

连续墙液压抓斗起重机双主卷扬同步控制

游张平^{1,2}, 彭英³, 李万莉¹, 李盛宇²

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 丽水学院机械工程系, 浙江 丽水 323000;
3. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 阐述了连续墙液压抓斗起重机双主卷扬液压系统的工作原理. 建立了双主卷扬同步系统的数学模型. 采用主从式同步PID(proportional integral derivative)控制策略, 并且将自适应在线遗传算法应用于PID参数的优化整定中. 仿真结果表明, 与传统遗传PID控制相比, 自适应在线遗传PID控制具有较好的控制性能. 现场试验数据表明: 所采用的控制策略比传统遗传PID控制算法具有更好的同步控制效果, 同步精度可达 $\pm 0.35^\circ$, 很好地满足了连续墙液压抓斗起重机同步作业的基本要求.

关键词: 起重机; 双主卷扬; 同步控制; 遗传算法; 自适应控制

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Adaptive Synchronization Control of Diaphragm Wall Grab Crane with Double Main Hoist

YOU Zhangping^{1,2}, PENG Ying³, LI Wanli¹, LI Shengyu²

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Mechanical Engineering, Lishui University, Lishui 323000, China; 3. College of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: A double hoist hydraulic system of diaphragm wall grab crane was introduced. A mathematic model was built for the double hoist synchronous system. Synchronous control strategy of proportional integral derivation(PID) with master-slave mode was adopted, and an on-line adaptive genetic algorithms (GA) was employed to optimize the parameter of PID. The simulation results show that the proposed algorithm has better control performance than traditional GA. Field test data indicate that there are good synchronizing effects by applying the proposed control strategy, and the synchronization precision can be controlled within $\pm 0.35^\circ$, which can meet the working requirements in engineering, and

it is more capable of improving precision of synchronism driving than the PID control with traditional GA.

Key words: crane; double hoist; synchronous control; genetic algorithms(GA); adaptive control

同步控制一直是液压行业的一个重要课题, 在重载、大型设备的运动中其作用显得尤为突出. 多年以来, 按偏差的比例(proportional)、积分(integral)和微分(derivative)进行控制的PID控制是应用最为广泛的一种自动控制方法, 在液压同步控制系统中具有广泛的应用. 而实际工业过程往往具有非线性、时变不确定性, 应用常规PID控制器不能达到理想的控制效果, 且常常受到参数整定方法烦杂的困扰^[1].

遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种基于自然选择和基因遗传学原理的随机并行搜索算法, 是一种寻求全局最优解而不需要任何初始化信息的高效优化方法^[2]. 应用遗传算法对PID控制器进行参数寻优, 具有操作方便、速度快的优点, 不需要复杂的规则, 只通过字串进行简单的复制、交叉、变异, 便可达到寻优. 但遗传算法在解决一些复杂问题时还存在着早熟和收敛速度慢的缺陷, 不利于在实时控制中的应用^[3].

针对传统遗传算法存在的不足, 为满足系统的高性能指标要求, 本文以所设计的连续墙液压抓斗起重机^[4-6](以下简称“连续墙抓斗”)双主卷扬液压系统为研究对象, 建立的数学模型, 提出基于自适应在线遗传算法的主从式同步PID控制策略, 对其同步协调控制进行相关仿真和现场试验研究. 仿真结果和现场试验结果验证了该控制方法的可行性与有

收稿日期: 2009-07-02

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划重点资助项目(2008AA042803)

作者简介: 游张平(1978—), 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为工程机械智能控制及故障诊断. E-mail: youzhangping@163.com

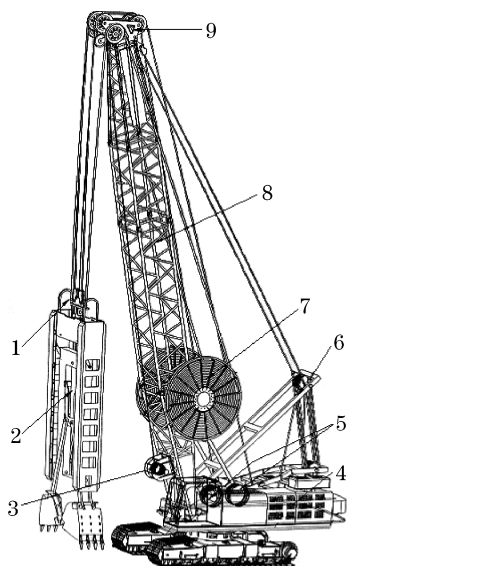
李万莉(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程机械智能控制、微波应用理论及控制.
E-mail: cnlwl@tongji.edu.cn

效性。(由于篇幅所限,本文分析只以双主卷扬起升过程为例。)

1 连续墙抓斗及其结构分析

连续墙抓斗是一种集机械、电气、液压、控制、测量等多学科技术于一体的技术密集型工程施工装备。它具有施工速度快,成墙效率高,成墙精度高,对周边环境影响小,人员劳动强度小,操作方便,低能耗等优点;适用于地铁车站、地下厂房、地下车库、地下通道、地下变电站、高层建筑地下室等深基坑工程及围护结构,尤其适用于在城市密集建筑群区域中进行深基坑施工,还可用于防渗墙和构筑地下深基础施工。随着我国基础施工行业的不断发展,国内一些龙头企业迅速崛起,在吸收国外先进技术的基础上开发出了具有自主知识产权的连续墙抓斗产品,但都属于中小吨位的单主卷扬系统。大吨位的双主卷扬系统产品在国内尚属空白。

双主卷扬连续墙抓斗主要由专用底盘、双主卷扬、液压胶管卷盘、电缆卷筒、变幅机构、臂架、猫头架、扁担梁、抓斗等部件组成(图1)。双主卷扬的采用,可使抓斗在斗宽、斗重和斗容上都得到较大幅度的提升,从而提升整机的工作性能。但是,这一结构的使用,不仅在力学性能上对起重机的起升臂架、卷筒、机身等刚性结构提出了更高要求,而且在控制上也比单主卷扬系统多出了许多新的问题。其中一个



1—扁担梁; 2—抓斗; 3—电缆卷筒; 4—底盘; 5—双主卷扬;
6—变幅机构; 7—软管卷盘; 8—臂架; 9—猫头架

图1 双主卷扬连续墙抓斗简图
Fig.1 Double main hoist system

突出的问题,便是对2根钢丝绳同步运动的控制。在主工况下,2个主卷扬共同提升或下放抓斗。但当2个主卷扬的速度不相等时,抓斗容易偏斜工作,不仅会使成墙精度达不到要求,而且会使滑轮损坏、钢丝绳加速磨损及其中1个主卷扬超载工作,从而导致安全事故。

2 双主卷扬液压系统工作原理

本系统中,执行元件由左右对称的2个变量马达组成。各个分组中的控制模块都相同,均由电比例先导阀、主阀、变量马达和主卷扬机构、辅助阀及相关检测元件等组成。图2为双主卷扬液压系统的工作原理简图。

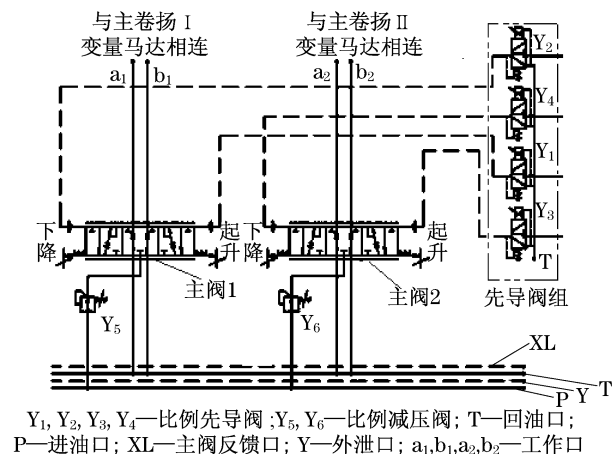


图2 双主卷扬液压系统工作原理简图

Fig.2 Working principle of double main hoist hydraulic system

双主卷扬起升时,比例先导阀 Y_2, Y_4 断电,系统先导压力油经由比例先导阀 Y_1, Y_3 流出,推动各自回路的主阀右位工作,主油泵输出的压力油经比例减压阀(Y_5, Y_6)、主阀,驱动马达转动,联结减速器进而带动卷筒转动,钢丝绳收卷,抓斗处于起升工况。起升过程中,主卷扬I为主令卷扬,主卷扬II为随动卷扬,安装在抓斗上的倾角传感器实时检测抓斗水平倾角,转换成电信号反馈到先导阀 Y_3 的比例电磁铁上,控制比例先导阀 Y_3 出口压力,进而控制主阀2的阀口开度来调节主卷扬II的起升速度,从而实现双卷扬的实时同步控制。

3 双主卷扬系统数学模型

为简化模型,不考虑控制腔压缩效应和功率级

运动速度的影响,忽略先导阀口处的液动力和先导阀芯上的库仑摩擦力^[7],根据受力平衡方程可推导出电比例先导阀传递函数为

$$G_p(s) = \frac{K_P K_I}{ms^2 + Bs - K_I + K_P A_0} \quad (1)$$

式中: s 为拉普拉斯变换算子; K_P 为先导液桥的压力增益; K_I 为比例电磁铁的电流力增益; m 为先导级移动部件的质量(包括衔铁的质量); B 为黏性阻尼系数; A_0 为先导液桥输出压差的作用面积。

在同步调整的过程中,负载看作是确定不变的,同时忽略主阀本身的黏性摩擦系数,根据主阀阀芯的运动方程、控制腔及阀口前后压力腔的流量平衡方程,主阀稳态液动力线性化方程,可得到主阀的传递函数表达式为

$$G_v(s) = \frac{K_{qx} K_{qy}}{K_P \omega_v A_x} \frac{1}{1 + s/\omega_v} \quad (2)$$

式中: K_{qy} , K_{qx} 分别为先导阀和主阀的阀口流量增益; A_x 为主阀芯控制腔端面的面积; ω_v 为主阀的主导转折频率,反映先导液桥对主阀运动的速度负反馈。

已知臂架顶部滑轮组倍率为 1,根据图 3 传递关系可推导出液压变量马达和卷扬的传递函数为

$$G_m(s) = \eta_{mv} / V_m \quad (3)$$

$$G_h(s) = \pi R / 30i \quad (4)$$

式中: η_{mv} 为马达容积效率; V_m 为马达排量; R 为钢丝绳对主卷扬的转矩力臂,由于钢丝绳沿卷筒轴向缠绕的,可近似认为是不随主卷扬升降而变的常数; i 为卷扬减速机减速比。

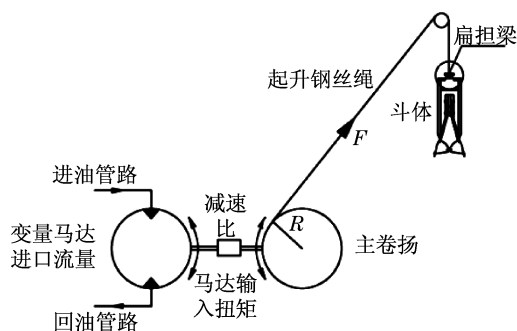


图 3 变量马达和主卷扬机构示意图

Fig.3 Mechanism schematic diagram

假设:两根钢丝绳的间距为 h , t_0 时刻斗体开始提升,扁担梁已存在 θ_0 的初始倾角,上升至 t_1 时

刻,斗体被提升到指定高度,扁担梁倾角为 θ_1 ,在这一提升过程中的任意时刻 t ,扁担梁顶部倾角传感器所检测出的水平倾角为 θ 。根据图 4 所示几何关系,可推导出扁担梁部分的传递函数为

$$G_g(s) = 1/h \quad (5)$$

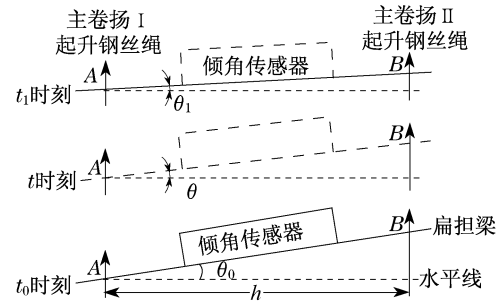


图 4 扁担梁倾角计算示意图

Fig.4 Calculation schematic diagram of inclination angle

所以系统从电信号输入至倾角输出之间的传递函数为

$$G(s) = G_p(s) G_v(s) G_m(s) G_h(s) G_g(s) = \frac{\pi R \eta_{mv} K_I K_{qx} K_{qy}}{30 i h V_m A_x} \frac{1}{(ms^2 + Bs - K_I + K_P A_0)(s + \omega_v)} \quad (6)$$

4 双主卷扬系统同步控制策略

目前常采用的液压同步控制方法主要有两种:一种是开环式的控制方法,即用分流集流阀、同步缸、同步马达等组成同步液压回路,其特点是原理简单、成本低,但精度也较低;第二种方法是用电液伺服阀或电液比例阀组成闭环控制系统,采用这种闭环控制方法时,同等方式和主从方式是通常采用的两种控制策略,采用这两种控制策略有望获得高精度的同步控制^[8]。由于该系统不对主卷扬 I 闭环控制,只要求主卷扬 II 同步跟随即可,所以采用的是主从控制指令,如图 5 所示。即通过可编程控制器(programmable logic controller, PLC)编程,只调整 2 个电液比例阀中的某一个的电流信号,通过液控回路,以调整马达转速,控制主卷扬动作,使一根钢丝绳跟踪另一根钢丝绳提升或者下降,最终使 2 根钢丝绳动作满足同步要求。

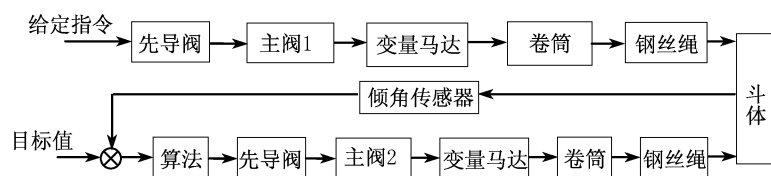


图 5 主从式同步控制原理图

Fig. 5 Schematic diagram with master-slave mode

5 自适应遗传算法与在线 PID 参数优化

5.1 基本原理

所谓在线 PID 参数整定,即在每个采样时间分别对 PID 参数进行整定.采用遗传算法在线整定 PID 参数,就是针对每个采样时间实现 PID 控制参数的遗传算法优化.在采样时刻 K ,选取足够多的个体,计算不同个体的自适应度,通过遗传算法的优化,选择自适应度大的个体所对应的 PID 控制参数作为该采样时间下的 PID 控制参数.

5.2 基本步骤

自适应在线遗传算法的基本步骤与传统的遗传算法基本相同,不同点在于它是在每个采样时间 t 都对参数进行遗传寻优.在采样时间 t 的具体计算步骤为:先对参数编码,按一定规模初始化一个种群,随机产生 N 个个体,种群中的每一个体代表一个可能的解;然后根据适应度值函数,计算每一个体的适应度值并依此控制再生操作,之后按一定的概率对种群进行交叉、变异操作;这样种群不断进化,直至寻优结束;在寻优结束之后,对优化的结果进行解码,使之表示成要求的结果.

5.3 自适应在线遗传算法整定 PID 参数的实现

5.3.1 初始群体的生成

目前常采用的编码方法主要是二进制编码和实数编码.基本遗传算法使用的二进制编码不能反映问题的结构,并且个体长度大,占用计算机内存多,难以提高精度;实数编码适用于表示范围较大的数值,便于较大空间的搜索,也便于设计专门的算法因子以处理较复杂的决策变量约束条件^[9].本文采用实数编码并随机生成种群规模为 120 的初始群体.若系统中有 M 个参数需要优化,以这 M 个参数为分量构成一个 M 维行向量,并将它作为个体的编码,即

$$Q = [q_1, q_2, \dots, q_M] \quad (7)$$

式中: Q 表示个体; q_i 表示在第 i 个参数的空间内随机产生的分量.

根据不同被控对象整定 PID 参数,可获得比较满意的控制效果.对有较大惯性或滞后的被控对象,比例、微分控制器能改善系统在调节过程中的动态特性.积分控制虽然改善了比例控制中残差的问题,却没有解决稳定性的问题.当调节好比例增益系数 K_p ,微分作用系数 K_d 后可再调节积分作用系数 K_i 的值, K_i 的值一般可取 $1/50$ 甚至更小,故采用本法调节时,没有对 K_i 调节也能使系统快速达到稳定^[10].设每个个体有 2 个分量 K_p, K_d ,按照多次实验的结果以及以前经验值取参数,取值范围为: $0.2 \leq K_p \leq 0.6, 0 \leq K_d \leq 0.001$.然后在这组参数的周围进行优化.

5.3.2 适应度函数的计算

为获取满意的过渡过程动态特性,并防止产生超调,采用误差绝对值、误差、误差变化率和误差的累积值的加权值作为第 k 个采样时间第 i 个个体的参数,选用 $J(i)$ 作为参数选取的最优指标

$$J(i) = \alpha_p |e(i)| + \beta_p |d(i)| \quad (8)$$

式中: $e(i)$ 为第 k 个采样时间第 i 个个体的位置跟踪误差; $d(i)$ 为第 k 个采样时间第 i 个个体的位置跟踪误差变化率; α_p, β_p 分别为误差和误差变化率的加权系数,一般取 $\alpha_p = 0.95, \beta_p = 0.05$.

为了避免超调,采用了惩罚功能,即一旦产生超调,将超调量作为最优指标的一项,此时最优指标为若 $e(i) < 0$,则 $J(i) = J(i) + 100 |e(i)|$ (9)

由此确定适应度函数为

$$F(i) = 1/J(i) \quad (10)$$

5.3.3 交叉、变异操作

选择交叉概率为 $p_c = 0.9$.本文采用自适应变异概率的方法,即自适应度越大,变异概率越小,变异概率为 $p_m = 0.2 - 0.01n/N, n = 1, 2, \dots, N$.

6 仿真结果及分析

将被控对象实例的系统参数代入式(6),得到被

控对象的传递函数近似为: $G(s) = 544\ 440 / (s^3 + 89.1s^2 + 10\ 680s)$. 根据以上给定的策略, 针对被控对象 $G(s)$, 设定采样时间为 0.01 s , 仿真时间为 0.8 s , 输入为阶跃信号, 分别应用自适应遗传算法和传统遗传算法编写优化程序进行仿真研究. 图 6 为系统在传统遗传 PID 控制下和自适应在线遗传 PID 控制下对阶跃信号的响应曲线. 可以看出, 两种控制算法的仿真曲线均未出现超调, 但是传统遗传 PID 控制时系统的调节时间大约需要 0.32 s , 自适应在线遗传 PID 控制时仅需要 0.1 s . 自适应在线遗传算法的稳定误差带也比传统的遗传算法的小, 而且其他指标都明显优于传统遗传算法的结果. 在用自适应在线遗传算法优化的曲线中, 明显有一个转折点, 这也充分说明了它的自适应性, 在开始阶段寻优速度很快, 响应速度也很快, 当接近理想值后寻优速度减慢, 响应速度也随之减慢. 由此可见, 自适应在线遗传 PID 控制算法在保证系统稳定性的同时, 获得了比传统遗传 PID 控制算法更快的响应速度, 更好的动态性能.

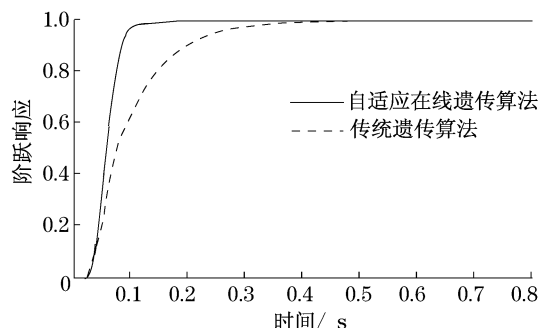


图 6 系统对阶跃信号的响应曲线
Fig.6 Step response of system

7 现场试验及结果分析

为测试以上控制算法和控制策略的实际效果, 在某国产新型双主卷扬连续墙抓斗设备上分别应用这两种算法进行了试验研究.

7.1 试验步骤

(1) 确保以上两种算法试验都在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的液压油温度条件下运行, 若液压油温度过低可通过进行抓土动作将液压油温度快速提升, 若液压油温度过高可停止任何动作并运转冷却风扇将液压油温度快速降低.

(2) 将发动机转速档位旋钮设定在 $1\ 600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 左右的转速档位.

(3) 操作工况切换按钮, 使设备运行在主工况 (双主卷扬同步工况) 下工作.

(4) 将控制起升先导油路的液压手柄扳到最大位置, 使抓斗向上提升运行.

(5) 同步采集从抓斗扁担梁倾角传感器上传来的数据.

7.2 试验结果及分析

分别用传统遗传 PID 控制算法与自适应在线遗传 PID 控制算法按以上步骤进行试验, 记录试验数据, 并绘制试验曲线. 传统遗传 PID 控制时扁担梁水平倾角的实测曲线分别如图 7 所示; 自适应在线遗传 PID 控制时扁担梁水平倾角的实测曲线如图 8 所示. 由图可见, 传统遗传 PID 算法能使扁担梁的水平倾角值 (反映双主卷扬同步误差) 基本保持在 $\pm 0.6^{\circ}$ 以内, 自适应在线遗传 PID 算法则可保持在 $\pm 0.35^{\circ}$ 以内; 系统稳定后, 前者基本保持在 $\pm 0.35^{\circ}$ 以内, 后者则可保持在 $\pm 0.15^{\circ}$ 以内, 同时后者也较前者快速地进入稳定阶段, 这也充分说明了自适应在线遗传 PID 算法具有较快的响应速度, 克服了传统遗传算法在 PID 寻优时存在的早熟收敛和收敛速度慢的缺陷, 具有较好的实时性. 亦即, 自适应在线遗传 PID 算法较传统遗传 PID 算法的控制效果好, 静差小, 振荡也小. 由此可见, 本文所提出的同步方式具有较高的同步精度, 良好的动态跟踪性能, 优良的鲁棒性和有效抑制外界干扰的能力, 完全适合连续墙抓斗双主卷扬同步系统.

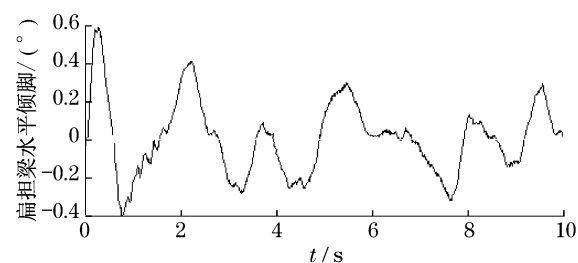


图 7 传统遗传 PID 控制下同步误差曲线
Fig.7 Synchronization error curve with GA PID

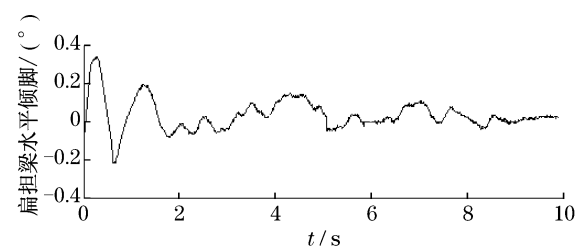


图 8 自适应在线遗传 PID 控制下同步误差曲线
Fig.8 Synchronization error curve with adaptive GA PID

8 结论

(1) 设计要求同步控制精度为 $\pm 3^\circ$, 在自适应在线遗传 PID 控制下系统实测同步误差曲线控制精度为 $\pm 0.35^\circ$, 稳定后可达 $\pm 0.15^\circ$, 较好地满足了设计要求.

(2) 理论分析和实验证明, 自适应在线遗传算法克服了传统遗传算法早熟收敛和收敛速度慢的缺陷, 寻优速度快, 响应速度快, 具有更好的控制品质, 更佳的控制效果, 完全适合应用于实时控制要求高的场合.

(3) 采用主从式遗传 PID 同步控制策略能较好地实现双主卷扬系统的同步协调运动, 具有较高的同步精度, 良好的动态跟踪性能, 优良的鲁棒性和有效抑制外界干扰的能力, 完全适合连续墙抓斗双主卷扬同步系统, 能够较好地满足连续墙抓斗的同步作业要求.

(4) 传统遗传算法离线整定的 PID 控制器参数的方法不利于控制器有效跟踪连续墙抓斗的负载条件, 对工况变化不具备自适应能力. 为此, 本文提出的基于自适应遗传算法的在线 PID 控制方法具有现实意义.

参考文献:

- [1] 杨智, 朱海峰, 黄以华. PID 控制器设计与参数整定方法综述[J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(5): 1.
YANG Zhi, ZHU Haifeng, HUANG Yihua. Recent studies of PID design and parameter tuning method [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 32(5): 1.
- [2] Goldberg D E. Genetic algorithm in search, optimization and machine learning[M]. Reading; Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989.
- [3] 任子武, 伞冶. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 41.
REN Ziwu, SAN Ye. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 41.
- [4] 嘉红霞, 李万莉. 地下连续墙抓斗液压控制系统设计与分析[J]. 机床与液压, 2010, 38(8): 42.
JIA Hongxia, LI Wanli. Studies and design on hydraulic control system of underground diaphragm wall grab[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(8): 42.
- [5] 嘉红霞, 李万莉, 余浩杰. 地下连续墙液压抓斗纠偏系统动态分析与建模[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(10): 1393.
JIA Hongxia, LI Wanli, YU Haojie. Dynamic analysis and model of underground diaphragm wall hydraulic grab control system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(10): 1393.
- [6] 游张平, 来磊, 李万莉. 基于 CAN 总线的连续墙抓斗起重机安全报警系统设计[J]. 中国工程机械学报, 2009(2): 171.
YOU Zhangping, LAI Lei, LI Wanli. Safety alarm system design for diaphragm-wall grab based on CAN bus[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009(2): 171.
- [7] 刘克平, 史鹏飞, 李丙林, 等. 自适应遗传 PID 控制算法在球杆系统中的应用[J]. 自动测量与控制, 2008, 27(7): 54.
LIU Keping, SHI Pengfei, LI Binglin, et al. Application of adaptive genetic PID algorithm in ball & beam system [J]. Automatic Measurement and Control, 2008, 27(7): 54.
- [8] 徐鸣谦, 郗科, 萧子渊, 等. 双缸液压电梯的同步控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1999, 27(5): 545.
XU Mingqian, LI Ke, XIAO Ziyuan, et al. Synchronization control of a twinplunger hydraulic elevator [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1999, 27(5): 545.
- [9] 路甬祥, 胡大统. 电液比例控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
LU Yongxiang, HU Dahong. Electro-hydraulic proportional control technique[M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [10] ZHOU Donghua, WEI Henghua. The application of floating encode genetic algorithms in finding optimal multivariable[C] // Proc 4th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA2002). Shanghai: IEEE Press, 2002: 1324 - 1327.