

磨机负荷专家控制系统设计及仿真研究

贺晓巧, 王建民, 赵 晔

(河北联合大学 电气工程学院, 河北 唐山 063000)

摘要: 磨矿过程的大滞后和时变等特点, 致使对磨机负荷的最佳工作点很难进行稳定、高效的控制, 针对以上情况, 借鉴生物界的免疫反馈原理和遗传算法, 利用模糊控制可以有效地实现对非线性、纯滞后、复杂的对象进行控制的优点, 并结合 PID 与自寻优方法, 设计出磨机负荷专家控制系统, 用 VB 编写 OPC 客户端及控制程序, 实现对磨机负荷的动态优化控制; 试验结果表明, 文章提出的控制策略能够增强系统的稳定性, 且在干扰存在的情况下也能很好的跟随系统的参数变化, 在提高磨机台时产量的同时增加了矿厂的经济效益。

关键词: 专家控制; 模糊免疫; 遗传算法; 变步长自寻优; 磨机负荷; OPC

Mill Load Expert Control System Design and Simulation Research

He Xiaoqiao, Wang Jianmin, Zhao Ye

(College of Electrical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063000, China)

Abstract: The characteristics of big lag and time-varying in grinding process make it hard to stably and efficiently control for the best working point of mill load, in view of the above situation, learn from the immune feedback principle of biological and genetic algorithm, using the advantages of fuzzy control can effectively achieve control effect to the nonlinear, time delay, and complex object, combined with PID and self-optimizing method to design mill load expert control system, using VB to write OPC client and the control program to realize the dynamic optimization control of the mill load. Test results show that the proposed control strategy can enhance the stability of the system, and can also follow the parameters changes of the system well in the presence of interference, and increase the yield of the mill as the same time as improving the economic efficiency of the mines.

Keywords: expert control; fuzzy immune; genetic algorithm; variable step size self-optimizing; mill load; OPC

0 引言

磨矿过程是整个选矿工序的核心且磨机运行过程非常复杂, 在磨矿过程中, 由于存在众多参数且这些参数极易发生变化, 加之球磨机的模型难以建立, 致使磨矿过程具有大惯性、强滞后、负荷最佳点易漂移等特点。目前国内的磨机负荷控制系统通常采用传统的 PID 控制, 其往往不能获得很好的控制效果。而在矿厂实际运行过程中, 常常通过操作者的经验对磨机负荷进行控制, 显然这种控制方式需要耗费大量的人力资源, 而且磨机经常会发生“空磨”、“饱磨”或“堵磨”等现象, 无形间增加了矿厂的耗电量且导致矿厂生产效率低下。鉴于以上问题, 如能实现对磨机负荷进行优化控制且使负荷稳定在最佳状态, 其对矿厂的经济和磨机安全运行有着十分重要的意义^[1-2], 同时也达到了节能降耗的目的。本文设计了一种新型磨机负荷控制器, 用免疫算法提高控制系统的抗干扰能力, 用遗传算法优化模糊控制器, 实现对 PID 参数的优化调整; 采用变步长自寻优控制, 实现对磨机负荷的实时控制, 在保证系统稳定运行的前提下提高球磨机的工作效率。

1 球磨机运行特性

球磨机的运行特性曲线如图 1 所示, 其中 P 代表磨机的

功率特性曲线, F 为磨机出力特性曲线, S 为磨机磨音特性曲线。从图中可以直接看出三者与磨机负荷的关系。通过有机划分, 可以将图 1 划分为 3 个部分: (I) P 上升, S 下降, F 增加。此时磨机耗电大但出力小, 不是最佳控制区; (II) P 下降, S 减小并趋于稳定, F 增大且达到最大出力点。当 F 达到最大点之后 S 信号基本保持不变^[3], 且此时磨机耗电不大, 则此区域为最佳控制区; (III) P 和 F 均呈下降趋势, 此区域已达“饱磨”状态, 应该避免。

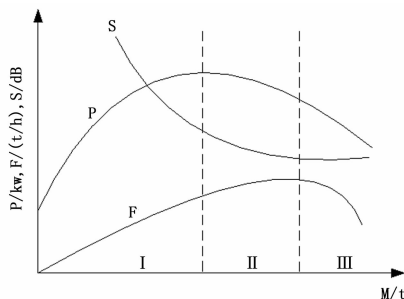


图 1 球磨机运行特性曲线

2 基于模糊免疫自寻优的磨机负荷专家控制系统

2.1 专家控制系统体系结构

磨机负荷专家控制系统主要由人机交互界面、知识库、推理机、数据库和自寻优控制器等部分构成, 其体系结构如图 2 所示。

系统用 VB 设计人机交互界面, 通过级联菜单实现对个参数的设置并实现用户与系统的交互。知识库中存放系统对象的

收稿日期: 2014-06-18; 修回日期: 2014-07-14。

作者简介: 贺晓巧(1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事复杂系统建模分析与控制方向的研究。

王建民(1958-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事计算机控制技术方向的研究。

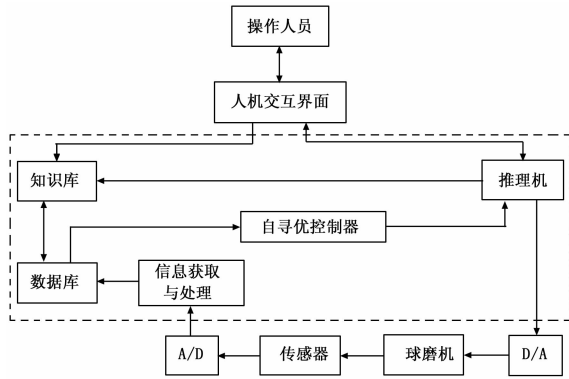


图 2 专家控制系统体系结构图

量, 论域为 $[-10, 10]$, 模糊子集设置为 $\{N, Z, P\}$, 分别表示负、零、正 3 个等级; 输出量为给矿量的搜索步长, 论域设置为 $[-2, 2]$, 模糊子集设置为 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$, 分别表示负大、负小、零、正小、正大 5 个等级, 输入量和输出量的隶属度函数均采用三角函数。自寻优控制器结构图如图 3 所示。

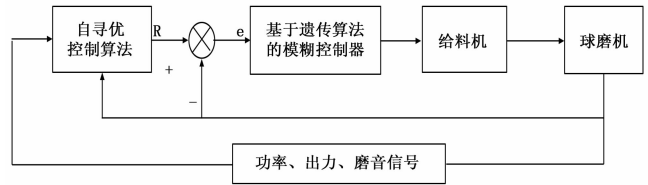


图 3 自寻优控制器结构图

有关知识、控制规则、控制系统的性能指标等知识, 这些知识采用生产式规则表示; 推理机运用正向推理法并从知识库中选择有关知识对专家控制提供的算法及系统评定指标进行推理, 最终得出相应的最佳控制决策; 数据库用来存放系统运行过程中的详细实时参数及系统推理过程中用到的数据、中间结果与处理的数据^[4]; 自寻优控制器中包含变步长自寻优控制算法和模糊免疫 PID 控制算法量部分, 实现对动态磨机负荷的最佳控制。

2.2 自寻优控制算法设计

由于系统运行过程中各参数极易变化且不易控制, 加之磨机运行过程复杂, 致使磨机负荷的最佳点不断漂移。鉴于这种情况, 采用变步长自寻优算法, 使系统能够在磨机负荷不断漂移的情况下自动寻找到最佳负荷点。普通自寻优控制策略的原理^[5]即: 假设某时刻的当前负荷值为 L_1 , 对应时刻的磨机出力为 F_1 , 当负荷值增加一个步长 ΔL 即磨机负荷变为 $L_1 + \Delta L$ 时, 记录此时的磨机出力值, 记为 F_2 , 若 $F_2 - F_1 > 0$ 则证明在负荷增加的同时磨机出力也随之增加, 负荷调节方向正确; 否则调节方向错误。这种寻优方式的弊端在于其负荷的调节步长为一个固定值, 如果调节步长太小则导致系统收敛速度较慢, 不能快速的找到系统最佳工作点; 如果调节步长太大, 则会增大搜索损失, 使效益受损^[6]。

鉴于以上问题, 本文提出一种新的寻优策略, 即模糊变步长自寻优算法。此算法将磨机的功率信号、磨音信号和出力信号进行融合, 并运用模糊控制算法对负荷调节步长进行动态调节, 以减少搜索损失。结合磨机的工作特性曲线, 可将模糊变步长自寻优算法的原理描述为 (K_p, K_f, K_s 分别代表功率、出力和磨音曲线的斜率): 1) $K_p > 0, K_f > 0, K_s < 0$ 三者同时满足时采用较大步长进行寻优, 以达到快速找出最佳工作点, 此状态下的系统处于图 1 中的 (I) 区; 2) 当 $K_p < 0, K_f > 0, K_s < 0$ 三者同时满足时采用较小步长进行寻优, 以免由于步长太大给系统带来寻优损失, 此状态下的系统处于图 1 中的 (II) 区前侧; 3) 当 $K_p < 0, K_f > 0, K_s \approx 0$ 三者同时满足时采用零步长来维持系统此时的运行状态, 此状态下的系统处于图 1 中的 (II) 区后侧; 4) 当 $K_p < 0, K_f < 0, K_s \approx 0$ 三者同时满足时采用负步长, 使球磨机恢复到理想的运行状态, 此状态下的系统处于图 1 中的 (III) 区。

由实际生产实践经验得知, 将给矿量的搜索步长范围设定为每小时 $-2 \sim +2$ 吨, 三种曲线的斜率变化范围为 $-10 \sim +10$, 将磨音、出力和电流曲线的斜率作为模糊控制器的输入

2.3 模糊免疫控制算法设计

2.3.1 生物界免疫反馈机理

免疫系统是生物界独特的生理反应。当有病菌或抗原入侵机体时, 免疫系统会及时产生抗体来抵抗外来群体, 抗原与抗体有效结合, 可以将抗原吞噬或破坏掉^[7]。免疫应答方式分为两种: 一种是体液免疫应答, 另一种是细胞免疫应答^[8]。免疫反馈机理可以描述为: 抗原经呈递细胞 (APC) 的消化, 先激活 T_H 细胞, 同时释放淋巴因子, 而后激活 B 细胞, B 细胞接收到信号后产生抗体。在抗原较多的情况下, 有少量的 T_S 细胞被活化, T_S 细胞的作用是对 T_H 和 B 细胞产生一定的抑制作用; 在抗原较少的情况下, 将活化较多的 T_S 细胞, 以保证免疫系统的稳定性^[9]。体液免疫机理示意图如图 4 所示。

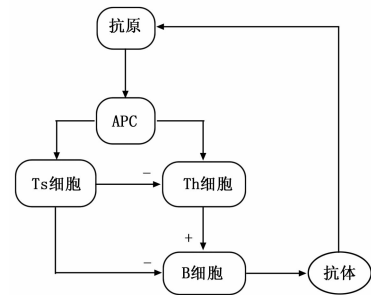


图 4 体液免疫机理响应过程

2.3.2 免疫 PID 控制策略

借鉴免疫反馈机理, 将其融入 PID 控制, 设计出一种模糊免疫 PID 控制器, 以增强被控对象的抗干扰能力。假设第 k 代抗原的数量为 $\delta(k)$, 而由抗原刺激的 T_H 细胞的输出为 $T_H(k)$, T_S 细胞对 B 细胞的影响为 $T_S(k)$, 则可以得出 B 细胞所承受的总刺激为:

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k) = k_1 \delta(k) - k_2 f[S(k), \Delta S(k)] \delta(k) \quad (1)$$

其中: $k_1 > 0$ 为刺激因子; $k_2 < 0$ 为抑制因子。 $f(\cdot)$ 为一个非线性函数, 称作抗体抑制调节函数^[9], 反应细胞抑制刺激能力大小。

常规的增量式 PID 控制器的离散形式为:

$$u(k) = u(k-1) + K_p(e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (2)$$

表 1 模糊控制规则表

$\Delta K_i/\Delta K_d$		e						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ec	NB	NB/PS	NM/PS	NM/ZE	NM/ZE	NM/ZE	NS/PB	NS/PB
	NM	NM/NS	NM/NS	NM/NS	NM/ZE	NS/ZE	ZE/PS	ZE/PS
	NS	NM/NB	NM/NB	NS/NM	NS/NS	ZE/ZE	PS/PS	PS/PS
	ZE	NM/NB	NS/NM	ZE/NM	ZE/NS	PS/ZE	PS/PS	PM/PM
	PS	NS/NB	NS/NM	ZE/NM	PS/NS	PS/ZE	PM/PS	PM/PS
	PM	ZE/NM	ZE/NM	PS/NS	PS/NS	PM/ZE	PM/PS	PM/PM
	PB	ZE/PS	ZE/PS	PS/ZE	PS/ZE	PM/ZE	PM/PM	PB/PB

式 (2) 中 K_P, K_I, K_D 分别为 PID 控制算法的比例、积分和微分系数。如果将第 k 代抗原的数量 $\delta(k)$ 看做系统偏差 $e(k)$, 将 B 细胞承受的总刺激 $S(k)$ 看做控制的输入量 $u(k)$, 那么 $\Delta S(k) = \Delta u(k)$, 则反馈规律又可描述为 (即将 (1) 式中的 $S(k)$ 替换为 $u(k)$, 将 $\delta(k)$ 替换为 $e(k)$):

$$u(k) = k_1 e(k) - k_2 f[u(k), \Delta u(k)] e(k) = K(1 - \lambda f(u(k), \Delta u(k))) e(k) \quad (3)$$

式 (3) 中, $K_{p1} = K(1 - \lambda f(u(k), \Delta u(k)))$; $K = k_1$; $\lambda = k_2/k_1$ 。如果 k_1 增大, 则系统的响应速度增大; λ 增大则系统的超调量将相应减小, 系统的稳定性相对较好。可以看出, 由于 $f(\cdot)$ 的存在, 基于免疫调节的控制器相当于一个非线性 P 控制器, 比例系数 K_{p1} 会随控制器输出的变化而变化, 因此可以应用该原理来调节 PID 控制器的比例系数, 增强系统的适应能力。

对于非线性函数 $f(\cdot)$, 应用模糊控制理论对其进行逼近。模糊控制器的输入量为 $u(k)$ 和 $\Delta u(k)$, 输出量为 T 细胞的抑制函数 $f(\cdot)$ 。输入量的模糊子集为负和正, 用 $\{N, P\}$ 表示, 采用 S 形函数作为隶属度函数; 输出量的模糊子集为正、零、负, 用 $\{N, Z, P\}$ 表示。隶属度函数采用 S 形函数和三角函数的组合。其控制规则由如下定义:

- IF $u(k)$ is N and $\Delta u(k)$ is N, Then $f(u(k), \Delta u(k))$ is P;
- IF $u(k)$ is N and $\Delta u(k)$ is P, Then $f(u(k), \Delta u(k))$ is Z;
- IF $u(k)$ is P and $\Delta u(k)$ is N, Then $f(u(k), \Delta u(k))$ is Z;
- IF $u(k)$ is P and $\Delta u(k)$ is P, Then $f(u(k), \Delta u(k))$ is N;

2.3.3 模糊控制器的设计

以喂料量的偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入量, 输出量为 PID 的积分和微分常数的变化量, 即 ΔK_i 和 ΔK_d , 再通过公示 $K_i = K'_i + \Delta K_i, K_d = K'_d + \Delta K_d$ 求出 PID 的积分和微分常数^[10]。其中 K'_i, K'_d 为前一次采样时刻的参数值, $\Delta K_i, \Delta K_d$ 为各参数的整定值, K_i, K_d 为下一次采样的 PID 参数值。

输入量和输出量论域量化等级范围均为 $[-6, 6]$, 模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, 隶属度函数采用三角形函数。对于每个参数的整定, 都有 49 条模糊控制规则并采用“IF A and B, then C”的形式。对 49 条模糊关系 R_i 进行求并运算得到总的模糊关系 R , 然后利用合成运算求出输出量的模糊量, 最后用加权平均法求出其精确量。 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊控制规则表如下所示。

2.3.4 遗传算法对模糊控制器的优化

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化算法, 选择、交叉和变异是该算法的

核心操作^[11]。通过遗传算法对模糊控制器的隶属度函数和模糊控制规则进行优化, 可以有效地抑制系统超调且能提高系统的抗干扰能力。本文选用十进制的编码方式, 用三角函数作为隶属度函数, 实际编码中取三角形底边的一半作为待优化参数, 对其进行编码; 选取匹兹堡方法对模糊控制规则进行编码。约定以 1~7 七个数字分别代表语言变量 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 的值。按照以上规定, 将表 1 的控制规则写成一维数组的形式为:

$$\Delta K_i: 1222233 \quad 2222344 \quad 2233455 \quad 2344556 \quad 3345566$$

$$4455666 \quad 4455667$$

$$\Delta K_d: 5544477 \quad 3334455 \quad 1123455 \quad 1223456 \quad 1223455$$

$$2233456 \quad 5544467$$

本设计中, 系统的优化目标函数选为 $I = \int_0^{+\infty} e^2(t) dt$, 其中 $e(t)$ 为系统误差; 取 $J = 1/(I + \alpha)$ 作为适应度函数, 其中 α 为大于零的常数, 引入 α 是为了避免适应度函数分母趋近于零时出现溢出的情况。对于群体中适应度高的个体, 用轮赌法对其进行复制操作, 适应度低的个体直接淘汰。以 $P_c = 0.85$ 的概率对编码进行交叉操作, 以 $P_m = 0.01$ 的概率对编码进行变异操作, 增强系统的搜索和适应能力。

基于遗传算法的模糊免疫 PID 结构图如图 5 所示。

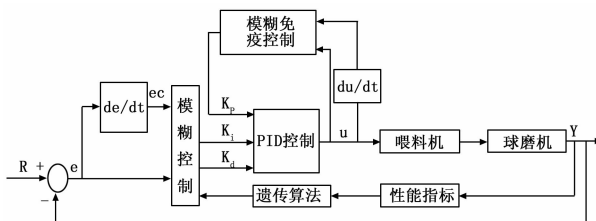


图 5 基于遗传算法的模糊免疫 PID 结构图

3 磨机负荷专家控制系统的软硬件环境及仿真分析

3.1 系统的软硬件环境

以承德某选矿厂为背景, 采用 DCS 集散控制系统, S7-300PLC 构成主站, 计算机完成对现场设备的显示与操作, 控制器采用 CPU315-2PN/DP, 现场 IO 采用 ET200 分布式, 并预留 10% 的扩展 ET200 实现后续中细碎控制系统, 所有 IO 站都是通过 PROFIBUS-DP 现场总线与主控制器相连接, 系统采用工业以太网通信协议实现上位机与下位机的实时通讯。工控 PC 与 PLC 之间通过 RS485 进行通讯, 并用 WINCC 作为组态软件, 用 VB 编写 OPC 客户端^[12], 用 WINCC 作为 OPC 的

(下转第 156 页)

参考文献:

[1] 高 晖, 陈 欣, 夏云程. 无人机航路规划研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33 (2): 135 - 138.

[2] 王景杰, 吴文启, 梁朝阳等. 无人飞行器航迹规划评价方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (8): 2237 - 2241.

[3] 安玉娇, 江辉军, 郑根营, 马 煜. 无人机低空突防航迹规划算法研究 [J]. 测控技术, 2011, 30 (12): 86 - 90.

[4] 王绪芝, 姚 敏, 赵 敏, 胡中华. 基于蚁群算法的无人机航迹规划及其动态仿真 [J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34 (1): 29 - 32.

[5] Alex Y, Sanjiv S, Anthony S. An efficient online path planner for outdoor mobile robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 32: 129 - 143.

[6] 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[7] 罗 建. 基于 Lyapunov 导航向量场的无人机协同跟踪地面目标 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2012, 51 (4): 406 - 413.

[8] 李文超, 袁冬莉. 基于机动目标模型的无人机视场跟踪仿真研究

[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (2): 402 - 404.

[9] 张得舒, 黄长强, 丁达理等. 基于 A* 算法的无人机攻击轨迹解算 [J]. 电光与控制, 2011, 18 (3): 18 - 20.

[10] 何平川, 戴树岭. 一种改进的 UAV 三维航迹实时规划算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36 (10): 1248 - 1251.

[11] 王庆江, 高晓光, 符小卫. 无威胁情况下任意两点间的无人机路径规划 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31 (9): 2157 - 2162.

[12] 赵真明, 孟正大. 基于加权 A* 算法的服务型机器人路径规划 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2008 (36): 196 - 198.

[13] Hennebray Michae, Jian Kuod, Nygard Kendall. Dynamic network refinement in automated aircraft route planning [A]. IEEE IT 2007 Proceedings [C]. Chicago: IEEE, 2007: 373 - 377.

[14] 冯乃勤, 王岁花, 郑延斌. OPE 表和 CLOSED 表的合一 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 16: 100 - 102.

[15] 张大巧, 鲜 勇, 许立军, 王 剑. 基于改进 A* 的三维航迹快速规划方法 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30 (5): 59 - 62.

(上接第 122 页)

服务器, 底层设备的数据通过 OPC 通道传输到 OPC 客户端, 并在 VB 中编写磨机负荷控制算法, 最后将得到的控制数据再由 OPC 通道逐级传给底层设备, 同时在 VB 客户端中可以实现对各个参数的设定和报警功能, 达到对磨机负荷的优化控制效果。

3.2 仿真分析

对本文设计的控制策略用 Matlab/Simulink 进行了仿真研究, 用二阶时滞系统代替磨机负荷模型, 其传递函数为: $G(s) = \frac{e^{-50s}}{700s^2 + 80s + 1}$, 采用单位阶跃信号作为输入, 并在某一时刻随机加入干扰信号, 仿真结果如图 6 所示。由图可知, 模糊免疫 PID 控制器的调节作用比传统 PID 控制效果要好很多, 其能够使系统有较快的调节速度、较小的系统超调, 且在加入干扰后模糊免疫 PID 控制器能够使系统快速的达到稳定状态。

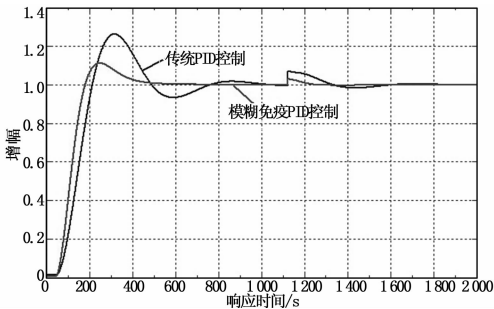


图 6 仿真效果图

4 结语

针对矿厂磨机负荷不易控制的问题, 设计并实现了磨机负荷模糊免疫 PID 自寻优专家控制系统, 用 VB 编写 OPC 客户端及控制程序, 实现对磨机负荷的优化计算与自动控制。仿真实验表明此控制系统较传统的 PID 控制有较好的控制效果,

增强了系统的抗干扰能力。通过在实际矿场一段时间的试运行, 表明本控制器能够降低矿场消耗, 使矿场的经济效益提高了 3%, 且在保证系统安全稳定运行的情况下大大降低了工作人员的劳动强度。

参考文献:

[1] 于仲安, 刘 颖. 基于 PLC 的磨矿分级监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (45): 838 - 840.

[2] 汤 健, 赵立杰, 岳 恒, 等. 磨机负荷检测方法研究综述 [J]. 控制工程, 2010, 17 (5): 565 - 57.

[3] 刘月丹. 钢球磨机机制粉系统的优化控制算法研究及实现 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

[4] 王耀南, 孙 炜, 等. 智能控制理论及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[5] 马祥兴. 自寻优自调整模糊 PID 控制器的设计与仿真 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (4): 216 - 220.

[6] 曹 晖, 司刚全, 张彦斌, 等. 基于 ANFIS 的自寻优算法在磨机机制粉系统中的应用 [A]. 中国仪器仪表学会第九届青年学术会议论文集 [C]. 2007, 10: 149 - 152.

[7] 张卫东. 基于改进模糊免疫 PID 控制的网络控制系统 [D]. 海南: 海南大学, 2012.

[8] 丁曙光, 束鹏程, 桂贵生. 基于免疫 PID 控制的速度伺服系统的仿真研究 [J]. 机械设计与制造, 2012 (11): 112 - 114.

[9] 文定都. 基于模糊免疫 PID 的电加热炉温度控制系统 [J]. 冶金自动化, 2007 (6): 43 - 46.

[10] 宋乐鹏, 刘 斌, 陈红芬, 吴慧民. 基于 Bang-Bang 模糊自适应 PID 的干燥窑温度控制 [J]. 计算机与应用化学, 2012, 29 (7): 881 - 884.

[11] 张 巍, 卢宇清. 基于在线自适应遗传算法的 PID 参数整定和优化 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (12): 154 - 157.

[12] 邹孝付, 马小平, 焦晓宁. OPC 在煤矿生产中的应用研究 [J]. 工况自动化, 2010, 8 (8): 117 - 120.