

复杂生产过程计划调度级联模型在选矿 MES 中的应用研究

黄肖玲¹ 柴天佑²

摘要 针对大型选矿生产线运行和管理特点,分析了选矿企业生产成本、原矿处理量、精矿品位、金属回收率等综合生产指标在计划层、执行层和控制层间的交互关系;说明了选矿企业计划调度主要特征是将综合指标逐层分解优化为日生产线指标的思想;建立了在保证产品质量合格前提下总成本最小为目标和在保证合理精矿品位的前提下,以减小精矿库存、最大限度地满足设备生产能力为目标的计划与调度两阶段级联优化模型;提出了决策选矿生产线日原矿处理量和精矿品位与尾矿品位等生产指标的生产计划调度优化方法,并应用于某选矿企业制造执行系统 (Manufacturing execution system, MES),取得显著应用成效。

关键词 制造执行系统, 选矿过程, 计划与调度, 综合生产指标

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.01130

Application of Planning and Scheduling Cascade Model of Complex System Processing to Mineral Processing MES System

HUANG Xiao-Ling¹ CHAI Tian-You²

Abstract For the production line operation and management of mineral processing, the interactions of comprehensive indices, such as mineral processing cost, raw ores quantity, concentrate grade, metal recovery and so on, were analyzed at planning, execution, and control layers. We also illustrated the main feature of planning and scheduling in mineral processing enterprises, which is to decompose and optimize the comprehensive production into the production indices of a day. A two-stage hierarchical model of planning and scheduling was established, which can minimize the overall cost for ensuring products quality and maximally utilize equipment capacity for ensuring rational concentrate grade, decrease the concentrate inventory. The approach of planning and scheduling, which makes decision on day production indexes of raw ores quantity, concentrate grade and tailing grade, was proposed in this paper. It has been applied to a manufacturing execution system (MES) of a mineral processing enterprise, and satisfactory results have been achieved.

Key words Manufacturing execution system (MES), mineral processing, planning and scheduling, comprehensive production indexes

生产方式的演变和 IT 技术的进步是促进制造业信息化发展的两个基本动因。在制造业信息化的早期阶段,受到当时环境限制,工厂业务管理的信息化与生产设备的自动化常被作为两个独立的领域而分别进行,长期存在信息孤岛和信息断层的问题成

为阻碍公司级业务管理系统与工厂级生产管理系统之间集成的根本原因^[1-3]。导致公司级的业务管理系统无法得到及时准确的生产实绩信息,无法把握生产现场的真实情况,而生产现场人员也得不到切实可行的生产计划与生产指示。

1990 年美国 AMR (Advanced manufacturing research) 的报告中首次提出制造执行系统 (Manufacturing execution system, MES) 这一概念,并将 MES 定位于重点解决生产执行层的生产管理问题,定义为“位于上层的计划管理系统与底层的工业控制之间的面向车间层的管理信息系统”。

MES 是流程工业综合自动化的核心技术,其主要功能是负责生产管理和调度执行。MES 同样是制造业信息化,特别是流程工业自动化建设中,在企业计划管理和车间生产控制之间架起的一座信息沟通和管理桥梁,将使企业更容易建立一个快速反应、

收稿日期 2010-03-04 录用日期 2011-04-08
Manuscript received March 4, 2010; accepted April 8, 2011
国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(2009CB320600), 高等学校学科创新引智计划 (B08015), 辽宁省教育厅高等学校科研项目 (2009A312) 资助
Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB320600), Program of Introducing Talents of Discipline to University (B08015), and Science and Research Program of the Educational Department of Liaoning Province (2009A312)
1. 大连海事大学交通运输管理学院 大连 116026 2. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110004
1. Collage of Transportation and Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110004

有弹性、精细化、统一的信息化制造环境, 对提高企业生产效率、产品质量以及降低消耗具有重要的作用^[4-6].

选矿企业生产过程控制与管理的核心就是生产指标的优化问题. 选矿企业中的金属回收率、精矿品位等生产指标, 是计算产品生产能力、编制生产计划的基本依据, 它综合反映企业生产与管理的水平, 其水平的高低与企业的产品质量、生产效率、生产成本有密切的关系, 兼具生产和管理的双重意义.

然而, 作为流程工业之一的选矿, 同样存在管理决策层、计划调度执行层、过程控制层的信息阻断问题, 且人工凭经验调度不能及时准确地反映生产中原材料变化.

本文建立了在保证产品质量合格前提下总成本最小为目标和在保证合理精矿品位的前提下, 以减小精矿库存、最大限度地满足设备生产能力为目标的两阶段计划调度级联优化模型, 提出了选矿企业的强磁生产线与弱磁生产线日原矿处理量和精矿品位与尾矿品位的生产计划调度方法.

1 选矿生产线运行管理过程描述

1.1 选矿生产线简介

某选矿厂生产过程分为原矿生产、竖炉焙烧、磨矿与磁选、精矿生产和尾矿处理 5 个作业流程, 如图 1 所示.

来自原矿堆场的 N 种原矿量即为 $y_i(t)$ ($i = 1, \dots, N$). 经过原矿处理过程, 筛分出粉矿和块矿. 粉矿直接输送到磨矿过程, 磨成粒度合格的矿浆, 再经磁选过程的强磁选设备进行磁选处理成精矿和尾矿. 块矿输送到竖炉进行焙烧, 焙烧矿输送到磨矿过程研磨成粒度合格的矿浆, 再经磁选过程的弱磁选设备进行磁选处理成精矿和尾矿. 强磁精矿和弱磁精矿都进入精矿大井, 进行脱水浓缩处理后输送到精矿库.

1.2 生产过程管理

选矿厂通过生产计划部门、技术部门、调度室、作业区作业长等把企业综合计划的综合 (生产和经济) 指标分解至生产线指标. 生产计划部门、技术部门、调度室、作业区、作业长等完成计划、调度系统主要功能. 如图 2 所示.

公司生产管理部门将上层综合计划分解出的含综合指标的月计划 (主生产计划) 下达其选矿厂. 月计划中给出原矿处理量和质量、精矿产量和品位、金属回收率、能源消耗、成本等综合生产指标计划. 选矿厂生产管理部门接受公司下达月计划的指标, 编制选矿厂的周作业计划. 厂技术部门根据月质量计划和周质量计划给出原矿处理量、精矿品位等周综合生产指标优化值. 选矿厂调度室接受周计划, 并结合实际生产状况, 形成日/班作业生产计划. 目前, 针对选矿生产指标优化的研究, 大多针对具体的模型和算法, 缺乏对整个生产指标优化体系结构的研究. 总之, 现有研究的不足是没有运用系统工程理论实现整体优化.

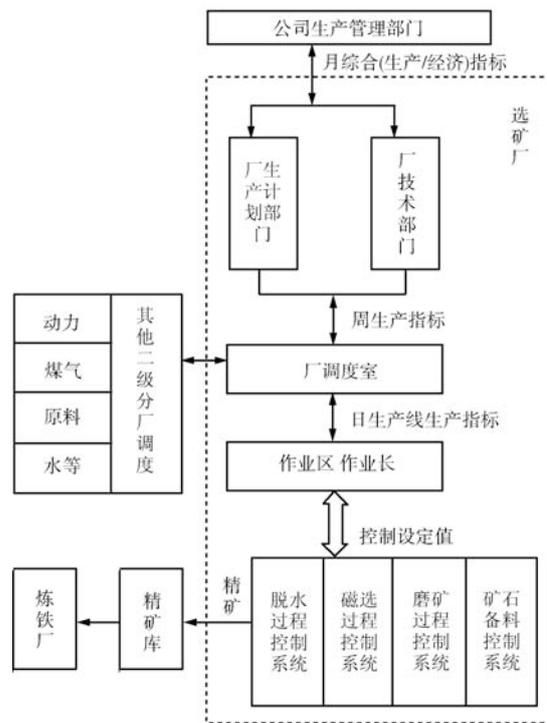


图 2 选矿综合生产指标计划调度模式

Fig. 2 Planning and scheduling mode of comprehensive production indices in mineral processing

2 实现综合生产指标优化的 MES 系统

2.1 MES 结构

生产管理系统是一个多层面、多侧面的复杂系

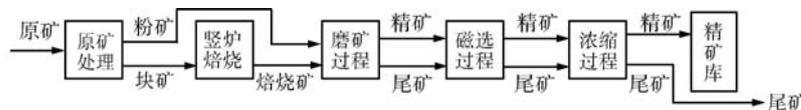


图 1 选矿生产工艺流程图

Fig. 1 Technological flow of mineral processing

统,具有层次性,由若干个子系统组成,并可以细分为更小的次子系统,实现递阶控制.生产管理系统是由既有纵向层次,又有横向关联的子系统构成的一个完善的矩阵构架模式的有机整体.生产管理系统是一个信息系统,信息是企业生产管理协调与控制的基础,企业应该正确、及时地收集、提供、传递、储存、分析与利用运作过程中的信息,以便合理有效地利用各种资源,提高生产效率和经济效益.因而生产管理又是一个集成性很强的系统.

针对上述生产系统的特性和选矿企业的特点,本文采用 ERP/MES/PCS 三层 CIMS 结构^[4],如图 3 所示.在文献 [5-7] 工作的基础上,研究了选矿计划、调度综合生产指标与控制器参数之间的关系及相应的控制模式.将上层企业综合计划的企业综合(生产和经济)指标通过 MES 层计划、调度分解为周生产指标和日生产线生产指标,建立指标间对应关系,实现整个调度体系纵向和横向集成.纵向集成主要保证计划分解过程中由上至下优化目标的一致性,和计划执行过程中由下至上反馈的实时性;横向集成主要实现整个生产线生产过程的均衡生产和物流、信息流的畅通.

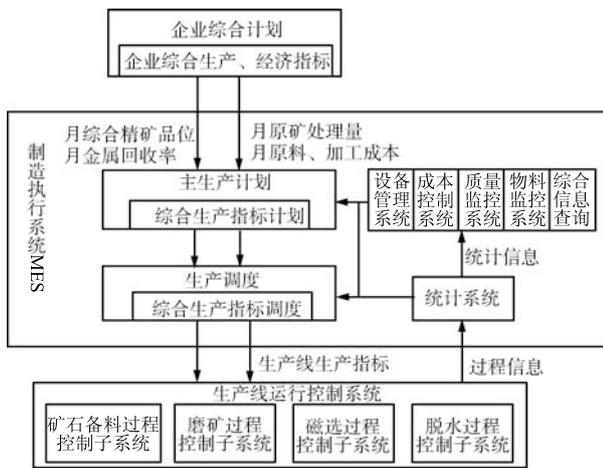


图 3 实现综合生产指标优化的 MES 结构

Fig. 3 MES structure for realizing the optimization of comprehensive production indices

2.2 优化策略

在流程工业 CIMS 体系结构中,每一级都具有信息、控制和对象几个要素,其也是一个广义的控制系统.因此,以过程控制体系的角度出发,建立对生产指标进行递阶分解控制的对应关系,并进一步运用系统工程理论进行整体优化,使局部的优化理论成果应用到具有整体性的 MES 框架中,并规定它们

在系统中的组织方式和协作方式.生产指标优化策略结构图如图 4 所示.

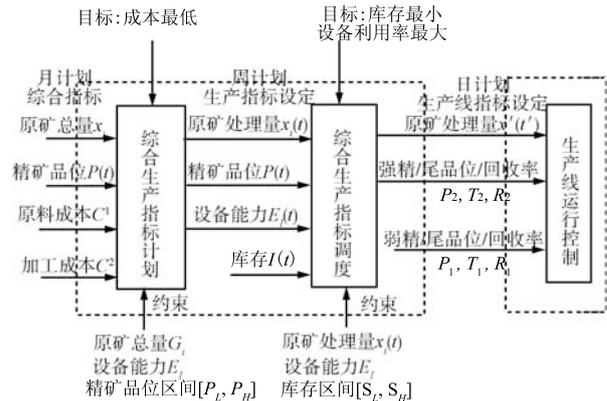


图 4 选矿综合生产指标优化策略

Fig. 4 Optimization strategy of comprehensive production indices in mineral processing

首先,生产计划的编制相当于给出一个设定值的作用,一个科学合理的计划的给出,要考虑多方面的约束,在这些约束下尽可能使目标值最优化.月计划是全月的生产目标,给月的生产指标提供了一个基准线,但每日的具体生产指标还需根据当时的实际情况进行调整.因为月计划周期长,而在实际生产中常常会出现影响生产的随机事件.因此,将计划指标时间尺度细化到“日”,就会将这类事件化为确定事件处理. MES 主要负责生产管理和调度执行,根据上级下达的生产计划,充分利用车间的各种生产资源、生产方法和丰富的实时现场信息,快速、低成本地制造出高质量的产品.目前, MES 仅仅实现了生产数据的集成,没有实现整个生产流程的关于产量、质量、成本、消耗等综合生产指标的优化控制^[8].因此,在确定了生产计划后,还不能用于指导生产,因为在计划制定中都有一些综合生产指标的时间跨度较大,一般为一个月,需要对生产计划进行分解:一方面是时间上的分解,就是把综合计划分为月生产计划、周生产计划、日作业计划等;另一方面是空间上的分解,就是把总体的生产计划逐次分到各个车间、各个工段,使它们的任务具体化.生产调度的优化策略的局部优化完成后,安排具体的机器进行生产.本系统的优化策略是:计划模型将月计划分解为综合生产指标优化的周计划,调度模型将周计划分解为综合生产指标优化的日计划.

由于 MES 是以计划调度为主线、成本控制为核心,来实现生产指标优化的目标,所以综合指标优化计划模型的目标是以成本最小为目标,将月综合生产指标转化为周综合生产指标^[9];而调度性能指标可以是成本最低、库存费用最少、设备利用率最

高等, 所以综合生产指标优化调度模型的目标是实现库存最小和设备利用率最大, 将周综合生产指标转化为日生产线生产指标^[10]. 将生产线指标转化为生产线运行控制设定值, 进行选矿生产.

3 面向生产指标优化的两级计划调度方法

本文需要分别实现综合生产指标计划、综合生产指标调度两个阶段的不同优化目标. 因而需要两阶段模型完成.

3.1 面向综合生产指标优化的计划方法

第一阶段根据月计划下达的各种原矿总量、精矿的合格品位、原料成本和加工成本等指标, 确定每周的原矿处理量, 保证选矿成本和精矿废品惩罚为最小优化目标模型.

3.1.1 面向综合生产指标优化的计划模型

综合生产指标优化的计划模型的目标函数为

$$\min f(x) = \sum_{t=1}^T \left[\left(u[P_L - P(t)]^+ + v[P(t) - P_H]^+ \right) \times \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 \left(\frac{\mu_{il}}{\sigma_{il}} \right) x_i(t) \right] + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (C_i^1 + C_i^2) x_i(t)$$

目标函数 (1) 中的第一项是精矿废品惩罚费用, 即希望精矿产品的品位在 $[P_L, P_H]$, 当铁精矿的实际品位低于 P_L 或高于 P_H 时, 单位惩罚分别为 u 和 v . 第二项是原矿原料成本和加工成本费用. 其中, i 代表所有矿石的种类, l 为块矿和粉矿 ($l = 1, 2$), μ_{il} 为第 i 种矿石第 l 类 (粉或块) 矿的比例, σ_{il} 为精矿倍选比, t 为计划期, C_i^1 为单位原矿的原料成本, C_i^2 为位加工成本, $[P_L, P_H]$ 为合格铁精矿的金属品位区间, 决策变量 $x_i(t)$ 代表第 i 种原矿在时间 t 的处理量. $P(t)$ 为精矿品位, 如式 (2) 所示:

$$P(t) = \frac{\sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^N (\mu_{il} \rho_{il} \eta_{il}) x_i(t)}{\sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu_{il}}{\sigma_{il}} x_i(t) \right)} \quad (1)$$

其中, η_{il} 为第 i 种矿石粉矿或块矿的金属回收率; ρ_{il} 为第 i 种矿石第 l 类 (粉或块) 矿的铁金属含量.

约束如下:

每种原矿在一个计划期内 (月) 总量限制由式 (3) 给出.

$$\sum_{t=1}^T x_i(t) \leq G_i, \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

其中, G_i 为第 i 种矿石的总量. 设备在一个计划期内 (月) 生产能力限制由式 (4) 给出.

$$\sum_{i=1}^N \mu_{il} x_i(t) \leq E_l(t), \quad l = 1, 2; \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

其中, $E_l(t)$ 为 t 时段用于磁选的粉矿和块矿的设备额定生产能力. 合格铁精矿品位限制由式 (5) 给出.

$$P_L \leq P(t) \leq P_H, \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (4)$$

处理矿石的重量为非负数:

$$x_i(t) \geq 0, \quad i = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

3.1.2 改进的粒子群算法计划优化方法

采用智能搜索算法是先有可行性的加工顺序, 然后确定每个操作的开工时间, 并对这个顺序进行优化. 智能搜索算法在生产调度领域得到了广泛的应用, 其主要特征是临近搜索, 在探索解空间时, 仅对选定的成本函数值的变化做出响应, 因而通用性强. 基本粒子群优化算法 (Particle swarm optimization, PSO) 可以表示为

$$v_{id}^{k+1} = w v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (6)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (7)$$

其中, w 为惯性权重, x_{id} 为粒子经历的位置, v_{id} 为粒子飞行的速度, p_{id} 为粒子自身经历的最好位置, p_{gd} 为群体所有粒子经历的最好位置, c_1, c_2 为加速常数, r_1, r_2 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机数. 式 (7) 的第一项为粒子先前的速度, 第二项为“认知”部分, 表示粒子本身的思考, 第三项为“社会”部分, 表示粒子间的信息共享与相互合作. 粒子群算法初始化为一组随机粒子, 然后通过迭代寻找最优解. 粒子追随两个当前最优值来更新自己的位置, 一个是粒子迄今为止找到的个体极值 p_{id} , 另外一个是整个粒子群迄今为止找到的全局极值 p_{gd} .

选矿生产计划优化模型属于决策变量为实数有界的非线性优化问题, 由于 PSO 算法具有深刻的智能背景, 可直接采用实数编码形式搜索解空间, 对优化函数无任何连续可微要求. 本文结合问题特点, 设计了用于求解该模型改进的 PSO 算法.

基本改进思想是: 由于惯性权重对算法的优化性能的影响, 较大的值有利于提高算法的收敛速度, 而较小时则有利于提高算法的收敛精度, 因此, 根据微粒对约束的满足程度和搜索状态动态调整惯性权重, 使得算法限制不可行解影响的同时, 逐步提高搜索的精度和效率. 改进 PSO 算法流程如下:

步骤 1. 初始化参数配置表: 微粒数量、惯性权重、加速常数、最大速度/最大运行代数; 在 $[0, G_i]$ 范围内随机产生微粒的位置, 速度为 $0.1G_i$, 最大速度为 $0.2G_i$.

步骤 2. 为限制不可行解, 引入自适应权重调整因子, 定义 ω_1 和 ω_2 代表各约束的违反系数.

$$\omega_1 = \max_i \left\{ \frac{\sum_{t=1}^T x_i(t) - G_i}{\sum_{t=1}^T x_i(t)}, 0 \right\} \quad (8)$$

$$\omega_2 = \max_{(l,t)} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{il} x_i(t) - E_l(t)}{\sum_{i=1}^N \mu_{il} x_i(t)}, 0 \right\} \quad (9)$$

$$\omega = 1 - \max\{\omega_1, \omega_2\} \quad (10)$$

其中, ω 代表约束 (3) 和 (4) 违反状态下的惯性调整因子. 显然, 约束违反系数越大, 惯性调整因子 ω 值越小, 微粒迭代的继承信息越少. 此外, 还要根据搜索状态对第 k 代的惯性权重 $W(k)$ 进行自适应调整, 即随着迭代的深入, 逐步减小 $W(k)$ 的值. 设 k 为当前迭代次数, $w(k)$ 为自适应惯性调整因子, 则:

$$w(k) = \begin{cases} \frac{2}{1 + e^{\frac{k}{\sigma_{\max}}}}, & \omega \geq \sigma, \sigma \in (0, 1) \\ 1, & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

综上所述, 基于约束满足程度和搜索状态的自适应惯性权重如式 (13):

$$W(k) = W_0 \times \omega \times w(k) \quad (12)$$

其中, W_0 为惯性变量基值.

步骤 3. 评价每个微粒的适应度 $eval(x)$, 选择形式如式 (14):

$$eval(x) = P_0 - f(x) \times p(x) \quad (13)$$

其中

$$p(x) = \frac{(\omega_1 + \omega_2 + 2)}{2}$$

步骤 4. 对于每个微粒, 将其适应度与经历过的最好位置 P_{id}^{best} 做比较; 如果较好, 则将其作为当前的最好位置;

步骤 5. 对于每个微粒, 将其适应度与全局所经历过的最好位置 g_{id}^{best} 做比较; 如果较好, 则重新设置 g_{id}^{best} 索引号;

步骤 6. 粒子速度和位置调整式如式 (15) 和式 (16), 根据公式调整微粒的速度和位置.

$$v_{id}^{k+1} = W(k)v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (14)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (15)$$

步骤 7. 根据最大代数判断是否达到算法终止条件, 如未满足则返回步骤 2.

步骤 8. 当最终结果不一定满足约束条件时, 采用如下策略进行修复:

1) 若不满足约束条件 (3) 或 (4), 按各原矿的单位金属量消耗成本 η_i 从大到小依次降低原矿的投入量, 直到满足约束条件为止. 其中:

$$\eta_i = \frac{(C_i^1 + C_i^2)}{\sum_{l=1}^2 (\mu_{il} \rho_{il} \eta_{il})} \quad (16)$$

2) 若不满足约束条件 (5), 按各原矿的单位精矿量的消耗成本 η'_i 从小到大依次增加原矿的投入量. 其中:

$$\eta'_i = \frac{(C_i^1 + C_i^2)}{\sum_{l=1}^2 \left(\frac{\mu_{il}}{\sigma_{il}} \right) x_i(t)} \quad (17)$$

求得每周的精矿品位 $P(t)$ 及此时所对应的原矿处理量 $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)$ 作为调度综合生产指标优化模型的输入.

3.2 面向生产线的综合生产指标优化的调度方法

根据上一阶段计算的周原矿处理量、强磁精矿品位和弱磁精矿品位的优化值、周计划给出的每天满足炼铁工序需要的铁精矿量、精矿的期初库存及精矿库存量的限制范围、弱磁球磨机与强磁球磨机的台时处理量等, 确定各种原矿的处理量及磁选过程的弱磁精矿品位和强磁精矿品位, 保证设备能力充分发挥, 保证精矿的库存尽量接近库存下限, 建立调度综合生产指标优化的多目标模型.

3.2.1 面向生产线的综合生产指标优化的调度模型

面向综合生产指标优化的多目标调度模型为

$$\min f_1(x) = \max_{t=1,2,\dots,T} \left\{ 1 - \frac{S_H - I(t')}{S_H - S_L} \right\} \quad (18)$$

$$\max f_2(x) = \min_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \frac{\sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^N \mu_{il} x'_i(t')}{E_l(t)} \right\} \quad (19)$$

模型中第一目标函数 (19) 表示精矿库存最小化. 即在满足最低精矿库存量下限的前提下, 尽量使精矿库存量 $I(t')$ 接近 S_L . 第二目标函数 (20) 表示在满足设备生产能力的前提下, 使设备额定生产能力最大化. 其中: t' 为计划期内的时间段 (此时为日, $t' = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$); $[S_L, S_H]$ 表示每日铁精矿库存区间.

决策变量 $x'_i(t')$ 代表第 i 种原矿在其时间段内 (每天) 的生产量. $I(t')$ 为精矿库的即时库存量, 由式 (21) 表示.

$$I(t') = I(0) + \sum_{t'=1}^{T'} \sum_{i=1}^N x'_i(t') \sum_{l=1}^2 \left(\frac{\mu_{il}}{\sigma_{il}} \right) - \sum_{t'=1}^{T'} M, \quad t' = 1, \dots, 7 \quad (20)$$

其中, M 为每天炼铁所需的精矿量, $I(0)$ 为精矿库的期初库存.

约束如下:

每种原矿在一个计划期内 (周) 总量限制如式 (22) 所示.

$$\sum_{t'=1}^{T'} x'_i(t') \leq x_i(t), \quad t' = 1, \dots, T' \quad (21)$$

设备能力限制如式 (23) 所示.

$$\sum_{i=1}^N \mu_{il} x'_i(t') \leq E_l(t), \quad l = 1, 2, \quad t' = 1, \dots, T' \quad (22)$$

各时段内保证综合铁精矿库存量限制如式 (24) 所示.

$$S_L \leq I(t') \leq S_H, \quad t' = 1, \dots, T' \quad (23)$$

保证一周之内综合铁精矿品位平均值等于给定的周综合铁精矿品位计划值, 如式 (25) 所示.

$$\frac{\sum_{t'=1}^{T'} P(t')}{T'} = P, \quad t' = 1, \dots, T' \quad (24)$$

处理矿石的重量、计划期精矿库存为非负数.

$$\begin{aligned} x'_i(t') &\geq 0, \quad i = 1, \dots, N; \quad t' = 1, \dots, T' \\ I(0) &= S_0, \quad I(t') \geq S_L \end{aligned} \quad (25)$$

日弱磁精矿、强磁精矿和日综合精矿品位 $P_1(t')$, $P_2(t')$, $P(t')$ 的表达式如下:

$$P_1(t') = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i1} \rho_{i1} \eta_{i1}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu_{i1}}{\sigma_{i1}} \right) x'_i(t')}$$

$$P_2(t') = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i2} \rho_{i2} \eta_{i2}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\mu_{i2}}{\sigma_{i2}} \right) x'_i(t')}$$

$$P(t') = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 (\mu_{il} \rho_{il} \eta_{il}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 \left(\frac{\mu_{il}}{\sigma_{il}} \right) x'_i(t')}$$

$T_1(t')$, $T_2(t')$, $T(t')$ 分别代表日弱磁尾矿、强磁尾矿、日综合尾矿品位, 表达式如下:

$$T_1(t') = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i1} \rho_{i1}) x'_i(t') - \sum_{i=1}^N (\mu_{i1} \rho_{i1} \eta_{i1}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{1}{\sigma_{i1}} \right) x'_i(t')}$$

$$T_2(t') = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i2} \rho_{i2}) x'_i(t') - \sum_{i=1}^N (\mu_{i2} \rho_{i2} \eta_{i2}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{1}{\sigma_{i2}} \right) x'_i(t')}$$

$$T(t') = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 (\mu_{il} \sigma_{il}) x'_i(t') - \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 (\mu_{il} \sigma_{il} \eta_{il}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 \left(1 - \frac{1}{\sigma_{il}} \right) x'_i(t')}$$

$R_1(t')$, $R_2(t')$, $R(t)$ 分别代表弱磁、强磁、总金属回收率, 表达式如下:

$$R_1(t') = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i1}\rho_{i1}\eta_{i1}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N (\mu_{i1}\rho_{i1}) x'_i(t')} \quad \min f(x) = \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) \quad (30)$$

$$R_2(t') = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{i2}\rho_{i2}\eta_{i2}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N (\mu_{i2}\rho_{i2}) x'_i(t')}$$

$$R(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 (\mu_{il}\rho_{il}\eta_{il}) x'_i(t')}{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 (\mu_{il}\rho_{il}) x'_i(t')}$$

3.2.2 基于多目标调度模型求解方法

线性规划是运筹学的一个重要的分支,理论上较完善,实际应用也很广泛.由于有成熟的计算机应用软件的支持,采用线性规划模型安排生产几乎不是一件困难的事情.线性规划模型用在原材料单一、生产过程稳定不变、分解型生产类型的企业十分有效.

由于模型的目标函数包含非线性项,下面对其线性化处理,通过模型的转换使其变为线性.对于求解多目标优化模型有多种方法,但是要求目标的同时实现最优往往是很难的,不同思路可引发不同的处理得失的合理方法.本文采用了实际中使用较多的线性加权法和法.存在定理:如果 x^* 是加权问题的唯一解(最优解),则 x^* 为多目标问题的非劣解.按照线性加权,引入变量 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 令

$$\min f(x) = \lambda_1 \max_{t=1, \dots, T} \left\{ 1 - \frac{S_H - I(t')}{S_H - S_L} \right\} + \lambda_2 \max_{t=1, \dots, T} \left\{ 1 - \frac{\sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^N \mu_{il} x'_i(t')}{E_l(t)} \right\} \quad (26)$$

$$1 - \frac{S_H - I(t')}{S_H - S_L} \leq f_1(x), t' = 1, \dots, T' \quad (27)$$

$$1 - \frac{\sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^N \mu_{il} x'_i(t')}{E_l(t)} \leq f_2(x), t' = 1, \dots, T' \quad (28)$$

$$0 \leq f_1(x) \leq 1, \quad 0 \leq f_2(x) \leq 1 \quad (29)$$

最终,模型的目标函数转化为

求解步骤如下:

步骤 1. 根据库存量需求和生产能力构造模型(27)及目标函数(31),以及 λ_1, λ_2 的值;

步骤 2. 使用通用的线性规划软件,计算出 $f_1(x), f_2(x)$ 的目标函数值;

步骤 3. 由式(19)、(20)和(22),计算出在每个作业计划时段的原矿计划处理量;

步骤 4. 利用不同的 λ_1, λ_2 求解模型.

求得日原矿处理量 $x'_1(t'), x'_2(t'), x'_3(t'), x'_4(t')$; 强磁选精矿品位、弱磁选精矿品位、综合精矿品位 $P_1(t'), P_2(t'), P(t')$; 精矿库存 $I(t')$; 设备处理能力 $f_2(x)$; 弱磁尾矿、强磁尾矿和尾矿品位 $T_1(t'), T_2(t'), T(t')$; 金属回收率 $R_1(t'), R_2(t'), R(t)$.

4 应用研究

4.1 应用对象描述

结合某钢铁公司选矿厂生产的实际,采用图3的体系结构.在原有平台的基础上,增加了综合生产指标的优化功能,建立了实现生产指标优化的选矿MES系统.该系统包括综合生产指标优化系统、质量管理、能源管理、成本控制、设备管理、统计与分析、综合查询等子系统.

某选矿厂在计划期 T 内,对4种原矿进行磁选,一个月的原矿总量为 G_i ,原矿的原料成本和加工成本为 C_i^1 和 C_i^2 ,强、弱磁球磨机台时处理量分别为65、75吨/台时,精矿品位稳定在 $[P_L, P_H]$ (52.20 ~ 54.20) 范围内,每天满足炼铁工序需要的铁精矿量 M ,精矿的期初库存 $I(0)$ 及精矿库存量的限制范围 $[S_L, S_H]$,炼铁每天需要的精矿量一般在6000吨左右,生产组织方式为:若设备能力及精矿需求量在计划期 $[1, 2]$ 范围内,则选8系列运行,也就是4台弱磁球磨机和4台强磁球磨机运行;若设备及精矿需求量在计划期 $[3, 4]$ 范围内,则选6系列运行,也就是3台弱磁球磨机和3台强磁球磨机运行.弱磁球磨机与强磁球磨机的台时处理量分别为 E_1, E_2 .其他边界条件 $\mu_{il}, \rho_{il}, \eta_{il}, \sigma_{il}$ 见表1.表2给出球磨台时处理量及其他参数,数据来自月生产计划、金属平衡表及调度日报等.

表1 月原矿综合指标和原矿总量

Table 1 Monthly raw ores comprehensive indices and raw ores total amount

边界条件	镜铁矿	大堆粉矿	黑鹰山粉矿	低品位黑鹰山粉矿
μ_{i1}	64%	0%	0%	0%
μ_{i2}	36%	100%	100%	40%
ρ_{i1}	34%	0%	0%	48.5%
ρ_{i2}	31%	28%	48%	47.25%
η_{i1}	79.55	66.13	78.3	84.8
η_{i2}	66.13	66.13	78.3	84.4
G_i	374 206	22 540	5 880	6 160

表2 已知设备能力和精矿需求参数表

Table 2 Equipment capacities and concentrate demand parameters which are known

T	弱磁球磨机 $E_1(t/h)$	强磁球磨机 $E_2(t/h)$	期望精矿品位 $P(t)$
1	75	65	0.52~0.542
2	75	65	0.52~0.542
3	75	65	0.52~0.542
4	75	65	0.52~0.542

4.2 优化方法参数选择与应用方法实现

首先, 利用综合生产指标优化模型的 PSO 算法, 采用 C++ 语言编写, 运用于 Windows 2000 操作系统的 PentiumIII (1G/128M) PC 机上. 算法参数设置: 微粒群规模 $M = 20$, 最大迭代数 $MaxIter = 100$, 最大速度 $Vel_{max} = 0.02$, 惯性权重基值为 1, $c_1 = c_2 = 2.0$, 采用以上参数值来控制算法. 本文算法优化效果明显, 在 M 的各种取值下, 算法在迭代 100 次以内就能很好地收敛. 与此同时, 在同样的仿真条件下运用同样的适应度函数比较 GA 和 PSO, 结果如图 5 所示, GA 的收敛速度相对较慢, 而且容易陷入局部极小, PSO 收敛速度快, 全局收敛性和收敛精度相对要好.

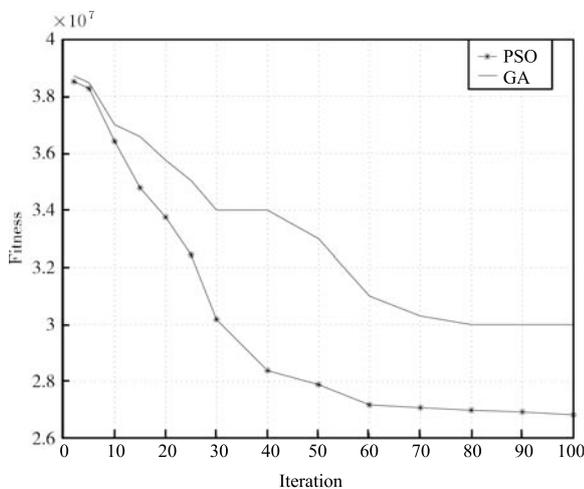


图5 GA 与 PSO 是适应度收敛趋势

Fig.5 Tendencies of GA and PSO simulations

表3 得出不同计划期内(周)原矿投入量和铁精矿品位等指标. 通过表3的结果可以看出, 采取上述改进的 PSO 方法计算的结果能在满足设备能力限制的条件下合理分配各时段的原矿处理量, 最终使得精矿品位接近决策者设定的期望范围, 各时段内设备能力负荷均衡.

表3 每周不同原矿投入量时精矿各品位

Table 3 Weekly input amount of raw ores and concentrate grade

T	$x_i(t)$				$P(t)$		
	镜铁矿	大堆粉矿	黑鹰山粉矿	低品位黑矿	$P_1(t)$	$P_2(t)$	$P(t)$
1	46 775.5	2 817.5	2 817.5	735	0.5686	0.4817	0.5385
2	46 775.5	2 817.5	735	2 053	0.5696	0.4760	0.5401
3	46 775.5	2 817.5	735	770	0.5686	0.4720	0.5382
4	46 775.5	2 817.5	735	770	0.5686	0.4720	0.5382

利用第一阶段得出的 4 周的周计划, 再根据生产实际及经验判断, 选择 4 周中最合理的 1 周指标优化值, 作为第二阶段综合指标调度优化模型和算法的输入, 同时 λ_1, λ_2 分别取不同的值, 求得日综合生产指标优化值. 通过模型验证, 当 λ_1, λ_2 均取 0.5 时为最佳值, 如表 4 所示. 它满足库存平衡偏差最小和设备生产能力最大化的目标, 合理分配了每天的各种原矿处理量及磁选的强/弱精矿品位生产系统的日生产指标.

表4 模型计算结果

Table 4 Model results

λ_1	λ_2	$f_1(x)$	$f_2(x)$	Point
0.1	0.9	0.3993	0.2418	A
0.3	0.7	0.3993	0.2418	B
0.5	0.5	0.3993	0.2418	C
0.6	0.4	-2.4652E-032	0.7469	D
0.8	0.2	-2.4652E-032	50.3674	E
0.9	0.1	0	0.7469	F

4.3 应用效果

表5 给出了通过上述日指标优化模型计算点 C 作业计划期内 (7 days) 每天的原矿处理量、强/弱磁选过程的精矿品位、设备能力和库存等结果. 将所得的各种原矿处理量下达给原料工序, 强/弱精矿品位值送给磁选优化控制系统, 进行选矿生产, 设备运转率提高 2.98%, 精矿品位提高 0.57%, 金属回收率提高 2.01%, 操作人员减少 50%, 消耗减少 20%. 提高了生产设备的运行能力, 实现了精矿品位、原矿处理量、金属回收率和生产成本的目标.

表 5 每日原矿投入量 $x'_i(t')$ 和精矿品位
Table 5 Daily input amount of raw ores and concentrate grade

T	原矿生产线指标		弱磁选生产线指标				强磁选生产线指标				综合结果				
	日	镜铁 矿	大堆 粉矿	黑鹰山 粉矿	低品位 黑矿	弱磁精 矿品位	弱磁尾 矿品位	弱磁金属 回收率	强磁精 矿品位	强磁尾 矿品位	强磁金属 回收率	综精矿 品位	综尾矿 品位	金属回 收率	精矿 库存
	$x'_1(t')$	$x'_2(t')$	$x'_3(t')$	$x'_4(t')$	$P_1(t')$	$T_1(t')$	$R_1(t')$	$P_2(t')$	$T_2(t')$	$R_2(t')$	$P(t')$	$T(t')$	$R(t')$	$I(t')$	$1-f_2(x)$
1	5 331	779.9	257.92	0	0.5680	0.1327	0.7955	0.4697	0.1883	0.6773	0.5298	0.1573	0.7428	6 996	76%
2	7 031	425.8	0	0	0.5680	0.1327	0.7955	0.4649	0.1795	0.6681	0.5368	0.1577	0.7360	6 996	76%
3	7 031	117.4	308.41	0	0.5680	0.1327	0.7955	0.4813	0.2039	0.6636	0.5416	0.1658	0.7345	6 996	76%
4	7 031	425.8	0	0	0.5680	0.1327	0.7955	0.4649	0.1795	0.6681	0.5368	0.1577	0.7360	6 996	76%
5	6 656	410	0	377.27	0.5700	0.1378	0.7964	0.4740	0.1880	0.6696	0.5407	0.1638	0.7379	6 996	76%
6	6 684	402.7	0	370.24	0.5700	0.1377	0.7964	0.4739	0.1880	0.6694	0.5407	0.1638	0.7378	6 996	76%
7	7 010	255.8	168.67	22.49	0.5681	0.1330	0.7956	0.4746	0.1931	0.6657	0.5397	0.1624	0.7353	6 996	76%
综合	46 776	2 817.5	735	770	0.5686	0.1342	0.7958	0.4720	0.1885	0.6688	0.5382	0.1613	0.7371	6 996	76%

1) 考虑到某选矿厂是一个联合企业, 它的精矿品位不是越高越好, 而是在一个稳定的范围 (52.5% ~ 53.5%), 大于 54.2% 为高废, 小于 52.2% 为低废, 且它的品位变化区间又很小, 所以在第二阶段没有把精矿品位作为模型的目标, 而是作为模型的约束.

2) 第二阶段模型中的原矿量、精矿需求量、库存限制以及设备能力之间存在潜在的关系, 如: 精矿需求量过大时, 库存量势必变小, 如果取值不合理, 会造成 u 值为 0.

3) 在该模型中需要的一些如选矿比、块矿率、金属收率等的边界条件, 它们的取值有些来自现场的经验, 因而需要在案例库中选取合理值. 通过上面的模型可以得出原矿处理量和强、弱精矿产量, 设备运时, 强、弱精矿品位等, 将这些指标值作为工艺指标优化系统的输入.

5 结论

采用面向生产指标逐层优化分解的方法, 对选矿 MES 进行研究, 将两阶段递阶级联计划调度模型嵌入 MES 系统进行集成. 首先进行全流程优化 (企业综合计划), 利用全流程优化的结果指导局部指标的优化 (综合生产指标优化计划模型), 利用局部优化的结果指导点的优化 (综合生产指标优化调

度), 可以得到大系统的总体优化, 实现了选矿生产过程优化控制、优化运行和优化管理, 真正实现了管理和控制一体化. 该方法结合综合自动化信息系统工程, 成功地应用于赤铁矿厂, 实现了选矿生产过程的优化运行和优化管理, 最终使得金属回收率提高 2.01%, 精矿品位提高 0.57%, 操作人员减少 50%, 消耗减少 20%, 设备运转率提高 2.98%, 提高了企业管理的科学水平和经济效益.

References

- 1 Nakamura M. Effect and develop of MES. *Chemistry Equipment*, 2000, **42**(1): 93-101
- 2 Kumagai Y. Framework of MES. *Chemistry Equipment*, 1999, **41**(1): 62-65
- 3 Nagalingam S V, Lin G C I. Latest developments in CIM. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 1999, **15**(6): 423-430
- 4 Chai Tian-You, Jin Yi-Hui, Ren De-Xiang, Shao Hui-He, Qian Ji-Xin, Li Ping, Gui Wei-Hua, Zheng Bing-Lin. Contemporary integrated manufacturing system based on three-layer structure in process industry. *Control Engineering of China*, 2002, **9**(3): 1-6
(柴天佑, 金以慧, 任德祥, 邵惠鹤, 钱积新, 李平, 桂卫华, 郑秉霖. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统. *控制工程*, 2002, **9**(3): 1-6)

- 5 Chai Tian-You, Zheng Bing-Lin, Hu Yi, Huang Xiao-Ling. Current research situation and development of manufacturing execution systems. *Control Engineering of China*, 2005, **11**(12): 1–6
(柴天佑, 郑秉霖, 胡毅, 黄肖玲. 制造执行系统的研究现状和发展趋势. 控制工程, 2005, **11**(12): 1–6)
- 6 Huang Xiao-Ling, Chu Yan-Gang, Li Hui-Ying, Chai Tian-You. Study and application of ore concentration manufacturing execution system. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2004, **10** (9): 1079–1083
(黄肖玲, 初延刚, 李慧莹, 柴天佑. 选矿制造执行系统的研究与应用. 计算机集成制造系统, 2004, **10** (9): 1079–1083)
- 7 Huang Xiao-Ling, Chai Tian-You. Particle swarm optimization for raw material purchasing plan in large scale ore dressing plant. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(5): 632–636
(黄肖玲, 柴天佑. 粒子群优化算法在大型选矿企业原料采购计划中的应用. 自动化学报, 2009, **35**(5): 632–636)
- 8 Chai Tian-You. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35** (6): 641–649
(柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. 自动化学报, 2009, **35** (6): 641–649)
- 9 Huang X L, Xue J S, Dong L J. The modeling and application of ore dressing cost predication based on neural network. *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer-Verlag. 2005. 939–946
- 10 Huang Xiao-Ling, Ding Jin-Liang, Chai Tian-You. Study of scheduling based on production indices optimization for mineral processing. *Journal of Systems Engineering*, 2006, **21**(2): 136–142
(黄肖玲, 丁进良, 柴天佑. 面向生产指标优化的选矿过程调度研究. 系统工程学报, 2006, **21**(2): 136–142)



黄肖玲 博士, 大连海事大学交通运输管理学院教授. 主要研究方向为流程工业制造执行系统、生产计划与调度、物流工程与管理、智能优化方法. 本文通信作者.

E-mail: huangxiaoling@mail.dlmu.edu.cn

(HUANG Xiao-Ling Ph.D., professor at the College of Transportation Management, Dalian Maritime University. Her research interest covers manufacturing execution system, production planning and scheduling, logistics engineering and management, and evolutionary computation and applications. Corresponding author of this paper.)



柴天佑 中国工程院院士, 东北大学教授. IEEE Fellow, IFAC Fellow, 欧亚科学院院士. 1985 年获得东北大学博士学位, 主要研究方向为自适应控制、智能解耦控制、流程工业综合自动化理论、方法与技术.

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

(CHAI Tian-You Academician of Chinese Engineering Academy and professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow, academician of the International Eurasian Academy of Sciences. He received his Ph.D. degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent control, and integrated automation of industrial process.)