基于多级前馈与周期梯度寻优的烧结混合料水分控制方法

王瑞林[1]，李自成[1]，熊 涛[1]，肖高兴[1]，张先玲[2]
（1. 武汉工程大学 电气信息学院，湖北 武汉 430205；2. 南京钢铁股份有限公司 炼铁事业部，江苏 南京 210044）

摘要：烧结混合料水分控制是烧结矿生产过程中十分重要的环节，其主要存在大滞后、多变量干扰及数据波动等控制难点。本文通过分析烧结混合料加水混合工艺与特点，针对一、二次混合制粒不同的工况条件，提出多级前馈联合周期梯度寻优控制策略，同时结合当前配料成分与透气性指数等关键参数，采用BP神经网络模型预测适合当前烧结的最优水分率，并从连续生产的角度识别停机、开车与模式切换等运行状态，最终替代人工控制实现加水混合全过程自动化。仿真结果和工业应用表明，本文提出的控制方法的性能优于常规PID控制，系统投运后能显著提升烧结自动化水平。

关键词：烧结自动化；水分控制；多级前馈控制；周期梯度寻优；BP神经网络
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0038－08
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.052

Moisture control method of sintering compound based on multi-stage feed-forward and cycle gradient optimization

WANG Ruilin[1], LI Zicheng[1], XIONG Tao[1], XIAO Gaoxing[1], ZHANG Xianling[2]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China;
2. Ironmaking Division of Nanjing Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract: The moisture control of sintering compound is one of the very important links in the sinter production process, and there are mainly such control difficulties as large lag, multivariable interference and data fluctuation. By analyzing the water mixing process and characteristics of sintering compound, a multi-stage feed-forward combined periodic gradient optimization control strategy is proposed according to the different working conditions of primary and secondary mixing granulation. Combined with the current ingredient composition and air permeability index and other key parameters, the BP neural network model is used to predict the optimal moisture rate suitable for the current sintering, and the operating states such as shutdown, start-up and mode switching are identified from the perspective of continuous production, and finally the whole process of water mixing is automated instead of manual control. Simulation results and industrial applications show that the performance of the control method proposed is better than that of conventional PID control, and the sintering automation level can be significantly improved after the system is put into operation.

Key words: sintering automation; moisture control; multi-level feed-forward control; periodic gradient optimization; BP neural network

烧结矿生产过程包括配料、加水混合、布料、点火烧结、破碎冷却和筛分等工序[1]。加水混合过程是其重要步骤，适宜的混合料水分可以使混合料达到最高成球率以及最大的料层透气性[2]，

收稿日期：2022－03－16；**修回日期**：2022－07－12
基金项目：国家自然科学基金资助项目(41727801)
作者简介：王瑞林(1998—)，男，硕士研究生，从事计算机集成控制方面的研究。
通信作者：李自成(1977—)，男，教授，从事控制理论及应用、计算机集成控制方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其控制精度会直接或间接影响烧结矿的成品率与质量[3]。烧结混合料水分自动控制一直是国内外相关学者研究和实现的目标，如：聂慧远[4]通过分析自动加水控制的难点，考虑典型亲水、疏水原料下料波动对水分控制的影响，固定一混加水量且仅在二次混合采用多变量融合算法控制混合料水分；谭奇兵等[5]设计了混合料水分串级控制结构，在内外环皆采用 PID 控制器实现物料水分自动调节；李庭贵等[6]针对传统 PID 控制在固定参数下难以保证系统性能的缺陷，结合模糊控制思想采用模糊推理方式自整定 PID 控制参数；SINGH 等[7]利用机器学习与遗传算法得到混合料水分率等关键参数最优解；刘伟东[8]应用神经网络 PID 控制器和神经网络辨识器及 Smith 预估补偿器建立烧结混合料加水自动控制模型，并运用 Simulink 进行仿真研究。上述烧结混合料水分控制一般采用传统的 PID 控制方法或加入一些现代控制方法，但其主要基于理论与仿真分析进行研究，而如何从工业应用实现的角度，针对加水混合工艺设计出有效的控制方法是烧结行业亟须解决的问题。

因加水混合被控系统存在大滞后性、非线性、检测精度低、多变量干扰及数据波动等控制难点，同时考虑到工况复杂程度与安全成本因素，国内大多数烧结厂仍采用远程手动控制加水量[9]，但在实际连续生产过程中由于操作工劳动强度大和不同的操作习惯，成品烧结矿的质量参差不齐[10]。为解决上述问题，本文提出一种多级前馈联合周期梯度寻优控制策略用于烧结混合料的水分控制，以过程控制关键参数为依据，应用 BP 神经网络模型预测烧结混合料的最优水分值，并用来指导目标水分值的设定；在停机、开车和不同控制模式切换时预留前一状态参数，将其作为下一运行状态的初始控制参数，保证连续生产并实现加水混合全过程自动化控制；最后，通过 Simulink 仿真及实际运行效果验证上述控制策略的有效性。

1　加水混合工艺与特点

1.1　烧结原料加水混合制粒工艺

烧结生产工艺流程如图 1 所示，其加水混合工艺普遍采用两段混合方式。由图 1 可见，在配料仓出口处给料圆盘设定下料速度后，混匀矿、燃料、熔剂、除尘灰、生石灰、返矿等原料先经过小皮带称重后汇入大皮带，再进行两段加水混合，出混料机后采用水分仪检测混合料水分率[11]。一次混合是使混合料快速润湿混匀、生石灰消化，混合时间为 2 ~ 3 min，加水量占比约为 80%；二次混合除继续混匀润湿外，其主要目的是制粒，混合时间更长(一般需要 4 ~ 5 min)，加水量占比为 20% 左右。经两次加水混合后，水分率与粒度都适宜的混合料进行后续的布料、烧结等工序。

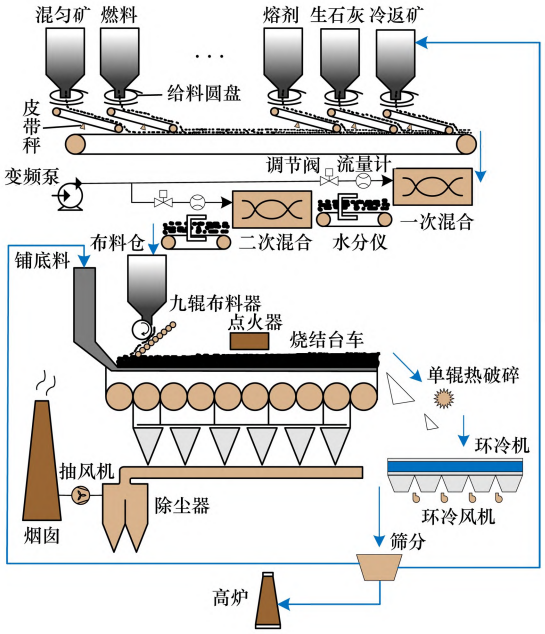


图 1　烧结生产工艺流程

Fig. 1　Sintering production process

1.2　加水混合过程的主要特点

1.2.1　大滞后性

烧结原料在配混过程中有明显的滞后特性，主要体现在 3 个方面：① 原料下料滞后，因配料仓在混料机前方呈“一”字排列，各原料下料称重后运输至混料机内的时间不同；② 水分检测滞后，混料机的惯性特性使得在同一时刻加水混合与被水分仪检测的混合料不是同一段物料，混合料自进入混料机加水混合到最终被水分仪检测，整个过程耗时 3 ~ 5 min；③ 执行机构滞后，烧结用水一般为含有杂质且温度较高的厂内冷却循环水，传统加水流量采用电动调节阀控制，响应周期较长且长期使用易结垢堵塞，因此国内烧结厂陆续改用变频控制，水量调节时间得到大幅缩短。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现场实测国内某钢铁厂5号烧结机实际生产中各原料称重后到达一混入口处、混合料加水混合后水分检测和现场执行机构的滞后时间如表1所示。

表1 加水混合工艺各部分实测滞后时间

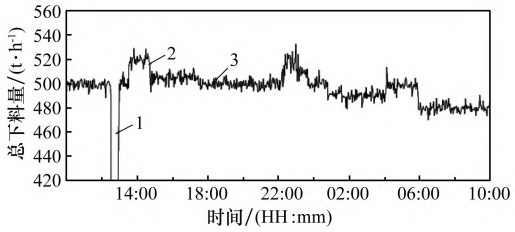
Table 1 The measured lag time of each part of water mixing process s

1#仓下料	2#仓下料	3#仓下料	4#仓下料	5#仓下料	6#仓下料	7#仓下料	8#仓下料	9#仓下料	10#仓下料
146	139	129	123	119	110	162	159	116	109
11#仓下料	12#仓下料	13#仓下料	14#仓下料	15#仓下料	16#仓下料	一混水分检测	二混水分检测	一混水量调节	二混水量调节
88	82	79	76	72	65	150	300	6	6

1.2.2 多参数的动态变化与强关联性

实际生产过程中，存在原料质地分布、检测仪器灵敏度、水压、外界环境干扰等因素，在人为调度调整阶段或工况稳定阶段，各过程参数如原料下料量、水分率、加水量处于幅度大小不一的动态变化中，因配料系统同时参与下料的料仓多达十几台甚至二十多台，进入混料机总进料量的波动不可忽视，而下料量的波动会引起加水量以及混合后物料含水率的变化。

国内某钢铁厂5号烧结机某日24 h实际生产中总下料量的变化情况如图2所示，数据采样周期为3 min。由图2可见：在连续生产过程中，总下料量一直处于动态变化中，在人为调度阶段，波动明显，其范围约为20 t/h；在工况稳定阶段，波动幅度为目标值上下6 t/h以内，且不定期出现停机停料现象。上述两类特点也是实现烧结混合料水分自动控制的主要难点，本文对此有针对性地提出一种自动优化控制策略。



1—停机阶段；2—调度调整阶段；3—工况稳定阶段

图2 不同运行阶段下总下料量的波动情况

Fig. 2 Fluctuation of total feed quantity at different running stages

2 烧结混合料水分优化控制策略

2.1 多级前馈控制

前馈控制主要解决配料系统下料波动、下料滞后以及一混水分偏离问题，根据一、二次加水混合运行条件，采用不同前馈控制方法，当下料量变化与水分值偏离时对加水量进行快速粗调整。

2.1.1 一混下料延时跟踪与波动处理

同一生产线上每一段料的称重与加水混合时间不一致，需对各料仓下的皮带秤称重值(w_i^t,t/h)做延时对正处理[12]，延时时间为各原料经皮带秤称重后运输至一次混料机入口处的时间(T_i,s)，根据各料种对水的吸收特性与人工长期工作经验得到各原料加水系数(φ_i)，得到n台料仓出料时一混当前时刻加水量：

$$h_{1(t)} = \sum_{i=1}^{n} w_i^{t-T_i} \cdot \varphi_i \tag{1}$$

式中：$h_{1(t)}$为一混当前时刻加水量，t/h；t表示当前时间，s；i为料仓编号。

考虑到各原料下料量动态变化，若将$h_{1(t)}$直接作为一混前馈加水量，则调整次数过于频繁，这不仅增加误调整概率使系统震荡，还会缩短硬件使用寿命。理想调整状态是当工况稳定且下料波动幅度较小时不做调整；当生产调度人工主动干预时及时调整。设下一时刻一混前馈加水量：

$$h_{1(t+1)} = \sum_{i=1}^{n} w_i^{(t+1)-T_i} \cdot \varphi_i \tag{2}$$

参考工况稳定时下料波动最大幅值，并利用式(1)计算出对应的加水量阈值(h_ω)，当加水量变化值$\Delta h = h_{1(t+1)} - h_{1(t)}$超过阈值时，即当$|\Delta h| > h_\omega$时，则将$h_\omega$累加并作为一混前馈加水量$h_1$。计算流程如图3所示。

2.1.2 二混补偿式调节

若原料经一次加水混合后的水分值偏离目标水分值，则在二次混合时对加水量进行补偿式调

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

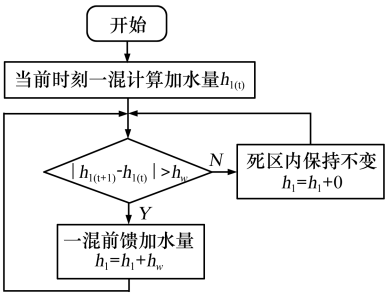


图 3　一混前馈加水量波动处理流程

Fig. 3　Flow chart of wave treatment of first mixed feedforward water

整。因此，可根据一次混合后混合料重量与水分偏离程度计算二混加水量：

$$h_{2(t)}=\frac{m_{b1}-m_1^{T_m}}{100\%}w_b^{T_w} \tag{3}$$

式中：m_{b1}为一混目标水分，%；$m_1^{T_m}$为延时处理的一混后物料水分，%，延时时间为物料从水分仪检测点运输至二混入口处的时间T_m，s；$w_b^{T_w}$为延时处理的一混后料重，t/h。

同理，因实测水分值的波动，需对二混前馈加水量进行超阈值处理得到二混加水前馈加水量h_2。除以上两种前馈调整外，当目标水分更改时，可以根据经验对加水量做预处理，以达到提前调整的目的，那么多级前馈控制模型可用下式表示。

$$Q_i=h_i+\frac{\Delta m_{bi}}{100\%}\cdot\eta_i \tag{4}$$

式中：Q_i为前馈加水控制量，t/h；Δm_{bi}为目标水分变化量，%；η_i为经验折算系数；i为 1、2。

2.2　周期梯度寻优

加水混合过程存在水分检测滞后与执行机构响应滞后问题，而常规串级 PID 控制无法解决此类难题。因此，本文在前馈粗调整的基础上，提出一种周期梯度寻优控制策略，对加水量进行微调，以满足控制精度要求，控制结构如图 4 所示。

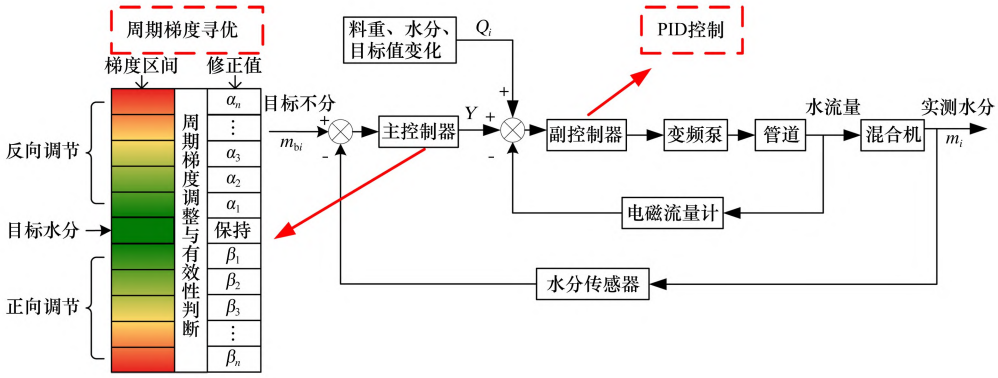


图 4　周期梯度寻优控制策略的控制结构

Fig. 4　Control structure of periodic gradient optimization control strategy

（注：α_n、β_n分别为主控制器正向、负向调节时第 n 个梯度区间对应的修正值，t/h；m_{bi}为目标水分，%；Y为主控制器的输出，t/h；m_i为实测水分，%。）

烧结混合料水分控制系统采用多级前馈与双闭环复合控制策略，其在闭环结构中内环使用 PID 控制器消除流量波动与执行机构时滞问题，外环主控制器采用周期梯度寻优控制算法，其主要控制思想用数学表示如下。

$$\begin{cases}Y_{k-1}=\Psi_{(\overline{m_{(k-1)}}-m_b)}\\ Y_k=[\,Y_{k-1}+\Psi_{(\overline{m_{(k)}}-m_b)}\,]^T\end{cases} \tag{5}$$

式中：Ψ为实测水分偏离目标水分所对应梯度区间的加水修正量，t/h；$\overline{m}$为实测水分平均值，%；m_b为目标水分值，%；T为周期调节时间，s。

此算法以目标水分为中心设置多个等幅度梯度区间并以其相对中心点的距离固定一个加水修正量，将水分检测滞后时间 T 作为实测水分平均值 $\overline{m}$ 的采样周期，周期累加偏离目标中心点梯度对应的加水修正量 Ψ 作为闭环调整量 Y，直至实测水分率达到控制精度要求则得到最优加水量。

2.3　最优目标水分预测

不同的配矿结构条件下，适宜烧结过程的混合料水分各不相同，增加粗颗粒铁料配比会使适宜的水分降低；增加粉状铁料配比会使适宜的水分增高[13]。而水分率的高低直接影响透气性的好

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

坏，目标水分率的设定一般由人工凭经验设定，具有一定盲目性。因此考虑结合料层透气性等过程参数应用 BP 神经网络模型预测当前最优烧结混合料水分，指导目标水分率设定。

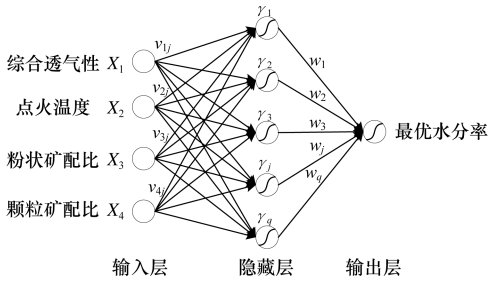


图 5 最优水分率神经网络预测模型

Fig. 5 Neural network prediction model of optimal moisture rate

（注：X_i 为神经网络的输入值；v_{ij} 为输入层到隐藏层神经元之间的连接权重；γ_j 为隐藏层神经元的阈值；w_j 为隐藏层到输出层神经元之间的连接权重。）

网络的输入端由点火温度、根据各风箱气体流量得到的综合透气性指数、粉状矿以及颗粒矿的配比 4 个参数组成。选取大量工况稳定且透气性良好时的过程参数作为网络训练样本，预测当前运行状态适合烧结的最优水分率。

2.4 全过程自动控制处理

实际烧结生产时会因故障检修等出现短暂的紧急停机现象，而整个生产线高度连锁、浑然一体，有着严格的开、停机顺序。因此开、停机过程也是人工最忙的阶段，不同阶段下配合其他工序实现全过程自动加水是急需解决的问题。

开、停车阶段主要有两个特点：① 滞、空料现象，因顺停逆启的开车顺序导致传输带上出现一段空料，皮带上与混合机内等设备上滞留有未处理的原料；② 前后参数一致性，短时间开、停机过程可以认为原料性质不变，并且空料段的位置与长短是一定的。基于以上特点，以混料机与相邻其后皮带机运行信号为开、停机信号，在急停时刻保留上一状态时加水量等控制参数，并实测现场滞留料段与空料段距离以及运输至混料机的时间；停机阶段停止各控制算法，使变频泵频率赋零停止加水；开机后先以保留参数作为控制参数进行加水、停水、再加水三段式加水处理，最后纳入算法控制，解决滞、空料问题，简化人工操作并实现全过程自动化。

3 Simulink 仿真与实际应用分析

为验证本文控制算法可行性，结合实际生产过程在 Simulink 上搭建水分控制仿真模型，对比不同控制器的控制效果，并将该算法应用于某钢铁厂 4#、5#烧结机的混合料水分控制，分析验证实际应用成效。

3.1 Simulink 仿真对比分析

混合料水分控制过程中的影响因素众多。为保证仿真分析与设计的可靠性和准确性，在搭建仿真模型时需考虑被控对象的主要特征[14]。混料机与现场执行机构存在明显的惯性与滞后特性，鉴于 FOPDT（一阶惯性加时滞模型）对高阶时滞对象有着很强的逼近能力，因此采用 FOPDT 对内、外环的被控对象进行拟合，该模型简化为

$$G(s)=\frac{K}{Ts+1}e^{-\tau s} \tag{6}$$

式中：$G(s)$ 为被控对象的传递函数；s 为被控系统模型由时间域通过拉普拉斯变换得到复数域的复数自变量；K 为比例系数；T 为惯性时间，s；τ 为滞后时间，s。

设定目标水分率为 7.2%，并在运行过程中添加适当的扰动以模拟水压及原料变化带来的干扰，本文所搭建的烧结混合料水分控制仿真模型如图 6 所示。

在小滞后与大滞后两种环境下，对比 PID + PID 控制器与周期梯度寻优 + PID 控制器的控制效果。仿真环境参数配置如表 2 所示。仿真运行结果如图 7 所示。

由图 7 可知：小滞后环境下两种控制器都能达到稳态，而周期梯度寻优控制比 PID 控制具有更小的超调量，能更快消除水压等扰动因素；大滞后环境下周期梯度寻优算法依然能达到控制精度要求，PID 控制则处于发散状态，且在稳定控制的情况下，本文控制器的调节时间（400 s）优于文献[2]中模糊 PID 控制器的调节时间（500 s），而大滞后仿真环境更符合实际生产运行条件。

本文采用 Matlab 软件编写搭建混合料适宜水分的 BP 神经网络预测模型，设定网络训练样本为某钢铁厂5#烧结机2021年12月23日—2022年

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

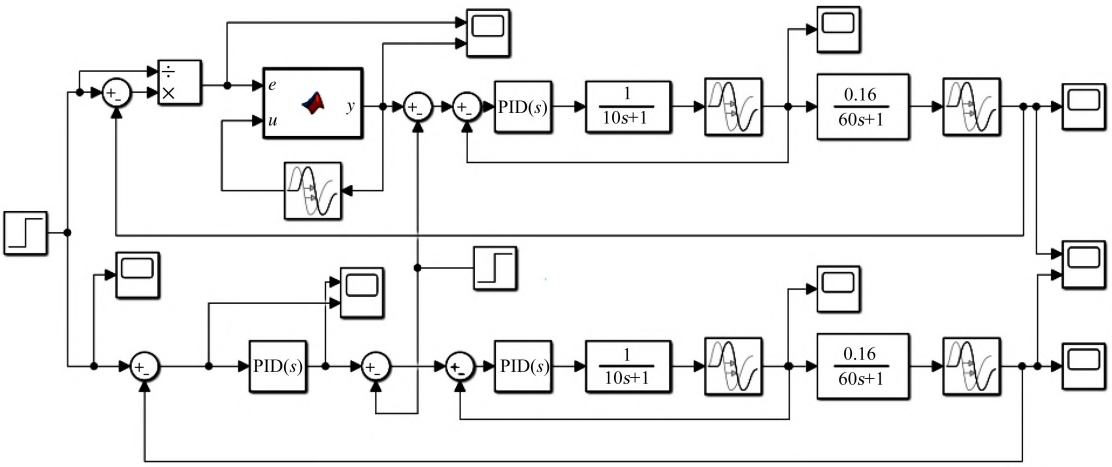


图 6　烧结混合料水分控制仿真对比

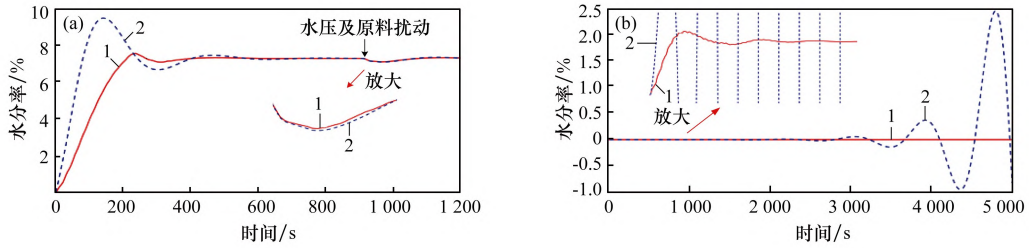
Fig. 6　Simulation comparison diagram of sintering mixture moisture control

（注：e 为水分偏差率，%；u 为前一周期中主控制器的输出，t/h；y 为当前主控制器的输出，t/h。）

表 2　不同仿真环境下参数配置

Table 2　Parameter configuration in different simulation environments

仿真环境	内环惯性常数	内环纯滞后时间/s	外环惯性常数	外环纯滞后时间/s
小滞后	10	5	30	2
大滞后	10	5	60	200



（a）小滞后；（b）大滞后

1—周期梯度寻优；2—PID。

图 7　小滞后和大滞后环境下不同控制器的控制效果

Fig. 7　Control effects of different controllers in small and big lag environment

1 月 10 日的实际生产数据，选取工况良好时的 1 000 组数据作为网络的训练集，并各选取 150 组数据作为验证集与测试集。模型预测结果如图 8 所示。由图 8 可知，训练后，该模型线性回归的拟合度在 80% 以上，其预测结果对目标水分设定有一定指导意义。

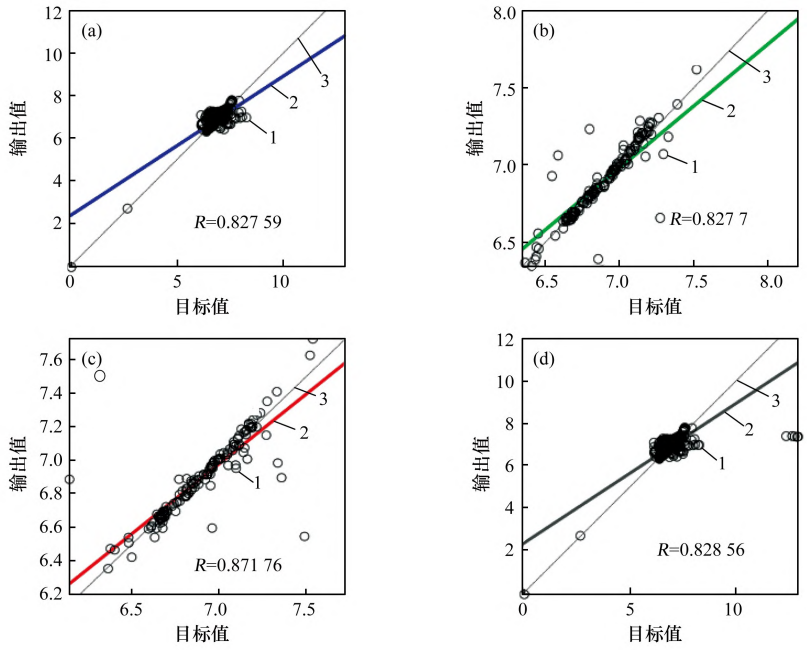
3.2　实际应用验证

基于本文所述优化控制方法的烧结混合料水分控制系统已应用于某钢铁厂 4#、5#烧结机，系统投运后，二混后水分稳定性以及烧结自动化水平显著提高。由于加水混合工序中二混后实测水分为最终控制的水分，且实际生产时常以二混后水分控制的好坏为评判依据，本文截取系统应用后某开、停机时间段以及长时间自动控制模式下二混后混合料水分控制的运行数据，该时期内二混目标水分设定值为 7.2%，其控制效果分别如图 9 所示。由图 9 可知，在不同工况切换以及长时间生产运行的情况下，控制系统能识别开、停车状态及时调整加水量，并能在目标水分设定值 0.3% 的误差内自动控制混合料水分，满足生产需求。

4　结　论

通过分析烧结混合料加水混合过程特点与实际生产需求，针对性地设计出一系列水分优化控

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



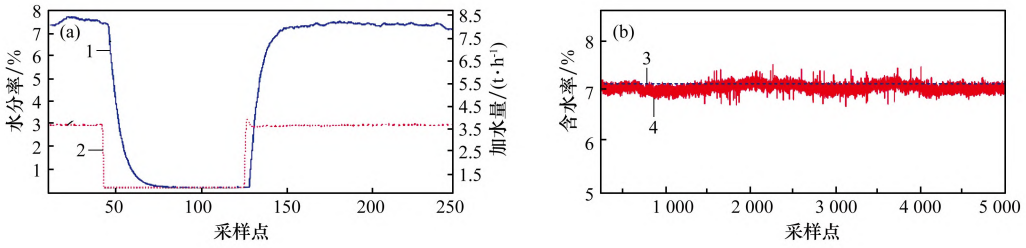
（a）训练集；（b）验证集；（c）测试集；（d）整体数据集

1—数据点；2—最佳线性拟合；3—期望拟合。

图 8 烧结混合料适宜水分率神经网络预测的线性回归

Fig. 8 Linear regression diagram of suitable moisture rate of sinter mixture predicted by neural network

（注：R 为神经网络模型在各数据集上的拟合值，R 值越接近 1 表示模型的拟合效果越好。）



（a）开停车阶段；（b）长时间运行

1—开停车阶段二混实测水分；2—二混加水量；3—二混目标水分；4—长时间运行阶段二混实测水分。

图 9 系统开停车阶段和长时间自动运行效果

Fig. 9 Effect of system startup and shutdown phase and long-term automatic operation

制策略，所述方法在仿真实验中有良好的性能，由此方法所搭建的控制系统成功应用于实践。并得出如下主要结论：① 针对加水混合工艺与特点，采用多级前馈控制能在过程参数变化时对加水量进行粗调整，且相比较于传统闭环控制，周期梯度寻优算法在大滞后大惯性的环境下有着更显著的控制性能；② 应用 BP 神经网络模型预测当前最优水分率以及开、停车阶段全自动控制能大幅度降低人工劳动强度。通过仿真与工业应用验证了本文控制策略的优越性，系统投入实际生产后，显著提升了烧结自动化水平。

参考文献：

[1] JIANG Y, YANG N, YAO Q, et al. Real-time moisture control in sintering process using offline-online NARX neural networks[J]. Neurocomputing, 2020, 396: 209 – 215.

[2] 高茜茜. 烧结混合料水分控制系统的设计与建模研究[D]. 沈阳：东北大学，2015.
GAO Qianqian. Research on design and modeling for sinter mixture moisture control system[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.

[3] 吴岳明，聂慧远，吴朝霞. 基于非线性自回归神经网

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

络的烧结混合料水分智能控制[J]. 冶金自动化，2021，45(1)：27－33.
WU Yueming，NIE Huiyuan，WU Zhaoxia. Intelligent control of sintering mixture moisture based on NARX neural network [J]. Metallurgical Automation，2021，45(1)：27－33.

[4] 聂慧远. 烧结生产自动加水控制的难点及实现途径[J]. 烧结球团，2021，46(6)：69－74.
NIE Huiyuan. Difficulties and realization ways on automatic water addition in sintering production[J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(6)：69－74.

[5] 谭奇兵，文虹力，蒋杰，等. 烧结混合料水分自动控制系统的开发及应用[J]. 烧结球团，2019，44(2)：18－23.
TAN Qibing，WEN Hongli，JIANG Jie，et al. Development and application of automatic moisture control system for sinter mixture [J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(2)：18－23.

[6] 李庭贵，薛邵文. 烧结混合料水分模糊 PID 控制系统设计[J]. 制造业自动化，2013，35(9)：97－101.
LI Tinggui，XUE Shaowen. The fuzzy PID controller designed on the sinter mixture moisture control system[J]. Manufacturing Automation，2013，35(9)：97－101.

[7] SINGH K，VAKKANTHAM P，NISTALA S H，et al. Multi-objective optimization of integrated iron ore sintering process using machine learning and evolutionary algorithms[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals，2020，73(8)：2033－2039.

[8] 刘伟东. 钢铁厂烧结料水分控制的仿真研究[D]. 沈阳：北方工业大学，2013.
LIU Weidong. Simulation research on sintering moisture control of steel plant[D]. Shenyang：North China University of Technology，2013.

[9] 杨小明，吴岳明. 烧结混合料自适应前馈加水控制算法[J]. 烧结球团，2021，46(4)：20－24.
YANG Xiaoming，WU Yueming. Self-adaptive feedforward water addition control algorithm for sinter mixture [J]. Sintering and Pelletizing，2021，46(4)：20－24.

[10] WANG C，WU M. Hierarchical intelligent control system and its application to the sintering process [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2013，9 (1)：190－197.

[11] ZHANG G，WU S，ZHU J，et al. Influencing factors and mechanism of water absorption process of iron ores during sintering[J]. International Journal of Minerals，Metallurgy and Materials，2014，21(2)：122－130.

[12] 张锋. 烧结混合料水分控制系统的设计与应用[D]. 沈阳：东北大学，2011.
ZHANG Feng. Design and application on control system of sinter mixture moisture [D]. Shenyang：Northeastern University，2011.

[13] 彭志强，秦峰，周鹏，等. 混合料水分对新钢铁矿烧结的影响[J]. 烧结球团，2016，41(3)：17－21.
PENG Zhiqiang，QIN Feng，ZHOU Peng，et al. Influences of water content of sintering mixture on iron ore sintering of Xinsteel[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(3)：17－21.

[14] 孙优贤，桂卫华，钱锋，等. 控制工程手册(下册)[M]. 北京：化学工业出版社，2016，236－239.
SUN Youxian，GUI Weihua，QIAN Feng，et al. Control engineering manual(Volume 2)[M]. Beijing：Chemical Industry Press，2016，236－239.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵，不再另行支付)，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明，如有异议请来稿说明，本刊将作适当处理。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net