

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.004

面向云制造的有限资源多任务调度博弈

舒 萧,王时龙,康 玲,杨 波,杨星星,邹海旭

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:为解决云制造环境下云服务组合优化调度问题,在深入分析目前优化调度问题存在的难点及研究不足的基础上,提出一种云制造环境下有限资源的多任务调度模型。考虑服务需求者间存在的利益冲突及重要的服务评价指标,以每个服务需求者作为博弈参与者,将每个任务的执行制造路径当作博弈策略,把时间、合格率、成本和服务质量组成的综合服务水平看作博弈支付函数,最终把有限资源的多任务调度问题转变为多个静态非合作博弈问题。在此基础上,将求解纯策略纳什均衡解的过程编制为算法,该算法所得的均衡解为每个任务的最终执行制造路径。实验仿真表明该模型及算法具有可行性及有效性。

关键词:云制造;多任务调度;有限资源;非合作博弈;纳什均衡

中图分类号:TP391.7

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2020)03-001-11

Multi-task scheduling game with limited resources for cloud manufacturing

SHU Xiao, WANG Shilong, KANG Ling, YANG Bo, YANG Xingxing, ZOU Haixu

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To solve the cloud service composition optimal-selection (CSCOS) problem in cloud manufacturing (CMfg), based on the deep analysis of the difficulties and shortcomings in current researches, an optimization model for multi-task scheduling with limited resources problem (MLSR) is proposed. Considering the interest conflicts of service demanders and important quality of service (QoS) indicators, the multi-task scheduling problem with limited resources is converted into multiple static non-cooperative game, and the service demander (SD), different execution manufacturing path of each task and comprehensive service level (CSL) are considered as game player, game strategy and game payoff of a game, respectively. On this basis, the process to seek the pure strategy Nash Equilibrium (PSNE) solution is compiled into an algorithm, whose solutions are the final manufacturing execution paths for each task. Finally, simulation results show the feasibility, effectiveness of both the model and algorithm.

Keywords: cloud manufacturing; multi-task scheduling; limited resources; non-cooperative game; Nash Equilibrium

收稿日期:2019-03-31; **网络出版日期:**2019-09-24

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAF02B02);教育部创新团队发展计划资助项目(IRT_15R64)。

Supported by National Science and Technology Support Plan Subsidization Project (2015BAF02B02) and Innovation Team Development Program of the Ministry of Education (IRT_15R64).

作者简介:舒萧(1994—),男,硕士研究生,主要从事云制造研究,(E-mail)1012753923@qq.com。

通讯作者:王时龙,男,教授,博士生导师,主要从事先进制造技术研究,(E-mail)slwang@cqu.edu.cn。

云制造是一种面向服务、高效低耗和基于知识的网络化智能制造新模式。它融合了现有信息化制造、云计算、物联网、语义 Web、高性能计算等先进信息技术,通过对现有网络化制造与服务技术进行延伸和变革,将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化,并进行统一、集中的智能化管理和经营,实现智能化、普适化和高效的共享和协同,通过网络为制造全生命周期过程提供可随时获取的、按需使用、优质廉价、安全可靠的服务^[1-3]。

云服务的组合优化(CSCOS, cloud service composition optimal-selection)为云制造落地实施的关键技术,目前,绝大多数学者着眼于单制造任务的组合优化研究^[4-9],具体的研究方法是把单任务分解为一系列具有逻辑关系的子任务,再将子任务与其对应的候选资源池相匹配(每个候选资源池中均存在多个候选制造资源,即服务需求方(SD, service demander)与服务提供方(SP, service provider)是“一对多”的服务形式),再对每个候选资源进行服务质量(QoS, quality of service)评价,最后采用各种优化算法(混合人工蜂群算法^[4]、双层规划^[5]、蚁群算法^[6]、混合教学算法^[7]、混沌控制算法^[8]、遗传人工蜂群混合算法^[9]等)从候选资源池中选出最优的制造资源提供服务,形成制造执行路径。

此外,还有少数学者对云制造环境下多任务的组合优化问题进行研究。刘卫宁等^[10]以单任务的研究为基础,融入多任务多联盟生成问题假设,建立了基于服务质量的多任务云服务组合模型,并采用改进遗传算法对问题进行求解;苏凯凯等^[11]采用带精英策略的遗传算法对多任务问题进行求解,并解决了制造服务需求方和云制造服务平台运营方的利益冲突;Liu 等^[12]提出了一种云制造多任务调度模型,考虑了任务工作负载和基本服务要素,进行了大量的实验仿真,以显示基于不同的工作负载的调度方法的效果。对于多云制造任务调度的研究方法,SD 与 SP 仍为“一对多”的服务形式。忽略了对于 SD 与 SP 之间“多对多”服务形式的研究,即为云制造环境下有限资源的多任务优化调度问题。

研究提出一种面向云制造的有限资源的多任务调度模型(MSLR, multi-task scheduling with limited resources),着眼于解决多个服务需求方对于单个(或多个)云服务同时需求而产生的冲突问题,而博弈论对于解决冲突问题有着天然的优势。服务需求方、每个任务的制造执行路径和综合服务水平被看作是博弈参与者、博弈策略和博弈支付函数,将 MSLR 问题转化为静态纯策略非合作博弈,并提出了纯策略纳什均衡算法(PSNE, pure strategy Nash Equilibrium algorithm)来解决问题。

1 有限资源多任务调度问题概述

在一个云制造系统中主要由制造服务需求方(SD)、制造资源提供方(SP)及云制造服务平台运营方^[1] 3 个主体组成。SP 提供制造服务资源,经由云平台将服务虚拟化、服务化后上传到云端形成资源云池。云服务的组合优化调度问题指的是根据 SD 提交的不同制造任务,云制造服务平台为其配置合理的制造服务资源或制造资源服务组合,并交由制造资源提供方完成制造任务的过程。云制造讲求分散资源集中使用,而资源的集中是一个相对缓慢的过程,在云制造发展初期会存在多个 SD 同时需求某服务而产生利益冲突的问题;而当云制造发展到一定程度时,也会存在多个 SD 对有限的优质资源产生需求的利益冲突问题。笔者提出了面向云制造的有限资源的多任务调度问题,给出以下定义:

定义 1 有限资源的多任务调度问题(MSLR):在云制造服务优化调度过程中,能提供的优质服务资源的 SP 是有限,把多个 SD 同时需求一个服务或多个服务定义为 MSLR。

目前 MSLR 所存在的难点主要为以下 2 点:①当多个 SD 同时需求同一个服务,如何合理分配服务。②当同类多个 SD 同时提出资源需求,在 SP 有限时如何安排各个 SD 的制造过程。为解决以上问题展开研究。

研究采用文献[6]中对调度优化问题中的各对象的定义。分别为物理制造单元(PMU, physical manufacturing unit)、逻辑制造过程(LMP, logical manufacturing process)、逻辑制造任务(LMT, logical manufacturing task)及执行制造路线(EMP, execute manufacturing path)。在多任务优化调度过程中,存在多个 LMP,每个 LMP 又可以分解为多个 LMT,由不同的 PMU 执行每个 LMT,进而获得 EMP。

面向有限资源的多任务服务优化调度过程如图 1 所示。从 SP 角度出发,制造资源被集中为面向服务的 PMU,根据 PMU 能够独立完成的 LMT,将所有的 PMU 投入不同的物理制造单元组(制造资源候选集)中,

以物理制造单元组的形式发布到制造云池中。从 SD 角度来说,制造任务被抽象为 LMP,再将 LMP 分解为一系列 LMT,具有相同任务特性(能被同一 PMU 加工)的 LMT 将被投入同一任务池中,制造任务将以任务池的形式发布到云池中。任务池与物理制造单元组的匹配是多任务调度优化问题的基础,接下来则需要从对应的物理制造单元组中为每一 LMT 选出合理的制造服务以形成 EMP。

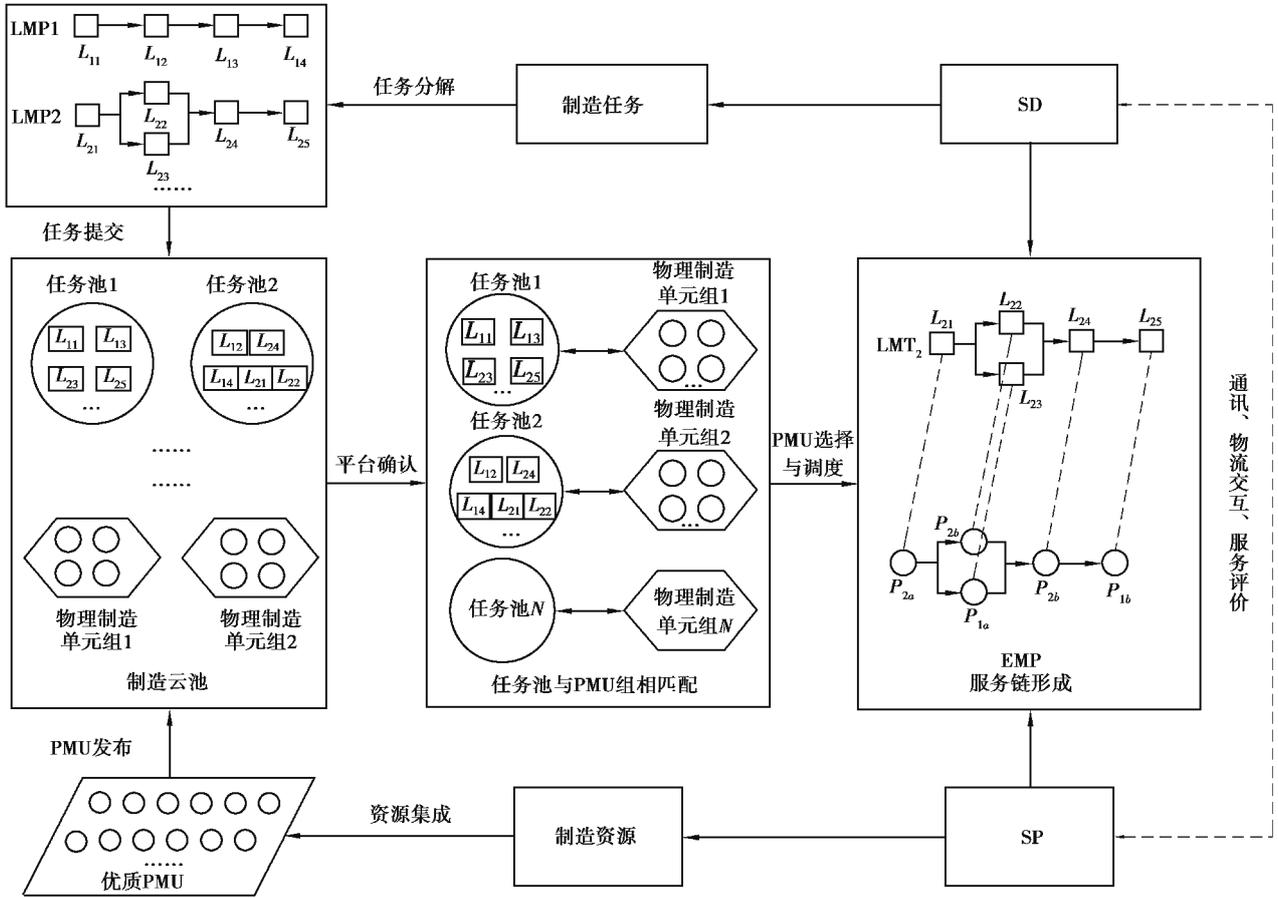


图 1 MSLR 优化过程

Fig. 1 MSLR optimization process

2 有限资源多任务调度数学模型

2.1 模型假设

为了让本模型更加完善,做出以下几个假设:

- 1) 由毛坯供应所在地 (LS) 到第一个 PMU 所在地点的物流时间为 2 d, 成本为 2 元/kg;
- 2) 由最后一个 PMU 到物流终点 LE 的物流时间与成本均忽略不计;
- 3) 工件在加工中的重量损失忽略不计;
- 4) 每个 PMU 对不同 LMT 进行加工需要 1 d 的准备时间。

2.2 优化目标函数

将物理制造单元 PMU 表示为

$$P_{PMU}(L_{PMU}, S_E, P), \tag{1}$$

式中: L_{PMU} 表示 PMU 的位置信息; S_E 表示 PMU 参与云制造过程后所获的服务优劣信息; P 为合格率, 表示提供本次服务的零件合格率信息。

在多任务调度模型中, 用 G_T 表示总的制造任务, 可由多个单制造任务集表示

$$G_T = \{M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n\}, \tag{2}$$

式中, M_i 为第 i 个制造任务, 可表示为

$$M_i(L_S, L_E, Q_D, B_Q, L_{LMP}), \quad (3)$$

式中: L_S 表示本次服务的物流起始地点(毛坯供应所在地); L_E 表示本次服务的物流终点(订单交付地点, 即 SD 所在地); Q_D 为订单中零件的数量; B_Q 为毛坯质量; 一个逻辑制造过程 L_{LMP} 由 n 个逻辑制造任务 $\{L_{LMT,1}, L_{LMT,2}, \dots, L_{LMT,n}\}$ 组成, 为

$$L_i = \{L_{LMT,1}, \dots, L_{LMT,j}, \dots, L_{LMT,n}\}, \quad (4)$$

式中, j 表示制造任务的逻辑制造先后顺序。在 MSLR 问题中, 每个 LMT 将会有 k 个 PMU 能够提供满足要求的服务, 用 P_t 表示与 L_i 对应的 PMU 集, P_t 为第 t 个物理制造单元组, 为

$$P_t = \{P_{PMU,1}(c, q, t), \dots, P_{PMU,k}(c, q, t)\}, \quad (5)$$

式中, c, q, t 分别表示由 $P_{PMU,i}$ 完成 $L_{LMT,i}$ 所承诺的价格、合格率及时间。

为每一 LMT 选取最优的 PMU 提供服务, 需要对选取 QoS 评价指标, 对 PMU 进行服务评价。过去很多学者对服务评价的指标进行了研究, 笔者采用文献[8]在服务调度优化问题中提出评价指标, 即完成时间 T 、产品质量 Q 、加工成本 C 和加工服务水平 S , 构建面向有限资源的多任务调度模型的优化指标。

2.2.1 完成时间

一个 LMT 的完成时间 T 主要包含物流时间 T_M 和制造时间 T_L 。制造时间包含等待时间、准备时间及加工时间等。因此一个制造过程的时间参数可以表示为

$$T = m_t(x_{i,j}) + l_t(x_{i,j-1}, x_{i,j}), \quad (6)$$

式中: $x_{i,j}$ 表示为 $L_{LMP,i}$ 中的 $L_{LMT,j}$ 选中的 PMU, $m_t(x_{i,j})$ 表示由 PMU 所承诺的完成 $L_{LMT,j}$ 的制造时间; $l_t(x_{i,j-1}, x_{i,j})$ 表示由 $L_{LMT,j-1}$ 到 $L_{LMT,j}$ 的物流时间。

2.2.2 加工成本

一个制造任务的加工成本 C 包括了物流成本 C_M 和制造成本 C_L , 为

$$C = C_M + C_L = Q_D(m_c(x_{i,j}) + B_Q * l_c(x_{i,j-1}, x_{i,j})), \quad (7)$$

式中: $m_c(x_{i,j})$ 表示由 PMU 完成 $L_{LMT,j}$ 所承诺的制造成本; $l_c(x_{i,j-1}, x_{i,j})$ 表示由 $L_{LMT,j-1}$ 到 $L_{LMT,j}$ 的物流成本。

2.2.3 产品质量

由 SP 所承诺的产品制造合格率表示产品的质量水平。一个制造任务的产品质量可表示为

$$Q = q(x_{i,j}), \quad (8)$$

式中, $q(x_{i,j})$ 表示完成 $x_{i,j}$ 的 PMU 所承诺的合格率。

2.2.4 服务优劣

一个制造任务的服务优劣评价可用表示为

$$S = s(x_{i,j}), \quad (9)$$

式中, $s(x_{i,j})$ 表示对完成 $x_{i,j}$ 的 PMU 的历史服务水平评价。

文中的优化约束主要是在一个 LMP 中, 一个 $L_{LMT,j}$ 的开始时间 T_s 应该大于前一个任务 $L_{LMT,j-1}$ 的完成时间 T_c 与其物流时间 l_t 之和, 数学表达式为

$$T_s(x_{i,j}) \geq T_c(x_{i,j-1}) + l_t(x_{i,j-1}, x_{i,j}). \quad (10)$$

2.3 参数无量纲化处理

上述 4 个评价参数具有不同的量纲和变化范围, 在处理过程中不能对其进行简单的叠加, 需要对其进行无量纲化处理。将以上 4 个指标分为 2 类, 并采用文献[13]中的方法其进行处理。①效益指标(越大越): Q, S ; ②成本型指标(越小越好): T, C 。无量纲化处理后的结果为

$$r_Q(X) = \frac{Q(X) - Q(X)_{\min}}{Q(X)_{\max} - Q(X)_{\min}}, \quad (11)$$

$$r_S(X) = \frac{S(X) - S(X)_{\min}}{S(X)_{\max} - S(X)_{\min}}, \quad (12)$$

$$r_T(X) = \frac{T(X)_{\max} - T(X)}{T(X)_{\max} - T(X)_{\min}}, \quad (13)$$

$$r_c(X) = \frac{C(X)_{\max} - C(X)}{C(X)_{\max} - C(X)_{\min}} \quad (14)$$

则优化问题的目标函数可定义为

$$f(X) = w_Q r_Q(X) + w_S r_S(X) + w_T r_T(X) + w_C r_C(X), \quad (15)$$

式中, X 为 LMT, w_Q 、 w_S 、 w_T 和 w_C 分别为加工质量、服务水平、加工成本及加工时间的权重系数,且 $w_Q + w_S + w_T + w_C = 1$ 。在求解权重系数中最常用的方法是层次分析法,但在实际情况中,各种指标的分布受各服务需求方不同偏好的影响,由层次分析法所得的权重亦不一定为最优的权重分布。不对各权重系数进行推演,采取文献[6]的权重系数为

$$w_Q = 0.4647; w_S = 0.0634; w_T = 0.1791; w_C = 0.2929.$$

由此权重系数可以看出:SD 最看重的是制造任务的质量水平,其次是资金成本与时间成本,而服务质量则不被看重。

3 有限资源多任务调度博弈

在 MSLR 问题中,不能只关注每个独立的 LMP 的最优制造过程,需化解 LMT 间的利益冲突问题,需协调、安排每个任务的制造过程,最终获得一个相对最优的结果。博弈论解决这种具有冲突特点的问题有突出优势,所以文中采用博弈论来解决 MSLR 问题。博弈论是数学经济定律,指的是多个博弈者之间通过改变他们各自的博弈策略来获得最大的博弈支付的问题^[14]。目前,博弈论在各种工程问题中得到了广泛的应用^[15-16]。文献[11]采用博弈论来解决多任务无限资源的优化调度问题,着眼于化解制造服务需求方和云制造服务平台运营方的利益冲突,而文中则侧重于化解多个服务需求方间的利益冲突。博弈论可分为合作博弈和非合作博弈,在合作博弈中博弈者之间可制定一些具有约束力的协议,而非合作博弈则不能。调度博弈问题可以看作是一个 N 人参与的非合作博弈,同时博弈者之间的信息是完全公开透明的。笔者将服务需求者看作博弈者,服务需求者通过改变制造策略来获得更好的综合服务质量,则不同的制造调度策略即为博弈策略,综合服务质量为博弈支付。可以将该模型看作一个多元数组,为

$$G = \{N, S, U\}, \quad (16)$$

式中: N 为博弈参与者; S 为博弈策略; U 为博弈支付。

3.1 参与者

在服务调度优化博弈中,SD 为追求最优的综合服务质量参与博弈。在算法编制时,把 SD 的目标赋予物理制造单元组(物理制造单元组中的所有 PMU 均想为 SD 提供最优的服务质量),将 P_i 中的 PMU 作为博弈参与者。博弈开始时,将有 n 个 PMU,这些物理制造单元将被分到 t 个物理制造单元组中,每个小组里的 PMU 在一场博弈中被视作服务候选者。如果某属于物理制造单元组 $P_i = \{P_{PMU,q}, P_{PMU,p}, \dots\}$ 的某一 PMU 可完成加工任务,那么 P_i 中的所有 PMU 视为参与第 h 阶段的博弈。定义博弈者为 $N_i^h = \{P_{PMU,q}, P_{PMU,p}, \dots\}$,其中 N_i^h 表示第 h 个博弈阶段与 P_i 对应的博弈参与者集。

3.2 博弈策略

在 MSLR 博弈开始时,建立与 P_i 相匹配的任务池 $T_{TP} = \{T_{TP1}, T_{TP2}, \dots, T_{TPn}\}$,把属于不同逻辑制造过程的第一个逻辑制造任务投入相应的任务池中。当制造过程的某个逻辑任务已在执行,则在下一博弈阶段把此逻辑制造过程的下一逻辑任务投入相应任务池中继续博弈,直到完成整个制造过程。如果在博弈阶段 h 中 P_i 为一组博弈参与者,那可将与 P_i 对应的任务池看作是博弈策略,即 $S_i^h = tp_i^h$,其中 S_i^h 表示 h 阶段中相对于 P_i 的博弈策略, tp_i^h 表示 h 阶段中相对于 P_i 的任务池。当博弈参与者的数量多于博弈策略时,可在博弈策略集中加入空策略 Φ (博弈支付为 0 的制造任务),以保证博弈的正常进行。在调度优化博弈中,每个 SD 通过采用合理的加工序列来获得最大化综合服务水平,同时将所有其他博弈者的综合服务水平最小化。因此,博弈收益不仅仅与自身策略有关,还与其他博弈者的博弈策略相关。

3.3 博弈支付

博弈支付是博弈者在博弈阶段 h 中所获得的红利,可将其看作博弈策略的指示器,博弈者采用最优策略来获得最大的博弈支付。博弈支付即为任务需求方在第 h 博弈阶段中所获的综合服务水平,为

$$U_k^h(s) = f(X), \tag{17}$$

式中, $U_k^h(s)$ 表示第 h 个博弈阶段第 k 个博弈参与者的博弈支付。

解决云制造环境下有限资源多任务调度博弈问题,其关键点在于将任务池看作是博弈策略集,将综合服务水平看作是博弈支付。在整个博弈过程中,将要经过 H 个博弈阶段,来完成任务池中所有制造过程。初始博弈阶段为 $h=1$,当所有物理制造单元组中至少有一个 PMU 完成制造任务时,博弈则进入下个阶段。

3.4 纳什均衡

纳什均衡(NE)被广泛应用于 N 人非合作博弈中。纳什均衡是所有博弈策略中的均衡点,处于均衡状态时每个博弈参与者不能通过私自修改自身的博弈策略来获得更大的博弈支付,即此时为博弈参与者的相对最优策略。当参与博弈的博弈者数量有限时,此博弈则至少存在一个均衡点。多任务调度博弈可看作是 N 人静态纯策略博弈,优化求解过程即为均衡点的寻解过程,参考文献[3]给出了 N 人静态纯策略 NE 求解方法。

定义 设在 n 人有限纯策略静态博弈中,第 k 个博弈者的收益函数为 $U_k(s), s \in S$ 。当存在: $s^* = (A^{1*j_1}, A^{2*j_2}, \dots, A^{n*j_n}) = (s^{k-1*}, A^{k*j_k}, s^{k+1*})$, 使得 $U_i(s^*) = U_k(s^{k-1*}, A^{k*j_k}, s^{k+1*}) \geq U_k(s^{k-1*}, A_i^k, s^{k+1*}), \forall A_i^k \in S_i, i=1, 2, \dots, n$, 则称 s^* 为 n 人有限纯策略静态博弈的 NE。

记 $T_k(s^{k-1}, s^{k+1}) = \{s^{k-1}, A^{kjl}, s^{k+1} | \max_{A^{kjl} \in S_k} U_k(s^{k-1}, A^{kjl}, s^{k+1})\}, k=1, 2, \dots, n$ 则 $\bigcap_{k=1}^n T_k$ 则为一个纯策略静态博弈的 NE。由于博弈参与者的数量有限,满足均衡解存在条件,所以: $\bigcap_{k=1}^n T_k \neq \Phi$, 即每次博弈都至少存在一个 NE。当有多个均衡解时,则每个解的博弈支付相当,文中选取使制造时间更为合理的解。

3.5 纯策略纳什均衡算法(PSNE)

为了方便计算 NE,将 NE 求解过程采用 MTLAB R2016a 编制算法程序,算法流程如图 2 所示。

步骤 1 记录博弈阶段 $h=1$;

步骤 2 获取本阶段所有的物理制造单元 PMU 及所有的任务池;

步骤 3 划分物理制造单元组 P_i , 将物理制造单元组作为博弈参与者;

步骤 4 获取所有可行的制造过程,形成任务池,将任务池看作是博弈策略集;并与 P_i 相匹配;

步骤 5 博弈参与者与博弈策略相匹配;

步骤 6 建立所有博弈策略的博弈支付函数 $U_k^h(s)$;

步骤 7 计算纯策略集: $T_k^h(s^{k-1}, s^{k+1}), k=1, 2, \dots, n$, 记录下每个 T_k^h ;

步骤 8 计算 $\bigcap_{k=1}^n T_k^h$, 记录下本阶段的博弈均衡解;

步骤 9 博弈阶段加 1, 循环步骤 2~8 直到完成所有阶段的博弈。

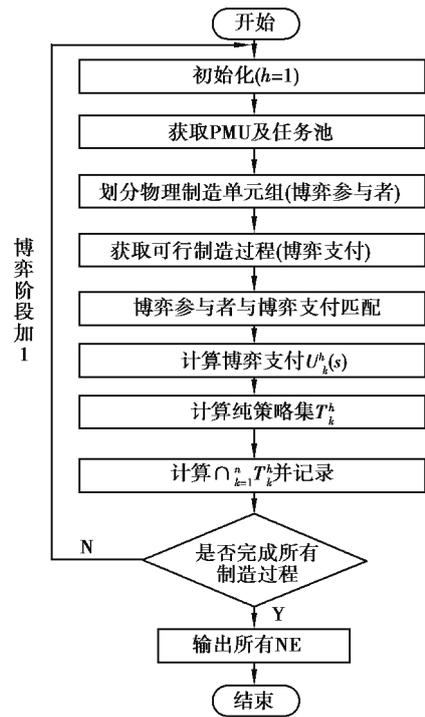


图 2 纯策略纳什均衡算法流程图

Fig. 2 PSNE algorithm flow chart

4 算例分析

4.1 初始条件

本算例中包括 6 个 PMU(如表 1 所示),随机的分布在 6 个城市,共有 3 个物理制造单元组分别为: $P_1 = \{P_{PMU1}, P_{PMU2}\}, P_2 = \{P_{PMU3}, P_{PMU4}\}, P_3 = \{P_{PMU5}, P_{PMU6}\}$ 。每个城市之间的物流成本如表 2 所示,数据由国内的某物流商提供。本模型中总共有 9 个逻辑制造过程,每个过程分为 3 个逻辑制造任务,任务的详细信息由表 3 给出,表中 T_{11} 行 P_{PMU1} 列所对应的数据 3/0.90/209 表示由 P_{PMU1} 加工完成 T_{11} 所需的加工时间为 3 d、合格率为 0.90 和加工成本为 209 元/件。表 3 中时间、合格率和报价数据均在一定范围内,由正太分布生成。表 4 为加工毛坯零件的质量和数量。

表 1 PMU 信息
Table 1 PMU information

PMU	地点 (L , city)	服务评价 S
P_{PMU1}	C_5	7.9
P_{PMU2}	C_2	9.6
P_{PMU3}	C_4	8.0
P_{PMU4}	C_6	8.1
P_{PMU5}	C_1	9.3
P_{PMU6}	C_3	8.8

表 2 物流时间与成本
Table 2 Logistics time and cost

	d/(元·千克 ⁻¹)					
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	0/0	2/2.35	2/2.25	3/2.7	3/2.2	3/3
C_2		0/0	1/0.9	2/1.75	3/2.65	3/2.55
C_3			0/0	2/1.9	3/2.65	3/2.5
C_4				0/0	3/2.8	3/2.25
C_5					0/0	2/1.85
C_6						0/0

表 3 制造时间(天)/合格率/成本(元)
Table 3 Manufacturing time (days) / pass rate / cost (yuan)

LMP	LMT	可用 PMU 及其时间、合格率、报价					
		P_{PMU1}	P_{PMU2}	P_{PMU3}	P_{PMU4}	P_{PMU5}	P_{PMU6}
T_1	T_{11}	3/0.90/209	4/0.93/240				
	T_{12}			4/0.92/112	5/0.99/102		
	T_{13}					3/0.98/195	4/0.91/183
T_2	T_{21}			3/0.93/75	3/0.97/90		
	T_{22}	3/0.98/98	5/0.96/60				
	T_{23}					5/0.97/68	5/0.92/41
T_3	T_{31}					5/0.95/56	4/0.91/59
	T_{32}	3/0.99/55	4/0.95/44				
	T_{33}			6/0.98/238	4/0.92/151		
T_4	T_{41}					3/0.95/179	5/0.97/168
	T_{42}			4/0.95/57	3/0.91/53		
	T_{43}	6/0.97/168	4/0.91/165				
T_5	T_{51}			6/0.93/33	5/0.92/63		
	T_{52}					4/0.97/55	3/0.90/56
	T_{53}	6/0.93/132	5/0.92/163				
T_6	T_{61}			6/0.94/51	4/0.95/72		
	T_{62}	5/0.97/102	3/0.91/110				

续表3

LMP	LMT	可用 PMU 及其时间、合格率、报价					
		P_{PMU1}	P_{PMU2}	P_{PMU3}	P_{PMU4}	P_{PMU5}	P_{PMU6}
T_7	T_{63}					6/0.99/123	5/0.97/97
	T_{71}	3/0.98/155	4/0.92/122				
	T_{72}					3/0.92/160	3/0.95/200
T_8	T_{73}			4/0.98/140	3/0.93/133		
	T_{81}	4/0.98/60	3/0.94/55				
	T_{82}					4/0.97/68	6/0.95/31
T_9	T_{83}			4/0.99/76	3/0.92/52		
	T_{91}					5/0.95/156	4/0.91/159
	T_{92}			3/0.95/179	4/0.91/243		

表 4 毛坯质量及数量

Table 4 Blank quality and quantity

LMP	数量/件	质量/kg
T_1	290	15
T_2	351	7
T_3	260	7
T_4	392	10
T_5	268	21
T_6	331	10
T_7	379	21
T_8	427	9
T_9	444	23

4.2 结果分析

利用 PSNE 算法得到的结果是一个考虑了时间、合格率、成本和服务质量综合优度的结果,不仅是时间最优结果。而对于一般的调度问题,甘特图能够直观地表现调度结果。如图 3 所示,图中横轴为时间(d),纵轴为 PMU,总的调度时间为 39 d。下面对博弈过程进行简要说明,在第一博弈阶段中,物理制造单元组 $P_1 = \{P_{PMU1}, P_{PMU2}\}$ 在所对应的任务池为 $tp_1^1 = \{T_{11}, T_{71}, T_{81}\}$, 经过博弈后所得到的 NE 为 $\{T_{71}, T_{81}\}$ 与 $\{T_{81}, T_{71}\}$, 而 $\{T_{81}, T_{71}\}$ 在本次博弈中的所需的制造时间更短,被选定为本次博弈结果,即 P_{PMU1} 加工完成 T_{81} , P_{PMU2} 加工完成 T_{71} 。当博弈进入下一阶段时则把 T_{82} 与 T_{72} 分别投入相应的任务池中,而 T_{11} 则投入 tp_1^2 中。

在图 3 的结果中,逻辑制造过程 T_1 与 T_9 在与其他 LMP 匹配中所获得的综合服务水平低于其他制造过程,导致了 T_1 与 T_9 的制造延后。在实际情况下,某些任务具有完成时间限制,文中把 T_1 与 T_9 加入优先制造序列,即每个博弈阶段优先为优先制造序列中的制造过程寻找服务,再对其余的制造过程进行博弈,优化结果如图 4 所示,总的调度时间为 43 d。在 T_1 与 T_9 加入优先制造序列情况下,为保证所在制造任务所获得综合服务水平,在调度时间上有所牺牲。

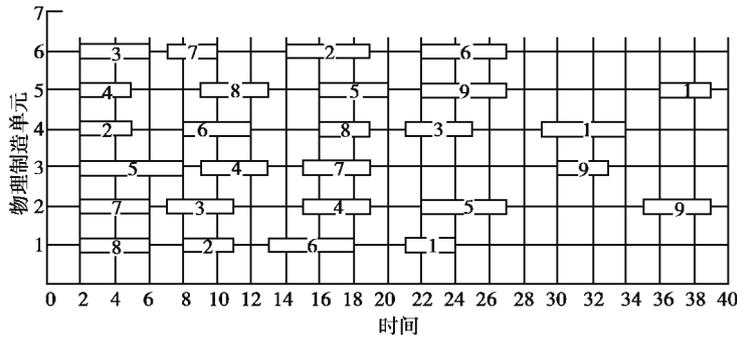


图 3 多任务调度博弈结果

Fig. 3 Multi-task scheduling game result

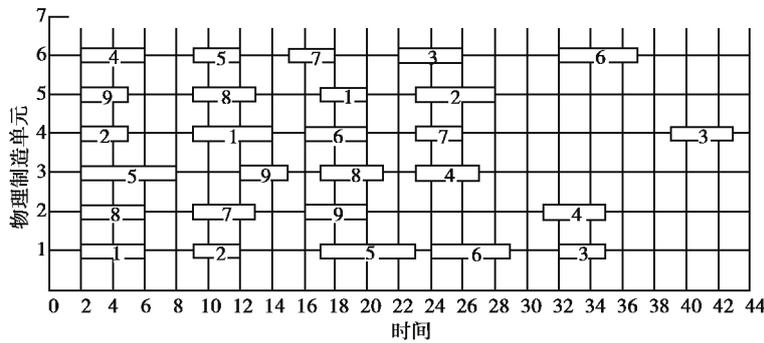


图 4 优先制造序列

Fig. 4 Priority manufacturing sequence

图 5 表示所有逻辑制造过程的综合服务水平对比图,虚线表示在正常调度结果下所有 LMP 获得综合服务水平,实线表示优先制造序列下所有 LMP 获得的综合服务水平。由图 5 可看出,将 T_1 与 T_9 加入优先制造序列会使得, T_3 、 T_5 、 T_7 与 T_8 所获得的综合服务水平降低, T_1 、 T_6 、 T_9 所获得的综合服务水平保持不变, T_2 、 T_4 所获得的综合服务水平略微增加,所有逻辑制造过程获得的总综合服务水平下降了 3.42%。文中经过多次实验总结如下规律,将某逻辑制造过程加入优先制造序列,会使得所有的逻辑制造过程获得的总综合服务水平下降。

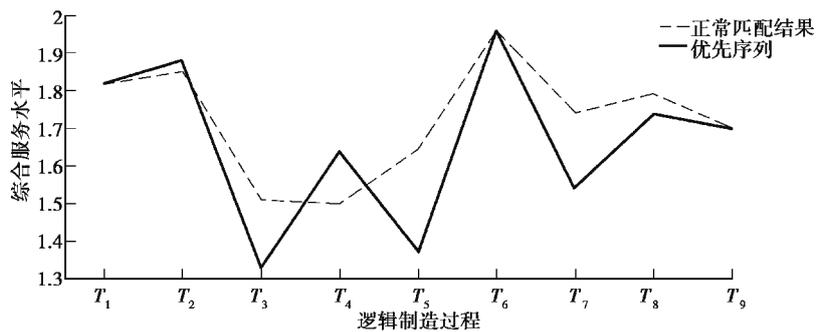


图 5 综合服务水平对比图

Fig. 5 Comprehensive service level comparison chart

为了评估博弈调度算法的优越性,将文中的调度策略与以下已提出的调出策略进行比较,例如由张超勇等^[17]提出的改进非支配遗传算法调度策略(NSGA-II)及由 He 等^[18]提出的右移调度策略(Right Shift)。结果对比如图 6 所示,3 种调度策略所获得的总综合服务水平如表 5 所示。

由图 6 可以得出在调度时间上: $t_{NSGA-II} < t_{PSNE} < t_{RightShift}$, 即由非支配遗传算法调出策略得出的调度时间最优。由表 5 可以得出所有任务获得的总综合服务水平对比为: $t_{NSGA-II} < t_{RightShift} < t_{PSNE}$, 由 PSNE 计算获得

的解为最优综合服务水平解。虽然 NSGA-II 在调度时间上最优,但却牺牲了其他指标的收益,所获得的总综合服务水平最低。而文中所提出的博弈调度法所获得总综合服务水平最高,表明了该方法的优越性。

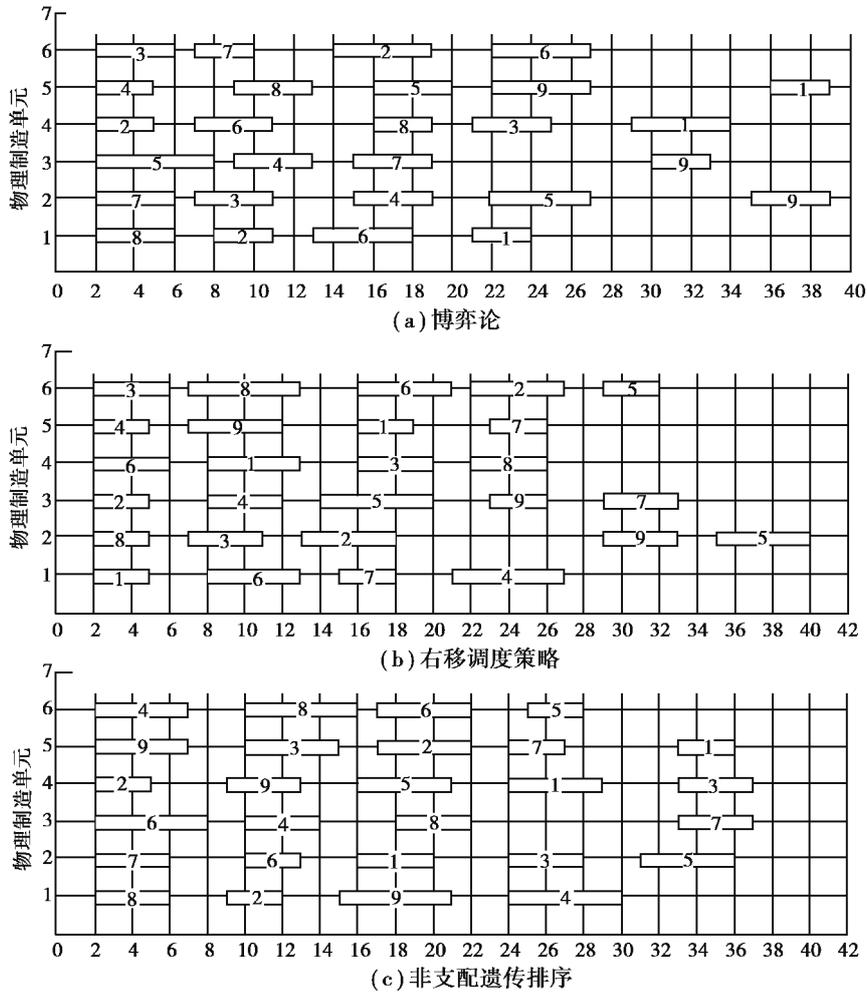


图 6 多种方法调度结果

Fig. 6 Multiple methods scheduling results

表 5 总综合服务水平

Table 5 Total comprehensive service level

调度策略	总综合服务水平
Game Theory	15.51
Right Shift	15.27
NSGA-II	14.79

5 结 论

提出了面向多任务的有限资源的优化调度模型,将以往对于多任务资源优化调度中 SD 与 SP“一对多”服务模式转化为本文的“多对多”“多对一”形式。采用了非合作博弈的方法,将服务需求方作为博弈参与者,以每个任务的制造执行路径作为博弈策略,把时间、合格率、成本和服务组成的综合服务水平作为博弈支付函数,建立一种多任务资源优化调度的博弈决策数学模型。采用 PSNE 算法获得纯策略非合作博弈的纳什均衡解,均衡解即为最终的制造执行路径。算例论证结果表明文中提出的面向多任务的有限资源优化调度博弈法能够有效地解决 MSLR 问题,合理地化解了各 SD 间的利益冲突,算例论证了该模型及算法的有效性及其可行性。

参考文献:

- [1] 李伯虎, 张霖, 王时龙, 等. 云制造: 面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-7,16.
LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7,16.(in Chinese)
- [2] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 再论云制造[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 449-457.
LI Bohu, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Further discussion on cloud manufacturing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3):449-457. (in Chinese)
- [3] 李正龙. 一种 n 人静态博弈纯策略纳什均衡存在性判别法[J]. 运筹与管理, 2004, 13(1): 33-37.
LI Zhenglong. An existence distinguishing method for pure strategy Nash equilibrium existence in n-person static games [J]. Operations Research and Management Science, 2004, 13(1): 33-37.(in Chinese)
- [4] Zhou J J, Yao X F. Multi-objective hybrid artificial bee colony algorithm enhanced with Lévy flight and self-adaption for cloud manufacturing service composition[J]. Applied Intelligence, 2017, 47(3): 721-742.
- [5] 苏凯凯, 徐文胜, 李建勇, 等. 云制造环境下基于双层规划的资源优化配置方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(7): 1941-1952.
SU Kaikai, XU Wensheng, LI Jianyong, et al. Manufacturing resource allocation method based on bi-level programming in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(7): 1941-1952.(in Chinese)
- [6] Cao Y, Wang S L, Kang L, et al. A TQCS-based service selection and scheduling strategy in cloud manufacturing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1-4):235-251.
- [7] Zhou J, Yao X. Hybrid teaching-learning-based optimization of correlation-aware service composition in cloud manufacturing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017:1-19.
- [8] Huang B Q, Li C H, Tao F. A chaos control optimal algorithm for QoS-based service composition selection in cloud manufacturing system[J]. Enterprise Information Systems, 2014, 8(4): 445-463.
- [9] Xue X, Wang S F, Lu B Y. Manufacturing service composition method based on networked collaboration mode[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 59: 28-38.
- [10] 刘卫宁, 刘波, 孙棣华. 面向多任务的制造云服务组合[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(1): 199-209.
LIU Weining, LIU Bo, SUN Dihua, et al. Multi-task oriented service composition in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(1):199-209. (in Chinese)
- [11] 苏凯凯, 徐文胜, 李建勇. 云制造环境下基于非合作博弈的资源优化配置方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2228-2239.
SU Kaikai, XU Wensheng, LI Jianyong. Manufacturing resource allocation method based on non-cooperative game in cloud manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(8): 2228-2239.(in Chinese)
- [12] Liu Y K, Xu X, Zhang L, et al. Workload-based multi-task scheduling in cloud manufacturing [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 45: 3-20.
- [13] 马文龙, 王铮, 赵燕伟, 等. 基于改进蚁群算法的制造云服务组合优化[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 113-121.
MA Wenlong, WANG Zheng, ZHAO Yanwei, et al. Optimizing services composition in cloud manufacturing based on improved ant colony algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(1): 113-121.(in Chinese)
- [14] Rasmusen E. Games and information; an introduction to games theory[J]. The Economic Journal, 1989, 99(397): 864.
- [15] Nawa N E. Agents that acquire negotiation strategies using a game theoretic learning theory[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2006, 21(1):5-39.
- [16] Marco G D, Romaniello M. Beliefs correspondences and equilibria in ambiguous games[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2012, 27(2): 86-107.
- [17] 张超勇, 董星, 王晓娟, 等. 基于改进非支配排序遗传算法的多目标柔性作业车间调度[J]. 机械工程学报, 2010, 46(11): 156-164.
ZHANG Chaoyong, DONG Xing, WANG Xiaojuan, et al. Improved NSGA-II for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(11): 156-164.(in Chinese)
- [18] He W, Sun D H. Scheduling flexible job shop problem subject to machine breakdown with route changing and right-shift strategies[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1-4):501-514.