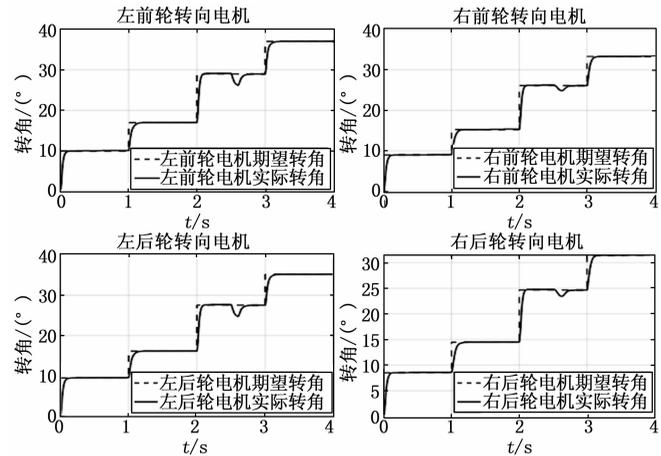


图 14 4 个转向电机的转角跟踪图

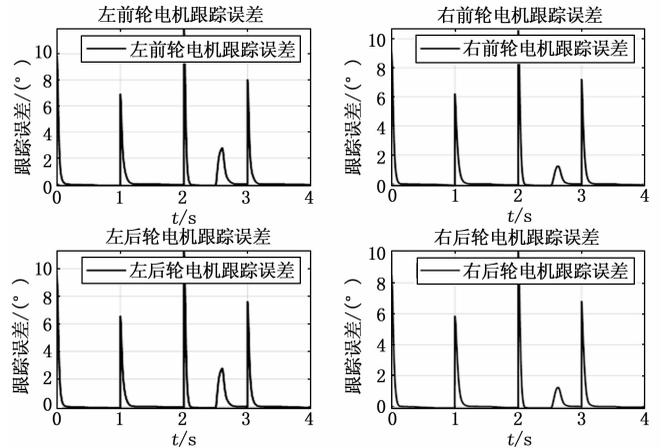


图 15 4 个转向电机的跟踪误差图

5 结束语

1) 本文对四舵轮式全向重载 AGV 转向控制进行研究，根据四舵轮式 AGV 机械结构及运动学规律建立了四舵轮式 AGV 的数学模型；采用 BAS-PID 融合算法进行 PID 参数整定；同时运用了交叉耦合控制策略设计了位置补偿器。

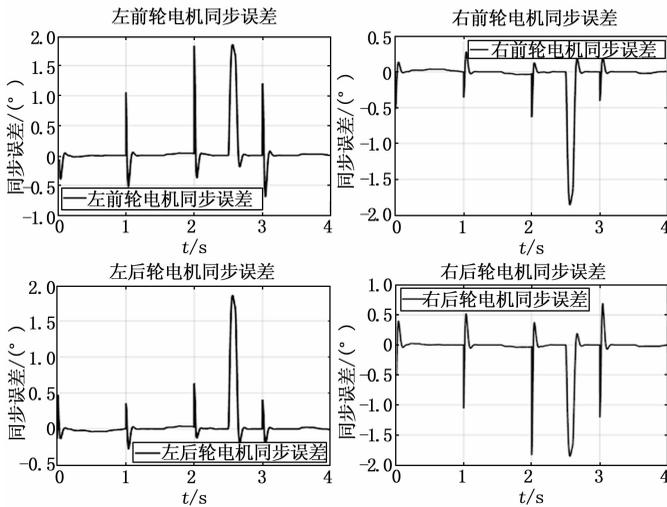


图 16 4 个转向电机的同步误差图

2) BAS-PID 融合算法能快速找出最优 PID 参数, 使系统响应快且无超调, 运用交叉耦合控制策略实现系统的高效协同。

3) 仿真结果表明, 系统同步性好, 具有较强的抗干扰能力强, 误差收敛速度快。当系统存在干扰信号时, 系统调整时间快, 所引起速度波动小, 有效提高 AGV 的转向的同步性, 扩大 AGV 的运用场合。

参考文献:

- [1] WU X, ZHANG Y, ZOU T, et al. Coordinated path tracking of two vision-guided tractors for heavy-duty robotic vehicles [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2018, 53 (13): 93-107.
- [2] BAYAR G, OZTURKS. Investigation of the effects of contact forces acting on rollers of a mecanum wheeled robot [J]. *Mechatronics*, 2020, 72 (4): 102-115.
- [3] 谢永良, 尹建军, 贺坤, 等. 轮式 AGV 纯滚动转向系统设计及无侧滑转向控制研究 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49 (4): 27-35.
- [4] QIU Q, FAN Z, MENG Z, et al. Extended ackerman steering principle for the coordinated movement control of a four wheel drive agricultural mobile robot [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 152 (6): 40-50.
- [5] 张承慧, 石庆升, 程金. 一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27 (15): 59-63.

(上接第 39 页)

- [13] 克里斯·斯皮尔. *SystemVerilog 验证测试平台编写指南* [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] BETZ V. 深亚微米 FPGA 结构与 CAD 设计 [M]. 王伶俐, 杨萌, 周学功, 译, 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [15] MENG X Z, CHEN L G, ZHOU H, et al. FPGA interconnect timing library based on the statistical method [C] // *ASIC-CON*. Guangzhou; 2011, IEEE 9th International Conference on Digital Object Identifier, 2011: 393-396.

- [6] SUN Q, LI S, KANG X. Analysis on kinematics of omnidirectional full drive mobile robot [C] // *Proceeding of the IEEE. Wuyi Mountain; International Conference on Information and Automation*, 2018, 615-620.
- [7] 谷雨, 马钺. 基于加权交叉耦合的多电机同步控制研究 [J]. *电气传动*, 2015, 45 (9): 58-61.
- [8] 王慧霞. 基于迭代学习与交叉耦合的数控机床进给伺服系统运动控制 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [9] 王丽梅, 孙璐. 基于经验模态分解算法的直驱 XY 平台交叉耦合迭代学习控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36 (17): 4745-4753.
- [10] 张京, 陈度, 王书茂, 等. 农用轮式机器人四轮独立转向驱动控制系统设计与试验 [J]. 2015, 31 (18): 63-70.
- [11] 陈勇, 刘哲, 乔健, 等. 重载轮式移动机器人路径跟踪滑模预测控制 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42 (8): 214-220.
- [12] 苏学满, 孙丽丽, 于华, 等. 四轮电机交叉耦合同步控制策略研究 [J]. *机械设计与制造*, 2020 (7): 89-92.
- [13] 叶宇豪, 彭飞, 黄允凯. 多电机同步运动控制技术综述 [J]. *电工技术学*, 2021, 36 (14): 2922-2935.
- [14] WU T, ZHOU C, YAN Z, et al. Application of PID optimization control strategy based on particle swarm optimization (PSO) for battery charging system [J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2020, 15 (4): 528-535.
- [15] 陈阳, 姚晔. 基于天牛须-粒子群优化算法的大型中央空调系统节能控制 [J]. *制冷学报*, 2021, 42 (4): 43-49.
- [16] 李真, 王帆, 王冉珺. 永磁同步电机的自抗扰控制器参数自整定 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (5): 92-96.
- [17] 郗欣甫, 黄文军, 李培波, 等. 基于人群搜索算法的多伺服电机协同控制研究 [J]. *东华大学学报 (自然科学版)*, 2017, 43 (1): 81-87.
- [18] 黄振华, 薛家祥. 基于粒子群算法的无线充 PID 控制器优化设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28 (11): 84-88.
- [19] 古志, 曾云, 李敏, 等. 基于 SOA 的水轮机调速系统 PID 参数优化 [J]. *排灌机械工程学报*, 2021, 39 (6): 583-588.
- [20] 李树林, 王琨, 郝艳军. 基于粒子群优化方法的电力系统状态向量估计模型 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (5): 184-188.
- [21] 葛育晓, 赵荣珍. 基于改进 SOA 算法自整定 PID 系统优化研究 [J]. *仪表技术与传感器*, 2020 (10): 108-116.

- [16] 江峻. *FDP FPGA 芯片可编程逻辑单元建模与故障测试* [D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [17] BHATNAGAR H. 高级 ASIC 芯片综合 [M]. 张文俊, 译, 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [18] 李昕蔓, 易清明, 石敏. 帧间预测模块的静态时序分析 [J]. *微计算机信息*, 2010, 26 (17): 105-107.
- [19] 王志功. *集成电路设计* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [20] 张斌, 张松涛. FPGA 同步电路设计技巧 [J]. *计算机与网络*, 2007 (1): 40-41.