ZGM型中速磨煤机宽负荷运行建模与仿真*

方世军[1], 廖海燕[2,3], 卓建坤[2†], 丁 涛[3], 姚 强[1,2]

(1. 新疆大学 电气工程学院,新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 清华大学 热科学与动力工程教育部重点实验室,北京 100084;
3. 国家能源集团新能源技术研究院有限公司,北京 102211)

摘 要：为满足火电机组宽负荷灵活调峰对制粉系统快速响应的需求,本文针对ZGM型中速磨煤机动态仿真模型在宽负荷工况下精度不足的问题,基于质量与能量守恒定律建立动态机理模型;采用局部敏感性分析确定关键参数(一次风量、风温及热量因子);结合热平衡机理对汽化潜热与散热模型进行修正. 结果表明,修正后模型在40%~90%宽负荷范围内的仿真误差均在5%以内. 在此基础上,针对快速升负荷过程磨煤机启动空窗期导致的燃料供应滞后问题,分析了给煤斜坡速率、一次风量及一次风超前时间对煤粉出力响应时间、出口温度等关键参数的非线性影响规律,并采用网格搜索多参数寻优,获得了提升磨煤机运行出力的最优参数组合方法,可使低负荷下煤粉流量响应时间缩短至300 s,高负荷下缩短至350 s,较磨煤机启动方式提前约3.6 min,且出口温度波动满足安全约束要求. 本文为磨煤机宽负荷精准仿真与快速变负荷运行提供了可靠的模型基础与优化运行方案.

关键词：ZGM磨煤机;动态建模;网格搜索优化;宽负荷调峰;响应特性

DOI：10.13568/j.cnki.651094.651316.2026.04.07.0001

中图分类号：TK223;TM621.2 **文献标识码**：A **文章编号**：2096-7675(2026)05-0513-018

引文格式：方世军,廖海燕,卓建坤,丁涛,姚强. ZGM型中速磨煤机宽负荷运行建模与仿真[J]. 新疆大学学报(自然科学版中英文),2026,43(5):513-530.

英文引文格式：Fang Shijun, Liao Haiyan, Zhuo Jiankun, Ding Tao, Yao Qiang. Modeling and simulation of wide load operation of ZGM medium speed coal mill[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English),2026,43(5):513-530.

Modeling and Simulation of Wide Load Operation of ZGM Medium Speed Coal Mill

Fang Shijun[1], Liao Haiyan[2,3], Zhuo Jiankun[2], Ding Tao[3], Yao Qiang[1,2]

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Key Laboratory of Thermal Science and Power Engineering, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. National Energy Group New Energy Technology Research Institute Co. Ltd., Beijing 102211, China)

Abstract: In order to meet the demand of rapid response of coal pulverizing system for flexible peak shaving of thermal power units under wide load, aiming at the problem that the dynamic simulation model of ZGM medium speed pulverizer is not accurate enough under wide load conditions, a dynamic mechanism model is established based on the law of conservation of mass and energy. Local sensitivity analysis is used to determine the key parameters (primary air volume, air temperature and heat factor). Combined with the heat balance mechanism, the latent heat and heat dissipation model of vaporization is modified. The results show that the simulation error of the modified model is less than 5% in the wide load range of 40%-90%. On this basis, aiming at the problem of fuel supply lag caused by the start-up window period of the coal pulverizer during the rapid load-raising process, the nonlinear effects of coal feeding slope rate, primary air volume and primary air advance time on key parameters such as response time of pulverized coal output and outlet temperature are analyzed. The grid search multi-

* **收稿日期**：2026-04-07; **修回日期**：2026-06-08; **录用日期**：2026-06-11.
基金项目：新疆维吾尔自治区科技重大专项“新型燃煤机组灵活智能发电关键技术开发及示范”(2023A01005-1).
作者简介：方世军(2001—),男,硕士生,从事燃煤电站灵活调峰运行建模与仿真的研究,E-mail:107552304550@stu.xju.edu.cn.
† **通信作者**：卓建坤(1975—),男,副研究员,主要从事燃烧技术与清洁能源利用的研究,E-mail:zhuojk@tsinghua.edu.cn.

parameter optimization is used to obtain the optimal parameter combination method for improving the output of the operating coal pulverizer, which can shorten the response time of pulverized coal flow to 300 s at low load and 350 s at high load, which is about 3.6 min earlier than the start-up mode of the coal pulverizer, and the outlet temperature fluctuation meets the safety constraint requirements. This study provides a reliable model basis and optimal operation scheme for accurate simulation of wide load and rapid variable load operation of coal mill.

Key words: ZGM coal mill; dynamic modeling; grid search optimization; wide load peak regulation; response characteristics

0 引 言

“双碳”目标推动我国能源结构转型进入加速阶段,可再生能源装机容量持续增长,其间歇性与波动性对电网安全运行提出严峻挑战[1]. 为应对该挑战,火电运行模式将由稳定工况为主向灵活调节为主转变[2-4]. 燃煤机组需要承担更加频繁、快速的宽负荷调峰任务,这对制粉系统的快速稳定响应提出新挑战. ZGM型中速磨煤机具备出力稳定、煤种适应性广、变负荷适应性强等优点,在当前电厂中广泛应用[5]. 但制粉系统具有非线性、慢时变、大延迟和不确定性等特点,难以建立精确的数学模型,也难以满足机组宽负荷调峰的需求,其中出口风粉温度与煤粉出力等参数变化更是关系到整个锅炉系统的稳定运行[6-8]. 在宽负荷调峰过程中,磨煤机还面临快速频繁启停任务,大大增加了机组运营负担和成本[9]. 启动磨煤机要经暖磨、给煤机启动、煤量爬升等多个阶段,全过程耗时可达数分钟甚至更长,难以满足电网对机组快速响应的需求. 故亟需开展ZGM型中速磨煤机宽负荷动态建模及变负荷动态响应特性研究.

建立准确的宽负荷磨煤机动态模型是研究磨煤机宽负荷动态特性的前提. Austin[10]基于机理方程研究磨煤机中的破碎理论,将研磨过程简化为速率的数学描述. Sato等[11]在此基础上建立了辊环磨模型,能够描述磨煤机内部物理过程且验证了磨煤机的适用性. 左蔚然[12]对中速磨煤机研磨区搭建数学模型,将煤的破碎及粒径分布等过程进行详细的数学建模,揭示了磨煤机动态物理过程. 张峰彬[13]构建了ZGM型中速磨煤机内部的破碎-粒度分布数学模型,描述了磨煤机内部颗粒的运动行为. 谷俊杰等[14]基于机理建模方法构建了MPS磨煤机数学模型,能够有效模拟磨煤机动态运行参数变化. 这些机理模型能够详细描述磨煤机的物理过程,但需要详细的物理参数,在实际工程中应用存在限制. Niemczyk等[15]建立了适用于多种型号磨煤机的简化物理模型,并采用差分进化算法对11个参数进行辨识,模型仿真精度较高,但对热量计算过于简化. 曾德良等[16]利用扩展卡尔曼滤波算法实时预测原煤水分,给出水分对研磨过程的影响机制,但对磨煤机物理过程描述相对简化. Gao等[17]基于原煤水分提出了出口煤粉估计信号,并设计优化控制方法,提高了模型的控制精度. 上述研究说明了混合建模的优势,但对模型宽负荷准确性未进行验证. 景峥等[18]在磨煤机模型中引入煤粉细度的影响,研究了磨煤机的静动态特性,提出风煤比对磨煤机控制的重要性. 周亚星[19]发现磨煤机数据采集中一次风数据相对理论一次风量偏高,通过控制一次风和流场等解决实际电厂中产生的问题. 该研究说明了一次风对磨煤机模型动态特性及准确性的重要影响. 在快速响应方面,房小满等[20]提出一种变转速磨煤机的快速响应控制策略,使机组变负荷速率达到3% Pe/min,改善了机组响应特性,但需给磨煤机增加变频系统. 王德华等[21]设计了一套磨煤机自启停控制系统,降低了磨煤机操作难度,提升了磨煤机的负荷响应能力,但对缩短启动过程时间的效果有限.

基于上述研究现状分析,为验证模型宽负荷适应性并提高磨煤机快速响应能力,本文以ZGM型中速磨煤机为研究对象,针对电厂低负荷工况下风煤比显著偏高导致模型适应性下降的问题,通过各参数的敏感性分析提出相应修正方法,可有效改善模型在宽负荷工况范围内的适应性和准确性. 在此基础上,针对提高磨煤机出力来部分代偿磨煤机启动空窗期的运行策略,研究各关键控制参数对磨煤机响应时间的影响规律,为运行策略提供指导.

1 ZGM型磨煤机动态仿真数学模型

1.1 磨煤机

本文以安徽宿州某电厂ZGM95G-Ⅱ型中速磨煤机为研究对象,主要参数如表1所示,煤的工业分析如表2所示.

表 1　ZGM95G-Ⅱ型中速磨煤机主要参数

Table 1　Main parameters of ZGM95G-Ⅱ medium speed coal mill

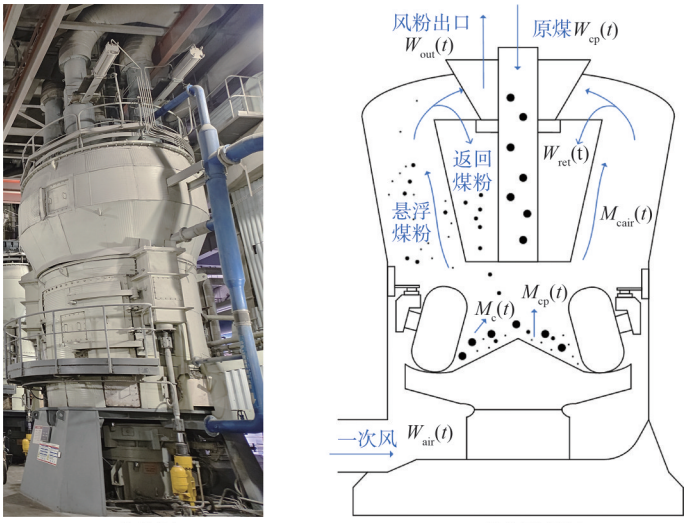
参数/单位	数值
锅炉配备磨煤机/台	5
标准制粉出力/(t/h)	52.1
额定功率/kW	421
磨煤电耗量/(kWh/t)	6~10
电动机电压/V	6 000
额定空气风量/(kg/s)	23.16
分离器叶轮转速/(r/min)	140

表 2　煤种基本参数

Table 2　Basic parameters of coal

参数	符号	数值
全水分	M_t	9.8
水分	M_{ad}	1.92
灰分	A_{ad}	26.85
挥发分	V_{ad}	27.32
	V_{ar}	25.13
全硫	$S_{t,ad}$	0.56
	$S_{t,ar}$	0.52
氢值	H_{ad}	3.39
高位发热量	$Q_{gr,ad}$	22.42
低位发热量	$Q_{net,ar}$	19.75

ZGM95G-Ⅱ型磨煤机是一种中速辊盘式磨煤机，由图1(b)可知，原煤从磨煤机中央落煤管进入磨环，旋转的磨环通过离心作用将原煤输送至研磨辊道，通过磨辊进行碾磨．一次风通过喷嘴环均匀进入磨环周围，将研磨后的煤粉烘干并输送至磨机上部分离器进行分离，粗粉被分离出返回磨环重磨，合格的细粉被一次风带出分离器．



(a) 实物图　　(b) 结构原理图

图 1　ZGM型中速磨煤机结构

Figure 1　Structure of ZGM medium speed coal mill

1.2 磨煤机数学模型

本文按照原煤在磨煤机的变化过程搭建动态模型[22],涵盖原煤和一次风输入到风粉混合输出过程. 针对风、煤参数,一次风温波动引起空气比热容的变化幅度不超过3%,相对磨煤机巨大的金属热容量及蒸发潜热,其产生的热量偏差可忽略不计;在热平衡计算中将干煤与水分的传热及蒸发过程分开计算,通过单独计算水分蒸发所需的汽化潜热,原煤含水量变化对系统热平衡的非线性影响已被精准剥离并纳入动态方程[17]. 故模型进行以下简化假设:

1)磨煤机中的煤只有原煤和煤粉两种存在形式,不考虑原煤的粒径影响,制粉过程无质量损失.

2)一次风取冷、热一次风均匀混合后的参数.

3)磨煤机的出口温度定义为分离器的出口温度,风、煤粉温度相同.

4)假设煤与风的物理性质等相关参数为常数,不随状态变化而变化(如煤和风的比热容等).

根据以上假设与图1(b)中原煤在磨煤机内变化流程建立原煤和煤粉质量方程:

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}M_{\mathrm{c}}(t) = W_{\mathrm{c}}(t) + W_{\mathrm{ret}}(t) - K_1 M_{\mathrm{c}}(t), \\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}M_{\mathrm{cp}}(t) = K_1 M_{\mathrm{c}}(t) - W_{\mathrm{cp}}(t), \\ \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}M_{\mathrm{cair}}(t) = W_{\mathrm{cp}}(t) - W_{\mathrm{out}}(t) - W_{\mathrm{ret}}(t), \end{cases} \tag{1}$$

式中:M_{c}为磨盘上原煤的质量,kg;M_{cp}为磨盘上煤粉的质量,kg;M_{cair}为空气中悬浮的煤粉质量,kg;W_{c}为给煤量,kg/s;W_{ret}为返回煤粉质量流量,kg/s;K_1为原煤转化煤粉的比例,%;W_{cp}为一次风携带的煤粉质量流量,kg/s;W_{out}为磨煤机出口煤粉质量流量,kg/s.

其中一次风携带的煤粉质量流量与一次风量和磨盘上煤粉的质量相关,而磨煤机出口的煤粉质量流量与分离器转速和磨煤机内空气中悬浮煤粉的质量流量相关,返回磨盘煤粉的质量同样取决于空气中煤粉的质量:

$$\begin{cases} W_{\mathrm{cp}}(t) = K_2 W_{\mathrm{air}}(t) M_{\mathrm{c}}(t), \\ W_{\mathrm{out}}(t) = K_3 M_{\mathrm{cair}}(t)\left(1 - \dfrac{\omega(t)}{K_4}\right), \\ W_{\mathrm{ret}}(t) = K_5 M_{\mathrm{cair}}(t), \end{cases} \tag{2}$$

式中:K_2为一次风携带煤粉比例,%;W_{air}为一次风量,kg/s;K_3为悬浮煤粉中离开磨煤机的比例,%;ω为分离器转速,r/s;K_4为磨煤机分离器转速的最小值,r/s;K_5为返回磨盘的比例,%.

磨煤机内悬浮的煤粉质量增加及一次风压差变化均会影响磨煤机压降,其影响关系如下[23]:

$$P_{\mathrm{d}}(t) = K_6\left(1 - e^{-K_7 M_{\mathrm{cair}}(t)}\right) P_{\mathrm{a}}(t), \tag{3}$$

式中:K_6为一次风压差修正系数;K_7为悬浮煤粉对风阻影响系数;P_{a}为一次风压差,Pa.

一次风压差与一次风量和一次风温度相关[24]:

$$P_{\mathrm{a}}(t) = \frac{22.4}{28.8} \cdot \frac{273 + T_{\mathrm{in}}}{273} \cdot \left(\frac{W_{\mathrm{air}}}{10}\right)^2. \tag{4}$$

磨煤机功率和磨煤机磨盘上的煤粉变化呈线性关系:

$$P_{\mathrm{mill}}(t) = K_8 M_{\mathrm{c}}(t) + K_9 M_{\mathrm{cp}}(t) + E_{\mathrm{e}}, \tag{5}$$

式中:K_8为磨盘上每千克原煤消耗的功率比例,%;K_9为每千克煤粉消耗的电力比例,%;E_{e}为磨煤机空转消耗的电功率比例,%.

基于上述质量方程,结合能量守恒,建立磨煤机出口温度方程:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}T_{\mathrm{out}}(t) K_{11} = Q_{\mathrm{in}} - Q_{\mathrm{out}}, \tag{6}$$

式中:T_{out}为磨煤机出口风粉混合温度,℃;K_{11}为磨煤机热容量,kJ/℃;Q_{in}为输入磨煤机的热量,kJ/s;Q_{out}为输出磨煤机的热量,kJ/s.

输入磨煤机的热量:

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{air}} + Q_{\text{rc}} + Q_{\text{w}} + Q_{\text{p}}, \tag{7}$$

$$\begin{cases} Q_{\text{air}} = C_{\text{air}} W_{\text{air}}(t) T_{\text{in}}(t), \\ Q_{\text{rc}} = (1 - \rho_{\text{m}}) C_{\text{c}} W_{\text{c}}(t) T_{\text{c}}, \\ Q_{\text{w}} = \rho_{\text{m}} C_{\text{w}} W_{\text{c}}(t) T_{\text{c}}, \\ Q_{\text{p}} = K_{10} P_{\text{mill}}(t), \end{cases} \tag{8}$$

式中：Q_{air}为一次风热量，kJ/s；C_{air}为一次风比热容，kJ/(kg·℃)；T_{in}为一次风温度，℃；Q_{rc}为原煤热量，kJ/s；ρ_{m}为原煤中水含量，%；C_{c}为原煤比热容，kJ/(kg·℃)；T_{c}为原煤温度，℃；Q_{w}为原煤中水的热量，kJ/s；C_{w}为水的比热容，kJ/(kg·℃)；Q_{p}为研磨煤粉的热量，kJ/s；K_{10}为研磨功率转化热量的耗散系数，kJ/(s·%)．

输出磨煤机的热量：

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{a\&e}} + Q_{\text{rcd}} + Q_{\text{l}} + Q_{\text{loss}} + Q_{\text{gr}}, \tag{9}$$

$$\begin{cases} Q_{\text{a\&e}} = C_{\text{air}}\left(W_{\text{air}}(t) + \rho_{\text{m}} W_{\text{c}}(t)\right) T_{\text{out}}, \\ Q_{\text{rcd}} = (1 - \rho_{\text{m}}) C_{\text{c}} W_{\text{out}}(t) T_{\text{out}}, \\ Q_{\text{l}} = \rho_{\text{m}} W_{\text{c}}(t) L_{\text{v}}, \\ Q_{\text{loss}} = K_{\text{loss}} Q_{\text{in}}, \\ Q_{\text{gr}} = M_{\text{total}} C_{\text{c}} T_{\text{out}}, \end{cases} \tag{10}$$

$$M_{\text{total}} = \frac{\text{d}}{\text{d}t} M_{\text{c}}(t) + \frac{\text{d}}{\text{d}t} M_{\text{cp}}(t) + \frac{\text{d}}{\text{d}t} M_{\text{cair}}(t), \tag{11}$$

式中：$Q_{\text{a\&e}}$为出口一次风和蒸发水的热量，kJ/s；Q_{rcd}为出口煤粉的热量，kJ/s；Q_{l}为水的蒸发潜热，kJ/s；L_{v}为水的汽化潜热，J/kg；K_{loss}为热损失系数，取0.02；M_{total}为磨煤机内总质量流量，kg/s．

2　模型参数辨识及宽负荷验证

2.1　参数辨识

为获得模型中11个未知参数K值，本文采用具备较好鲁棒性、使用广泛、参数辨识效果好的遗传算法，对模型进行参数辨识，结果如表3所示．

表 3　模型中的K值

Table 3　The parameter K value in the model

K	数值	K	数值
K_1	0.033 8	K_7	3.928 0
K_2	0.068 8	K_8	0.157 0
K_3	0.033 1	K_9	0.542 3
K_4	0.651 9	K_{10}	8.980 6
K_5	0.004 9	K_{11}	2.572×10^7
K_6	2.909 1		

2.2　原模型宽负荷动态模型验证

为验证模型宽负荷准确性，本文使用电厂40%、70%、90%典型负荷工况进行模型验证，各负荷风煤参数及磨煤机运行数量如表4所示．

表 4　各负荷工况数据

Table 4　Data of each load condition

机组负荷	磨煤机台数	给煤量范围/(kg/s)	一次风量范围/(kg/s)
40%	3	8.00~9.30	21.00~22.11
70%	4	8.97~11.52	20.47~23.85
90%	5	8.39~10.75	19.32~21.47

以甲磨为研究对象,以90%负荷为例介绍磨煤机验证过程,其输入参数如图2所示. 仿真值和实际值对比如图3所示. 结果表明,压降相对误差在第4 965 s处最大(4.95%),出口温度和功率最大误差分别为2.31%和3.51%. 说明模型准确可靠. 由图4可知,随着负荷降低,在40%负荷处,模型出口温度误差超过10%,模型宽负荷适应性不足.

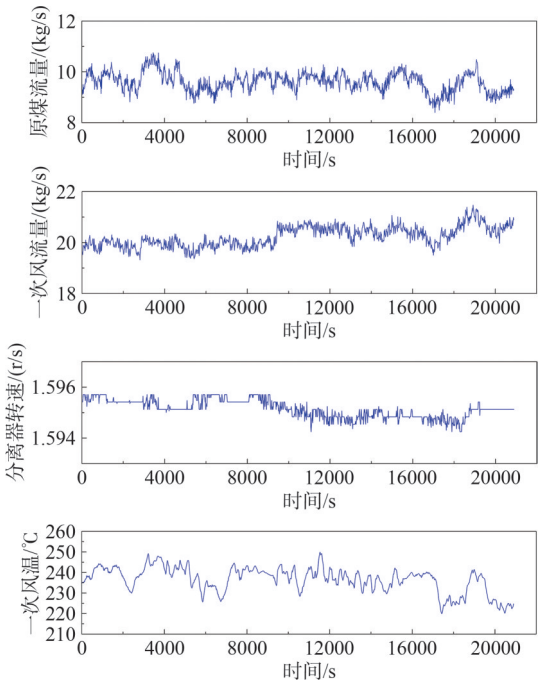


图 2 输入参数

Figure 2 Input parameters

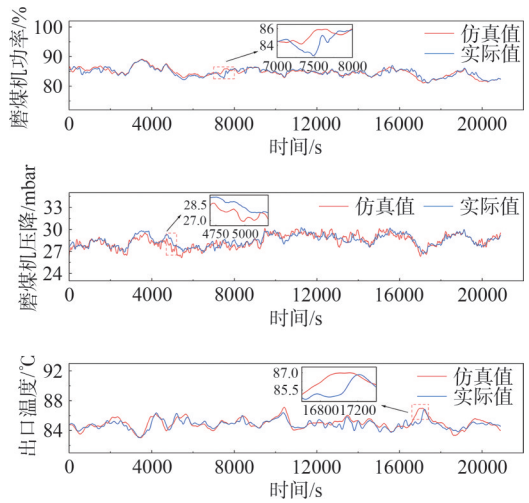


图 3 磨煤机关键参数模型验证

Figure 3 Model verification of key parameter of coal mill

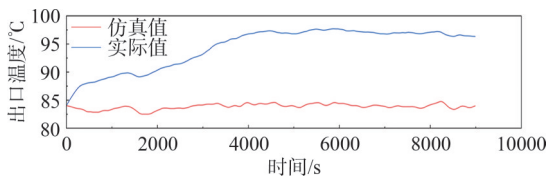


图 4 40%负荷磨煤机出口温度验证

Figure 4 40% load coal mill outlet temperature verification

2.3　低负荷失真机理及分析

基于表4中各负荷风煤参数分析，低负荷工况下风煤比偏高，且风煤参数作为磨煤机主要热量输入，可能是造成出口温度误差的主要原因．因此，基于厂家磨煤机说明书中的理论空气曲线（图5），选取40%负荷和90%负荷的风煤参数对比如图6所示．研究结果表明，低负荷工况下，风煤比显著高于设计值，为进一步验证风煤比是否为出口温度误差的唯一来源，对理论风煤比下磨煤机出口温度进行仿真，结果如图7所示，出口温度误差虽然有所下降，但仍然存在偏差．

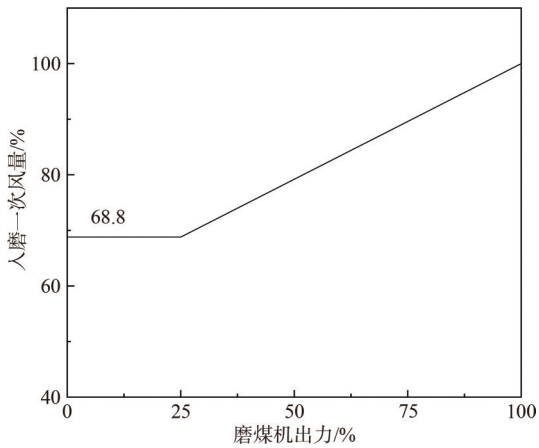


图 5　磨煤机理论空气曲线

Figure 5　Theoretical air curve of coal mill

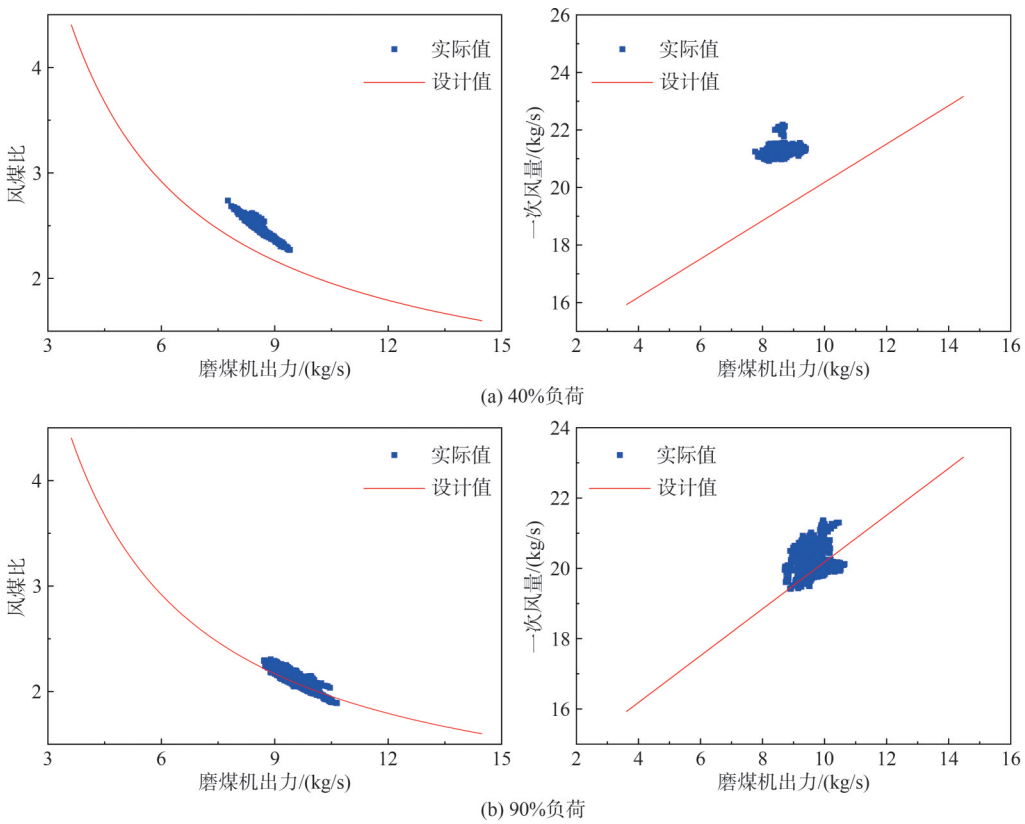


图 6　40%和90%负荷下一次风量及风煤比的设计值与实际值对比

Figure 6　The design values of primary air volume and air-coal ratio under 40% and 90% load compared with the actual values

为进一步分析误差来源，基于90%负荷数据，开展模型参数敏感性分析，采用局部敏感性分析方法对模型验证结果中各输入参数施加±10%的扰动，评估其对出口温度的影响程度，结果如图8(a)所示．同样对各热量参数进行扰动分析，结果如图8(b)所示．

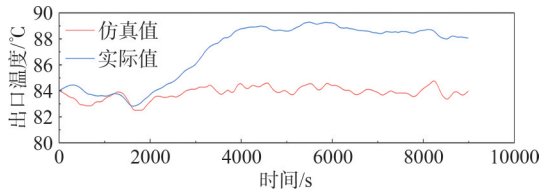


图 7 理论风煤比下40%负荷磨煤机出口温度

Figure 7 The outlet temperature of 40% load coal mill under theoretical air-coal ratio values

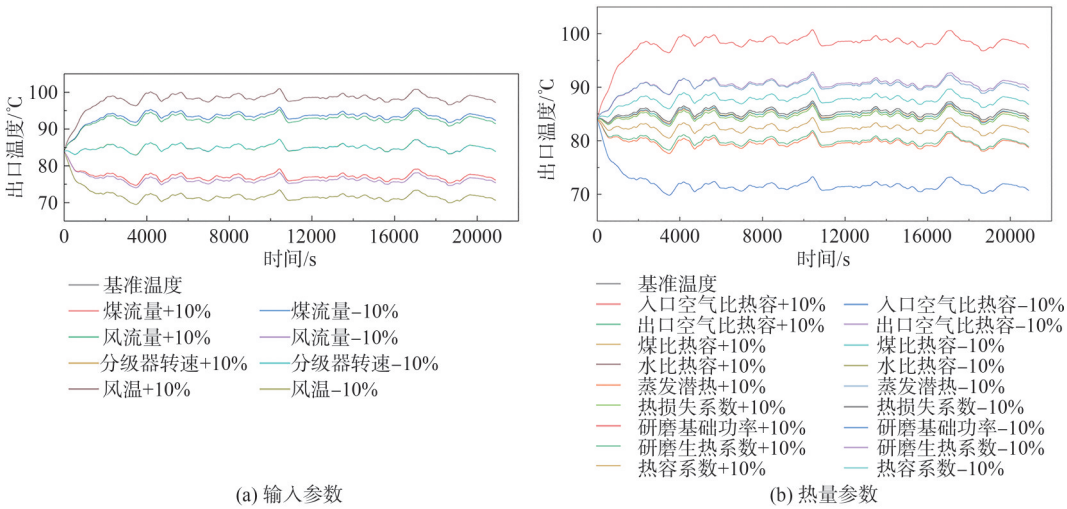


图 8 关键参数±10%扰动下的出口温度变化

Figure 8 The change of outlet temperature under ±10% disturbance of key parameters

为直观比较各参数对出口温度的影响程度,将图8中的敏感度结果进行归一化处理,输入参数与各热量参数的归一化敏感度排序分别如图9(a)和图9(b)所示. 结果表明,一次风相关参数对磨煤机的热平衡影响最为显著. 除了介质参数影响,汽化潜热和磨煤机热损失对出口温度的影响较大,而高一次风量直接影响磨煤机内热传递过程,后续模型修正应重点围绕磨煤机的干燥传热过程展开,以实现对模型的合理修正.

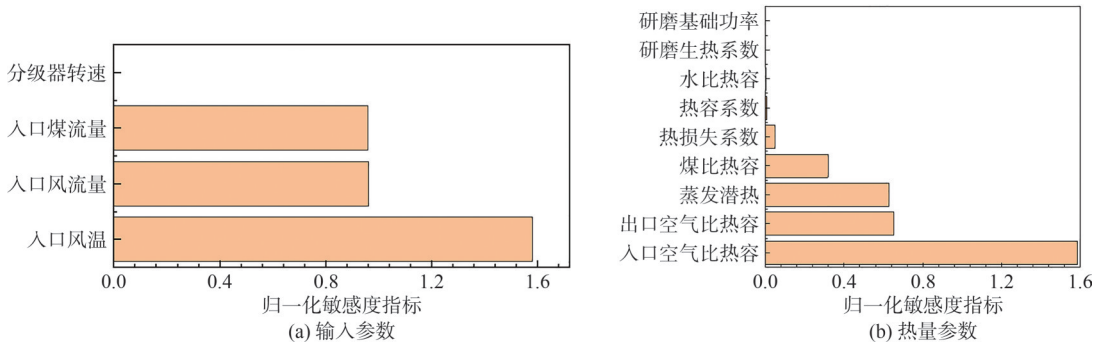


图 9 关键参数敏感度排序

Figure 9 Sensitivity ranking of key parameters

2.4 模型修正及宽负荷验证

由传热机理可知,一次风对磨煤机内部热传递的影响包含原煤干燥和一次风与磨煤机金属间的换热两部分. 其中原煤干燥表示煤中水的汽化潜热,式(10)是最大蒸发量与汽化潜热的乘积,将蒸发过程进行简化处理,未考虑一次风温和一次风量对其影响. 故在式(10)中添加蒸发系数,与磨煤机内部的平均温度、风量和煤中水分相关,对汽化潜热修正建立如下公式:

$$\begin{cases} Q_1 = \rho_m W_c(t) L_v \beta, \\ \beta = K_{12} T_m R_{air} \rho_m, \\ T_m = \dfrac{T_{in}(t) + T_{out}(t)}{2}, \\ R_{air} = \dfrac{W_{air}(t)}{W_{aird}(t)}, \end{cases} \tag{12}$$

式中：β为蒸发系数；K_{12}为修正系数；T_m为磨煤机内平均温度，℃；R_{air}为风量影响系数；W_{aird}为设计一次风量，kg/s．其中蒸发系数β是干燥速率与煤种特性的定量耦合，而干燥速率主要受磨煤机内平均温度和风量大小的影响，二者的大小影响磨煤机内干燥能力的强弱；而不同煤种水分含量不同，对蒸发过程形成内在约束，即不同含水率煤种的水分被干燥的难易程度不同．气-固对流换热还受到煤粉动态比表面积、气-固接触时间及流场变化等复杂因素影响，故增加修正系数K_{12}对难以测量参数所造成的传热偏差进行修正．

式(10)中磨煤机热损失为固定热损失系数与输入热量的乘积，该处理忽略了一次风强化换热．热损失是磨煤机内部热量与外界的热交换过程，由于磨煤机内部换热面积难以计算，为避免模型过于复杂，将换热面积与总传热系数等常数的乘积用参数代替．同时考虑一次风量的修正，重新定义的热损失方程如下：

$$Q_{loss} = K_{13}\left(1 + K_{14}\left(R_{air} - 1\right)\right)\left(T_m - T_a\right), \tag{13}$$

式中：K_{13}为热损失系数，表征磨煤机固有的壳体导热热阻、外部换热热阻及面积；K_{14}为一次风强化换热因子，表征一次风量变化对强化换热敏感度；T_a为环境温度，℃．

基于上述修正模型，对40%负荷工况进行参数辨识，结果如表5所示，所得K值与表3相比量级一致，说明不同负荷下K值差异不大．在此基础上对宽负荷工况进行模型验证，结果如图10所示，修正后的模型误差均在5%以内．其中：40%负荷出口温度最大误差为2.4%；70%负荷压降最大误差为4.97%；90%负荷对比未修正模型误差均有降低，出口温度和功率相对误差分别为3.16%和2.02%，压降误差为4.22%，下降了0.73%，出口温度和功率相对误差均下降了约0.3%．综上，说明修正后的模型准确可靠，宽负荷工况适应性较好，且本模型可迁移至其他型号磨煤机或不同煤种进行应用，但需要重新进行参数辨识．

表 5　40%负荷模型中K值

Table 5　K value in 40% load model

K	数值	K	数值
K_1	0.044 4	K_8	0.108 4
K_2	0.057 2	K_9	0.474 8
K_3	0.047 0	K_{10}	9.989 7
K_4	0.630 3	K_{11}	2.586×10^7
K_5	0.006 9	K_{12}	0.067 4
K_6	2.842 0	K_{13}	5.879×10^3
K_7	3.634 6	K_{14}	0.080 4

3　提升磨煤机出力的动态响应特性

为满足机组灵活调峰对制粉系统快速响应的需求，本节基于修正后的宽负荷ZGM型中速磨煤机动态模型，研究通过提升运行中磨煤机的出力，以部分代偿方式，解决新磨启动空窗期导致燃料供应滞后问题．重点分析给煤斜坡速率、一次风量比例因子(风量因子)及一次风超前时间(超前时间)等运行参数对煤粉出力响应时间、出口温度等动态特性的影响规律，并通过网格搜索方法，获得了覆盖不同负荷区间的最优参数组合，为提升制粉系统在变负荷过程中的响应能力与运行安全性提供指导．

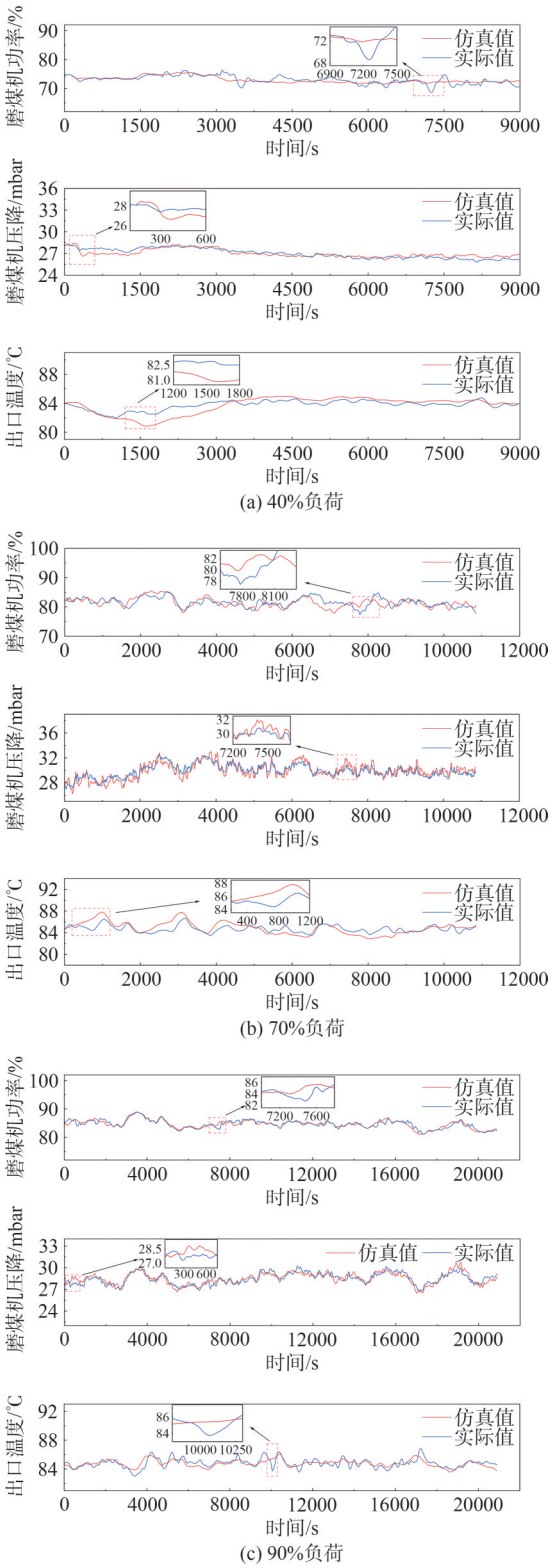


图 10　宽负荷磨煤机关键参数模型验证

Figure 10　Validation of key parameter model of wide load coal mill

3.1　升负荷过程分析

为确定升负荷过程中磨煤机的出力需求及新磨启动时间,截取包含磨煤机启动过程的升负荷数据进行分析. 图11给出了总燃料量与机组负荷随时间的变化趋势,结果表明,总燃料量与机组负荷变化趋势基本一致. 在4 275 s时启动第五台磨煤机(丙磨),截取4 000~7 200 s区间内丙磨相关参数进行仿真,得到其出口

煤粉流量响应曲线，如图12所示．将开始进入相对稳定区间后的均值作为稳态值，当出口煤粉流量达到95%稳态值并持续稳定时，磨煤机出力达到稳定．结果表明，丙磨从给煤机启动到出力开始变化约有15 s延迟，从给煤机启动到出力稳定的响应时间为564 s；给煤机启动到给煤稳定的响应时间为228 s，对应给煤流量变化率为1.89 kg/(s·min)．说明在机组升负荷过程中，若仅依赖新增磨煤机启动补充燃料，难以及时满足锅炉对燃料量快速提升的需求，故有必要研究通过提升运行磨煤机出力对启动空窗期进行部分代偿的可行性．

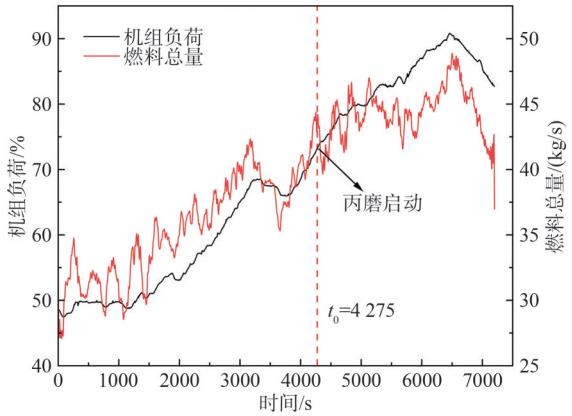


图11　总燃料量与机组负荷变化曲线

Figure 11　Total fuel quantity and unit load change curve

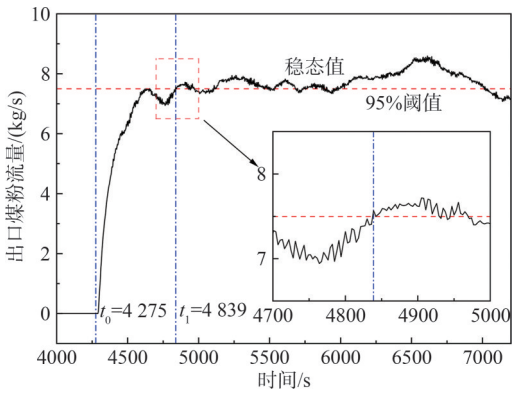


图12　丙磨出口煤粉流量响应曲线

Figure 12　Pulverized coal flow response curve of mill outlet

为覆盖宽负荷工况，本文选取机组负荷由40%升至50%和70%升至90%两个需要启动磨煤机补充燃料的典型场景开展研究．考虑到实际运行中磨煤机参数存在差异，本文以单台磨煤机为研究对象，并以各稳态负荷下运行参数均值作为初始值．目标负荷对应的单台磨煤机参数根据原负荷下运行磨煤机台数折算得到，具体见表6，其中目标负荷下的一次风流量依据丙磨启动过程中的风煤拟合关系确定．

表 6　各负荷单台磨煤机运行数据

Table 6　Operation data of a single coal mill under different loads

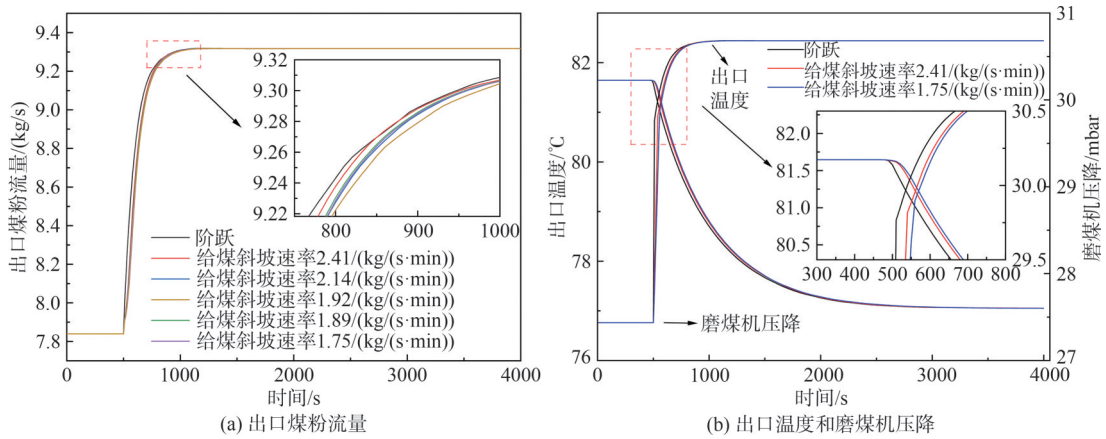
机组负荷	磨煤机台数	给煤量/(kg/s)	一次风量/(kg/s)	一次风温/℃	分离器转速/(r/s)
40%	3	8.510 1	21.466 0	230.794 9	1.635 5
50%	4	10.114 1	22.498 0	232.185 3	1.596 0
70%	4	10.194 3	22.627 4	234.966 0	1.595 4
90%	5	11.195 4	23.193 7	236.343 5	1.595 1

为保证提高磨煤机出力过程中的运行安全，防止堵磨和自燃等问题发生，根据磨煤机说明书中的安全运行限值及实际运行数据设置扰动边界：磨煤机稳定出口温度控制在70~90 ℃，动态过程中不低于65 ℃；

磨煤机出力不低于额定出力的40%;一次风流量不超过24 kg/s;压降超过4 kPa时视为存在堵煤风险. 考虑到丙磨从给煤开始到出力约需15 s,故假设一次风量变化不晚于给煤量变化;扰动过程中一次风温和分离器转速随负荷线性变化. 本文设定的边界条件均源于设备说明书与现场运行数据. 设备说明书中标定的最大通风阻力为6 kPa,考虑到实际运行数据中无严重堵磨样本,正常压降水平较低,故将堵煤风险的压降阈值保守设定为4 kPa,该设定值远大于正常运行最大压降,且低于设备设计极限,具备合理的预警提前量.

3.2 给煤斜坡速率

以丙磨启动过程中给煤流量变化率作为基准值,在t = 500 s时改变给煤斜坡速率,分析其对磨煤机出口煤粉流量、出口温度及压降参数的影响. 由于两种升负荷场景下关键参数变化趋势基本一致,本文以40%升至50%负荷过程为例进行说明,如图13所示. 随着给煤斜坡速率增大,出口煤粉流量达到稳定出力的过程明显加快;同时,出口温度与压降的变化更为剧烈,而在较低给煤斜坡速率下,两者变化相对平缓. 图14给出了不同给煤斜坡速率下两种升负荷场景的响应时间(定义为煤粉出力达到新稳态值95%所需时间). 结果表明,在低负荷区间,阶跃响应以及给煤斜坡速率为2.14 kg/(s·min)和2.41 kg/(s·min)时响应最快,均为300 s,其余工况响应时间为310 s;在高负荷区间,随着给煤斜坡速率增大,响应时间总体呈减小趋势,最快为350 s,并在部分给煤斜坡速率区间内出现响应时间相同的现象.



(a) 出口煤粉流量 (b) 出口温度和磨煤机压降

图13 40%升50%负荷下给煤斜坡速率对煤粉出力、出口温度及磨煤机压降的影响

Figure 13 The influence of coal feeding adjustment rate on pulverized coal output, outlet temperature and pressure drop of coal mill from 40% to 50% load

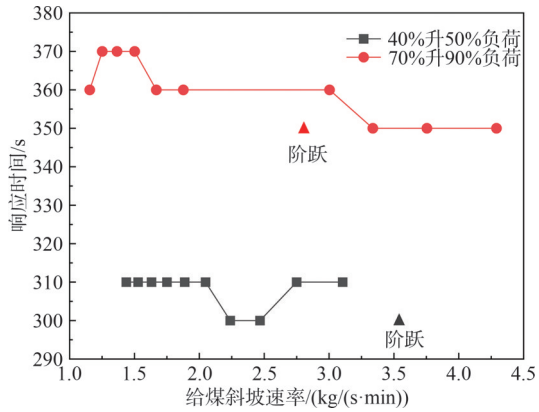


图14 不同负荷段下给煤斜坡速率对煤粉出力响应时间的影响

Figure 14 The influence of coal feeding adjustment rate on the response time of pulverized coal output under different load sections

造成上述差异的原因为:不同负荷区间内磨煤机内部存煤量、煤粉干燥需求及系统惯性存在显著差异. 高负荷区间虽然所需提升的出力增量相对较小,但初始给煤量高,磨盘上存煤量基数大,导致系统热惯性大,

达到新平衡所需时间更长，整体响应慢于低负荷区间[25-26]．同时，高负荷区间一次风温较高、热容量较大，煤粉干燥能力较强，此时增加给煤斜坡速率能直接、有效地转化为出粉量的提升[8]，故响应时间随给煤斜坡速率增大而呈现减少的趋势．相较之下，低负荷区间内部存煤量少，但目标出力提升幅度大，此时给煤增加与干燥能力之间的匹配关系成为关键．过低的给煤斜坡速率限制了出力提升速度，而过高的给煤斜坡速率会导致磨内蒸发负荷骤增，若干燥热量（主要来自一次风）无法及时匹配，将引起出口温度快速下降，恶化干燥条件，反而延长了稳定时间[27]．故存在一个最优的给煤斜坡速率区间（如2.14~2.41 kg/(s·min)），在此区间内，给煤速率与干燥能力达到最佳平衡，故而响应时间最短．综上，磨煤机的动态响应是内部物料存储（惯性）、输入能量（给煤）与干燥介质（一次风）三者之间动态耦合的结果．高负荷下，大惯性是主要矛盾，提高给煤量能有效克服惯性；低负荷下，干燥能力成为瓶颈，需准确匹配一次风量和给煤量的变化速率．

3.3　一次风量比例因子

将丙磨升负荷过程中一次风量与给煤量拟合曲线的斜率作为一次风量比例因子基准值，对应风量因子为1；通过调整该因子来改变一次风量随给煤量变化的斜率，以实现一次风量调节，其他运行条件保持不变．由于高、低负荷过程关键参数变化趋势基本一致，本文以70%升90%负荷过程为例进行说明，如图15所示．图16为两种升负荷场景下，不同风量因子对应的煤粉出力响应时间．结果表明，在低负荷区间，风量因子为1.05时响应最快，为300 s，其余工况均为310 s；在高负荷区间，风量因子为1.10时响应最快，为340 s，风量因子为0.90时响应最慢，为370 s，风量因子为0.95与1.15时，响应时间为350 s，风量因子为1.00和1.05时，响应时间均为360 s．

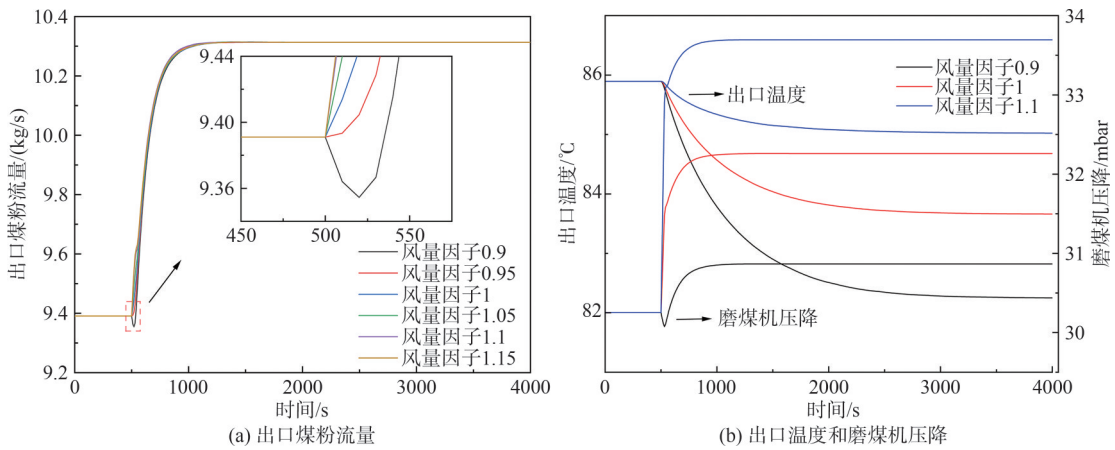


图15　70%升90%负荷下不同风量因子对煤粉出力、出口温度及磨煤机压降的影响

Figure 15　The influence of different air volume factors on pulverized coal output, outlet temperature and pressure drop of coal mill from 70% to 90% load

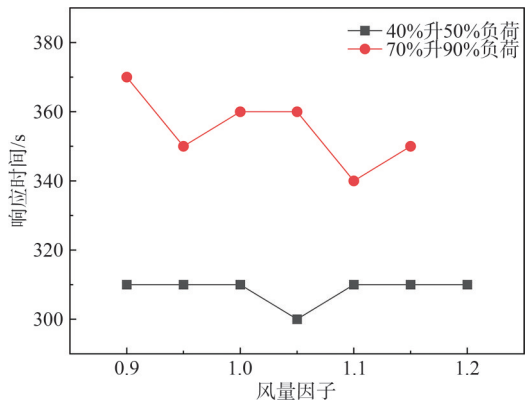


图16　不同负荷段下风量因子对煤粉出力响应时间的影响

Figure 16　The influence of air volume factor on the response time of pulverized coal output under different load sections

综上分析,随着风量因子增大,初始阶段一次风对煤粉的携带能力增强,出口煤粉流量的增长速率逐渐加快. 然而,大量煤粉被迅速带出会导致磨盘上存煤量减少,进而削弱一次风的持续携粉能力,形成一个受内部存粉动态平衡制约的负反馈过程. 因此,在较低风量条件下,出口煤粉流量存在先下降后上升的变化特征. 稳态阶段增大风量会加大磨煤机内部流动阻力,导致压降增大并呈现明显阶跃变化. 同时风量增加强化了煤粉的干燥作用,使得出口温度升高且达到稳定的时间缩短. 此外,在高负荷区间由于存粉量高、惯性大,一次风量对内部存粉的动态平衡影响较为迟缓,从而造成高负荷区间响应时间随风量变化的差异;在低负荷区间由于存粉量少,一次风量对平衡影响较快,而过高和过低风量的影响机制相反,所以在低负荷区间存在最佳风量因子1.05,响应时间在其两侧大致呈对称分布.

一次风量调节不仅直接影响煤粉的输送能力,更决定了磨煤机对新增给煤量的干燥承载能力. 这与单纯依靠结构优化(如改进分离器)来改善出粉特性的思路有所不同,更体现了运行过程中风煤协调的动态优化目标. 适当提高风量因子,可通过降低制粉系统循环倍率、减少内部物料再循环来提升响应速度;但风量过高会增加不必要的通风电耗,并可能影响煤粉细度. 故存在一个与给煤速率相匹配的最优风量因子,以实现响应速度与运行经济性、安全性的平衡.

3.4 一次风超前时间

一次风超前时间是指一次风先于给煤量扰动的时间间隔,且一次风的变化趋势与风煤同时扰动保持一致,其他运行条件不变. 丙磨从给煤扰动到出力变化间隔约需15 s,给煤量变化与出力变化之间的延迟时间约为20 s,故取5~60 s为超前时间范围. 由于高低负荷过程关键参数变化趋势基本一致,本节以70%升90%负荷过程为例进行说明. 如图17(a)所示,当一次风量提前于给煤响应时,磨煤机入口风量率先增大,使得磨盘上部分煤粉被提前带出,导致出口煤粉流量出现一个初始峰值. 随后,由于磨盘上煤粉质量的减少削弱了一次风的持续携带能力,出力会短暂下降. 待给煤量增加后,磨盘上原煤质量回升,出力才持续增加并最终达到新的稳态. 该先上升后下降再上升的动态过程,是磨内存煤量与一次风携带能力相互制约的典型表现[27].

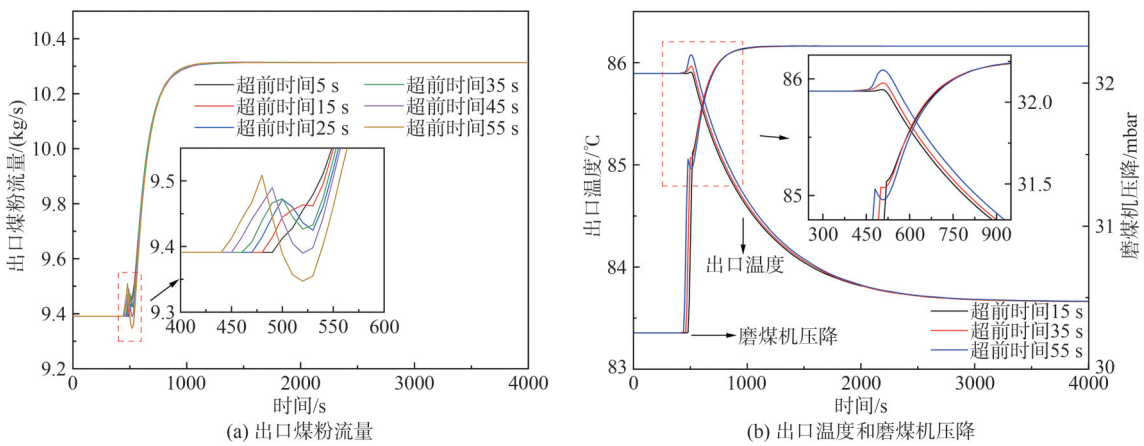


图17 70%升90%负荷下不同超前时间对煤粉出力、出口温度及磨煤机压降的影响

Figure 17 The influence of different advance time on pulverized coal output, outlet temperature and pressure drop of coal mill from 70% to 90% load

对于出口温度的影响,当一次风量提前于给煤响应时,干燥热量过剩,导致出口温度瞬间升高(图17(b)). 待给煤量增加后,蒸发负荷增大,温度开始回落. 提前时间越大,出口温度的初始峰值越高,但最终稳态温度不超过一次风温. 对于压降,其变化受一次风量和磨内料层厚度共同影响. 提前时间超过15 s时,压降呈现先上升(风温和体积流量增加)、后下降(携粉量下降)、再上升(给煤后料层增厚)的复杂变化.

一次风超前时间的设置,是对制粉系统大惯性、大滞后特性的一种前馈补偿. 通过将一次风动作指令前移,可在煤粉响应尚未建立前预先调整磨内输送与干燥条件,从而改善动态过程中的风煤匹配关系,缩短整体

响应时间[28]．然而，响应时间随超前时间的变化呈非线性特征，且存在多个局部最优点，如图18所示．故最优超前时间的选择，是一次风携带煤粉能力与磨内动态存煤量之间相互平衡的结果，且多个变量存在强耦合关系，故下一节将通过算法寻优进行综合优化．

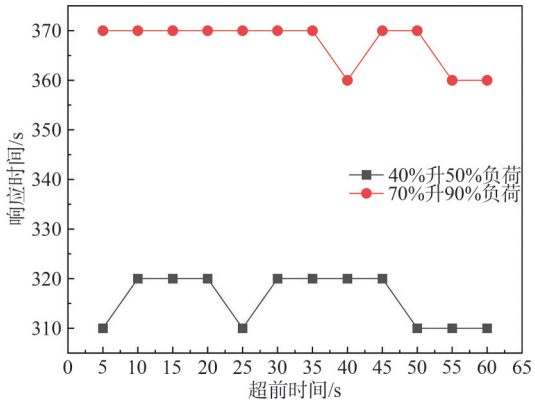


图18　不同负荷段下超前时间对煤粉出力响应时间的影响

Figure 18　The influence of advance time on the response time of pulverized coal output under different load sections

3.5　综合扰动寻优

上述3个扰动下，磨煤机响应时间均呈现非线性特征，其综合作用难以通过简单叠加预测．本文将在单因素分析基础上，以上述3个扰动为变量，以最小响应时间为目标，同时将磨煤机出口温度、压降及一次风量等参数作为安全约束，进行协同优化．网格搜索方法能够系统性遍历参数空间内所有可能的组合，并评估其性能，适用于参数组合较少且需要全局寻优的场景[29]．故本节采用网格搜索法进行综合扰动寻优．具体参数搜索范围及步长设置如下：1）给煤斜坡速率．低负荷场景取值范围为1.1~3.0 kg/(s·min)，高负荷场景取值范围为2.4~4 kg/(s·min)，步长均为0.1 kg/(s·min)．2）一次风量比例因子．低负荷场景下0.9~1.2，高负荷场景下0.9~1.15，步长均为0.01．3）一次风超前时间．两种场景取值范围均为5~60 s，步长为1 s．对每个参数组合进行动态仿真，记录其响应时间，并筛选满足所有安全约束且响应时间最短的组合．

在40%升50%低负荷场景下，共仿真34 720个参数组合，其中响应时间最短为300 s的组合共计3 354个．在70%升90%高负荷场景下，共仿真20 944个组合，其中响应时间最短为350 s的组合共计533个．上述最佳参数筛选共耗时47 min，其响应时间最短参数组合分布如图19所示，部分最优参数组合示例如表7和表8所示．

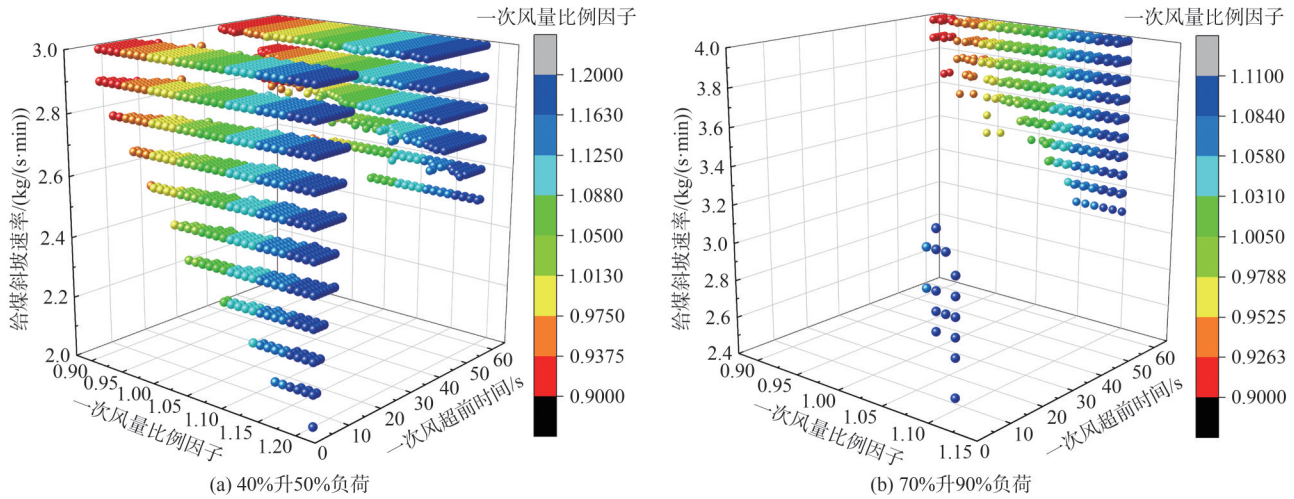


图19　不同负荷段下最优响应时间对应的参数组合分布

Figure 19　The parameter combination distribution corresponding to the optimal response time under different load sections

表 7 40%升50%负荷最优响应时间扰动组合

Table 7 Optimal response time disturbance combination from 40% to 50% load

扰动	组合1	组合2	组合3	组合4	组合5	组合6
给煤斜坡速率/(kg/(s·min))	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3
一次风量比例因子	1.2	1.2	1.2	0.96	0.9	0.9
一次风超前时间/s	5	7	11	59	55	5

表 8 70%升90%负荷最优响应时间扰动组合

Table 8 Optimal response time disturbance combination from 70% to 90% load

扰动	组合1	组合2	组合3	组合4	组合5	组合6
给煤斜坡速率/(kg/(s·min))	2.5	2.9	3.1	3.3	3.5	3.7
一次风量比例因子	1.11	1.09	1.06	1.03	1.01	0.91
一次风超前时间/s	5	5	60	59	58	57

由最优参数组合集与图19可知,给煤斜坡速率与一次风量比例因子呈现负相关,给煤斜坡速率越大,实现最短响应时间所需要的一次风量比例因子可相应减小. 在低负荷场景下,当给煤斜坡速率达到2.7 kg/(s·min)时,一次风量因子可达下限值0.9;在高负荷场景下,当给煤斜坡速率为3.9 kg/(s·min)时,一次风量因子也可取0.9. 这表明快速的给煤量增加本身能够有效提升磨盘上原煤向煤粉的转换速率,从而降低对额外风量补偿的依赖[7].

在相同给煤斜坡速率下,一次风量因子越大,其对应的一次风超前时间选择范围越广. 最优超前时间多分布在50 s以上. 说明在快速增加给煤量时,需要更早地调整风量以匹配随之增大的干燥需求(蒸发负荷)与输送需求,避免因风煤响应不同步导致出口温度波动或响应延迟.

随着给煤斜坡速率增加,最优参数组合呈现多样化趋势,即存在多种不同组合均能实现相近的最短响应时间. 反映制粉系统内部(磨内存煤量、悬浮煤粉量)存在多个能实现快速动态平衡的路径. 具体组合的选择,将取决于对运行平稳性(如出口温度波动)、经济性(耗电量)或设备安全的不同侧重.

4 结 论

本文对ZGM型中速磨煤机进行宽负荷动态建模,完整描述原煤在磨煤机中的变化过程,并利用Matlab软件完成模型的参数辨识和验证. 针对机组低负荷时较高风煤比导致磨煤机模型失真的问题,对汽化潜热和磨煤机散热模型进行修正,使得模型在40%~90%宽负荷内关键参数的仿真误差均小于5%,提升了模型的预测精度和负荷适应性. 在此基础上,研究揭示了提升运行磨煤机出力部分代偿磨煤机启动空窗期的运行方式下,给煤斜坡速率、一次风量比例因子及一次超前时间对煤粉出力响应时间与出口温度的非线性耦合影响规律,发现给煤斜坡速率是影响出力响应速度的直接影响因素,而一次风量比例因子通过调节风煤比,显著影响磨内输送与干燥过程,一次风超前时间是对系统大滞后特性的有效前馈补偿手段. 最后,利用网格搜索获得不同负荷区间的最优参数组合,揭示了实现快速响应的参数匹配规律,相比开启一台磨煤机到运行稳定的564 s,提升磨煤机出力到运行稳定在低负荷段为300 s,高负荷段为350 s,至少可提前3.6 min. 通过对磨煤机控制策略进行改造,根据已知的最佳运行参数和DCS中磨煤机出力以及风量数据,可以前馈调整磨煤机风煤参数,无需增加测点式软测量即可实现该策略. 本研究不仅增强了中速磨煤机动态模型的理论可靠性,也为火电机组参与宽负荷调峰提供了运行优化策略,后续可向在线自适应校正及制粉-燃烧系统协同优化方向深入拓展.

参考文献:

[1] 李政,李伟起,张忠伟,等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究[J]. 中国工程科学,2024,26(4):108-120.

Li Z,Li W Q,Zhang Z W,et al. Development strategy of flexible resources in China’s power system under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Strategic Study of CAE,2024,26(4):108-120. (in Chinese)

[2] 饶宏，韩丰，陈政，等. 我国电力安全供应保障策略研究[J]. 中国工程科学，2023，25(2)：100-110.
Rao H，Han F，Chen Z，et al. Strategy for guaranteeing power supply security of China[J]. Strategic Study of CAE，2023，25(2)：100-110.（in Chinese）

[3] 国家发展和改革委员会，国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案[EB/OL]. (2022-05-14)[2026-05-27]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-05/30/c1310608539.htm.
National Development and Reform Commission，National Energy Administration. Implementation plan for promoting high quality development of new energy in the new era[EB/OL]. (2022-05-14)[2026-05-27]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-05/30/c1310608539.htm.（in Chinese）

[4] 王庆华，刘吉臻，樊欢豹，等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术：锅炉系统及汽轮发电机系统[J]. 中国电机工程学报，2024，44(18)：7136-7167.
Wang Q H，Liu J Z，Fan H B，et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition：Boiler system and turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(18)：7136-7167.（in Chinese）

[5] 李志军. 600 MW电站锅炉磨煤机改造技术研究及质量控制[D]. 北京：华北电力大学，2017.
Li Z J. Research on reforming technology and quality control of 600 MW utility boiler pulverizer[D]. Beijing：North China Electric Power University，2017.（in Chinese）

[6] 田丹，田亮，刘鑫屏，等. 中速磨直吹式制粉系统的动态模型[J]. 电力科学与工程，2008，24(9)：41-44.
Tian D，Tian L，Liu X P，et al. Dynamic model of medium speed mill direct-fired pulverizing system[J]. Electric Power Science and Engineering，2008，24(9)：41-44.（in Chinese）

[7] Agrawal V，Panigrahi B，Subbarao P. A unified thermo-mechanical model for coal mill operation[J]. Control Engineering Practice，2015，44：157-171.

[8] Gao Y，Zeng D，Liu J，et al. Optimization control of a pulverizing system on the basis of the estimation of the outlet coal powder flow of a coal mill[J]. Control Engineering Practice，2017，63：69-80.

[9] 陈小强，韩晓岗，孙海峰，等. 火力发电机组经济启动管理实践[J]. 创新世界周刊，2021(9)：46-53.
Chen X Q，Han X G，Sun H F，et al. Practice of economic start-up management of thermal power generating units[J]. Innovation World Weekly，2021(9)：46-53.（in Chinese）

[10] Austin L G. Introduction to the mathematical description of grinding as a rate process[J]. Powder Technology，1971，5(1)：1-17.

[11] Sato K，Meguri N，Shoji K，et al. Breakage of coals in ring-roller mills part I：The breakage properties of various coals and simulation model to predict steady-state mill performance[J]. Powder Technology，1996，86(3)：275-283.

[12] 左蔚然. MPS磨煤机运行过程数学建模与优化[D]. 徐州：中国矿业大学，2013.
Zuo W R. Mathematic modeling and optimization on the process of MPS coal mill[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2013.（in Chinese）

[13] 张峰彬. ZGM型中速磨机的磨煤-分级特性及能量耗散机制研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2023.
Zhang F B. Research on grinding-classification characteristics and energy dissipation mechanism of ZGM vertical spindle mill[D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2023.（in Chinese）

[14] 谷俊杰，王玉坤. MPS型中速磨煤机制粉系统机理建模与仿真[J]. 动力工程学报，2017，37(12)：983-991.
Gu J J，Wang Y K. Mechanism modeling and simulation for coal pulverizing system of MPS medium speed mills[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2017，37(12)：983-991.（in Chinese）

[15] Niemczyk P，Andersen P，Bendtsen D J，et al. Derivation and validation of a coal mill model for control[J]. IFAC Proceedings Volumes，2009，42(9)：233-238.

[16] 曾德良，高珊，胡勇. MPS型中速磨煤机建模与仿真[J]. 动力工程学报，2015，35(1)：55-61.
Zeng D L，Gao S，Hu Y. Modeling and simulation of MPS medium-speed coal mill[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2015，35(1)：55-61.（in Chinese）

[17] Gao Y，Zeng D，Liu J. Modeling of a medium speed coal mill[J]. Powder Technology，2017，318：214-223.

[18] 景峥，伍克宁，刘百慧，等. 燃煤机组中速磨煤机制粉系统建模及运行特性研究[J]. 动力工程学报，2026，46(1)：32-41+50.
Jing Z，Wu K N，Liu B H，et al. Study on modeling and operation characteristics of pulverized-coal preparation system with medium speed coal mill for coal-fired units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2026，46(1)：32-41+50.

(in Chinese)

[19] 周亚星. MBF-23型中速磨煤机直吹式制粉系统一次风优化研究[D]. 杭州:浙江大学,2021.
Zhou Y X. Research on optimization of primary air of direct-blowing pulverizing system with MBF-23 medium speed coal pulverizer[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2021. (in Chinese)

[20] 房小满,陆陆,何郁晟,等. 基于变转速磨煤机的机组快速变负荷控制策略研究[J]. 能源工程,2024,44(4):78-85.
Fang X M,Lu L,He Y S,et al. A fast load control strategy for the unit based on the variable speed coal mill[J]. Energy Engineering,2024,44(4):78-85. (in Chinese)

[21] 王德华,任宪桥,凌奥骅. 响应快速调峰的磨煤机自动启停控制研究[J]. 黑龙江科学,2024,15(18):59-62.
Wang D H,Ren X Q,Ling A H. Automatic start and stop control of coal mill in response to rapid peak regulation[J]. Heilongjiang Science,2024,15(18):59-62. (in Chinese)

[22] Pradeebha P, Pappa N, Vasanthi D. Modeling and control of coal mill[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(32): 797-802.

[23] Niemczyk P,Bendtsen D J,Ravn P A,et al. Derivation and validation of a coal mill model for control[J]. Control Engineering Practice,2012,20(5):519-530.

[24] 简一帆. MPS型中速磨煤机的建模与优化控制[D]. 北京:华北电力大学,2018.
Jian Y F. Modeling and optimal control of MPS-type medium-speed coal mill[D]. Beijing:North China Electric Power University,2018. (in Chinese)

[25] Yin W,Hu Y,Ding G,et al. Research on the construction of digital twin virtual model of coal mills[J]. Measurement,2025,242:116235.

[26] 何芳,白焰. 磨煤机存煤量与锅炉运行参数的关联分析[J]. 矿山机械,2014,42(12):76-80.
He F,Bai Y. Analysis on correlation of coal charge of mill and operating parameters of boiler[J]. Mining & Processing Equipment,2014,42(12):76-80. (in Chinese)

[27] 高耀岿,胡勇,曾德良,等. 基于磨出口温度定值优化的制粉系统多变量预测控制[J]. 动力工程学报,2017,37(10):814-820.
Gao Y K,Hu Y,Zeng D L,et al. Multivariable predictive control of a pulverizing system based on mill outlet temperature optimization of the coal mill[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017,37(10):814-820. (in Chinese)

[28] 孙赫宇,季宝伟,魏雨珊,等. 基于一次风流量动态补偿的协调控制系统优化[J]. 电气传动,2024,54(9):56-61.
Sun H Y,Ji B W,Wei Y S,et al. Optimization of coordinated control system based on primary air flow dynamic compensation[J]. Electric Drive,2024,54(9):56-61. (in Chinese)

[29] 汪颖,王琳. 基于PSO和网格优化结合的SVM算法癌症分类研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版),2026,40(1):56-61.
Wang Y,Wang L. A study on cancer classification based on PSO and grid optimization combined SVM algorithm[J]. Journal of Lanzhou University of Arts and Sciences(Natural Sciences), 2026,40(1):56-61. (in Chinese)

责任编辑:刘 敏