基于数据分析模糊 PID 球团矿冷却智能控制方法

闫素杰，杜 平，张涛涛，范 勇
(江苏沙钢集团有限公司 计算机中心，江苏 张家港 215625)

摘要：本文根据球团冷却工艺，结合数据分析技术，确定球团生产各冷却段最佳温度、压力控制范围，并运用模糊 PID 技术制定控制策略、设计模糊控制器、建立优先推送机制，最终构建了球团冷却控制模型。经过调试和在生产中改进以及后续的数据跟踪表明，该模型在不同的生产条件下展现了良好的智能性，可保证球团矿性能最优、系统快速调节和平稳运行，解决人工调节不及时、精度不高的问题，以及球团冷却过程随时间和生产的热传导模型不恒定及大延迟、大滞后的非线性控制问题。在连续生产情况下，各冷却环节温度精度达到 98%，抗压强度在 2 300～2 700 N/P 范围内达到 97.31%。

关键词：球团冷却；智能控制；数据分析；模糊 PID 控制
中图分类号：TF046.6；TP273 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)01－0081－05
doi：10.13403/j.sjqt.2023.01.012

Intelligent control method of fuzzy PID pellet cooling based on data analysis

YAN Sujie，DU Ping，ZHANG Taotao，FAN Yong
(*Computer Center，Jiangsu Shagang Group Co.，Ltd.，Zhangjiagang* 215625，*Jiangsu*，*China*)

Abstract：According to the pellet cooling process and data analysis technology，the optimal temperature and pressure control range of each cooling section in pellet production are determined，the fuzzy PID technology is used to formulate control strategy，to design fuzzy controller and to establish priority push mechanism. Finally，the pellet cooling control model is constructed. After debugging and improvement in production and subsequent data tracking，the model shows good intelligence under different production conditions，which can ensure the optimal performance of pellet，rapid adjustment and smooth operation of the system，and solve such problems as untimely manual adjustment and low precision，as well as the nonlinear control of unsteady heat conduction model，large delay and large lag in pellet cooling process with time and production. In the case of continuous production，the temperature accuracy of each cooling link reaches 98%，and the compressive strength reaches 97.31% in the range of 2 300～2 700 N/P.

Key words：pellet cooling；intelligent control；data analysis；fuzzy PID control

随着高炉的大型化、高炉操作的精细化，高炉对球团矿原料的质量提出了更高的要求。而在球团生产中，预热、焙烧、冷却是使球团矿物理指标达标的关键过程，冷却 1～4 段温度的合理梯度递减，是球团矿抗压强度稳定的关键。

目前我国球团行业在设备连锁、配矿配料、主抽风机变频启动、余热回收、脱硫脱硝等方面自动化控制技术已成熟。随着人工智能技术的发展，国内外学者在焙烧过程建模、仿真相关研究较多：蒲舟等[1]采用基于 CFD、多孔介质传质、传热理论和未反应收缩核模型相结合的方法建立磁铁矿球团氧化反应模型，计算不同气流温度、不同 O_2 质量浓度、不同气流速度、不同直径条件下球团氧化反应的相关参数，

收稿日期：2022－07－15；**修回日期**：2022－11－17
作者简介：闫素杰(1980—)，女，高级工程师，从事工业自动化、信息化方面的研究。
通信作者：杜 平(1980—)，男，高级工程师，博士，从事冶金自动化方面的研究。

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

指导预热过程球团氧化率的预测；孙玥等[2]针对链算机抽风干燥段，基于 Fluent 软件对球团干燥模型中的源项进行数值模拟，根据能量守恒定律建立抽风干燥段的热能平衡模型，为链算机热能的有效利用提供参考；张铭等[3]通过建立贝叶斯－BP 神经网络，对球团链算机预热段温度场模型进行系统辨识，为温度场均衡稳定的控制提供相关的模型参考和理论指导；宋昱[3]对球团矿在环冷机中冷却过程进行数值模拟分析，研究球团矿冷却过程的温度场和速度场。王福斌等[4-5]建立的离线仿真模型为球团矿焙烧操作参数提出了优化意见，探索了通过调整球团粒度、料层空隙度、料层厚度来节能降耗的途径。但由于球团矿生产过程能量场复杂、干扰多、滞后性强，离线仿真模型不能实时参与生产过程工艺参数调节，鲜有球团矿冷却控制模型运用到实际生产并直接参与生产过程控制。实际生产环节仍靠人工凭经验调节，由于参数众多，人工控制存在控制复杂、出错率高，调节不及时等问题，导致冷却不够排红料、各环冷段温度不能保持实时均匀梯度递减等现象。本文以沙钢链—回—环球团生产智能化改进项目为背景，基于工业大数据分析，采用模糊控制技术与 PID 算法相结合的方法，构建球团冷却过程智能控制模型，并首次将此模型运用到球团冷却实际生产控制中，实现了球团冷却过程全自动无人值守操作、智能控制，冷却各环节(温度、压力)调节的智能化、精准化，提高了球团矿质量。

1 球团冷却工艺

球团矿通过鼓风冷却方式在环冷机上进行冷却，使球团矿剩余的 FeO 得到进一步氧化，以保证球团矿温度小于150 ℃且 w(FeO) <1%。环冷机炉罩分4段：环冷一段热气流通过受料斗上部窑头和平行管道直接入回转窑作二次风，以提高窑内气氛温度；环冷二段热气流通过热风管直接引入链算机预热一段作为热源；环冷三段温风被送至链算机抽风干燥一段作为热源；环冷4段废气通过环冷机烟囱排放[6-8]。冷却以一、二段为主，三、四段为辅，以保证冷却余热最大限度的被回收利用。研究通过合理调整鼓风量，保证球团的冷却效果，球团环冷机冷却工艺参数见表1。

表1 环冷机冷却工艺参数

Tab1e 1 Cooling parameters of pellet cooler

项目	环冷一段	环冷二段	环冷三段	环冷四段
冷却温度/℃	950～1 150	750～850	200～400	<150
负压/Pa	－10～－30	－30～－80	<－90	—
排料温度/℃	—	—	—	<120

2 数据分析

不同高炉球团矿比例和球团矿抗压要求不同，本文根据沙钢5 800 m^3 高炉运行数据，球团矿占比为13%～15%，抗压强度为2 300～2 700 N/P，高炉顺行且经济性良好。抗压强度过低，不利于运输，入炉后透气性无法保证。抗压强度过高，生产能耗高，球团内部致密，不利于还原，会导致燃料比升高。本文通过采集生产过程中球团矿1 a 的冷却温度、压力参数和球团矿检测性能指标(采集频率为10 s)，经数据清洗后建立样本数据，并采用 IBM SPSS 软件，选择皮尔逊相关和双尾检验法对球团的抗压强度和环冷温度进行数据分析，获得球团抗压强度与环冷一段温度皮尔逊相关系数为0.72。根据皮尔逊相关系数公式[9]可知，相关系数为正，为0.6～0.8时属于正强相关。所以，球团抗压强度与环冷一段温度具有正强相关性。

球团矿抗压强度与环冷一段温度散点分布如图1。结合图1，通过试验和统计分析确认球团矿抗压强度在2 300～2 700 N/P 对应环冷一段温度参数范围为980～1 080 ℃，如图红色点划线所示的交集区域。此条件下得到球团抗压强度良好且适合沙钢5 800 m^3 高炉生产要求。

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

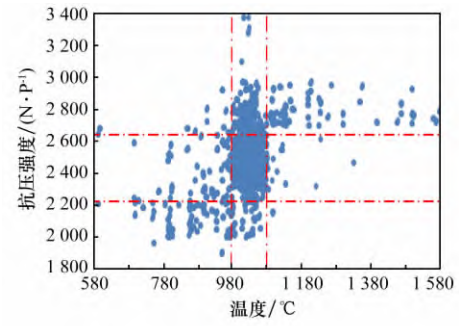


图 1　抗压强度与温度数据分布

Fig. 1　Distribution diagram of compressive strength and temperature

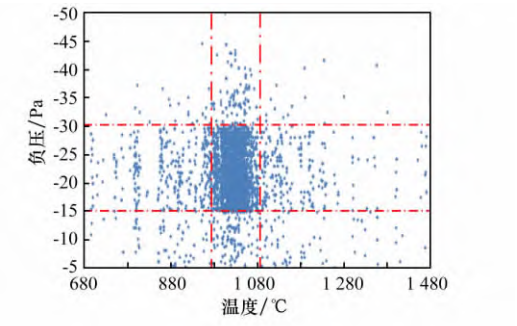


图 2　负压与温度数据分布

Fig. 2　Distribution diagram of negative pressure and temperature

环冷一段负压强度和温度散点分布图如图 2。结合图 2，通过实验和统计分析确认环冷一段控制温度在 980 ~ 1 080 ℃，对应负压为 －15 ~ －30 Pa，如图红色点划线所示的交集区域。

通过以上分析可知，当环冷 1 段温度、负压分别控制为 980 ~ 1 080 ℃、－15 ~ －30 Pa 时，可以保证球团矿抗压强度在 2 300 ~ 2 700 N / P，质量优异，同时设备调节频次最少且能快速调节到位，保持系统运行处于稳定状态。采用同样分析方法，可以得到环冷二 ~ 四段的分析结果，如表 2 所示。可以看出表 2 比表 1 的范围更精确。本文将分析结果与模糊 PID 技术结合，作为 PID 调整输入，通过模糊 PID 调节实现正常生产下系统自主调节，无人干预且产品最优的智能化生产模式。

表 2　环冷机各段数据分析结果

Table 2　Data analysis result of each section of circular cooler

项目	环冷一段	环冷二段	环冷三段	环冷四段
冷却温度/℃	950 ~ 1 150	750 ~ 820	200 ~ 260	＜80
负压、排料温度/Pa	－10 ~ －30	－30 ~ －70	－50 ~ －90	＜60

3　模糊 PID 控制策略

本文以环冷一段为例，将模糊控制与常规 PID 控制相结合，选择数据统计分析的环冷段温度和负压作为控制参数，将环冷段温度与负压分开由两个 PID 模块进行控制，设计两个模糊控制器，分别以温度偏差(e_1) 、温度偏差变化率(e_{c1}) 和负压偏差(e_2) 、负压偏差变化率(e_{c2}) 作为模糊控制器的输入，通过模糊规则运算，调整各自比例(K_p) 、积分(K_i) 、微分(K_d) 3 个参数，从而给出不同环境下的 PID 输入 o_1、o_2，使得环冷机的冷却风机开度控制具有良好的动、静态性能。根据球团矿生产工艺控制要求制定合理的优先推送机制，对环冷机的风机进行实时智能调节控制，从而控制环冷温度与负压，达到环冷一段智能自动操作的目的。环冷二 ~ 四段控制策略与环冷一段相同，以环冷一段为例的模糊 PID 控制策略如图 3 所示。

3.1　模糊控制器设计

模糊推理规则是用于描述模糊控制器输入和输出关系的离散式规则，通常为工程经验和模拟分析研究结果确定[10]，对于模糊 PID 控制的比例度 K_p、积分时间常数 K_i、微分时间常数 K_d 3 个参数的选择采用的经验见表 3。

结合表 3，当偏差 e 较大时，需要较大 K_p 来加快在大偏差下响应速度，K_d 应取较小值，为避免大偏差造成的积分饱和现象，K_i 应当取小值，甚至可以考虑 $K_i = 0$；当偏差 e 中等大小时，则需要选取中等大小的 K_p，一方面保证系统的动态响应速度，另一方面又要避免系统超调，系统的调节速度主要依靠选取合适的 K_d 实现，而 K_i 此时应当谨慎取值；当偏差 e 较小

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

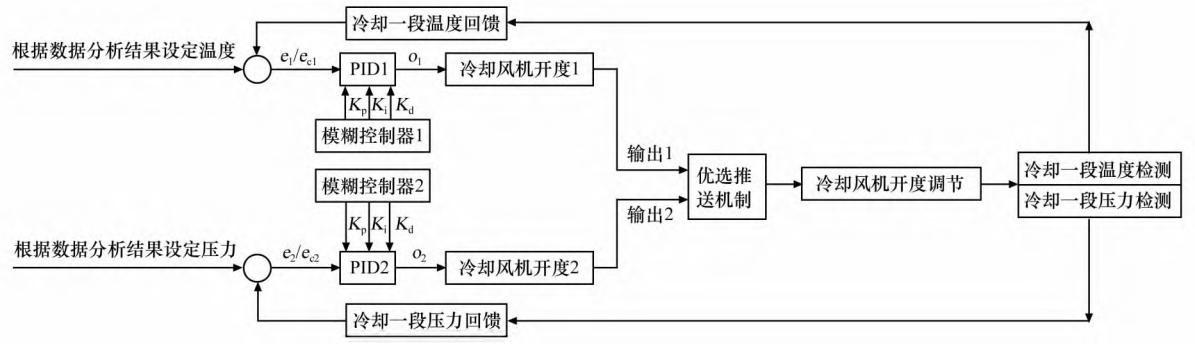


图 3 环冷一段模糊 PID 控制策略

Fig. 3 Fuzzy PID control strategy of No. 1 circular cooler

时，选取较大的 K_d，并增大 K_i，加强系统的跟随能力，消除余差，由于偏差 e 本身较小，所以不会因此造成系统过大的超调，为了减少被控对象测量值在设定值附近频繁震荡的现象，K_d 则需要根据偏差变化率 e_c 的大小来确定[11]。

建立输入偏差 e 和偏差变化率 e_c 与输出 K_p、K_i、K_d 的模糊规则，对应的语言值为大负(NB)、中负(NM)、小负(NS)、零值(ZO)，大正(PB)、中正(PM)、小正(PS)，根据实验数据以及调整操作经验建立模糊 K_p、K_i、K_d 规则如表 3，当温度偏差 e 为 NB 即温度与目标相比过低，e_c 为 PB，即温度升高的很快，此时 K_p 为 PB，尽快消除偏差大力正向加温，K_i 为 PS，尽力消除净差正向最小；K_d 为 NB，谨慎超调反向大量减温，所以此时 K_p、K_i、K_d 为 PB、PS、NB。其余情况如表 3 所示，选择合适 K_p、K_i、K_d。

表 3 温度模糊控制 K_p、K_i、K_d 规则表

Table 3 K_p、K_i、K_d ruler of temperature fuzzy control

e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	PB PS NB	PM PS NB	PS PS NB	ZO NB ZO	NS NB PB	NM NB PB	NB NB PB
PM	PB PM NM	PM PM NM	PS PS NM	ZO NM ZO	NS NM PM	NM NM PM	NB NB PM
PS	PB PB NS	PM PB NS	PS PM NS	ZO NS ZO	NS NS PS	NM NS PS	NB NS PS
ZO	PB ZO ZO	PM ZO ZO	PS ZO ZO	ZO ZO ZO	NS ZO ZO	NM ZO ZO	NB ZO ZO
NB	NB NS PB	NM NS PS	NS NS PB	ZO PB ZO	PS PM NS	PM PB NS	PB PB NS
NM	NB NM PM	NM NM PM	NS NM PM	ZO PM ZO	PS PM NM	PM PM NM	PB PM NM
NS	NB NB PS	NM NB PS	NS NB PS	ZO PS ZO	PS PS NB	PM PS NB	PB PS NB

采用相同方法，设计负压模糊控制 K_p、K_i、K_d 规则，根据上述规则进行模糊推理，把输入模糊变量映射到相应的输出模糊变量上，建立系统的知识库。

3.2 优先推送机制的建立

根据工艺控制要求及操作专家经验，制定环冷一段优先推送机制，见表 4。PID 模糊控制系统实时进行冷却负压、温度状态检测判断，根据实时监测数值进行调整，由于负压是保证设备安全生产的前提，优先级为一级，高于温度。且根据现场测试和数据分析，负压调节作用时间为 10 s，温度调节作用时间为 60 s。

表 4 优先推送机制

Table 4 Priority applying mechanism

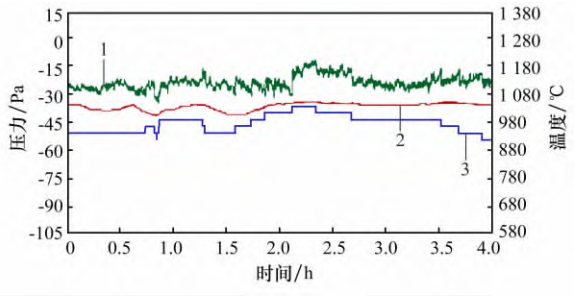
优先级别	调节模式	作用时间/s
一级	压力调节	10
二级	温度调节	60

4 实际应用效果

采用模糊 PID 控制的环冷一段压力、温度和风机开口度实时控制效果如图 4 所示。由图 4 可知：当压力接近高压 −30 Pa 时，风机开口度

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

自动上调；当压力接近 -15 Pa 低压时，风机开度自动下调，自动将环冷一段压力控制在 -15 ~ -30 Pa；当温度接近高温 1 080 ℃时，风机开度自动下调；当温度接近 980 ℃低温时，风机开度自动上调，自动将环冷一段温度控制在 980 ~ 1 080 ℃，安全压力调整级别高于温度。



1—压力；2—温度；3—风机开度。

图 4　环冷 1 段压力、温度控制效果

Fig. 4　Control effect of pressure and temperature in the No. 1 circular cooler

5　结　论

本文采用数据深度挖掘、模糊控制与 PID 控制相结合的方法，构建了球团冷却过程智能控制模型，并将模型通过 PLC 编程实现，应用于球团冷却实际生产控制中，实现了球团冷却过程全自动控制，达到了球团矿生产自动无人值守操作，冷却各环节温度、压力调节更加智能化、精准化，可提高球团矿质量和生产效率。且经过 1 年的实践应用，各冷却环节温度 98% 控制在工艺范围之内，成品球团矿抗压强度在 2 300 ~ 2 700 N/P 范围内比例达到 97.31% 。

参考文献:

[1] 浦舟，张铭，周峰，等. 磁铁矿球团等温氧化反应建模与数值模拟[J]. 烧结球团，2020，45(3)：22 - 26.
PU Zhou，ZHANG Ming，ZHOU Feng，et al. Modeling and numerical simulation of isothermal oxidation reaction of magnetite pellet[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(3)：22 - 26.

[2] 孙玥，周峰，李伯全. 基于多指标正交试验的链算机抽风干燥段热工参数优化[J]. 烧结球团，2020，45(4)：35 - 40.
SUN Yue，ZHOU Feng，LI Boquan. Thermal parameter optimization in the DDD of chain grate by orthogonal test with multi-targets[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(4)：35 - 40.

[3] 宋昱. 球团矿在环冷机中冷却过程的数值模拟分析[D]. 唐山：华北理工大学，2019.
SONG Yu. Numerical simulation of pellets' cooling process in annular cooler[D]. Tangshan：North China University of Science and Technology，2019.

[4] 王福斌，刘贺飞，何江红，等. 烧结运行工艺参数分析及烧结行为模型构建. 烧结球团，2020，45(6)：29 - 34.
WANG Fubin，LIU Hefei，HE Jianghong，et al. Analysis on operation process parameters of sintering and construction sintering behavior mode[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(6)：29 - 34.

[5] 冯哲愚，董美蓉，张忠培，等. 臭氧前置氧化 NO_x 的数值模拟与优化[J]. 烧结球团，2020，45(5)：71 - 76.
FENG Zheyu，DONG Meirong，ZHANG Zhongpei，et al. Numerical simulation and optimization on pre-oxidation of NO_x by ozone[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(5)：71 - 76.

[6] 张铭，修晓波，周峰，等. 链算机预热段温度场模型的贝叶斯 - BP 神经网络系统辨识[J]. 烧结球团，2020，45(4)：44 - 49.
ZHANG Ming，XIU Xiaobo，ZHOU Feng，et al. Identification on Bayes-BP neural network system for temperature field model of preheating section of chain grate[J]. Sintering and Pelletizing，2 2020，45(4)：44 - 49.

[7] 陈伟，武鹏飞，王宝祥，等. 烧结 - 高炉炼铁全过程炉料结构智能优化系统[J]. 烧结球团，2020，45(4)：8 - 13.
CHEN Wei，WU Pengfei，WANG Baoxiang，et al. Intelligent optimization system of burden structure in the whole process of sintering-blast furnace iron-making[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(4)：8 - 13.

[8] 樊猛辉，冀岗，李强，等. 烧结机提质增产与减排技术的改造与应用[J]. 烧结球团，2020，45(5)：34 - 38.
FAN Menghui，JI Gang，LI Qiang，et al. Renovation and application on technology of quality and productivity improvement and flue gas emission reduction of sinterer[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(5)：34 - 38.

[9] 张雪嫣. 面向卷烟设备智能控制的公共信息模型设计与数据相关性分析[D]. 北京：机械科学研究总院，2019.
ZHANG Xueyan. Public information model design and data correlation analysis for intelligent control of cigarette equipment[D]. Beijing：China Academy of Machinery Sience and Technology，2019.

[10] 滕悦，徐少川，张庆东. 基于图像处理技术的皮带跑偏监测系统设计[J]. 烧结球团，2020，45(2)：10 - 14.
TENG Yue，XU Shaochuan，ZHANG Qingdong. Design of monitoring system for belt deviation based on image processing technology[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(2)：10 - 14.

[11] 裴元东，吴胜利，张俊杰，等. 烧结配加高炉瓦斯灰替代燃料降低 NO_x 排放实践[J]. 烧结球团，2020，45(1)：73 - 76.
PEI Yuandong，WU Shengli，ZHANG Junjie，et al. Practice of reducing NO_x emission by sintering with blast furnace gas as has substitute fuel[J]. Sintering and Pelletizing，2020，45(1)：73 - 76.

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