

## 铝液配载问题建模及混合遗传算法优化

李建华<sup>1</sup>, 魏 星<sup>1</sup>, 芮执元<sup>1,2</sup>, 王晓东<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学机电工程学院, 兰州 730050; 2. 有色冶金新装备教育部工程研究中心, 兰州 730050; 3. 中国铝业股份有限公司兰州分公司, 兰州 730060)

**摘 要:** 针对电解铝生产过程中电解槽调配及出铝调度问题, 在建立数学模型分析基础上, 设计一种混合策略优化算法. 通过引入人工经验排出特例, 利用遗传算法完成优化. 以出铝路径为优化适应度函数, 利用交叉算子调配电解槽铝液组合, 利用变异算子改变槽装车路线. 最后通过某铝厂电解槽3组数据优化实例表明了所提出方法的有效性.

**关键词:** 配铝; 遗传算法; 工艺调度

**中图分类号:** TP278

**文献标志码:** A

## Blending and loading problem of molten aluminum and hybrid genetic algorithm optimization

LI Jian-hua<sup>1</sup>, WEI Xing<sup>1</sup>, RUI Zhi-yuan<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-dong<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Engineering Research Center of Nonferrous Metallurgy's New Equipment, Ministry of Education, Lanzhou 730050, China; 3. Aluminum Corporation of China Limited Lanzhou Branch, Lanzhou 730060, China. Correspondent: RUI Zhi-yuan, E-mail: zhiy\_rui@163.com)

**Abstract:** A hybrid optimization strategy genetic algorithm is put forward to solve the problem of blending electrolyzer and aluminum scheduling in the electrolytic aluminum production process based on the mathematical model analysis. Artificial experience is used in order to rule out special case. The fitness function is optimized by the path of aluminum scheduling. The crossover operators are designed to implement the transformation of electrolyzer combination and the mutation operators are designed to change the route of loading. The effectiveness for the proposed method is demonstrated by 3 optimization examples of electrolyzer from a northwest aluminum plant of China.

**Key words:** blending electrolyzer; genetic algorithm; process scheduling

### 0 引 言

电解槽配铝是电解铝生产关键工艺之一. 电解槽生产过程中, 由于每个电解槽工况不同, 其生产出的铝液化验成分各不相同. 化验成分涉及到铁、硅、镁、铜、钙、锌等, 这些杂质成分决定了生产出铝的纯度. 配铝工艺是根据每台电解槽的化验数据, 将多台电解槽铝液按照生产出铝重量进行配铝, 使融合在一起的多台电解槽铝液的最终成分满足生产工艺化学成分要求, 即铁、硅、镁、铜、钙、锌等杂质含量不能高于指定值. 现实生产中, 配铝工艺过程非常复杂, 配铝工艺规划与出铝抬包调度存在相关性, 配铝既要考虑到配铝后的工艺成分要求, 又要考虑出铝的轨迹路径问

题, 使出铝抬包尽可能在临近的电解槽出铝, 因此电解铝配铝问题是一个多约束条件下的工艺调度优化问题, 计算困难<sup>[1-3]</sup>.

目前, 配铝基本采用人工配铝, 费时费力且容易出错. 对此, 文献[4]在没有考虑调度情况下对原铝铸造优化算法进行了研究. 文献[5]按照每两个电解槽合成一个抬包对配铝过程的多约束优化进行了研究, 以Fe、Si含量及出铝路径对应权值形成优化目标对配铝调度进行优化. 但是, 实际配铝与调度更加复杂<sup>[6]</sup>: 现场化验数据复杂, 不仅仅只处理Fe、Si两种杂质; 铝槽工况复杂, 往往存在化验数据非常好不需要配比调度, 或者存在大的杂质化验数据无法自动配

收稿日期: 2012-12-25; 修回日期: 2013-05-16.

基金项目: 国家国际科技合作项目(2011DFR70670); 教育部创新团队项目(IRT1140); 甘肃省科技支撑计划项目(1011 GKCA007).

作者简介: 李建华(1975—), 男, 副教授, 博士, 从事计算机集成制造的研究; 芮执元(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 从事数字化设计及制造等研究.

比调度;现场调度过程复杂,合成拾包的电解槽的数量在小于等于3的条件下变化.因此,在针对多化验元素要求建立数学模型分析基础上,本文设计了一种混合策略优化算法.首先引入人工经验排出特例,利用遗传算法<sup>[7-9]</sup>完成多约束优化;然后以出铝路径为优化适应度函数,设计交叉算子调配电解槽铝液组合,设计变异算子改变槽装车路线;最后通过某铝厂电解槽3组优化实例表明了所提出方法的有效性.

## 1 配铝工艺规划与调度集成建模

电解槽按顺序排放,如图1所示.配载问题包括配和载.生产中每3个电解槽的铝液配成一个拾包,在拾包中的铝液满足工艺化验标准前提下,决策出电解槽拾包装载方案使铝液出铝路程最短.

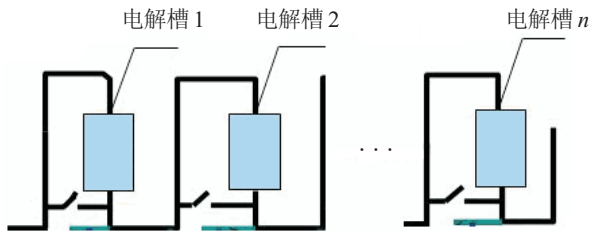


图1 电解槽排放方式示意

**定义1** 设 $n$ 个出铝电解槽集合为

$$N = \{N_1, \dots, N_i, \dots, N_n\}, \quad (1)$$

其中 $n$ 为出铝槽数.

**定义2** 设铝液调配工艺标准集合为

$$\{M_1, \dots, M_i, \dots, M_m, M_{m+1}\}. \quad (2)$$

其中: $m$ 为工艺要求化验元素个数, $M_i$ 为第 $i$ 种元素的最大含量( $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ), $M_{m+1}$ 为铝液中 $m$ 种元素含量总和的最大值.

**定义3** 设 $n$ 个槽出铝重量集合为

$$\{W_1, W_2, \dots, W_n\}, \quad (3)$$

其中 $n$ 为出铝槽数.

**定义4**

$$\{P_{i1}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{im}, P_{i(m+1)}\}. \quad (4)$$

其中: $P_{ij}$ 为第 $i$ 个电解槽第 $j$ 种元素的含量, $P_{i(m+1)}$ 为第 $i$ 个电解槽 $m$ 种元素的含量总和.

**定义5** 设拾包组为

$$C_i = \{c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}\}. \quad (5)$$

其中: $c_{i1}$ 、 $c_{i2}$ 、 $c_{i3}$ 为槽号,代表该槽在第 $i$ 组铝液拾包中; $i \in [1, \lceil n/3 \rceil]$ .为便于计算,要求 $c_{i1} < c_{i2} < c_{i3}$ (最后一组电解槽数可以小于3).

**定义6**

$$L_i = |N_{c_{i3}} - N_{c_{i2}}| + |N_{c_{i2}} - N_{c_{i1}}|, \quad (6)$$

其中 $L_i$ 表示出铝拾包在第 $i$ 个组合内天车行驶路程.若最后一组剩两个电解槽,则拾包行驶路程仅为这两

个电解槽间的路程;若只剩一个电解槽,则行驶路程记为0(单位为电解槽间距).

在符合调配标准的前提下,完成一批次电解槽的铝液调配任务,以出铝电解槽集合所有拾包路程之和最短为目标,定义目标函数如下:

$$L = \min \sum_{i=1}^{\lceil \frac{1}{3}n \rceil} L_i, \quad i \in \left[1, \lceil \frac{1}{3}n \rceil\right]. \quad (7)$$

定义约束条件为

$$\sum_{k=1}^s P_{c_{ikj}} W_{c_{ik}} \leq M_j \sum_{k=1}^s W_{c_{ik}}. \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} i \in \left[1, \lceil \frac{1}{3}n \rceil\right], \\ j \in [1, m+1], \\ 1 \leq s \leq 3, \end{cases} \quad (9)$$

$s$ 为当前拾包组含电解槽数目.

## 2 基于混合遗传算法的模型解算

电解生产中,电解槽化验数据经常出现波动,若槽况良好,则化验数据满足工艺要求,无需进行配铝计算,直接按照就近电解槽出铝即可;若发生槽况不好的极端情况,如某些化学成分过高而不可能实现工艺配铝,则无法完成配铝计算,只能转入人工对杂质成分过高的电解槽进行处理.对于这两种情况需按照人工经验予以排出.

整个算法流程如下.

**Step 1:** 定义5中 $c_{ik}$ 按照出铝电解槽号每3个一组顺序累增,计算式(8).如果所有约束条件都满足,则槽况良好,直接出铝,按照槽号生成拾包调度数据,程序结束.

**Step 2:** 对于任一 $N_i \in N$ 和其他电解槽中任意两个组成拾包,计算约束式(8).如果所有约束条件都不满足,则槽况恶劣,提示无法配铝,程序结束.

**Step 3:** 遗传算法开始,初始化种群,设定算子参数,进化代数 $i = 0$ .

**Step 4:** 计算适应度,将优良基因保存于基因库.

**Step 5:** 轮盘赌选择交叉及变异算子.

**Step 6:** 如果种群的平均适应度低于前一代种群平均适应度,则从基因库中提取一定数量的优良基因到种群,产生下一代个体.

**Step 7:** 中止条件判断,若不中止则转Step 4.

**Step 8:** 输出最优个体,即为拾包调度数据.

以上算法中核心难题是基因编码、变异及交叉算子设计.下节将具体说明.

### 2.1 基因编码与初始种群生成

定义 $(n_1, n_2, \dots, n_n)$ 为符合调配标准的电解槽

序列基因编码, 每3个电解槽组成一个拾包, 即基因编码从前往后每3个基因合成一个包,  $n_i$  表示电解槽  $N_{n_i}$ , 则其中拾包组出铝方案可表示为  $(n_{3(k-1)+1}, n_{3(k-1)+2}, n_{3(k-1)+3}), k \in [1, \lceil n/3 \rceil]$ . 当  $k$  为最后一组时, 包含槽数可以小于3. 例如: 基因编码为 (6, 13, 14, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 1, 2, 3, 16) 代表共16个电解槽将完成出铝任务, 其中 (6, 13, 14) 为第1拾包, (4, 5, 7) 为第2拾包, ..., 最后第6拾包只包含一个电解槽16. 在初始化过程中, 由于Fe杂质含量是最重要的指标, 应侧重考虑. 具体过程如下.

Step 1: 在  $[1, n]$  之间随机产生起始槽位  $i$ , 形成顺序基因链  $(i, i+1, \dots, n, 1, 2, \dots, i-1)$ ;

Step 2: Fe 元素含量按冒泡法由高到低排列调整基因链;

Step 3: 从起始基因位开始, 每3个基因组成一个拾包, 若拾包数据不满足约束条件 (8), 则顺序向后调换基因位置, 直到满足约束条件;

Step 4: 产生初始基因链.

### 2.2 交叉及变异算子

选择出的个体以一定的交叉概率配对交叉, 交叉算子用于调配电解槽铝液组合. 算法如下.

Step 1: 选择个体最后一个含3个基因的拾包组合的第1位为交叉点. 如: 16个电解槽基因链, 最后一个含有3个电解槽拾包组为13, 14, 15位基因, 则定义  $P_1$ 、 $P_2$  的交叉点  $P_m$  为13, 1~12位为交叉数据.  $P_1$  和  $P_2$  可表示为

$$P_1 : (3, 8, 13, 1, 6, 11, 2, 15, 16, 4, 10, 12, 5, 7, 9, 14),$$

$$P_2 : (4, 5, 11, 3, 14, 15, 9, 10, 16, 2, 6, 8, 1, 7, 12, 13).$$

Step 2: 将  $P_1$  交叉点后  $[P_m, n]$  数据调整为  $P_2$  交叉点后  $[P_m, n]$  数据, 将  $P_2$  交叉点后  $[P_m, n]$  数据调整为  $P_1$  交叉点后  $[P_m, n]$  数据. 若有重复基因, 则在交叉后基因链内互换基因位置. 调整后为

$$P_1 : (3, 8, 14, 5, 6, 11, 2, 15, 16, 4, 10, 9, 1, 7, 12, 13),$$

$$P_2 : (4, 1, 11, 3, 13, 15, 12, 10, 16, 2, 6, 8, 5, 7, 9, 14).$$

Step 3: 对调整后的  $P_1$ 、 $P_2$  交叉点前的数据  $[1, P_m - 1]$ , 按照约束条件 (8) 进行判断. 如果不满足, 则在  $[1, P_m - 1]$  内按照个体初始化策略重新调整. 得到交叉后的个体为

$$F_1 : (3, 8, 11, 5, 6, 14, 2, 15, 16, 4, 9, 10, 1, 7, 12, 13),$$

$$F_2 : (1, 4, 11, 3, 13, 15, 10, 12, 16, 2, 6, 8, 5, 7, 9, 14).$$

变异算子用来改变槽装车路线. 随机产生变异基因位  $i$ , 其中  $3 < i < n$ . 若  $[1, n]$  (不包括  $i$  所在基因组的3个基因位) 基因位中存在  $j$ , 使得  $i$  与  $j$  所在的两个基因组在二者互换后仍满足约束条件 (8), 则变异

操作结束; 否则, 按未发生变异操作看待.

### 3 算例分析

为了验证本文所提出方法的有效性, 以西北某企业电解槽数据为算例依托数据, 工艺要求生产七零铝, 即要求铝纯度达到99.7%, 杂质的化验数据最大标准如表1所示, 即约束条件需同时满足表1要求.

表1 电解铝七零铝化学元素最大含量标准 %

Fe	Si	Cu	Ga	Mg	Zn	Sum
0.2	0.1	0.01	0.03	0.02	0.03	0.3

选择出铝电解槽为16个, 其化验数据如表2所示. 实际生产过程中, 电解槽一次出铝量约为3t, 为方便计算并直观显示, 取出铝重量统一为3t. 初始种群大小100, 随机生成的初始种群中最好拾包出铝路程为37槽间距. 经过混合遗传算法进化150代后, 出铝路程最优值为12槽间距, 最优值为 (3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 1, 2, 4, 14, 15, 16, 10). 为验证算法有效性, 针对以上算例进行20次运算, 混合遗传算法150代优化后出铝电解槽间距平均为12.5, 算法效果稳定.

表2 电解铝原铝化验数据 %

槽号	Fe	Si	Cu	Ga	Mg	Zn	Sum
1	0.21	0.04	0	0.02	0	0.01	0.28
2	0.18	0.05	0	0.02	0	0.01	0.26
3	0.26	0.06	0	0.02	0	0.01	0.35
4	0.21	0.04	0	0.02	0	0.01	0.28
5	0.16	0.04	0	0.02	0.01	0.01	0.24
6	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01	0.25
7	0.17	0.04	0	0.02	0	0.01	0.24
8	0.16	0.04	0	0.02	0	0.01	0.23
9	0.23	0.06	0	0.02	0	0.01	0.32
10	0.17	0.04	0	0.02	0	0.01	0.24
11	0.19	0.04	0	0.02	0	0.01	0.26
12	0.19	0.04	0	0.02	0	0.01	0.26
13	0.16	0.04	0	0.02	0	0.01	0.23
14	0.18	0.04	0	0.02	0	0.01	0.25
15	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01	0.25
16	0.2	0.04	0	0.02	0	0.01	0.27

在实际操作中, 往往会出现槽况不好的情况或者槽况非常好的情况, 如表3、表4所示. 按照上述算法, 遗传算法执行前需对表3数据进行判定. 由于4号槽铁含量过高, 与其他任意槽都无法实现配铝, 则提示转入人工处理配铝. 通过对表4进行判定可知, 每一个电解槽均可与两个邻近电解槽进行配铝, 因此可按照顺序出铝.

表3 工况较差电解槽化验数据 %

槽号	Fe	Si	Cu	Ga	Mg	Zn	Sum
1	0.16	0.05	0	0.02	0	0.01	0.24
2	0.14	0.06	0	0.02	0	0.01	0.23
3	0.16	0.04	0	0.02	0	0.01	0.23
4	0.32	0.07	0	0.02	0	0.01	0.42
5	0.15	0.04	0	0.02	0	0.01	0.22
6	0.18	0.05	0	0.02	0	0.01	0.26
7	0.16	0.04	0	0.02	0	0.01	0.23
8	0.15	0.05	0	0.02	0	0.01	0.23
9	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01	0.25
10	0.18	0.04	0	0.02	0	0.01	0.25
11	0.18	0.04	0	0.02	0	0.01	0.25
12	0.19	0.06	0	0.02	0	0.01	0.28
13	0.15	0.06	0	0.02	0	0.01	0.24
14	0.22	0.05	0	0.02	0	0.01	0.3
15	0.18	0.04	0	0.02	0	0.01	0.25
16	0.15	0.04	0	0.02	0	0.01	0.22

表4 工况较好电解槽化验数据 %

槽号	Fe	Si	Cu	Ga	Mg	Zn	Sum
1	0.16	0.05	0	0.02	0	0.02	0.25
2	0.18	0.05	0	0.02	0	0.01	0.26
3	0.15	0.04	0	0.02	0	0.01	0.22
4	0.16	0.05	0	0.02	0	0.03	0.26
5	0.18	0.04	0	0.02	0	0.02	0.26
6	0.15	0.05	0	0.02	0	0.03	0.25
7	0.17	0.04	0	0.02	0	0.03	0.26
8	0.19	0.04	0	0.02	0	0.01	0.26
9	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01	0.25
10	0.15	0.04	0	0.02	0	0.01	0.22
11	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01	0.25
12	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01	0.25
13	0.17	0.05	0	0.02	0	0.01	0.25
14	0.16	0.05	0	0.02	0	0.01	0.24
15	0.16	0.05	0	0.02	0	0.01	0.24
16	0.15	0.07	0	0.02	0	0.01	0.25

## 4 结 论

本文对电解铝生产过程中电解槽出铝调度问题进行了研究,在建立数学模型分析基础上,设计了一种混合策略优化算法,通过引入人工经验排出特例,利用遗传算法完成优化,并给出了算法设计的细节.通过某铝厂电解槽3组数据的优化实例验证了所提出方法的有效性.尽管已经完成的工作可以满足生产工艺要求,但实际配铝过程希望杂质数据尽可能的小,以提高品质.这样条件下的化验数据目标和出铝路程目标将构成一个多目标优化问题,这是下一步将要研究的内容.

## 参考文献(References)

[1] Kumar M, Rajotia S. Integration of scheduling with computer aided process planning[J]. J of Materials

Processing Technology, 2003, 138(1/2/3): 297-300.

- [2] Moon C, Seo Y. Evolutionary algorithm for advanced process planning and scheduling in a multi-plant[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(2): 311-325.
- [3] 徐海黎, 李建华, 王孙安. 基于混沌克隆选择算法的工艺调度优化[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4637-4640. (Xu H L, Li J H, Wang S A. Optimization of process planning and scheduling based on chaos clone algorithm[J]. J of System Simulation, 2009, 21(15): 4637-4640.)
- [4] 夏元明. 原铝铸造优化配铝算法分析及软件开发[J]. 轻金属, 2005, 322(7): 38-41. (Xia Y M. Calculation analysis and software development of primary aluminum casting optimized proportioning aluminum method[J]. Light Metals, 2005, 322(7): 38-41.)
- [5] 张亚利. 铝电解槽出铝智能排包软件研究与开发[D]. 北京: 北方工业大学计算机信息工程学院, 2009. (Zhang L Y. Research and development of arranging package of aluminum electrolysis cells intelligently[D]. BeiJing: School of Computer and Information Engineering, North China University of Technology, 2009.)
- [6] 谢卫华. 铝业生产资源管理系统几个关键问题的研究[D]. 长沙: 中南大学信息科学与工程学院, 2012. (Xie W H. Research on several key problems about the aluminum production resource management system[D]. Changsha: School of Information Science and Engineering, Central South University, 2012.)
- [7] 李建华, 王孙安. 一种改进的遗传算法—Family GA[J]. 控制与决策, 2004, 19(9): 999-1003. (Li J H, Wang S A. Family GA — An improved genetic algorithms[J]. Control and Decision, 2004, 19(9): 999-1003.)
- [8] 张浩, 朱云龙, 常春光. 基于NSGA II的高精铜板带配料优化问题[J]. 控制与决策, 2012, 27(7): 1071-1076. (Zhang H, Zhu Y L, Chang C G. Burdening optimization problem of high-precision copper strips based on NSGA II algorithm[J]. Control and Decision, 2012, 27(7): 1071-1076.)
- [9] 鲁延京, 陈英武, 杨志伟. 求解约束优化问题的粒子进化变异遗传算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(10): 1441-1446. (Lu Y J, Chen Y W, Yang Z W. Improved GA with particle swarm's evolutionary strategy for solving constrained optimization problems[J]. Control and Decision, 2012, 27(10): 1441-1446.)

(责任编辑: 李君玲)