

# 基于混沌理论的 PID 参数自整定 锅炉汽包水位控制系统设计

吕 宁, 姬秋云, 夏增刚

(哈尔滨理工大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘 要:** 锅炉汽包水位是工业蒸汽锅炉安全稳定运行的重要指标, 目前水位控制普遍采用前馈串级三冲量控制器, 控制效果与控制器 PID 参数选择关系很大, 而常用的参数整定方法步骤繁琐, 搜索效率较低, 且不一定最优, 控制效果常出现大的振荡和超调。本文利用混沌具有遍历性的特点, 对基于 Logistic 映射的混沌搜索优化方法进行了改进, 采用一类在有限区域范围内折叠次数无限的一维迭代混沌自映射, 提出一种新的混沌 PID 优化参数方法。通过对汽包模型的仿真结果表明, 该算法具有较高的搜索效率与搜索精度, 能够实现 PID 参数的优化整定。

**关 键 词:** 汽包水位; 混沌; 优化; PID 控制

中图分类号: TK223.7; TP273.4 文献标识码: A

## 引 言

混沌是在非线性系统中普遍存在的现象, 混沌运动具有对初值的高度敏感性、运动轨迹的遍历性和随机性等特点。在优化设计领域中, 混沌现象的遍历性特点可以作为搜索过程中避免陷入局部极小的一种优化机制。因此, 混沌已经成为一种新颖的全局优化技术, 混沌优化就是根据其遍历性和规律性特点采用混沌变量在一定范围内进行搜索, 促使混沌变量的搜索跳出局部极小点, 最终达到全局最优点。目前基于混沌搜索优化的方法大都采用 Logistic 映射, 这类优化方法对于搜索空间小时效果显著, 但当搜索空间大、搜索时间较长时, 搜索的效率和能力不能令人满意。

目前, 工业系统普遍采用的 PID 控制器的控制效果与控制参数的选择有很大关系, 而 PID 参数的整定是一项十分繁琐的工作。虽然 PID 参数的整定和优化的方法很多, 但传统的非智能整定方法如 Ziegler-Nichols 法基本是一种基于经验的方法<sup>[1]</sup>, 并非最优解; 智能型整定方法如模糊 PID、神经网络

PID 虽然能较好地实现 PID 控制参数的优化, 但需要在线整定, 计算量大, 使得控制器的负担很重。

锅炉汽包水位是火力发电机组的重要参数, 也是工业蒸汽锅炉安全、稳定运行的重要指标<sup>[2]</sup>。为了提高锅炉汽包水位控制系统的 PID 控制性能, 针对上述不足, 设计了一种基于改进一维迭代混沌自映射搜索优化、满足时间误差积分指标最优 (ITAE) 的 PID 控制器。

## 1 混沌搜索优化算法

混沌搜索优化算法的基本思想是把混沌变量线性映射到优化变量的取值区间, 然后利用混沌变量进行搜索。由于基于 Logistic 映射的混沌优化方法在大空间、多变量的优化搜索上存在着计算时间长、不能搜索到最优解的问题, 故对基于 Logistic 映射的混沌搜索优化方法进行了改进, 采用一类在有限区域范围内折叠次数无限的一维迭代混沌自映射<sup>[3]</sup>, 比一般的在有限区域内折叠次数有限的一维迭代混沌自映射 Logistic 映射具有更好的混沌特性。一维迭代混沌自映射采用下式定义:

$$\left. \begin{aligned} X_{n+1} &= \sin(2/X_n), n = 0, 1, 2, \dots \\ -1 &\leq X_n \leq 1, X_n \neq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

该映射由于折叠次数无限, 在区间  $[-1, 1]$  内有无穷多个不动点和零点, 因此若要由此映射产生混沌, 必须注意以下两点:

(1) 迭代的初始值不能为 0;

(2) 初始值不能取为无穷多个不动点的任何一个, 否则为稳定轨道, 不能产生混沌; 不动点为方程  $x = \sin(2/x)$  的解。

图 1 为映射函数值与迭代次数 (600 次) 之间的关系。

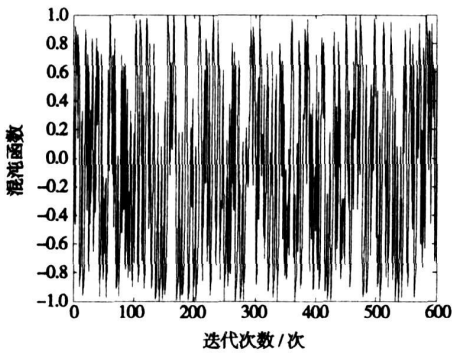


图 1 迭代次数与混沌函数值的关系

## 2 混沌搜索优化 PID 控制器设计

利用混沌的遍历性对 PID 参数进行寻优。首先, 在优化 PID 参数时将混沌变量引入到 PID 参数的寻优方式中, 找出满足系统稳定性条件和目标函数最小值原则的一组参数作为 PID 参数的次优解, 在此基础上再进行混沌变量的局部搜索找出最优或次最优的 PID 控制参数。

PID 控制系统混沌搜索优化设计原理如图 2 所示。

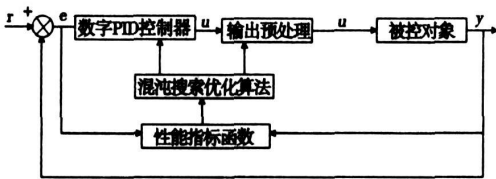


图 2 PID 控制系统混沌搜索优化设计原理

PID 寻优目标函数很多, 本文选用控制系统常用的 ITAE 积分性能指标, 它能够综合评价控制系统的动态和静态性能, 具有超调量小、响应快、调节时间短及稳定误差小等特点。将目标函数取为时间误差积分性能指标最优原则<sup>[4]</sup>, 即:

$$J(\text{ITAE}) = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2)$$

为最小, 将式(2)离散得:

$$J(\text{ITAE}) = \sum_{i=0}^T t_i \cdot |e(t)| \cdot T \quad (3)$$

式中:  $T_s$ —采样点数;  $T$ —采样时间。

### 2.1 PID 控制器算法的设计

PID 控制器的算式为:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

将式(4)离散得到 PID 算式:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(k) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (5)$$

式中:  $K_I = K_p \cdot \frac{T}{T_I}$ ,  $K_D = K_p \cdot \frac{T_D}{T}$ ;  $T_I$ —积分时间;  $T_D$ —微分时间;  $T$ —采样时间;  $k$ —采样序号,  $k=1, 2, \dots, N$ ;  $u(k)$ —第  $k$  次采样时刻 PID 控制器输出的控制量。

### 2.2 混沌搜索优化算法

为了得到 PID 参数的全局最优值, 采用一维迭代混沌自映射式(1)作为变量的混沌运动: 当  $-1 \leq X_n \leq 1$ ,  $X_n \neq 0$  时自定义的一维迭代混沌自映射完全处于混沌状态。利用混沌状态具有对初值敏感的特点, 取不同的初值可得到不同轨迹的混沌变量, 以保证一次载波能到达最优解附近。

基于混沌搜索优化 PID 参数的具体步骤如下:

(1) 依式(5)取  $K_p$  的混沌变量为  $K_p(n+1)$ ;  $K_I$  的混沌变量为  $K_I(n+1)$ ;  $K_D$  的混沌变量为  $K_D(n+1)$ 。

(2) 每次将  $K_p(n+1)$ 、 $K_I(n+1)$ 、 $K_D(n+1)$  分别作为  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的值对被控对象进行 PID 调节, 得出输出值, 在无限寻优次数的结果中, 找出满足 ITAE 性能指标和系统稳定性条件的一组参数值  $K_p(n+1)$ 、 $K_I(n+1)$ 、 $K_D(n+1)$  作为 PID 参数的次优解  $K_p^*$ 、 $K_I^*$ 、 $K_D^*$ , 这是用混沌变量进行的粗搜索<sup>[3]</sup>。

(3) 搜索到 PID 参数的次优解之后, 为了在次优解的邻域内通过逐步缩小混沌变量遍历的区域, 实现混沌细搜索, 找到 PID 参数的全局最优解, 因此在次优解的基础上进行二次载波。根据一维迭代混沌自映射方程  $X_{n+1} = \sin(2/X_n)$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ , 并按式(6)进行二次载波:

$$K_p = K_p^* + Z_t \cdot K_p(n+1) \quad (6)$$

$$K_I = K_I^* + Z_t \cdot K_I(n+1)$$

$$K_D = K_D^* + Z_t \cdot K_D(n+1)$$

$$Z_{t+1} = (1 - \lambda) \cdot Z_t \quad (0 < \lambda < 1) \quad (7)$$

式中:  $K_p^*$ 、 $K_I^*$ 、 $K_D^*$ —PID 参数的次优解;  $\lambda$ —时变参数  $Z_t$  的衰变因子, 以逐步缩小混沌变量的遍历区域。若  $Z_{t+1} \leq R$  ( $R$  为给定常数)则终止循环。

同样, 细搜索也根据目标函数取最小值原则进行寻优, 同时对搜索的一组参数进行稳定性判定, 这样在满足系统稳定性的前提下目标函数取最小值的参数组  $K_p(n+1)$ 、 $K_I(n+1)$ 、 $K_D(n+1)$  为最终要找到的 PID 参数的全局最优解  $K_p$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 。

### 3 仿真实例与分析

汽包水位混沌优化控制系统的原理如图 3 所示。

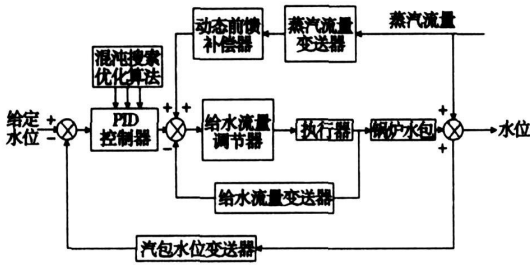


图 3 汽包水位混沌优化控制系统原理框图

汽包模型描述如下<sup>[9]</sup>：

给水流量  $W$  与水位  $L$  的传递函数  $\frac{L(s)}{W(s)} =$

$$\frac{0.0529}{s(8.5s+1)}$$

；蒸汽流量  $D$  与水位  $L$  的传递函数

$$\frac{L(s)}{D(s)} = \frac{2.613}{(6.7s+1)^2} - \frac{0.0747}{s}$$
；执行器传递函数  $G$

$$(s) = \frac{4.5}{0.3895s+1}$$
；给水流量变送器传递函数  $G_W(s)$

$$= \frac{0.05}{0.3s+1}$$
；汽包水位变送器传递函数  $G_L(s) =$

$$\frac{1.05}{0.36s+1}$$
；动态前馈补偿器传递函数  $D_f(s) =$

$$\frac{0.05}{0.36s+1}$$
。

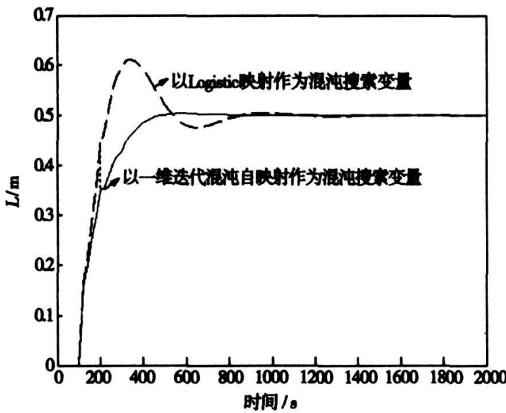


图 4 一维迭代混沌自映射 PID 控制器阶跃响应

首先对系统的 PID 控制参数进行混沌优化, 将混沌变量范围扩大到锅炉汽包水位 PID 控制参数的优化变量范围内<sup>[4]</sup>, 采用在有限区域范围内折叠次

数无限的一维迭代混沌自映射, 采样周期  $T=0.1\text{ s}$ , 在式(2)中取采样点数  $T_s=10\text{ s}$ , 即每 100 步混沌寻优一次。混沌粗搜索次数取 2000 次。通过仿真很快得到 PID 参数的次优值:  $K_P=1.4672$ 、 $K_I=0.0686$ 、 $K_D=9.8611$ 、 $J=0.3440$ 。在此基础上, 进行一次载波, 逐步缩小混沌搜寻的范围, 在式(7)中取衰减因子  $\lambda=0.001$ , 时变参数  $Z_t$  的初始值  $Z_0=0.8$ , 常数  $R=0.01$ , 即当  $Z_t \leq 0.001$  时二次载波结束。最终得到 PID 参数的全局最优值  $K_P^*=1.5627$ 、 $K_I^*=0.0742$ 、 $K_D^*=8.5535$ 、 $J=0.2138$ 。寻优结果和阶跃响应仿真曲线如图 4 所示。

采用一维迭代自映射函数的混沌优化 PID 整定算法, 使得控制系统在稳定工况下可保证控制偏差不大于  $\pm 10\text{ mm}$ , 变动负荷过程中能维持汽包水位的控制偏差在  $\pm 15\text{ mm}$  内, 且无超调, 符合机组变负荷运行对汽包水位的要求。

本文所提出的 PID 参数优化整定方法, 在应用过程中为适用于不同控制对象, 可先对控制参数进行混沌优化, 将混沌搜索变量范围扩大到优化变量范围内, 以满足算法通用性的要求。

### 4 结 论

针对锅炉汽包水位三冲量调节器中 PID 控制参数整定复杂, Logistic 映射混沌搜索优化方法在搜索空间大时搜索时间较长效率低的问题, 设计了一种基于一维迭代混沌自映射的混沌搜索 PID 控制器参数优化方法。将该方法应用于火力发电厂锅炉自然循环汽包三冲量给水控制器上, 通过仿真, 证明了基于新型混沌搜索优化算法的 PID 控制器具有稳定、超调量小、调节时间短、控制精度高的优点, 且简单易于实现。

### 参考文献:

- [ 1 ] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum settings for automatic control[J]. Trans ASME 1942, 64(11):759-768.
- [ 2 ] 孙秀权, 唐 健, 于秀银, 等. 锅炉和工业炉窑实用计算机控制技术[M]. 北京: 国防出版社, 1993
- [ 3 ] 王 凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [ 4 ] 李 兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615
- [ 5 ] 邹 恩. 混沌控制及其优化应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [ 6 ] 王红旗, 余余山, 郝加臣. 锅炉水位的优化因子模糊控制[J]. 焦作工学院学报, 2003, 22(3):224-227.

(编辑 何静芳)

law of mechanical atomizing nozzles. But when the oil spray pressure is relatively low, the atomization mechanism will take a reverse course, i. e. the lower the oil spray pressure, the finer the atomized particles. From the foregoing it can be shown that the swirling steam-based mechanical atomized-oil sprayer can maximally improve the atomization quality under a low-load operating condition and has a relatively large turndown ratio with a steam consumption rate lower than that of an often-used pneumatic atomized-oil sprayer. **Key words:** supercharged boiler, oil sprayer, atomization characteristics, numerical simulation

基于粗糙集理论的火焰图像处理与状态识别 = **Flame Image Processing and Status Discrimination Based on Rough Sets Theory** [刊, 汉] / WU Guang-fu, LU Zhen-zhong (College of Energy Source and Environment under the Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 310 ~ 313, 321

A flame status discrimination method based on rough sets theory has been presented in the light of the main problems concerning the flame detection of an entire furnace. The method makes use of the classification principle in the rough sets theory to identify the high temperature zone of flame combustion. In combination with other flame image characteristic values, a knowledge decision-making system was employed based on the rough sets theory to set up flame-status discrimination rules and establish a basic model for the discrimination of entire furnace combustion status to make a judgement of the latter. As the decision-making table is of a simple attribute expression, it lends itself to be easily understood by operators and provides operation guidance for boiler combustion regulation. The on-site tests indicate that the characteristic magnitudes of flame images have a close bearing on the quality of combustion process. The processing based on the rough sets theory can lead to a higher effectiveness and the quantitative classification by adopting attribute sets should help realize a qualitative discrimination of the output values, thus resulting in a precise and reliable discrimination of the system status. **Key words:** rough set, image processing, status discrimination, flame detection, decision-making table

基于混沌理论的 PID 参数自整定锅炉汽包水位控制系统设计 = **Design of a Water Level Control System for the Drum of a PID Parameter and Self-tuning Boiler Based on Chaotic Theory** [刊, 汉] / LU Ning, JI Qiu-yun, XIA Zeng-gang (College of automation under the Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, Post Code: 150080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). — 314 ~ 316

The water level in a boiler drum is an important index for the safe and steady operation of an industrial steam boiler. Nowadays, for the water level control usually adopted are feed-forward cascade three-impulse controllers. The control effectiveness is heavily dependent on the proper selection of PID (proportional-integral-differential) parameters of the controller. However, the commonly used parameter-adjusting method involves complicated and tedious steps, resulting in a relatively low searching efficiency. Furthermore, the method is not always an optimized one and big oscillations and overshoots often occur to the control system. By making use of the ergodicity specific to the chaotic theory, one can improve the chaotic-searching optimization method based on Logistic mapping. Presented was a new chaotic PID-parameter optimization method by using one-dimensional iterative chaotic self-mapping which features infinite collapses in a finite region. The simulation results obtained by using the boiler drum models show that the relevant algorithm has a relatively high searching efficiency and accuracy, capable of realizing an optimized adjustment of PID parameters. **Key words:** drum water level, chaos, optimization, PID control

低热值煤层气燃烧器的数值模拟 = **A Numerical Simulation of a Low-heat-value Coal-bed Gas Burner** [刊, 汉] / LUO Yu-dong, ZHANG Li, TANG Qiang, et al (College of Power Engineering under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(3). —