

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902835

# 基于 Gamma 加速积灰模型的燃煤锅炉吹灰优化\*

张泽慧 史元浩

(中北大学 电气与控制工程学院 太原 030051)

**摘要:**针对燃煤锅炉受热面吹灰操作不合理的问题,以吹灰最小费用为目标,提出一种基于 Gamma 加速积灰模型的吹灰优化方法。首先分析在锅炉受热面的积灰状态呈连续单调递增的情况下,以一个服从指数分布的连续非负的随机变量来表示锅炉受热面积灰的速度,建立加速积灰模型;其次,将积灰过程近似成 Gamma 过程,以最小平均费用为目标,建立了锅炉受热面的吹灰优化模型。以某 300 MW 燃煤机组省煤器的受热面积灰状态为算例分析,利用粒子群优化算法优化吹灰平均费用率,得到锅炉受热面最佳的吹灰次数和吹灰阈值,使得锅炉受热面吹灰的平均费用率最小,说明了所提出的吹灰最小费用率优化模型的可行性。

**关键词:**平均费用率;Gamma 过程;清洁因子;加速积灰模型;吹灰优化

**中图分类号:** TN201;TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Soot blowing optimization based on Gamma accelerated ash accumulation model for coal-fired boilers

Zhang Zehui Shi Yuanhao

(School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of improper ash blowing operation on the heating surface of coal-fired boilers, this paper proposes a soot blowing optimization method based on Gamma acceleration soot deposition model with the aim of minimizing soot blowing cost. In this paper, firstly, in the case that the ash accumulation state on the heating surface of the boiler is continuously monotonically increasing, a continuous non-negative random variable obeying the exponential distribution is used to express the ash velocity of the boiler heating area, and an accelerated ash accumulation model is established; Secondly, under the circumstance the ash process is regarded as a similar process to the Gamma model. An optimized model for ash blowing on the heating surface of the boiler is established to minimize the average cost. Taking the ash state of the heating area of a 300 MW coal-fired economizer as an example, the PSO algorithm is used to optimize the average cost of ash blowing, obtaining the best soot blowing times and soot blowing thresholds on the heating surface of the boiler, so that making the average cost of the soot blowing on the heating surface of the boiler smallest. It also illustrates the feasibility of the minimum cost rate optimization model proposed in this paper.

**Keywords:** average cost rate; Gamma process; cleaning factor; accelerated ash accumulation model; ash blowing optimization

## 0 引言

我国环境问题日益严重,燃煤电站原煤得不到充分燃烧,污染和环保的问题不断突出,为了使其锅炉原煤充分燃烧以及锅炉受热面及时清灰,提高锅炉运行效率,减

少运行成本,现对锅炉吹灰系统进行建模,并对其深入研究<sup>[1-2]</sup>。燃煤锅炉机组在运行的过程中,受热面会不断地产生积灰和结渣,这些积灰和结渣会不断地积累,导致灰污热阻率增大,传热能力下降,如果不及时进行吹灰操作,很大程度上影响了燃煤锅炉机组的正常运行,降低了锅炉运行效率,增加了锅炉运行成本和吹灰费用。从积

收稿日期: 2019-12-17 Received Date: 2019-12-17

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61533013)、山西省重点研发计划(201703D111011)、山西省自然科学基金(201801D121159)、山西省青年自然科学基金(201801D221208)资助项目

灰和结渣所产生的吹灰费用出发,对积灰受热面及时进行有效吹灰是十分必要的<sup>[3-7]</sup>。现阶段,基本上所有的燃煤电站都配有一套完备可靠的吹灰操作系统以及吹灰设备,并且按照在规定的时间内定时定量进行吹灰操作。这种漫无目的的吹灰方式不仅造成了不可再生能源的浪费,还会因吹灰不及时或吹灰过度所导致的受热面损坏以及寿命减短等问题,而且这种盲目的吹灰方式还会造成燃煤锅炉机组的运行成本以及吹灰费用的增加。因此,对锅炉受热面的锅炉吹灰优化的研究是很有必要的。

近年来,随着测量仪器技术的发展和积灰结渣原理的不断深入研究,一些发达国家开始对锅炉受热面积灰问题进行研究。20世纪90年代,美国的 Honeywell 公司利用数据分析对燃煤电站进行了吹灰,这种及时有效的吹灰与定时定量的吹灰相比在很大程度上减少了吹灰所产生的费用成本,并在一定程度上提高了锅炉运行的安全性和经济性。Peña 等<sup>[8]</sup>则运用专家系统建立了概率模型,以人工神经网络和自适应神经模糊推理预测吹灰效果,这种方法需要做模型和数据的训练。阎维平等<sup>[9]</sup>在分析试验结果和运行状况之下,结合锅炉受热面的污染特性,提出了优化现有吹灰器以及改造声波吹灰器等方法进行锅炉吹灰。徐力刚等<sup>[10]</sup>通过对炉膛结渣进行监测,分析监测的结果,提出一种基于时间单位炉膛传热量最大的吹灰优化模型。这些吹灰优化模型的建立,在一定程度上避免了盲目吹灰,更加的安全可靠,但却没有考虑到吹灰成本的相关问题。

因此,在燃煤锅炉系统的正常运行中,为了使每次吹灰的费用最少,对其受热面积灰情况的研究是非常有必要的。本文以锅炉受热面吹灰的经济性为研究目的,去解决定时定量等一些传统吹灰方式所产生的弊端,由此建立了吹灰优化的费用率模型,同时考虑到吹灰效果的不同建立受热面积灰加速模型,从而来确定吹灰操作的最小费用。最后用锅炉受热面清洁因子(CF)的监测数据作为算例分析的数据确定出最佳的吹灰优化方法到达吹灰所用的费用最少。

## 1 吹灰优化策略

### 1.1 基本假设

本文只考虑对受热面积灰采取何种吹灰方式,提出基于吹灰方式的吹灰优化模型,从而确定吹灰周期内所用的费用最小。由系统受热面的积灰状态性能呈连续单调退化<sup>[11-12]</sup>。定义  $X(t)$  为  $t$  时刻系统的积灰劣化状态,做出如下基本假设。

假设 1 系统初始时积灰程度,即初始状态  $X(0)$  为 0,表示一个系统处于全新的状态。

假设 2 多次吹灰操作后系统积灰速度加快。

假设 3 所有的吹灰操作都能使系统受热面状态“恢复如新”,即吹灰操作后受热面积灰状态返回到最初的全新工作状态。

假设 4 系统受热面吹灰操作优化的目标函数为系统受热面运行周期内吹灰操作所产生的平均费用率最低。

### 1.2 吹灰优化模型

在吹灰优化模型下,主要面临两个决策:何时采取吹灰操作和何时该进行预防性吹灰策略。而吹灰操作策略依赖于系统受热面实时的积灰状态  $X(t)$ 。定义当前检测与下一次检测的时间间隔为  $T$ 、临近吹灰阈值  $\varepsilon$  和失效吹灰阈值  $L$  ( $\varepsilon < L$ )。何时采取吹灰操作取决于第  $k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) 次检测时系统受热面积灰劣化状态  $X(kT)$  与阈值  $\varepsilon$  和  $L$  之间的关系,如图 1 所示。

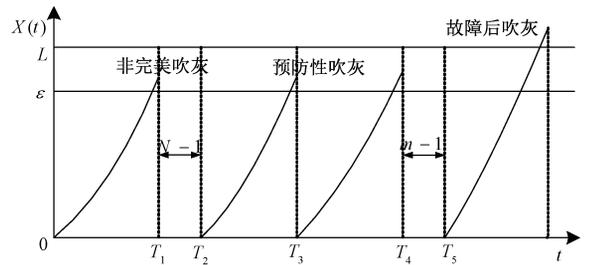


图 1 吹灰优化模型的吹灰操作过程

Fig. 1 Soot blowing operation process of soot blowing optimization model

1) 当  $X(kT) < \varepsilon$  时,系统受热面积灰劣化状态在正常范围内,不需要进行任何吹灰操作。图 1 的  $[0, \varepsilon]$  的区域为系统受热面积灰劣化状态为正常范围。

2) 当  $\varepsilon \leq X(kT) < L$  时,系统受热面积灰劣化状态在临近吹灰阈值范围内,系统未发生故障停机,仍可继续运行,但系统发生故障停机的风险高。图 1  $[\varepsilon, L]$  的区域为系统受热面积灰劣化状态为临近吹灰阈值范围内,如果检测到系统受热面积灰劣化状态处于该区域内,则需要进行非完美吹灰操作,由假设 2 和假设 3 可知非完美吹灰后系统受热面积灰劣化状态  $X(t)$  为 0,但系统积灰劣化速度比新系统的受热面积灰劣化速度加快。如果系统受热面经历  $N - 1$  次非完美吹灰且再次处于临近吹灰阈值范围内,那么系统受热面进行预防性吹灰,并由假设 3 可知预防性吹灰后系统受热面积灰劣化状态恢复如新,即  $X(t)$  为 0。此时假设系统受热面积灰劣化速度回归到初始的速度<sup>[13]</sup>。定义  $P_N$  为前  $N$  次吹灰操作时系统受热面未发生故障失效的概率。即系统受热面的积灰劣化状态在前  $N$  次吹灰操作时未处于失效吹灰阈值  $L$  处,意味着前  $N$  次吹灰操作时系统受热面积灰劣化状态均处于临近失效阈值范围内,共进行  $N - 1$  次非完美吹灰操作和 1 次预防性吹灰操作。

3) 当  $X(kT) \geq L$  时, 系统受热面积灰劣化状态到达失效吹灰阈值时, 需要进行故障停机后吹灰, 简称为故障后吹灰。并由假设 3 可知故障后吹灰系统受热面积灰劣化状态恢复如新, 即  $X(t)$  为 0。此时假设系统受热面积灰劣化速度回归到初始的速度。图 1  $[L, +\infty]$  的区域为系统受热面积灰劣化状态为失效吹灰阈值范围, 定义  $P_m$  为前  $m-1$  次非完美或预防性吹灰操作时系统受热面未发生故障失效而第  $m$  次吹灰时系统受热面的积灰劣化状态处于失效阈值范围内的概率。即系统受热面的积灰劣化状态在前  $m-1$  次非完美或预防性吹灰操作时未处于失效吹灰阈值  $L$  处, 意味着前  $m-1$  次非完美或预防性吹灰操作时系统受热面积灰劣化状态均处于临近失效阈值范围内, 第  $m$  次系统受热面积灰劣化状态处于故障失效阈值范围内<sup>[14-15]</sup>。

吹灰优化策略问题解决的是选择合理的阈值  $\varepsilon$  和进行非完美吹灰策略的次数  $N$ , 来实现系统受热面吹灰的最优化。过低的阈值  $\varepsilon$  会使系统的传热量保持在较大范围内, 增加了系统运行的效率, 但由于阈值  $\varepsilon$  过低而频繁的进行吹灰操作进而产生较高的吹灰费用, 影响成本。过高的阈值  $\varepsilon$  会使系统的传热量较小, 降低系统的运行效率和增加系统的故障风险。另一方面, 吹灰次数  $N$  过大可能会延误最佳吹灰时间, 很难保证系统能安全可靠的运行。吹灰次数  $N$  过小虽然有利于实时检测系统受热面的积灰状态, 但产生的成本也随之增加。

本文从经济角度出发, 为了达到吹灰费用最小的目标, 通过选择最优的非完美吹灰的次数  $N$  和临近失效阈值  $\varepsilon$ , 对系统受热面的积灰状态进行优化分析。假设系统在  $[0, \tau]$  时间内吹灰所需要的吹灰费用为  $C(\tau)$ , 锅炉长期运行的平均费用率为  $c_\infty$ 。由更新定理<sup>[16]</sup>可得,  $c_\infty$  可以锅炉一个寿命周期内的平均费用率表示。

$$c_\infty = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{C(0, \tau)}{\tau} = \frac{E(C(\tau))}{E(\tau)} \quad (1)$$

式中:  $c_\infty$  为锅炉长期运行的平均费用率;  $E(C(\tau))$  为受热面寿命周期运行的平均费用;  $E(\tau)$  为受热面平均寿命周期。为了减少吹灰成本, 使得经济效益中最高, 锅炉长期运行的平均费用率要最小, 即:

$$\min \{c_\infty\} = \min \left\{ \frac{E(C(\tau))}{E(\tau)} \right\} \quad (2)$$

随着系统受热面积灰状态的劣化以及吹灰次数的增加, 系统受热面积灰劣化速度逐渐加快, 假设系统已经历经  $N-1$  次非完美吹灰并且第  $N$  次再次到达临近吹灰阈值  $\varepsilon$ , 则进行预防性吹灰。系统在第  $m$  ( $m < N$ ) 次发生故障后吹灰, 即:

$$E(\tau) = \left[ T \cdot \sum_{i=1}^N E(K_i) + \sum_{i=1}^{N-1} E(Y_i) \right] P_N + \sum_{m=1}^N \left[ T \cdot \sum_{i=1}^N E(K_i) + \sum_{i=1}^{m-1} E(Y_i) \right] P_m \quad (3)$$

式中:  $Y_i$  表示第  $i$  次吹灰时长;  $K_i$  表示第  $i$  次吹灰周期内的检测次数。同理:

$$E(C(\tau)) = \left[ c_p \sum_{i=1}^{N-1} E(Y_i) + c_1 \right] P_N + \sum_{m=1}^N \left[ c_p \sum_{i=1}^{m-1} E(Y_i) + c_2 \right] P_m + c_r \quad (4)$$

式中:  $c_p$  表示单位时间非完美吹灰费用;  $c_1$  表示预防性吹灰费用;  $c_2$  表示故障后吹灰费用;  $c_r$  表示由于受热面积灰而损失的费用。为了求出  $E(\tau)$  和  $E(C(\tau))$  的表达式, 需要先求解出  $E(K_i)$ 、 $P_N$ 、 $P_m$  和  $E(Y_i)$  即可。由于待求解的参数都是基于系统受热面积灰劣化过程进行计算和估计, 因此需要先建立锅炉受热面灰污沉积加速模型, 并计算吹灰优化策略的参数。

## 2 锅炉受热面积灰监测模型

本文以某电厂 300 MW 燃煤机组省煤器的受热面为研究对象, 定义了各对流受热面的实际传热系数和理论传热系数的比值为该受热面的 CF, 可以用来描述受热面的清洁程度, 用各对流受热面的污染率 FF 来表示各受热面灰污沉积程度。

$$CF = \frac{K_r}{K_0} \quad (5)$$

$$FF = 1 - CF$$

式中:  $K_r$ 、 $K_0$  分别表示为受热面的实际传热系数和理论传热系数。

其中 Gamma 过程是具有独立增量并且呈单调递增的特性, 所以本文选用 Gamma 过程来描述受热面清洁因子的状态。假设随机过程  $\{X(t) | t \geq 0\}$  为 Gamma 过程, 表示系统在第  $i$  次吹灰周期内  $X(t)$  的概率密度函数和 Gamma 函数分别为:

$$f_{\alpha_i}(x) = \frac{\beta^{\alpha_i} x^{\alpha_i-1}}{\Gamma(\alpha_i)} e^{-\beta x}, x \geq 0 \quad (6)$$

$$\Gamma(\alpha_i t) = \int_0^\infty u^{\alpha_i-1} e^{-u} du, \alpha > 0$$

式中:  $x$  表示系统退化状态;  $\alpha_i$  和  $\beta$  分别为形状参数和尺度参数; 系统劣化率的均值为  $\alpha_i/\beta$ ; 方差为  $\alpha_i/\beta^2$ 。

根据 Gamma 过程的概率密度函数, 可知锅炉受热面积灰程度从全新状态 0 到达某一状态  $x$  的时间  $t_x$  的分布函数:

$$F_x(t) = P\{X(t) \geq x\} = \frac{\Gamma(\alpha_i t, x\beta)}{\Gamma(\alpha_i t)} \quad (7)$$

## 3 吹灰优化策略参数计算

### 3.1 积灰加速建模

为了模拟每次吹灰后对系统受热面积灰的影响, 根

据假设 2, 在进行多次吹灰后系统受热面积灰速度加快<sup>[17-19]</sup>。因此, 经过吹灰操作后, 系统的积灰劣化程度可以降低, 但积灰劣化速度可以提高。经过一次吹灰后, 系统的积灰劣化速度可以通过非负连续随机变量描述, 系统受热面积灰劣化速度的变化趋势如图 2 所示。

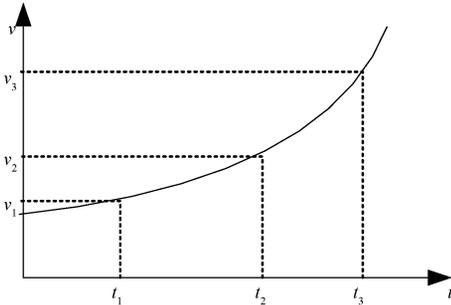


图 2 系统受热面积灰劣化速度变化曲线

Fig. 2 System heating area gray degradation rate curve

在第  $i$  次吹灰周期内系统的平均退化速度为:

$$v_i = \frac{\int_0^{+\infty} x f_{\alpha_i}(x) dx}{t} = \frac{\alpha_i}{\beta} \quad (8)$$

假设系统受热面的积灰劣化速度可以用  $\xi_k$  这一随机变量表示, 由图 2 可知这一随机变量是非负、连续且服从指数分布的, 其分布函数的概率密度为:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

根据指数分布的概率密度函数可得, 系统受热面在经过吹灰操作后, 其随机变量  $x$  的指数分布函数为:

$$P\{X \leq x\} = F(x) = 1 - e^{-\lambda x}, x > 0 \quad (10)$$

式中:  $\lambda$  是一个非负实数;  $\xi_k$  的均值  $E(\xi_k) = \lambda$ 。

通过吹灰优化模型可以知道, 如果第  $k$  次吹灰操作是一种预防性或者故障后吹灰操作, 则系统在吹灰后的积灰速度被重置为  $v_k = v_0 = \frac{\alpha_0}{\beta}$ 。如果第  $k$  次吹灰操作是一种不完美的吹灰操作, 则系统吹灰后的平均积灰速度为  $v_k = v_{k-1} + \xi_k$ 。

图 3 为一个由于非完美吹灰操作而导致的积灰速度的提高。当系统受热面积灰状态到达  $X_{T_i} (\varepsilon < X_{T_i} < L)$  时, 进行非完美吹灰操作, 操作完成后系统受热面积灰状态为 0, 此时的系统受热面积灰劣化速度由原来的  $v_0$  变化为  $v_1 (v_1 > v_0)$ 。

### 3.2 第 $i$ 个吹灰周期内的平均检测次数 $E(K_i)$

设  $X_i(t)$  表示第  $i$  个吹灰周期内  $t$  时刻系统受热面的灰污沉积状态, 在每一次吹灰完成后系统的积灰状态置为 0, 所以有  $X_i(0) = 0$ , 对于第  $k (k = 1, 2, \dots)$  次吹灰, 系统在第  $i$  个吹灰周期内的平均吹灰次数为:

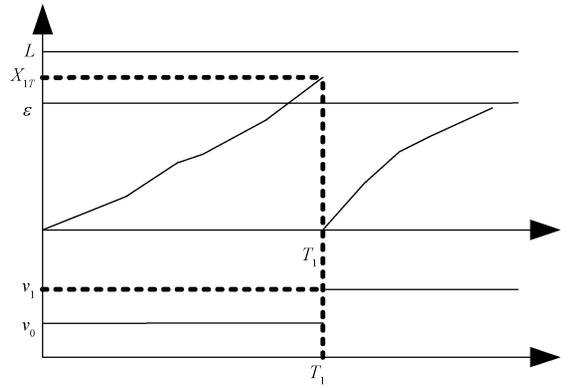


图 3 劣化加速模型描述

Fig. 3 Description of the degradation acceleration model

$$E(K_i) = \sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P \left\{ \begin{array}{l} \text{前 } k-1 \text{ 次检测时不需要进行吹灰,} \\ \text{第 } k \text{ 次检测时进行吹灰} \end{array} \right\} =$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P\{X_i((k-1)T) < \varepsilon, \varepsilon \leq X_i(kT) < L\} =$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} k \cdot P\{X_i((k-1)T) < \varepsilon, \varepsilon \leq X_i((k-1)T) + X_i(T) < L\} =$$

$$\int_{\varepsilon}^L f_{\alpha_i T, \beta}(y) dy + \sum_{k=2}^{\infty} k \cdot \int_0^{\varepsilon} f_{\alpha_i(k-1)T, \beta}(x) \int_{\varepsilon-x}^{L-x} f_{\alpha_i T, \beta}(y) dy dx \quad (11)$$

式中:  $f_{\alpha_i T, \beta}(x)$  为第  $i$  个吹灰周期内 Gamma 过程  $X_i(t)$  的概率密度函数, 具体的表达式如式 (6) 所示。由于 Gamma 过程  $X_i(t)$  具有平稳的独立增量性质, 即  $X_i(kT) = X_i((k-1)T) + X_i(T)$  成立。

### 3.3 第 $i$ 次吹灰的平均时间 $E(Y_i)$

在锅炉吹灰实际系统中, 吹灰用时的时长与系统受热面的劣化程度成正比, 即严重劣化系统的吹灰用时要高于轻微劣化系统的吹灰用时; 这是因为多次吹灰操作会使系统受热面的老化程度加快, 从而增加了吹灰用时<sup>[20-22]</sup>。本文将吹灰次数与系统受热面积灰状态作为自变量, 得到系统受热面吹灰时长的线性回归模型如下:

$$Y_i = h(i, X(t)) = \xi_0 + \xi_1 i + \xi_2 x \quad (12)$$

式中:  $Y_i$  表示吹灰时长,  $i$  为维修次数;  $\xi_0, \xi_1$  和  $\xi_2$  为相关系数。第  $i$  次吹灰的平均用时为:

$$E(Y_i) = E(h[i, X_i(t)]) = \sum_{k=1}^{\infty} E(h[i, X_i(t)]) \cdot$$

$$P\{\text{第 } k \text{ 次吹灰时刻为 } K_i T\} = \sum_{K_i=1}^{\infty} E(h[i, X_i(t)]) \cdot$$

$$P\{X_i((K_i-1)T) < \varepsilon, \varepsilon \leq X_i((K_i-1)T) + X_i(t) < L\} =$$

$$\int_{\varepsilon}^L h(i, y) f_{\alpha_i T, \beta}(y) dy + \sum_{K_i=2}^{\infty} \int_0^{\varepsilon} f_{\alpha_i(K_i-1)T, \beta}(x) \cdot$$

$$\int_{\varepsilon-x}^{L-x} h(i, y) f_{\alpha_i T, \beta}(y) dy dx \quad (13)$$

### 3.4 概率 $P_N$ 和 $P_m$ 的计算

设第  $j$  次吹灰时刻为  $K_j T$ , 即在前  $N$  次进行吹灰时系

统并未发生故障失效的概率为:

$$P_N = \prod_{j=1}^N P\{\text{第 } j \text{ 次吹灰时系统未发生故障失效}\} = \prod_{j=1}^N \left( \sum_{K_j=1}^{\infty} P\{X_j((K_j - 1)T < \varepsilon, \varepsilon \leq X_j(K_j T) < L)\} \right) = \prod_{j=1}^N \left[ \int_{\varepsilon}^L f_{a_j T, \beta}(y) dy + \sum_{K_j=2}^{\infty} \int_0^{\varepsilon} f_{a_j(K_j-1)T, \beta}(x) \cdot \int_{\varepsilon-x}^{L-x} f_{a_j T, \beta}(y) dy dx \right] \quad (14)$$

假设前  $m - 1$  次非完美或预防性吹灰操作时系统受热面未发生故障失效,那么在第  $m$  次系统受热面积灰劣化状态处于故障失效阈值范围内,即第  $m$  次吹灰期内发生故障失效的概率为:

$$P_m = \prod_{j=1}^{m-1} P\{\text{第 } j \text{ 次吹灰时系统未发生故障失效}\} \cdot P\{\text{第 } m \text{ 次吹灰时系统发生故障失效}\} = \prod_{j=1}^{m-1} \left[ \int_{\varepsilon}^L f_{a_j T, \beta}(y) dy + \sum_{K_j=2}^{\infty} \int_0^{\varepsilon} f_{a_j(K_j-1)T, \beta}(x) \cdot \int_{\varepsilon-x}^{L-x} f_{a_j T, \beta}(y) dy dx \right] \cdot \left[ \int_{\varepsilon}^L f_{a_m T, \beta}(y) dy + \sum_{K_m=2}^{\infty} \int_0^{\varepsilon} f_{a_m(K_m-1)T, \beta}(x) \int_{L-x}^{\infty} f_{a_m T, \beta}(y) dy dx \right] \quad (15)$$

将式(3)和(4)和(11)~(15)代入到式(2)中,即可求得系统平均最小费用率  $\min\{C_{\infty}\}$  的解析表达式。

### 4 算例分析

根据研究对象 300 MW 燃煤机组省煤器受热面的数据可得到省煤器污染率的变化曲线如图 4 所示。

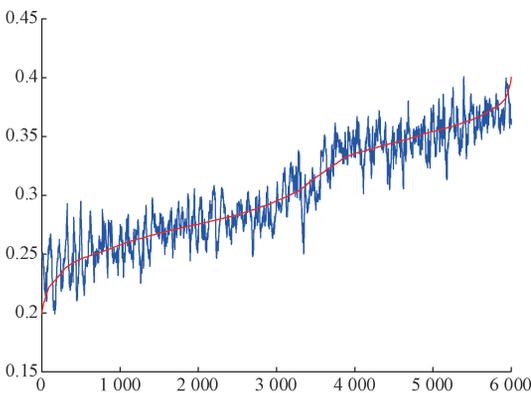


图 4 原始数据拟合图  
Fig. 4 Raw data fit graph

表 1 不同临界吹灰阈值  $\varepsilon_i$  下的最优吹灰次数  $N_i$  与平均费用率  $C_{\infty}$

Table 1 Optimal number of soot blowing  $N_i$  and average cost rate  $C_{\infty}$  under different critical soot thresholds  $\varepsilon_i$

$\varepsilon_i$	0.238 5	0.242 9	0.265 8	0.286 5	0.308 5	0.328 2	0.348 8	0.367 4	0.387 5
$N_i$	15	15	14	13	9	9	6	5	3
$C_{\infty}$	0.910 5	0.887 4	0.822 6	0.801 1	0.798 0	0.790 2	0.793 7	0.842 2	0.886 3

通过极大似然估计该组清洁因子数据服从 Gamma 分布的参数  $\alpha_0 = 1.02, \beta = 0.006 6$ , 系统的吹灰失效阈值  $L$  设置为 0.5。考虑到实际的情况,清洁因子的采集时间间隔  $T=5$  s。随着吹灰次数的增加,系统的劣化速度加快,在系统的一个寿命周期内,单位时间非完美吹灰费用  $c_p = 120$ , 预防性吹灰费用  $c_1 = 180$ , 故障后吹灰费用  $c_2 = 1 500$ , 受热面积灰而损失的费用  $c_r = 60$ , 其中  $\xi_0 = -0.214, \xi_1 = 0.108, \xi_2 = 0.427$ 。将以上各个参数代入到系统平均最小费用率  $\min\{C_{\infty}\}$  的表达式中,利用粒子群算法(PSO)多目标优化算法进行求解可以得到系统长期运行的最小费用率  $\min\{C_{\infty}\}$ , 如图 5 所示。

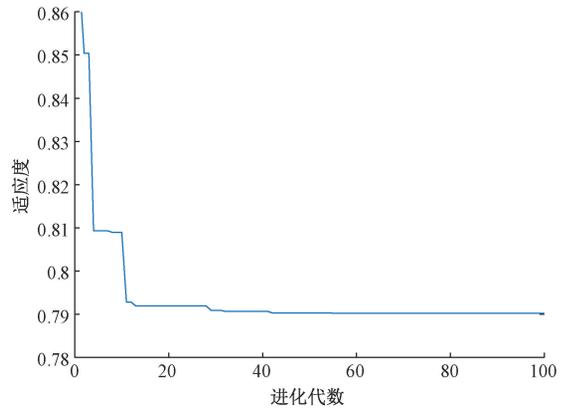


图 5 PSO 算法迭代曲线

Fig. 5 PSO algorithm iteration graph

图 5 中,最大进化代数为 100,优化执行次数为 1,经优化后最小平均费用率  $\min\{C_{\infty}\} = 0.790 2$ 。平均费用率  $C_{\infty}$  最小,此时的非完美吹灰次数  $N^* = 9$ , 临界吹灰阈值  $\varepsilon = 0.328 2$ , 计算结果如下表 1 所示。研究对象 300 MW 燃煤机组省煤器受热面的清洁因子用来表示表 1 的临界吹灰阈值  $\varepsilon_i$ , 从表 1 可以得出过大的吹灰阈值会减少吹灰次数但由此会导致积灰程度加深,受热面传热降低,增加了原煤的投入,由此会产生更大的平均费用率;吹灰阈值过小,会导致频繁吹灰,造成不必要的资源浪费,由于吹灰次数变多导致更大的平均费用率。所以通过对吹灰阈值的优化,选择合适的吹灰阈值和吹灰次数,使系统长期运行的平均费用率最低,节省更多的成本费用。并与文献[20]采用的基于吹灰剩余时间预测的吹灰优化方法所得出的最小费用率 0.885 8 进行对比,可以看出考虑加速积灰模型对锅炉受热面进行吹灰优化是可行的,而且费用率较低且吹灰效果更好。

## 5 结 论

本文考虑吹灰不能恢复如新的状况,建立了一种积灰加速模型,将积灰过程近似成 Gamma 过程,提出一种基于 Gamma 加速过程的燃煤锅炉受热面预防性吹灰优化策略,以 300 MW 燃煤机组省煤器受热面为研究对象,以最小吹灰成本为目标,建立了吹灰优化模型。系统平均费用率的表达式根据更新过程定理可以求得,并利用 PSO 算法求解出最优吹灰次数和最优吹灰阈值,通过算例分析看出,最优吹灰阈值和吹灰次数直接决定了系统平均费用率的大小。结果验证了本文提出方法的有效性和可行性,对锅炉受热面吹灰的相关研究有一定的参考作用,对锅炉的实际吹灰操作提高了理论指导。

## 参考文献

- [ 1 ] 丁敏. CFB 锅炉受热面积灰监测与吹灰优化[D]. 保定:华北电力大学, 2018.  
DING M. CFB Boiler heated area ash monitoring and soot blowing optimization [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018.
- [ 2 ] WEN J, SHI Y, PANG X, et al. Optimization of boiler soot blowing based on Hamilton-Jacobi-Bellman equation [J]. IEEE Access, 2019(7): 20850-20862.
- [ 3 ] 王新伟, 钱虹, 王佳辉. 基于烟道热量分布的受热面积灰程度模型[J]. 热力发电, 2020(6): 1-9.  
WANG X W, QIAN H, WANG J H. Based on flue heat distribution study on ash accumulation on heating surface [J]. Thermal Power Generation, 2020(6): 1-9.
- [ 4 ] 陈焯璇. 基于不同计算模型的燃煤电站锅炉吹灰优化系统的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2015.  
CHEN Y X. Research on soot blowing optimization system for coal-fires utility boiler based on different calculation models [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [ 5 ] DO P, VOISIN A, LEVRAT E, et al. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 133(11): 22-32.
- [ 6 ] NEVES M L, SANTIAGO L, MAIA C. A condition-based maintenance policy and input parameters estimation for deteriorating systems under periodic inspection [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011 ( 61 ): 503-511.
- [ 7 ] 张剑, 余岳峰, 田正林, 等. 电站锅炉炉膛局部结渣监测与吹灰优化[J]. 锅炉技术, 2019, 50(4): 1-9.  
ZHANG J, YU Y F, TIAN ZH L, et al. Local slagging monitoring and soot blowing optimization in furnace of

coal-fired utility boilers [J]. Boiler Technology, 2019, 50(4): 1-9.

- [ 8 ] PEÑA B, TERUEL E, DÍEZ L I. Soft-computing models for soot-blowing optimization in coal-fired utility boilers [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(2): 1657-68.
- [ 9 ] 阎维平, 董建聪, 高正阳, 等. 500 MW 机组塔式锅炉受热面污染特性分析与吹灰系统优化改造[J]. 热力发电, 2011, 40(8): 51-56.  
YAN W P, DONG J C, GAO ZH Y, et al. Analysis of heating surface fouling behavior and optimized retrofit of soot-blowing system for tower type boiler of 500MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(8): 51-56.
- [ 10 ] 徐力刚, 黄亚继, 王健, 等. 基于炉膛结渣监测模型的吹灰优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 63-70.  
XU L G, HUANG Y J, WANG J, et al. Optimization of soot blowing based on furnace slagging monitoring model [J]. Journal of Southeast University ( Natural Science Edition ), 2018, 48(1): 63-70.
- [ 11 ] 史元浩. 燃煤电站锅炉燃烧过程吹灰优化与燃烧优化控制[D]. 上海:上海交通大学, 2014.  
SHI Y H. Optimization control of ash blowing and combustion optimization in the combustion process of coal-fired power station boilers [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014.
- [ 12 ] SHI Y, WEN J, CUI F, et al. An optimization study on soot-blowing of air preheaters in coal-fired power plant boilers [J]. Energies, 2019, 12(5): 958.
- [ 13 ] 李玲, 成国庆, 柳炳祥. 基于 Gamma 过程的加速劣化系统模型及其最优视情维修策略[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(11): 2922-2927.  
LI L, CHENG G Q, LIU B X. Accelerated deteriorating system model based on Gamma process and its optimal condition-based maintenance policy [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2013, 19 ( 11 ): 2922-2927.
- [ 14 ] 陈闯, 陆宁云, 姜斌, 等. 单部件加速退化系统的视情维修策略优化[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(3): 613-619.  
CHEN CH, LU N Y, JIANG B, et al. Optimization of condition-based maintenance strategy for single-unit accelerated degrading systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(3): 613-619.
- [ 15 ] 石慧, 曾建潮. 考虑非完美维修的实时剩余寿命预测及维修决策模型[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(9): 2259-2266.  
SHI H, ZENG J CH. Prediction of real-time remaining useful life and maintenance decision model considering

imperfect preventive maintenance [ J ]. Computer integrated manufacturing system, 2014, 20 ( 9 ): 2259-2266.

[ 16 ] SHI Y, LI Q, WEN J, et al. Soot blowing optimization for frequency in economizers to improve boiler performance in coal-fired power plant [ J ]. Energies, 2019, 12(15) :2901.

[ 17 ] 韩志全, 张金龙, 徐靖喆, 等. 基于加速 Wiener 退化模型的管道裂缝评价和预测 [ J ]. 化工管理, 2019(22) :154-155.  
HAN ZH Q, ZHANG J L, XU J ZH. et al. Pipeline crack evaluation and prediction based on accelerated Wiener degradation model [ J ]. Chemical Management, 2019(22) :154-155.

[ 18 ] 王浩伟, 徐廷学, 赵建忠. 融合加速退化和现场实测退化数据的剩余寿命预测方法 [ J ]. 航空学报, 2014, 35 ( 12 ):3350-3357.  
WANG H W, XU Y X, ZHAO J ZH. Residual life prediction method fusing accelerated degradation and field degradation data [ J ]. Journal of Aviation, 2014, 35 ( 12 ):3350-3357.

[ 19 ] 张健强, 于泽忠, 郭大山, 等. 印度某 300 MW 煤粉锅炉吹灰实验与吹灰方式优化 [ J ]. 锅炉制造, 2017(1) :23-26.  
ZHANG J Q, YU Z ZH, GUO D SH, et al. Soot-blowing tests and soot-blowing optimization of the Indian 300 MW pulverized coal boiler [ J ]. Boiler Manufacturing, 2017(1) :23-26.

[ 20 ] 李强, 史元浩, 曾建潮. 基于剩余时间预测的电站锅炉吹灰优化研究 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(10) :59-64.  
LI Q, SHI Y H, ZENG J CH. Study on soot blowing optimization of utility boiler based on residual time prediction [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10) :59-64.

[ 21 ] 秦爽, 张卫军, 于泽忠, 等. 现代燃煤电站锅炉吹灰系统优化方向研究 [ J ]. 科学技术创新, 2018(14) : 167-168.  
QIN SH, ZHANG W J, YU Z ZH, et al. Research on optimization direction of soot blowing system formodern coal-fired power station boiler [ J ]. Scientific and Technological Innovation, 2018(14) :167-168.

[ 22 ] 姚婧, 黄竹青, 张路涛, 等. 燃煤锅炉受热面状态吹灰方案优化 [ J ]. 节能, 2013, 32(4) :27-30.  
YAO J, HUANG ZH Q, ZHANG L T, et al. Optimization of soot blowing scheme for heating surface of coal-fired boiler [ J ]. Energy Conservation, 2013, 32(4) :27-30.

作者简介



张泽慧, 2017 年于中北大学获得学士学位, 现为中北大学硕士研究生, 主要研究方向为故障预测与健康管理的。

E-mail:1573046638@qq.com

**Zhang Zehui** received her B. Sc. degree from North University of China in 2017, now she is a M. Sc. candidate at North University of China. Her main research interests include prognostics and health management.