

DOI: 10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2017.1.05

粒子群 AOD 炉防喷溅系统 PID 参数优化

解雯惠, 付虹*, 曹开发

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 引入惯性权重粒子群算法在线优化 PID 控制器参数, 利用 AOD 反应时熔体内和熔体表面温差分别对氧气流量、氮气流量、氧枪位置、喷溅抑制剂加入量 4 个变量进行控制, 使其工作在最佳条件下, 实现 AOD 炉冶炼铬铁合金时抑制喷溅的自动控制。

关键词: AOD; 防喷溅; 粒子群算法; PID 控制

中图分类号: TP 273.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2017)01-0026-05

Particle swarm AOD furnace splash system PID parameters optimization

XIE Wenhui, FU Hong*, CAO Kaifa

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Inertial weighted particle swarm is introduced to online optimize PID parameters. With the temperature difference between liquid surface and furnace, variables such oxygen/nitrogen flow rate, top-gun top-blown position and amount of splash resistance are checked to realize automatic splash control and ensure AOD work in optimal conditions.

Key words: AOD; splashing; Particle Swarm Optimization (PSO); PID control.

0 引言

氩氧精炼法工艺是一种生产高质量低碳铬铁的新工艺, 使用设备是 AOD 炉, 该种工艺是将电炉粗炼好的钢水倒入 AOD 炉, 采用一定比例的氩、氮和氧的混合气体从炉体下部侧壁吹入炉内, 在 O_2-N_2-Ar 气泡表面进行脱碳反应^[1]。这种方法生产工艺简单, 并大大降低了成本, 但喷溅问题也时有发生。喷溅是指电炉炼钢吹炼过程中,

由于氧气的气流或者脱碳反应产生大量 CO 气体逸出, 将炉内的部分熔渣以及铁等带出炉外的现象^[2]。在生产中, 氧枪位置控制不当、操作人员加料方式不合理等不良操作都有可能引发喷溅。据统计^[3], 喷溅事故占冶金行业事故的 60% 以上。喷溅对炼钢生产危害很多: 它会造成跑渣带铁以及大量热量损失, 影响炼钢的热平衡, 增大钢铁料消耗, 不利于成本控制, 影响冶炼控制的稳定性; 极易造成人员烧烫伤和渣道积渣, 设备使用寿命

收稿日期: 2016-09-24

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目(20130206029GX)

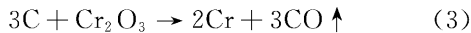
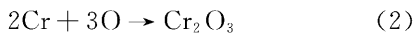
作者简介: 解雯惠(1991-), 女, 汉族, 吉林蛟河人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事测控技术与智能系统方向研究, E-mail: 13154318168@163.com. * 通讯作者: 付虹(1963-), 女, 汉族, 吉林长春人, 长春工业大学教授, 硕士, 主要从事测控技术与智能系统方向研究, E-mail: fuhong@ccut.edu.cn.

降低, 炉子的相关附属设备遭到破坏。因此, 有必要对喷溅产生的原因进行分析研究并制定应对措施。

1 AOD 炉的喷溅机理及系统分析

1.1 产生机理

AOD 炉精炼铬铁合金过程中, 铬铁合金熔体内及其熔体液面会发生 3 个化学反应^[4]。



其中: 反应(1)、(2)是放热反应; 反应(3)为吸热反应, 其反应速度受供氧量、熔池碳含量、CO 含量、渣中 Cr_2O_3 含量和温度的共同影响。如果冶炼过程中熔池骤然受到冷却, 会抑制反应(3)的进行, 供入的氧气生成大量 Cr_2O_3 并聚积; 当熔池温度再度升高到一定程度, 反应(3)重新快速进行, 在反应(1)和反应(3)的共同作用下, 瞬间产生大量的 CO 气体, 由于 Cr_2O_3 含量较高, 渣液张力较小、渣液泡沫化程度较高且渣层较厚, 致使 CO 逸出困难, 导致 AOD 炉喷溅的发生^[5]。如果碳氧反应剧烈, 就会产生泡沫性喷溅, 严重的话会产生爆发性喷溅; 如果炉渣中的 Cr_2O_3 含量降低, 其特征恰好相反, 导致炉渣返干, 产生金属性喷溅。

可见, 炉渣中 Cr_2O_3 含量是影响喷溅发生的主要原因, 但目前无法实现 Cr_2O_3 含量的在线测量, 所以要选出一种能在线监测且能表征喷溅发生的信号。研究表明, 如果熔渣中 Cr_2O_3 含量变多, 熔渣将会发泡, 渣层由于膨胀厚度增加, 其表面张力下降, 阻碍渣液与钢水的热交换过程, 导致炉内下层钢水与渣液上层表面的温差随 Cr_2O_3 含量的增加而增大; 反之, 当渣中 Cr_2O_3 含量下降, 炉内下层钢水与渣液上层表面的温差随 $Cr_2O_2O_3$ 含量的减少而降低, 所以, 文中选用上下层温差信号来表征喷溅。

1.2 AOD 抑制喷溅系统的硬件配置

喷溅控制系统采用西门子 S7-300PLC 进行控制, 系统输入量是炉内下层钢水与渣液上层表面的温差, 输出量是氧枪位置、氧气流量、氮气流量、喷溅抑制剂加入量。

输入量温差分别由安装在顶枪和底枪上的红外测温装置按采样周期在线测得, 非接触测取炉内铁水上面的渣液温度和铁水温度, PLC 实行温差的同步计算; 变频器根据 PLC 的输出指令控制枪位的升降; 氧气、氮气的流量分别由流量调节阀实现脉宽调制式恒流量控制; 喷溅抑制剂通过控制电磁振动给料机添加。抑制 AOD 炉喷溅系统的整体框图如图 1 所示。

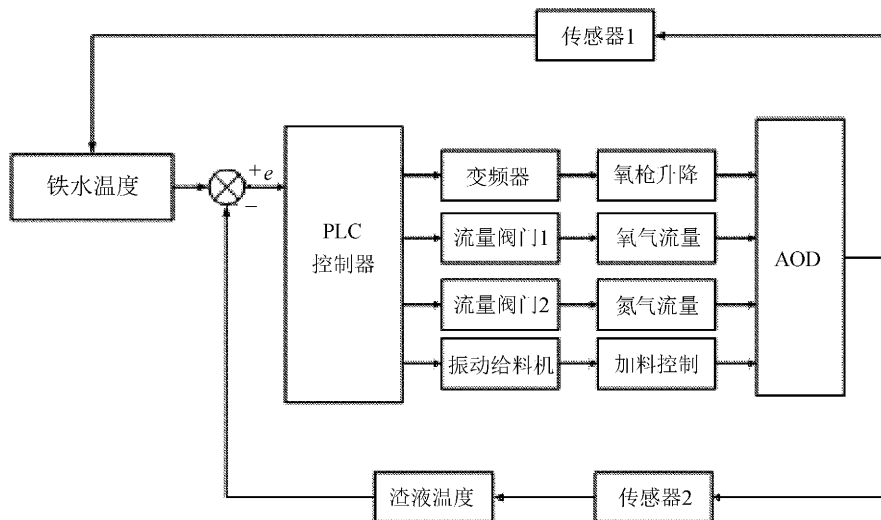


图 1 AOD 炉抑制喷溅控制闭环框图

2 粒子群算法优化 PID 控制 AOD 炉抑制喷溅方法

2.1 理论依据

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimiza-

tion, PSO) 是一种基于群体智能的优化算法, 其思想受启发于鸟类的捕食行为^[6]。粒子群优化算法起始于对可行域中一群随机粒子的初始化, 每个粒子都用位置、速度和适应度值三项指标衡量

该粒子的优劣,且每个粒子代表优化问题的一个潜在最优解,其中适应度值由适应度函数计算得到,其值的大小表征了粒子的好坏。

假设一个搜索空间是 D 维的,种群为由 n 个粒子组成的 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 。每个微粒都有一个位置矢量和一个速度矢量,分别表示为: $\mathbf{X}_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ 和 $\mathbf{V}_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$ 。粒子们跟踪两个“极值”在解空间中搜索。第1个极值是粒子本身所找到的最优解,这个解称作个体极值 K_d , 记为 $P_i=(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})$; 第2个极值是群体所有微粒经历过的有最好的适应度的位置,这个极值就是全局极值 G_{Best} , 记为 $G_i=(G_{i1}, G_{i2}, \dots, G_{iD})$ 。也可以不用整个种群,而只用其中一部分作为粒子的邻居,那么在所有邻居中的极值就是局部极值。在每一次迭代计算中,粒子的第 d 维 ($1 \leq d \leq D$) 根据如下公式更新自己的速度和位置^[7]:

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (6)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (7)$$

式中: i ——微粒;

j ——微粒的第 j 维;

t ——第 t 代;

c_1, c_2 ——加速常数,通常在 $0 \sim 2$ 间取值;

$r_1 \sim U(0, 1), r_2 \sim U(0, 1)$ ——两个相互独立的随机函数。

微粒的速度 V_{id} 被一个最大速度 V_{max} 所限制; 粒子的位置也被限制在 $[V_{\text{min}}, V_{\text{max}}]$ 之间。

c_1, c_2 代表将每个粒子推向个体极值和全局极值位置的统计加速项的权值。较低的值允许粒子在被拉回之前可以在目标区域外徘徊,较高的值导致粒子突然地冲向或越过目标区域。可以通过下式改变加速因子:

$$c_1 = (c_{1f} - c_{1i}) \frac{n_{\text{iter}}}{\max n_{\text{iter}}} + c_{1i} \quad (8)$$

$$c_2 = (c_{2f} - c_{2i}) \frac{n_{\text{iter}}}{\max n_{\text{iter}}} + c_{2i} \quad (9)$$

式中: $c_{1f}, c_{1i}, c_{2f}, c_{2i}$ ——常量;

iter ——当前迭代次数。

2.2 粒子群优化算法改进策略

在基本粒子群优化算法中,可以把粒子的速度看做是搜索的步长,它直接决定着算法的全局收敛性。而惯性权重 w 表示了粒子受当前时刻速度影

响的比重,一方面使得粒子保持运动惯性,另一方面让粒子具备一定的搜索新区域的能力^[8]。通过大量研究发现,改变惯性权重 w 的大小可以协调粒子群优化算法的局部搜索和全局搜索能力。在速度进化方程中引入惯性权重,即:

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (10)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (11)$$

当 $w=0$ 时,粒子的速度仅由其当前位置指标 P_{Best} 和 G_{Best} 决定,而不受当前速度的影响; 当 $w \neq 0$ 时,粒子具备扩大搜索空间的能力,并且惯性权重 w 越大,粒子的速度越大,粒子就以越大的步长进行全局寻优; 与此相反的是,惯性权重 w 越小,粒子的速度越小,粒子就更具有进行局部搜索的趋势。文中采用的是文献^[9]建议的线性递减权值(Linearly Decreasing Weight, LDW)策略,即

$$w = w_{\text{max}} - \frac{(w_{\text{max}} - w_{\text{min}}) \times t}{T_{\text{max}}} \quad (12)$$

式中: $w_{\text{max}}, w_{\text{min}}$ ——惯性权重的最大取值和最小取值;

t ——随着优化过程变化的当前进化代数;

T_{max} ——事先设定的最大进化代数。

采用线性递减权值策略,可以对惯性权重 w 进行动态调整; 在优化的初始阶段,将一相对较大值赋给 w ,目的是让各个粒子在全局范围内以较大的速度寻优; 随着优化过程的进行,线性地减小 w ,目的是在寻优的后期,使粒子能够在极值附近做更加细微的搜索。通过这种策略,协调了算法的局部搜索能力和全局搜索能力,使算法以更高的概率寻优到全局最优解。

2.3 PSO-PID 控制器的设计

PID 控制器的系统结构如图 2 所示。

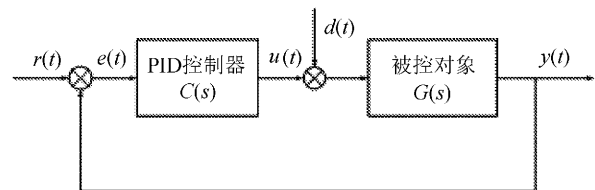


图2 PID 控制系统框图

图中: $C(s)$ ——PID 控制器的传递函数;

$G(s)$ ——被控对象的传递函数;

$r(t)$ ——系统输入;

$y(t)$ ——系统输出;
 $e(t)$ ——输入输出之间的误差;
 $u(t)$ ——控制器输出;
 $d(t)$ ——扰动。

PID 控制器的输出为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

PID 参数优化整定就是要在 K_p 、 K_i 、 K_d 的可行域空间内找到某一组控制参数,常用的指标有 ISE、IAE、ITAE、ISTE 等,文中选用 ITAE 指标,其定义为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (14)$$

基于粒子群优化算法,依据最小化响应速度和超调量的目标,搜寻该系统模型的 PID 控制的一组最优增益 K_p 、 K_i 、 K_d ,具体步骤如下:

1) 设置迭代次数,种群规模,粒子的位置向量、速度向量、 P_{Best} 和 G_{Best} ,确定惯性权重、学习因子、适应度函数的加权系数等,程序初始化。

2) 控制系统仿真,获取需要的性能参数,计算适应度函数。

3) 评价每个粒子的适应度并更新。将粒子适应值与个体极值 P_{Best} 比较,如果优于,则更新个体极值,并将各个粒子的适应值与全局极值比较,如果优于,则更新全局极值,否则,不更新。

4) 更新粒子位置及速度。按照式(4)和式(5)对每一个粒子的位置和速度进行更新。

5) 检验是否达到迭代的次数。如果当前的迭代次数达到了最大次数,则停止迭代,输出最优解。否则转到步骤 2)。

6) 控制器最终会得到一组最优解集,决策者选择最优解集中的最优解进行 PID 控制。

3 系统仿真

抑制喷溅系统为单输入多输出系统,分别为氧气流量、氮气流量、氧枪位置、喷溅抑制剂加入量的控制方式,为方便控制分为四个单输入单输出系统,因控制方式相同,以对氧枪位置的控制为例。由 PID 的控制原理可知,PID 控制器的控制量是系统的误差,误差量一般由系统的期望输出值(输入量)与实际输出比较得到。为检验该系统时域响应性能,设定参考位置信号为阶跃信号,幅值为 1。对氧枪高度的控制是通过电机实现的,

其等效模型可简化为二阶系统,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{4s^2 + 3s + 2}$$

3.1 常规 PID 控制的阶跃信号响应

根据文献[10]中提供的经验整定方法,得到 PID 的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 8、5、14.5。仿真后得到的系统响应如图 3 所示。

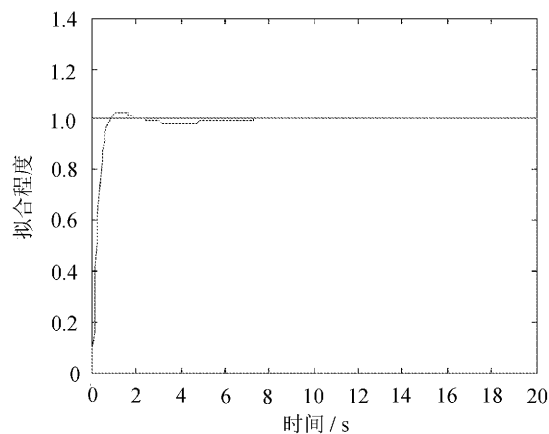


图 3 常规 PID 控制器拟合图像

3.2 PSO 优化得到的 PID 参数

PSO 优化 PID 过程部分的程序实现如下:

```
function z=PSO_PID(x)
assignin('base','Kp',x(1)); %粒子依次赋值给 Kp
assignin('base','Ki',x(2)); %粒子依次赋值给 Ki
assignin('base','Kd',x(3)); %粒子依次赋值给 Kd
[t_time,x_state,y_out]=sim('PID_Model',[0,10]);
%使用命令运行控制系统模型 10s
z=y_out(end,1); %还回性能指标
```

其中, x 为 PSO 传递来的粒子,首先调用函数 assignin 将 $x(1) \sim x(3)$ 的赋值给 Workplace 中的 PID 的参数 K_p 、 K_i 、 K_d ;调用函数 sim 对 Simulink 进行仿真,其中 PID_Model 是 Simulink 模型的文件名,[0,10]为仿真时间,还回的 y_out 即为输出端子 1 的值;最后将性能指标 ITAE 赋值给 z,以实现从 Simulink 部分到 PSO 部分的参数传递。仿真参数选择如下:粒子群维数取为 3,粒子数为 30;惯性权重 ω 从 0.9 开始随着迭代代数逐步递减到 0.1; V_{max} 设定为参数的范围宽度 1.2;加速常数 C_1 、 C_2 等于 2;迭代次数为 30。运行 Matlab 粒子群优化程序后得到 PID 的 3 个参数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别为 13.519 8、20.008 6、22.837 7。运行 Matlab 主程序后得到系统仿真如图 4 所示。

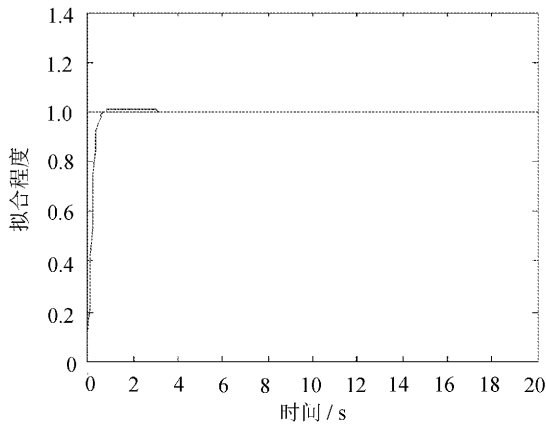


图 4 PSO 优化 PID 控制器拟合图像

粒子群算法的寻优历程如图 5 所示。

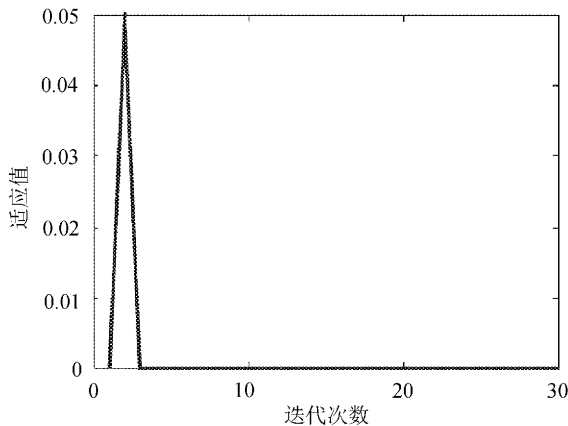


图 5 粒子群算法的寻优历程

从图 3、图 4 可以得到喷溅系统在常规 PID 和 PSO 优化 PID 控制下的阶跃信号响应指标,见表 1。

表 1 系统的阶跃信号响应

算法	上升时间/s	稳态时间/s	超调量/%
常规 PID	0.9	7.5	3.10
PSO 优化 PID	0.7	4.5	0.56

从表 1 可以看出,PSO 优化 PID 相比于常规 PID 无论是稳定时间还是超调量都有明显改善,并且系统振荡减小,对于快速实现抑制系统喷溅有很好的效果。而且通过图 5 可以看出,粒子群在全局寻优过程中能逐步迅速找到最优值。用粒子群算法改进 PID 可以克服传统 PID 控制自适应能力差,对非线性系统控制效果不佳的缺点,并且带惯性权重的 PSO 避免了常规 PSO 收敛速度较慢的不足,缩短了响应达到稳态的时间,同时也

平衡了全局搜索与局部搜索的能力。

4 结 语

在 AOD 炉的抑制喷溅系统中采用惯性权重粒子群算法改进 PID 控制,能避免常规粒子群算法收敛速度慢、精度低的缺陷。文中引入惯性因子的粒子群算法优化 PID 用于 AOD 炉的抑制喷溅系统,突破了传统模型的局限性,实现了喷溅的动态控制,降低生产成本和事故的发生。把对系统喷溅的控制转化为对 Cr_2O_3 的控制,进而转化为对渣液上层表面与炉内下层铁水温差的间接控制。对系统的 4 个输出量氧枪位置、氧气流量、氮气流量和喷溅抑制剂加入量采取分别控制,简化了系统的控制方式。引用惯性权重粒子群算法与常规 PID 控制相比具有收敛速度较快、优化性能好、响应时间短和超调量小的特点。

参考文献:

- [1] 黄希祐.钢铁冶金原理[M].3 版.北京:冶金工业出版社,2002:355-357.
- [2] 郑杰.莱钢 90 t 转炉喷溅原因分析与对策[J].山东冶金,2011,33(3):12-13.
- [3] 于欢欢,许红岩,张洋.模糊控制在 AOD 炉冶炼铬铁合金喷溅系统中的应用[J].长春工业大学学报:自然科学版,2011,32(2):1-6.
- [4] Hagiwara T, Araki M. Design of stable state feedback controller based on the muirate sampling of the plant output[J]. IEEE Trans on Automatic Control,1988,33(9):812-819.
- [5] 贾振海.氩氧炉生产中、低、微碳铬铁的新工艺[J].铁合金,2005,36(2):11-16.
- [6] 魏秀业,潘宏侠.粒子群优化及智能故障诊断[M].北京:国防工业出版社,2010.
- [7] 李宁,何汉青,潘利群.多输入多输出炉温模糊控制研究[J].基础自动化,2000,7(6):13-15.
- [8] 焦嵩鸣,谭雨林,桑士杰.基于改进粒子群算法的主汽温控制系统 PID 参数优化[J].电力科学与工程,2012,28(12):9-13.
- [9] 尤文,马海涛,赵彬.氩氧精炼低碳铬铁过程喷溅预报及控制[J].长春工业大学学报:自然科学版,2012,33(5):537-542.
- [10] 黄凯.起重机自适应智能防摆方法及其仿真研究[D].南京:南京林业大学机械设计及理论学院,2007:8-102.