

基于粒子群算法进行参数自我调整的广义预测控制算法在汽包液位控制中的应用

杨湘, 程明

(南京工业大学 自动化与电气工程学院, 南京 211816)

摘要: PID 控制算法的学习性能及泛化性能取决于参数设置; 在常规方法中, 这些参数以固定值形式参与运算, 而当面对复杂分布的数据集时, 可能无法挑选出一组能够胜任各种分布情况的参数; 因此, 提出一种基于粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 进行参数自我调整的广义预测控制算法 (generalized predictive control, GPC); 该算法根据工业锅炉现场环境的复杂性, 机组参数的时变性, 有效地解决了 PID 控制的控制精度受到限制的问题; 着重讲述了汽包液位控制方案的设计, 可看出 PSO-GPC 控制在汽包液位控制中的重要应用, 其次, 通过粒子群算法对参数进行辨识, 并给出了仿真算例, 参数辨识准确, 最后用 PID 控制算法在液位控制中的仿真曲线与广义预测控制算法对锅炉汽包液位进行了仿真曲线进行了对比分析, 可见广义预测控制增强了系统的快速性, 稳定性好且抗干扰性强。

关键词: 汽包液位; 控制方案; 广义预测控制; 粒子群算法; 仿真

Generalized Predictive Control Based on PSO and Its Application in Drum Water Level Control

Yang Xiang, Cheng Ming

(College of Automation & Electrical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: Hyper-parameters, which determine the ability of learning and generalization for PID control algorithm and usually fixed during training. Thus when PID is applied to complex system modeling, this parameters-fixed strategy leaves PID in a dilemma of selecting rigorous or slack parameters due to complicated distributions of sample dataset. Therefore, in this paper we proposed GPC algorithm based on PSO algorithm in which parameters are adaptive to sample dataset distributions. According to the complexity of environment and time-varying parameters, we solve the problem which control precision is restricted based on PID. Focuses on the design of the steam drum level control scheme, which can see the importance of its application in the drum level control based on PSO-GPC. Then, it identifies the parameters based on PSO algorithm and the simulation example is given, the parameter identification is accurate. Finally through the comparison of PID which in third reference and GPC on simulation and analysis shows that GPC can enhance the rapidity of the system and the stability is better.

Keywords: drum water level; control scheme; generalized predictive control; PSO algorithm; simulation

0 引言

目前, 工业技术迅速发展导致了能源的需求量不断增加, 这就使得要在节约能源的前提下实现经济的最大化变得尤为重要, 因此, 提出将先进控制技术引入到工业生产中。例如模糊预测控制在注汽锅炉中的应用, 可以提高蒸汽质量, 降低注汽锅炉的运行能耗, 控制性能好^[1]。可见, 引入先进控制于工业的控制之中具有良好的前景。

汽包液位系统是锅炉控制系统的子系统, 工业锅炉蒸发量大而汽包容积则相对较小, 要使锅炉的蒸发量总是随着负荷的变化而变化, 那么就要求汽包液位的变化速度要相当快, 若液位不到位, 在很短时间就可能达到危险液位^[2], 而满水或缺水都会导致严重的故障。在工业锅炉实际运行过程中, 基于安全性、稳定性、可靠性和经济性等方面的考虑, 锅炉的汽包液位必须维持在某一期望值的附近^[3]。

关于汽包液位的先进控制策略的研究目前主要集中在自校正 PID 控制, 包括模糊自适应 PID 控制、神经自适应 PID 控制等方法, 同时, 也有其他复杂 PID 的控制算法的研究。自校正 PID 控制算法实现了对控制参数的在线调整, 随着工况的改变, 能及时调整参数以提高控制效果^[4-5]。复杂 PID 控制对汽包液位的控制虽然算法简单并能够满足基本的系统要求^[6]。

但是, 工业现场环境复杂, 机组参数存在时变性, PID 控制的精度满足不了实际工业生产过程中的生产要求。因此, 本文提出广义预测控制算法, 用粒子群算法进行了参数辨识, 并通过仿真算例对广义预测控制算法进行了仿真分析。汽包受热使汽包内的水蒸发成水蒸气, 供给负荷使用。汽包内的水位在给水流量的作用下会产生相应的变化, 而锅炉要想正常运行, 汽包液位必须维持在

允许的范围内波动, 锅炉汽水控制系统监控界面如图 1 所示。

1 汽包液位控制系统方案设计

1.1 锅炉汽水工艺控制要求

当锅炉开始运行时, 就会给汽包加热, 图 1 中给出了汽包在汽水控制中的结构和作用, 由图 1 可见, 汽包对于锅炉系统是非常重要的设备, 在锅炉汽水系统中是一个枢纽, 起着承上

收稿日期: 2014-05-18; 修回日期: 2014-06-19。

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(13KJB510013)。

作者简介: 杨湘(1988-), 女, 江苏泰州人, 硕士生, 主要从事控制理论与控制工程方向的研究。

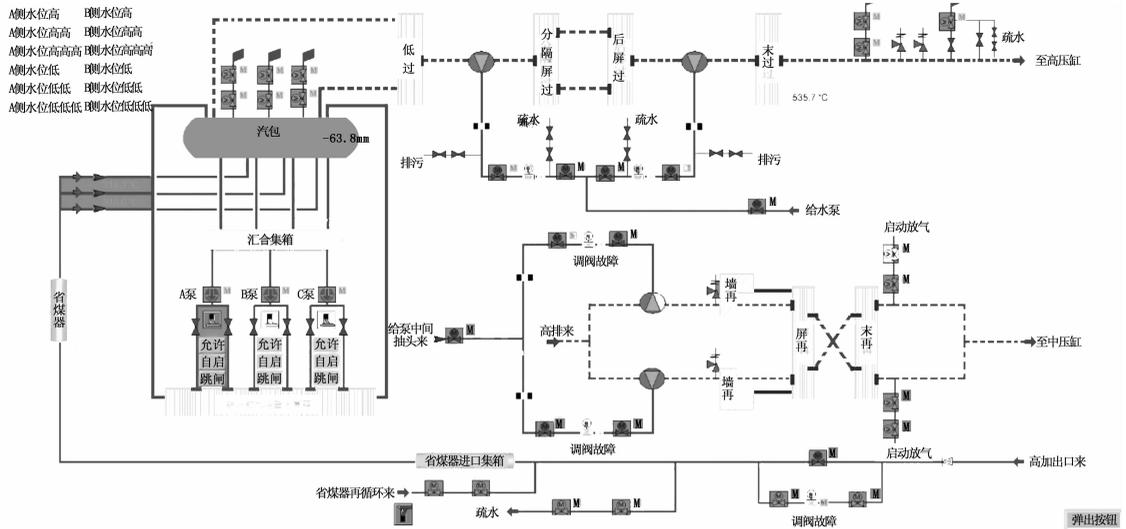


图 1 锅炉汽水控制系统监控界面

启下的作用。在图 1 中，虚线的管道表示蒸汽，实线的管道表示水，水冷壁与下降管分别连接于汽包形成自然循环回路。由水冷壁进入汽包的汽水混合物，利用汽包内部的蒸汽空间和汽水分离装置进行汽水分离，使离开汽包的饱和水蒸汽的水分降到最低。超高压的加热炉汽包内部还装有蒸汽清洗装置，利用给水清洗蒸汽，减少蒸汽直接溶解的盐分。汽包成为水冷壁、省煤器及过热器的连接中心。此外，还有一些辅助管道与汽包连接，如给水管、事故放水管、加药管、排污，利用汽包水空间对炉水加药、排污，进行炉内水处理。

汽包液位的控制过程是：锅炉系统正常启动后，当汽包液位超过水位上限时，调节进水阀的开度；当汽包液位低于水位下限时，同样调节进水阀的开度；当汽包液位到达极低水位时，切断整个控制回路，排除故障后，再重新启动。这 3 种情况都需要报警。

1.2 控制系统设计方案

1.2.1 设计原则

- (1) 要确保系统能够安全、稳定的运行；
- (2) 能达到较好的控制水平；
- (3) 在实现基于 PSO 的广义预测控制的基础上，经济效益与生产效益达到最优。

由于考虑到其他子系统，I/O 点数留有充分的裕量进行扩展，因此选择 SIEMENS 公司的 S7-300PLC 作为下位机控制单元，S7-300 系统有很多 I/O 扩展模块，当系统规模增大并且变得复杂时，可以任意增加模块对 PLC 进行扩展，而且 S7-300 本身对工业环境的适应性很好。

1.2.2 控制系统的主要功能

- (1) 数据采集：主要是采集汽包液位。
- (2) 汽包液位的控制：由现场采集的汽包液位数据，根据 PSO 算法对参数进行辨识，然后采用广义预测控制算法来计算阀门的开度，实现汽包液位的自动控制。
- (3) 报警：通过上位机监控软件实现，水位超过上限水位、低于下限水位和到达极低水位时都会引起报警。

1.2.3 控制方案设计

由于加热炉汽包液位系统是时滞的、时变系统，传统的

PID 算法对系统的动态变化的适应能力不是很好，因此选择广义预测控制算法。利用 PSO 算法对模型的参数进行辨识，因为当对象的参数发生变化的时候，PSO 辨识算法可以既快又准确地辨识出系统模型的全部参数，又可以有效的避免模型适配时产生的不良后果。根据广义预测控制算法的参数设定原则，算法中的参数设定 N 等于被控对象的上升时间， $M=1$ ，然后按照广义预测控制算法步骤逐步实施。接着上位机集中监测整个系统，通过 PLC 与上位机的通讯的实现，使设备状态能够在线监测、修改或控制。

利用 PSO 辨识出的实时动态模型与广义预测控制相结合，PSO 动态辨识器通过实时采集过程的输入输出数据在线辨识被控过程模型的参数，使预测模型的参数跟随被控过程的参数变化而变化。利用 PSO 动态辨识器得到广义预测模型并求出使目标函数值最小的控制增量，然后采用滚动优化策略对系统实施控制，算法原理图如图 2 所示。

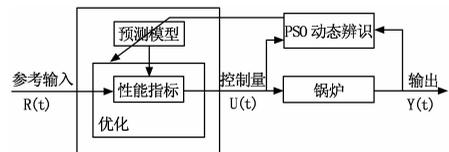


图 2 基于 PSO 的广义预测控制算法基本结构图

1.3 锅炉汽水控制系统执行流程

锅炉汽水整个系统的执行流程如图 3 所示。

当加热炉系统给定启动信号初始化后，加热炉汽包也开始按照给定要求开始运行。在汽包液位到达给定水位的过程中，通过液位传感器实时反馈汽包内液位的高度。当液位高于上限水位或低于下限水位时，给定一个抖动时间 2 s，若 2 s 过后液位依然没有下降或上升至正常液位波动范围内，则进水阀进行相应调整并且报警，引起操作人员的注意；当液位在正常液位波动范围内时，PLC 则定时将液位的采样值送入到广义预测控制器中计算阀门的开度，然后输出控制信号，依次循环。

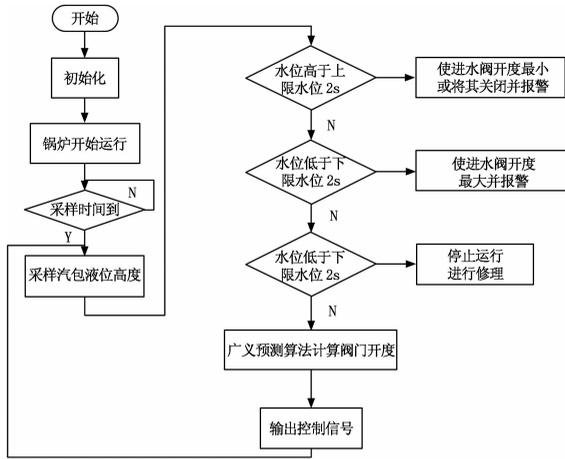


图 3 锅炉汽水系统的执行流程图

2 仿真分析

2.1 基于 PSO 算法的模型参数辨识仿真研究

PSO 算法的数学描述为: 设搜索的空间为 D 维, 第 i 个粒子可以用一个 D 维向量表示为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$, 粒子的速度可以表示为 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$, 第 i 个粒子曾经到过的最优位置为 $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$, 粒子群体曾经到达的最优位置为 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})^T$, 粒子动态范围为 $\mathbf{X}_{\max} = (x_{\max 1}, x_{\max 2}, \dots, x_{\max D})^T$, 粒子的最大速度为 $\mathbf{V}_{\max} = (v_{\max 1}, v_{\max 2}, \dots, v_{\max D})^T$ 。PSO 算法步骤如下:

Step1: 种群初始化, 包含种群数量, 迭代次数, 加速因子 C_1 、 C_2 , 惯性权重 ω , 粒子数量、位置和速度;

Step2: 计算种群内每一个粒子的适应值, 确定第 i 个粒子曾经到过的最优位置 P_i 与粒子群体曾经到达的最优位置 P_g ;

Step3: 对每个粒子的位置和速度进行更新, 根据公式 (1)、(2)、(3) 从 t 代更新到 $t+1$ 代:

$$\overline{v}_{id} = \omega \cdot v_{id} + C_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (p_{id} - x_{id}^t) + C_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (p_{gd} - x_{id}^t) \quad (1)$$

$$v_{id}^{t+1} = \begin{cases} \overline{v}_{id} & \overline{v}_{id} > v_{\max d} \\ \overline{v}_{id} - v_{\max d} & \overline{v}_{id} \leq v_{\max d} \\ -v_{\max d} & \overline{v}_{id} < -v_{\max d} \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (3)$$

其中: $i=1, 2, \dots, N$; $d=1, 2, \dots, D$; C_1 和 C_2 为加速因子; rand_1 和 rand_2 为相互独立的 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数。

设汽包液位系统传递函数为 $P(s) = \frac{K}{T_s s + 1} e^{-Ls}$, 对象参数 $K=1, T=25, L=20$ 。采用 PSO 算法对这个模型进行实时辨识, 仿真时主要参数设置如下: 惯性权重 $\omega_{\min}=0.6, \omega_{\max}=0.9$, 加速因子 $C_{1,\text{ini}}=2.5, C_{1,\text{fin}}=0.5, C_{2,\text{ini}}=0.5, C_{2,\text{fin}}=2.5$, 粒子数 $N_{\text{iter}}=200, N_{\text{ps}}=60$ 。

其仿真结果如图 4~7 所示。

由图 4~7 仿真曲线可以看出, 对参数 $L、T、K$ 3 个参数的辨识准确, K 趋向于 1, T 趋向于 25, L 趋向于 20 且输出误差较小, 因此基于 PSO 算法的模型参数辨识方法能准确辨识出对象模型参数。

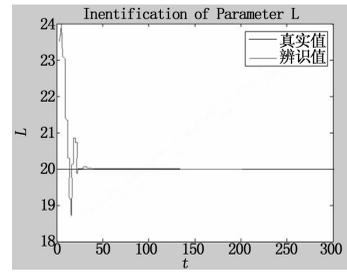


图 4 参数 L 的辨识

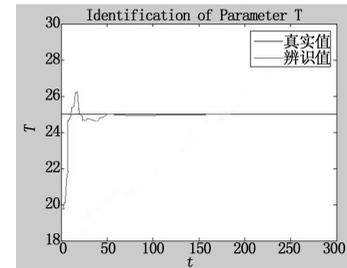


图 5 参数 T 的辨识

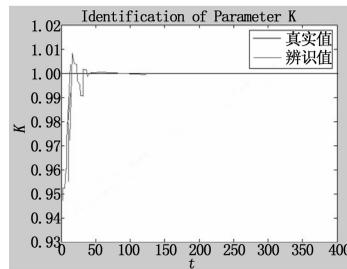


图 6 参数 K 的辨识

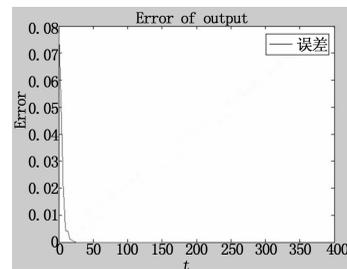


图 7 输出误差

2.2 锅炉汽包液位 GPC 仿真分析

广义预测控制 (GPC) 是在以下背景提出的, 一是工业过程的复杂化, 二是对控制性能的要求不断提高, 三是 DMC 和 MAC 等基本预测控制算法在选择反馈校正系数时遇到了难以兼顾的抗干扰性和鲁棒性的困难。

GPC 的基本思路和步骤为: (1) 在控制过程中, 通过在线辨识使得预测模型跟踪系统特性变化, 同步体现被控对象变化; (2) 根据辨识模型及时调整控制器参数, 从而抑制扰动的影响; (3) 使算法既有较好的控制性能又有较强的鲁棒性。如图 8 为 GPC 结构框图。

设被控对象模型为 $\frac{0.2713z^{-1}}{1-az^{-1}}z^{-1}$, 其中极点为 $a =$

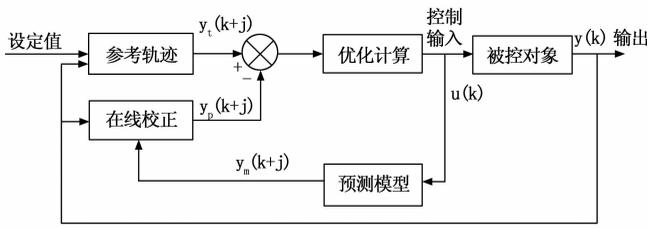


图 8 广义预测控制结构框图

$$\begin{cases} 0.835 & 1, 0 \leq k \leq 200 \\ 0.636 & 7, 200 < k \leq 300 \\ 0.730 & 2, 300 < k \leq 400 \\ 0.835 & 1, k > 400 \end{cases}$$
 ，采用 GPC 控制算法进行仿真，广

义预测控制参数设置为：预测步长 $N=10$ ，控制步长 $N_u=3$ ，控制权值 $\lambda=0.2$ ，柔化系数 $\alpha=0.2$ ，运行步数为 100，系统的实际阶数 $n_a=2$ ， $n_b=1$ ，模型系数 A 为 $[1, -1.5, 0.7]$ ，模型系数 B 为 $[1, 0.5]$ ，设置程序如下：

```

%分散广义预测控制(C=1)(对象参数已知)
clear all;
clc;
close all;
G1=tf([0 0 0 0 0 0.2713],[1 -0.8351],5,'variable','z'-1);
G2=tf([0 0 0 0 0 0.2713],[1 -0.6367],5,'variable','z'-1);
G3=tf([0 0 0 0 0 0.2713],[1 -0.7302],5,'variable','z'-1);
%-----参数设置-----
num=1; den=[10,1];L=20;
Ts=5; %采样周期
[A,B,d]=tf2AB(num,den,L,Ts)
[na,nb]=rankn(A,B);
N=10; %预测步长
Nu=3; %控制步长
lambda=0.5 * eye(Nu);deta=1;
alpha=0.2; %柔化系数
Al=conv(A,[1 -1]);naa=na+1;
[E,F]=diophantine(A,N,d);
G=getGij(B,E);
[Gk,Gpk,Gku]=getG(G,Nu)
%-----输出-----
tend=100;
uk=zeros(d+nb+1,1);
duk=zeros(d+nb+1,1);
yk=zeros(naa,1);
w=ones(tend+d+N,1);
%-----GPS控制-----
  
```

仿真结果如图 9 所示

由图 9 的仿真曲线与文献 [3] 中 PID 在液位控制中的仿真曲线对比可以看出，广义预测控制的稳定性较好，采用广义预测控制不仅能提高系统快速性，而且增强了系统的抗干扰能力，控制效果佳。

3 结束语

面对工业锅炉现场环境的复杂性，机组参数存在的时变

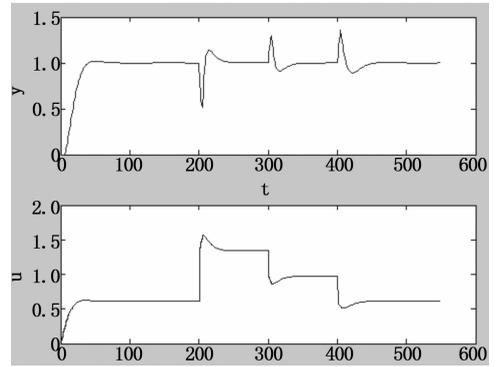


图 9 GPC 系统输入输出曲线

性，为免控制精度会受到限制，故采用广义预测控制为上位机及 PLC 为下位机的控制方案，并利用 PSO 算法辨识对象模型参数。同时，通过广义预测控制算法对锅炉汽包液位的控制仿真分析说明广义预测控制在控制非线性、时变、耦合及参数和结构不确定的复杂过程时效果较好，在工业生产中具有推广应用价值。

参考文献：

- [1] 周艳君. 模糊预测控制在注汽锅炉中的应用: [D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [2] 鄢波, 丁维明, 魏海坤. 工业锅炉汽包水位模糊自适应 PID 控制系统 [J]. 发电设备, 2006, 4: 276-279.
- [3] 任登凤, 宋飞虎. 工业锅炉汽包水位先进 PID 控制研究 [J]. 计算机仿真, 2009, 26 (7): 195-196.
- [4] Huang S N, Tan K K, Wong Y S. Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring [J].
- [5] 雷萍. 基于 PSO 优化的小波神经网络在刀具磨损识别中的应用 [J]. 工具技术, 2007, 41 (6): 91-94.
- [6] 李冬辉, 周巍巍. 基于小波神经网络的传感器故障诊断方法研究 [J]. 电工技术学报, 2005, 20 (5): 49-52.
- [7] 李士勇. 蚁群优化算法及其应用研究进展 [J]. 计算机测量与控制, 2003, (12): 911-913.
- [8] Maciejowski J M Predictive Control with Constraints [M]. London: Prentice Hall, 2001.
- [9] PLC Control system and Equipment interfaces of CIAE-30 Cyclotron, Internal, CIAE [Z].
- [10] Lewis R W Modeling industrial control systems using the IEC 61499 function block atandard [Z]. 2002.
- [11] 庞中华, 邵惠鹤. 预测控制在现代过程工业中的应用与发展 [J]. 测控技术, 1999, 18 (12): 5-8.
- [12] 徐广宇. 基于广义预测控制及其仿真研究: [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2005.
- [13] 潘立登. 先进控制与在线优化技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [14] Tomohiro Takaqi, Michio Suqeno. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 1985, 15 (1): 116-132.
- [15] 陈章平, 杨泽, 沈国宇. 西门子 S7-300/400PLC 控制系统设计与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.