

基于禁忌搜索的平行机多工厂供应链调度

蒋大奎 李 波

天津大学,天津,300072

摘要:提出一类平行机多工厂供应链调度问题,从整体的角度优化订单分配、生产调度和运输调度。以交货期限内完成所有工件的生产和运输总成本最小化为目标,构建了问题的混合整数规划模型。设计了一种基于向量组编码结构的禁忌搜索算法以求解该问题。使用供应链调度策略和独立决策策略分别对算例进行求解,数据结果验证了供应链调度策略的优越性。禁忌搜索算法结果与 CPLEX 的求解结果对比表明,禁忌搜索算法有效可行。

关键词:供应链调度;多工厂;平行机;禁忌搜索

中图分类号:N-945.25;TP29

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.06.012

Multi-plant Supply Chain Scheduling with Parallel Machines Based on Taboo Search Algorithm

Jiang Dakui Li Bo

Tianjin University, Tianjin, 300072

Abstract: A multi-plant supply chain scheduling problem with parallel machines was proposed. Decisions of different functions including order assignment, production scheduling and batch delivery scheduling were integrated for a simultaneous optimization. A mixed integer programming model for the problem was built to minimize the production and distribution cost under the conditions that all jobs were finished before the due date. A taboo search algorithm with vector array representation was designed to solve the problem. Experiments adopting supply chain scheduling approach and decoupled approach respectively were conducted on the problem, and the results confirm the substantial advantages of the supply chain scheduling approach. Furthermore, compared with exact solutions provided by CPLEX, the results show that the designed algorithm is an efficient method for solving the problem.

Key words: supply chain scheduling; multi-plant; parallel machine; taboo search

0 引言

对于一些大型装备制造项目,装备制造企业需要多个零部件加工厂为总装工厂提供装配部件。企业普遍采用的项目实施流程为:企业总部将工件分配给多个零部件加工厂,并要求在指定期限内完成工件生产并送至总装工厂,各个零部件加工厂需要在指定期限内以最低的生产和运输成本完成总部分配的任务。由于总部与零部件加工厂存在着不同的资源约束和决策目标,当各部门独立决策时,难以实现企业整体利益最大化。如何通过对工件分配、工件生产和运输调度协同优化以降低企业内部供应链成本,成为这类企业关注的热点问题。

为了有效地解决这类问题,供应链调度问题(supply chain scheduling)被提出,并受到广泛关注。供应链调度问题将排序理论应用于供应链管理,对生产调度和分批发送 2 个阶段的问题集成

研究,从具体操作层面使用确定性模型研究供应链问题^[1]。文献[2-4]分别研究了单机器和平行机单工厂供应链调度问题,但并没有考虑订单运输时间和车辆装载能力约束。针对上述研究的不足,文献[5-8]提出了启发式算法以求解考虑订单运输时间和车辆装载能力约束的单机器和平行机单工厂供应链调度问题。对供应链中有多个工厂的情况,由于需要考虑订单分配,问题的复杂性明显增加。Chen 等^[9]研究了单机器作业环境下的多工厂供应链调度问题,证明了问题是 NP 难题,并设计了启发式算法。蒋大奎等^[10]将文献[9]中的客户数量扩展为多个,并设计了混合禁忌搜索算法进行求解。在多工厂供应链调度问题中,目前尚没有关于工厂为平行机作业环境的相关研究报道^[11]。

针对零部件加工厂普遍为平行机作业的特点,本文提出一类平行机多工厂供应链调度问题,为该问题设计了一种基于向量组编码结构的禁忌搜索算法,并通过仿真实验验证了平行机多工厂供应链调度的优越性和本文禁忌算法的有效性。

收稿日期:2011-04-07

基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0236);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100032110034)

1 问题描述及最优性条件

1.1 问题描述

本文的问题描述如下:某企业在不同地理位置共有 m 个零部件加工厂,零部件加工厂集合记作 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 。每个零部件加工厂 i 的加工环境为具有 r_i 台相同的机器,在任意时刻,每台机器只能加工一个工件。计划期内企业需要加工 n 个工件(订单),工件集合记作 $N = \{1, 2, \dots, n\}$,每个工件仅需在一台机器上加工一次。工件 j 在工厂 i 的加工时间为 p_{ij} ,加工成本为 c_{ij} 。工件加工后按批次发送给总装工厂,每个批次最多发送 b 个工件。工厂 i 发送一个批次的运输时间为 t_i ,运输成本为 f_i 。所有工件必须在交货期限 D 内送至总装工厂。企业需要将工件分配给各个零部件加工厂、安排工件在各台机器上的加工顺序以及对如何分批发送工件进行决策,通过制定集成调度方案(以下简称方案)以使完成所有工件的生产和运输总成本最小。为方便,将本文问题简记为 P 。问题 P 的结构如图 1 所示。

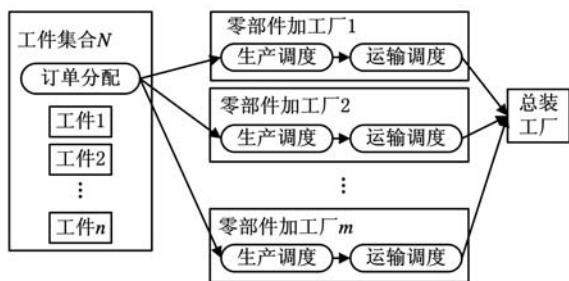


图 1 平行机多工厂供应链调度问题结构图

为方便表达,本文采用三参数法(δ, σ, φ)描述一个方案,其中参数 δ 表示一个订单分配子方案,它指定了每个工件的加工工厂;参数 σ 表示 δ 给定下的一个生产调度子方案,它指定了加工每个工件的机器及加工顺序;参数 φ 表示 σ 给定下的一个分批运输子方案,它指定了工厂的发送批次、每批次的发送时间及工件所在的发送批次。

1.2 最优性条件

定理 1 对于问题 P ,存在具有以下性质的最优调度:

- (1) 同一个工厂加工任何 2 个工件之间没有空闲。
- (2) 每一批工件的发送均发生在该批工件中的某一个工件的加工完成时间。
- (3) 每个工厂加工的所有工件按加工完成顺序进行发送。

记集合 $N_i(\sigma)$ 为生产调度子方案 σ 指定的由工厂 i 加工的工件集合, $N_i(\sigma)$ 中工件数量为

$$n_i(\sigma)。$$

定理 2 当 δ 和 σ 给定时,问题 P 具有一个最优的分批运输子方案 φ^* 。将每个集合 $N_i(\sigma)$ 中的所有工件分成 y_i 个批次发送, y_i 的计算公式为

$$y_i = \lceil \frac{n_i(\sigma)}{b} \rceil \quad i \in M$$

式中, $\lceil \frac{n_i(\sigma)}{b} \rceil$ 表示不小于 $\frac{n_i(\sigma)}{b}$ 的最小整数。

其中,第一个批次发送 $n_i(\sigma) - (y_i - 1)b$ 个工件,其余的 $y_i - 1$ 个批次均发送 b 个工件。

定理 1 的结论显然成立,定理 2 的证明见文献[11]的定理 7。

通过上述定理,问题得到简化。简化后问题的决策变量为 $x_{ijk} = 1$,即工件 j 由工厂 i 的第 k 台机器加工,否则为 0; y_i 为工厂 i 发送的批次数。

借鉴文献[9]单机器多工厂供应链调度问题的数学模型,问题 P 的混合整数规划模型可以表示为

$$\min \left(\sum_{i \in M} \sum_{j \in N} \sum_{k=1}^{r_i} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{i \in M} f_i y_i \right) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in N} p_{ij} x_{ijk} + t_i \leq D \quad (2)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, r_i\} \quad \forall i \in M$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{k=1}^{r_i} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k=1}^{r_i} x_{ijk} \leq b y_i \quad \forall i \in M \quad (4)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad y_i \geq 0 \text{ integer} \quad (5)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, r_i\} \quad \forall i \in M \quad \forall j \in N$$

其中,目标函数式(1)的第一项表示完成所有工件的生产总成本,第二项为运输总成本;约束式(2)表示各机器加工的工件必须在交货期限内完成;约束式(3)表示每个工件的加工需求均要得到满足,且只能由一台机器加工;约束式(4)为发送批次的约束。

2 禁忌搜索算法设计

禁忌搜索算法(taboo search algorithm, TS)作为一种求解全局优化问题的智能优化算法,广泛应用于 NP-hard 组合优化问题的近似求解^[12-13]。针对问题特点,本文设计了一种基于向量组编码结构的禁忌搜索算法及 3 种邻域操作。

2.1 编码结构

借鉴C++标准模板库,本文设计了一种基于序数编码的向量组(vector array)编码结构。对于一个向量组,其拥有向量(vector)的数量为所有机器数量 $\sum_{i \in M} r_i$,向量 \mathbf{V}_{ik} 表示工厂 i 的第 k 台机器, \mathbf{V}_{ik} 中的元素数量为工厂 i 的第 k 台机器加工

的工件数量,向量中的元素位序表示机器的加工顺序,每个元素为一个工件。以 6 个工件的 2 个双机器工厂为例,若工厂 1 的机器 1 依次加工工件 1 和 2,工厂 2 的机器 1 依次加工工件 3、4、5,工厂 2 的机器 2 加工工件 6,则向量组如图 2a 所示。若工件 4 改由工厂 1 的机器 2 加工,则向量组的变化如图 2b 所示。

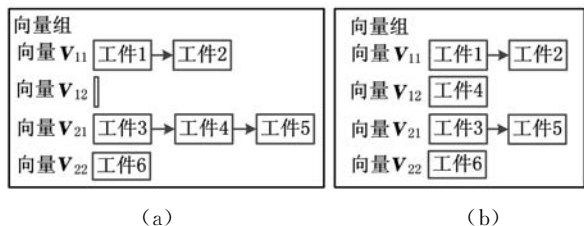


图 2 6 个工件的 2 个双机器工厂的向量组

2.2 初始解

初始解的生成步骤如图 3 所示。

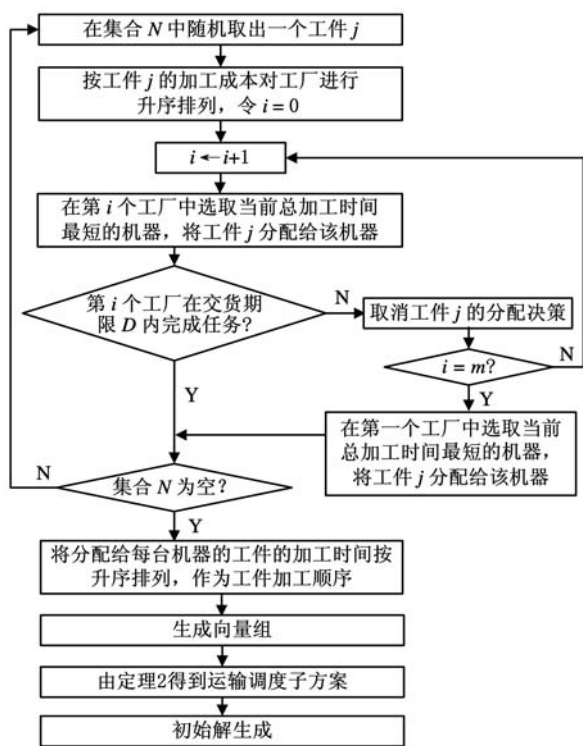


图 3 生成初始解的流程图

2.3 邻域操作

若当前解为不可行解,本文设计了块结构邻域操作以搜索可行解;若当前解为可行解,本文设计了插入、交换 2 种邻域操作以搜索邻域中更优的解。

2.3.1 块结构操作

块结构操作由 Nowicki 等^[14] 首先提出,并广泛应用于生产调度问题。本文设计了一种块结构邻域操作以处理当前解为不可行解的情况,块结构邻域操作的具体步骤如下:

(1) 记当前解中违反交货期限约束的机器在

向量组中对应的向量为 V_{ak} ,从 V_{ak} 中任选一个元素 A 。

(2) 在向量组中任选一个向量 V_{bl} , $V_{ak} \neq V_{bl}$,在向量 V_{bl} 中任选一个元素 B 。将元素 A 从 V_{ak} 中取出,并插入到元素 B 前面或将元素 A 与元素 B 交换。

(3) 记向量 V_{ak} 中由工件组成的集合为 N_a ,向量 V_{bl} 中由工件组成的集合为 N_b ,分别判断以下 2 个公式是否成立:

$$\sum_{j \in N_a} p_{aj} + t_a \leq D$$

$$\sum_{j \in N_b} p_{bj} + t_b \leq D$$

若均成立,则执行步骤(4);否则,块结构操作得到的解为不可行解,块结构操作终止。

(4) 由向量组得到订单分配子方案 δ' 和生产调度子方案 σ' ,由定理 2 得到分批运输子方案 φ' ,新的方案 $(\delta', \sigma', \varphi')$ 生成,块结构操作完成。

2.3.2 插入操作和交换操作

插入操作通过将向量组中某个向量的元素插入到其他向量中,以得到新的订单分配子方案 δ' 和生产调度子方案 σ' ,再由定理 2 得到新的分批运输子方案 φ' 。

交换操作通过交换 2 个不同向量中的元素,以得到新的订单分配子方案 δ' 和生产调度子方案 σ' ,再由定理 2 得到新的分批运输子方案 φ' 。

2.4 禁忌规则和终止条件

本文算法的禁忌规则为:如果向量 V_{ik} 中的工件 j 移动到其他向量中,则在接下来的 λ 代中不允许工件 j 被移回到向量 V_{ik} 。如果经过邻域操作得到比当前解更好的解,则不管该邻域操作是否被禁忌,都采用该邻域作为当前邻域。终止条件为达到预先设定的迭代次数 μ 。

2.5 算法框架

禁忌搜索算法框架如图 4 所示。

3 独立决策策略

本文设计了独立决策下总部的订单分配问题模型和各零部件加工厂的生产运输集成调度问题模型。

3.1 订单分配问题模型

为了缩短项目周期,总部以完成所有工件的时间最小化为决策目标。对于该订单分配问题,本文作以下假设:

(1) 工厂为机器作业环境,工厂 i 加工工件 j 的加工时间为 p_{ij}/r_i 。

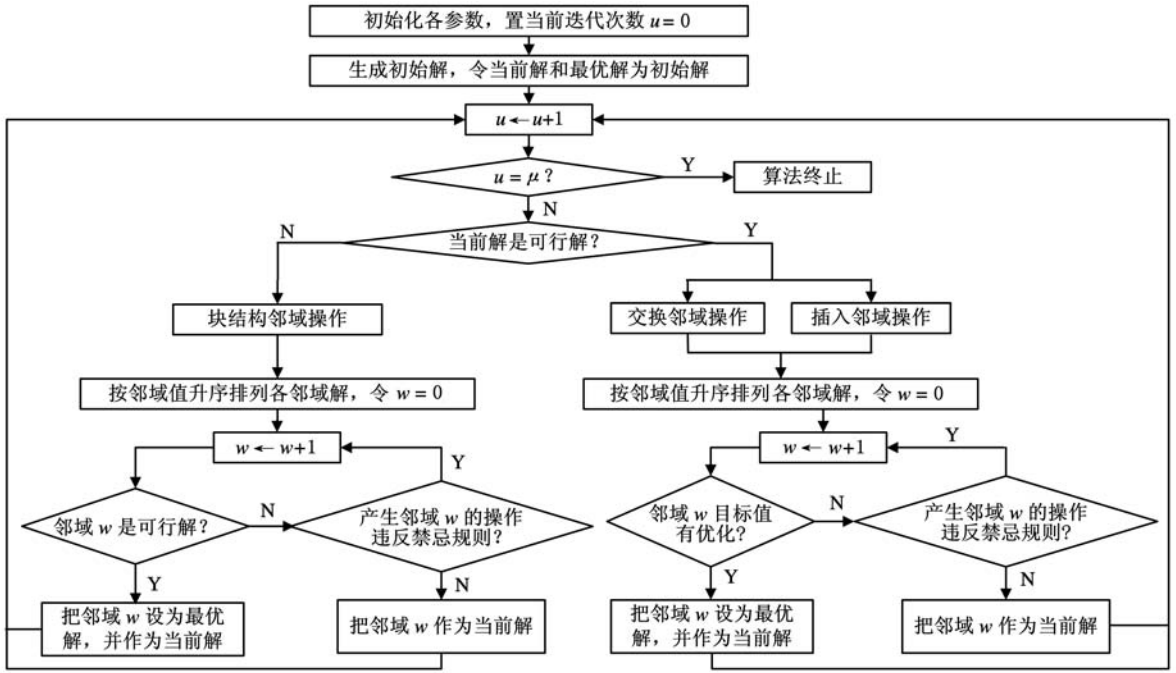


图 4 禁忌搜索算法框架

(2) 每个加工完成的工件单独运送。

订单分配问题的决策变量为 $z_{ij} = 1$, 即工件 j 由工厂 i 加工, 否则 z_{ij} 为 0。其订单分配问题的数学模型为

$$\min [\max_{i \in M} (\sum_{j \in N} \frac{p_{ij}}{r_i} z_{ij} + t_i)] \quad (6)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in N} \frac{p_{ij}}{r_i} z_{ij} + t_i \leq D \quad \forall i \in M \quad (7)$$

$$\sum_{i \in M} z_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (8)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in M \quad \forall j \in N \quad (9)$$

其中, 式(6) 是目标函数, 用于寻找在所有可行订单分配方案中完成所有工件加工所需时间最短的订单分配方案; 约束式(7) 表示每个工厂必须在交货期限前完成工件的加工; 约束式(8) 表示每个工件的加工需求均要得到满足, 且只能分配给一个工厂。

3.2 生产运输集成调度问题模型

经过订单分配, 工厂 i 需要加工的工件集合记为 N_i 。每个工厂 i 对生产和运输进行集成调度, 以实现交货期限内完成 N_i 中所有工件的生产运输总成本最小化。生产运输集成调度的决策变量与 1.2 节中模型的决策变量相同。每个工厂 i 的生产运输集成调度问题模型为

$$\min (\sum_{j \in N_i} \sum_{k=1}^{r_i} c_{ij} x_{ijk} + f_i y_i) \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \sum_{j \in N_i} p_{ij} x_{ijk} + t_i \leq D \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, r_i\} \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^{r_i} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N_i \quad (12)$$

$$\sum_{j \in N_i} \sum_{k=1}^{r_i} x_{ijk} \leq b y_i \quad (13)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad y_i \geq 0 \text{ integer} \quad (14)$$

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, r_i\} \quad \forall j \in N_i$$

其中, 式(10) 是目标函数, 为工厂 i 的生产和运输总成本最小化; 约束式(11) 表示工厂 i 的每台机器加工的工件必须在交货期限内完成; 约束式(12) 表示分配给工厂 i 的每个工件的加工需求均要得到满足, 且只能由工厂 i 的一台机器加工; 约束式(13) 为对工厂 i 发送批次的约束。

4 仿真实验及分析

4.1 算例

10 个零部件加工厂为总装工厂提供 500 个工件, 每个运输批次最多可发送 6 个工件, 交货期限为 1200。为了避免具体算例对算法性能可信度的影响, 本文通过随机方式生成以下数据, 每个零部件加工厂拥有的机器数服从均匀分布 [2, 5], 各零部件加工厂到总装工厂的运输时间和运输成本均服从均匀分布 [100, 1000], 工件在各零部件加工厂的加工时间服从均匀分布 [10, 100], 加工成本服从均匀分布 [100, 500]。

4.2 结果及分析

为了验证平行机多工厂供应链调度策略优于独立决策策略, 本文对 2 种不同策略进行比较, 2 种策略均使用 CPLEX 12.2 求解。同时为了验证本文禁忌算法的有效性, 本文分别使用本文禁忌算法和 CPLEX 12.2 对算例进行求解。本文禁忌

算法通过 Visual C++ 2005 实现,并使用 C++ 标准模板库。PC 为 AMD Athlon(tm) II X2 245, 4GB RAM。表 1 为本文禁忌算法的参数设置。

表 1 参数设置

参数	值
禁忌表长度 λ	20
每次迭代邻域操作次数 t	40
迭代次数 μ	5000

针对 10 组随机算例,分别运算 10 次。2 种不同决策的比较结果如表 2 所示,2 种不同求解方法的比较结果如表 3 所示。

表 2 2 种不同决策策略的比较结果

算例	独立决策		平行机多工厂供应链调度			2 种策略偏差率 (%)
	解值	完成所有工件时间	解值	计算时间 (s)	完成所有工件时间	
1	151 835	805	88 339	140.406	832	41.8
2	153 414	980	90 318	145.938	1016	41.1
3	151 557	987	81 321	41.015	1007	46.3
4	151 962	861	92 045	85.625	888	39.4
5	150 703	861	91 701	59.860	883	39.1
6	152 086	906	93 709	169.125	924	38.4
7	156 528	889	88 363	70.360	906	43.5
8	156 096	947	91 202	66.172	979	41.6
9	153 497	969	89 935	55.765	1004	41.4
10	156 081	815	92 796	78.532	838	40.5

注:2 种策略偏差率=(独立决策解值-平行机多工厂供应链调度解值)/独立决策解值。

表 3 两种不同求解方法的比较结果

算例	CPLEX		本文禁忌算法				算法结果偏差率 (%)
	解值	计算时间 (s)	最优解	最差解	平均结果	平均计算时间 (s)	
1	88 339	140.406	90 707	91 139	90 887.1	7.216	2.88
2	90 318	145.938	93 227	93 702	93 474.2	6.608	3.49
3	81 321	41.015	83 488	83 704	83 598.2	7.539	2.80
4	92 045	85.625	93 441	93 950	93 703.1	6.609	1.80
5	91 701	59.860	93 842	94 225	94 071.3	7.648	2.58
6	93 709	169.125	96 072	96 728	96 483.2	7.334	2.96
7	88 363	70.360	90 320	90 755	90 589.5	6.962	2.51
8	91 202	66.172	92 911	93 474	93 244.5	7.116	2.24
9	89 935	55.765	92 776	92 926	92 871.3	7.058	3.26
10	92 796	78.532	95 726	96 209	95 930.1	7.163	3.38

注:算法结果偏差率=(禁忌算法平均结果-CPLEX 解值)/CPLEX 解值。

由表 2 可知,平行机多工厂供应链调度策略完成所有工件花费的时间仅比独立决策多约 26,但生产运输总成本却降低了 40%左右。原因为:独立决策时各部门的决策目标不一致,导致了企业的整体利益的损失。供应链调度决策在交货期限允许的情况下,以延长较短的交货时间为代价,大幅度地降低了供应链的运作成本,体现了平行机多工厂供应链调度策略的优越性。

由表 3 可知,本文禁忌算法得到的平均结果与 CPLEX 得到的最优解的偏差仅约 3%,但却节

省了 90%以上的运算时间。同时,CPLEX 对 10 个不同算例的计算时间差异较大,标准差为 44.09,而本文禁忌算法的平均计算时间标准差仅为 0.34。因此,本文禁忌算法能够在较短且稳定的时间内得到满意的结果。

5 结论

(1)本文针对大型装备制造企业内部供应链的特点,提出了一类平行机多工厂供应链调度问题,给出了解的最优性条件,并建立了问题的数学模型。

(2)根据解的特点,提出了一种向量组编码结构,并设计了禁忌搜索算法及块结构、插入、交换 3 种邻域操作。

(3)通过仿真实验验证了平行机多工厂供应链调度策略的优越性和本文禁忌算法的有效性。

参考文献:

- [1] 柏孟卓,陈峰,唐国春. 供应链管理中生产和运输集成的排序问题[J]. 工业工程与管理,2007,12(5): 47-50.
- [2] Hall N G, Potts C N. Supply Chain Scheduling: Batching and Delivery [J]. Operations Research, 2003,51(4):566-584.
- [3] Hall N G, Potts C N. The Coordination of Scheduling and Batch Deliveries[J]. Annual of Operations Research,2005,135(1):41-64.
- [4] Averbak I, Xue Zhihui. On-line Supply Chain Scheduling Problems with Preemption[J]. European Journal of Operational Research,2007,181(1):500-504.
- [5] Pundoor G, Chen Zhilong. Scheduling a Production-distribution System to Optimize the Tradeoff between Delivery Tardiness and Total Distribution Cost[J]. Naval Research Logistics,2005,52(6):571-589.
- [6] Chen Zhilong, Pundoor G. Integrated Order Scheduling and Packing [J]. Production and Operations Management,2009,18(6):672-692.
- [7] Chen Zhilong, Vairaktarakis G L. Integrated Scheduling of Production and Distribution Operations[J]. Management Science,2005,51(4):614-628.
- [8] 陈荣军,唐国春. 平行机的供应链排序[J]. 系统科学与数学,2010,30(2):274-282.
- [9] Chen Zhilong, Pundoor G. Order Assignment and Scheduling in a Supply Chain[J]. Operations Research,2006,54(3):555-572.
- [10] 蒋大奎,李波. 基于混合禁忌搜索算法的供应链排序问题[J]. 机械工程学报,2011,47(20):53-59.
- [11] Chen Zhilong. Integrated Production and Outbound

面向客户定制产品开发的多目标优化算法设计

艾青松 许强 刘泉

武汉理工大学, 武汉, 430070

摘要: 对多目标优化进化算法进行研究, 设计了基于客户需求信息的产品多目标优化算法。针对进化算法优化效率低的缺点, 提出了目标侧重度概念, 使进化算法有选择地收敛, 提高了算法的优化效率; 针对进化算法容易陷入局部最优和解分布不均匀的缺点, 提出了目标间距概念, 避免算法在收敛过程中早熟, 保证了最优解的多样性, 降低了客户的选择压力。在 MATLAB 7.0 平台上对改进算法进行仿真实验, 并与 NSGA-2 和 SPEA-2 两种进化算法进行对比分析, 验证了改进算法的可行性、可靠性与优越性。

关键词: 多目标优化进化算法; 目标侧重度; 目标间距; 多样性

中图分类号: TP302.1

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.06.013

Design of Multi-object Optimization Algorithm for Customized Product Development

Ai Qingsong Xu Qiang Liu Quan

Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070

Abstract: A new method of multi-objective optimization based on the customer requirements was designed. In order to improve the efficiency of the traditional algorithm, the concept of object focus degree was proposed, so that the evolutionary algorithm convergence was of selective. There are several limitations of the existing evolutionary algorithms, such as easily falling into local optimal solution and uneven solution distribution. According to these weaknesses, a concept of object spacing matrix was proposed. The new method can avoid the earlier algorithm convergence and make sure the diversity of the optimal solution. The proposed method was simulated based on MATLAB7.0. The simulation results indicate that the proposed algorithm is feasible, and has better reliability and superiority than other two popular evolutionary algorithms (NSGA-2 and SPEA-2).

Key words: multi-objective optimization algorithm; object focus degree; object space; diversity

1 多目标优化进化算法概述

现代制造企业要高效率、低成本地设计和生产令客户满意的产品, 就必须能够快速准确地获取客户的个性化需求, 以最快的速度加以满足。然而, 满足客户的需求并不是唯一的目标, 还要考虑企业的生产设备、技术实力、制造能力、人员力量以及生产成本、生产周期和企业管理等其他因素, 只有在满足客户需求且自身条件具备的前提

下, 才能在最短的时间内生产出让客户满意的商品, 达到生产企业和客户之间的双赢。因此, 基于客户需求信息的产品设计优化是一个多目标优化问题^[1]。

近年来, 有学者提出了多目标优化进化算法 (evolutionary multi-objective optimization, EMO)^[2], 该算法作为一种简单有效的全局搜索算法, 具有较强的全局收敛能力和较强的鲁棒性, 且不需要借助问题的特征信息 (如导数等梯度信息) 就可以有效求解大量非线性、不可微和多峰值的复杂优化问题。

进化算法是以达尔文的进化论思想为基础, 通过模拟自然界生物进化准则逼近问题最优解的

收稿日期: 2011-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50905133); 湖北省自然科学基金资助项目 (2009CDB255); 武汉市科技计划项目 (201171034314)

Distribution Scheduling: Review and Extensions [J]. Operations Research, 2010, 58(1): 130-148.

[12] Armentano V A, Shiguemoto A L, Lokketangen A. Tabu Search with Path Relinking for an Integrated Production - distribution Problem [J]. Computers & Operations Research, 2011, 38(8): 1199-1209.

[13] 潘全科, 朱剑英. 一类解决 Job shop 问题的禁忌搜索算法[J]. 中国机械工程, 2006, 17(5): 536-539.

[14] Nowicki E, Smutaniccki C. A Fast Taboo Search Algorithm for the Job-shop Problem [J]. Management Science, 1996, 42(6): 797-813.

(编辑 何成根)

作者简介: 蒋大奎, 男, 1981 年生。天津大学管理与经济学部博士研究生。主要研究方向为生产调度、物流调度和智能优化。发表论文 2 篇。李波, 女, 1967 年生。天津大学管理与经济学部教授、博士研究生导师。