

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.06.003

## 云制造资源的工序级多目标调度方法研究

孙卫红<sup>1</sup> 吴海元<sup>1</sup> 吕文新<sup>1</sup> 高一聪<sup>2</sup>

(1. 中国计量大学机电工程学院, 杭州, 310018;

2. 浙江大学流体动力及机电系统国家重点实验室, 杭州, 310058)

**摘要:** 由于云制造资源的分散性、多样性、负载率不均衡性等特点对其调度与调度粒度有更高的要求, 将云制造任务分解后的工序作为调度的最小粒度, 构建一种以最短制造服务时间、最低制造服务成本以及均衡负载率为多目标的云制造资源工序级调度模型, 采用以粒子群、遗传相结合的混合多目标调度算法, 将遗传算法中通过双层编码的染色体作为粒子群算法的粒子, 双层编码方式是指以工序加工顺序作为第一层、工序对应加工资源编号为第二层, 随后通过对染色体交叉变异进行粒子更新, 使整个调度过程快速收敛于全局最优解。最后电梯实例证明了该算法能在较短的时间内给出最优的调度方案, 从而有效地解决云制造资源多目标调度问题。

**关键词:** 云制造; 混合算法; 遗传算法; 粒子群算法; 工序级多目标资源调度

中图分类号: TP181

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)06-0773-06

## Research on Multi-objective Process Scheduling of Cloud Manufacturing Resources

SUN Weihong<sup>1</sup>, WU Haiyuan<sup>1</sup>, LÜ Wenxin<sup>1</sup>, GAO Yicong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, 310018, China;

2. The State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systrms, Zhejiang University, Hangzhou, 310058, China)

**Abstract:** Cloud manufacturing resources have high demands for scheduling and scheduling granularity because of its dispersion, diversity and load ration imbalances, etc. In this paper, a new multi-objective model for manufacturing resources process scheduling is proposed. The model decomposes the manufacturing task into process as scheduling minimum granularity to minimize the total time of manufacturing service, the total cost of manufacturing services and the balanced load rate. The new model adopts hybrid algorithm which combines genetic algorithm(GA) and particle swarm optimization (PSO), uses the chromosomes of GA as particles in the hybrid algorithm, and carries out the double-layer coding by using the processing order as the first layer and the corresponding processing resource number as the second layer. Then particles are by the updated crossover and mutation of chromosomes to achieve a faster and more accurate optional solution for the algorithm converges. At last, the example of elevator proves that the new model can get optional scheduling scheme in a short time and effectively solve the multi-objective scheduling problem for cloud manufacturing resource.

**Key words:** cloud-manufacturing; hybrid algorithm; genetic algorithm; particle swarm optimization; multi-objective resource scheduling base on process

**基金项目:** 国家自然科学基金(51675477)资助项目; 浙江省湖州市重大科技专项重点(2015ZD2013)资助项目。

**收稿日期:** 2017-07-02; **修订日期:** 2017-08-24

**作者简介:** 孙卫红, 男, 博士, 教授, 浙江省工程图学会常务理事, 研究方向为数字化设计与制造、制造业信息化, 发表学术论文 40 余篇, 知识产品 35 项(其中发明专利 5 项), 主持完成科研项目近 20 项, 获省部级奖励 3 项。

**通信作者:** 孙卫红, E-mail: whsun@cjlu.edu.cn.

**引用格式:** 孙卫红, 吴海元, 吕文新, 等. 云制造资源的工序级多目标调度方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(6): 773-778. SUN Weihong, WU Haiyuan, LÜ Wenxin, et al. Research on multi-objective process scheduling of cloud manufacturing resources[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(6): 773-778.

云制造 (Cloud manufacturing, CMfg) 是一种基于网络、面向服务的智慧化制造模式<sup>[1]</sup>。它利用网络和服务平台对制造资源进行统一管理和调度, 高效率、低成本地为用户提供各类按需制造的产品与服务<sup>[2]</sup>, 因此在面向 CMfg 服务的生产过程中, 优化云制造资源的调度至关重要。

CMfg 服务平台融合并采用了物联网、虚拟化、信息物理系统等资源感知接入技术动态的对产品加工过程中不同粒度的信息进行采集, 实现对各种加工状态进行实时监测与控制。在 CMfg 资源调度中调度粒度存在两个级别, 分别是制造任务调度初步分解后的子任务级和将子任务继续分解后工序级, 粒度越细, 对加工状态的监测与控制更加精确, 从而提供更专业的面向服务的 CMfg。在当前的 CMfg 资源调度的相关研究领域中, 很多有效的调度模型和调度算法<sup>[3-6]</sup> 被提出, 但这些研究基于的调度粒度仍停留在子任务级, 没有对工序级的资源调度进行深入研究。

本文针对 CMfg 资源的分散性、多样性、负载率不均衡性等特点, 提出了基于工序级的多目标 CMfg 资源调度。目标是以工序级为最小调度粒度为每个制造服务分解后的制造任务申请最合适的 CMfg 资源, 明确制造任务在制造资源上的加工顺序、加工位置, 使得总体加工时间最短、成本最小以及负载率均衡。粒子群算法 (Particle swarm

optimization, PSO) 虽常用作求解多目标最优解问题, 但易陷入局部最优。因此采用遗传 (Genetic algorithm, GA) 与 PSO 结合的混合算法 (GA-PSO), 将双层编码后的 GA 染色体作为 PSO 中粒子, 通过对其交叉变异操作进行粒子更新, 从而使整个调度过程能快速、准确地收敛于全局最优解。本文提出的调度方案能够很好地解决 CMfg 资源多目标调度问题, 为制造资源申请企业和提供制造资源企业提供调度结果, 使 CMfg 环境的资源利用率最大化。

## 1 CMfg 资源特点与调度描述

### 1.1 CMfg 资源特点

(1) 分散性与多样性: CMfg 资源种类繁多, 分布在不同地理位置, 相同制造任务的制造时间、制造成本也不尽相同<sup>[7]</sup>。因此要求最终的资源调度方案提供高效、低成本的服务。

(2) 负载率不均衡: CMfg 资源负载率不平衡, 忙闲不均, 存在周期性或局部性的制造资源过剩<sup>[8]</sup>。

### 1.2 CMfg 资源调度描述

CMfg 资源调度可以描述为制造任务需求和制造资源能力在所设定的约束条件 (时间、成本、负载率) 下的动态匹配行为。具体资源调度流程如图 1 所示, 在云平台上形成了云资源库与云子任务库。

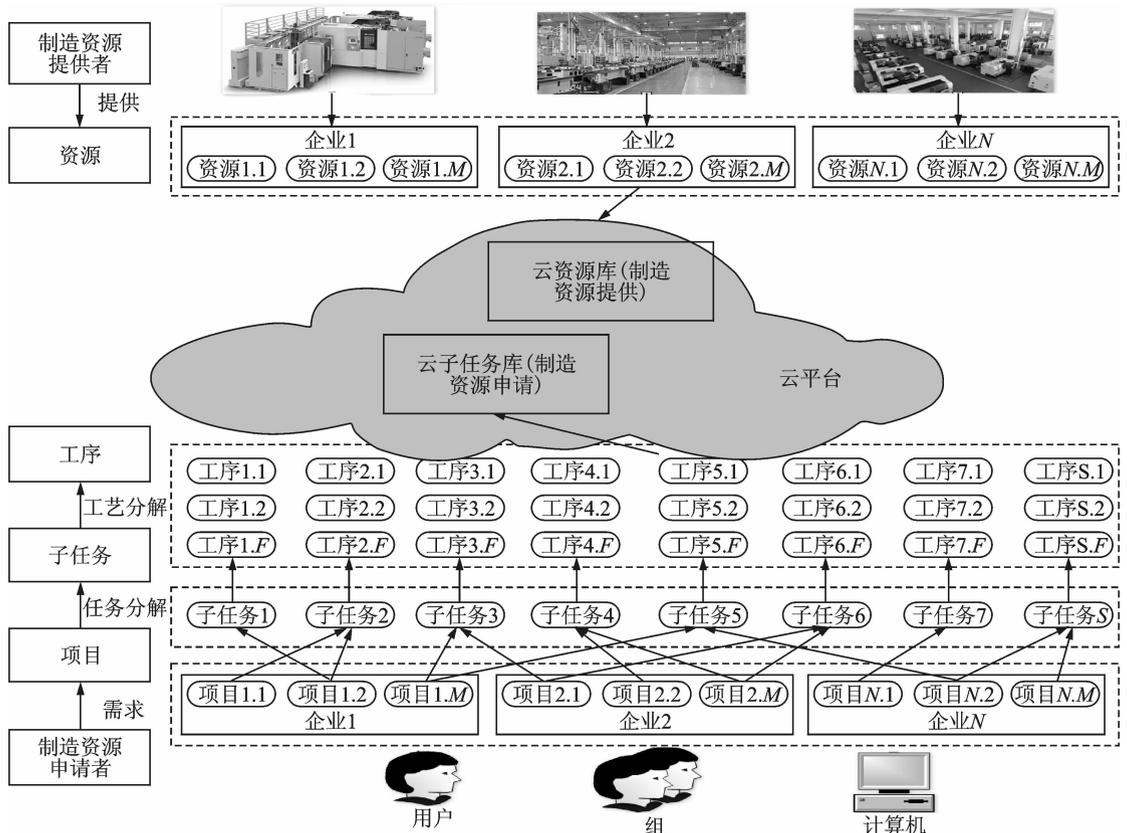


图 1 云制造环境下资源调度过程

Fig. 1 Resource scheduling process in CMfg environment

工序级作为云子任务的最小粒度,在云服务库中有多个候选制造资源,可在任意候选资源上进行制造服务。为使研究更具有可操作性,本文作以下假设:

- (1)相同工序在同一制造资源执行;
- (2)工序在制造资源上加工时间,加工成本是确定的;
- (3)不同制造子任务具有相同的优先级,而子任务内部可以存在工序约束。

## 2 多目标优化模型

### 2.1 目标函数

假定在云平台上有多制造资源申请,每个制造资源申请包含  $N$  个子任务  $F_i, i = \{1, 2, \dots, N\}$ , 在  $M$  个制造资源上加工。每个子任务有  $P_i$  道工序。 $F_{ij}$  对应为第  $i$  个制造子任务的第  $j$  道工序,有  $M_{ij}$  个可选制造资源。

#### 2.1.1 总制造时间

总制造时间是从用户提出制造资源申请到获得制造资源所花时间,由制造资源申请分解后所耗时间最长的子任务决定。总制造时间  $T$  表达式如下

$$T = \max \sum_{j=1}^{P_i} \sum_{k=1}^{M_{ij}} e_{ijk} \eta_i t_{ijk}$$

其中:  $e_{ijk}$  表示  $F_{ij}$  是否在第  $k$  个资源上加工,  $\eta_i$  为  $F_i$  所对应的工件数量,  $t_{ijk}$  表示  $F_{ij}$  在第  $k$  个资源上加工时间。

#### 2.1.2 总制造成本

总制造成本是从制造资源申请到加工完成所产生的费用总和。总制造成本  $C$  表达式如下

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{P_i} \sum_{k=1}^{M_{ij}} e_{ijk} c_{ijk} \eta_i$$

其中:  $c_{ijk}$  表示  $F_{ij}$  在第  $k$  个资源上加工成本。

#### 2.1.3 制造资源负载均衡率

制造资源负载均衡率是指制造资源之间负载差异最小。制造资源负载均衡率  $L$  表达式如下

$$L = \frac{1}{\sum_{s=1}^M M_s - 1} \sum_{s=1}^M \left( \frac{L_s}{Ca_s} \times 100\% - \frac{1}{\sum_{s=1}^M M_s} \sum_{s=1}^M \theta_s \right)^2$$

其中:  $M_s$  表示第  $s$  个制造资源,  $s = \{1, 2, \dots, M\}$ ,  $L_s$  表示第  $s$  个制造资源的负载,  $Ca_s$  表示第  $s$  个制造资源的可用工时,  $\theta_s$  表示第  $s$  个制造资源的负载率。

### 2.2 约束条件

(1)时序约束:制造子任务后续工序的加工开始时间不得超过其前道工序(一个或多个)的加工结束时间,即

$$t_{end_{ij}} \leq t_{start_{i(j+1)}}$$

其中:  $t_{end_{ij}}$  表示前置工序的完成时间,  $t_{start_{i(j+1)}}$  表示当前工序开始时间。

(2)工序的原子性:制造工序为调度的最小粒度,一道工序只能占用一个逻辑制造资源,即

$$\sum_{k=1}^{M_{ij}} e_{ijk} = 1$$

(3)交货期约束:所有子任务完成时间不大于项目交货截止时间,表达式如下

$$T \geq T_{imax}$$

其中:  $T_{imax}$  表示  $F_{ij}$  的最晚交货时间。

(4)制造任务总成本约束:子任务成本总和低于项目的预算成本,表达式如下

$$C \geq C_{imax}$$

其中:  $C_{imax}$  为  $F_{ij}$  的最大预算。

### 2.3 多目标优化的目标函数

由制造资源调度的总制造时间、成本和负载率的目标函数组成最终目标函数,表达式如下

$$F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x)) = (\min T, \min C, \min L)$$

## 3 资源调度混合算法的实现

本文提出的 GA-PSO 混合算法是采用将 GA 中双层编码方式的染色体作为 PSO 中粒子,引入 GA 的交叉和变异操作,通过粒子与个体极值或群体极值交叉以及粒子自身变异的方式更新粒子,从而替代传统 PSO 中通过跟踪极值来更新粒子位置的方法。这样的做法不仅保持 PSO 良好的局部搜索性能,同时还利用了 GA 良好的全局搜索能力。GA-PSO 混合算法流程如图 2 所示,在种群初始化后,通过适应度函数计算粒子的适应值,从而进行个体极值和群体极值筛选,对粒子进行交叉变异等更新操作后再次计算粒子适应值,更新个体极值与群体极值,在有限迭代次数之内,得出最优解。

### 3.1 编码、解码方式及初始化

染色体编码采用双层编码方式,个体长度为  $2 \sum_{i=1}^{P_i} F_{ij} M_{ij}$ 。其中染色体前半部分表示制造工序在制造资源上加工顺序,后半部分表示制造工序对应加工制造资源编号。

然后初始化规模为  $N$  的粒子群,在给定可行区域中为粒子群中每个粒子随机指定初始位置,初始化过程中个体引导者为粒子本身。

### 3.2 适应度函数

多目标求解最优解有两种解决方案:方案 1 得到 Pareto 最优解集;方案 2 根据用户需求设置目

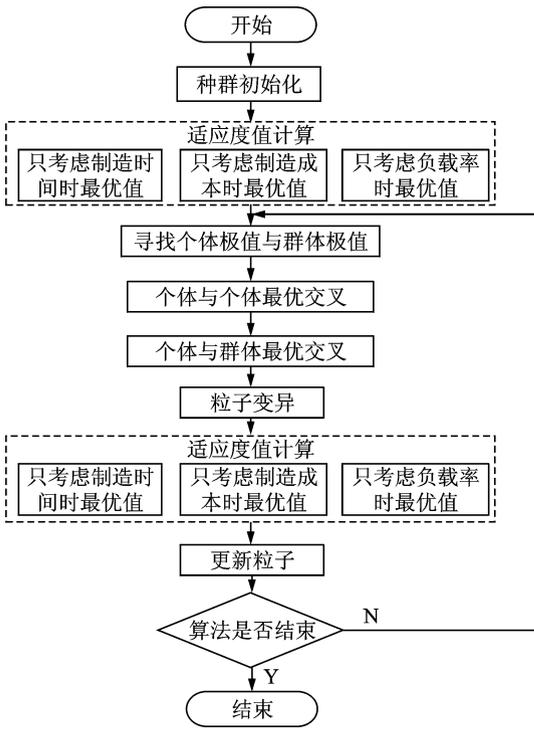


图2 GA-PSO混合算法流程

Fig. 2 Hybrid algorithm process of GA-PSO

标权重,将多目标转化为单目标进行求解得到唯一解<sup>[9-11]</sup>。本文采用了一种随机权重相对加权法计算适应度函数,保持 Pareto 最优解的多样性和均匀分布性的同时,还可以找到合理度量意义下的优胜解。适应度函数为

$$\text{fitness}(x) = \omega_1 \frac{\min T - T_{\min}}{T_{\min}} + \omega_2 \frac{\min C - C_{\min}}{C_{\min}} + \omega_3 \frac{\min L - L_{\min}}{L_{\min}}$$

其中:权重  $\omega_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^3 r_i}$ ,  $r_i$  为非负随机数,对于  $T_{\min}$ ,

$C_{\min}$ ,  $L_{\min}$  分别对应只考虑制造时间因素时的最短时间、只考虑制造成本因素时的最低成本和只考虑制造资源负载率因素时的均衡负载。

$$T_{\min} = \text{fitness}_1(x) = \min T$$

$$C_{\min} = \text{fitness}_2(x) = \min C$$

$$L_{\min} = \text{fitness}_3(x) = \min L$$

### 3.3 粒子更新

#### 3.3.1 交叉操作

交叉操作采用整数交叉法,针对个体与个体极值交叉、个体与群体极值交叉,取出粒子的前

$\sum_{i=1}^{p_i} F_{ij} M_{ij}$  位,随机选择交叉位置交叉。操作方法

如图3所示:交叉位置为6,只对个体前  $\sum_{i=1}^{p_i} F_{ij} M_{ij}$  位进行交叉。

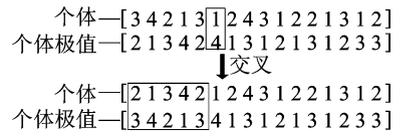


图3 染色体交叉操作

Fig. 3 Chromosome chiasmata

交叉后把某些子任务多余的操作变为子任务工序缺失的操作,并按交叉前个体的制造资源来调整个体极值 ( $\sum_{i=1}^{p_i} F_{ij} M_{ij} + 1$ )  $\sim 2 \sum_{i=1}^{p_i} F_{ij} M_{ij}$  位的制造资源,如图4所示。

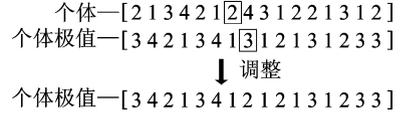


图4 染色体交叉后的调整

Fig. 4 Adjustment after chromosome chiasmata

#### 3.3.2 变异操作

随机选取变异个体,选择变异位置 Pos 1 和 Pos 2,最后把个体中 Pos 1 和 Pos 2 位加工工序以及对应的制造资源编号进行调换,如图5所示,Pos 1 为 3,Pos 2 为 5。



图5 染色体变异操作

Fig. 5 Chromosome mutation

## 4 算法的实例应用与分析

在前面介绍的高度模型与算法基础上,作者搭建了用于管理云资源服务调度的云平台。平台通过制造企业发布自身的核心制造资源,将资源汇集录入云资源池,在企业面向自身不具备制造能力的制造任务时发布制造服务申请,云平台通过分解服务申请对应的制造任务,在云资源池中利用调度算法快速调度匹配对应具有制造能力的企业,满足资源申请企业需要的同时最大化使用了云资源池资源。

由于电梯制造工艺复杂,流程繁多,多数中小型电梯制造企业只能生产电梯某核心部件,不具备生产完整电梯的制造能力。但这些企业可以将各自的制造资源聚集到云平台,云平台通过整合分散资源形成生产完整电梯能力。以湖州某电梯制造企业为例,该企业制造能力薄弱,不具备生产电梯减震装置能力,因此需要借助云平台,提交生产电梯减震装置资源申请,云平台对此申请进行任务分解为如表1所示有6个制造子任务,每个子任务对应有不同的工序,通过在云平台的资源池搜索匹

配,这些工序在云平台上对应 10 个制造资源可供选择。表 2 所示为子任务对应的加工工序。子任务的交货期与预算成本设定如表 3 所示。子任务工序对应可加工制造资源如表 4 所示。工序在不同制造资源上对应加工时间如表 5 所示。工序在不同制造资源上所需加工成本如表 6 所示。各制造资源对应的负载度如表 7 所示。

表 1 申请制造服务子任务

Tab. 1 Subtask of manufacturing services

子任务编号	子任务名称	工序数量
$F_1$	底板	6
$F_2$	安装板	6
$F_3$	筒式减震器	5
$F_4$	限位板	4
$F_5$	定位片	5
$F_6$	卡件	6

表 2 子任务对应工序

Tab. 2 Corresponding process of sub-task

编号	工序标号	工序名称	加工类型
1	101	粗铣轮廓	铣
2	102	粗车	车
...	...	...	...
31	605	磨平面	磨
32	606	钻孔	铣

表 3 子任务对应的交货期与预算成本

Tab. 3 Corresponding delivery and budget cost sub-tasks

$F_i$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
$T_{i\max}$	336	288	240	200	192	160
$C_{i\max}$	158	208	350	340	258	267

表 4 工序对应的可加工制造资源

Tab. 4 Corresponding manufacturing resources of process

	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$
$F_1$	5	6	4	[2,9]	[3,7]	10
$F_2$	4	[2,9]	8	[6,7]	5	[1,10]
$F_3$	3	[6,8]	7	[2,1]	[4,10]	
$F_4$	5	2	[4,7]	10		
$F_5$	[4,5]	5	[9,10]	6	2	
$F_6$	[2,6]	4	[6,9]	7	8	[3,9]

表 5 工序在不同制造资源上对应加工时间

Tab. 5 Processing time in different manufacturing resources

	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$
$F_1$	3	10	9	[5,4]	[3,3]	4
$F_2$	6	[8,6]	4	[2,6]	3	[3,3]
$F_3$	4	[5,7]	7	[5,5]	[9,11]	
$F_4$	7	3	[4,6]	3		
$F_5$	[6,4]	10	[7,9]	8	5	
$F_6$	[3,7]	10	[8,7]	9	4	[9,4]

表 6 各工序在不同制造资源上对应加工成本

Tab. 6 Processing cost in different manufacturing resources

	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{14}$	$F_{15}$	$F_{16}$
$F_1$	11	25	14	[9,11]	[7,6]	8
$F_2$	15	[12,9]	8	[5,8]	4	[7,7]
$F_3$	8	[10,9]	11	[15,16]	[21,21]	
$F_4$	16	7	[8,11]	8		
$F_5$	[9,14]	18	[17,19]	16	13	
$F_6$	[8,13]	20	[13,15]	15	7	[15,13]

表 7 各制造资源负载度

Tab. 7 Load of manufacturing resources

$M_s$	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$
$L_s$	0.91	0.89	0.83	0.94	0.70
$M_s$	$M_6$	$M_7$	$M_8$	$M_9$	$M_{10}$
$L_s$	0.79	0.93	0.71	0.88	0.95

根据调度模型及算法, MATLAB 编程运算。为了评估 GA-PSO 混合算法的性能,在相同实验条件下,采用传统 GA 作为对比实验。初始化参数如下:迭代次数为 200,种群规模为 100,初始交叉概率为 0.8,变异概率为 0.3。GA-PSO 和传统 GA 求解的最优解变化曲线如图 6 所示。对比结果表明,相对于传统 GA,GA-PSO 具有更快收敛速度与全局探索。传统 GA 在迭代 40 次左右陷入了局部最优,并最终收敛于最优解 223,GA-PSO 混合算法在迭代次数为 30 时收敛于全局最优解 219。可以得出,GA-PSO 的收敛性和局部探索能力均优于传统 GA。

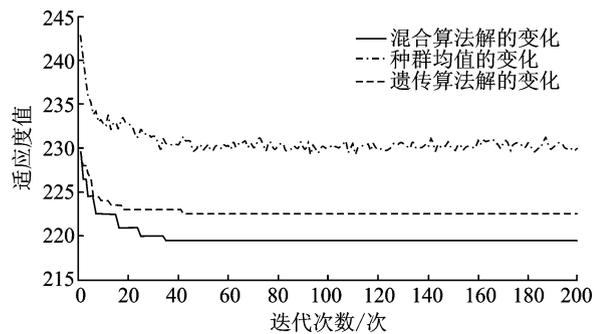


图 6 GA-PSO 混合算法求解最优解过程

Fig. 6 Process of GA-PSO hybrid algorithm for solving the optimal solution

最终得出的最优调度方案如图 7 所示。其中子任务 1 在总体加工 4 h 后开始,第一道工序在编号为 5 的资源上进行,第二道工序在编号为 6 资源上进行。所有制造任务在 50 h 后完成。

## 5 结束语

针对云制造资源的特点,以工序级为最小调度粒度,综合考虑云制造资源调度的主要影响因素,

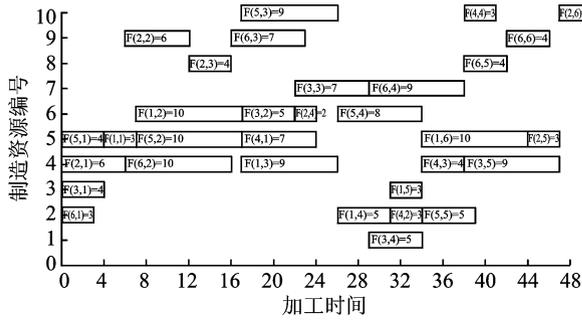


图7 最优调度方案

Fig. 7 Optimal scheduling scheme

以制造时间最短、制造成本最小以及制造资源负载率均衡为多目标,构建一个云制造资源的多目标调度优化模型。提出基于GA-PSO的混合云制造资源调度算法,结合利用了有较好全局搜索能力的遗传算法和具有局部搜索能力优势的粒子群算法,使整个调度过程在最短时间内收敛于全局最优解。最后以湖州某电梯制造企业的生产订单为例进行实验,结果证明了该算法可以有效解决云制造资源的多目标调度问题。

#### 参考文献:

- [1] REN Lei, ZHANG Lin, WANG Lihui, et al. Cloud manufacturing: Key characteristics and applications [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2017, 30(1):501-515.
- [2] 张霖,罗永亮,范文慧,等.云制造及相关先进制造模式分析[J].计算机集成制造系统,2011,17(3):458-468.  
ZHANG Lin, LUO Yongliang, FAN Wenhui, et al. Analyses cloud manufacturing and realted advanced manufacturing models[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(3):458-468.
- [3] ZHANG Lin, LUO Yongliang, TAO Fei, et al. Cloud manufacturing: A new manufacturing paradigm [J]. Enterprise Information Systems, 2014, 8(2): 167-187.
- [4] 鲁建厦,胡庆辉,董巧英,等.面向云制造的混流混合车间调度问题[J].中国机械工程,2017,28(2):191-198.  
LU Jianxia, HU Qinghui, DONG Qiaoying, et al. Cloud manufacturing-oriented mixed-model hybrid

shop-scheduling problem [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2017, 28(2):191-198.

- [5] 熊永华,王静,吴敏,等.面向多目标优化的云制造虚拟资源调度方法[J].计算机集成制造系统,2015,21(11):3079-3087.  
XIONG Yonghua, WANG Jing, WU Min, et al. Virtual resource scheduling method of cloud manufacturing oriented to multi-objective optimization[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2015, 21(11): 3079-3087.
- [6] LAILI Yuanjun, TAO Fei, ZHANG Lin, et al. A study of optimal allocation of computing resources in cloud manufacturing systems [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(5):671-690.
- [7] 李伯虎,张霖,任磊,等.云制造典型特征、关键技术与应用[J].计算机集成制造系统,2012,18(7):1345-1356.  
LI Bohu, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Typical characteristics, technologies and applications of cloud manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2012, 18(7):1345-1356.
- [8] 范泽兵,李山,陈冰,等.设备负载均衡的制造资源优化配置方法[J].机械设计与制造,2013,8:113-116.  
FAN Zebing, LI Shan, CHEN Bing, et al. Manufacturing resources optimal allocation method of the equipment load balancing [J]. Machinery Design and Manufacture, 2013, 8:113-116.
- [9] LI Kewu, ZHANG Gongxuan, ZHU Zhaomeng. A decomposition-based multi-objective workflow scheduling algorithm in cloud environment [J]. Computer Engineering & Science, 2016(8):13.
- [10] LENG Sheng, WEI Xiaobin, ZHANG Wenyi. Improved ACO scheduling algorithm based on flexibleprocess [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 23(2): 154-160.
- [11] FENG Yixiong, ZHANG Zhifeng, TIAN Guangdong, et al. Data-driven accurate design of variable blank holder force in sheet forming under interval uncertainty using sequential approximate multi-objective optimization [J]. Future Generation Computer Systems, 2017: <http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2017.02.048>.