文章编号:1674-7607(2026)01-0032-10 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240619

燃煤机组中速磨煤机制粉系统建模及运行特性研究

景 峥[1], 伍克宁[2], 刘百慧[1], 胡晓阳[1],
王 珠[1], 邱斌斌[1], 王进仕[1]
(1. 西安交通大学 能动学院,陕西西安 710049; 2. 河北西柏坡发电有限责任公司,河北石家庄 050000)

摘 要:建立精确的制粉系统模型并分析其运行特性,是系统运行控制优化的关键理论基础。搭建了包括磨煤机、一次风机、输煤管道等关键设备的磨辊式中速磨煤机制粉系统灰箱模型,其中耦合了磨煤机内部存煤量与运行参数的关系,考虑了煤粉细度对制粉系统出力的影响等。基于模型分析了制粉系统在单参数及固定风煤比时的稳态运行特性和启动过程中的动态运行特性。结果表明:当给煤量(质量流量)从 12 kg/s 增加到 26 kg/s 时,磨煤单耗从 10.26 kW·h/t 降低到7.14 kW·h/t,降低了 30.4%;在固定风煤比的情况下,一次风温和原煤水分质量分数是决定煤粉出口温度的关键因素,当风煤比为 1.6,一次风温从 260 ℃升高到 300 ℃时,出口风粉温度将升高 19.03%;在升负荷过程中,制粉系统出力延迟了 102 s。

关键词:中速磨煤机;制粉系统;粒径分布模型;煤粉细度;灰箱模型
中图分类号:TK621 **文献标志码**:A **学科分类号**:470.20

Study on Modeling and Operation Characteristics of Pulverized-coal Preparation System with Medium Speed Coal Mill for Coal-fired Units

JING Zheng[1], *WU Kening*[2], *LIU Baihui*[1], *HU Xiaoyang*[1],
WANG Zhu[1], *QIU Binbin*[1], *WANG Jinshi*[1]
(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
2. Hebei Xibaipo Power Generation Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China)

Abstract: Establishing an accurate model of the pulverized-coal preparation system and analyzing its operational characteristics are the key theoretical foundations for optimizing the system operational control. By incorporating the coupling relationship between the internal coal inventory of the coal mill and its operational parameters, and considering the impact of pulverized coal fineness on the output capacity of the coal pulverizing system, a gray box model of pulverized-coal preparation system with roller-type medium speed coal mills, encompassing key equipment such as coal mills, primary air fans, and coal conveying pipelines, was constructed. Based on this model, the steady-state operational characteristics of the pulverized-coal preparation system under single-parameter and fixed air-to-coal ratio conditions, as well as its dynamic operation-

收稿日期:2024-10-08 **修订日期**:2024-11-01
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100700)
作者简介:景 峥(1999—),男,陕西延安人,硕士研究生,研究方向为燃煤机组智慧运行控制。
王进仕(通信作者),男,教授,博导,E-mail:wangjinshi@xjtu.edu.cn。

al characteristics during the startup process, were analyzed. Results indicate that when the coal feed rate (mass flow rate) increases from 12 kg/s to 26 kg/s, the specific energy consumption for coal grinding decreases from 10.26 kW·h/t to 7.14 kW·h/t, representing a reduction of 30.4%. Under a fixed air-coal ratio, the primary air temperature and the mass fraction of moisture in raw coal are identified as the key factors determining the outlet temperature of pulverized coal. When the air-coal ratio is 1.6 and the primary air temperature rises from 260 ℃ to 300 ℃, the outlet air-coal mixture temperature increases by 19.03%. During the load-increasing process, the output capacity of the coal pulverizing system is delayed by 102 s.

Key words: medium speed coal mill; pulverized-coal preparation system; particle size distribution model; pulverized coal fineness; gray box model

为了加快促进能源电力绿色低碳转型[1]，我国燃煤发电正由常规主力电源向基础保障性和系统调节性电源并重转型[2]。发电系统的数字化建设是支撑能源电力转型的重要途经[3]，而燃煤电站智能化是其数字化转型的核心。

制粉系统是燃煤机组的重要组成部分。中速磨煤机制粉系统以其启动迅速、调节灵活、电耗较低的优点[4]而被大中型机组广泛采用。制粉系统对于机组的经济运行[5]和燃烧优化[6]至关重要，但其非线性、多变量、多输出的特点使得建立精确的系统模型较困难。因此，建立制粉系统的高精度模型，研究其运行特性，可以为发展先进的制粉控制系统和故障监测技术提供理论基础，是燃煤机组智能化建设的重要内容。

针对制粉系统及相关参数建模问题，国内外学者进行了探索，其中模型主要包括黑箱模型和灰箱模型。针对黑箱建模的研究中：陈波等[7]利用长短期记忆(LSTM)网络建立了燃煤机组磨煤机的性能预测模型；刘国福[8]利用反向传播(BP)神经网络建立了钢球磨煤机料位和运行电流的黑箱模型；Xie等[9]基于模糊神经网络算法建立了磨煤机内部存煤量的模型。黑箱模型能对建模范围内的工况进行高精度的预测，但解释性和泛化性能较差。针对灰箱建模的研究中：谷俊杰等[10]建立了包含钢球磨煤机压损、出口温度、料位和出力的机理模型；Li 等[11]建立包含原煤水分估计、电流和出口风粉温度等关键参数的制粉系统动态模型；Bhatt 等[12]基于第一性原理分别建立了采用静态分离器和动态分离器的磨煤机能量和质量平衡的数学模型，并且对 2 种系统的动态特性进行了讨论；王朝阳等[13]建立制粉系统动态模型，并且提出增加考虑煤质水分信息的控制策略优化研究；罗毅等[14]提出一种基于改进鲸鱼算法优化 Transformer 网络超参数的磨煤机故障预警方法；张元东[15]提出一种中速磨煤机特征分类及劣化分析算法。现有的灰箱模型普遍忽视了磨煤机干燥出力与磨煤机运行状态的耦合影响，并且忽略了煤粉细度对磨煤机出力的影响。

针对现有建模工作的不足，本文尝试依据燃煤机组制粉系统工作物理过程建立数学模型，对难以测定的过程系数采用待辨识参数表征并利用数据驱动的方法进行辨识，最终得到高精度的制粉系统灰箱模型。基于模型分析制粉系统稳态/动态运行特性，为其运行优化和智慧控制奠定理论基础。

1　制粉系统灰箱模型

1.1　制粉系统对象及工作过程

针对某 1 000 MW 超超临界机组的中速磨煤机正压直吹冷一次风机制粉系统进行建模研究。磨煤机为 MPS235HP-II 中速磨煤机，分离器为动静态分离器。磨煤机技术参数如表 1 所示。

表 1　磨煤机技术参数

Tab.1　Technical parameters of coal mill

参数	数值
转速/(r·min^{-1})	29.9
锅炉最大连续出力(BMCR)工况给煤量(质量流量)/(t·h^{-1})	117.49
煤粉细度/%	16
哈氏可磨系数	80
电机功率/kW	760
额定电压/kV	10

该制粉系统的工作过程如下：

(1) 原煤由给煤机输送，经落煤管进入磨盘。

(2) 原煤落入磨盘后，磨辊在液压加载力的作用下挤压原煤。原煤在碾磨部件和摩擦力的作用下逐渐被研磨成细煤。

(3) 煤粉在离心力作用下向磨盘外运动，切向抛出，迅速与一次风混合并进行换热。煤粉被一次风干燥和输送至磨煤机上部的分离区域。

(4) 被一次风携带的煤粉进入分离器中，粒径大的煤粉被分离，返回磨盘再次被碾磨；未被分离的煤粉则被一次风输送出磨煤机，经输煤管道供给锅炉燃烧。

1.2 制粉系统数学模型

1.2.1 磨煤机模型

将磨煤机划分为内部存煤量、换热、压损和功率子模型，并且建立能够反映磨煤机出口风温、进出口压差和运行电流等关键参数的精确模型。

(1) 磨煤机内部存煤量模型。

磨煤机内部煤的流动情况如图 1 所示，其中：$q_{m,\mathrm{raw}}$为来自给煤机的原煤质量流量，kg/s；$q_{m,\mathrm{back}}$为分离区返料的质量流量，kg/s；$q_{m,\mathrm{air}}$为一次风量(质量流量)，kg/s；$q_{m,\mathrm{out}}$为磨煤机给煤量，kg/s；$q_{m,\mathrm{gs}}$为从研磨区进入初步分离区的煤粉质量流量，kg/s；m_{c}为悬浮区的存煤量，kg；m_{plate}为磨盘上的煤量，kg；m_{g}为研磨区存煤量，kg。基于煤粉研磨的工作过程，磨煤机的内部可划分为磨盘区、研磨区、悬浮区和分离区。

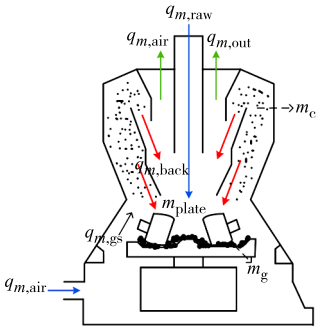


图 1 磨煤机内煤流动示意图

Fig. 1 Diagram of coal flow in coal mill

建立磨煤机内部存煤量的质量方程。

① 磨盘区存煤量模型。

来自给煤机的原煤和分离区返料落到磨盘上被磨辊研磨。从磨盘中心进入磨盘辊道的原煤质量流量为 $q_{m,\mathrm{tf}}$，依据质量守恒建立的动态平衡方程为

$$\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{plate}}}{\mathrm{d}t}=q_{m,\mathrm{raw}}+q_{m,\mathrm{back}}-q_{m,\mathrm{tf}} \tag{1}$$

式中：t 为煤粉从磨盘中心进入磨盘辊道的时间，s。

假设煤粉相对于磨盘做匀变速直线运动，则 t 为

$$t=\sqrt{\frac{2R}{a_{\mathrm{b}}}} \tag{2}$$

式中：R 为磨盘半径，m；a_{b}为磨盘上原煤的加速度，m/s^2。

由牛顿第二定律得到

$$a_{\mathrm{b}}=\omega_1^2R-\mu_{\mathrm{a}}g \tag{3}$$

式中：ω_1为磨盘转动的角速度，rad/s；μ_{a}为磨盘的动摩擦因数；g 为重力加速度，m/s^2。

此时，$q_{m,\mathrm{tf}}$为

$$q_{m,\mathrm{tf}}=\frac{m_{\mathrm{plate}}}{t} \tag{4}$$

② 研磨区存煤量模型。

研磨区接收磨盘区输送的原煤，并且使原煤在磨辊和旋转磨盘的挤压下碾压成煤粉。一次风将制成的煤粉吹起对其进行干燥，同时携带煤粉进入磨盘上方的初步分离区进行一次分离。石子煤被磨煤机排出。研磨区的质量守恒方程为

$$\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{g}}}{\mathrm{d}t}=q_{m,\mathrm{in}}-q_{m,\mathrm{out}}=q_{m,\mathrm{tf}}-q_{m,\mathrm{sz}}-q_{m,\mathrm{gs}}-\Delta w(\mathrm{M})q_{m,\mathrm{tf}} \tag{5}$$

$$\Delta w(\mathrm{M})=\frac{w(\mathrm{M_{ar}})-w(\mathrm{M_{pc}})}{1-w(\mathrm{M_{pc}})} \tag{6}$$

式中：$w(\mathrm{M_{pc}})$为研磨区煤粉中水的质量分数，%；$w(\mathrm{M_{ar}})$为原粉中水的质量分数，%；$\Delta w(\mathrm{M})$为煤中水分蒸发比；$q_{m,\mathrm{sz}}$为石子煤排放的质量流量，kg/s；$q_{m,\mathrm{in}}$为进入磨煤机煤的质量流量，kg/s。

石子煤排放质量流量 $q_{m,\mathrm{sz}}=k_{\mathrm{sz}}q_{m,\mathrm{tf}}$，其中相关参数 k_{sz}取 0.05%。

从研磨区进入初步分离区的煤粉质量流量 $q_{m,\mathrm{gs}}$为

$$q_{m,\mathrm{gs}}=k_1m_{\mathrm{g}} \tag{7}$$

式中：k_1为待辨识参数。

③ 悬浮区存煤量模型。

悬浮区是煤粉从离开研磨区到进入分离区的缓冲区间。一次风携带煤粉将研磨区研磨后的煤粉颗粒送入分离器进行分离。进入分离器煤粉的质量流量与悬浮区的存煤量 m_{c}及一次风量 $q_{m,\mathrm{air}}$成正比。悬浮区的存煤量方程为

$$\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t}=q_{m,\mathrm{gs}}-q_{m,\mathrm{left}} \tag{8}$$

$$q_{m,\mathrm{left}}=k_2\frac{q_{m,\mathrm{air}}}{\rho_{\mathrm{tm}}}m_{\mathrm{c}} \tag{9}$$

式中：$q_{m,\mathrm{left}}$为离开悬浮区进入分离区煤粉的质量流量，kg/s；ρ_{tm}为一次风密度，kg/m^3；k_2为待辨识参数。

④ 分离区存煤量模型。

磨煤机采用动静态分离器实现煤粉颗粒的筛分。分离区的存煤量方程为

$$q_{m,\mathrm{out}}=k_{\mathrm{se}}q_{m,\mathrm{left}} \tag{10}$$

$$q_{m,\mathrm{back}}=q_{m,\mathrm{left}}-q_{m,\mathrm{out}} \tag{11}$$

式中：k_{se}为分离区的分离系数。

分离区的分离系数表征了动静态分离器对于煤粉粒径的筛分特性。结合被破碎煤粉的粒径分布规律和煤粉细度对该系数进行计算。

采用 Rosin-Rammler 分布模型描述研磨后煤粉的粒径分布规律[16]，即

$$F(x)=\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x}=100bnx^{n-1}\exp(-bx^n) \tag{12}$$

对式(12)进行积分得

$$D=100-\phi=100\exp(-bx^n) \tag{13}$$

式中：$F(x)$为煤粉粒径分布函数；ϕ 为小于 x 的质量分数；D 为粒径大于 x 的煤粉质量分数；b 为颗粒大小范围的尺度常数；n 为煤粉的均匀性指数。

研磨后的煤粉在一次风曳力的作用下进入磨煤机的分离区。对于单一煤粉颗粒，在忽略其他力作用的情况下，其受力条件是颗粒重力减去其在流体中的浮力等于其在流体中所受到的曳力[17]，即

$$\frac{1}{6}\pi d_{\mathrm{p}}^3\rho_{\mathrm{p}}g-\frac{1}{6}\pi d_{\mathrm{p}}^3\rho g=\xi\frac{\pi}{4}d_{\mathrm{p}}^2\frac{\rho w_{\mathrm{xd}}^2}{2} \tag{14}$$

式中：d_{p} 为一次风携带煤粉颗粒的临界直径，m；ρ_{p} 为煤粉颗粒的密度，kg/m^3；ρ 为空气的密度，kg/m^3；ξ为颗粒对气流的迎风面阻力系数，取 0.44[17]；w_{xd} 为单颗粒被气流夹带时气固两相的相对速度。

由式(14)可求得

$$d_{\mathrm{p}}=\frac{3\xi\rho w_{\mathrm{xd}}^2}{4(\rho_{\mathrm{p}}-\rho)g} \tag{15}$$

利用计算得到的 d_{p}，再结合由辨识得到的 k_1 和粒径分布模型确定尺度常数 b，即

$$1-\exp(-bd_{\mathrm{p}}^n)=k_1 \tag{16}$$

$$b=\frac{-\ln(1-k_1)}{d_{\mathrm{p}}^n} \tag{17}$$

式(16)描述了直径小于 d_{p} 的煤粉可被一次风带入分离区，且直径小于 d_{p} 的煤粉的质量分数等于分离系数 k_1。

$$R_{90}=\frac{1-\exp(-bd_{90}^n)}{1-\exp(-bd_{\mathrm{out}}^n)} \tag{18}$$

$$k_{\mathrm{se}}=\frac{1-\exp(-bd_{\mathrm{out}}^n)}{1-\exp(-bd_{\mathrm{p}}^n)} \tag{19}$$

式中：R_{90} 为煤粉细度，%；d_{90} 为 90 型分离器筛子孔对应的煤粉直径，m；d_{out} 为磨煤机出口煤粉的最大直径，m。

式(18)为煤粉细度的计算式，式(19)为分离系数的定义式。利用式(18)计算出口煤粉的最大直径 d_{out}，再依据式(19)计算分离系数。

(2) 磨煤机换热模型。

认为磨煤机内温度分布均匀，并且依据文献[18]的一次风与煤粉换热的仿真结果，基于热量平衡原理和磨煤机热设计计算，建立磨煤机出口温度 t_{m} 的动态方程，即

$$\mathrm{d}(c_{\mathrm{metal}}m_{\mathrm{metal}}t_{\mathrm{m}}+c_{\mathrm{mix}}mt_{\mathrm{m}})=(Q_{\mathrm{in}}-Q_{\mathrm{out}})\mathrm{d}t \tag{20}$$

$$c_{\mathrm{mix}}=c_{\mathrm{out,raw}}(1-k_3w(\mathrm{M_{ar}}))+k_3w(\mathrm{M_{ar}})c_{\mathrm{water}} \tag{21}$$

式中：Q_{in} 为进入磨煤机的热量流量，kJ/s；Q_{out} 为离开磨煤机的热量流量，kJ/s；c_{metal}、c_{mix}、$c_{\mathrm{out,raw}}$、c_{water}分别为金属比热容、磨煤机内部煤的平均比热容、煤在出口风温下的比热容和水的比热容，kJ/(kg·K)；m_{metal}为磨煤机内金属质量，kg；m 为磨煤机内部总煤量，kg；k_3为待辨识参数。

进入磨煤机的热量流量 Q_{in}由 4 个部分组成，分别如下。

① 一次风带入热量流量 Q_{in1}为

$$Q_{\mathrm{in1}}=q_{m,\mathrm{air}}c_{\mathrm{in,dry}}t_{\mathrm{air}} \tag{22}$$

② 密封风带入热量流量 Q_{in2}为

$$Q_{\mathrm{in2}}=3.6q_{m,\mathrm{seal}}c_{\mathrm{in,wet}}t_{\mathrm{envi}} \tag{23}$$

③ 入口煤量带入热量流量 Q_{in3}为

$$Q_{\mathrm{in3}}=q_{m,\mathrm{in}}(c_{\mathrm{in,raw}}(1-w(\mathrm{M_{ar}}))+c_{\mathrm{water}}w(\mathrm{M_{ar}}))t_{\mathrm{envi}} \tag{24}$$

④ 磨煤机做功带入热量 Q_{in4}为

$$Q_{\mathrm{in4}}=K_{\mathrm{mac}}I \tag{25}$$

式中：t_{air}为一次风温，℃；t_{envi}为环境温度，℃；$c_{\mathrm{in,dry}}$、$c_{\mathrm{in,wet}}$分别为干空气在入口风温下的比热容、湿空气在环境温度下的比热容，kJ/(kg·K)；$c_{\mathrm{in,raw}}$为煤在环境温度下的比热容，kJ/(kg·K)；$q_{m,\mathrm{seal}}$为密封风质量流量，kg/s；I 为磨煤机电流，A；K_{mac}为待辨识参数。

离开磨煤机的热量流量 Q_{out}由 6 个部分组成，分别如下。

① 一次风带出的热量流量 Q_{out1}为

$$Q_{\mathrm{out1}}=q_{m,\mathrm{air}}c_{\mathrm{out,wet}}t_{\mathrm{m}} \tag{26}$$

② 密封风带出的热量流量 Q_{out2}为

$$Q_{\mathrm{out2}}=3.6q_{m,\mathrm{seal}}c_{\mathrm{out,wet}}t_{\mathrm{m}} \tag{27}$$

③ 出口煤粉带出的热量流量 Q_{out3}为

$$Q_{\mathrm{out3}}=q_{m,\mathrm{out}}(c_{\mathrm{out,raw}}(1-w(\mathrm{M_{pc}}))+c_{\mathrm{water}}w(\mathrm{M_{pc}}))t_{\mathrm{m}} \tag{28}$$

④ 水分蒸发吸收的热量流量 Q_{out4}为

$$Q_{\mathrm{out4}}=q_{m,\mathrm{in}}(w(\mathrm{M_{ar}})-w(\mathrm{M_{pc}}))(\gamma+c_{\mathrm{out,steam}}t_{\mathrm{m}}) \tag{29}$$

⑤ 损失热量流量 Q_{out5}为

$$Q_{\mathrm{out5}}=K_{\mathrm{loss}}Q_{\mathrm{in}} \tag{30}$$

⑥ 石子煤带出的热量流量 Q_{out6}为

$$Q_{\mathrm{out6}}=q_{m,\mathrm{sz}}c_{\mathrm{sz}}t_{\mathrm{m}} \tag{31}$$

式中：$c_{\mathrm{out,wet}}$、$c_{\mathrm{out,steam}}$分别为湿空气、水蒸气在出口风温下的比热容，kJ/(kg·K)；γ 为汽化潜热，kJ/kg；c_{sz}为石子煤的比热容，kJ/(kg·K)；K_{loss}为待辨识参数。

研磨区煤粉中水分质量分数 $w(\mathrm{M_{pc}})$计算式为

$$w(\mathrm{M_{pc}})=w(\mathrm{M_{ar}})\cdot\exp\frac{t_{\mathrm{m}}}{K_{\mathrm{w}}} \tag{32}$$

式中：K_{w}为待辨识参数。

磨煤机运行电流反映磨煤机做功情况。磨煤机

电流包括初始电流、支撑电流和加载电流。支撑电流与磨盘总存煤量成正比，加载电流与磨辊加载力成正比。建立的磨煤机运行电流方程为

$$I=c_1+c_2(m_{\text{plate}}+m_{\text{g}})+c_3 p_{\text{F}} \tag{33}$$

式中：p_{F}为磨辊加载力对应的油压，MPa；c_1、c_2和c_3均为待辨识参数。

(3) 磨煤机压损模型。

该部分压损考虑了纯气流压损 Δp_1、带粉气流压损 Δp_2和循环煤量压损 Δp_3。

① 纯气流压损。

该部分的压损主要包括管道摩擦阻力压损、管路元件的局部压损、部件阻力压损，计算公式为

$$\Delta p_1=p_1\left(\frac{\rho_{\text{air}}v^2}{2}\right) \tag{34}$$

式中：p_1为待辨识参数；v为气流速度，m/s；ρ_{air}为空气密度，kg/m^3。

② 带粉气流压损。

入口风在与煤粉接触后，携带煤粉往上流动，此时为带粉气流的压损。该部分的压损为

$$\Delta p_2=\left(p_2+p_3\frac{q_{m,\text{xie}}}{q_{m,\text{air}}}\right)\left(\frac{\rho_{\text{air}}v^2}{2}\right) \tag{35}$$

式中：p_2、p_3均为待辨识参数；$q_{m,\text{xie}}$为携粉质量流量，kg/s，此处取 $q_{m,\text{xie}}=q_{m,\text{gs}}$。

③ 循环煤量压损。

磨煤机内一次风压损与磨煤机内循环煤量成正比，即

$$\Delta p_3=p_4 q_{m,\text{back}} \tag{36}$$

式中：p_4为待辨识参数。

(4) 磨煤机功率模型。

磨煤机功率反映磨煤机研磨煤粉过程中能量消耗特性。该磨煤机磨盘由三相异步电动机驱动，功率 P 为

$$P=\sqrt{3}UI_{\text{mill}}\cos\phi_{\text{mill}} \tag{37}$$

式中：U 为额定电压，V；I_{mill}为额定电流，A；ϕ_{mill}为功率因数。

1.2.2 一次风系统模型

对于单台磨煤机，基于热量平衡和质量守恒原理，建立的一次风系统模型为

$$q_{m,\text{aircold}}=s_1\left(\frac{N}{1\,000}B_{\text{cold}}\right)^{s_2} \tag{38}$$

$$q_{m,\text{airhot}}=s_3\left(\frac{N}{1\,000}B_{\text{hot}}\right)^{s_4} \tag{39}$$

$$\frac{\mathrm{d}q_{m,\text{air}}}{\mathrm{d}t}=q_{m,\text{aircold}}+q_{m,\text{airhot}}-s_5 q_{m,\text{air}} \tag{40}$$

$$t_{\text{air}}=\frac{q_{m,\text{aircold}}t_{\text{envi}}+q_{m,\text{airhot}}t_{\text{hot}}}{q_{m,\text{air}}} \tag{41}$$

式中：$q_{m,\text{aircold}}$为冷一次风质量流量，kg/s；$q_{m,\text{airhot}}$为热一次风质量流量，kg/s；N 为一次风机的平均转速，rad/min；B_{cold}为冷风门开度，%；B_{hot}为热风门开度，%；s_1～s_5均为待辨识参数，选择文献[19]的推荐值进行仿真。

1.2.3 输煤管道模型

输煤管道将磨煤机研磨好的合格煤粉输送到锅炉炉膛进行燃烧，其数学模型为

$$\frac{\mathrm{d}m_{\text{pipe}}}{\mathrm{d}t}=q_{m,\text{out}}-s_6 m_{\text{pipe}} \tag{42}$$

式中：m_{pipe}为输煤管道中的煤粉量，kg；s_6为待辨识参数。

1.3 参数辨识

1.3.1 数据预处理

基于机组的运行数据对模型的待定参数进行辨识。采用移动平均滤波对数据进行平滑处理，滑动窗口宽度选取为 5 时，计算公式为

$$\bar{x}_t=\frac{1}{5}(x_{t-2}+x_{t-1}+x_t+x_{t+1}+x_{t+2}) \tag{43}$$

式中：x_t为机组实际运行数据；$\bar{x}_t$为滤波后机组数据；t为机组运行时刻。

1.3.2 参数辨识

采用某 1 000 MW 超超临界机组制粉系统实际运行数据作为基础数据集，并将基础数据集划分为 8 h 的建模数据集和 67 h 的验证数据集。利用粒子群优化算法在建模数据集上对模型待辨识参数进行寻优。在 Matlab 2022 软件平台上搭建模型，在粒子群优化算法中，种群数设置为 50，迭代次数为 100。

适应度函数 f_{fitness}设为

$$f_{\text{fitness}}=\sum_{j=1}^{J}\left(\frac{|\Delta p_{\text{model},j}-\Delta p_{\text{measure},j}|}{\Delta p_{\text{measure},j}}+\frac{|I_{\text{model},j}-I_{\text{measure},j}|}{I_{\text{measure},j}}+\frac{|t_{\text{model},j}-t_{\text{measure},j}|}{t_{\text{measure},j}}\right) \tag{44}$$

式中：Δp_{model}、I_{model}、t_{model}分别为模型计算时刻的磨煤机压差、运行电流和出口一次风温；$\Delta p_{\text{measure}}$、$I_{\text{measure}}$、$t_{\text{measure}}$分别为实测时刻的磨煤机压差、运行电流和出口一次风温；j为数据点；J为总数据数。

辨识得到的模型参数如表 2 所示。

表 2 参数辨识结果

Tab. 2 Parameter identification results

参数	数值	参数	数值	参数	数值
m_{metal}/kg	12 499	K_{w}	51.897	p_1	2.669
k_1	0.292	K_{loss}	0.035	p_2	16.162
k_2	0.050	c_1	24.881	p_3	13.459
k_3	0.584	c_2	0.100	p_4	2.234
K_{mac}	3.824	c_3	0.495	s_6	0.020

1.4　模型验证

对比模型在额定工况下的仿真值与设计值，以验证其稳态仿真结果的可靠性，结果如表 3 所示。结果表明，该模型对于制粉系统关键参数设计值的相对误差均小于 2%，可满足国际自动化学会 ANSI/ISA 77.20.01-2012 *Fossil Fuel Power Plant Simulators : Functional Requirements* 的规定。

表 3　制粉系统模型验证

Tab. 3　Verification of pulverized-coal preparation system

参数	仿真值	设计值	相对误差
BMCR 工况给煤量	117.22 t/h	117.49 t/h	0.23%
一次风质量流量	128.52 t/h	129.48 t/h	0.74%
磨煤机压损	7 175 Pa	7 130 Pa	0.63%
一次风出口温度	348.4 ℃	352.0 ℃	1.02%
磨煤机出口温度	83.8 ℃	60～93 ℃	
磨煤机功率	773 kW	760 kW	1.71%

进一步对模型动态仿真结果进行验证，选择磨煤机出口风粉温度、进出口压差和磨煤机电流等关键参数作为验证参数，验证结果如图 2～图 4 所示。

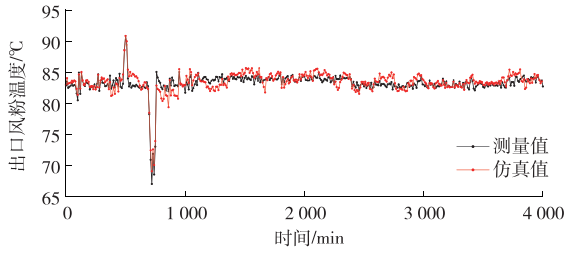


图 2　出口风粉温度验证曲线

Fig. 2　Verification curve of outlet air-coal mixture temperature

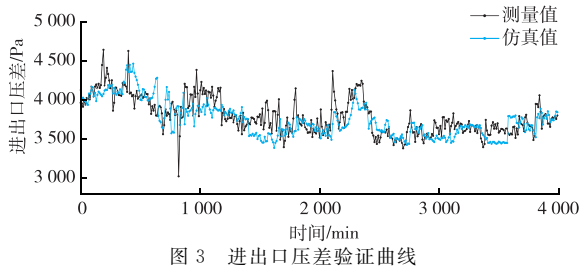


图 3　进出口压差验证曲线

Fig. 3　Verification curve of inlet and outlet pressure difference

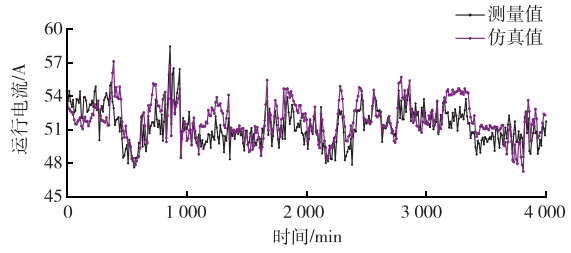


图 4　运行电流验证曲线

Fig. 4　Verification curve of operation current

选取均方根误差(RMSE)和平均绝对百分误差(MAPE)量化表征仿真结果的准确程度，统计结果如表 4 所示。结果表明：模型动态仿真结果的 MAPE 最大值为 3.70%，具有良好的精度。

表 4　RMSE 和 MAPE 统计结果

Tab. 4　Statistics results of RMSE and MAPE

参数	数值
出口风粉温度的 RMSE/K	0.88
进出口压差的 RMSE/Pa	194.27
运行电流的 RMSE/A	1.47
出口风粉温度的 MAPE/%	0.86
进出口压差的 MAPE/%	3.70
运行电流的 MAPE/%	2.33

2　制粉系统运行特性研究

分别对制粉系统的稳态及动态运行特性进行研究，分析制粉系统运行过程中参数的变化规律。

2.1　稳态运行特性

2.1.1　单参数变化

分别研究在给煤量、一次风量和分离器转速变化的情况下制粉系统关键参数的变化特性。以给煤量为 15 kg/s、一次风量为 22.9 kg/s、分离器转速为 76 r/min、煤粉细度为 15.9% 作为基准参数进行研究。

(1) 变给煤量。

给煤量从 12 kg/s 增加到 26 kg/s，制粉系统参数变化如图 5 所示。随着给煤量的增加，磨煤机内部存煤量线性增加，给煤量每增加 1 kg/s，磨盘存煤量增加 2.5 kg，研磨区存煤量增加 13.6 kg，悬浮区存煤量增加 4.3 kg，循环煤质量流量增加 2.9 kg/s。制粉系统出口风粉温度下降幅度趋缓，出口风粉温度从 66.25 ℃减小到 34.63 ℃，减小了 47.7%。磨煤机单耗下降幅度趋缓，磨煤机单耗从 10.26 kW·h/t 减小到7.14 kW·h/t，减小了 30.4%。

(2) 变一次风量。

一次风量从 18 kg/s 增加到 32 kg/s，制粉系统参数变化如图 6 所示。随着一次风量的增加，悬浮区存煤量下降幅度趋缓，存煤量从 72.48 kg 减小到 37.5 kg，下降了 48.3%；磨煤机进出口压差下降幅度趋缓，从 5 377 Pa 下降到 3 573 Pa，下降了 33.6%；制粉系统出口风粉温度逐渐增加，一次风量每增加 1 kg/s，出口风粉温度增加 2.0 K；制粉系统出口煤粉水分质量分数逐渐减小，从 4.4% 减小到了 2.6%，减小了 40.9%。

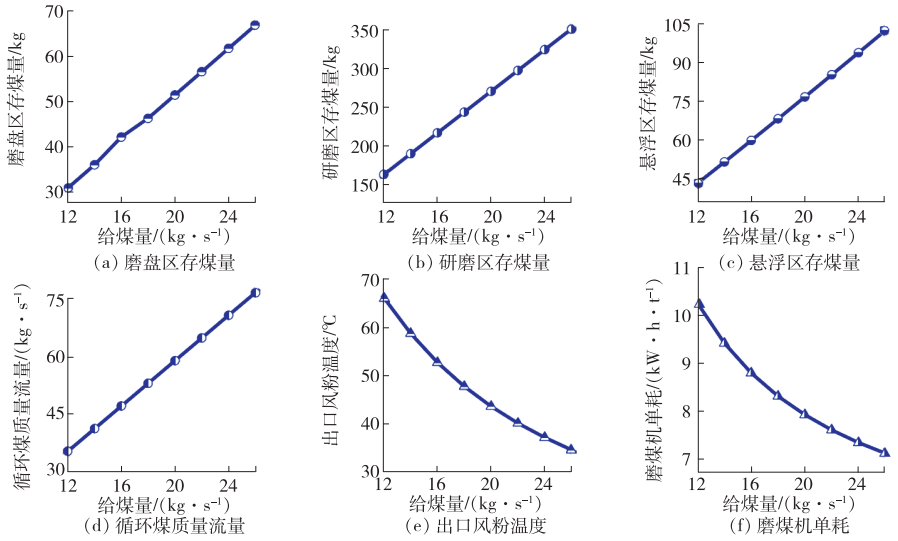


图 5 单参数变化下系统参数随给煤量的变化

Fig. 5 The variation of system parameters with coal feed rate under single-parameter change

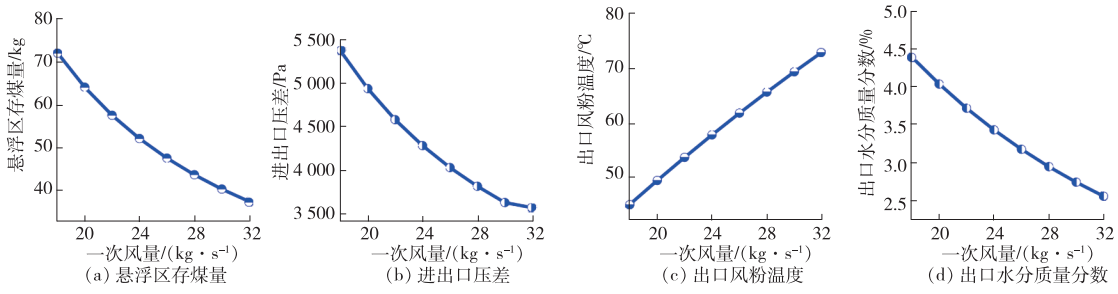


图 6 单参数变化下系统参数随一次风量的变化

Fig. 6 The variation of system parameters with primary air flow rate under single-parameter change

(3) 变分离器转速。

分离器转速从 73 r/min 增加到 80 r/min,制粉系统参数变化如图 7 所示,其中,循环倍率定义为进入分离器的煤粉质量流量与分离器出口煤粉质量流量的比。随着分离器转速的增加,磨煤机内部存煤量线性增加,转速每增加 1 r/min,磨盘存煤量增加 0.4 kg,研磨区存煤量增加 2.0 kg,悬浮区存煤量增加 0.4 kg,循环煤质量流量增加 0.6 kg/s,磨煤机出口煤粉细度减少 0.8 百分点,磨煤机内部煤量的循环倍率增加 0.04。

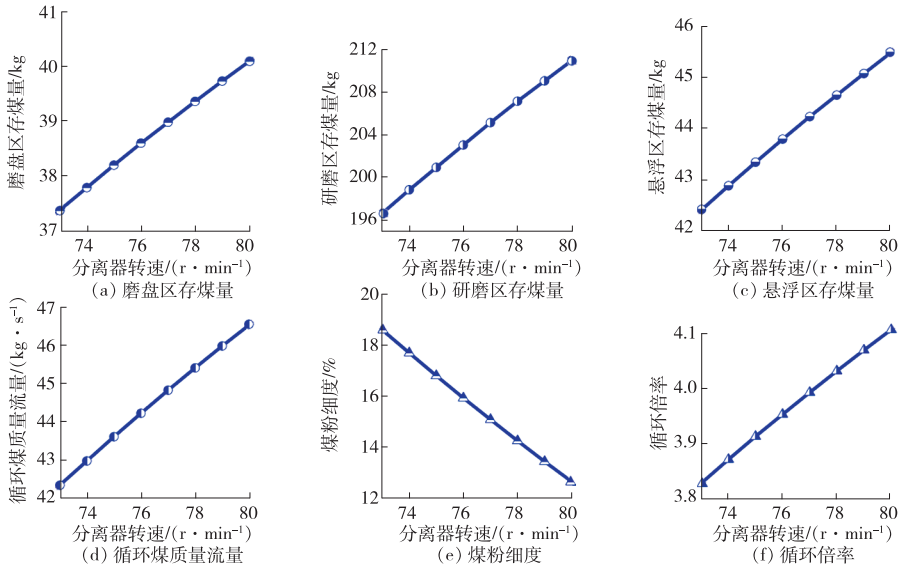


图 7 单参数变化下系统参数随分离器转速的变化

Fig. 7 The variation of system parameters with separator rotational speed under single-parameter change

2.1.2　固定风煤比变化

研究在不同风煤比条件下，改变给煤量、一次风温和原煤水分质量分数时磨煤机出口风粉温度和出口水分质量分数的变化特性。以给煤量为 14 kg/s、一次风温为 280 ℃、原煤水分质量分数为 10.5%作为基准参数进行研究。

（1）变给煤量。

保持不同风煤比，给煤量从 12 kg/s 增加到 26 kg/s，制粉系统参数变化如图 8 所示。随着给煤量的增加，磨煤机出口风粉温度缓慢增加，出口煤粉水分缓慢减小。当风煤比分别为 1.2、1.6、2.0、2.4 时，给煤量每增加 1 kg/s，煤粉温度分别增加 0.12、0.19、0.24、0.27 K。随着风煤比的增加，给煤量对出口风粉温度的影响增大。随着风煤比的增加，磨煤机出口风粉温度逐渐增加，出口水分含量逐渐减小。

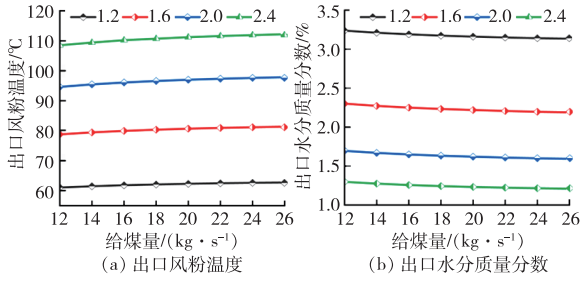


图 8　固定风煤比下参数随给煤量的变化

Fig. 8　The variation of system parameters with coal feed rate under fixed air-to-coal ratio

（2）变一次风温。

保持不同的风煤比，一次风温从 250 ℃增加到 320 ℃，制粉系统参数变化如图 9 所示。随着一次风温的增加，磨煤机出口风粉温度逐渐增加，出口水分含量逐渐减小。当风煤比分别为 1.2、1.6、2.0、2.4 时，一次风温平均升高 10 K 时，出口风粉温度分别增加 2.63、3.48、4.17、4.72 K。随着风煤比的增加，一次风温对出口风粉温度的影响增大。随着风煤比的增加，磨煤机出口风粉温度逐渐增加，而出口水分含量逐渐减小。

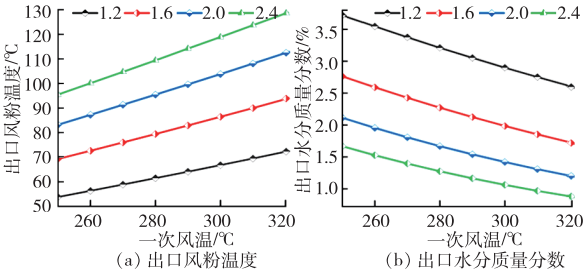


图 9　固定风煤比下参数随一次风温的变化

Fig. 9　The variation of system parameters with primary air temperature under fixed air-to-coal ratio

（3）变原煤水分质量分数。

保持不同的风煤比，原煤水分质量分数从 8.5%增加到 12%，制粉系统参数变化如图 10 所示。随着原煤水分含量的增加，磨煤机出口风粉温度逐渐减小，出口煤粉水分含量逐渐增加，当风煤比分别为 1.2、1.6、2.0、2.4 时，原煤水分质量分数平均增加 0.5 百分点，出口风粉温度分别减小 2.09、2.35、2.44、2.43 K。随着风煤比的增加，磨煤机出口风粉温度逐渐增加，出口煤粉水分含量逐渐减小。

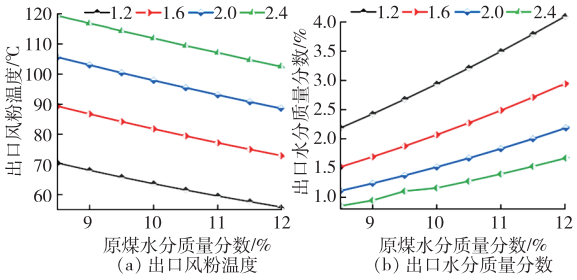


图 10　固定风煤比下参数随原煤水分质量分数的变化

Fig. 10　The variation of system parameters with raw coal moisture mass fraction under fixed air-to-coal ratio

2.2　动态运行特性

给煤信号以 5%/min 变出力速率的斜坡信号输入时，对制粉系统关键参数的响应进行分析。

在投运过程中，制粉系统出力特性如图 11 所示。磨煤机开启冷、热风门对磨煤机进行升温，控制进入磨煤机的一次风温小于 150 ℃，一次风量达到最低风量（12.50 kg/s），并且调整磨煤机出口的一次风温，当一次风温大于 68 ℃时启动给煤机。给煤机输入最低给煤量为 15 t/h，待磨煤机出力达到最小出力时接入锅炉供煤。

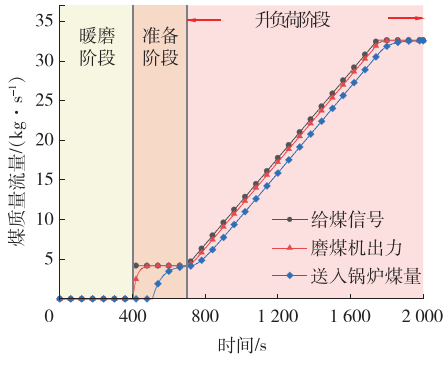


图 11　制粉系统出力曲线

Fig. 11　Output curve of pulverized-coal preparation system

磨煤机进出口压差（即压损）和功率的特性曲线分别如图 12、图 13 所示。随着给煤量的增加，磨煤机进出口压差和功率不断升高，最终分别达到稳定值（7 163 Pa、773 kW）。

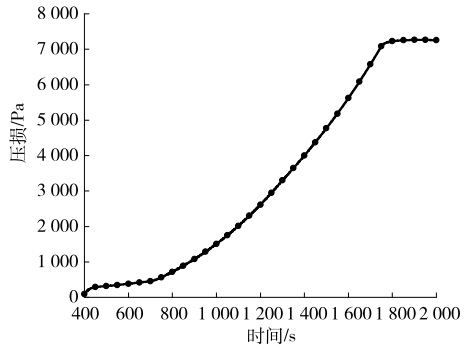


图 12 磨煤机压损曲线

Fig. 12 Pressure loss curve of coal mill

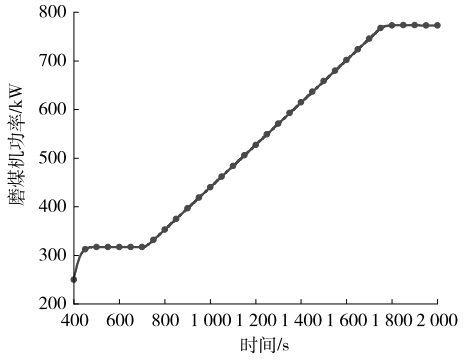


图 13 磨煤机功率曲线

Fig. 13 Power curve of coal mill

一次风量由热风门控制，并且通过热风门控制维持设定的风煤比。在投运过程中风门开度及一次风量的动态曲线如图 14 所示。在对磨煤机进行预热的过程中维持最低一次风量；在升负荷过程中一次风量随着给煤量的增加不断升高，并且在 2 023 s 时达到稳定值。

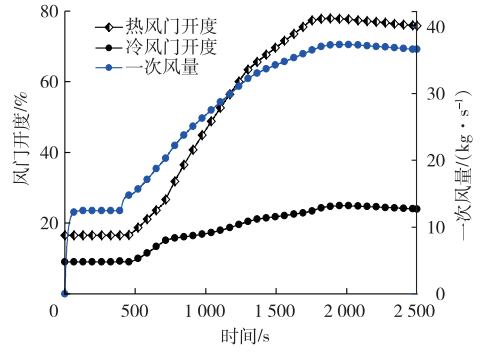


图 14 一次风量曲线

Fig. 14 Flow rate curve of primary air

一次风温是影响磨煤机出口风粉温度的关键因素。通过冷风门开度控制一次风温实现对磨煤机出口风粉温度的控制。在投运过程中风门开度及一次风温的动态曲线如图 15 所示。在升负荷过程中，进入磨煤机的一次风温先不断增加，在 1 770 s 时短暂下降后又回升直至达到稳定值。

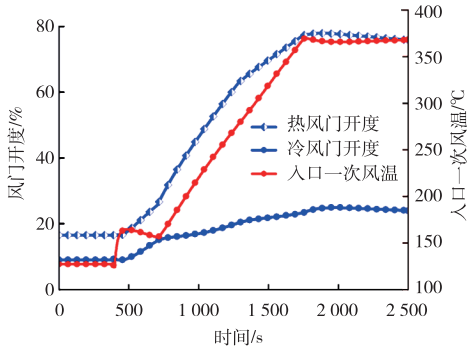


图 15 一次风温曲线

Fig. 15 Temperature curve of primary air

磨煤机出口风粉温度如图 16 所示。磨煤机完成暖磨并投入给煤机后，磨煤机开始研磨原煤。在升负荷初期，因为过量的一次风及一次风温的增加使得出口风粉温度不断增加。随着给煤量的升高，风煤比逐渐减小并达到设定值，最后煤粉出口温度逐渐趋于稳定值。

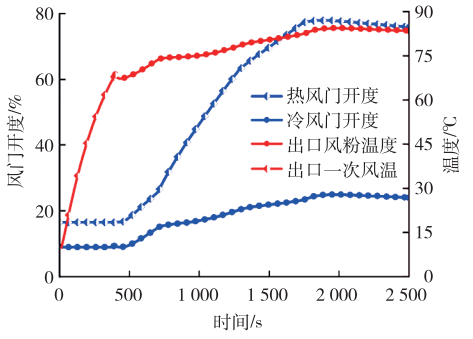


图 16 出口风粉温度曲线

Fig. 16 Outlet temperature curve of pulverized coal

在升负荷过程中，该制粉系统从最低研磨出力到达到额定出力的响应时间为 1 149 s，较给煤信号延迟了 102 s；制粉系统升负荷过程中，随着给煤量的增加，磨煤机压损及功率均不断增加；一次风系统控制进入磨煤机的一次风量和温度，使制粉系统维持一定的风煤比和设定的出口风粉温度。制粉系统自身具有的惯性会阻碍煤电机组负荷的快速响应。为了进一步提高机组运行灵活性，适应新型电力系统发展需求，急需改进控制系统以提高制粉系统的控制精度，优化系统的响应特性。

3 结论

(1) 建立了包括磨煤机、一次风机、输煤管道等关键设备的磨辊式中速磨煤机制粉系统的灰箱模

型，其中耦合了磨煤机内部存煤量与运行参数的关系，考虑了煤粉细度对制粉系统出力的影响等。对比验证结果表明，模型的稳态误差均小于 2%，动态过程中关键参数的平均相对误差最大值为 3.70%，具有良好的预测精度。

(2) 在系统稳态运行特性方面，磨煤机能耗随着负荷的升高不断降低，但下降幅度趋缓，当给煤量从 12 kg/s 增加到 26 kg/s，磨煤单耗从 10.26 kW·h/t 降低到7.14 kW·h/t，降低了 30.4%；在固定风煤比的情况下，一次风温和原煤水分含量是决定出口风粉温度的关键因素。当风煤比为 1.6、一次风温从 260 ℃升高到 300 ℃时，出口风粉温度将升高 19.03%，并且随着风煤比的增加，一次风温对出口风粉温度和出口水分含量的影响进一步增大。因此，控制一次风温对于维持出口风粉温度的稳定至关重要。

(3) 在系统动态运行特性方面，制粉系统从最低研磨出力至达到额定出力的响应时间为 1 149 s，较给煤信号延迟了 102 s；磨煤机进出口压差和功率均不断增加直至达到稳定值；一次风系统在维持设定的风煤比的同时保持制粉系统出口风粉温度的稳定。

参考文献：

[1] 杨勇平，陈衡，郝俊红，等. “双碳”目标下我国燃煤发电转型升级发展路径[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6900-6909.
YANG Yongping，CHEN Heng，HAO Junhong，et al. Development pathways for the transformation and upgrading of China's coal-fired power generation under the goals of carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(17)：6900-6909.

[2] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京：中国电力出版社，2023.

[3] 王翔宇，陈武晖，郭小龙，等. 发电系统数字化研究综述[J]. 发电技术，2024，45(1)：120-131.
WANG Xiangyu，CHEN Wuhui，GUO Xiaolong，et al. Review of research on the digitalization of power generation system[J]. Power Generation Technology，2024，45(1)：120-141.

[4] 岑可法，周昊，池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京：中国电力出版社，2003.

[5] 焦健. 中速磨制粉系统建模及其非线性预测控制方法研究[D]. 南京：东南大学，2016.

[6] AGRAWAL V，PANIGRAHI B K，SUBBARAO P M V. Review of control and fault diagnosis methods applied to coal mills[J]. Journal of Process Control，2015，32：138-153.

[7] 陈波，王亚欧，陶谦，等. 基于长短期记忆神经网络的燃煤机组磨煤机性能预测模型[J]. 热力发电，2021，50(6)：121-127.
CHEN Bo，WANG Yaou，TAO Qian，et al. LSTM-based performance prediction model for coal mill in a coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation，2021，50(6)：121-127.

[8] 刘福国. 基于数据挖掘的钢球磨煤机运行特性建模和优化[J]. 煤炭学报，2010，5(5)：850-854.
LIU Fuguo. Performance modeling and optimization of ball mill based on data mining[J]. Journal of China Coal Society，2010，35(5)：850-854.

[9] XIE Youcheng，ZHANG Jing，REN Ping. Soft sensing system for coal storage in ball mill based on fuzzy neural network [C]//Proceedings of 2008 Chinese Control and Decision Conference. Yantai：IEEE，2008：1827-1831.

[10] 谷俊杰，陈见永，张岩. 双进双出磨煤机制粉系统机理建模与仿真[J]. 动力工程学报，2017，37(6)：467-474.
GU Junjie，CHEN Jianyong，ZHANG Yan. Mechanism modeling and simulation on pulverizing system of a double-inlet double-outlet coal mill[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2017，37(6)：467-474.

[11] LI Xinwen，WU Yingchun，CHEN Huafeng，et al. Coal mill model considering heat transfer effect on mass equations with estimation of moisture[J]. Journal of Process Control，2021，104：178-188.

[12] BHATT D S，DADIALA V，BARVE J J. Industrial coal Pulverizer model simulation and parametric investigation[J]. IFAC-PapersOnLine，2018，51(28)：115-120.

[13] 王朝阳，石慧，王文毓，等. MPS 型磨煤机制粉系统动态模型与瞬态运行优化控制研究[J]. 中国电机工程学报，2024，44(16)：6518-6528.
WANG Chaoyang，SHI Hui，WANG Wenyu，et al. Study on dynamic model and transient operation optimization control of the MPS coal mill pulverizing system[J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(16)：6518-6528.

[14] 罗毅，段明达. 基于 IWOA-Transformer 的磨煤机故障预警[J]. 动力工程学报，2024，44(6)：939-946.
LUO Yi，DUAN Mingda. Fault warning of coal mill based on IWOA-Transformer [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(6)：939-946.

(下转第 50 页)

转机械振动源分析[J]. 振动与冲击，2022，41(17)：276-281.
MA Gao，CHEN Yaming，SHEN Deming，et al. Vibration source analysis of rotating machinery based on working condition transmission path[J]. Journal of Vibration and Shock，2022，41(17)：276-281.

[10] DE KLERK D，OSSIPOV A. Operational transfer path analysis：theory，guidelines and tire noise application[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2010，24(7)：1950-1962.

[11] TAN J J，CHAIGNE A，ACRI A. Operational transfer path analysis of a piano[J]. Applied Acoustics，2018，140：39-47.

[12] 文智明，张荣婷，谷欢欢. 基于工况传递路径分析方法的空调器室外机噪声源识别[J]. 制冷与空调，2021，21(2)：20-24.
WEN Zhiming，ZHANG Rongting，GU Huanhuan. Noise source identification of outdoor unit of air conditioner based on operational transfer path analysis method[J]. Refrigeration and Air-Conditioning，2021，21(2)：20-24.

[13] 于承宣，刘忠远，范强，等. 基于工况传递路径分析(OTPA)方法的热泵热水器室外机振动噪声分析[J]. 噪声与振动控制，2021，41(6)：255-262.
YU Chengxuan，LIU Zhongyuan，FAN Qiang，et al. Vibration and noiseanalysis of the outdoor units of heat pump water heaters based on OTPA technique[J]. Noise and Vibration Control，2021，41(6)：255-262.

[14] 胡启龙，张卫军，张恒，等. 工况传递路径分析在核电汽轮发电机振动综合治理中的应用[J]. 热力发电，2022，51(12)：157-163.
HU Qilong，ZHANG Weijun，ZHANG Heng，et al. Application of operational transfer path analysis in comprehensive treatment for nuclear power turbo-generator vibration[J]. Thermal Power Generation，2022，51(12)：157-163.

[15] 郭冰彬，罗志翔，肖乾，等. 基于弹性车辆系统和OTPA方法的车辆振动传递特性分析[J]. 交通运输工程学报，2024，24(2)：179-192.
GUO Bingbin，LUO Zhixiang，XIAO Qian，et al. Analysis of vehicle vibration transfer characteristics based on flexible vehicle system and OTPA method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2024，24(2)：179-192.

[16] GAJDATSY P，JANSSENS K，DESMET W，et al. Application of the transmissibility concept in transfer path analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing，2010，24(7)：1963-1976.

[17] LOUD W S. Generalized inverses and generalized Green's functions[J]. SIAM Journal on Applied Mathematics，1966，14(2)：342-369.

[18] CHENG Wei，ZHU Yan，LU Jingbai，et al. An accurate and reliable operational transfer path analysis for transfer path contribution evaluation based on Landweber iterative method[J]. Measurement Science and Technology，2020，31(2)：025102.

[19] FENG Zhipeng，ZHANG Dong，ZUO M J. Adaptive mode decomposition methods and their applications in signal analysis for machinery fault diagnosis：a review with examples[J]. IEEE Access，2017，5：24301-24331.

[20] 叶毫阳，张万福，黄锦辉，等. 推力轴承对水轮发电机组轴系横向振动特性的影响[J]. 动力工程学报，2024，44(10)：1541-1549.
YE Haoyang，ZHANG Wanfu，HUANG Jinhui，et al. Effect of thrust bearing on the lateral vibration characteristics of the shafting system of hydro-generator unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(10)：1541-1549.

(上接第 41 页)

[15] 张元东. 中速磨煤机特征分类及劣化分析算法研究[J]. 动力工程学报，2024，44(8)：1189-1195.
ZHANG Yuandong. Research on feature classification and deterioration analysis algorithm of medium-speed coal mills[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(8)：1189-1195.

[16] 姜秀民，杨海平，李彦，等. 煤粉颗粒粒度分形分析[J]. 煤炭学报，2003，28(4)：414-418.
JIANG Xiumin，YANG Haiping，LI Yan，et al. Fractal characteristics of coal powder[J]. Journal of China Coal Society，2003，28(4)：414-418.

[17] 徐通模，惠世恩. 燃烧学[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2017.

[18] 赵虹，余海铭，杨建国，等. 中速磨煤机内风煤动态换热特性[J]. 中国电机工程学报，2014，34(11)：1735-1740.
ZHAO Hong，YU Haiming，YANG Jianguo，et al. Dynamic heat transfer characteristics of gas-solid in medium speed mill[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(11)：1735-1740.

[19] 李新稳. 基于数据挖掘的中速磨煤机制粉系统建模研究[D]. 杭州：浙江大学，2020.