微粉生产过程中磨机进出口温度多目标优化

李晓理^{1,2,3,4†}, 高 杰¹, 王 康¹

- (1. 北京工业大学 信息学部, 北京 100124; 2. 计算智能与智能系统北京市重点实验室, 北京 100124;
- 3. 数字社区教育部工程研究中心, 北京 100124; 4. 北京未来网络科技高精尖创新中心, 北京 100124)

摘要: 微粉是钢铁废渣经过研磨后所形成的一种粉末, 是一种高效且环保的建筑材料添加剂. 在微粉生产过程中磨机进出口温度之间存在正相关的关系, 但在正常工况下进口温度的升高将有助于提高产量, 而出口温度的降低却有利于保证生产的安全性, 因此温度设定值的求解将是一个多目标优化问题, 较难获得最优值. 从实际生产工况出发, 采用非支配排序遗传算法II、多目标粒子群优化算法和多目标灰狼优化算法多种多目标优化算法求解此问题, 并进行对比分析获得最优可行解集. 优化后得到的解集能更好的为温度的设定提供参考, 从而提升产量与生产的安全

关键词: 微粉; 环保; 温度; 多目标优化; 设定值; 可行解

引用格式: 李晓理, 高杰, 王康. 微粉生产过程中磨机进出口温度多目标优化. 控制理论与应用, 2020, 37(2): 275 – 282

DOI: 10.7641/CTA.2019.80779

Multi-objective optimization of mill inlet and outlet temperature in slag powder production process

LI Xiao-li^{1,2,3,4†}, GAO Jie¹, WANG Kang¹

- (1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
- 2. Beijing Key Laboratory of Computational Intelligence and Intelligent System, Beijing 100124, China;
- 3. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100124, China;
 - 4. Beijing Advanced Innovation Center for Future Internet Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The slag powder is a kind of powder formed by grinding iron and steel waste slag, and it is an efficient and environmentally additive for building materials. There is a positive correlation between the inlet and outlet temperatures of the mill during the production of the slag powder, but the increase in the inlet temperature under normal conditions will help to increase the yield, while the decrease in the outlet temperature will help to ensure the safety of the production. Therefore, the solution of the temperature set value will be a multi-objective optimization problem, and it is difficult to obtain the optimal value. Starting from the actual production conditions, multi-objective optimization algorithms based on non-dominated sorting genetic algorithm II, multi-objective particle swarm optimization algorithm and multi-objective grey wolf optimization algorithm are used to solve this problem, and the optimal feasible solution set is obtained by comparative analysis. The optimized solution set can provide a better reference for temperature setting, thereby improving yield and production safety.

Key words: slag powder; environmentally; temperature; multi-objective optimization; set value; feasible solution **Citation:** LI Xiaoli, GAO Jie, WANG Kang. Multi-objective optimization of mill inlet and outlet temperature in slag powder production process. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(2): 275 – 282

收稿日期: 2018-10-10; 录用日期: 2019-05-16.

†通信作者. E-mail: lixiaolibjut@bjut.edu.cn; Tel.: +86 13488806991.

本文责任编委: 王伟.

国家自然科学基金项目(61873006, 61473034, 61673053), 国家重点研发计划项目(2018YFC1602704, 2018YFB1702704), 北京市科技重大专项项目(Z181100003118012)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61873006, 61473034, 61673053), the National Key Research and Development Project (2018YFC1602704, 2018YFB1702704) and the Beijing Major Science and Technology Special Projects (Z181100003118012).

1 引言

钢铁生产后所产生的废渣,将会对环境造成严重的污染,微粉的生产就有效的解决了这一问题.微粉是将钢铁生产所形成的废渣经过立式磨机的充分研磨后所形成的一种粉末.将该粉末以一定比例添加至水泥中可以使水泥的强度得到有效的提高,从而获得一种更加坚固且环保的建筑材料[1-2].

在微粉生产中,为了保证微粉的产量以及生产的 安全性, 磨机进、出口温度起着至关重要的作用. 本文 通过国内某大型微粉生产企业的现场实际运行数据, 得到磨机进口温度、磨机出口温度以及产量之间的关 系. 通过分析发现磨机进、出口温度在正常的工况下, 升高磨机进口温度能够提高微粉的产量. 降低磨机的 出口温度,能够有效避免微粉收集时故障的发生[3], 提高生产的安全性. 但由于磨机进、出口温度之间存 在着正相关的关系. 因此难以通过简单的单目标优化 的方法求解磨机进出口温度的最优设定值, 使生产达 到既高效又安全的最佳状态. 针对这一问题, 本文将 采用多目标优化的方法来求解进出口温度设定值的 可行解集. 多目标优化是解决多个目标之间在相互矛 盾的情况下,通过优化得到一组可行解集使得各目标 能各自达到较好的状态. 目前已有许多研究者利用多 目标优化算法解决了各种实际问题. Ali Hojjati等研 究者通过使用常见的多目标优化算法对水库的发电 能力与蓄水防洪能力这两个相互矛盾的指标进行优 化[4]. 张浩等研究者提出一种多目标根系算法用于优 化铜铸锭生产过程中的生产时间和某惩罚值来提高 生产效率[5]. 盛万兴等研究者将供电系统中的网损、 成本以及某一项评价可靠性的指标进行多目标优化, 从而使供电方案得到优化[6]. 因此通过上述分析得出 在研究磨机进出口温度优化的问题上,采用多目标优 化的方法是十分必要也是十分具有实际意义的.

本文在优化前建模的问题上,为了降低建模的复杂性将使用遗传算法优化反向传播(genetic algorithm optimized back propagation, GA-BP)神经网络分别对进出口温度进行建模. 在多目标优化的问题上,本文将采用多目标灰狼优化(multi-objective grey wolf optimization, MOGWO)算法与比较常见的非支配排序遗传算法II(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)和多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法进行仿真. 通过仿真得到的Pareto解,利用Hypervolume指标进行对比. 对比后发现, MOGWO在优化效果上要优于MOPSO和NSGA-II. 因此MOGWO算法得到的解集能更好的为进出口温度的设定提供参考,从而提高工厂的生产效率以及生产的安全性.

2 微粉生产工艺流程及磨机进出口温度分析

2.1 微粉生产流程分析

本文对国内某大型微粉生产企业的微粉生产工艺进行研究.该企业的生产微粉的工艺流程如图1所示.钢铁废渣在与石膏混合后进入磨机内,经过磨机内的磨辊研磨形成细小的微粉,再由底部的热风吹入选粉机处,选粉机的作用是分离出那些细度合格的微粉.经过选粉机的筛选,细度合格的微粉从选粉机顶部的磨机出口处送出,然后进入收尘器进行微粉的收集.在生产过程中的热风,主要由热风炉燃烧后产生的热量,经过冷风阀门、热风节止阀门以及循环空气阀门的开度调节所形成.热风的大致走向为:从热风炉经过各类阀门的调节,大量的热风从磨机底部的磨机进口处进入;然后携带着生产合格的微粉从选粉机顶部的磨机出口处跑出;最后进入收尘器中过滤出微粉,一部分的热风又再次返回磨机进口处用于生产.

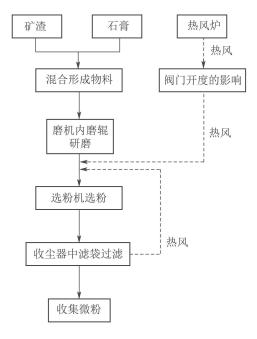


图 1 微粉生产流程

Fig. 1 Production process of slag powder

2.2 磨机进口温度分析

根据文献[1]和文献[2]得出热风与微粉生产关系简图,如图2所示.磨机进口温度指的是热风进入立磨机底部入口处的温度.热风炉燃烧煤粉提供足够的热量,接着主要通过冷风阀门、热风节止阀门以及循环空气阀门,这3类阀门的开度的调节,使得立磨机的进口温度得到相应的变化.

因此通过分析得出影响磨机进口温度的因素有: 热风炉温度、冷风阀门开度、热风节止阀门开度以及 循环空气阀门开度.

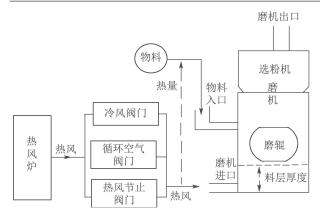


图 2 热风与微粉生产关系

Fig. 2 Relationship between hot air and slag powder production

磨机的进口温度主要作用就是对矿渣物料进行加热,降低物料中的水分,更利于磨机中的磨辊对物料的研磨.如果当磨机进口温度太低,物料的含水率不能有效降低从而引发磨机堵料停机,当磨机入口温度过高将引发磨辊的润滑油变质以及磨机内大量微粉静电聚集引发立磨震动^[1,3].因此在生产中进口温度必须保持在一定的范围内,才能保证生产的正常进行.

2.3 磨机出口温度分析

立磨机主要由底部研磨物料的磨辊与顶部的选粉机构成,磨机出口温度即图2中选粉机上方出口处的温度.热风炉燃烧煤粉经过冷风阀、热风节止阀以及循环空气阀3类阀门所形成热风主要从磨机底部进入,干燥磨机内的物料以及将微粉吹起送入选粉机.另外有一小部分热风在送入磨机进口前所产生的热量在物料入口处对物料进行初步加热.因此,磨机的出口

温度除了磨机进口温度的直接作用,还有物料入口处的温度以及磨机内的物料变化,也会影响磨机的出口温度^[3].由于磨机进口温度与物料入口处温度都由热风炉温度、冷风阀门开度、热风节止阀门开度以及循环空气阀门开度所决定.

所以通过分析得出影响磨机出口温度的因素有: 热风炉温度、冷风阀门开度、热风节止阀门开度、循环空气阀门开度以及磨机内的料层厚度.

同样磨机出口温度也必须控制在一定的范围内, 当出口温度过低,微粉无法得到有效烘干,当出口温 度过高时,收尘器中的滤袋将会被烧坏^[3].滤袋烧坏 后将会导致微粉无法得到有效的收集,使得工厂当天 计划的产量无法得到保证,从而影响企业的经济效益. 另外滤袋的烧坏也有可能引发火灾,将对工厂所有员 工的人身安全造成威胁.

通过上述分析, 热风始终贯穿着微粉生产的全过程. 立磨机的进口温度以及出口温度能够直观的反映出热风温度的变化. 因此, 磨机进、出口的温度是微粉的生产过程中的两项重要的指标.

3 磨机进、出口温度与产量的关系

3.1 数据清洗

本文对工厂实际运行数据进行简单整理后使用拉依达准则对数据进行清洗,剔除那些记录异常的数值. 拉依达准则的原理^[7]:将数据与该样本的平均值作差, 所得的差的绝对值大于该样本3倍的标准差时,就判 定该数据为异常值,并对其进行剔除.

通过清洗最后获得1837组数据样本对.数据如表1所示.该数据将用于后续磨机进出口温度与产量3者之间关系的研究以及对进出口温度的建模.

表 1 清洗后的数据 Table 1 Data after cleaning

热风炉 温度/℃	循环空气阀门 开度/%	冷风阀门 开度/%	热风节止阀门 开度/%	料层厚度/ mm	磨机进口 温度/℃	磨机出口 温度/℃	产量/ (T·h ⁻¹)
665	68.49	0	100	24	243	107	90.752
660	62.41	0	97.66	19	252	110	81.999
676	68.43	0	100	16	234	101	84.815
615	60	0	99	12	228	104	91.931
617	60.24	1.22	96.5	7	245	107	93.952
:	:	÷	÷	:	÷	÷	:
663	60.39	1.27	98.06	8	260	114	94.082
700	56.00	0	100	3	223	109	85.167

3.2 磨机进口温度与产量关系

将表1中的数据按照产量升序进行排列,并从表中 选取磨机进口温度以及产量的数据,将变量进行归一 化,给出两变量之间的关系变化.进口温度与产量的 变化关系如图3所示.

接着使用皮尔逊相关系数来判定两变量之间的相 关性. 当皮尔逊相关系数越靠近0表示两变量相关性 越小, 反之当系数越靠近1表示两变量的正相关性越 大, 当系数在0 ~ 0.2之间时, 两变量几乎没有什么相关性, 当系数0.2 ~ 0.4之间时说明两变量有一定的正相关性, 当系数大于0.4时就表示两变量有较明显的正相关性[8]. 皮尔逊相关系数 6 的表达式如式(1)所示[9]. 式(1)中 n 为样本的数量, 4 , 6 分别代表两个变量样本中的每个数值, 4 , 6 分别代表两个变量的样本平均值[9]:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{n} (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (B_i - \bar{B})^2}}.$$
 (1)

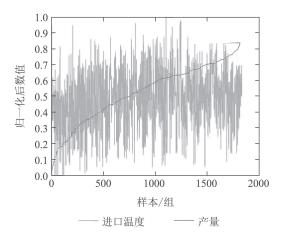


图 3 进口温度与产量关系

Fig. 3 Relationship between inlet temperature and yield

通过计算得到两个变量的皮尔逊相关系数为0.2335,说明进口温度与产量存在一定的正相关的关系,因此在正常工况下提高磨机进口温度,有利于产量的提高,从而增加工厂的经济效益.

3.3 磨机出口温度与产量关系

同样表1中按产量升序排列的数据中,提取磨机出口温度与产量数据进行归一化后对比,两个变量的关系如图4所示.接着通过计算两变量的皮尔逊相关系数,发现出口温度与产量的皮尔逊相关系数为0.0580.通过图4的观察与皮尔逊相关系数的计算说明出口温度与产量在正常的工况下,两变量之间几乎没有什么相关性.

如第2.3节中磨机出口温度的分析,出口温度过高将会带来一系列严重的后果.因此,如果在出口温度在正常的工作范围内,出口温度越低就越不容易发生滤袋被烧坏的故障^[3],从而生产过程中的安全性得到了有效的提高,企业的生产效益同时也得到了保障.并且通过分析出口温度与产量两者之间的关系发现,出口温度在在正常的工作范围内与产量的相关性不大,在该范围内降低温度并不会影响产量.所以综合来说,在正常工况下如果降低磨机的出口温度将更有利于保障企业的安全生产与生产效率.

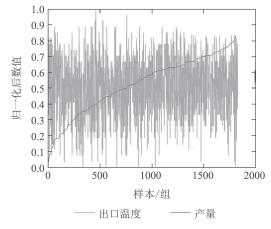


图 4 出口温度与产量关系

Fig. 4 Relationship between outlet temperature and yield

3.4 进口温度与出口温度之间关系

将表1中的数据按照进口温度的升序进行重新排列,并从中选取磨机进口温度与出口温度对比观察,两变量的变化如图5所示. 从图中可以明显观察到进口温度与出口温度成正相关的关系. 接着计算两变量的皮尔逊相关系数为0.4726, 所以进、出口温度明显正相关.

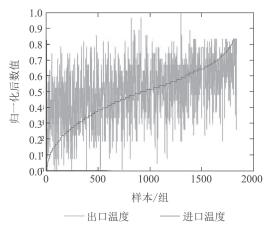


图 5 进出口温度之间关系

Fig. 5 Relationship between inlet and outlet temperature

磨机进出口温度与产量三者之间的关系如图6所示.由于之前通过分析得到进出口温度在正常的工况下,进口温度越高,出口温度越低将越利于微粉的产量的提高以及生产安全的保证.但是进出口温度之间存在正相关的关系,这使得对磨机进出口温度设定值的优化增加了困难,因为无法在正常的工况下同时获得最高的进口温度与最低的出口温度.针对这一问题,使用简单的单目标优化算法是无法解决的.因此本文将采用多目标优化的方法来解决这一问题,确定进出口温度设定值的最优可行解集,作为工厂生产过程中磨机进出口温度设定的参考值,提高生产的安全与产量.

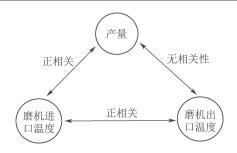


图 6 磨机进出口温度与产量关系

Fig. 6 Relationship between mill inlet and outlet temperature and yield

4 磨机进出口温度建模

在使用多目标优化算法之前首先需要对磨机进、出温度进行建模.考虑到微粉生产过程磨机进、出口温度是两个比较复杂的系统,难以通过机理来分别建立进出口温度的数学模型.因此本文采用GA-BP神经网络分别建立四输入单输出的磨机进口温度模型,以及五输入单输出的磨机出口温度模型.使用该方法很大程度的降低了建模的复杂性,只需通过系统的输入输出数据即可建立模型.进、出口温度的输入输出结构分别如图7-8所示.

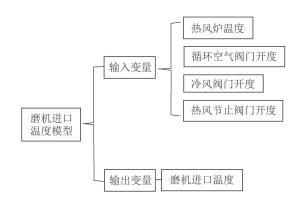


图 7 磨机进口温度模型结构

Fig. 7 Model structure of mill inlet temperature

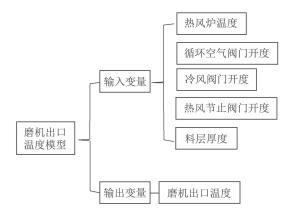


图 8 磨机出口温度模型结构

Fig. 8 Model structure of mill outlet temperature

遗传算法优化BP神经网络^[10]: BP神经网络通过 权值与阈值的设定能够表示出复杂的函数, 对复杂的 系统进行建模, 但是初始BP神经网络初始权值和阈值 没有具体设定方式. 因此, 通过遗传算法选择、交叉、 变异等操作在搜索方式, 找出最优解作为BP神经网络 的初始权值、阈值, 通过网络的训练对磨机进出口温 度进行建模.

BP神经网络的模型结构^[10-11]: 磨机进口温度与出口温度模型都设为单隐含层模型, 其中隐含层节点个数通过公式分别设为6和7, 确定隐含层节点个数的公式如式(2)所示^[11]. 式(2)中p为隐含层节点个数,a和b分别表示输入层与输出层的节点个数, c为一个1到10之间的整数^[11]:

$$p = \sqrt{a+b} + c. (2)$$

BP神经网络的结构确定后,在遗传算法中设定0.1的变异概率以及0.5的交叉概率,通过80次迭代,寻找出BP神经网络的最优初始权值与阈值 $^{[10]}$.

从之前表1中的提取建模需要的相关数据,然后从样本对中随机抽取1737组数据作为训练集,用于磨机进出口温度模型的训练.剩下的100组作为测试集,来检验模型的准确性.表2为最后运行结果的平均绝对百分比误差E的公式如式(3)所示 $^{[12]}$.在式(3)中:测试样本的个数 $n=100,C_i$ 为预测值, Z_i 为实际值 $^{[12]}$.通过表2可以看出,使用GABP神经网络建立的数学模型,平均绝对百分比误差较小.因此所建立的模型能够分别作为磨机进、出口温度的表达式,用于后续的多目标优化.

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{C_i - Z_i}{Z_i} \right|.$$
 (3)

表 2 测试的平均绝对百分比误差

Table 2 Average absolute percentage error of test

模型	平均绝对百分比误差
磨机进口温度模型	0.0430
磨机出口温度模型	0.0335

5 磨机进出口温度多目标优化

在磨机进口温度与出口温度成正相关的情况下,求一组解集,让磨机进口温度有较高的工作温度同时磨机出口处有较低的工作温度.磨机进出口温度的多目标优化方案如下^[5,13]:

在建立完模型后,得到磨机进口温度函数 f_1 ,磨机出口温度函数 f_2 .

磨机进口温度函数: $f_1 = (x_1, x_2, x_3, x_4)$; 磨机出口温度函数: $f_2 = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$.

在函数中 x_1 表示热风炉温度, x_2 表示循环空气阀门开度, x_3 表示冷风阀门开度, x_4 表示热风节止阀门

开度, x_5 表示料层厚度.

$$F1 = -f_1(x_1, x_2, x_3, x_4), \tag{4}$$

$$F2 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5). (5)$$

F1与F2为优化的目标函数. x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 为决策变量,每个变量根据表1都有各自的约束范围.

利用上述条件,使用多目标优化算法求解出一组最优Pareto解,可以尽可能使F1与F2都取得较小的值. 具体表达式如下:

最后将Pareto解中的F1还原(取反),得到最终最优的可行解集,用于为进出口温度的设定提供参考.

5.1 非支配排序遗传算法II

NSGA-II是一种比较常用的多目标优化算法. NSGA-II算法的原理^[6,14-15]: 首先确定种群大小、迭代次数等参数,本文中,种群大小设为40. 在生成初始种群后,初始种群经过交叉以及变异操作后,产生了新的种群. 然后将新的种群与旧的种群一块进行非支配排序,排序后对拥挤距离进行计算,然后从中选取40个最优解作为新的种群. 经过多次这样的迭代(多次将产生的新种群与旧种群一起进行排序与选取最优解集合), 当达到设定的迭代次数后, 得到最终的Pareto解.

5.2 多目标粒子群优化算法

MOPSO算法在多目标优化上也具有较好的应用效果. MOPSO的实现原理 $^{[16-17]}$: 首先初始化MOPSO 算法的参数: 种群大小、迭代次数等. 种群大小设为40, 在随机生成初始的粒子群后, 根据目标函数F1与F2找出当前最优的粒子, 接着随着算法不断迭代, 每个粒子不断更新自己的位置与速度, 并寻找出最优的粒子, 最后得到MOPSO优化后的40个Pareto解.

5.3 多目标灰狼优化算法

MOGWO算法的原理^[18-19]: MOGWO算法模拟的是狼群在捕食某个猎物的过程中,不断向猎物靠近(即不断向这最优解逼近)的行为. 将初始的每一个解看作是每只灰狼, 所有的解集即视为一个狼群, 在这个狼群中分成A1, A2, A3, A4这4个等级, 在A1, A2, A3狼的带领下向着猎物不断靠近. 在MOGWO算法中在搜索最优解的种群之外还有一个外部种群, 用于存储最当前的最优解集. A1, A2, A3狼即从这外部种群中选取, 通过算法的多次迭代, 外部种群不断更新, 最后获

得理想的最优解集,在本文中MOGWO的种群大小同样也设为40. 在算法运行后获得40个Pareto解.

5.4 多目标优化算法仿真对比

使用NSGA-II, MOPSO, MOGWO进行多目标优化仿真, 每次运行获得40个Pareto解. 每次所得到的Pareto解集合用Hypervolume(HV)指标进行评价, 该指标越大说明该多目标优化算法Pareto解的收敛性以及多样性就越好^[20], HV的计算方法如下^[20]:

步骤1 (C_1, C_2) 为参考点, $(F1_i, F2_i)$ 为某一算法某次运行所求得的每个Pareto解, 将 (C_1, C_2) 与 $(F1_i, F2_i)$ 作为矩形的对角, 计算出每个解与参考点所围成的矩形面积.

步骤2 将步骤1中计算的所有矩形求并集, 所形成的图形的面积即为HV的值.

本文参考点(C_1 , C_2)选取为(-220, 115), 然后将 NSGA-II, MOPSO, MOGWO算法分别运行15次, 统计每个算法的HV平均值、最大值、最小值以及标准差并进行对比 $^{[13,21]}$. 表3为3种算法各自运行15次后, HV指标的统计值. 图9为3种算法在15次运行中各自HV指标最大时Pareto解集的对比.

表 3 HV计算结果对比

Table 3 Comparison of HV calculation results

HV统计指标	NSGA-II	MOPSO	MOGWO
平均值	815.1887	819.2739	839.0102
最大值	828.8959	836.9341	844.5428
最小值	785.5252	795.1044	820.3367
标准差	14.94598	11.79299	7.793511

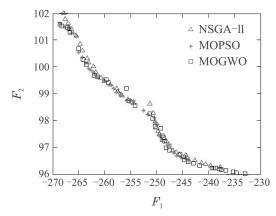


图 9 3种算法的Pareto解集

Fig. 9 Pareto solution set of three algorithms

通过观察图9和表3发现MOGWO算法在磨机进出口温度的优化上优于另两种算法. MOGWO算法在运行15次后不但HV的平均值、最大值、最小值要大于另外两种算法,并且标准差也要小于另外两种算法. 因此, MOGWO算法相比较于NSGA-II和MOPSO不

但有更好的优化效果,而且运行结果更加稳定.通过图9也能观察出MOGWO算法优化后得到的解集合相较与另两种算法分布更广并且也更远离参考点,说明该解集还原后得到的可行解能够为工厂设定磨机进出口温度提供更多选择,并且这些可行解更能满足在正常工况下取得较高进口温度的同时获得更低出口温度的要求.因此通过上述分析得出,MOGWO算法更适合对进、出口温度进行多目标优化.

提取MOGWO中HV最好的Pareto解集,将横坐标F1取反,还原出符合实际温度的最优可行解集,还原后的解集如图10所示.通过一开始的数据清洗,得到磨机进口温度在210℃到288℃之间,磨机出口温度在93℃到120℃之间.从图10中可以看出,图中的所有解都在正常的工况内,符合生产的实际情况,可以为进出口温度的设定提供可靠的参考.

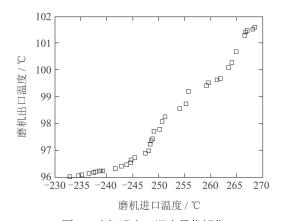


图 10 磨机进出口温度最优解集
Fig. 10 Optimal solution set for mill inlet and outlet temperature

6 结论

通过对磨机进出口温度分析,提出磨机进出口温度的优化方案.使用GA-BP神经网络算法分别对进出口温度建立数学模型.将MOGWO算法与比较常见的NSGA-II算法和MOPSO算法分别对进出口温度的设定值进行优化.优化后所得的可行解集通过HV指标进行分析,通过分析得出MOGWO的优化效果要优于NSGA-II与MOPSO.MOGWO算法优化所的可行解相较于另两种算法分布更广,并且这些可行解更能满足在正常工况下取得较高进口温度的同时获得更低出口温度的要求.因此MOGWO算法所求得的最优解集更加适合作为设定磨机进出口温度的参考值.从而提高生产的效率并降低生产故障发生,保障现场的生产安全.

参考文献:

 WANG Kang, LI Xiaoli, JIA Chao, et al. Optimal tracking control for slag grinding process based on adaptive dynamic programming. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(10): 1542 – 1551.

- (王康, 李晓理, 贾超, 等. 基于自适应动态规划的矿渣微粉生产过程 跟踪控制. 自动化学报, 2016, 42(10): 1542 – 1551.)
- [2] LI Xiaoli, WANG Ziyang, WANG Kang. Plant-wide optimization for slag powder production process. *Journal of Dalian University of Technology*, 2017, 57(5): 517 – 523. (李晓理, 王子洋, 王康. 矿渣微粉生产过程全流程优化. 大连理工大学学报, 2017, 57(5): 517 – 523.)
- [3] FAN Lailiang. Establishment and realization of fuzzy neural networks control model of mill passageway temperature. Shandong Metallurgy, 2011, 33(2): 64 66.
 (范来良. 磨机出入口温度模糊神经网络控制模型建立及实现. 山东治金, 2011, 33(2): 64 66.)
- [4] HOJJATI A, MONADI M, FARIDHOSSEINI A, et al. Application and comparison of NSGA–II and MOPSO in multi-objective optimization of water resources systems. *Journal of Hydrology and Hy*dromechanics, 2018, 66(3): 323 – 329.
- [5] ZHANG Hao, ZHU Yunlong, QI Xiangbo. Job scheduling of the s-melting process for high-precision copper ingot using multi-objective root growth algorithm. Control Theory & Applications, 2018, 35(1): 121 128.
 (张浩,朱云龙, 亓祥波. 基于多目标根系生长算法的高精铜锭熔炼
 - (张浩, 朱云龙, 亓祥波. 基于多目标根系生长算法的高精铜锭熔炼作业调度. 控制理论与应用, 2018, 35(1): 121 128.)
- [6] SHENG Wanxing, YE Xueshun, LIU Keyan, et al. Optimal allocation between distributed generations and microgrid based on NSGA—II algorithm. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(18): 4655 4662. (盛万兴, 叶学顺, 刘科研, 等. 基于NSGA—II算法的分布式电源与微电网分组优化配置. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4655 4662.)
- [7] ZHANG X L, LIU P. A new delay jitter smoothing algorithm based on pareto distribution in cyber-physical systems. Wireless Networks, 2015, 21(6): 1913 – 1923.
- [8] WANG Juan, WU Xuming, WANG Aifeng. The application of pearson correlation coefficient algorithmin in searching for the users with abnormal watt-hour meters. Power Demand Side Management, 2014, 16(2): 52 54.
 (王涓, 吴旭鸣, 王爱凤. 应用皮尔逊相关系数算法查找异常电能表用户. 电力需求侧管理, 2014, 16(2): 52 54.)
- [9] ZHOU H, DENG Z, XIA Y, et al. A new sampling method in particle filter based on pearson correlation coefficient. *Neurocomputing*, 2016, 216: 208 – 215.
- [10] LI Song, LIU Lijun, XIE Yongle. Chaotic prediction for short-term traffic flow of optimized BP neural network based on genetic algorithm. Control and Decision, 2011, 26(10): 1581 1585.
 (李松, 刘力军, 解永乐. 遗传算法优化BP神经网络的短时交通流混沌预测. 控制与决策, 2011, 26(10): 1581 1585.)
- [11] MA J, NI S, XIE W, et al. Deep auto-encoder observer multiplemodel fast aircraft actuator fault diagnosis algorithm. *International Journal of Control*, 2017, 15(4): 1641 – 1650.
- [12] QI Chi, HOU Zhongsheng. Application of adaptive single-exponent smoothing for short-term traffic flow prediction. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(4): 465 469.

 (齐驰, 侯忠生. 自适应单指数平滑法在短期交通流预测中的应用. 控制理论与应用, 2012, 29(4): 465 469.)
- [13] WANG K, LI X, JIA C, et al. Multiobjective optimization of the production process for ground granulated blast furnace slags. Soft Computing, 2018, 22(24): 8177 8186.
- [14] LI Sanyi, LI Wenjing, QIAO Junfei. A local search strategy based on density for NSGA2 algorithm. Control and Decision, 2018, 33(1): 60 66.
 (栗三一, 李文静, 乔俊飞. 一种基于密度的局部搜索NSGA2算法. 控制与决策, 2018, 33(1): 60 66.)
- [15] MURUGAN P, KANNAN S, BASKAR S. Application of NSGA-II algorithm to single-objective transmission constrained generation expansion planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(4): 1790 – 1797.

- [16] GAO Yan, ZHAO Zhonggai, LIU Fei. DMFA-based multi-objective optimization for fermentation processes. *CIESC Journal*, 2018, 69(6): 2594 2602.
 (高岩, 赵忠盖, 刘飞. 基于动态代谢通量分析的发酵过程多目标优化. 化工学报, 2018, 69(6): 2594 2602.)
- [17] FALEHI A D, PIRAN N, POURGHOLI M. HFAGC based on MOP-SO technique: optimal design, comparison, verification. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2016, 31(3): 1199 – 1209.
- [18] CUI Minglang, DU Haiwen, WEI Zhenglei, et al. Research on improved strategy for multi-objective grey wolf optimizer. *Computer Engineering and Applications*, 2018, 54(5): 156 164. (崔明朗, 杜海文, 魏政磊, 等. 多目标灰狼优化算法的改进策略研究. 计算机工程与应用, 2018, 54(5): 156 164.)
- [19] SAHOO A, CHANDRA S. Multi-objective grey wolf optimizer for improved cervix lesion classification. *Applied Soft Computing Jour*nal, 2017, 52: 64 – 80.
- [20] YANG IT, HSIEH Y M, KUNG L O. Parallel computing platform for multiobjective simulation optimization of bridge maintenance plan-

- ning. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2012, 138(2): 215 226.
- [21] LI Lin, YING Shi, DONG Bo. A multi-objective ant colony algorithm for deployment optimization of service-oriented application. *Journal* of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(9): 2376 – 2387.
 - (李琳, 应时, 董波. 一种求解面向服务软件部署优化问题的多目标蚁群算法. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(9): 2376 2387.)

作者简介:

李晓理 博士, 教授, 目前研究方向为智能控制、复杂系统的建模优化与控制, E-mail: lixiaolibjut@bjut.edu.cn;

高 杰 硕士研究生,目前研究方向为神经网络建模与优化, E-mail: 499766199@qq.com;

王 康 博士,目前研究方向为智能控制、复杂系统的建模优化与控制, E-mail: wangkang@bjut.edu.cn.