

蚁群算法 PID 控制器在磨机给矿控制中的应用

杨志刚, 李艳姣, 张杰

(河北联合大学 电气工程学院, 河北 唐山 063009)

摘要: 磨矿过程是选矿生产中的关键环节, 而其中磨机负荷是磨矿过程的一个重要参数, 它与生产效率和能源消耗有密切的关系; 针对选矿厂球磨机运行过程具有非线性、大滞后性和时变性的特点, 常规 PID 控制难以得到预期的控制效果; 蚁群算法是一种新兴的仿生优化算法, 具有较强的鲁棒性和良好的分布式计算机制, 易于与 PID 方法相结合; 因此提出了一种基于蚁群算法的 PID 参数优化的控制算法, 实现对球磨机给矿的稳定控制, 优化后的控制器与传统 PID 控制相比, 有较好的动态和静态性能; 仿真应用结果表明, 该方法的实用性和有效性, 超调量减少近 50%, 能够使磨机的给矿控制更加稳定。

关键词: 蚁群算法; 磨机给矿控制; PID; 参数优化

Application of PID Controller Based on Ant Colony Algorithm in Grinding Mill Feed Control

Yang Zhigang, Li Yanjiao, Zhang Jie

(College of Electrical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract: Grinding is the key link in the production of mineral processing, and mill load is an important parameter in the process of grinding, it is closely related to production efficiency and energy consumption. According to the characteristics of ball process with nonlinear, larger time-delay and time-varying, conventional PID control is difficult to obtain the expected control effect. Ant colony algorithm is a new bionic optimization algorithm, has strong robustness and good mechanism of distributed computing, easy to be combined with PID method. So this article puts forward PID parameter optimization based on ant colony algorithm, realize the stable control of ball mill for ore, the optimized control compared with traditional PID control, has better dynamic and static performance. Simulation results show that the method is practical and effective.

Key words: ant colony algorithm; mill feed control; PID; parameter optimization

0 引言

选矿生产过程中, 磨矿作业是整个选矿厂的最关键环节, 而磨机负荷是磨矿分级作业的一个重要参数。磨机负荷控制的目的是当物料易磨性、粒度和球磨机参数发生变化时, 能够始终保证磨机的产量最高, 并使磨机稳定运行, 防止磨机出现“闷磨”或“空磨”状态^[1]。能否准确地控制磨机负荷是整个磨矿过程优化控制的关键。由于磨矿过程具有大滞后性、时变性和大惯性等特点, 常规的 PID 控制器很难满足控制要求。在传统的生产工艺中, 都是由操作人员来控制磨机负荷, 他们凭借日常积累的经验, 用人耳来判断磨机磨音的高低, 再由人工调整磨机的给矿量, 来间接的控制磨机负荷的状态, 这样调节的往往不及时也不准确^[2]。为了提高磨矿产品质量, 有必要研究智能 PID 磨机给矿系统, 来满足磨机负荷的控制要求。

针对磨矿过程的实际工艺, 本文提出了一种基于蚁群算法的不完全微分 PID 控制器的设计方法, 利用蚁群算法全局优化 PID 控制器的参数, 实现稳定给矿。实验仿真结果表明该方法的科学性和合理性。

1 磨机给矿量控制策略的分析与设计

根据磨矿分级给矿过程特性和控制目标的分析, 本文设计了串级给矿控制系统, 控制原理图如图 1 所示。主回路采用模糊控制实现给矿量的设定, 副回路采用蚁群算法优化的 PID 控制器实现稳定给矿。首先将磨机电流经模糊运算后, 得出给矿量的最优设定值; 确定了给矿量设定值之后, 采用闭环控制给矿, 以保证磨机能够稳定运行, 提高磨矿效率。由皮带秤检测实际的给矿量, 然后根据给矿控制算法, 通过改变给矿机的变频器的频率, 来实现磨机给矿量按设定值变化^[3-4]。本文主要介绍磨机给矿控制算法, 即蚁群算法优化 PID 控制器算法。

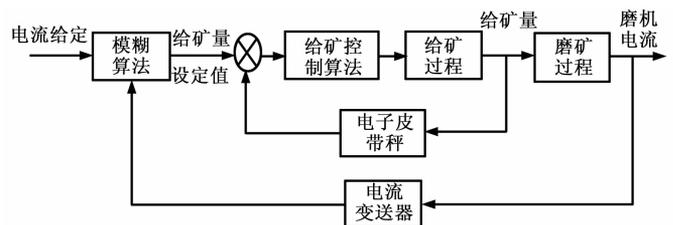


图 1 控制系统原理图

2 蚁群算法基本原理

根据蚂蚁“寻找食物”的群体行为, 意大利科学家 Dorigo M 等在 20 世纪初提出了蚁群算法的基本模型, 随后又进一步

收稿日期: 2014 - 01 - 06; 修回日期: 2014 - 03 - 06。

作者简介: 杨志刚(1977 -), 男, 河北唐山人, 讲师, 主要从事检测与控制技术及智能装置方向的研究。

阐述了蚁群算法的核心思想。蚁群算法是一种模拟蚂蚁群体智能行为的仿生优化算法, 采用正反馈并行自催化机制, 具有较强的鲁棒性、优良的分分布式计算机制、容易和其他方法相结合的特点, 用来解决许多复杂的组合优化问题^[5-6]。

蚁群算法已成功的应用在旅行商问题 (Travelling Salesman Problem, TSP) 中, 以它为例简述一下蚁群算法的基本原理。旅行商问题的简单形象描述为: 给定 n 个城市, 找出一条最短封闭的巡回路径使之满足旅行商访问每个城市仅一次且仅有一次后在返回到原来的出发城市^[7]。用蚂蚁代替旅行商来完成任任务, 设 m 为蚂蚁的总数量, $b_i(t)$ 表示为 t 时刻位于城市 i 的蚂蚁数量, $d_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 表示两城市之间的距离, 则

$$m = \sum_{i=1}^n b_i(t) \quad (1)$$

在搜索过程中, 蚂蚁根据各条路径上的信息量和路径的启发信息来计算状态转移概率。 $p_{ij}^k(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 由城市 i 到城市 j 的状态转移概率

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta}, & \text{若 } j \in allowed_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻在城市路径上残留的信息素; α 为信息启发式因子, 其值越大, 则该蚂蚁越倾向于选择其他蚂蚁经过的路径, 蚂蚁之间的协作性越强; β 为期望启发式因子, 其值越大, 则该状态转移概率越接近于贪心规则; η_{ij} 表示启发函数, 一般表达式为 $\eta_{ij}(t) = 1/d_{ij}$ 。与自然界中的蚁群不同, 人工蚁群具有记忆功能, $tabu_k(k = 1, 2, \dots, m)$ 表示蚂蚁已走过的城市, 旧的信息素会随着时间的推移逐渐淡化, 用 ρ 表示信息素挥发系数, 蚂蚁遍历 n 个城市 (即一个循环结束) 后, 各路径上的信息量按式 (3) 进行调整

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (4)$$

通常采用 Ant-Cycle 模型, 在 Ant-Cycle 模型中,

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Delta\tau_{ij}^k$ 表示蚂蚁 k 在本次循环中留在 (i, j) 的信息量; $\Delta\tau_{ij}$ 表示本次循环中留在 (i, j) 的信息量的增量; Q 表示信息素的强度; L_k 表示蚂蚁 k 在本次循环中所走路程的总长度。

经过不断的循环, 直到旅行计数器达到最大的循环次数或算法收敛, 最终使得所有蚂蚁都选择同一条路径, 这条路径就被认为是最短的旅行路径。

3 基于蚁群算法的 PID 控制器参数的优化

任何 PID 控制器性能的好坏主要依赖于以控制参数的优化, 传统的整定方法有 Ziegler-Nichols (Z-N) 法、临界比例度法、衰减曲线法等, 但他们都有一定的局限性, 像磨矿过程这样非线性特点的对象, 就显得无能为力了, 因此本文采用蚁群算法来优化 PID 控制器的 3 个参数, 使之达到良好的整定效果。基于蚁群算法的 PID 控制器参数优化的基本思想为将 PID 控制器的 3 个参数组合在一起作为蚁群中的一只蚂蚁, 每一只蚂蚁在搜索空间内根据其他蚂蚁释放的信息素, 来调节路径, 不断的向目标函数逼近, 最终寻找到最优路径, 最优路径

就为 PID 控制器的最优参数^[8]。

3.1 蚁群算法优化 PID 控制器结构

蚁群算法 PID 控制器由蚁群算法参数寻优和不完全微分 PID 控制器两部分组成。蚁群算法在每一采样时刻根据输入量 r 与输出量 y 的偏差 $e = r - y$ 来寻找最佳的 PID 控制器参数, 即比例放大系数 K_p , 积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d 。不完全微分 PID 控制器用来计算每一个采样周期的偏差量, 从而得出控制器的输出量^[9]。基于蚁群算法优化 PID 控制参数的结构图如图 2 所示。

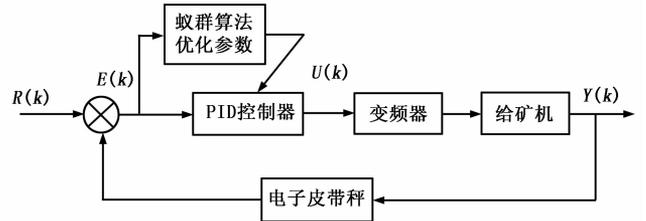


图 2 基于蚁群算法优化 PID 控制器的结构图

3.2 不完全微分 PID 控制器

一般来说, 引入微分控制会提高系统的动态性能, 但会使系统的输出对干扰非常敏感, 为了克服阶跃扰动对磨机给矿的影响, 在常规 PID 控制器中加入一个一阶惯性环节, 这样的微分控制称之为不完全微分控制^[10]。不完全微分 PID 控制器的传递函数为:

$$U(s) = (K_p + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{K_p T_d s}{T_f}) E(s) = U_p(s) + U_i(s) + U_d(s) \quad (6)$$

式中, K_p 为比例增益; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; $E(s)$ 为系统输入与输出之间的偏差; $U(s)$ 为控制量。

在离散时间域内, PID 控制表示为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=1}^k e(j) + K_d (1-\lambda) \sum_{j=1}^k \lambda^{k-j} \Delta e(j) + \lambda^k u_d(0) \quad (7)$$

式中, $K_i = K_p T / T_i$; T 为采样周期; λ 为常数, 且 $\lambda = T_f / (T_f + T) < 1$; $K_d = K_p T_d / T$

在不完全微分 PID 控制系统中, 微分作用缓慢变化, 故不容易引起震荡, 具有良好的控制性能和鲁棒性。

3.3 蚁群算法设计

3.3.1 节点和路径的生成

以不完全微分 PID 控制器的 K_p 、 T_i 、 T_d 3 个参数为优化变量, 并设他们有 5 位有效数字, 依据这些参数在绝大多数 PID 控制的取值情况, 令 K_p 的 5 个数位中小数点前占 2 位, 小数点后占 3 位; T_i 、 T_d 小数点前占 1 位, 小数点后占 4 位。为了方便采用蚁群算法, 把这 3 个待优化的参数的值抽象的表示在 XOY 平面, 如图 3 所示。在 XOY 平面上一共有 15×10 个节点, 用 $K_{m_i}(x_i, y_{i,j})$ 表示一个节点, 其中 x_i 表示节点的横坐标, $y_{i,j}$ 表示节点的纵坐标^[5]。

设某只蚂蚁从原点 O 出发, 当这只蚂蚁爬到线段 L_{15} 上某一点时表示完成了一次循环。其爬行的路径表示为: $Path = \{O, K_{m_1}(x_1, y_{1,j}), K_{m_2}(x_2, y_{2,j}), \dots, K_{m_{15}}(x_{15}, y_{15,j})\}$ 。显然, 这条路径代表的 K_p 、 T_i 、 T_d 3 个参数的值可按如下公式计算:

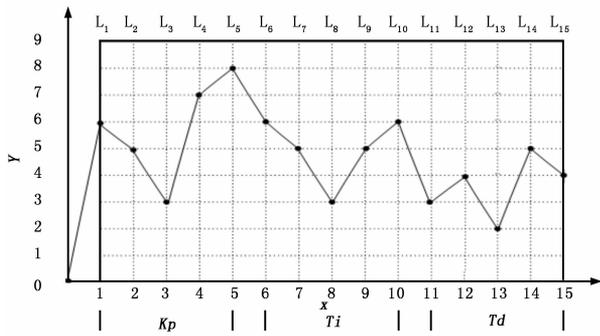


图 3 节点及路径生成示意图

$$\begin{cases} K_p = y_{1,j} \times 10^1 + y_{2,j} \times 10^0 + y_{3,j} \times 10^{-1} + \\ \quad y_{4,j} \times 10^{-2} + y_{5,j} \times 10^{-3} \\ T_i = y_{6,j} \times 10^0 + y_{7,j} \times 10^{-1} + y_{8,j} \times 10^{-2} + \\ \quad y_{9,j} \times 10^{-3} + y_{10,j} \times 10^{-4} \\ T_d = y_{11,j} \times 10^0 + y_{12,j} \times 10^{-1} + y_{13,j} \times 10^{-2} + \\ \quad y_{14,j} \times 10^{-3} + y_{15,j} \times 10^{-4} \end{cases} \quad (8)$$

图 3 显示了蚂蚁爬行的一条路径，该路径所表示的 K_p 、 T_i 、 T_d 的值分别为 $K_p = 64.3780$ 、 $T_i = 5.4267$ 、 $T_d = 3.4254$ 。

3.3.2 目标函数的建立

为了使系统具有较好的性能，建立目标函数时，应该以系统的性能指标为根本依据，本设计主要考虑单位阶跃响应时，系统超调量 σ 、上升时间 t_r 和调节时间 t_s ，定义目标函数为^[5]：

$$F = \lambda_\sigma \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + \lambda_{t_r} \left(\frac{t_r}{t_{r0}} \right) + \lambda_{t_s} \left(\frac{t_s}{t_{s0}} \right) \quad (9)$$

式中， σ_0 、 t_{r0} 、 t_{s0} 为采用 Ziegler-Nichols 法得到的系统的性能指标； λ_σ 、 λ_{t_r} 、 λ_{t_s} 为加权系数，根据日常积累的经验，分别取 0.6、0.2、0.2。 σ 、 t_r 、 t_s 的约束条件为

$$\begin{cases} \sigma < \sigma_0 \\ t_r < t_{r0} \\ t_s < t_{s0} \end{cases} \quad (10)$$

3.3.3 路径点的选择

假设每只蚂蚁从线段 L_i 上任意节点爬到下一线段 L_{i+1} 上任意节点的时间相等且与节点之间的距离无关。在 t 时刻，设蚁群移动到线段 L_i 上，令 b_j ($j = 0 \sim 9$) 为 t 时刻在线段 L_i 上节点 j 处蚂蚁的总数量 m ，则 $m = \sum_{j=0}^9 b_j(t)$ 。设 $\tau(x_i, y_{i,j}, t)$ 代表 t 时刻在节点 $K_{not}(x_i, y_{i,j})$ 上残留的信息量，初始时各个节点上的信息量均相等，则 t 时刻第 k 只蚂蚁由 L_{i-1} 上任意点向节点 $K_{not}(x_i, y_{i,j})$ 爬行的概率为^[11]

$$P_k(x_i, y_{i,j}, t) = \frac{\tau^\alpha(x_i, y_{i,j}, t) \eta^\beta(x_i, y_{i,j}, t)}{\sum_{j=0}^9 \tau^\alpha(x_i, y_{i,j}, t) \eta^\beta(x_i, y_{i,j}, t)} \quad (11)$$

式中， $\eta(x_i, y_{i,j}, t)$ 表示节点 $K_{not}(x_i, y_{i,j})$ 上的能见度，且

$$\eta(x_i, y_{i,j}, t) = \frac{10 - |y_{i,j} - y_{i,j}^*|}{10} \quad (12)$$

3.3.4 信息素的更新

为了增强蚁群算法的搜索能力，利用正反馈机制，即信息量越大的路径被选择的概率就越大。各路径点上信息量按照式

进行调整^[12]

$$\tau(x_i, y_{i,j}, t + 15) = \rho\tau(x_i, y_{i,j}, t) + \Delta\tau(x_i, y_{i,j}) \quad (13)$$

$$\Delta\tau(x_i, y_{i,j}) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_k(x_i, y_{i,j}) \quad (14)$$

$$\Delta\tau(x_i, y_{i,j}) = \begin{cases} \frac{Q}{F_k}, & \text{若第 } k \text{ 只蚂蚁在本次循环中经过 } K_{not}(x_i, y_{i,j}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中， F_k 表示第 k 蚂蚁在本次循环中的目标函数值。

3.3.5 PID 参数寻优的步骤

利用蚁群算法优化 PID 参数的具体步骤如下^[13]：

(1) 利用 Ziegler-Nichols 法计算出 PID 参数 K_{p0} 、 T_{i0} 、 T_{d0} 和系统性能指标 σ_0 、 t_{r0} 、 t_{s0} 。

(2) 设蚂蚁为 m 只，并且给每只蚂蚁 k 定义一个有 15 个元素组成的一位数组 $Path_k$ 。

(3) 令时间计数器 $t = 0$ ，循环次数 N_c 为 0，并设最大循环次数 N_{cmax} 和初始时刻各个节点的信息量 $(x_i, y_{i,j}, 0)$ 的值 c 。令 $\Delta\tau(x_i, y_{i,j}) = 0$ ，将蚂蚁全部放置于起点 O 。

(4) 置 $i = 1$ ，利用公式 (11) 来计算蚁群中蚂蚁向线段 L_i 上每个节点爬行的概率，然后根据所算出的概率，采用赌轮法为蚂蚁在线段 L_i 上选择一个节点，并使蚂蚁爬行到该节点，同时将该节点的纵坐标存放到 $Path_k$ 中。

(5) 将 $i = i + 1$ ，如果 $i \leq 15$ ，则跳转到第 (4) 步；否则跳转到第 (6) 步。

(6) 根据蚂蚁所经过的路径，即一维数组 $Path_k$ ，利用式 (8) 计算出该条路径所对应的 PID 参数 K_p^k 、 T_i^k 、 T_d^k ；然后用计算机进行仿真并计算出其对应的系统性能指标 σ^k 、 t_r^k 、 t_s^k ；接着用式 (9) 计算蚂蚁 k 对应的目标函数 F_k ；最后记录下本次循环中最优性能指标时的路径，即最优路径，并将其对应的最优 PID 参数存放到 K_p^* 、 T_i^* 、 T_d^* 。

(7) 令 $t \leftarrow t + 15$ 、 $N_c \leftarrow N_c + 1$ ，根据式 (13~15) 更新每一个节点的信息量，并将 $Path_k$ 的所有元素清零。

(8) 如果 $N_c < N_{cmax}$ ，且整个蚁群还没有收敛到同一路径时，则所有蚂蚁再次放置于原点 O 并跳转到第 (4) 步；如果 $N_c < N_{cmax}$ ，且整个蚁群已经收敛到同一路径时，则蚁群算法结束，输出最优路径以及其对应的 PID 控制器参数 K_p^* 、 T_i^* 、 T_d^* 。

4 仿真实验测试结果

本设计的基于蚁群算法的最优 PID 控制器用来控制磨机的给矿，由于磨矿过程具有滞后性。大惯性和时变性的特点，用二阶系统近似代替磨矿给矿的传递函数，二阶系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{e^{-50s}}{(60s + 1)(10s + 1)} \quad (16)$$

对系统进行仿真。在仿真实验时，以单位阶跃信号为输入，取 $\rho = 0.5$ 、 $\lambda = 0.9$ 、 $T_f = 0.5$ s、 $m = 10$ 。利用蚁群算法得到的 PID 的最优参数为 $K_p^* = 10.231$ 、 $T_i^* = 35.753$ 、 $T_d^* = 0.1792$ 。系统的单位阶跃响应如图 4 所示。

可以看出，用蚁群算法优化过的 PID 控制器稳态误差小、过度时间较短、超调量减小，对比表如表 1 所示。

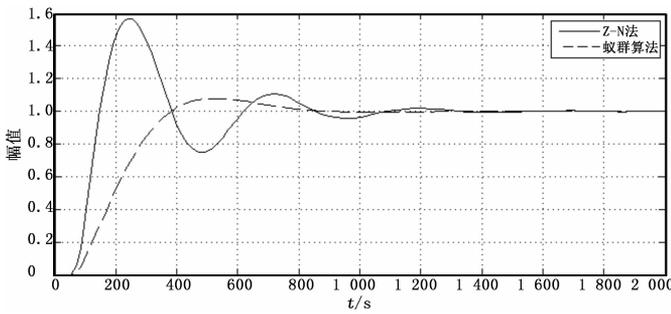


图 4 优化前后系统阶跃响应曲线

表 1 两种控制方法的 PID 参数及性能指标

PID 控制方法	K_p	T_i	T_d	σ (%)	t_s
Z-N 法	20.000	23.643	0.025 7	59	800
蚁群算法	10.231	35.753	0.179 2	9	1 300

5 结束语

理论分析和实际仿真研究表明, 本文提出的将蚁群算法和不完全微分 PID 控制器有机结合起来, 优化 PID 参数的策略, 与常规 PID 控制相比, 有更好的鲁棒性, 有效地减少了磨机给矿的波动, 对于解决复杂的磨矿过程给矿控制具有良好的实用性。

参考文献:

[1] 王泽红, 陈炳辰. 球磨机负荷检测的现状与发展趋势 [J]. 中国粉体技术, 2001, 7 (1): 19-23.

(上接第 1411 页)

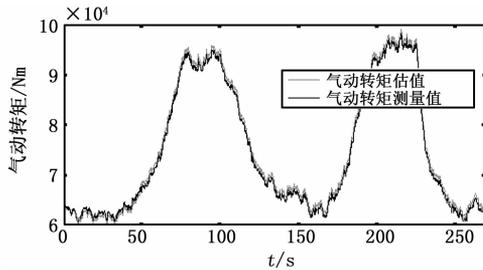


图 4 测量和估计气动转矩

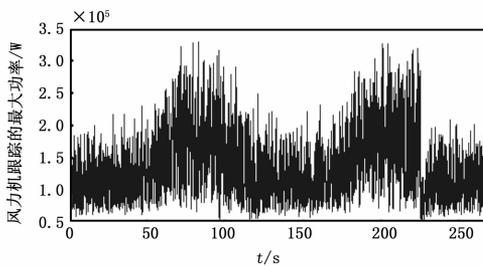


图 5 最大功率跟踪曲线

5 结语

在额定风速以下, 风力机控制的目标是最大风能捕获, 而传统的控制方法需要准确估计风速。由于风剪切等因素影响, 对大型风力机是不现实的。本文在不估计风速的条件下, 对风

[2] 周平, 柴天佑. 磨矿过程磨机负荷的智能检测与控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25 (6): 1095-1098.

[3] 周克良, 张建荣. 模糊-PID 串级控制在磨机给矿控制系统中的应用 [J]. 煤矿机械, 2008, 29 (2): 162-164.

[4] 劳春萍, 杨承志. 模糊智能控制在磨矿分级给矿系统中的应用 [J]. 自动化仪表, 2011, 32 (10): 60-65.

[5] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[6] 赵云涛, 王京, 宋勇, 等. 蚁群算法在中厚板液压伺服系统中的应用研究 [J]. 机床与液压, 2008, 36 (8): 266-269.

[7] 尹宏鹏, 柴毅. 基于蚁群算法的 PID 控制参数优化 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43 (17): 4-7.

[8] 陈书谦, 张丽虹. 蚁群算法在 PID 控制器参数优化中的应用 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (1): 238-241.

[9] 浦铁成, 白晶, 浦欣. 蚁群算法 PID 控制器在磁轴承控制系统中的应用 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2007, 8 (6): 562-565.

[10] 肖仲平, 王莹, 周金峰, 等. 基于蚁群算法的真空烧结炉最优 PID 温控系统 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (2): 159-161.

[11] 杜中杰, 陈鸿, 闫晓军. 基于蚁群算法的矿井提升机变频调速系统 [J]. 煤矿机械, 2010, 31 (11): 91-96.

[12] 段海滨, 王道波, 黄向华, 等. 基于蚁群算法的 PID 参数优化 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2004, 37 (5): 97-100.

[13] 许贺群. 基于改进蚁群算法的 PID 参数优化 [J]. 制造业自动化, 2011, 33 (4): 1-4.

力机转速的控制问题, 转化为对发电机转矩的间接控制问题。利用最优叶尖速比和风力机最优风能利用系数, 通过对风力机气动转矩的估计, 给出风力机获得最大功率时的最优转速。采用风力机气动转矩前馈控制, 得到发电机转矩最佳控制量。以估计的气动转矩和发电机最优转矩为输入, 引入状态观测器并采用扩展卡尔曼滤波估计转速, 最终实现风力机最大功率跟踪。最大功率跟踪控制的好坏, 决定于对气动转矩和转速估计的准确性, 仿真结果验证了估计的有效性和控制的可行性。

参考文献:

[1] 张文苑, 郑恩让, 朱玉国, 等. 兆瓦级同步风力发电机变桨距控制策略研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2203-2204.

[2] 王焱, 韩玉玲, 乔德浩. 无传感器双馈异步风力发电机直接转矩控制 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (4): 845-847.

[3] 马祎炜, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略 [J]. 电工技术学报, 2009, 24 (4): 202-208.

[4] 匡洪海, 吴政球, 李圣清. 基于同步扰动随机逼近算法的最大风能追踪控制 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (24): 34-38.

[5] 何玉林, 任海军, 金鑫, 等. 基于间接转矩控制的风电机组功率测控平台 [J]. 太阳能学报, 2011, 32 (2): 198-203.

[6] 杨金明, 吴捷, 杨俊华. 基于自抗扰控制器的风力发电系统的最大风能捕获控制 [J]. 太阳能学报, 2004, 25 (4): 525-529.

[7] 李理敏, 龚文斌, 刘会杰, 等. 基于自适应扩展卡尔曼滤波的载波跟踪算法 [J]. 航空学报, 2012, 33 (7): 1319-1328.

[8] 仲卫进, 艾芊. 扩展卡尔曼滤波在动态负荷参数辨识中应用 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (2): 47-50.