

文章编号: 2095-2163(2020)08-0019-05

中图分类号: O255

文献标志码: A

# 铝电解车间多功能机组调度的博弈模型研究

李雪<sup>1</sup>, 曹斌<sup>2</sup>

(1 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵阳 550025; 2 贵阳铝镁设计研究院有限公司, 贵阳 550000)

**摘要:**为解决铝电解车间多约束的多功能机组调度问题,提出了一种以完成全部任务总时间最小为优化目标的多功能机组调度博弈模型,提高车间多功能机组的利用率。采用遗传算法求解多功能机组调度博弈模型,根据多功能机组调度特点,设计了遗传算法的适应度函数,在编码上选择双链表编码以匹配多功能机组和车间任务。通过仿真实例,验证了调度博弈模型的合理性,同时使多功能机组的负荷相对均衡,减少了设备的维护量。

**关键词:** 铝电解; 多功能机组调度; 博弈论; 遗传算法

## Research on game model of multi-function unit scheduling in aluminum electrolysis workshop

LI Xue<sup>1</sup>, CAO Bin<sup>2</sup>

(1 Guizhou University College of Big Data and Information Engineering, Guiyang 550025, China;  
2 Guiyang Aluminum Magnesium Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

**[Abstract]** In order to solve the multi-constrained multi-function unit scheduling problem in the aluminum electrolysis workshop, a multi-function unit scheduling game model with the minimum total time to complete all tasks as the optimization goal is proposed to improve the situation that the aluminum electrolysis workshop adopts manual scheduling of multi-function units. We improve the utilization rate of multifunctional units in the workshop, and use genetic algorithm to solve the multifunctional unit scheduling game model, design the fitness function of the genetic algorithm according to the multifunctional unit scheduling characteristics, and select the double linked list coding to match the multifunctional unit and the workshop task. Simulation examples verify the rationality of the scheduling game model, and at the same time make the load of the multi-function unit relatively balanced, reducing the amount of equipment maintenance.

**[Key words]** aluminum electrolysis; multi-function unit dispatching; game theory; genetic algorithm

### 0 引言

多功能机组调度,是指对电解车间多功能机组这个有限资源进行合理分配<sup>[1]</sup>。在铝电解车间中,多功能机组是辅助铝液生产的重要工具,对铝液安全稳定的生产起着至关重要的作用。

铝液的生产过程存在多约束、多任务、生产规模大以及随机性因素多和生产过程复杂等特点,导致现在铝电解企业的车间采用人工调度多功能机组的模式,依靠工人的经验,根据车间任务位置和任务数量等情况对多功能机组进行调度,忽略了多功能机组负荷是否均衡。因此,车间经常出现多功能机组忙闲不一的情况,导致多功能机组损坏不一,增加了设备维护量。若仅仅通过人工调度多功能机组来辅助车间铝液的生产,很难降低铝电解车间的生产成本,也不能提高多功能机组的利用率<sup>[2]</sup>。

因此,如何合理的调度多功能机组,对完成任务

的总时间最小以及节约有限资源有着重大的现实意义<sup>[3-4]</sup>。随着科技时代的进步,铝电解车间的电解槽和多功能机组数量以及车间的任务需求规模逐渐扩大,铝电解车间中不同的任务需求对数量有限的多功能机组争夺的这一特点越来越突出,所以对如何合理调度铝电解车间多功能机组的研究变得更加迫切。

### 1 博弈论在生产调度中的应用

近年来,多任务调度问题存在一些传统调度方法无法解决的难处。对此有人把博弈理论引入多任务的调度中,对多任务的调度问题进行描述和求解,并在一定程度上取得了很大的成功。Kanlyan C<sup>[5]</sup>等对博弈理论在什么地方应用进行了深入研究,提出博弈理论的重要应用领域将是在运筹学上。Imma Curiel<sup>[6]</sup>等采用博弈论来解决在可加性和微弱递增的成本函数下,单机调度引起的成本分配问题,

**作者简介:** 李雪(1993-),女,学士,主要研究方向:优化调度;曹斌(1963-),男,博士,研究员,主要研究方向:机电一体化、工业控制、信息安全和智能管理。

**通讯作者:** 曹斌 Email: cb2027@126.com

收稿日期: 2020-06-17

尚未考虑多机多目标的调度问题。BORM P<sup>[7]</sup>等采用合作博弈解决交货日期的任务排序调度问题,考虑加权惩罚,加权迟到和完成时间这3种标准。但随着市场竞争越来越激烈,合作方对利益的追求也越来越大,很难达到平衡,合作关系很容易破裂。Teredesai T<sup>[8]</sup>等人基于智能软件代理来解决实时调度问题,其中生产者代理之间存在竞争与合作关系。代理商在竞争时会使用非合作博弈论中的最大化原则来设计出价策略,但提出的调度方法缺乏理论分析与算例验证。SUN<sup>[9]</sup>等、ZHANG<sup>[10]</sup>等建立了动态生产环境下柔性作业车间调度问题的调度非合作博弈模型。聂黎等<sup>[11]</sup>提出了基于博弈论的虚拟制造网络车间调度优化方法,设计了一个D最小纳什均衡。将虚拟制造网络车间调度模型的求解转换为寻求博弈模型的D最小纳什均衡点,实现了对该网络车间调度的博弈模型的有效求解。周艳平<sup>[12]</sup>提出基于客户成本需求的多目标生产调度问题,提高了企业的上产效率和利用率。但这些研究均忽略了设备负荷的均衡。目前看来,虽然博弈论在生产调度中的研究与应用取得了一定的成功,但是大部分研究都是在柔性制造车间、虚拟网络车间,尚未对铝电解车间的多功能机组调度进行研究。本文将在前人的研究基础上,运用博弈论来解决电解车间采用人工调度模式存在的问题,这对提高铝电解车间多功能机组的利用率具有非常大的意义。

## 2 车间布局与任务计划

在铝电解车间中,一个车间分成两个厂房,每个厂房又分为两个工区,每个工区分别有2台多功能机组、36个电解槽。电解槽的分布为A、B两个面,如图1所示,两个面分别分布了24个阳极导杆。随着化学反应的产生,每个电解槽每天都必须且只进行一次出铝任务;每个电解槽上的每块阳极需要进行周期更换,当阳极达到更换周期时需要取出并安装新阳极;随着阳极的消耗需周期性的对电解槽进行抬母线作业;以上任务都需多功能机组完成。此外还有一些临时任务,如重物的运输、添加氟化铝、调整阳极导杆等。本文主要考虑出铝、换阳极、抬母线任务。

本文设定多功能机组的运行速度为0.2 m/s,最小安全距离 $d = 3$  m。电解槽与多功能机组的部分平面布局如图2所示。其中,A、B、C、D、E是5个电解槽, $J_1$ 、 $J_2$ 是2台多功能机组。

选取铝电解车间某天4 h的任务需求计划,见表1。



图1 电解槽

Fig. 1 Electrolyzer

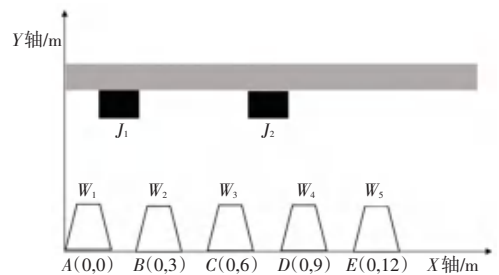


图2 平面布局图

Fig. 2 Plan layout

表1 铝电解车间4 h的任务需求表

Tab. 1 4 h task requirement table of aluminum electrolysis workshop

槽号	任务	编号	时间/min	槽号	任务	编号	时间/min
1	出铝	1	5	6	出铝	14	5
	抬母线	2	7		抬母线	15	7
	换阳极	3	30		7	出铝	16
2	出铝	4	5	抬母线		17	7
	抬母线	5	7	换阳极		18	30
	换阳极	6	30	8	出铝	19	5
3	出铝	7	5		换阳极	20	30
	换阳极	8	30		9	出铝	21
	4	出铝	9	5		换阳极	22
抬母线		10	7	10		出铝	23
5		出铝	11		5	换阳极	24
	换阳极	12	30		抬母线	25	7
	抬母线	13	7				

## 3 车间多功能机组调度博弈模型

### 3.1 问题描述

以铝电解车间一个工区为例,每个电解槽上有出铝、抬母线、换阳极等任务需求,每天每个电解槽有1-3个任务需求。其中每个电解槽每天需出一次铝,换阳极和抬母线是周期更换。因多功能机组上的小车只在垂直X轴方向运动,不影响多功能机组沿横向轨道的运动,故可以将小车的运动时间统一加入多功能机组完成任务的时间之内,单纯的关注多功能机组的调度问题。

假设铝电解车间存在  $m$  台多功能机组,  $w$  个电解槽,  $n$  个任务, 其中  $n$  远大于  $m$ 。同时, 为了精确描述多功能机组调度问题模型, 引入以下符号:

$N$ : 多功能机组集合, 多功能机组号按照电解槽号依次增大,  $N = \{1, 2, \dots, m\}$ ;

$W$ : 电解槽个数集合,  $W = \{1, 2, \dots, w\}$ ;

$S$ : 任务集合,  $S = \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{ij}\}$ , 其中  $1 \leq i \leq n$ ,  $j = 1, 2, 3$  (1, 2, 3 分别表示出铝、换阳极、抬母线);

$C_{i,j,m,c}$ : 表示多功能机组  $m$  的第  $c$  个任务是在电解槽  $i$  上执行任务  $j$ ;

$W_{is}$ : 任务  $s$  在电解槽  $i$  上;

$L_{span}$ : 多功能机组的可运行长度;

$d$ : 相邻两多功能机组的最小距离;

$t_s$ : 多功能机组开始完成任务时间;

$t_e$ : 多功能机组结束任务时间;

$t_i$ : 多功能机组  $i$  的运行时间;

$t_{i,s,m}, t_{i,e,m}$ : 多功能机组  $m$  完成任务  $i$  的开始、结束时间;

$$X_{mi} = \begin{cases} 1, & \text{天车 } m \text{ 执行任务 } i; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

$$Y_{mit} = \begin{cases} 1, & \text{天车 } m \text{ 在 } t \text{ 时刻执行任务 } i; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

同时, 多功能机组在完成的情况下, 需要满足多种约束条件:

(1) 一台多功能机组不能同时完成多个任务;

(2) 相邻两台多功能机组之间的距离在任意时刻都大于等于安全距离, 彼此不能相互跨越;

(3) 同一任务同一时刻只能在一台多功能机组上完成;

(4) 所有的多功能机组在零时刻均可以使用, 此时多功能机组是空闲的, 可以完成任意的任务;

(5) 所有任务的完成时间已经确定, 并且所有任务相应的准备时间可以省略, 视作已在完成任务的时间内。

车间约束条件的数学表达式如下:

$$P_{m,t} < L_{span}, \quad \forall m, t, \quad (1)$$

$$P_{m+1,t} \geq P_{m,t} + d, \quad \forall m, t, \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{m_{\max}} X_{mi} = 1, \quad \forall i, \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{i_{\max}} Y_{mit} \leq 1, \quad \forall m, t, \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^{m_{\max}} \sum_{i=1}^{i_{\max}} X_{mi} = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{m=1}^{m_{\max}} X_{mi} = i_{\max}. \quad (5)$$

### 3.2 调度博弈模型

本文主要研究的是多功能机组调度的博弈模型, 采用博弈论的思想进行建模。以铝电解车间多功能机组完成任务的总时间最小为优化目标, 通过提高多功能机组的利用率来实现。将某台多功能机组在某个电解槽上开始完成第一个任务定义为流水时间的开始, 把该多功能机组完成的最后一个任务定义为流水时间的结束。综上所述, 如果多功能机组完成分配任务的平均流水时间小, 表明了车间多功能机组的利用率高, 反之则利用率就低。多功能机组的平均流水时间可用式(6)计算得出:

$$\bar{F} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m P_k. \quad (6)$$

其中,  $\bar{F}$  是多功能机组的平均流水时间;  $P_k$  是多功能机组  $M_k$  的总流水时间。

综上所述, 铝电解车间的多功能机组调度博弈模型的基本三要素表示为:

$$G = (N, S_i, U_i), \quad N = \{1 \leq i \leq n\}. \quad (7)$$

其中,  $N$  为多功能机组构成的局中人,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $S_i$  为多功能机组  $i$  可选的任务策略集合, 可选集合为  $S_i = \{s_{11}, s_{12}, \dots, s_{ij}\}$ , 其中  $1 \leq i \leq n$ ,  $j = 1, 2, 3$  (1, 2, 3 分别表示出铝、换阳极、抬母线);  $U_i$  为多功能机组  $i$  选择策略  $S_i$  时的收益函数。因此, 不同的多功能机组选择不同的可行策略集, 会有不同的收益函数, 所以多功能机组的收益表示为:

$$U_z(s) = T_z^s + T_z. \quad (8)$$

其中,  $T_z^s$  表示第  $z$  台多功能机组在策略  $s$  下的被动运输时间,  $s$  由同一时刻的所有多功能机组共同选取;  $T_z$  可定义为第  $z$  台多功能机组完成任务的时间。

优化的目标是在提高多功能机组的利用率的同时使多功能机组负荷均衡, 即降低多功能机组的平均流水时间。而博弈追求的目标是收益最大, 所以把收益函数做如下转换:

$$R_z(s) = \frac{1}{U_z(s)}. \quad (9)$$

博弈模型的结构如图3所示。

纳什均衡解指的是当局中人采取策略  $s_i^*$  时获得的收益, 大于等于采取其它策略获得的收益时, 认为达到纳什均衡。

### 3.3 调度博弈模型求解

采用遗传算法对多功能机组调度博弈模型进行求解。其求解本质是求解博弈的纳什均衡点, 得到电解车间中多功能机组的最优调度, 达到提高铝电

解车间多功能机组的利用率,以及多功能机组负荷均衡的结果。根据车间调度需求对遗传算法的适应度函数值进行了设计,选择了合适的编码方式和3种算子来求解多功能机组的调度博弈模型。

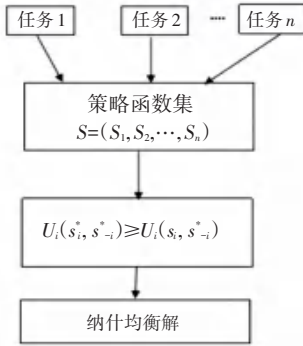


图3 博弈模型结构图

Fig. 3 Game model structure diagram

(1) 编码方式。铝电解车间多功能机组的调度问题的求解,是根据任务需求合理的对多功能机组进行调度,包括求解电解槽上任务序列中每个任务选择的多功能机组,以及电解槽上任务被完成的顺序。针对铝电解车间多功能机组调度的特点与任务需求,同时考虑任务链表和多功能机组设备链表这种双链表的编码,来进行染色体的编码,其结构如式10所示。

$$I = \begin{matrix} List_1 \\ List_2 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} j_{11}, j_{12}, \dots, j_{ij}, j_{un} \\ c_1, c_2, \dots, c_i, c_n \end{matrix} \quad (10)$$

其中,  $j_{ij}$  表示电解槽  $i$  上的任务  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ , 分别表示车间3种任务),  $c_i$  表示多功能机组  $i$ ,  $List_1 = (j_{11}, j_{12}, \dots, j_{ij}, j_{un})$ , 表示根据铝电解车间电解槽上的任务需求计划所对应的任务集。该任务集的任务编号由顺序编码确定,  $List_2 = (c_1, c_2, \dots, c_i, c_n)$  表示多功能机组集合的整数编码。

(2) 3种算子。相比遗传算法中的其它选择算子,锦标赛选择不需要转换适应度函数值且对最小化和最大化问题都适用。因此,本文采用此方法进

行选择。在交叉操作上采用双切点交叉方式,在染色体中选择两个父代的染色体,并在所选择的父代染色体上随机选取二两个点作为切点,然后交换这两个切点之前的的基因子串,经过交叉后,需对未交换部分进行修复;变异操作即互换两个随机位置上的基因。

(3) 适应度函数设计。本文以完成任务时间最小为优化为目标,建立铝电解车间多功能机组的调度博弈模型。因此适应度函数设计如下:

$$F^k(U_1^k, U_2^k, \dots, U_j^k, \dots, U_n^k) = \left[ \sum_{i=j}^n (U_j^k - U_i^k)^3 \right]^{1/3}, \quad (11)$$

$$U_j = \min\left(\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m P_k\right), \quad (12)$$

$$F^k(U_1^k, U_2^k, \dots, U_n^k) < \xi. \quad (13)$$

其中,  $U_j^k$  和  $U_j$  分别表示任务  $j$  在遗传算法迭代到第  $k$  代的收益,并且  $U_j$  为假设只存在多功能机组  $j$  在电解槽上完成任务时的最优收益。 $\xi$  用来终止算法的迭代,得出模型的最优解。

#### 4 仿真实例及分析

实验中以铝电解车间某一天早上4个小时的任务为例,有10个电解槽、2台多功能机组。相关的任务需求见表1。

环境与参数设置如下:

(1) 实验环境:算法应用 JAVA 语言编写,运行于操作系统 windows7 上。

(2) 主要参数见表2。

表2 主要参数表

Tab. 2 Main parameter table

初始种群	最大迭代次数	$P_c$	$P_m$
300	4 000	0.9	0.05

基于博弈论的多功能机组调度仿真结果,见表3、表4。表3表示通过遗传算法求解得出的调度结果,表4为多功能机组完成任务的收益结果。

表3 调度结果表

Tab. 3 Scheduling result table

迭代次数	1号多功能机组	2号多功能机组
1	[9, 3, 1, 2, 4, 6, 10, 13, 16, 5, 11, 7]	[8, 16, 18, 12, 25, 23, 21, 18, 16, 5, 14, 15, 22]
400	[8, 2, 1, 3, 4, 6, 12, 13, 16, 19, 11, 7, 9, 10, 12, 17]	[25, 23, 21, 18, 16, 5, 14, 15, 22, 20]
800	[5, 7, 11, 14, 17, 19, 1, 3, 6, 8, 10, 13, 16, 2, 4, 9]	[25, 24, 22, 20, 15, 12, 23, 21, 18]
1 500	[5, 7, 11, 14, 17, 19, 1, 3, 6, 8, 10, 13, 16, 2, 4, 9]	[25, 24, 22, 20, 15, 12, 23, 21, 18]
4 000	[5, 7, 11, 14, 17, 19, 1, 3, 6, 8, 10, 13, 16, 2, 4, 9]	[25, 24, 22, 20, 15, 12, 23, 21, 18]

表 4 收益结果表

Tab. 4 Results table

多功能机组号	1 代收益	400 代收益	800 代收益	1 500 代收益	4 000 代收益
1	0.003 26	0.004 16	0.005 75	0.005 75	0.005 75
2	0.003 18	0.004 10	0.005 71	0.005 71	0.005 71

从表 3 和表 4 可以看出,该算法在第 800 代以后,多功能机组调度博弈模型达到纳什均衡点,每台多功能机组完成任务的收益达到最优值,其两台多功能机组的收益相对均衡。在不考虑车间设备故障

的情况下,采用遗传算法求解多功能机组调度博弈模型所得出的调度方案,是合理可行的。两台多功能机组的运行轨迹如图 4 所示。

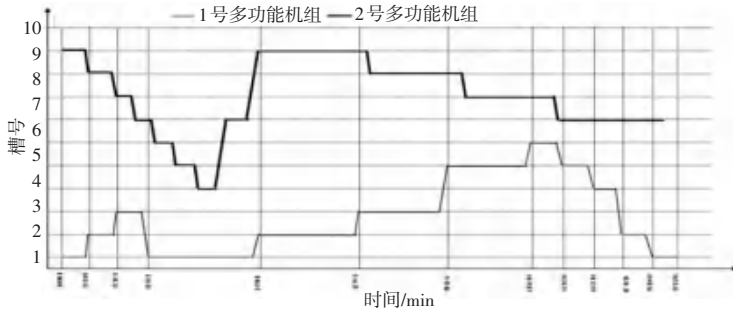


图 4 两台多功能机组的运行轨迹图

Fig. 4 The running track of two multi-function units

由图 4 可知,两台多功能机组完成铝电解车间某一天早上 4 h 任务总耗时 2.94 h。由此得出在不考虑多功能机组故障的情况下,通过建立多功能机组调度的博弈模型并采用遗传算法求解,得出的调度结果能够使多功能机组在规定时间内提前完成任务,提高了多功能机组的利用率。同时从图中可以看出两台多功能机组在完成的过程中没有发生冲突,且不存在被动运行,说明本文所建立的调度博弈模型并采用遗传算法求解的方法能够很好的解决铝电解车间多功能机组调度问题。

5 结束语

本文根据铝电解车间多功能机组实际运行特点及方式建立了以完成车间所有任务的总耗时最小为目标,引入博弈理论,把车间的多功能机组、任务和完成任务的时间分别映射为博弈论中的局中人、策略集合和收益函数,并采用遗传算法求解模型,并根据车间某天的实际任务进行仿真实验,验证了方法的可行性。

参考文献

[1] 陈勇,郑鑫帆,王亚良,等. 基于 GASA 优化算法的不确定条件下 Job-Shop 调度问题研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1455-1461.

[2] 李臣星. 基于博弈的多目标硫化车间生产调度研究[D]. 青岛科技大学,2013.

[3] 刘青,田乃媛,王英群,等. 天车调度在优化钢厂物流管制中的重要作用[J]. 北京科技大学学报,1998,20(1):36-40.

[4] 赵宁,杜彦华,董绍华,等. 基于循环仿真的钢铁板坯库天车作业优化[J]. 系统工程理论与实践,2012,32(12):2825-2830.

[5] Melanie Mitchell. L.D. Davis, handbook of genetic algorithms[J]. Artificial Intelligence, 1998, 100(1).

[6] KANLYAN C, WILLIAM S. Game Theory and Buisness Applications[M]. Springer,2001,95-133.

[7] Imma Curiel, Jos Potters, Rajendra Prasad, cooperation in one machine scheduling [J]. Mathematical Methods of Operations Research,1993,13(2):113-129.

[8] BORM P,FIESTRA-JANEIRO G. On convexity of games corresponding to sequencing situations with due dates [J]. European Journal of Operations Reearch,2002, 136(3): 616-634.

[9] SUN Dihua,HE Wei,AHENG Linjiang,et al. Scheduling flexible job shop problem subject to machine breakdown with GameTheory [J]. International Journal of Production Research. 2013, 52(13): 3858-3876.

[10] ZHANG Yingfeng,WANG Jing,LIU Sichao,et al. GameTheory Based real-time shop Floor Schedu-Ling Strategy and Method for Cloud Manufacturing [J]. International Journal of Intelligent Systems,2017,32(4):437-463.

[11] 聂黎,张国辉,王小刚,等. 基于博弈论的虚拟制造网络车间调度优化方法[J]. 中国机械工程,2019,30(12):1492-1497.

[12] 周艳平. 基于博弈理论的多目标生产调度问题研究[D]. 华东理工大学,2013.