

供应链协商调度模型与算法^{*}

苏生¹, 于海杰², 吴正华¹, 汤羽¹

¹(电子科技大学 计算机科学与工程学院, 四川 成都 611731)

²(电子科技大学 经济与管理学院, 四川 成都 611731)

³(泸州老窖博士后工作站, 四川 泸州 646000)

通讯作者: 苏生, E-mail: susheng@uestc.edu.cn, http://www.ccse.uestc.edu.cn

摘要: 研究了由一个制造商和一个分销商组成的供应链上分销商协商调度问题. 此供应链中, 制造商比分销商有更强的影响力, 先于分销商进行调度. 制造商与分销商之间不共享作业处理时间. 为了改善分销商调度, 建立了基于补偿的分销商协商模型, 设计了保留信息私有性的协商调度策略, 提出并分析了协商调度下制造商调度算法以及基于生态种群竞争的分销商协同演化调度算法. 仿真实验结果表明, 分销商协商调度模型与算法能够有效改善分销商调度性能, 在不增加制造商调度成本的条件下, 可最大程度地削减分销商调度成本超过 25%. 此外, 提出的竞争协同演化算法能够获得比遗传算法、粒子群算法和蚁群算法更好的调度解.

关键词: 供应链; 调度; 协商; 协同演化; 算法

中图法分类号: TP301 **文献标识码:** A

中文引用格式: 苏生, 于海杰, 吴正华, 汤羽. 供应链协商调度模型与算法. 软件学报, 2013, 24(1): 12-24. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4211.htm>

英文引用格式: Su S, Yu HJ, Wu ZH, Tang Y. Negotiated scheduling model and algorithms of supply chain. Ruanjian Xuebao/Journal of Software, 2013, 24(1): 12-24 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4211.htm>

Negotiated Scheduling Model and Algorithms of Supply Chain

SU Sheng¹, YU Hai-Jie², WU Zheng-Hua¹, TANG Yu¹

¹(School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

²(School of Economic and Management, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

³(Post-Doctoral Scientific Research Station of LUZHOU LAOJIAO Group Co., Luzhou 646000, China)

Corresponding author: SU Sheng, E-mail: susheng@uestc.edu.cn, <http://www.ccse.uestc.edu.cn>

Abstract: The negotiated scheduling problem of distributor is studied for a supply chain that consists of a manufacture and a distributor. The manufacturer is more influential than the distributor. It makes scheduling decisions followed by the distributor. The manufacture and distributor do not share information during the process time of any job. To improve scheduling results of the distributor, a negotiation model is built based on compensation mechanism. A negotiated scheduling strategy with information privacy is designed. A distributor negotiation-scheduling algorithm that consists of a scheduling algorithm of the manufacturer and ecologic population competition based coevolutionary algorithm of the distributor is designed and analyzed. Simulation experiments show that the negotiated scheduling of the distributor can effectively improve the scheduling performance of the distributor. Scheduling cost of the distributor can be cut down over 25% while the scheduling performance of the manufacturer does not become worse. Moreover, the proposed coevolutionary algorithm can obtain better scheduling solutions than the genetic, particle swarm optimization, and ant colony optimization algorithms.

Key words: supply chain; scheduling; negotiation; coevolutionary; algorithm

* 基金项目: 国家自然科学基金(60904072); 广东省教育部省部产学研结合项目(2010B090400028); 国家教育部博士点新教师基金(20090185120002); 国家教育部人文社科青年基金(09YJC630018); 电子科技大学中央高校基本科研业务经费(103.1.2 E022050205)

收稿时间: 2011-09-21; 修改时间: 2011-11-07; 定稿时间: 2012-03-27

供应链是多个企业为协同完成客户订单产品而形成的物流与信息网络.供应链企业一般包括制造商和分销商等核心业务实体,它们分别负责产品生产和销售.供应链管理是对供应链进行有效规划和运行控制的管理模式,是现代企业核心竞争力的重要组成部分^[1].很多跨国公司和知名企业通过实施供应链管理大幅度提升了企业管理水平,如联想在实施供应链管理后,其平均供货时间由 15 天缩短到 5.4 天,存货周转时间由 72 天缩短到 22 天.Hall 等人的研究显示,在其考虑的供应链环境下,供应商和制造商之间调度的集成与合作可以削减 20% 到将近 100% 的系统成本^[2],充分说明了研究供应链调度的重要性.

目前,供应链调度研究可以分为两大类:供应链集成调度和供应链协调调度.供应链集成调度主要探讨如何从供应链整体运作调度角度提升供应链及成员的竞争力,如,包括无限能力生产与运输集成调度^[3]、有限能力生产与运输集成调度^[4-12]、生产与分销集成调度^[12-17].此外,文献[18]研究了基于交货期窗口约束的多级供应链批量调度问题,并将批量调度和排序调度作为两个子问题处理;文献[19]用蚁群算法研究了大规模定制环境下的供应链动态调度问题.

供应链协调调度研究供应商、制造商和分销商等企业如何通过一定的协调策略与其他供应链企业成员进行协商来提高自己的调度收益及整个供应链效益^[20,21].文献[20]分析了含有一个供应商和多个制造商的组装供应链系统中供应商和制造商之间的冲突与合作问题,根据供应商和制造商之间不同影响力的强弱提出了协商调度模式和算法,结果显示,供应商与制造商之间的协调调度能节约高达 82.37% 的调度成本.他们的研究证实了供应链协调调度的价值,但他们假定制造商能力无限,且没有考虑 NP 子问题的求解.Manoj 等人研究了由一个制造商、一个分销商和几个零售商组成的供应链协调调度问题,他们分析了供应链伙伴之间的调度冲突,也分析了各方联合进行供应链调度的好处,但没有考虑供应链成员信息私有性问题^[21].

现有供应链调度研究存在 3 点局限性:第一是没有考虑供应链企业之间存在的非完全信任性.虽然很多研究都表明,通过企业间的紧密合作和信息完全共享能够增加供应链整体和成员企业的效益,但在实际运作过程中,大量成员企业间并没有达成完全信任.比如,一个成员提供给其他合作成员的信息具有一定的失真性,导致合作成员间形成信息不完全和不对称,对供应链的调度和运作产生了重要影响;第二是对供应链协调调度研究很有限.现有研究存在很多人为假设与限制,典型的,如 Chen 与 Hall 的研究假设制造商具有无限能力,其调度问题与供应商一样,只是目标不同.虽然他们的研究有力说明了协商调度的好处,但其研究所能应用的范围有限^[20];第三是对供应链调度中涉及的 NP 问题没有给出有效算法.

本文研究了在制造商有更强影响力的供应链环境中,分销商的协商调度问题.与现有研究不同,我们考虑了制造商与分销商之间具有非完全信任关系,表现为制造商与分销商之间不共享作业处理时间信息,但制造商能够根据分销商给出的作业交货期返回其调度目标值,以供分销商进行协商,这更符合现实的供应链运营场景.另外,制造商和分销商分别具有自己的调度,作业都需要占用一定的处理时间,且制造商和分销商分别以最小化总作业加工时间和作业总延迟为目标,这个目标组合很常见,但文献中没有更好地加以研究.

本文第 1 节描述问题.第 2 节建立基于补偿的分销商协商调度模型.第 3 节提出并分析协商调度模式下制造商和分销商各自的调度算法.第 4 节的仿真实验结果表明,分销商协商调度可在不影响制造商调度收益的条件下大幅度削减分销商调度成本,进而削减整个供应链调度成本.

1 问题描述

考虑由一个制造商和一个分销商组成的两阶段供应链,此供应链上的企业需要对 n 个作业(来源于订单)进行调度安排,以完成产品的加工与销售.作业相关产品首先由制造商生产,然后通过分销商销售.作业 $J_j(j=1, \dots, n)$ 在制造商和分销商所占用的处理时间分别为 $p_{j,u}$ 和 $p_{j,d}$,其中, $p_{j,u}$ 为广义处理时间,包括作业 j 在制造商内部的加工时间以及将作业相关的产品运输到分销商所耗费的时间.作业 j 的交货期为 d_j .假定所有作业均在零时刻释放(如在某个供应链计划周期的开始时刻),也即制造商调度的作业释放时间为 0,分销商作业的释放时间为 r_j ,其取值依赖于制造商的作业完成时间, w_j 是作业 j 在分销商的单位延迟惩罚权重.用 $s_{j,u}$ 和 $e_{j,u}$ 分别表示作业 j 在制造商调度中的开始时间和结束时间, $s_{j,d}$ 和 $e_{j,d}$ 分别表示作业 j 在分销商调度中的开始时间和结束时间.图 1 给出了

本文所考虑的供应链及其相关参数示意,客户释放 n 个作业给由制造商和分销商组成的供应链,制造商在完成其处理后将作业相关产品传递给分销商,分销商进行一定处理后交付给客户.其中,作业 j 用四元组(释放时间,单位处理时间,开始时间,结束时间)描述.

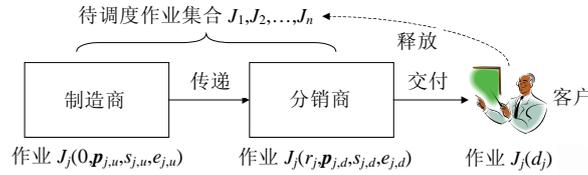


Fig.1 Supply chain considered in this paper

图1 本文所考虑的供应链示意

虽然制造商和分销商均是供应链上的成员,但他们相互独立,企业通常不愿意将内部的信息全部暴露给供应链上的其他伙伴成员.我们考虑制造商和分销商之间不共享作业处理时间信息的情况,即制造商不知道作业 j 在分销商的处理时间 $p_{j,d}$,分销商也不知道作业 j 在制造商的处理时间 $p_{j,u}$,但制造商和分销商之间允许在调度过程中进行某种合作.

在本文研究的供应链中,制造商比分销商有更大的发言权,处于主导地位,当制造商为大品牌厂商时经常出现这种情况.制造商首先进行自己的调度安排,然后,分销商再根据制造商作业的完成情况(主要依据作业在制造商的完成时间)进行调度安排.制造商在这种调度模式中占优,其调度结果对制造商有利,但对分销商不利,同时对整个供应链调度的性能也不利.为此,本文在不违背制造商和分销商之间信息私有性的条件下,研究分销商如何与制造商协商以改善分销商调度及整个供应链调度.

制造商以最小化作业的总完成时间为目标,分销商以最小化作业总权重延迟为目标,根据调度三要素 $a/b/c$ 法则(a, b 和 c 分别表示机器环境、作业性质和调度优化目标),制造商的调度问题可表示为 $1||\sum C_j$, 分销商的调度问题可表示为 $1||r_j||\sum w_j T_j$, α 和 β 分别表示制造商的调度和分销商的调度, α 和 β 之间的衔接应合法,即 $s_{j,d} \geq e_{j,u}$. 用 $O(\alpha)$ 和 $O(\beta)$ 分别表示调度 α 和 β 的目标值.由于制造商和分销商的目标函数不一样,且两者均采用基于时间的目标函数,而后文所提出的分销商对制造商的补偿是基于成本的,故需要将基于时间的目标函数值换算为成本.为此,用 λ 表示单位 $O(\alpha)$ 的成本, μ 表示单位 $O(\beta)$ 的成本.

2 基于补偿的供应链调度协商模型

类似于流水生产调度,作业需要先后经过制造商与分销商两个阶段进行处理,制造商对分销商的影响来源于制造商调度中作业的完成时间,主要体现为衔接约束 $s_{j,d} \geq e_{j,u}$, 即作业 j 在分销商调度中的开始时间必须等于或晚于其在制造商调度中的完成时间, $e_{j,u}$ 相当于作业 j 在分销商调度问题中的释放时间 r_j . 如果分销商要改善自己的调度,则必须改变 r_j . 这意味着分销商需要与制造商协商,将作业 j 在制造商调度中的完成时间 $e_{j,u}$ 变为一个对自己有利的值,而 $e_{j,u}$ 的改变意味着制造商调度的改变,即制造商要采用一个比以前调度方案更差的新调度.为激励制造商采用新的调度方案,分销商提供一个补偿 σ 给制造商,制造商新调度的目标值在补偿后不会比原调度差.相应地,分销商在新调度目标值的基础上进行制造商补偿操作后,其结果应该比分销商原调度的目标值要好,否则,分销商没有必要进行协商.

令 α 和 β 分别表示在制造商主导调度模式下制造商的调度和分销商的调度, α' 和 β' 分别表示在分销商协商调度模式下制造商的调度和分销商的调度. σ 表示分销商协商调度模式下分销商提供给制造商的补偿.

$$\lambda O(\alpha') - \sigma \leq \lambda O(\alpha) \tag{1}$$

$$\mu O(\beta') + \sigma \leq \mu O(\beta) \tag{2}$$

公式(1)表示制造商新调度的目标值减去一个补偿值 σ 后应该比原调度的目标值要小,即制造商的新调度不应比其原调度差.类似地,公式(2)表示分销商新调度的目标值加上一个补偿值 σ 后应该比原调度的目标值要

小,即分销商的新调度也不应比其原调度差.公式(1)和公式(2)约束经过补偿调整后的新调度不能比原调度差,否则,协商不能达成一致.

分销商的协商调度问题 NDS 可表示为

$$\left. \begin{aligned} & \text{Min } \mu O(\beta') + \sigma \\ & \text{s.t. } \lambda O(\alpha') - \sigma \leq \lambda O(\alpha), \mu O(\beta') + \sigma \leq \mu O(\beta), \text{ 且 } \sigma \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

定理 1. 解 $(\alpha_b, \beta_b, \sigma)$ 是问题 NDS 的最优解,其中 α_b, β_b 是问题 $\text{Min } \mu O(\beta) + \lambda O(\alpha')$ 最优解中制造商调度和分销商调度, $\sigma = \lambda(O(\alpha_b) - O(\alpha))$.

证明:由于 α_b, β_b 是问题 NDS 最优解中制造商调度和分销商调度,故 $\mu O(\beta_b) + \lambda O(\alpha_b) \leq \mu O(\beta) + \lambda O(\alpha)$.

将 $\sigma = \lambda(O(\alpha_b) - O(\alpha))$ 代入,可得 $\mu O(\beta_b) + \sigma \leq \mu O(\beta)$,即满足公式(2)的约束,而 $\sigma = \lambda(O(\alpha_b) - O(\alpha))$ 本身就满足公式(1)的约束.

再将 $\sigma = \lambda(O(\alpha_b) - O(\alpha))$ 代入问题 NDS 的目标函数,得到 $\text{Min } \mu O(\beta') + \lambda O(\alpha_b) - \lambda O(\alpha)$,其中 $\lambda O(\alpha)$ 是原调度中制造商的目标值,在问题 NDS 中是一个常数,对寻优过程和获得最优调度没有影响.故,问题 $\text{Min } \mu O(\beta') + \lambda O(\alpha')$ 的最优解即为问题 NDS 的最优解. \square

定理 2. 调度问题 $\text{Min } \mu O(\beta) + \lambda O(\alpha')$ 是 NP-hard 的.

证明:如果将制造商和分销商看成流水生产调度问题中的上下两个阶段,每个阶段有一台机器,作业需要顺序通过上下阶段处理,且上下阶段之间不存在信息隐藏的问题,则上述问题可以看成是一个 2 阶段流水调度问题 $F2 \parallel \sum C_{j,u} + \sum w_j T_j$,其中 $C_{j,u}$ 表示作业 j 在制造商的处理完成时间.如果将问题退化为仅有分销商,则调度问题为 $1 \parallel \sum w_j T_j$,它是 NP-hard 的.故,更为复杂的 $F2 \parallel \sum C_{j,u} + \sum w_j T_j$ 问题一定是 NP-hard 的. \square

在分销商协商调度模式中,利用分销商的新调度及制造商的配合,分销商能够获得的利益为

$$\mu O(\beta') + \lambda O(\alpha') - \lambda O(\alpha) - \mu O(\beta) = [\mu O(\beta') + \lambda O(\alpha')] - [\mu O(\beta) + \lambda O(\alpha)].$$

这个利润值等于整个供应链在原调度目标值与新调度目标值之间的差,表明分销商能够通过与制造商的协商获得等价于供应链系统级别协调的利益.

3 协商调度算法

3.1 保留信息私有性的协商调度策略

根据定理 1,分销商的协调调度问题等价于目标为 $\text{Min } \mu O(\beta) + \lambda O(\alpha')$ 的调度问题.此目标函数包含两个部分:一部分是在新调度下,制造商调度的目标值;另一部分是新调度下,分销商调度的目标值.这意味着分销商需要知道制造商和分销商对每个新调度的目标值,但由于制造商和分销商之间存在一定信息私有性,故不能像求解流水调度问题那样,将制造商和分销商作为一个整体进行统一调度,并获得双方调度的目标值,而需要在不违反处理时间信息私有性的条件下获得整个调度解.为此,我们采用基于请求-应答模式的协商调度策略,分销商在获得一个内部调度解后,将作业的开始时间作为制造商作业的交货期,并将此信息传递给制造商,制造商根据交货期进行调度,再将所获调度的目标值作为响应返回给分销商,此调度中不能存在任何作业的延迟完成.

分销商在寻找自身内部最优调度时,为了计算作业的开始时间和结束时间,需要知道作业的释放时间.因为这个释放时间依赖于制造商的作业完成时间,而制造商的新调度又依赖于分销商调度中作业的开始时间,这产生了一个循环依赖问题.为了打破这个循环,分销商在协商调度时,估计作业在制造商的处理时间,并将这个时间加入到分销商处理时间中,用于开始时间和结束时间的计算,然后再在计算出的作业开始时间和结束时间上减去此估计处理时间.用 $\eta_{j,d}$ 表示这个估计值,并用 $d_{j,u}$ 表示分销商调度给制造商作业确定的交货期.下面给出根据分销商作业排列获得分销商和制造商目标值的算法.

算法. *GetObjbyDistributorSchedule.*

输入:分销商作业排列;

输出: $\mu O(\beta) + \lambda O(\alpha')$ 的值, β .

- (1) For \forall job j Do $p_{j,d} \leftarrow p_{j,d} + \eta_{j,d}$, $r_j = 0$;
- (2) 分销商根据作业排列计算 $s_{j,d}, e_{j,d}$ 和调度目标值 $O(\beta)$;
- (3) For \forall job j Do $p_{j,d} \leftarrow p_{j,d} - \eta_{j,u}$, $s_{j,d} = e_{j,d} - p_{j,d}$, $d_{j,u} = s_{j,d}$;
- (4) 分销商将 $d_{j,u}$ 信息和获取满足 $d_{j,u}$ 约束的制造商调度目标值信息作为请求发送给制造商;
- (5) 制造商执行内部调度获得满足 $d_{j,u}$ 约束的调度解 α' , 并将其目标值 $O(\alpha')$ 返回给制造商;
- (6) 制造商将 $O(\beta)$ 与 $O(\alpha')$ 之和作为整个调度的目标值.

3.2 协商调度模式下制造商调度算法

在分销商协商调度模式下, 制造商的问题变为 $S'_M = 1 | C_{j,u} \leq d_{j,u} | \sum C_{j,u}$:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min } \sum C_{j,u} \\ \text{s.t. } C_{j,u} \leq d_{j,u} \end{array} \right\} \quad (4)$$

定理 3. 如果采用 EDD(earliest due date, 交货期优先) 法则, 制造商不能获得满足约束(4)的调度解, 则调度问题 S'_M 不存在可行解.

证明: 假定调度 S 中的作业 j 发生了延迟, 用 d_j 和 C_j 分别表示作业 j 的交货期和完成时间, 如果将作业 j 向后移动, 则作业 j 一定还是延迟的; 考虑将作业 j 向前移动: 如果作业 j 是调度 S 的第 1 个作业, 则调度 S 一定不可行; 如果 j 不是调度 S 的第 1 个作业, 而作业 $j-1$ 能够按时完成, 将作业 j 向前移动, 与作业 $j-1$ 交换, 则存在以下两种情况:

- (1) 如果 $d_{j-1} > d_j$, 表示位置 j 与 $j-1$ 上的作业不满足 EDD 法则, 将作业 j 与 $j-1$ 交换后, 作业 $j-1$ 与作业 j 之间符合 EDD 规则, 再检查此时作业 j 与作业 k 是否满足交货期约束: 如果满足, 则忽略; 如果不满足, 则为下面所述的第(2)种情况;
- (2) 如果 $d_{j-1} < d_j$, 表示位置 j 与 k 上的作业满足 EDD 法则, 将作业 j 与 $j-1$ 交换后, 作业 $j-1$ 的新完成时间 $C'_{j-1} = C_j$. 由于交换前 $C_j > d_j$, 故 $C'_{j-1} > d_j$; 而 $d_j > d_{j-1}$, 故 $C'_{j-1} > d_{j-1}$, 即作业 $j-1$ 必然会发生延迟.

综上所述, 如果在 EDD 规则下存在作业延迟, 则调度问题 S'_M 不存在满足约束(4)的调度解. \square

下面给出求解 $1 | C_{j,u} \leq d_{j,u} | \sum C_{j,u}$ 问题的算法 DDS.

算法. DDS.

输入: 制造商问题参数及 $d_{j,u}$;

输出: 制造商 $1 | C_{j,u} \leq d_{j,u} | \sum C_{j,u}$ 问题的最优调度.

- (1) 利用 EDD 法则获得调度解 S , 检查此解中是否存在不满足交货期约束的作业: 如果存在, 则终止, 返回空解; 否则, 继续;
- (2) 令 S 中作业的排列为 j_1, j_2, \dots, j_n ;
- (3) $i = 2$;
- (4) While $i \leq n$ Do
 - (4.1) If $p_{i-1} > p_i$, 尝试交换作业 j_i 与 j_{i-1} , 如果作业 j_{i-1} 不发生延迟则继续; 否则, 转步骤(4.4);
 - (4.2) 交换作业 j_i 与 j_{i-1} ; $k = i - 1$;
 - (4.3) While $k > 1$ Do
 - (4.3.1) If $p_{k-1} > p_k$, 尝试交换作业 j_k 与 j_{k-1} ; 如果作业 j_{k-1} 不发生延迟, 则继续; 否则, break;
 - (4.3.2) 交换作业 j_k 与 j_{k-1} ;
 - (4.3.3) $k = k - 1$;
 - (4.4) $i = i + 1$.

定理 4. 算法 DDS 能够获得问题 $1 | C_{j,u} \leq d_{j,u} | \sum C_{j,u}$ 的最优解.

证明: 在没有公式(4)的约束下, 可以通过 SPT(shortest process time, 处理时间优先)法则获得问题 $1 | \sum C_{j,u}$ 的最优解. 针对问题 $1 | C_{j,u} \leq d_{j,u} | \sum C_{j,u}$ 的解 S , 如果能在不违反公式(4)的约束下满足 SPT 规则, 则 S 是问题

$1\|C_{j,u} \leq d_{j,u} | \sum C_{j,u}$ 的最优解.由 DDS 算法可知, S 中不存在延迟作业.现任意挑选两个作业 i 和 $j(i < j)$,检查它们的关系:

- (1) $p_i \leq p_j$,由于作业 i 位于作业 j 之前,符合 SPT 规则;
- (2) $p_i > p_j$,若交换作业 i 与作业 j 不违反交货期约束,则交换作业 i 与作业 j ,这由 DDS 算法的步骤(4.2)和步骤(4.3.2)保证;如果违反交货期,则保持顺序不变,这由 DDS 算法的步骤(4.1)和步骤(4.3.1)保证. \square

定理 5. 算法 DDS 的时间复杂度为 $O(n^2)$.

证明:在 DDS 算法中,EDD 规则的时间复杂度为 $O(n \log n)$,步骤(4)的时间复杂度为 $O(n^2)$,故整个 DDS 算法的时间复杂度为 $O(n^2)$.最好情况是,作业处理时间的顺序与交货期的顺序一致,即 $d_i < d_j$,则 $p_i < p_j(i \neq j)$,此时,步骤(4)可在 $O(n)$ 的时间内完成. \square

3.3 协商调度模式下分销商的协同演化调度算法

对于分销商作业的任意一个排列,均可以利用算法 1 来计算这个排列的目标函数值.分销商需要从若干作业排序方案中找到一个最优排列.分销商内部的调度问题可以表示为 $1\|\sum C_{j,u} + \sum w_j T_j$,由于 $1\|\sum w_j T_j$ 是 NP-hard 的,故 $1\|\sum C_{j,u} + \sum w_j T_j$ 也是 NP-hard 的.为此,我们提出了基于生态竞争的协同演化算法来求解分销商调度问题 $1\|\sum C_{j,u} + \sum w_j T_j$.

协同演化算法是一种维护多个种群、每个种群既进行独立的演化求解又进行种群间协同求解的一种新型演化算法.相比于遗传算法等传统智能优化算法,协同演化算法由于利用了多个独立演化种群及其交互,故协同演化算法通常比遗传算法具有更好的优化性能^[22-24],很适用于求解 $1\|\sum C_{j,u} + \sum w_j T_j$ 问题.

借鉴生态学理论,种群 i 与种群 $j(j \neq i)$ 之间的竞争关系可以由 Lotka-Volterra 模型表达:

$$\frac{dN_i}{t} = r_i N_i \left(\frac{K_i - N_i - \alpha_{ij} N_j}{K_i} \right) \tag{5}$$

$$\frac{dN_j}{t} = r_j N_j \left(\frac{K_j - N_j - \alpha_{ji} N_i}{K_j} \right) \tag{6}$$

其中, N_i 和 N_j 分别为两个种群的大小, K_i 和 K_j 分别为两个种群的环境容纳量, r_i 和 r_j 分别为种群 i 与种群 j 的增长率.其中, $N_i/K_i(i=1,2)$ 可以指已占用的环境空间, $1-N_i/K_i$ 为未占用的环境空间, $\alpha_{ij}(i=1,2,j=1,2,i \neq j)$ 表示种群 j 对种群 i 的竞争系数,即种群 j 一个个体所占用的空间相当于 α_{ij} 个种群 i 个体所占空间.

种群 N_i 中,每个个体对自身种群的增长抑制作用为 $1/K_i$;种群 N_j 中,每个个体对种群 $N_i(i \neq j)$ 的抑制作用为 α_{ij}/K_i .如果种群 N_j 对 N_i 的抑制作用大于种群 N_j 对自身的抑制作用,即 $\alpha_{ij}/K_i > 1/K_j$,则种群 N_j 可以完全抑制 N_i ,种群 N_i 最终会被 N_j 完全吞并.只有当 $\alpha_{ij}/K_i < 1/K_j$ 且 $\alpha_{ji}/K_j < 1/K_i(j \neq i)$ 时,种群 N_i 和 N_j 都不能抑制对方,两个种群最终将取得平衡.

具有 M 个种群的 Lotka-Volterra 模型如下表示:

$$\frac{dN_i}{t} = r_i N_i \left(\frac{K_i - N_i - \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} N_j}{K_i} \right) \tag{7}$$

Lotka-Volterra 模型很适用于描述多种群协同演化算法中种群之间的竞争协同关系,其中的关键参数是 α_{ij} ,对种群个体是增长还是减少起到决定性作用.定义种群 i 和 j 在第 t 次演化后的最好适应度为 B_{it} 和 B_{jt} ,种群 i 和 j 在第 t 次演化后的平均适应度为 A_{it} 和 A_{jt} ,则 α_{ij} 第 t 次演化后的取值如下所示:

$$\alpha'_{ij} = \begin{cases} \frac{B_{jt}}{B_{jt}}, & \text{if } A_{jt} > A_{it}, B_{jt} < B_{it} \\ \frac{A_{jt}}{A_{jt}}, & \text{if } A_{jt} < A_{it}, B_{jt} > B_{it} \\ \frac{A_{jt} + B_{jt}}{A_{jt} + B_{jt}}, & \text{others} \end{cases} \quad (8)$$

与 α_{ij} 对应, α'_{ji} 在第 t 次演化后的取值如下所示:

$$\alpha'_{ji} = \begin{cases} \frac{A_{jt}}{A_{jt}}, & \text{if } A_{it} > A_{jt}, B_{it} < B_{jt} \\ \frac{B_{jt}}{B_{jt}}, & \text{if } A_{it} < A_{jt}, B_{it} > B_{jt} \\ \frac{A_{jt} + B_{jt}}{A_{it} + B_{it}}, & \text{others} \end{cases} \quad (9)$$

公式(8)与公式(9)在确定 α_{ij} 及 α_{ji} 第 t 次演化后的取值蕴含了以下思想:如果一个种群不够好,则会受到一定惩罚,惩罚的方法是一定程度地增加另一个种群对此种群的抑制作用;如果一个种群足够好,则会受到奖励,奖励的方法是大幅度削减另一个种群对此种群的抑制作用;如果一个种群很不好,则会受到严厉惩罚,惩罚的方法是大幅增加另一个种群对此种群的抑制作用.如果 $B_{it} < B_{jt}$ 且 $A_{it} > A_{jt}$ 以及 $B_{it} > B_{jt}$ 且 $A_{it} < A_{jt}$,则表示种群 i 的最优适应度好于种群 j 的最优适应度,但其平均适应度劣于种群 j 的平均适应度;类似地, $B_{it} > B_{jt}$ 且 $A_{it} < A_{jt}$ 则表示种群 i 的最优适应度劣于种群 j 的最优适应度,但其平均适应度优于种群 j 的平均适应度.这两种情况都表示种群 i 和 j 均不是足够好,只有当 $B_{it} < B_{jt}$ 且 $A_{it} < A_{jt}$ 时,种群 i 才足够好,而种群 j 很不好.

如果种群 i 和 j 的个体数量之和降低到了某个阈值 $\delta(\delta = \min(N_i, N_j)/2)$,且两个种群均不够好,则将两个种群融合,形成一个新的种群,再随机产生 $\gamma(\gamma = N_i + N_j - \delta)$ 个解加入到新种群中,然后将这个新种群分为两个独立种群 i 和 j 继续进行协同演化,种群 i 和 j 的规模分别为 N_i 和 N_j .对于 M 个种群,被融合的两个种群是个体数量最少的两个种群.如果种群 j 的个体数量降到了0,种群 i 的个体数量为 N'_i ,则随机产生 $\xi(\xi = N_i + N_j - N'_i)$ 个解加入到种群 j 中,然后再将这个种群分裂为两个独立种群继续进行协同演化,种群 i 和 j 的规模分别为 N_i 和 N_j .对于 M 个种群,种群 j 为个体数量最多的那个种群.

如果种群 i 的增长率 dN_i/t 为负值,则从种群中删除最差的 dN_i/t 个个体,提高种群 i 的整体竞争力,同时节约计算时间;反之,如果种群 i 的增长率为正值,则随机产生 dN_i/t 个个体加入到种群 i 中,降低其整体竞争力,提高种群多样性.

(1) 染色体编码

将所有待调度作业组成的排列作为染色体. n 个作业调度解的染色体基因个数也为 n ,每个基因的值为1到 n 的整数,且任意两个基因的均不相同.

(2) 交叉

采用单点交叉策略,对于两个交叉的染色体 S_1 和 S_2 ,随机选择一个交叉点 $k(0 < k \leq n)$,产生两个新解 S_3 和 S_4 .新解 S_3 继承 S_1 中1到 $k-1$ 位置上的基因及其顺序,第 k 到第 n 个基因来自于 S_2 ,是 S_2 去掉 S_3 中基因所代表的作业后剩余的作业,并保持在 S_2 中的先后顺序.类似地,新解 S_4 继承 S_2 中1到 $k-1$ 位置上的基因及其顺序,第 k 到第 n 个基因来自于 S_1 ,是 S_1 去掉 S_4 中基因所代表的作业后剩余的作业,并保持在 S_1 中的先后顺序.图2给出了8个作业($n=8$)的调度问题交叉操作示意图, $k=5$.

(3) 变异

采用基因交换变异策略,随机选择两个位置 k_1 和 k_2 ,交换两个位置上的基因形成新解.图3给出了8个作业($n=8$)的调度问题交换变异操作示意图, $k_1=3, k_2=6$.

(4) 组合-分裂算子

将种群 1 和种群 2 组合形成新种群 3,如果种群 3 的个体数量 N_3 小于 N_1+N_2 ,则随机产生 $N_1+N_2-N_3$ 个解加入到种群 3 中;否则,从种群 3 中选择 $N_3-N_1+N_2$ 个最好的个体,并删除其余个体,然后随机选择 N_1 个个体形成新种群 1,剩余个体形成新种群 2.

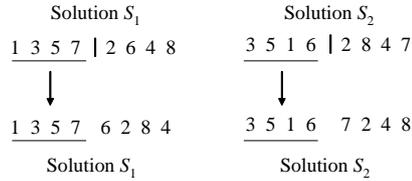


Fig.2 Single crossover operator
图 2 单点交叉操作

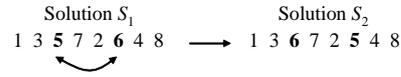


Fig.3 Swap mutation operator
图 3 交换变异操作

4 仿真实验

仿真实验的目的是验证本文提出的分销商协商调度模型与算法的有效性.随机生成若干算例进行实验.算例的作业规模分别为 20,40,60,80,100,150,200,代表了算例规模从小到大的变化.每种作业规模有 3 个算例.制造商和分销商作业处理时间是 1~100 的随机数,一个作业的交货期是此作业在分销商处理时间与一个随机数 δ 的乘积, δ 的取值范围为 1.5~2.5.单位延迟惩罚时间为 1~3 之间的整数.

算法用 Java 语言编写,所有实例运行在一个 Lenovo ThinkPad 笔记本电脑上,CPU 为 Intel (R) Core (TM) 2.1GHz,内存为 3GB.针对每个算例,算法重复运行 10 遍,取 10 遍运行中的最好值和平均值进行协商效果比较.制造商和分销商之间目标换算因子 λ 为 0.5.竞争演化算法的参数为:种群个数为 2,每个种群规模均为 50($N_1=N_2=50$),每个种群的环境容量为所有种群规模之和($K_1=K_2=100$),种群的增长率 $r_i=K_i/N_i+2, i=1,2$,每个种群的交叉概率、变异概率和赌轮盘选择压力分别为 0.7,0.3 和 2,连续 50 次迭代,当不能改善当前最优解时就停止演化.

用 MDS 表示制造商占优顺序调度模式,DNS 表示分销商协商调度模式,用制造商调度解目标值与分销商调度解目标值之和来表示 MDS 和 DNS 两种调度解的最终结果.根据定理 1,DNS 在这个目标下获得最优解即是分销商的最优解,MDS 和 DNS 在这个目标下获得的解之差可衡量分销商协调调度效果.表 1 给出了两种调度模式在 10 次运行中获得的最好解目标值(用 $Best$ 表示)和 10 次运行所获得的最好解的平均值(用 Avg 表示).DNS 获得的调度最好解对 MDS 的改善度用 Im 表示,其计算方法如公式(10)所示,其中, $Best_{MDS}$ 和 $Best_{DNS}$ 分别为 MDS 和 DNS 所获得的最好解目标值.

$$Im = \frac{Best_{MDS} - Best_{DNS}}{Best_{MDS}} \times 100\% \quad (10)$$

从表 1 可以看出, Im 值均为正,说明 DNS 能够有效改善分销商调度,最大改善度为 25.07%,最小改善度为 6.62%,平均改善度为 17.41%.

表 2 给出了 MDS 和 DNS 调度的最好解中制造商和分销商解的变化情况,用 Im_M 和 Im_D 分别表示 DNS 最好解中制造商调度目标值相对于 MDS 最好解中制造商调度目标值的改善度以及 DNS 最好解中分销商调度目标值相对于 MDS 最好解中分销商调度目标值的改善度,其计算方式如下(其中, $MBest_{MDS}$ 和 $DBest_{MDS}$ 分别为 MDS 最好解中制造商和分销商调度目标值, $MBest_{DNS}$ 和 $DBest_{DNS}$ 分别为 DNS 最好解中制造商和分销商调度目标值):

$$Im_M = \frac{MBest_{MDS} - MBest_{DNS}}{MBest_{MDS}} \times 100\% \quad (11)$$

$$Im_D = \frac{DBest_{MDS} - DBest_{DNS}}{DBest_{MDS}} \times 100\% \quad (12)$$

从表 2 可以看出,DNS 算法获得的解导致制造商调度变差、分销商变好,分销商需要补偿制造商才能进行

协商,但在分销商补偿制造商后还有较大程度改善.分销商调度的改善程度主要依赖于其调度目标值的减少,如 Im 为 25.07% 的问题 20_2,分销商调度改善 Im_D 达到 92.34%.

Table 1 Scheduling results of MDS and DNS

表 1 MDS 和 DNS 调度结果

	MDS		DNS		
	Mean	Best	Mean	Best	Im (%)
20_1	20 555	20 555	16 121	16 110	21.62
20_2	9 448	9 447	7 162	7 079	25.07
20_3	8 064	8 064	7 078	7 032	12.80
40_1	29 422	29 363	27 539	27 418	6.62
40_2	53 180	53 010	44 867	44 532	15.99
40_3	43 238	43 142	33 540	33 056	23.38
60_1	80 643	80 625	66 993	66 486	17.54
60_2	88 202	88 142	68 991	68 474	22.31
60_3	89 915	89 880	74 824	74 591	17.01
80_1	195 194	194 718	156 396	155 887	19.94
80_2	178 762	178 688	141 241	140 257	21.51
80_3	131 955	131 780	115 161	113 287	14.03
100_1	259 677	259 515	223 142	221 528	14.64
100_2	263 512	263 038	218 564	216 767	17.59
100_3	263 081	262 407	224 960	223 001	15.02
150_1	513 122	512 562	445 785	442 227	13.72
150_2	617 051	616 014	504 017	501 124	18.65
150_3	525 695	523 495	437 318	435 440	16.82
200_1	996 920	996 203	818 779	814 041	18.29
200_2	995 876	994 556	838 150	834 626	16.08
200_3	979 258	977 645	817 570	812 529	16.89

Table 2 Scheduling results of manufacturer and distributor in MDS and DNS

表 2 MDS 和 DNS 中制造商和分销商的调度结果

	MDS		DNS				
	$MBest_{MDS}$	$DBest_{MDS}$	$MBest_{DNS}$	$DBest_{DNS}$	Im_M (%)	Im_D (%)	Im (%)
20_1	10 158	10 397	11 172	4 938	-9.98	52.51	21.62
20_2	6 094	3 353	6 822	257	-11.95	92.34	25.07
20_3	6 005	2 059	6 313	719	-5.13	65.08	12.80
40_1	25 351	4 012	26 399	1 019	-4.13	74.60	6.62
40_2	32 352	20 658	35 687	8 845	-10.31	57.18	15.99
40_3	26 194	16 948	30 192	2 864	-15.26	83.10	23.38
60_1	56 251	24 374	61 580	4 906	-9.47	79.87	17.54
60_2	58 645	29 497	65 117	3 357	-11.04	88.62	22.31
60_3	67 885	21 995	72 390	2 201	-6.64	89.99	17.01
80_1	117 986	76 732	138 134	17 753	-17.08	76.86	19.94
80_2	107 162	71 526	125 226	15 031	-16.86	78.99	21.51
80_3	95 170	36 610	103 034	10 253	-8.26	71.99	14.03
100_1	180 100	79 415	197 337	24 191	-9.57	69.54	14.64
100_2	175 013	88 025	199 048	17 719	-13.73	79.87	17.59
100_3	178 030	84 377	208 426	14 575	-17.07	82.73	15.02
150_1	364 837	147 725	409 090	33 137	-12.13	77.57	13.72
150_2	408 792	207 222	463 481	37 643	-13.38	81.83	18.65
150_3	355 500	167 995	409 803	25 637	-15.28	84.74	16.82
200_1	684 401	311 802	755 159	58 882	-10.34	81.12	18.29
200_2	688 510	306 046	770 640	63 986	-11.93	79.09	16.08
200_3	647 132	330 513	739 710	72 819	-14.31	77.97	16.89

图 4 以算例 40_1 和 80_1 为例给出了分销商估计的作业 j 在制造商的处理时间 $\eta_{j,d}$ 对 DNS 调度结果的影响情况,令 $\eta_{j,d} = \xi \cdot p_{j,d}$, ξ 的取值范围为 1.0~1.7. 值得注意的是,根据 *getObjbyDistributorSchedule* 算法, ξ 如果小于 1, 则制造商一定不会获得满足交货期约束的解,故,这里 ξ 的取值均大于 1. x 轴表示 ξ 的取值, y 轴表示 DNS 的调度结果. 从图 4 可以看出,随着 ξ 取值的增加, DNS 调度结果越来越差,但主要受影响的是分销商的成本,制造商的成本几乎不受影响,而且有下降的趋势. 这表明 $\eta_{j,d}$ 越与 $p_{j,d}$ 接近, DNS 的调度效果越好; 也表明,如果制造商和分销商之间信息越透明,则分销商协商效果越好,对整个供应链调度的结果也越好. 制造商由于从释放时间开始调

度,且其目标为最小化作业完成时间之和,交货期的松紧与否对其造成的影响有限.

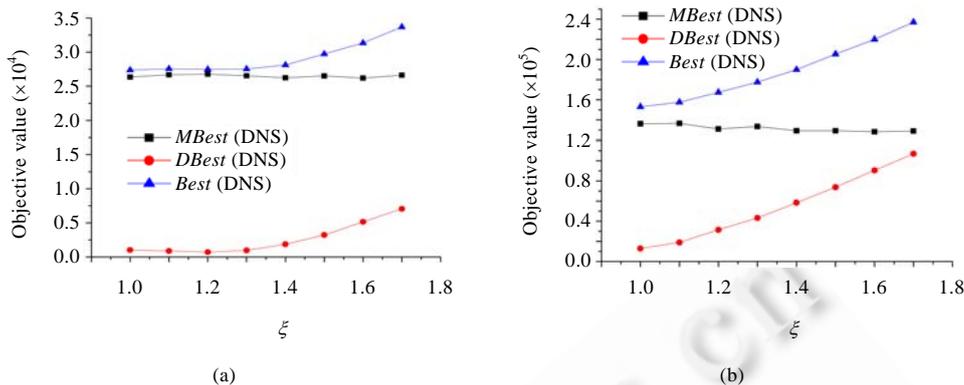


Fig.4 Influences of estimated process time $\eta_{i,d}$ of manufacturer on scheduling of DNS

图 4 制造商的估计处理时间 $\eta_{i,d}$ 对 DNS 调度结果的影响

图 5 描述了竞争协同算法中,组合-分裂算子对算法寻优的促进作用.考虑两种不同的演化停止准则:一种是如果连续 50 次迭代不能改善当前最优解就停止演化;另一种是 4 种算法均执行相同时间,计算时间随种群规模的变化而变化,等于 $10 \times ps / 20s$,其中, ps 为种群规模.图 5(a)和图 5(b)分别对应上述两种停止准则.横轴为作业数量,纵轴为不采用组合-分裂算子时算法获得目标值与采用组合-分裂算子时算法获得目标值之差.从图 5 可以看出,差值均为正,表明无论是第 1 种停止准则还是第 2 种停止准则,采用组合-分裂算子对竞争协同演化算法均具有较好的促进作用.此外,随着作业数量的增加,差值有扩大的趋势.

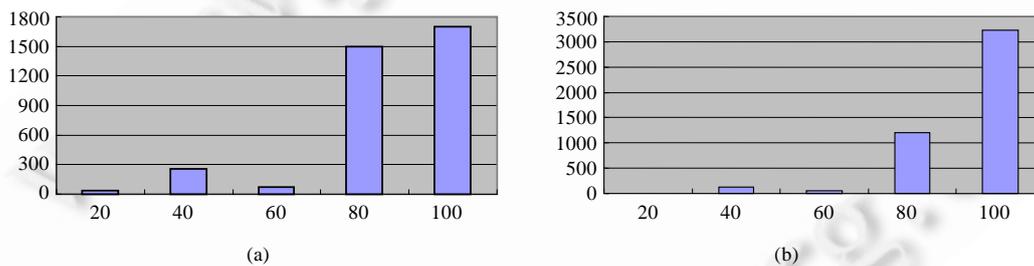


Fig.5 Effects of combination-split operator on optimization capacity of competitive coevolutionary algorithm

图 5 竞争协同算法中组合-分裂算子对寻优的促进作用

为进一步验证本文所提出的竞争协同演化算法(用 CCE 表示)的性能,将 CCE 与遗传算法(不考虑 CCE 中的多种群竞争协同,只使用一个种群,用 GGA 表示)、粒子群算法(采用文献[25]提出的自适应混合粒子群算法,用 PSO 表示.由于 CCE 没有考虑邻域搜索,故 PSO 也不考虑作业提出的基于邻域的贪心随机搜索策略)与蚁群算法(采用文献[26]中提出的蚁群算法,用 ACO 表示,也不考虑其中的邻域搜索)这 3 种算法应用到不同作业规模的问题上(每种规模的问题选择第 1 个算例),种群规模设为 100.同样考虑上述两种不同的演化停止准则.图 6 给出了 4 种算法在不同作业规模问题上所获得的最好解情况,其中,图 6(a)应用了第 1 种演化停止准则,图 6(b)应用了第 2 种演化停止准则.从图 6 可以看出,不论哪种演化停止准则,CCE 算法均能获得比其他 3 种算法更好的解,其中,GGA 算法的效果比 CCE 要差,但优于其他两种算法;ACO 算法的演化效果最差,所获得的最优解目标值几乎是 CCE 最优解目标值的 1 倍,可能与其演化计算原理有关.从图 6(b)可知,在相同计算时间这种公平环境下,CCE 也能获得比其他 3 种算法更好的解,充分说明了其求解本文供应链协商调度问题的优越性.

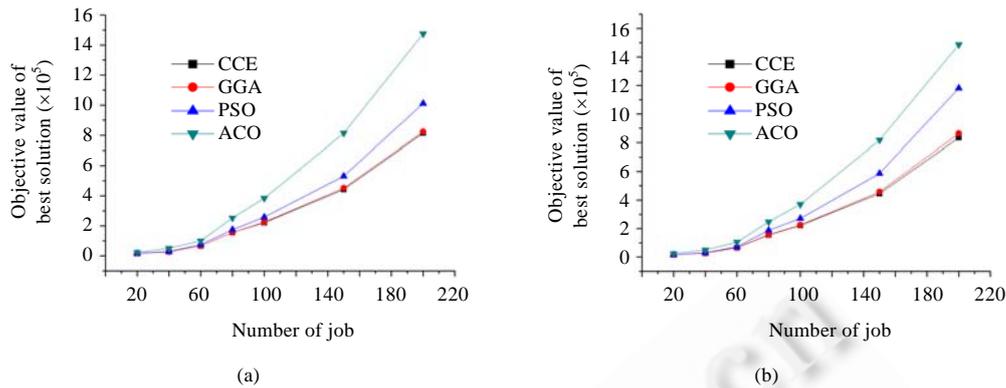


Fig.6 Comparison between four algorithms on different computational cases

图 6 4 种算法在不同算例上的比较

图 7 给出了 4 种算法在算例 40_1 上的演化曲线,其中,图 7(a)和图 7(b)分别对应上述两种停止准则.从图 7 可以看出:CCE 算法在计算过程中始终保持优势;GGA 的演化代数最多,但后期的演化动力很弱,改善最优解的能力很差;PSO 和 ACO 算法很快进入早收敛状态.ACO 的演化曲线印证了其较差的优化能力.

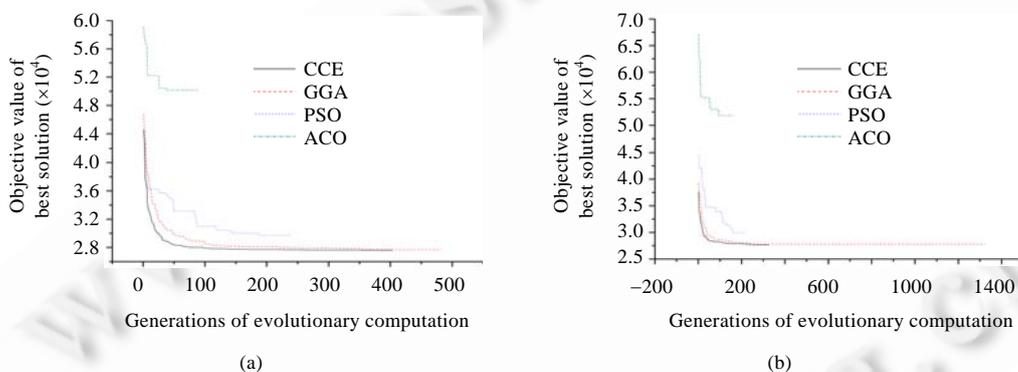


Fig.7 Evolutionary processes comparison between four algorithms

图 7 4 种算法演化过程比较

5 结论

在制造商占优的条件下,制造商将根据自己的优化目标实施内部调度,然后分销商再根据制造商调度所确定的作业释放时间实施自己的调度,这种模式对制造商调度有利,但对分销商调度和供应链整体调度不利.本文以分销商协商调度为出发点,提出了基于补偿的协商调度模型,并将模型问题转为制造商和分销商整体调度问题.为保持制造商作业处理时间信息的私有性,提出了基于请求-响应的协商调度模式.通过基于 EDD 的制造商非延迟最优调度算法及基于生态种群竞争的分销商调度算法,有效解决了分销商协商调度问题.仿真实验验证了协商调度模型与算法对分销商调度性能改善的有效性,为供应链高效调度运营提供了理论依据.

未来我们将考虑更加复杂的供应链结构,如包含一个制造商和多个分销商的供应链.针对这类供应链,仍然可以采用基于补偿的协商模式:一方面,每个分销商可以独立地与制造商进行协商.由于每个分销商的调度目标可能有所不同,故其协商调度问题是一个多目标协商调度问题,可利用多目标演化算法获得问题的非支配解集;另一方面,所有分销商可以联合形成一个整体,与制造商协商,然后按照某种规则分享协商收益.另外,不同的制造商和分销商调度目标组合将也是未来的研究方向之一.

References:

- [1] Su S, Zhan DC, Xu XF. An extended state task network formulation for integrated production-distribution planning in supply chain. *Ruanjian Xuebao/Journal of Software*, 2007,18(7):1626–1638 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1626.htm> [doi: 10.1360/jos181626]
- [2] Hall NG, Lesaoana MA, Potts CN. Supply chain scheduling: Batching and delivery. *Operations Research*, 2003,51(4):566–584. [doi: 10.1287/opre.51.4.566.16106]
- [3] Chang YC, Lee CY. Machine scheduling with job delivery coordination. *European Journal of Operational Research*, 2004,158(2):470–487. [doi: 10.1016/S0377-2217(03)00364-3]
- [4] Hall NG, Potts CN. The coordination of scheduling and batch deliveries. *Annals of Operations Research*, 2005,135(1):41–64. [doi: 10.1007/s10479-005-6234-8]
- [5] Chen ZL, Vairaktarakis GL. Integrated scheduling of production and distribution operations. *Management Science*, 2005,51(4):614–628. [doi: 10.1287/mnsc.1040.0325]
- [6] Pundoor G, Chen ZL. Scheduling a production-distribution system to optimize the tradeoff between delivery tardiness and distribution cost. *Naval Research Logistics*, 2005,52(6):571–589. [doi: 10.1002/nav.20100]
- [7] Dawande M, Geismar HN, Hall NG, Sriskandarajah C. Supply chain scheduling: distribution systems. *Production Operation Management*, 2006,15(2):243–261. [doi: 10.1111/j.1937-5956.2006.tb00243.x]
- [8] Agnetis A, Hall NG, Pacciarelli D. Supply chain scheduling: Sequence coordination. *Discrete Applied Mathematics*, 2006,154(15):2044–2063. [doi: 10.1016/j.dam.2005.04.019]
- [9] Gong H, Tang LX. The coordination of two parallel machines scheduling and batch deliveries. In: *Proc. of the COCOON 2008*. LNCS 5092, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 670–677. [doi: 10.1007/978-3-540-69733-6_66]
- [10] Esainani S, George S. Approximation algorithms for the supplier's supply chain scheduling problem to minimize delivery and inventory holding costs. *Operations Research*, 2009,57(2):426–438. [doi: 10.1287/opre.1080.0622]
- [11] Zegordi SH, Kamal Abadi IN, Beheshti NMA. A novel genetic algorithm for solving production and transportation scheduling in a two-stage supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 2010,58(3):373–381. [doi: 10.1016/j.cie.2009.06.012]
- [12] Li KP, Ma SH. Study of synchronized scheduling of parallel machine manufacturing and air transportation within ATO supply chain. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2007,27(12):9–51 (in Chinese with English abstract).
- [13] Tadeusz S. Coordinated supply chain scheduling. *Int'l Journal of Production Economics*, 2009,120(2):437–451. [doi: 10.1016/j.ijpe.2008.08.059]
- [14] Alebachew DY, Kudret D. A genetic approach to two-phase optimization of dynamic supply chain scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 2010,58(3):411–422. [doi: 10.1016/j.cie.2009.01.010]
- [15] Yao J, Liu L. Optimization analysis of supply chain scheduling in mass customization. *Int'l Journal of Production Economics*, 2009, 117(1):197–211. [doi: 10.1016/j.ijpe.2008.10.008]
- [16] Bhatnagar R, Mehta P, Teo CC. Coordination of planning and scheduling decisions in global supply chains with dual supply modes. *Int'l Journal of Production Economics*, 2011,131(2):473–482. [doi: 10.1016/j.ijpe.2011.01.011]
- [17] Yeung WK, Choi TM, Cheng TCE. Optimal scheduling of a single-supplier single-manufacturer supply chain with common due windows. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 2010,55(12):2767–2777. [doi: 10.1109/TAC.2010.2049766]
- [18] Dan B, Xiao J, Liu XH, Zhang XM, Li ZW, Tang HL. Batch scheduling of a multi-stage supply chain with due windows. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007,13(2):312–316 (in Chinese with English abstract).
- [19] Yao JM, Liu LW, Pu Y, Zhang XM. Analysis on ants optimization algorithm for supply chain dynamic scheduling in mass customization. *Journal of Management Sciences in China*, 2007,10(3):7–41 (in Chinese with English abstract).
- [20] Chen ZL, Hall NG. Supply chain scheduling: Conflict and cooperation in assembly systems. *Operations Research*, 2007,55(6):1072–1089. [doi: 10.1287/opre.1070.0412]
- [21] Manoj UV, Gupta JND, Gupta SK, Sriskandarajah C. Supply chain scheduling: Just-in-time environment. *Annals of Operations Research*, 2008,161(1):53–86. [doi: 10.1007/s10479-007-0290-1]
- [22] Dong HB, Huang HK, Yin GS, He J. An overview of the research on coevolutionary algorithms. *Journal of Computer Research and Development*, 2008,45(3):454–463 (in Chinese with English abstract).

- [23] Tan KC, Yang YJ, Goh CK. A distributed cooperative coevolutionary algorithm for multiobjective optimization. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2006,10(5):527-549. [doi: 10.1109/TEVC.2005.860762]
- [24] He RJ, Chen YN, Yao F, Xing LN. Knowledge-Based co-evolutionary approach for flexible job shop scheduling. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011,17(2):310-315 (in Chinese with English abstract).
- [25] Zhang CS, Sun JG, Ouyang DT, Zhang YG. A Self-Adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm for flow shop scheduling problem. Chinese Journal of Computers, 2009,32(11):2137-2146 (in Chinese with English abstract).
- [26] Keskinurk T, Yildirim MB, Barut M. An ant colony optimization algorithm for load balancing in parallel machines with sequence-dependent setup times. Computers & Operations Research, 2012,39(6):1225-1235. [doi: 10.1016/j.cor.2010.12.003]

附中文参考文献:

- [1] 苏生,战德臣,徐晓飞.基于扩展状态任务网的制造供应链计划.软件学报,2007,18(7):1626-1638. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1626.htm> [doi: <http://dx.doi.org/10.1360/jos181626>]
- [12] 李昆鹏,马士华.ATO供应链中航空运输及并行机生产协调调度问题.系统工程理论与实践,2007,27(12):9-51.
- [18] 但斌,肖剑,刘晓红,张旭梅,李志威,汤华丽.基于交货期窗口约束的多级供应链批量调度问题研究.计算机集成制造系统,2007,13(2):312-316.
- [19] 姚建明,刘丽文,蒲云,张秀敏.MC模式下供应链动态调度的蚁群寻优分析.管理科学学报,2007,10(3):7-41.
- [22] 董红斌,黄厚宽,印桂生,何军.协同演化算法研究进展.计算机研究与发展,2008,45(3):454-463.
- [24] 贺仁杰,陈宇宁,姚锋,邢立宁.求解柔性车间作业调度的知识型协同演化方法.计算机集成制造系统,2011,17(2):310-315.
- [25] 张长胜,孙吉贵,欧阳丹彤,张永刚.求解车间调度问题的自适应混合粒子群算法.计算机学报,2009,32(11):2137-2146.



苏生(1978-),男,四川南充人,博士,副教授,主要研究领域为复杂系统智能调度,演化算法,互联网搜索引擎.

E-mail: susheng@uestc.edu.cn



于海杰(1977-),女,博士,讲师,主要研究领域为供应链管理,复杂系统调度.

E-mail: yuhaijie@uestc.edu.cn



吴正华(1971-),男,博士,副教授,主要研究领域为人机交互技术,脑机接口技术.

E-mail: wzhxwz@sina.com



汤羽(1964-),男,博士,教授,CCF 高级会员,主要研究领域为并行计算,分布式计算.

E-mail: yutang@uestc.edu.cn