

基于线性自抗扰的 AGV 轨迹跟踪控制器设计 及参数优化

朱时杰 郭 青*

(北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要: 针对自动导引车(AGV)的轨迹跟踪问题,通过将多人多出的非线性运动学系统解耦为多个单人单出的线性系统,在此基础上设计了基于线性自抗扰控制(LADRC)的轨迹跟踪控制器;引入混沌搜索对量子粒子群算法(QPSO)进行改进以解决其易于陷入局部最优的问题,然后利用混沌量子粒子群算法(CQPSO)对 LADRC 控制器的参数进行整定;最后分别就参考轨迹为直线和参考轨迹突变情况下的轨迹跟踪情况进行了仿真实验,实验结果证明了本文设计的轨迹跟踪控制器的有效性。

关键词: 自动导引车(AGV); 线性自抗扰控制(LADRC); 混沌量子粒子群(CQPSO); 轨迹跟踪

中图分类号: TP242.6 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.04.015

引 言

自动导引车(automated guided vehicle, AGV)是一种具有柔性且满足复杂物料搬运需求的智能轮式移动机器人^[1]。高精度的轨迹跟踪是 AGV 将物料从起始点沿预设的轨迹安全运送到目标位置的重要基础,所以轨迹跟踪控制是 AGV 控制的一个重要研究方向。文献[2-3]采用积分反演技术与自适应滑模控制设计了具有全局渐近稳定的跟踪控制器,实现了参数未知和不确定性干扰条件下的移动机器人轨迹跟踪,但上述工作均存在算法复杂,实际应用困难的问题。

比例-积分-微分控制器(proportion integration differentiation, PID)因其设计简单、鲁棒性强等优势在 AGV 控制中得到了广泛的应用^[4]。但 PID 的参数设定对控制性能有很大影响,当控制对象的动态特性发生变化时,必须重新整定控制器参数才能保证控制系统的性能。自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)技术在 PID 控制的基础上,将系统的内部不确定性和外部干扰视为总扰动,并通过构造扩张状态观测器对总扰动实时估计并补

偿,消除各种不确定因素的影响^[5-6]。Gao^[6]通过简化 ADRC 的设计,将扩张状态观测器线性化处理,提出了线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC),将需整定的控制器参数减少到 4 个,使参数整定更易于实现。

相对于 PID 控制器, LADRC 控制器的参数较多,仅依靠经验来整定耗时长且无法保证控制器的性能,因此人们提出多种参数整定方法对 LADRC 控制器进行优化。文献[7]选择合适的适应度函数,利用粒子群优化算法(PSO)对 ADRC 参数进行优化,但 PSO 存在早熟的问题;文献[8]利用差分进化算法(DE)来改进 PSO 中粒子的多样性,从而解决 PSO 算法易于陷入局部最优的问题,但后期收敛速度较慢。

本文引入混沌搜索对量子粒子群算法(quantum-behaved particle swarm optimization, QPSO)进行改进,提出了混沌量子粒子群算法(chaos quantum-behaved particle swarm optimization, CQPSO),利用混沌的遍历性避免 PSO 算法陷入局部最优,并解决收敛速度慢的问题;针对轮式移动机器人 AGV,设计了基于 LADRC 的轨迹跟踪控制器,采用 CQPSO 优化控制器参数,通过跟踪机器人的位姿实现 AGV 运行轨迹的跟踪。

1 轮式移动机器人运动学模型

在理想的二维平面上选取一点 O 作为原点建

收稿日期: 2016-12-15

第一作者: 男, 1992 年生, 硕士生

* 通讯联系人

E-mail: guoqing@mail.buct.edu.cn

立坐标系 XOY , 如图 1 所示。以 AGV 的左、右轮轴线中心点 M 为原点, 建立车体自身的坐标轴 $X_M Y_M$, AGV 的位姿信息用坐标表示为 $[x_M, y_M, \theta]$ 。其中 X_M 轴为 AGV 的前进方向; $[x_M, y_M]$ 为点 M 的坐标; θ 为 X_M 轴与 X 轴逆时针的夹角, 即航位角; v 、 ω 分别表示 AGV 的线速度和角速度。

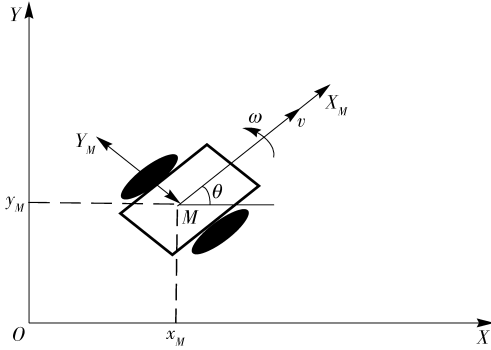


图 1 移动机器人的运动坐标系简化示意图

Fig. 1 Sketch of the motion coordinate system of AGV

轮式移动机器人的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_M = v \cos \theta \\ \dot{y}_M = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

2 线性自抗扰控制器

LADRC 继承了 PID 控制器利用误差反馈进行控制的思想。与 ADRC 相比, LADRC 省去了微分跟踪器, 状态误差反馈采用线性组合的方式, 同时利用线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO) 估计系统的总扰动^[9]。

假设被控对象为如式 (2) 所示的单输入单输出一阶系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, w) + bu \\ y = x \end{cases} \quad (2)$$

其中, x 为系统的状态量; y 为系统的输出; u 为系统的输入; w 为系统受到的外部扰动; b 表示控制增益参数, 并且 b 未知, 用其近似值 b_0 代替。

构造 LESO

$$\begin{cases} \dot{z} = A_s z + B_s u + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C_s z \end{cases} \quad (3)$$

其中: $z = [z_1 \ z_2]^T$ 为状态观测量, \hat{y} 为系统输出的估计值, A_s 、 B_s 、 C_s 为 LESO 的系数矩阵, $L = [2w_0 \ w_0^2]^T$ 为 LESO 的控制参数矩阵, w_0 为 LESO 的带宽。调节 w_0 使 LESO 的有界输入和有界输出稳定,

将 L 代入式 (3) 得到标准 LESO 表达式

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu \\ y_g = Cz + Du \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} -2w_0 & 1 \\ -w_0^2 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_0 & 2w_0 \\ 0 & w_0^2 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

根据文献[6], 设 $K_p = w_c^2$, w_c 为控制器带宽, 因此 LADRC 控制器设计问题转化为控制器参数即 LESO 的带宽 w_0 、控制器带宽 w_c 以及控制增益 b_0 的整定问题。图 2 为 LADRC 的闭环控制结构。

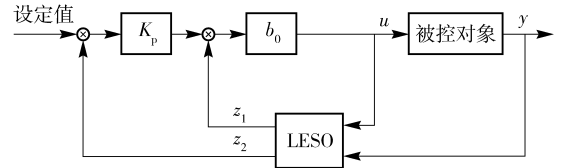


图 2 LADRC 控制结构图

Fig. 2 Diagram of the LADRC controller

3 基于 LADRC 的轨迹跟踪控制器设计

本文针对 AGV 的轨迹跟踪控制进行研究。AGV 在给定仓储实验环境下运行, 通过直流电机和舵机提供动力, 实现前行、后退、转弯等动作。AGV 采用惯性导航方式, 在驱动轮上安装编码器, 编码器与驱动轮同轴, 测得驱动轮的转速, 再根据转速及车体参数推算得到 AGV 的线速度及角速度。设定 AGV 的基准位姿, 根据 AGV 的运动学模型通过航位推算计算出 AGV 的实时位姿信息。

引入虚拟控制量 v_x 、 v_y , 则式 (1) 的运动学方程变为

$$\begin{cases} \dot{x}_M = v \cos \theta = v_x \\ \dot{y}_M = v \sin \theta = v_y \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (5)$$

其中, v_x 为轮式移动机器人的线速度 v 在 X 轴方向的分量, v_y 为 v 在 Y 轴方向的分量。由式 (5) 可知, 引入虚拟控制量后, 原两输入三输出的非线性运动学模型解耦为 3 个单输入单输出的控制回路。3 个输入的控制量 v_x 、 v_y 、 ω 分别对应 AGV 位姿的 3 个输出分量 $[x_M, y_M, \theta]$ 。因此由 3 个单输入单输出控制回路分别设计 3 个控制器, 控制系统结构如图 3 所

示。其中 x_r, y_r, θ_r 分别代表横坐标、纵坐标、航位角的参考值。

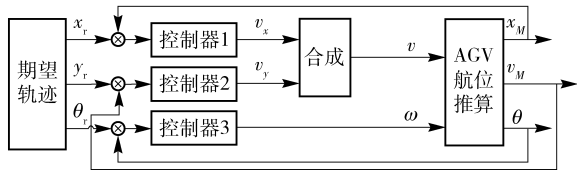


图 3 AGV 轨迹跟踪控制器结构

Fig. 3 AGV trajectory tracking controller structure

虚拟控制量 v_x, v_y 根据式(6)合成为 AGV 的线速度 v , 计算式如式(6)所示

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

4 混沌量子粒子群(CQPSO)算法

针对 QPSO 很容易陷入局部最优解无法跳出的问题^[10], 提出混沌量子粒子群(CQPSO)算法, 即利用混沌的遍历性^[11], 当 QPSO 陷入局部最优解时, 使用 logistic 映射函数生成混沌序列, 以当前的局部最优解为中心展开混沌序列的往返映射, 避免 QPSO 陷入局部最优。

CQPSO 算法的主要步骤如下:

1) 初始化粒子种群 在 H 维空间中, 随机产生 N 个粒子的位置和速度, 形成维数为 $N \times H$ 的初始种群数组 Pop, QPSO 与混沌搜索共用此初始种群;

2) 计算适应值 对于每个粒子, 计算其适应值;

3) 更新 QPSO 的个体最优位置 P_l^t 将每个粒子的适应值与该粒子所经历的个体最优位置适应值进行比较, 如果适应值较好, 则将其作为当前的个体最优位置;

4) 计算当前 QPSO 的全局最优位置 对于每个粒子, 将其适应值与整个粒子群所经历的最优位置比较, 若适应值较好, 将其作为当前的全局最优位置;

5) 计算 QPSO 的平均最优位置 根据式(7)计算种群的平均最优位置 \vec{C}^t

$$\vec{C}^t = (C_1^t, \dots, C_j^t) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \vec{P}_l^t = \left(\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N P_{l,1}^t, \dots, \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N P_{l,j}^t \right) \quad (7)$$

式中, \vec{C}^t 为维数 $1 \times H$ 的第 t 代种群的平均最优位置, $P_{l,j}^t$ 为第 t 代种群中第 l 个粒子的个体最优位置的第 j 维分量;

6) 根据式(8)QPSO 更新粒子的位置

$$\begin{cases} X_{l,j}^{t+1} = p_{l,j}^t - \beta |C_j^t - X_{l,j}^t| \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) & r_a < 0.5 \\ X_{l,j}^{t+1} = p_{l,j}^t + \beta |C_j^t - X_{l,j}^t| \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) & r_a \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $X_{l,j}^{t+1}$ 为第 $t+1$ 代种群的第 l 个粒子位置的第 j 维分量; β 为收缩扩张系数; C_j^t 为第 t 代种群平均最好位置的第 j 维分量; r_a, ε 为服从 $(0,1)$ 均匀分布的随机数; $p_{l,j}^t$ 为第 t 代种群的第 l 个局部吸引子的第 j 维分量, 其坐标位置表示为 $p_{l,j}^t = \varphi P_{l,j}^t + (1 - \varphi) P_g^t$ (其中 P_g^t 为第 t 代种群的全局最优位置, φ 为服从 $(0,1)$ 均匀分布的随机数);

7) 使用 logistic 映射函数^[11] 产生混沌序列

$$z_{l,j}^{t+1} = \mu \cdot z_{l,j}^t (1 - z_{l,j}^t) \quad (9)$$

其中, $z_{l,j}^t$ 表示在 t 代种群的第 l 个混沌变量的第 j 维分量; μ 表示混沌搜索的控制变量, 当 $\mu = 4$ 时, 公式(9)处在混沌状态, 且混沌变量 $z_{l,j}$ 在 $(0,1)$ 范围内, 其遍历性与随机性最好;

8) $z_{l,j}$ 与式(10)进行往返映射

$$X_{l,j} = b_l + z_{l,j} (b_u - b_l) \quad (10)$$

其中 b_u, b_l 代表待优化的参数寻优空间, $b_u \geq x_l \geq b_l$;

9) 比较 QPSO 和混沌搜索的全局历史最优值的适应值大小, 更新当前的全局最优值;

10) 重复步骤 2) ~ 9), 直至满足精度要求或者达到最大迭代次数, 停止搜索并输出全局最优值和其适应值。

5 仿真实验结果与分析

5.1 控制器寻优结果

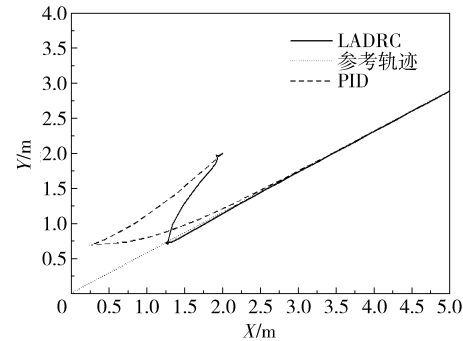
AGV 的轨迹跟踪控制系统结构如图 3 所示。控制器分别采用 PID 控制器和 LADRC 控制器, 通过参考轨迹为直线和参考轨迹突变两种情况对比两种控制器的控制效果。利用 CQPSO 分别对 PID 控制器与 LADRC 控制器的参数进行寻优, CQPSO 参数设定为: $N=30, H=9$, 最大迭代次数 $t_{\max}=50$ 次, 寻优空间 $[0,100]$ 。这里选取 ITAE 指标作为性能评价函数, 其定义为

$$J = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (11)$$

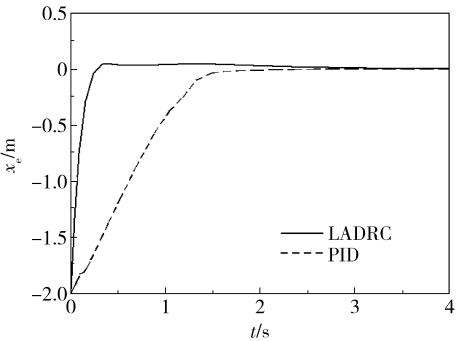
其中, $e(t)$ 表示横坐标误差 x_e 、纵坐标误差 y_e 与航位角误差 θ_e 的绝对值之和。LADRC 控制器与 PID 控制器寻优结果如表 1 所示, 其中 k_p, k_i, k_d 为 PID 控制器的 3 个参数。

表 1 控制器参数寻优结果

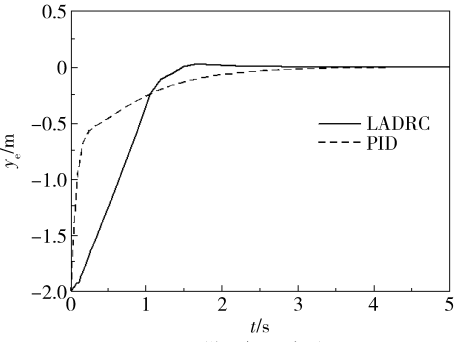
Table 1 Optimization results of controller parameters						
控制器	w_0	w_c	b_0	k_p	k_i	k_d
1	4.564	22.58	0.225	1.961	0.984	3.343
2	3.458	15.75	0.563	2.361	0.984	2.633
3	4.832	20.75	0.315	2.213	1.113	2.684



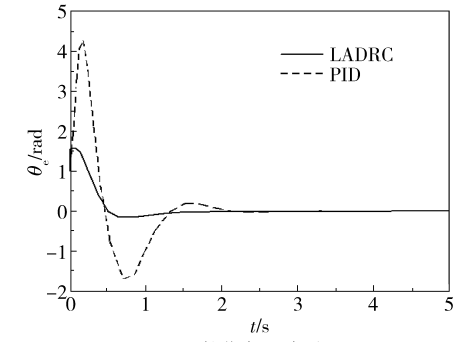
(a) 位姿跟踪轨迹仿真



(b) 横坐标跟踪误差



(c) 纵坐标跟踪误差



(d) 航位角跟踪误差

图 4 直线轨迹跟踪仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of straight line trajectory tracking

由图 4(a) 可以看出,在控制器的作用下,AGV 从起点向参考轨迹起始点方向调整,随着仿真时间增加,LADRC 和 PID 两种控制器均能使 AGV 接近参考轨迹并重合;图 4(b)、(c) 表明,LADRC 控制器比 PID 控制器对于参考位姿在 X 轴及 Y 轴方向的响应误差超调更小,并且很快接近于零;图 4(d) 表明,对于位姿跟踪的航位角误差,LADRC 控制器同样能够使其更快逼近零,且波动较小。所以总体来说 AGV 跟踪直线轨迹时,LADRC 的控制效果优于 PID 控制器。

5.3 参考轨迹发生突变时

假设当小车直线行走时预定轨迹上有障碍物出现,此时需要修改参考轨迹以避免障碍物,本文利用 Matlab 仿真模拟这一情况。设 AGV 的参考控制输入为 $v_r = 1\text{ m/s}$, $\omega_r = 0$;AGV 限速为 $|v_{\max}| = 1.5\text{ m/s}$,

5.2 参考轨迹为直线

当参考轨迹为直线时,选取 AGV 的参考输入 $v_r = 1\text{ m/s}$, $\omega_r = 0$;对 AGV 的线速度和角速度加以限制,取 $|v_{\max}| = 1\text{ m/s}$, $|\omega_{\max}| = 2\text{ rad/s}$;分别取参考位姿初始值为 $(x_r = 0, y_r = 0, \theta_r = \pi/6)$,AGV 的初始位姿为 $(x_0 = 2, y_0 = 2, \theta_0 = \pi/4)$ 。仿真实验结果如图 4 所示。

$|\omega_{\max}| = 2\text{ rad/s}$;AGV 的参考位姿初始值为 $(x_r = 0, y_r = 0, \theta_r = \pi/6)$,初始位姿为 $(x_r = 2, y_r = 2, \theta_r = \pi/4)$ 。在 $t = 2\text{ s}$ 时修改参考轨迹以避免障,使原设定轨迹的横坐标阶跃变化,修改后的参考轨迹与原轨迹平行并向左侧平移 1 m 。仿真实验结果如图 5 所示。

由图 5(a) 可以看出,当参考轨迹发生突变时,LADRC 与 PID 均可以使 AGV 最终跟踪给定的参考轨迹;图 (b)、(c) 表明,相对于 PID 控制器,在 LADRC 控制器的作用下,AGV 位姿在 X 轴及 Y 轴方向的响应误差超调均较小;图 (d) 表明,对于位姿跟踪的航位角误差,LADRC 控制器同样能够使其更快逼近零,且波动较小。因此当参考轨迹发生突变时,LADRC 控制器具有更好的调节能力。

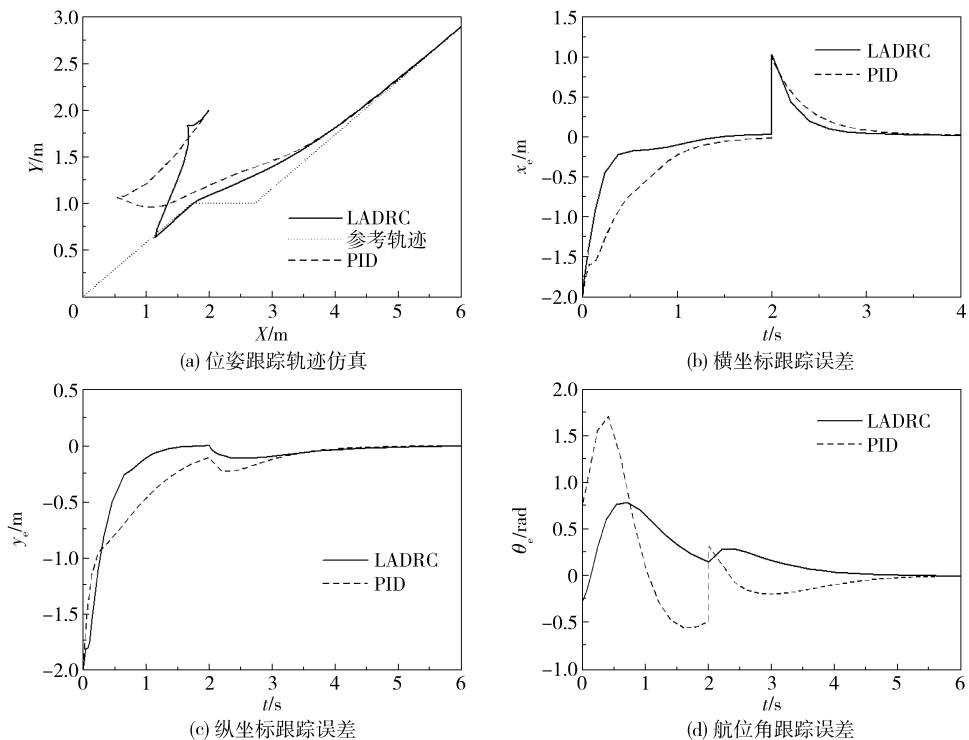


图 5 直线突变轨迹跟踪仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of line mutation trajectory tracking

6 结束语

本文基于 LADRC 算法设计了 AGV 的轨迹跟踪控制器,针对 LADRC 参数整定的问题,改进 QPSO 算法,加入混沌优化搜索,提高优化算法的收敛精度。分别在参考轨迹为直线和参考轨迹突变的两种情况下进行轨迹跟踪仿真实验,来对比 LADRC 控制器与 PID 控制器的性能。仿真结果证明 LADRC 控制器比 PID 控制器能更好地消除误差,响应误差超调小,体现了 LADRC 控制器稳定性高、鲁棒性强、不依赖被控对象模型的优点。

参考文献:

- [1] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013,39(7):963-972.
- Tan M, Wang S. Research process on robotics[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(7):963-972. (in Chinese)
- [2] 吴卫国,陈辉堂,王月娟. 移动机器人的全局轨迹跟踪控制[J]. 自动化学报, 2001, 27(3):326-331.
- Wu W G, Chen H T, Wang Y J. Global trajectory tracking control of mobile robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(3):326-331. (in Chinese)
- [3] 闫茂德,吴青云,贺昱曜. 非完整移动机器人的自适应

滑模轨迹跟踪控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3): 579-581/584.

Yan M D, Wu Q Y, He Y Y. Adaptive sliding mode tracking control of nonholonomic mobile robot[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(3): 579-581/584. (in Chinese)

- [4] 孟文俊,刘志强. 视觉引导 AGV 的路径跟踪控制研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3):321-325.
- Meng W J, Liu Z Q. Research on the path tracking control for vision-guided AGV[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3):321-325. (in Chinese)
- [5] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1): 24-31.
- Han J Q. Auto disturbances rejection control technique [J]. Frontier Science, 2007(1):24-31. (in Chinese)
- [6] Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the American Control Conference. Denver, USA, 2003:4989-4996.
- [7] 史永丽,侯朝桢,苏海滨. 基于粒子群优化算法的自抗扰控制器设计[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2):433-436.
- Shi Y L, Hou C Z, Su H B. Auto-disturbance-rejection controller design base on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(2): 433-436. (in Chinese)

- [8] 王子豪,杨小健. PSODE 混合算法的 ADRC 控制[J]. 电子技术应用,2016,42(6):91-93/97.
Wang Z H, Yang X J. ADRC control based on PSODE hybrid algorithm [J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(6): 91-93/97. (in Chinese)
- [9] 吴超,王文浩,张玉文,等. 基于 LADRC 的无人机轨迹跟踪[J]. 航空学报,2015,36(2):473-483.
Wu C, Wang W H, Zhang Y W, et al. LADRC-based trajectory tracking for unmanned helicopter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(2): 473-483. (in Chinese)
- [10] 傅继阳,钟亮,黄友钦,等. 基于量子粒子群算法的门式钢架结构抗风优化[J]. 西南交通大学学报,2013, 48(5):845-850.
Fu J Y, Zhong L, Huang Y Q, et al. Wind-resistant optimization of portal frames based on quantum-behaved particle swarm algorithm [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(5): 845-850. (in Chinese)
- [11] 程启明,程尹曼,汪明媚,等. 基于混沌粒子群算法优化的自抗扰控制在蒸馏发生器水位控制中的应用研究[J]. 华东电力,2011,39(6):957-962.
Cheng Q M, Cheng Y M, Wang M M, et al. The applied research on ADRC based on chaos-PSO optimization in SG water level control [J]. East China Electric Power, 2011, 39(6): 957-962. (in Chinese)

LADRC-based AGV trajectory tracking controller design and parameter tuning

ZHU ShiJie GUO Qing*

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Automatic guided vehicles (AGV) are an important transport tool in logistics systems. The AGV trajectory tracking problem is discussed in this work. The nonlinear multi-input multi-output control system is decoupled into several independent single-input single-output linear control loops by decomposing the velocity of AGV into the components in the X and Y directions. In addition, a controller for trajectory tracking of AGV is designed based on the linear active disturbance rejection control (LADRC). The paper introduces chaos search into the quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm to solve the flaws of easy plunging into local optimum, and then the improved chaos quantum-behaved particle swarm optimization (CQPSO) algorithm is used to tune the parameters of LADRC. The simulation results show that the proposed method is effective and feasible.

Key words: automated guided vehicle (AGV); linear auto disturbance rejection control (LADRC); chaos quantum-behaved particle swarm optimization (CQPSO); trajectory tracking

(责任编辑:汪 琴)