

# 基于多智能体的流程工业动态调度研究

徐新黎<sup>a</sup>, 俞靓亮<sup>a</sup>, 王 磊<sup>b</sup>, 王万良<sup>a</sup>

(浙江工业大学 a. 计算机科学与技术学院; b. 信息工程学院, 杭州 310023)

**摘 要:** 根据流程工业某车间的生产过程, 建立基于多智能体的生产调度系统模型, 分析各智能体之间的关系, 利用多智能体之间基于博弈论的协商机制, 提出一个双边单议题多阶段的谈判模型, 解决以工序流量或产品产量为目标的调度问题。对某隔膜烧碱生产线调度实例进行仿真, 结果验证了该系统的可行性和有效性。

**关键词:** 多智能体; 博弈论; 谈判机制; 动态调度; 车间调度; 流程工业

## Research on Process Industry Dynamic Schedule Based on Multi-agent

XU Xin-li<sup>a</sup>, YU Liang-liang<sup>a</sup>, WANG Lei<sup>b</sup>, WANG Wan-liang<sup>a</sup>

(a. School of Computer Science and Technology; b. School of Information Engineering,  
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**【Abstract】** This paper establishes a model of schedule based on multi-agent for the production process of a process industry workshop, and analyses the relationship among agents. A multi-stage single-issue bilateral negotiation model based on the consultation of game theory among agents is built to solve the schedule problem with the objective of process flow or output of product. Simulation results of diaphragm caustic soda production schedule example show the feasibility and effectiveness of the model.

**【Key words】** multi-agent; game theory; negotiation mechanism; dynamic schedule; job-shop schedule; process industry

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.04.004

### 1 概述

目前, 多智能体技术<sup>[1]</sup>在生产调度包括流程工业生产调度中的研究受到了越来越多学者的重视。文献[2]研究了流程工业化工企业中的 3 个多智能体系统。文献[3]在化工批量生产调度系统中研究了基于合同网的协调机制, 以及基于分布式规则的调度机制, 并考虑了紧急任务插入、订单取消、设备故障、任务延迟等动态调度因素。文献[4]研究了多智能体技术在炼油过程中的应用, 考虑了常规调度和异常调度, 比较了遗传算法、粒子群算法和多智能体技术在 2 种调度情况下的性能。总结已有文献的研究成果可以发现, 多智能体调度系统主要是利用多智能体通过协商、协调、协作或者博弈对问题进行“分而治之”式的解决, 从而克服整体式解决问题的各种缺点, 并且由于多智能体松耦合的特点在这个过程中能及时、有效地解决各种动态调度问题。

但是目前有关多智能体技术在生产调度领域中的研究, 大多数是把多智能体技术应用在调度系统框架结构的设计上, 属于一个较高的抽象层次, 很少直接应用在解决某些具体的调度问题上, 因此多数基于多智能体的生产调度系统还处在实验研究阶段, 很少直接应用在实际的企业生产过程中。为了解决实际生产过程中产生的动态事件, 本文利用多智能体技术研究了流程工业动态调度问题, 建立了基于多智能体的生产调度系统, 同时利用多智能体之间的协商所建立的一个谈判模型解决了以工序流量或产品产量为目标的调度问题。

### 2 智能体建模

本文以某化工厂隔膜烧碱生产线为研究背景, 其生产工艺如图 1 所示。

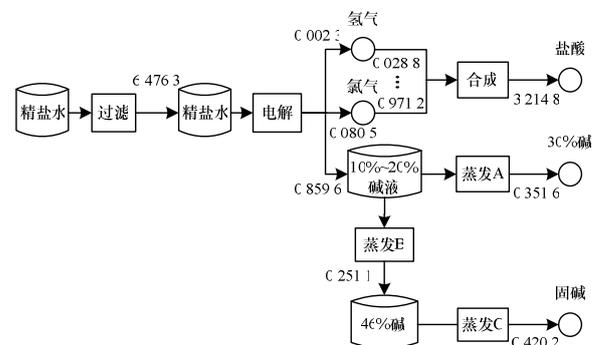


图 1 隔膜烧碱生产工艺

在图 1 中, 方块表示工序, 共有如下 6 道工序: 过滤, 电解, 合成, 蒸发 A, 蒸发 B, 蒸发 C, 对应的设备分别为原盐精制机组、电解槽、合成炉、三效逆流蒸发机组、三效逆流蒸发机组和熬碱大锅; 数字表示投入产出的质量比; 圆柱表示贮槽, 分别存储工业盐、精制水、10%~20%碱液、46%碱; 圆圈表示产品, 包括氢气、氯气、盐酸、30%碱、固碱, 但 46%碱既可作为原料生产固碱也可作为产品。6 道工序中只有蒸发 C 是间歇工序, 并且需要加工 36 个小时, 加工量比较少。在实际的生产过程中要求各道工序的处理量不低于

**基金项目:** 国家“863”计划基金资助项目(2007AA04Z155); 国家自然科学基金资助项目(60874074); 浙江省自然科学基金资助项目(Y1090592)

**作者简介:** 徐新黎(1977—), 女, 副教授、博士, 主研方向: 智能计算, 生产调度, 多智能体系统; 俞靓亮, 硕士; 王 磊, 硕士研究生; 王万良, 教授、博士

**收稿日期:** 2011-06-27 **E-mail:** xxl@zjut.edu.cn

日计划处理量。

由于该生产线属于流程工业, 所有原料通过各个生产设备的次序是不变的, 可能发生变化的只是通过各个生产设备的原料的数量, 或者说各个生产设备的处理量, 因此本文采用混合式的结构设计智能体的内部结构, 既具有反应型智能体的特点, 又具有认知型智能体的特点。具体表现为既能对外界环境的刺激做出恰当的反映, 又能根据其内部的信念、愿望和意图进行一定的推理, 还能提供设备的流量、各种贮槽储量等调度过程中的一些图表, 并且能够和其他智能体进行协商来解决问题。

为了解决隔膜烧碱生产线的日调度问题, 本文首先对每个生产设备(对应每个生产工序)建立一个智能体, 如图 2 所示共有 6 个智能体: 过滤智能体, 电解智能体, 合成智能体, 蒸发 A 智能体, 蒸发 B 智能体和蒸发 C 智能体。另外增加一个管理智能体, 用以解决以上 6 个智能体(主要是电解智能体、蒸发 A 智能体和蒸发 B 智能体)之间协商时发生的各种冲突, 同时处理一些动态调度的意外事件, 如紧急订单的插入、设备出现故障等, 还可通过与计算智能体的交互, 完成以经济效益为调度目标的紧急调度问题。最后添加一个数据库连接智能体用来连接数据库。

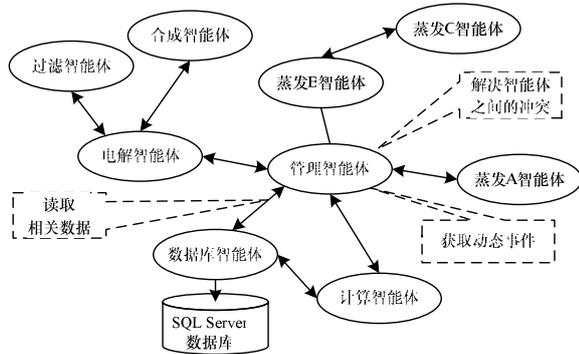


图 2 智能体之间的关系

本文生产线在实际调度过程中应该使得各个生产设备的处理量尽可能得大, 以取得较高的经济目标。各个智能体之间的关系如图 2 所示, 过滤工序和合成工序对其他工序的影响不大, 只与电解工序有关系, 在实际的生产过程中排产较为简单。另外由于蒸发 C 智能体只与蒸发 B 智能体有直接关系, 当蒸发 B 工序在每个时间段的处理量确定之后, 蒸发 C 的排产就很容易完成。所以, 该生产线调度的关键在于电解智能体与蒸发 A 智能体、蒸发 B 智能体之间的协商, 以确定对应的三道工序在调度周期内所有时间段的处理量。

考虑到如图 2 所示的多智能体系统总体结构属于以管理智能体为中心的星型结构, 其中管理智能体负责解决其他智能体在协商过程中出现的冲突。管理智能体周围的 6 个智能体之间是一种完全平等的关系, 不存在上下级的层次关系, 所以本文采用较为灵活的基于博弈论的协商机制。

### 3 基于博弈论的协商机制

近年来, 有很多专家学者把博弈论<sup>[5]</sup>引入到调度领域中, 解决了多种多样的问题。文献[6]从多灾点所需应急资源的角度出发, 提出了基于非合作博弈的应急资源调度模型和算法。文献[7]应用合作博弈理论, 提出了一种柔性制造系统的合作博弈调度方法。文献[8]提供了一种网络制造环境下工件调度问题的解决方案。针对流程工业实际生产过程的特点, 本文采用基于博弈论的多智能体之间协商的方法来解决隔膜

烧碱生产线的日调度问题。

#### 3.1 以工序流量为调度目标的问题模型

在基于智能体隔膜烧碱生产线的日调度中, 由于电解智能体、蒸发 A 智能体、蒸发 B 智能体之间的协商是最为重要的, 只要确定了它们之间的协商机制, 根据智能体之间的关系就能确定其他 3 个智能体的排产情况。所以, 这里智能体之间的协商主要发生在电解智能体、蒸发 A 智能体、蒸发 B 智能体三者之间。

在隔膜烧碱生产线的日调度中, 由于产品的产量是由生产该产品的工序和消耗该产品的工序(如果有)的流量决定的, 因此以产品产量为调度目标的调度问题可以转化为以工序流量为调度目标的调度问题。如果生产调度人员只选中某一个工序的流量, 那么此时就不存在博弈的问题, 只是一个单目标的优化问题, 可以用单纯的优化方法如粒子群优化算法<sup>[9]</sup>解决。

任何以 2 个工序流量为调度目标的问题从数学模型上来说是一样的, 不失一般性, 本文以生产调度人员选择电解工序流量和蒸发 B 工序的流量作为调度目标为例来研究这个问题。这里两者的支付函数分别是各自的流量。

针对该问题, 首先建立一个简单的数学模型: 向量  $x_n$  和  $y_n$  分别表示蒸发 A 工序和蒸发 B 工序在需要紧急调度时剩下  $n$  个时刻的流量, 蒸发 A 工序的支付函数  $x$  是向量  $x_n$  中各个分量之和, 类似地, 蒸发 B 工序的支付函数  $y$  是向量  $y_n$  中各个分量之和。定义  $S$  为该问题可行解的集合, 某个解  $s_i \in S$  所对应的向量  $x_n$ 、向量  $y_n$  中各个分量之和分别为  $x_i$ 、 $y_i$ 。如果不存在  $s_j \in S$ , 使  $s_j$  对应的  $x_j \geq x_i$ , 并且  $y_j \geq y_i$  同时成立, 那么称  $s_i$  是该问题的一个非劣解, 或称为 Pareto 最优解。并且向量  $x_n$ 、 $y_n$  中的每一维  $x_i$  和  $y_i$  ( $i=0, 1, \dots, n$ ) 都要满足以下的约束条件:

$$x_i + y_i \leq djy\_left + z_i \tag{1}$$

$$djy\_left + z_i - djy\_capacity \leq x_i + y_i \tag{2}$$

$$y_i \times C_A + nongjian\_left - nongjian\_out \leq nongjian\_capacity \tag{3}$$

$$x\_min \leq x_i \leq x\_max \tag{4}$$

$$y\_min \leq y_i \leq y\_max \tag{5}$$

$$z\_min \leq z_i \leq z\_max \tag{6}$$

$$jys\_min \leq jys\_left + jys\_in - 1/C_B \times z_i \leq jys\_max \tag{7}$$

其中,  $z_i$  表示相应时刻电解工序的流量。

式(1)表示蒸发 A 智能体和蒸发 B 智能体的流量之和不得超过贮槽中原有电解液  $djy\_left$  与电解工序新产生的电解液  $z_i$  之和。

式(2)表示贮槽中原有电解液  $djy\_left$  与电解工序新产生的电解液  $z_i$  之和不得超过蒸发 A 智能体流量  $x_i$ 、蒸发 B 智能体的流量  $y_i$  与电解液贮槽最大储量  $djy\_capacity$  三者之和。

式(3)表示蒸发 B 工序所产生的 46%碱的量减去制造固碱所消耗的 46%碱的量  $nongjian\_out$  再加上贮槽内剩余的液体量  $nongjian\_left$  不得大于 46%碱(浓碱)贮槽的最大储量  $nongjian\_capacity$ ,  $C_A$  表示蒸发 B 工序的产出比。

式(4)~式(6)表示相应工序的流量应该在其最小流量和最大流量之间。

式(7)表示在任何时刻精盐水贮槽中剩余液体的量应该在最小容量  $jys\_min$  和最大容量  $jys\_max$  之间,  $jys\_left$  表示精盐水贮槽中原有精盐水量,  $jys\_in$  表示由于过滤工序引

起的精盐水的增加量,这个数据可以通过改变过滤工序的流量来进行调节,  $1/C_B \times z_i$  表示由于电解工序引起的精盐水的减少量,而  $C_B$  为电解工序生产 10%~20%碱液的产出比。

### 3.2 谈判机制

由于电解工序流量和蒸发 B 工序的支付函数之间不存在直接的关系,因此无法从最优反映规则的角度来分析。由于电解工序是蒸发 B 工序的上游工序,蒸发 B 工序流量的取值范围受到电解工序的影响,另一方面,蒸发 B 工序流量的变化将会影响电解液贮槽的储量,从而影响电解工序流量的取值范围,两者的流量是存在间接相互影响的关系,可以从谈判的角度来考虑。

电解智能体、蒸发 B 智能体所要做的是通过相互之间的谈判在满足约束条件的情况下最大化当天剩下时间的各自的流量之和。显然,这是一个双边单议题多阶段的谈判。

在双方开始谈判前,首先要制定谈判协议,主要包括谈判状态的转移规则和谈判各方的通信协议。谈判状态的转移规则用来指导从谈判开始到谈判结束期间各个参与谈判的智能体的行动,其中最主要的是进行讨价还价的最多次数,通信协议采用 JADE 框架中的协议。

谈判双方为了判断对方的提议是否在自己可以接受的范围之内,通常会有一个评价提议的函数。在本文中,电解智能体和蒸发 B 智能体根据紧急订单中生产任务、当前已完成的任务和当天剩余的时间计算出每个时间段的平均流量作为评价提议的函数,其中,提议  $agenda(agenda_1, agentd_2)$  是一个二维向量,每一维分别表示电解工序和蒸发 B 工序的流量;每个时间段的平均流量  $average(average_1, average_2)$  也是一个二维向量,每一维分别表示为了完成紧急订单电解工序和蒸发 B 工序每小时的平均流量;谈判方  $x$  对另一方某个提议的可信度:

$$trust_x = p_1 \times \frac{agenda_x - x\_min}{average_x - x\_min} + p_2 \times \frac{k}{count} \quad (8)$$

其中,  $agenda_x$  表示该提议中谈判方  $x$  的流量;  $average_x$  表示谈判方  $x$  为了完成紧急订单每小时的平均流量;  $x\_min$  表示谈判方  $x$  固有的最小流量;  $k$  为当前谈判的阶段;  $count$  为谈判总的阶段数;  $p_1$  和  $p_2$  分别表示选择 2 个部分的概率,  $p_1 + p_2 = 1$ 。

如果当前谈判阶段不是最后一个阶段,那么某方提出的提议可能含有承诺(当该提议中的另一方的流量小于其每小时平均流量值),也有可能不含有承诺(当该提议中的另一方的流量不小于其每小时平均流量值)。

如果对方提议中的流量小于平均流量,那么己方可以选择不接受提议,从而提出一个新提议,如果接受了这个提议,那么对方要向己方做出一个可信的承诺,在以后的某个时间对己方做出相应的补偿(这个补偿大于己方平均流量与提议的流量之差)。总之,在谈判的前几个阶段谈判方做出的承诺的可信度较低,而在谈判快要结束的几个阶段谈判方做出的承诺的可信度较高。

另外为了避免谈判陷入僵局,当发现某一阶段的谈判经历了很长的轮数,如果议题值为谈判双方各自每小时平均流量值能满足约束条件式(1)~式(7),程序将自动迫使谈判双方接受这个议题。反之,程序使受损失较多的一方的流量值为每小时平均流量,相对应地,适当降低另一方的流量值。

谈判过程主要分为以下 10 个步骤:

**Step1** 随机确定  $x$  方为发出提议方,并令当前谈判阶段  $k$

为 0。

**Step2** 判断当前谈判阶段是否为谈判的最后一个阶段,即判断  $k$  是否小于  $count$ ,若否,转 Step3,反之转 Step8。

**Step3**  $x$  方使用某些策略向  $y$  方发出一个提议  $agenda$ (可能含有承诺),  $y$  方判断议题值  $agenda_y$  是否达到自身的每小时平均流量  $average_y$ ,若否,转 Step4,反之转 Step7。

**Step4**  $y$  方判断承诺可信度  $trust_x$  是否达到自身设定的最低阈值,若否,转 Step5,反之转 Step7。

**Step5**  $y$  方使用某些策略进行反提议  $agenda$ (可能含有承诺),  $x$  方判断议题值  $agenda_x$  是否达到自身的每小时平均流量  $average_x$ ,若否,转 Step6,反之转 Step7。

**Step6**  $x$  方判断承诺可信度  $trust_y$  是否达到自身设定的最低阈值,若是转 Step7,反之转 Step3。

**Step7** 接受提议,令  $k \leftarrow k+1$ ,进入下一个阶段的谈判,并转 Step2。

**Step8**  $x$  方使用某些策略向  $y$  方发出一个提议(不含承诺),  $y$  方判断是否达到自身的最低阈值,若否,转 Step9,反之,转 Step10。

**Step9**  $y$  方使用某些策略进行反提议(不含承诺),  $x$  方判断是否达到自身的最低阈值,若是转 Step10,反之,转 Step8。

**Step10** 谈判结束。

在谈判过程中,提议和反提议所使用的策略有让步策略、平衡策略和强硬策略。让步策略也称妥协策略,主要是指由于谈判某方在前几个阶段的谈判中取得了较高的收益,而主动降低自身的要求来促使谈判成功。平衡策略是指谈判某方为了使谈判成功,使提出议题的议题值每次增加或减少一个量提高对方的满意度,这个量可以是常量,也可以是变量。强硬策略也称坚持策略,是指谈判某方一味地要求对方满足自己提出的某个议题,不顾及对方的效益,主要在当某方在前几个阶段的谈判中认为自身受到了较大的损失时被采用。

## 4 仿真结果与分析

隔膜烧碱车间的工艺流程如图 1 所示,其中,6 道工序中只有蒸发 C 是间歇工序,且需要加工 36 个小时,加工量较少。表 1、表 2 是实际生产过程中的工艺数据表,表 3 是各个产品和原料的价格。

表 1 各道工序的最大、最小流量 (T/h)

流量	过滤	电解	合成	蒸发 A	蒸发 B	蒸发 C
最大	33.35	191.95	0.56	135.1	36.2	19.68
最小	0.00	58.17	0.00	0.0	0.0	0.00

表 2 各个储槽的最大、最小和初始储量 T

储量	工业盐储槽	精盐水储槽	10%~20%碱液储槽	46%碱储槽
最大	30 000	4 320	3 000	80
最小	0	400	0	0
初始	30 000	400	0	0

表 3 各个产品和原料的价格 (元/T)

物料	工业盐	氢气	氯气	盐酸	30%碱	固碱	46%碱
价格	430	3.51	1 167	1 000	1 330	2 051	1 363

下面利用多智能体之间的协商所建立的谈判模型,来解决以工序流量或产品产量为目标的隔膜烧碱车间日调度问题。设置某一阶段的最大谈判轮数为 10,  $p_1=0.7$ ,  $p_2=0.3$ 。图 3 和图 4 是谈判程序某次运行结束时电解工序、蒸发 B 工序的流量图。氢气产量变化和氯气产量变化分别如图 5、图 6

所示。

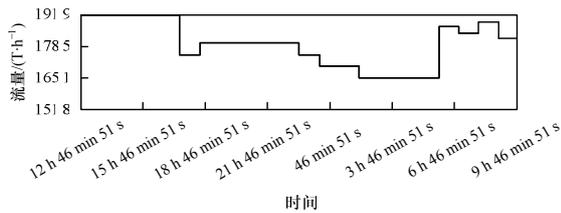


图3 电解工序流量

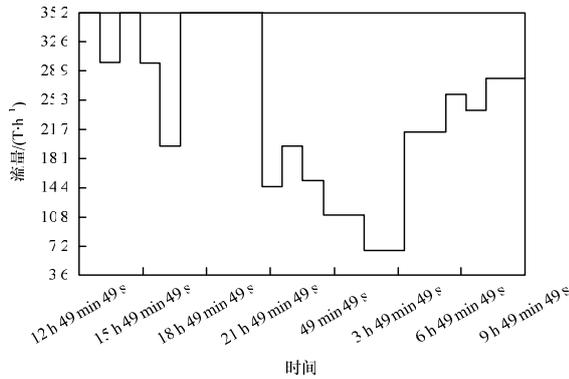


图4 蒸发B工序流量

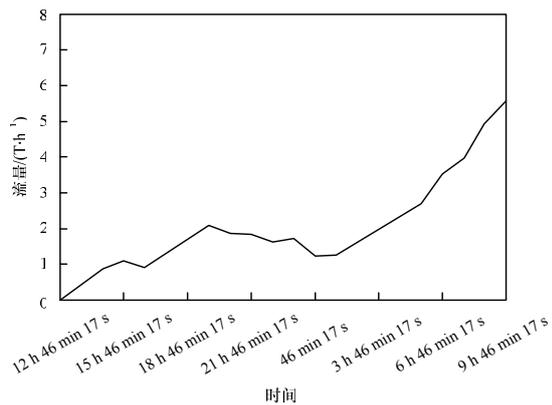


图5 氢气产量变化

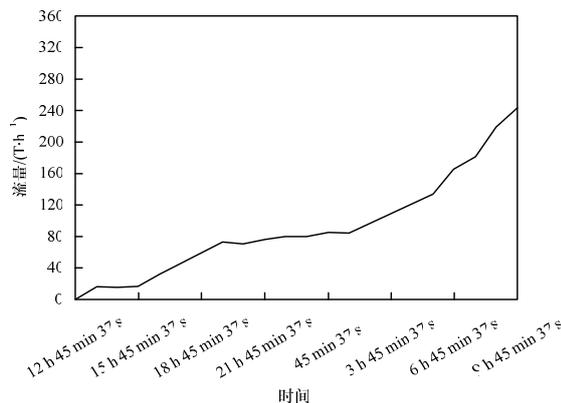


图6 氯气产量变化

同理, 蒸发B工序的产品46碱的产量在紧急订单插入后也在增加, 如图7所示。多次运行该程序, 发现是否改变 $p_1$ 和 $p_2$ 的值, 对于运行结果的影响不是很明显。这说明该谈

判模型对于 $p_1$ 和 $p_2$ 是不敏感的, 具有较好的鲁棒性。但是即使 $p_1$ 和 $p_2$ 的值保持不变, 多次运行程序, 某几次的谈判结果会偏离其余大多数情况下程序运行结束时的谈判结果, 并且谈判的效果也不是很理想, 产品产量和工序流量的增加量很小。出现这种情况是因为谈判各方在提议和反提议时, 在一定程度上随机地选择让步策略或平衡策略或强硬策略。

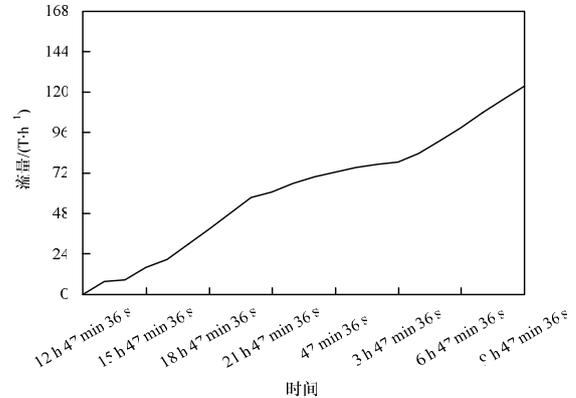


图7 46碱产量变化

## 5 结束语

本文针对流程工业生产实际, 设计了一个基于多智能体的流程工业车间调度模型, 并基于博弈理论研究了智能体之间的协商机制, 建立了一个谈判模型来解决以工序流量或产品产量为目标的调度问题, 仿真结果表明该模型具有较强的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] 任海英, 商晓坤. 柔性作业车间调度的多 Agent 协商策略[J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 269-271.
- [2] Aldea A, Banares-Alcantara R, Jimenez L, et al. The Scope of Application of Multi-agent Systems in the Process Industry: Three Case Studies[J]. Expert Systems with Applications, 2004, 26(1): 39-47.
- [3] 朱 晖. 基于多 Agent 的化工批量生产调度系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [4] 耿陪陪. 基于 Multi-Agent 系统的炼油过程动态调度[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [5] Kuhn H W. 博弈论经典[M]. 韩 松, 刘世军, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2004.
- [6] 杨继君, 许维胜, 黄武军, 等. 基于多灾点非合作博弈的资源调度建模与仿真[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 1620-1623.
- [7] 刘建国, 李青松, 王宁生. 柔性制造系统的合作博弈调度[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(9): 101-106.
- [8] Zhou Guanghui, Jiang Pingyu, Huang G. A Game-theory Approach for Job Scheduling in Networked Manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(9/10): 972-985.
- [9] 周 明. 基于改进粒子群算法的离子膜车间调度问题研究[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 1021-1025.

编辑 索书志