

文章编号: 1000-8152(2007)01-0000-00

## 基于多 Agent 的虚拟企业任务调度模型及优化

赵强<sup>1</sup>, 肖人彬<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 CAD 中心, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 系统科学研究所, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 采用多智能体技术构建虚拟企业任务调度模型, 并对基于该模型的任务调度运作过程进行说明. 针对调度优化问题, 以资源智能体承担的生产任务为研究对象, 综合考虑生产任务之间的时序逻辑关系、作业时间及资源自身已确定的生产任务等影响因素, 建立以生产延续时间最小为目标的优化模型, 给出粒子群优化求解算法. 应用实例及数字仿真验证了模型及优化算法有效性.

**关键词:** 虚拟企业; 任务调度; 多智能体系统; 粒子群优化

**中图分类号:** TP301      **文献标识码:** A

## The Mutil-Agent Based Model for Task Scheduling in Virtual Enterprise and Its Optimization

ZHAO Qiang<sup>1</sup>, XIAO Ren-bin<sup>2</sup>

(1. CAD Center, Huazhong University of Science and Technology,  
Hubei Wuan 430074, China;

2. Institute of Systems Science, Huazhong University of Science and Technology,  
Hubei Wuan 430074, China)

**Abstract:** By means of multi-agent technology, task scheduling model in virtual enterprise (VE) is presented, what's more, the operation process of task scheduling in VE based on above model is explained. As for optimization problem of task scheduling, taken production tasks of each resource agent as research objective, the model for task scheduling in VE for minimizing production duration is established, in which logical relationship among subtasks, as well as operation time of each subtask, given production activities of each resource agent and so on is considered, furthermore, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is brought forward for solving it. Real example and numerical simulation show that task scheduling model in VE and optimization algorithm are effective.

**Key words:** virtual enterprise; task scheduling; multi-agent system; particle swarm optimization

### 1 引言 (Introduction)

虚拟企业 (VE) 具有结构灵活、快速响应等特性, 因而受到越来越多企业的重视. 当企业面临某些核心资源缺乏或能力限制, 而无法独立完成某生产任务时, 可以通过构建 VE 来完成该任务. 通常盟主企业首先将生产任务分解、归并为若干子任务, 然后采取招标或选择代理等方式选择适宜合作企业承担相应子任务, 最终通过合作企业共同努力完成整个生产任务. 任务调度关系到 VE 运作成败, 因此成为 VE 一项重要研究内容. 任务调度也是典型的 NP 难题<sup>[1]</sup>, 并且由于 VE 具有离散性、不确定性、动态性等特点, 使其任务调度变得更为复杂. 通常采用

的禁忌搜索法、遗传算法等单一优化方法已不能较好解决 VE 任务调度问题. 将多智能体 (Mutil-Agent) 技术与优化算法相结合为解决 VE 动态任务调度问题提供了方法<sup>[2]</sup>.

目前采用多智能体技术研究 VE 构建、生产运作及协调管理的成果较多, 但很少研究涉及 VE 任务调度问题, 并且已有任务调度优化模型存在一定不足. 文 [3] 建立的 VE 任务调度模型仅考虑子任务的完成时段, 模型较简单, 并且给出的启发式算法仅能确定有效解存在性, 很难得到较优的调度方案. 本文认为 VE 任务调度优化问题类似于 JobShop 问题, 但该问题更复杂, 突出表现为生产任务之间约束

关系复杂性,如某些任务可能存在多个紧前或紧后任务,同时需考虑成员地理位置分散的特点,此外,资源自身已确定的生产任务也是影响VE任务调度优化的重要因素,而该因素往往被忽视,如文[4].因此VE任务调度的模型及优化求解算法需进一步扩展,才能更好运用于VE任务调度问题.本文将构建VE任务调度运作模型,并综合考虑生产任务之间的时序逻辑关系、作业时间、资源自身已确定的生产任务等影响因素,建立VE任务调度的优化模型,给出粒子群优化求解算法.结合多智能体技术与优化算法能够较为有效地解决VE任务调度问题.

### 2 任务调度模型 (Model for task scheduling)

文[5]提出的调度模型包括任务智能体 (Task Agent, TA)、调度智能体 (Scheduling Agent, SA) 及执行监控智能体 (Implement Agent, IA). 本文依据VE任务调度需要,新增管理智能体 (Management Agent, MA)、任务分解智能体 (Decomposition Agent, DA) 及资源智能体 (Resource Agent, RA), 并建立产品、订单数据库与决策模型及算法知识库,VE任务调度运作模型如图1所示.

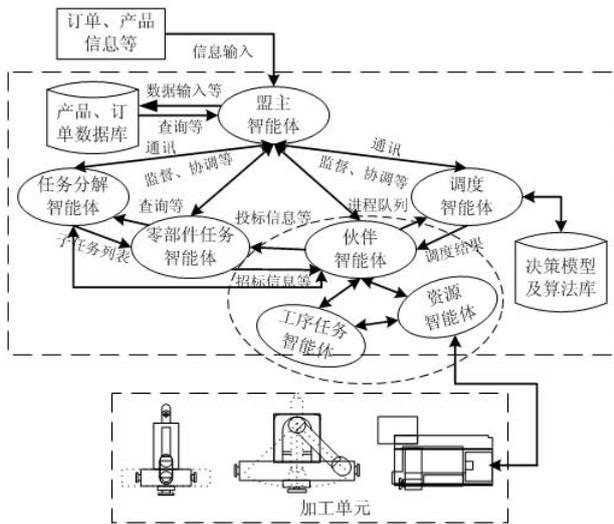


图1 基于多智能体的VE任务调度运作模型

Fig. 1 Mutil-agent based Model for task scheduling in VE

上述模型中,MA负责其余智能体的监控及协调管理,并协调不同智能体之间信息交互,如DA进行任务分解时需参考RA部分信息,借助MA,DA与RA能实现信息交互;DA负责将MA传递的生产任务分解为若干具有时序约束关系的子任务,并将子任务列表传递给TA;TA通过招标等形式选择适宜的RA承担子任务,最终将所有子任务合理分配给RA,并监控其运行.若任务分配及子任务执行过程中出现意外情况,则TA通知MA进行协调解决;RA负责整个VE资源管理、配置及监控.当某企业加入到VE时,其所拥有的诸如原材料、设备、人

员等资源也成为VE资源一部分,并由RA负责注册登记,记录其数量、位置、功能及状态等信息;当资源某项信息发生变化时,由RA通知MA以便及时更新数据库信息.SA负责调用相应决策模型及算法知识库对每个子任务进程进行合理规划,使其满足预订目标要求(如生产延续时间最小、生产成本最低等),并将优化后的调度队列信息反馈给RA,再由RA执行相应子任务.通过智能体之间的协同合作,最终完成VE整个生产任务.

### 3 任务调度优化求解 (Optimization on task scheduling)

调度优化是VE任务调度运作模型的关键环节之一,本文以生产延续时间最小为模型说明任务调度优化实现过程.

#### 3.1 问题描述 (Question description)

为完成某生产任务VE被组建.经任务分解、RA集选择及子任务分配,并获取相关信息(RA自身已确定的生产任务、完成子任务所需作业时间及子任务之间转运时间)后,SA优化目标为兼顾RA各自生产任务,规划VE任务调度方案使得生产延续时间最小.VE任务调度优化是一个循环反复的过程,当优化的调度方案无法满足预定完工期时,MA需要与RA进行协商,对子任务作业时间,乃至对RA已确定的生产任务进行修改,以满足完工期要求.为简化研究,假定在不影响RA各自生产任务的前提下,存在VE任务调度方案既能满足预定完工期,又能最小化生产延续时间.

#### 3.2 优化模型 (Optimization model)

为建立VE任务调度优化模型做如下假设:

1. 每个子任务执行顺序满足时序逻辑约束,且执行过程中不容许中断;
2. 考虑RA自身生产能力及条件限制,假定RA执行自身生产任务时,无力完成VE所分配的任何子任务,并且假定RA在执行VE所分配的子任务时,一次能且仅能执行一个子任务;
3. 生产任务的起始时间为0;

此外,模型中符号设定如下: $R$ 为资源智能体RA集合, $R = \{r_1, \dots, r_i, \dots, r_m\}$ , $m$ 为RA总数; $T$ 为经DA分解最终得到的子任务集合, $T = \{t_1, \dots, t_i, \dots, t_m\}$ , $n$ 为子任务总数; $E_i$ 为 $r_i$ 承担的子任务集合,并假定 $t_i \in E_i$ ; $H_i$ 为 $t_i$ 所有紧前子任务集合; $B_i$ 为 $t_i$ 所有紧后子任务集合,并假定 $t_j \in B_i$ ; $z_{ij}$ 为子任务 $t_i$ 到子任务 $t_j$ 的转运时间; $s_i$ 为子任务 $t_i$ 的开始作业时间; $q_i$ 为完成子任务 $t_i$ 所需的作业时间; $f_i$ 为完成子任务 $t_i$ 所需的作业时间; $t_{i'}$ 为同由 $r_i$ 完成,且位列于子任务 $t_i$ 之前执行的子任务; $P_i$ 为表示 $r_i$ 已确定的生产任务集

合, 用时间段表示.

基于以上的假设及符号设定, 则 VE 任务优化调度优化模型可如下描述:

$$\min F = \max f_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$s_j \geq f_i + z_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$s_i \geq f_{i'} + z_{i'i} \times \delta, \quad (3)$$

$$f_i = s_i + q_i, \quad (4)$$

$$[s_i, f_i] \cap P_i = \phi. \quad (5)$$

$$\text{其中, } \delta = \begin{cases} 1, & t_{i'} \in H_i; \\ 0, & \text{else}; \end{cases}$$

式 (1) 为目标函数, 优化 VE 任务调度方案力求生产延续时间最小; 约束条件 (2) 为子任务开始时间必须在其所有紧前子任务转运完成后才能开始; 约束条件 (3) 为子任务开始时间必须在同由一个 RA 完成的紧前一个子任务完成后才能开始; 约束条件 (4) 表示子任务开始时间与完成时间的关系; 约束条件 (5) 表示 RA 在执行 VE 任务时不能与自身已确定的生产任务相冲突.

#### 4 PSO 算法优化求解 (Optimization based on PSO algorithm)

PSO 算法<sup>[6]</sup>具有收敛速度快、参数调整少、优化效果好等特点, 已被广泛用于连续或离散型问题的优化求解. 采用 PSO 算法求解 VE 任务调度方案的关键环节为设定粒子位置矢量的表达、适应度函数及迭代更新公式, 以下对上述环节进行说明.

1. 约束矩阵建立: 由于子任务之间存在时序逻辑关系, 因此只有建立子任务之间的时序逻辑约束矩阵才能有效保证优化后的 VE 任务调度方案合理性. 本文用 3 个常量定义子任务之间的时序逻辑约束矩阵, 以子任务  $i$  与  $j$  为例说明. 0 表示子任务  $i$  与  $j$  之间不存在时序逻辑约束关系; 1 表示子任务  $i$  与  $j$  之间存在时序逻辑约束关系, 且子任务  $i$  先于  $j$  开始作业; 2 表示子任务  $i$  与  $j$  之间存在先后顺序关系, 且子任务  $i$  后于子任务  $j$  开始作业.

2. 粒子位置矢量表达: 采用 PSO 算法进行优化求解需建立粒子位置矢量与问题解的联系. 设定粒子群数为  $m$ , 维度为  $n$  ( $n$  为子任务数目), 本文用粒子位置矢量  $p_i = \{p_{i1}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{in}\}$  ( $p_i$  为  $1 \sim n$  的一个序列) 代表一种 VE 任务调度的候选方案. 粒子位置矢量生产方法为随机给定粒子每一维度的数值, 其后按从小到大顺序, 重新将粒子位置矢量赋值为  $1 \sim n$ . 通过上述方法产生的 VE 任务调度方案还需用时序逻辑约束矩阵进行修正, 以保证其合理性.

3. 适应度函数设定: 由于本文采用总生产延续时间最小做为 VE 任务调度的评价指标, 并且 PSO 算法通常进化的方向也为适应度函数减小的方向,

因此设定适应度函数如下.

$$\text{fitness} = \max f_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

4. 迭代更新公式: 设迭代次数  $t$  时, 粒子  $i$  位置矢量为  $p_i^{(t)} = \{p_{i1}^{(t)}, \dots, p_{ij}^{(t)}, \dots, p_{in}^{(t)}\}$ , 速度矢量为  $v_i^{(t)} = \{v_{i1}^{(t)}, \dots, v_{ij}^{(t)}, \dots, v_{in}^{(t)}\}$ , 个体最优位置矢量为  $p_i'^{(t)} = \{p_{i1}'^{(t)}, \dots, p_{ij}'^{(t)}, \dots, p_{in}'^{(t)}\}$ , 种群最优位置矢量为  $g_i^{(t)} = \{g_{i1}^{(t)}, \dots, g_{ij}^{(t)}, \dots, g_{in}^{(t)}\}$ , 求解过程中, 粒子速度矢量依据公式 (7) 和 (8) 更新.

$$v_{id}^{(t+1)} = \omega \cdot v_{id}^{(t)} + c_1 \cdot \text{rand}_1() \cdot [p_{id}'^{(t)} - p_{id}^{(t)}] + c_2 \cdot \text{rand}_2() \cdot [g_{id}^{(t)} - p_{id}^{(t)}] \quad (7)$$

$$p_{id}^{(t+1)} = p_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (8)$$

更新完毕后, 再采用粒子位置矢量表达中给出的赋值及修正方法产生新的粒子位置矢量, 进而产生新的 VE 任务调度方案.

#### 5 实例及仿真 (Example and simulation)

以设备制造为例<sup>[4]</sup>验证上述 VE 任务调度模型及优化算法有效性. DA 将设备制造过程分解为 31 个子任务 (子任务作业次序的活动网络如图 2 所示, 图中矩形框中的数字为子任务的作业时间 (单位: 天), 箭头上标注为转运时间), TA 选择 6 个 RA 完成所有子任务. RA 任务分配方案如下:  $r_1$  执行任务  $\{t_1, t_4, t_5, t_{22}, t_{27}, t_{31}\}$ ,  $r_2$  执行任务  $\{t_6, t_{11}, t_{21}, t_{26}, t_{30}\}$ ,  $r_3$  执行任务  $\{t_2, t_{10}, t_{14}, t_{25}, t_{29}\}$ ,  $r_4$  执行任务  $\{t_7, t_{12}, t_{16}, t_{17}, t_{28}\}$ ,  $r_5$  执行任务  $\{t_3, t_9, t_{13}, t_{19}, t_{24}\}$ ,  $r_6$  执行任务  $\{t_8, t_{15}, t_{18}, t_{20}, t_{23}\}$ . RA 已确定的生产任务如下:  $r_1$  已确定的生产任务为  $\{[12, 24], [56, 68]\}$ ,  $r_2$  已确定的生产任务为  $\{[0, 8], [24, 35], [90, 102]\}$ ,  $r_3$  已确定的生产任务为  $\{[38, 46], [60, 90]\}$ ,  $r_4$  已确定的生产任务为  $\{[35, 55], [80, 100]\}$ ,  $r_5$  已确定的生产任务为  $\{[0, 14], [64, 86]\}$ ,  $r_6$  已确定的生产任务为  $\{[0, 2], [18, 23], [70, 90]\}$ . 产品交货期为 110 天. 规划 VE 任务调度方案使其满足交货期要求.

设定粒子群数为 10, 维度为 31, 迭代次数为 10, 并令  $\omega=0.729$ ,  $c_1=c_2=1.49445$ . 采用 PSO 算法优化后设备制造任务调度方案如图 3 所示. 此调度方案下生产延续时间为 102 天, 可提前 8 天交货. 若不考虑成员企业自身生产任务, 采用 PSO 算法求得生产延续时间为 99 天, 与文献 [10] 优化结果相同, 但本文的 PSO 算法采用 matlab6.5 编码, 在 Pentium IV PC 机上的平均求解时间为 1.7s, 明显优于文 [10] 给出的 6~8s 的平均求解时间.

为验证 PSO 算法求解大规模任务调度问题有效性, 采用模拟实验方法进行测试. 模拟实验中子任务总数分别为 40, 50, 60, 80, 子任务作业时间及转运时间、子任务分配方案、作业次序的活动网络均

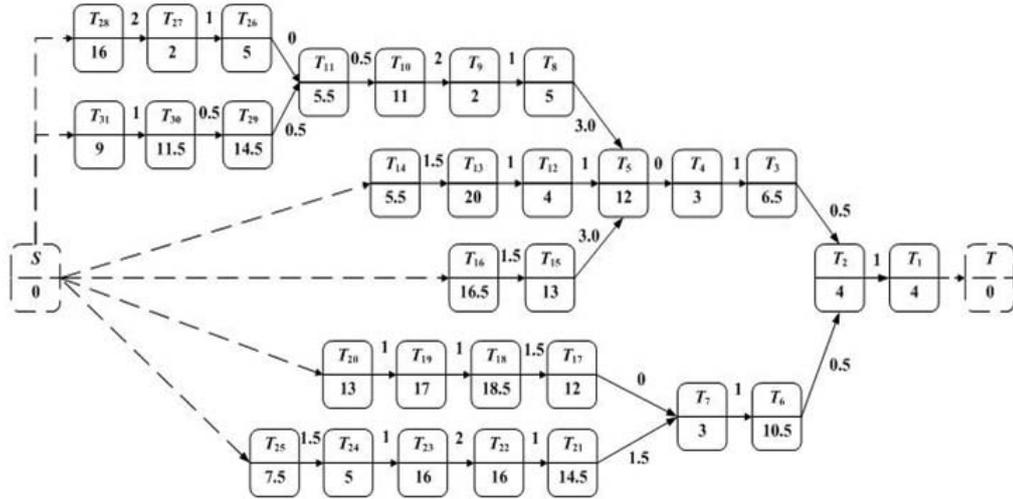


图 2 子任务作业次序的活动网络

Fig. 2 Active network of subtask operation order

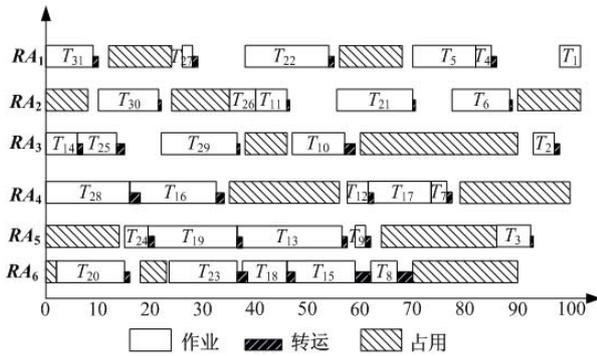


图 3 设备制造任务调度方案

Fig. 3 Task scheduling plan on equipment manufacture

随机产生. 针对不同子任务数目的 VE 任务调度问题, 模拟实验重复进行 5 次. 试验过程中, 均设定粒子群数为 20, 迭代次数为 30. 实验数据整理如表 1 所示. 模拟实验验证了 PSO 算法求解大规模任务调度问题的有效性.

表 1 数字仿真的测试结果

Table 1 The result of numerical experiment

序号	子任务总数	RA 总数	计算时间 (s)
1	40	6	5.3120
2	50	6	6.6560
3	60	8	8.1720
4	80	10	11.2810

## 6 结论 (Conclusion)

采用多智能体技术构建了 VE 任务调度运行模型. 该模型运作过程为首先由 MA 将总的生产任务传递给 DA, 由其将总的生产任务分解为若干具有时序约束关系的子任务; 其次, 由 TA 选择 RA 承担子任务, 并将所有子任务进行合理分配; 最后,

由 SA 进行优化调度, 并将调度结果传递给 RA 执行作业. 针对调度优化调度问题, 以 RA 承担的生产任务为对象, 综合考虑生产任务之间的时序逻辑关系、作业时间、已确定生产任务等因素, 建立了以生产延续时间最小为目标的优化模型. 为求解该模型, 构造了时序逻辑约束矩阵, 有效解决了任务之间复杂的约束关系, 并采用基于任务编号编码的 PSO 算法进行优化求解. 实例及数字仿真验证了 VE 任务调度模型及优化算法有效性.

## 参考文献 (References):

- [1] LIN W, BYRNES C I. Control of discrete-time nonlinear systems[J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1996, 41(4): 494-510.
- [2] RABELO R J, CAMARINHA-MATOS L M, AFSARMANESH H. Multi-agent-based agile scheduling[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1999(27): 15-28.
- [3] 苏平, 伍乃骥. 一种可重构制造系统的生产计划方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(3): 189-193. (Su Ping, Wu Naiqi. A method for production scheduling in reconfigurable system[J]. *CIMS*, 2003, 9(3): 189-193.)
- [4] 高阳, 江资斌. 用混合遗传算法求解虚拟企业生产计划 [J]. 控制与决策, 2007, 22(8): 931-934. (Gao Yang, Jiang Zibin. Using HGA to solve production planning in VE[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(8): 931-934.)
- [5] GRAHAM J R. *Real-time scheduling in distributed multi-agent system*[D]. Newark: University of Delaware, 2001.
- [6] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm Optimization[C]// *Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1995: 1942-1948.

## 作者简介:

赵强 (1976—), 男, 吉林白城人, 博士生, 目前从事虚拟企业、群集智能等研究, E-mail: zhaoliang88@gmail.com;

肖人彬 (1965—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博导, 目前从事系统方法论、系统复杂性等研究.