

基于多目标优化的堆取料机作业控制系统设计及应用

吴敏[†], 周晋妮, 蔡雁, 曹卫华

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 先进控制与智能自动化湖南省工程实验室, 湖南长沙 410083)

摘要: 通过对堆取料机作业过程进行特性分析, 本文以堆取料机运行成本最低和维修成本最低为优化目标, 建立改进的堆取料机作业多目标优化模型. 然后应用层次分析法将该模型转换成单目标优化模型, 最后应用优化算法获得优化作业方案. 在此基础上, 结合钢铁企业烧结原料场需求对堆取料机作业控制系统进行设计, 该系统包括堆取料优化模块、料场图绘制模块、机械控制模块、自动报警模块和集中监控模块. 该作业控制系统的应用, 缩短了堆取料机的行走路程, 提高了设备使用均衡率, 同时改善了原料稳定性.

关键词: 堆取料机; 优化模型; 控制系统; 行走路程; 使用均衡率

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Design and application of control system for operation of stacker-reclaimers based on multi-objective optimization

WU Min[†], ZHOU Jin-ni, CAI Yan, CAO Wei-hua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
Hunan Engineering Laboratory for Advanced Control and Intelligent Automation, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: This study deals with the minimization of the driving distance and maintenance cost, and the optimization of the operation of the stacker-reclaimer. First, a multi-objective optimization model for the operation of the stacker-reclaimer is presented based on the analysis of the characteristics of the operation processes. Next, the model is converted to a single-object optimization model using the analytical hierarchy process. Then, an optimization algorithm is designed to obtain an optimal working plan. Finally, an operating control system for the stacker-reclaimer is designed based on constrained conditions and practical requirements of the sintering stockyard in an iron and steel enterprise. This system contains an optimization module for piling up and reclaiming, a chart drawing module for the stockyard recording, an automatic control module, a monitoring module, and an alarm module. The application results of the system to the operation of real stacker-reclaimers shows that the system reduces the driving distance, increases the uniformity of utilization of devices, and improves the stability of raw material.

Key words: stacker-reclaimer; optimization model; control system; driving distance; utilization balance rate

1 引言(Introduction)

烧结原料场是存放钢铁企业原料的场地, 存储的原材料是企业正常生产的前提, 但是原料场占地面积大, 工序复杂, 占用了大量的企业资源和生产成本. 目前, 烧结原料场的作业过程, 尤其是堆取料机的作业过程并未得到充分的优化, 具有较大的改进空间. 因此, 对堆取料机作业优化与控制问题进行研究, 提出有效的解决方案, 提高料场的生产效率, 减少不必要的运行浪费和管理成本, 对钢铁企业节约生产成本具有重要的意义.

针对堆取料机等大型设备的控制问题, 国外钢铁企业已经积累了一定的研究基础. 文献[1]通过对堆取料机的运动学性能进行分析, 建立运动学方程, 采用

系统辨识方法进行模型参数识别, 进而基于辨识模型提出了一种堆取料机的Smith预估鲁棒控制器, 实现了堆取料机的准确控制. 这种方法减少了堆取料的人为操作失误, 但在料场工作效率方面并没有较大的改进; 文献[2]通过将料场作业优化模型分解为多目标规划问题与运输路径规划问题, 然后通过两个问题之间的交互完成料场作业优化模型的建立, 最后通过仿真验证模型的优越性; 文献[3]对料场的建模问题进行分解, 分别针对原料的供应与消耗、原料的运输建立数学模型, 实现作业优化调度. 这两种方法在思路上都有一定的独到之处, 但是并没有在实际生产过程中得到应用, 因此, 还需要做进一步的研究.

同时, 国内很多钢铁企业也针对该问题也提出了

料场无人化的建设目标^[4-5],并且部分钢铁企业已经实现了堆取料设备的全自动作业,但是效率只能达到人工作业的60%。因此,为了更好地管理原料场,减少不必要的资源浪费,必须提出一种有效可行的堆取料机作业优化与控制方案,并能在实际的生产过程中得到应用,从而真正地提高堆取料机作业效率,节约企业成本。

由于设备的使用均衡率不高往往会导致较高的维修成本,因此堆取料机的作业优化不仅要考虑堆取料机的行走路径,同时也要考虑设备的使用均衡率。针对多目标优化问题,一般有两种类型的求解方式:一种是采用智能优化算法进行求解,如模拟退火算法^[6]、遗传算法^[7]、进化差分算法^[8]、粒子群算法^[9-10]和蚁群算法^[11]等,然而堆取料机的作业受到原料的供应与消耗、市场变化等不可控的因素影响,没有一定的概率和规律可言,不易给出准确的数学描述,选用这类方法很可能陷入局部最优,难以达到最优的效果。另外一种类型是将多目标优化问题简化成单目标优化问题进行求解,该方法在工业控制过程中应用很广泛,关键在于各个子目标权重值的确定。

本文根据生产作业计划及堆取料机和料堆所在位置,以堆取料机行走路程最短和设备使用均衡率最高为目标,建立堆取料机作业多目标优化模型;然后应用层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)来确定各个目标的权重值,从而简化问题的求解难度,并避免目标函数非凸时权重的随意取值而可能导致部分最优解的丢失^[12];再采用加权方式将多目标优化问题转换为单目标优化问题。最后根据优化模型提出相应的优化算法^[13]。在此基础上,对堆取料机作业控制系统的硬件结构、数据流程以及功能模块进行设计,通过作业控制系统将该优化方法应用到实际生产中。该系统的应用能显著提高料场作业自动化管理水平,提高作业效率,减少企业管理成本。

2 作业特性分析与控制要求(Characteristic analysis and control requirements)

通过分析堆取料机作业特性,并结合现场需求提出堆取料机作业优化与控制要求。

2.1 特性分析(Characteristic analysis)

本文以某钢铁公司360 m²烧结机配套的原料场为研究对象,该料场主要负责烧结原料的存储,同时配备4台堆取料机进行原料的运输。该料场共有3个料条,分别称为A、B、C料条,每个料条长600 m,宽46 m,有4台堆取料机(编号分别为ST1、ST2、ST3和ST4)在相邻料条间进行堆取料。其中:A料条上的原料只能使用ST1或ST2进行堆取;B料条上的原料只能使用ST2或ST3进行堆取;C料条上的原料只能使用ST3或ST4进行堆取。

堆取料机主要作业方式有堆料作业和取料作业。

1) 堆料过程主要有3种模式,分别是行走堆料、旋转堆料和定点堆料。

① 行走堆料。这种作业模式是通过断续行走进行数层数列定点堆积。从第1列的第1点开始堆料,料位检测器测量出各个小堆的高度,然后行走机构根据检测器发出的指令进行微动,当堆取料机达到行走范围的极限,或者到达指定的行走范围,则进行换列,从料堆第2列的第1点开始反向堆料;当已经完成第1层各列的堆积之后,进行换层,然后开始第2层的堆积。这种断续行走的堆料方式形成的料堆是矩形的,所以有很高的料场利用率。

② 旋转堆料。在往返旋转堆积作业过程中,堆取料机的臂架从始至终固定在设定的堆积高度上,当堆取料次数达到预定值时,大车行走一个设定距离,然后开始下次作业。旋转堆料模式可以根据输送量的多少进而调整料堆的设定长度,例如在原料输送量较少或不连续的情况下,可以降低料堆长度设定值,这样堆积出来的料堆是比较规则的,效率也较高。

③ 定点堆料。定点堆料是由断续旋转和断续行走相结合的一种堆料方式,为减少扬尘,在堆积过程中第1堆原料被分成多层。高度检测器会实时测量料堆高度,并发出换层指令,以此类推,一直到堆完最后一层,作业过程中臂架高度不改变。然后,堆取料机按照设定的方向和角度旋转至第2堆原料所在位置继续堆积,当达到一定的旋转范围之后,大车行走一个设定距离,直到料堆长度达到设定值。

2) 取料过程有2种模式,分别是旋转取料和定点取料。

① 旋转取料有分层分段取料和分层不分段取料两种方式。

分层分段取料。首先堆取料机行走至指定料堆,然后通过旋转和俯仰动作将斗轮放到料堆顶层的作业开始点上,再通过旋转操作进行取料,当达到一定旋转范围时,大车行走一个设定距离,按预定的料段长度完成第1层取料后,开始下一层取料操作。完成最下面一层取料后就进行换段,这个时候把斗轮放到第2段顶层的作业开始点上,开始取料操作,取料段的长度设定要保证臂架不碰到料堆。

分层不分段取料。这种作业方式效率最高,基本不会碰到料堆,比较适合在较短、较低的料堆,同时能避免取料过程中因为塌方引起臂架和斗轮过载的危险,该种方式可以实现等量取料。

② 定点取料。这种工艺的特点是“间断操作,先堆先取”,该种方式效率最低。在取料过程中容易造成坍塌或引起斗轮过载。操作人员在采用这几种取料方式的时候,必须从料堆的顶层开始取料。

2.2 控制要求(Control requirements)

通过对堆取料机作业特性的分析, 结合现场工艺需求, 确定了堆取料机作业优化与控制要求, 分别如下所述:

- 1) 对堆取料机作业进行优化设计, 减少设备运行成本和维修成本.
- 2) 通过确定最优堆取料模式, 实现自动堆取料.
- 3) 实现料场图自动绘制, 建立堆取料报警机制, 同时实时监控料场作业情况.

根据上述作业优化与控制要求, 需要建立堆取料机作业优化模型和优化算法, 设计堆取料机作业控制系统对堆取料机作业进行优化与控制, 同时实现自动堆取料、料场图自动绘制、堆取料报警, 以及料场实时监控等功能.

3 堆取料机优化方法(Optimization method for stacker-reclaimers)

根据堆取料机作业控制要求确定优化目标, 从而针对实际生产过程建立堆取料机多目标优化模型, 同时提出一种改进的优化算法进行求解, 最后验证该方法的有效性.

3.1 优化模型(Optimization model)

根据堆取料机作业控制要求, 原料场的作业优化目标主要有以下两点:

- 1) 设备运行成本最低, 即在相同的生产计划下, 4台堆取料机每天行走的总路程最短, 如下所示:

$$z_1 = \min \sum_{j=1}^4 s_j, \quad (1)$$

其中 s_j 为第 j 台堆取料机某天的行走总路程, 单位为km.

- 2) 堆取料机的设备维修成本最低, 由现场经验可知, 在相同的生产计划下, 当设备使用均衡率最高时, 维修成本达到最低, 即4台堆取料机的使用率与平均使用率的绝对差值之和最小, 如下所示:

$$z_2 = \sum_{j=1}^4 |\eta_j - \eta|, \quad (2)$$

其中: η 为4台堆取料机某天的平均使用率; $\eta_j(j=1, 2, \dots, 4)$ 为第 j 台堆取料机某天的使用率, 由某天第 j 台堆取料机的行走总路程与所有堆取料机的行走总路程之和的比值确定, 如式(3)所示:

$$\eta_j = \frac{s_j}{s}, s = \sum_{j=1}^4 s_j, \eta = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \eta_j = 0.25, \quad (3)$$

其中: $s_j(j=1, 2, \dots, 4)$ 为某天第 j 台堆取料机行走总路程, s 为某天所有堆取料机行走总路程之和.

为了达到堆取料机的运行成本和设备维修成本最

低, 必须同时考虑堆取料机的行走路程和使用率. 文献[13]中目标函数为

$$z = \min \sum_{j=1}^4 [w_1 s_j + w_2 (\eta_j - \eta)^2],$$

没有考虑到两个目标之间单位不统一的问题, 使优化结果偏向于堆取料机的路径优化, 减弱了对设备使用均衡率的考虑. 本文对该目标函数进行改进, 通过添加价格系数的方式, 将两个目标表示为成本的形式, 单位统一为(元), 同时将设备使用均衡率以绝对值的形式表示, 从而更准确地描述优化目标, 同时降低计算难度, 改进后的目标函数如下:

$$z = \min \sum_{j=1}^4 [w_1 p_1 s_j + w_2 p_2 |\eta_j - \eta|], \quad (4)$$

其中: 变量 z 的单位是元; $w_k(k=1, 2)$ 为第 k 个子目标的权重值; p_1 和 p_2 是价格系数, 根据现场运行成本与行走路程的关系和设备使用率与维修成本的关系, 可得价格系数分别为35和46800.

在改进目标函数的同时, 对约束条件也进行相应的完善: 将文献[13]的第1个约束条件 $s_j \geq 0, j=1, 2, 3, 4$ 修改成式(5), 同时增加4个约束条件以提高优化效果, 如式(6)–(9)所示. 分别考虑了各变量的取值范围、堆取料机的限制条件(如料条A只能选用ST1和ST2堆取料机)、权重值和使用率的归一化问题等, 如式(5)–(13)所示:

$$s_{jm} \geq 0, j = 1, 2, 3, 4, m = A, B, C, \quad (5)$$

$$s_1 = s_{1A}, \quad (6)$$

$$s_2 = s_{2A} + s_{2B}, \quad (7)$$

$$s_3 = s_{3B} + s_{3C}, \quad (8)$$

$$s_4 = s_{4C}, \quad (9)$$

$$0 \leq w_k \leq 1, k = 1, 2, \quad (10)$$

$$w_1 + w_2 = 1, \quad (11)$$

$$0 \leq \eta_j \leq 1, j = 1, 2, \dots, 4, \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^4 \eta_j = 1 \quad (13)$$

其中 $s_{jm}(j=1, 2, \dots, 4, m=A, B, C)$ 为第 j 台堆取料机某天在 m 料条上堆取料时的行走总路程.

3.2 优化模型转换(Conversion of optimization model)

为了简化模型求解难度, 采用层次分析法确定子目标的权重值, 将堆取料机多目标作业优化模型转换成单目标模型^[13].

- 1) 首先组成一个决策群体(6人), 每个决策者按照AHP相对重要性评估表对上述两个目标的相对重要性进行判断, 再由判断结果生成单独的6个对比矩

阵:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

2) 求出各个对比矩阵的最大特征值、特征向量和一致性指标;

3) 通过一致性指标与AHP检验数的比较进行对比矩阵一致性检验;

4) 如果对比矩阵通过一致性检验, 则对其特征向量进行归一化处理, 分别求得各决策者对各子目标的权重值;

5) 将6组权重值的平均数作为各子目标的最终权重值.

由以上步骤求出两个目标的权重值分别为 $w_1 = 0.76$ 和 $w_2 = 0.24$, 将其代入式(4), 可得新的目标函数如下:

$$z = \min \sum_{j=1}^4 [26.6s_j + 11232|\eta_j - \eta|]. \quad (15)$$

将式(3)代入上式, 可得到只含有变量 s_j 和 s 的简单函数:

$$z = \min \sum_{j=1}^4 [26.6s_j + 11232|\frac{s_j}{s} - 0.25|]. \quad (16)$$

以上是优化模型的转换过程.

3.3 作业优化算法 (Optimization algorithm of operation)

在对目标函数进行转换之后, 再通过编程将该优化方法应用到4台堆取料机的实际作业中. 当原料场需要进行堆料或者取料作业时, 管理层将下发指令给堆取料机控制系统, 系统在接收到指令之后先运行堆取料机优化程序, 确定将要进行作业的堆取料机编号, 然后下发指令给PLC, 控制相应的堆取料机进行堆料或者取料操作. 具体的优化算法(堆取料机在A料条上的优化算法)如下所示:

第1步 变量初始化, 如式(17)–(22)所示:

$$N = \text{NULL}, \quad (17)$$

$$x_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

$$t_j = 0, \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (19)$$

$$d_j = d_{ij} = 0, \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (20)$$

$$d_{ij} = |t_j - x_i|, \quad (21)$$

$$y_j = 0, \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (22)$$

其中: N 为料条名, 可为A, B, C或NULL(空值), x_i 为料堆 i 在料场中的位置(即纵坐标的值), t_j 为第 j 台堆取料机在料场中的位置, d_j ($j = 1, 2, \dots, 4$)为某天第 j 台堆取料机的行走路程累加值. d_{ij} 为第 j 台堆取料

机进行第 i 次作业行走的路程, y_j 为第 j 台堆取料机进行本次作业所需成本.

第2步 从数据库中读入 N 的值, 如果 $N = A$, 则执行下一步, 否则判断是否为B料条或者C料条, 然后根据判断结果进入B料条或C料条堆取料机优化算法, 如果均不是, 则报警出错.

第3步 分别读入 x_i , t_1 和 t_2 的值, 代入公式(21)中进行计算得到 d_{i1} 和 d_{i2} , 再代入下式:

$$y_j = 26.6d_{ij} + 11232|d_{ij} / \sum_{j=1}^4 d_{ij} - 0.25|. \quad (23)$$

第4步 如果 $y_1 > y_2$, 则选择ST2对料堆 i 进行堆料或取料操作, 令 $j = 2$; 如果 $y_1 < y_2$, 则选择ST1对料堆 i 进行堆料或取料操作, 令 $j = 1$; 否则, 随机选择ST1或ST2, 令 $j = 1$ 或 2 .

第5步 读取堆取料机本次行走路程 d_{ij} , 并与 d_j 进行累加, 得到新的行走路程之和.

第6步 进入第2步继续.

根据堆取料机在A料条上的优化算法, 同理可得B料条和C料条堆取料作业的优化算法.

3.4 优化结果分析 (Analysis of optimization results)

堆取料机的作业优化模型是以行走路程最短和设备使用均衡率最高为目标建立的. 其中, 设备使用均衡率的高低可以用单台堆取料机的使用率作为指标来评判. 理想状况下, 每台堆取料机的使用率都应接近25%.

为证明该方法的有效性, 分别以优化前两个月的生产数据和优化后两个月的生产数据对堆取料机的行走路程和使用率进行分析, 结果如图1和图2所示.

从图1中可以看出, 在作业量基本相同的情况下, 使用优化算法前的2个月, 4台堆取料机每天的平均行走总路程为51.8 km; 使用优化算法后的2个月, 4台堆取料机每天的行走总路程明显降低, 平均为42.1 km. 路程缩短了9.7 km, 显然改进后的算法大大缩短了堆取料机行走路程, 更具优越性.

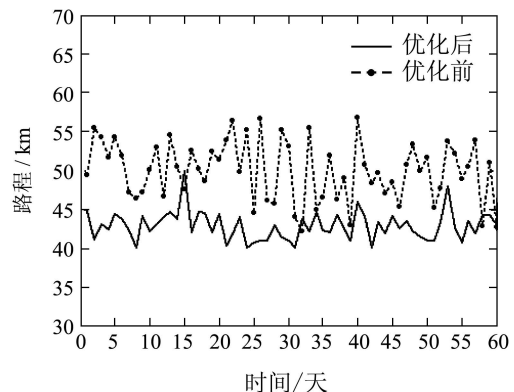


图1 4台堆取料机行走总路程

Fig. 1 The total walking distance of 4 stacker reclaimers

各台堆取料机的情况相似, 选用ST3堆取料机进行分析. 从图2中可以看出, 使用优化算法前的2个月, ST3的使用率波动范围很大, 在10%~35%之间波动; 使用优化算法后的2个月, ST3的使用率波动范围明显减小, 仅在20.1%~29.8%之间波动, 更接近理想状况.

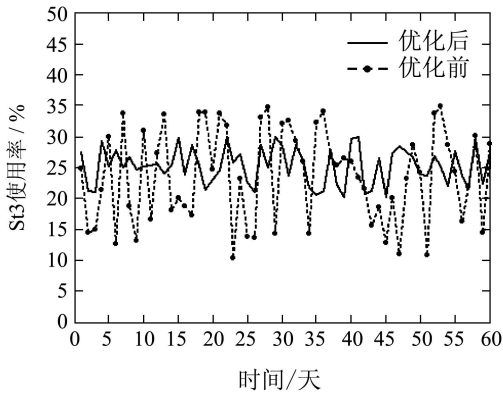


图 2 ST3堆取料机使用率

Fig. 2 Usage rate of ST3 stacker reclaimer

4 控制系统设计(Design of control system)

基于烧结料场现有的硬件架构与软件数据流, 构建堆取料机作业控制系统, 实现堆取料优化、料场图绘制、机械控制、自动报警及集中监控等系统功能.

4.1 硬件结构(Hardware structure)

料场的计算机管理系统由3层网络结构组成, 如图3所示.

从图3中可以看出, 料场计算机网络系统分别是L1层网络(基础自动化层), L2层(过程控制层), L3层(公司管理层). L1层中料场基础自动化采用西门子PLC系列实现, 由9台PLC组成, 7台S7-300系列PLC分别负责控制一次料场(即原料场)的4台堆取料机, 二次料场的1台堆料机、2台取料机. 剩余的2台PLC分别控制所有皮带机和预配料系统, 系统通过编写CFC程序, 然后下载到对应的PLC中实现控制.

烧结料场L2级系统由数据库服务器、数据采集服务器、工程师站、车号识别系统和原料场主控室系统组成, 数据采集服务器与料场一级机、车号识别系统等进行通讯. 同时数据库服务器也与L3网络进行通信. L2级系统的硬件设备与客户机都在原料场主控室, 本文所设计的堆取料机控制系统安装在原料场主控室.

L3层网络是公司管理层, 由数据库服务器和相关客户端计算机(炼铁厂技术科、计量科、生产管理中心和料场L3客户机)组成, 数据库服务器负责过程控制层的生产数据及ERP系统下发的生产计划的存储, 服务器采用ORACLE 10g标准版, 通讯方式采用DB-Link方式.

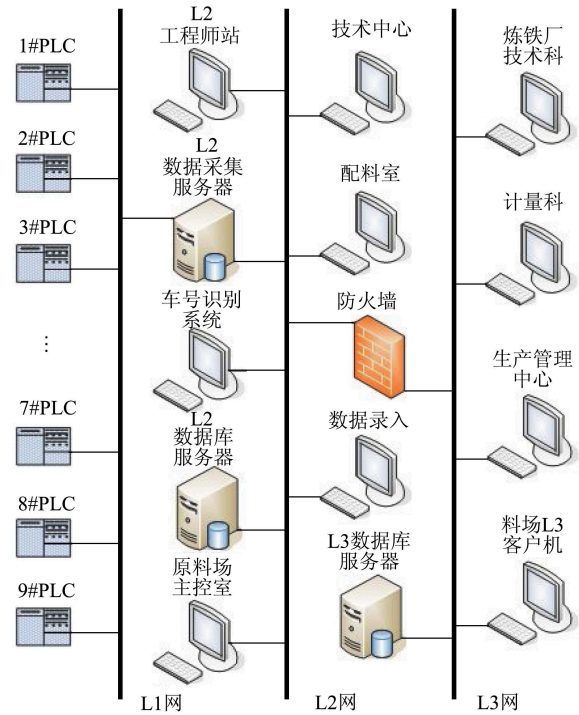


图 3 硬件结构

Fig. 3 Hardware structure

4.2 数据流程(Data flow)

根据上述硬件结构图, 可以确定系统数据流程如图4所示.

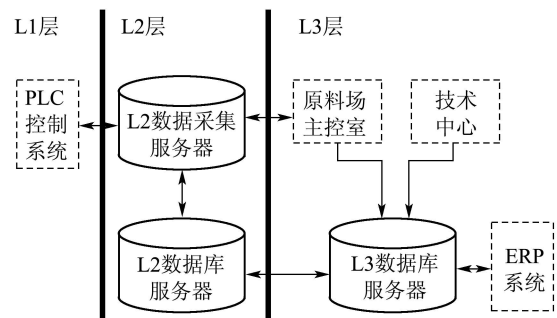


图 4 数据流图

Fig. 4 Data flow

上位机组态软件WinCC采用OPC方式进行数据采集, 系统采用KEPWARE OPC SERVER软件作为中间件, 通过它直接与PLC进行通讯. 一级机系统具有以太网模块, 并设有IP地址. 原料场PLC通过I/O卡或Profibus总线实现过程仪表检测量的采集以及执行机构控制量的下发. L2层数据采集服务器采集到的数据通过局域网将处理后的数据保存L2层数据库服务器. 同时, 为了实现管理层与控制层的信息传递, 料场L2数据库服务器与L3层数据库服务器的通讯是双向的.

4.3 系统功能(System functions)

根据堆取料控制要求, 应用本文提出的优化方法

建立堆取料机作业控制系统,共包含5大功能,分别如下:

1) 堆取料优化.

通过将本文提出的堆取料机优化算法编写成堆取料优化模块,作为一个单独的功能模块嵌入在堆取料机作业控制系统中.同时,控制系统与L1和L2层工业网络之间的数据是共享的,因此该程序所需的堆取作业计划、料场信息及堆取料机在料场中所在位置等数据,可从数据库中获得.程序运行结果也保存在服务器中,以指导料场作业.当系统下达作业指令时,管理员只需点击“堆取料优化”按钮,就可以得到最适合本次作业的堆取料机编号.

除此之外,系统在堆取料过程中根据堆取料机的走行位置、作业料堆的边界地址与作业结束地址之间的距离来控制堆取料过程.如果已接近作业结束地址,系统会提示警示信息.同时目前已完成作业量和剩余堆积地址内可堆取的最大量都会在监控画面上显示.这样管理人员可以直观地判断目前剩余地址内是否能完成本次堆取料作业,如果满足,则在完成剩余作业量堆取之后提示作业结束;否则,管理人员通知堆取料机停止作业.当剩余在地面皮带上的原料传送完毕时,自动结束本次堆取料作业.同时将备用地址作为新作业指令下发给对应堆取料机,重新开始作业.

2) 料场图绘制.

现场原有的料场图绘制完全是人工完成,不仅更新慢,而且精度低,因此,需采用自动绘制的料场图替代原先的手绘料场图.基于堆取料机回转角度、俯仰角度、悬臂长度、出料口高度、料堆的堆积半径等参数建立数学模型,采用计算机绘图技术自动生成料场图,为现场操作人员的决策制定提供详细信息.

3) 机械控制.

收到包含作业货种、计划作业量的堆取料计划后,系统根据作业货种在基础信息库中查出对应堆比重、堆积角度信息确定堆积模式.然后通过PLC控制堆取料机的悬臂回转、斗轮机构、物料流、俯仰机构、尾车、机电保护和大车行走等部件实现堆取料自动作业.该模块是堆取料机作业控制系统中不可缺少的一部分.

4) 自动报警.

在烧结料场中,经常发生堆取料失误的现象,特别是夜间操作时,易将要取的原料的料堆位置混淆,造成原料质量稳定性不高.针对这种现象,提出一种堆取料报警机制进行堆取料:堆取料时,根据本次生产计划,判断所需原料的名称、料号及储存位置,从数据库中读取堆取料机当前时刻位置,判断原料是否符合本次作业要求.如果是,则允许堆取料;否则禁止堆取料.采用这种方式可避免混料事故的发生.

5) 集中监控.

系统选用WinCC在主控室上位机上开发流程监控系统,实现对整个堆取料作业的监视与控制.同时,在堆取料机上安装视频监控设备,然后将信号通过工业网络传送到主控室,以实时显示堆取料机作业时各机构的运动、料堆形状的变化以及物料流动的情况.

5 现场应用(Real-world application)

本文提出了一种有效的堆取料机作业优化方法,设计了堆取料机作业控制系统,有效提高了生产效率,降低了生产成本.

对于烧结原料场的堆取料机作业管理环节而言,其工业效益主要体现在提高原料场生产效率和减少企业管理成本.在该系统优化前,堆取料机的作业方案是凭现场工人的经验进行制定的,浪费了较多的运行成本,而且经常会发生混料事故,影响矿粉质量,对企业效益造成很大的影响.针对这个问题,本文提出一种改进的堆取料机作业控制与优化方法,通过建立相应的作业控制系统,将其应用到实际生产过程中,达到了预期的效果.

取该系统优化前2个月与优化后2个月的料场生产指标进行比较,发现生产效益得到了明显的改善,如表1所示.

表1 主要质量指标对比

Table 1 Comparison of main quality indexes

| 生产指标 | X/km | Y/次 | Z/% | W/次 |
|------|------|-----|-------|-----|
| 优化前 | 51.8 | 6 | 88.96 | 5 |
| 优化后 | 42.1 | 0 | 91.03 | 1 |

在表1中: X为堆取料行走总路程日均值; Y为混料事故发生次数; Z为铁矿粉质量稳定率; W为堆取料机故障次数.

从表1可以看出,堆取料机每天的行走总路程缩短到了平均42.1 km,对比优化前的平均51.8 km,降低了9.7 km;由于堆取料报警技术的应用,优化后的2个月未发生混料事故,而优化前2个月发生了6次混料事故;混料事故的减少同时也提高了铁矿粉的质量,优化后铁矿粉质量的稳定率达到了91.03%,比优化前的平均88.96%,提高了2.07%;堆取料机的故障率也有明显降低,由优化前的5次降低到1次.

6 结论(Conclusion)

本文在深入研究堆取料机作业过程特性的基础上,根据烧结原料场的实际应用需求,以设备运行成本和维修成本最低为目标,建立了堆取料机作业多目标优化模型.同时提出了相应的优化算法,并且结合现场需求设计开发了基于多目标优化的堆取料机作业控制系统,能很好地指导企业优化管理,为解决钢铁企业烧结原料场堆取料机的作业优化问题提供了有效方法.

参考文献(References):

- [1] HONG K S, KIM S H, LEE K I. Reclaimer control: kinematic analysis, modeling, identification, and a robust Smith predictor [C] // *Proceedings of the 14th World Congress*. Beijing: IEEE, 1999: 409 – 414.
- [2] AGOU M, NISHI T, KONISHI M. A dynamic optimization model for storage yard logistic systems [C] // *Proceedings of the SICE Annual Conference*. Japan: IEEE, 2005: 3254 – 3259.
- [3] COELHO R J, CUZZOUL J, FIORONI M M. Simulation of raw material yard at CST [J]. *Revue de Metallurgie*, 2006, 103(3): 117 – 120
- [4] 罗首章, 丁守虎. 专家系统在料场智能化管理系统中的应用 [J]. 宝钢技术, 2002, 1(6): 1 – 4.
(LUO Shouzhang, DING Shouhu. Application of expert system in intelligent management system of baosteel yard [J]. *Baosteel Technology*, 2002, 1(6): 1 – 4.)
- [5] 杨传举, 李建沛, 樊增彬, 等. 济钢一铁厂原料场的综合改造 [J]. 烧结球团, 2008, 17(6): 53 – 56.
(YANG Chuanju, LI Jianpei, FAN Zengbin, et al. Transformation of Jinan Iron and Steel ironworks raw field [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2008, 17(6): 53 – 56.)
- [6] 冯雪, 裴志松. 求解装卸混合车辆路径问题的模拟退火遗传算法 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(8): 2013 – 2015.
(FENG Xue, PEI Zhiyong. A novel simulated annealing genetic algorithm for solving the vehicle routing problem with backhaul [J]. *Computer Measurement and Control*, 2011, 19(8): 2013 – 2015.)
- [7] 王瑞琪, 张承慧, 李珂. 基于改进混沌优化的多目标遗传算法 [J]. 控制与决策, 2011, 26(9): 1391 – 1397.
(WANG Ruiqi, ZHANG Chenghui, LI Ke. A sort of iterative learning control algorithm for tracking of robot trajectory [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(9): 1391 – 1397.)
- [8] LI G Y, LIU M G. The summary of differential evolution algorithm and its improvements [C] // *The 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*. Chengdu: IEEE, 2010: 153 – 156.
- [9] MOAYED D, GARY G Y. Cultural-based multiobjective particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2011, 41(2): 553 – 567.
- [10] 连志刚, 焦斌. 一种混合搜索的粒子群算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(10): 1404 – 1410.
(LIAN Zhigang, JIAO Bin. Particle-swarm optimization algorithm with mixed search [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(10): 1404 – 1410.)
- [11] 任志刚, 冯祖仁, 张兆君. 多优解更新信息素的混合行为蚁群算法 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(9): 1201 – 1206.
(REN Zhigang, FENG Zuren, ZHANG Zhaojun. Hybrid-behavior ant-colony optimization algorithm with pheromone updated by multiple good solutions [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(9): 1201 – 1206.)
- [12] 彭婷, 姜佩华. 层次分析法在环境绩效评估中的应用 [J]. 能源与环境, 2007, 5(1): 13 – 15.
(PENG Ting, JIANG Peihua. AHP in environmental performance evaluation [J]. *Energy and Environment*, 2007, 5(1): 13 – 15.)
- [13] 周晋妮, 钟茜怡, 蔡雁, 等. 堆取料机作业多目标优化方法及应用 [C] // 第31届中国控制会议. 合肥: IEEE, 2012: 2471 – 2475.
(ZHOU Jinni, ZHONG Qianyi, CAI Yan, et al. A multi-objective optimization method and application to stacker-reclaimer job [C] // *Proceeding of the 31st Chinese Control Conference*. Hefei: IEEE, 2012: 2471 – 2475.)

作者简介:

吴敏 (1963–), 男, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 博士生导师, IEEE高级会员(Senior Member, IEEE), 目前研究方向为过程控制、鲁棒控制和智能系统, E-mail: min@csu.edu.cn;

周晋妮 (1988–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为过程控制与智能优化, E-mail: zhoujinni@wuhua.csu.edu.cn;

蔡雁 (1978–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为过程控制和智能优化, E-mail: yjs-info@csu.edu.cn;

曹卫华 (1972–), 男, 教授, 目前研究方向为过程控制、鲁智能控制和多智能体系统, E-mail: caowh@mail.csu.edu.cn.