

# 并行多机提前/拖期调度的启发式算法

魏 健 杨建军

(北京航空航天大学工业与制造系统工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 准时制生产模式要求生产任务必须在交货期内完成。实际生产中这一问题受很多约束的影响变得非常复杂。文章针对任务动态到达、任务转换存在的调整时间和交货期、提前/拖期单位成本各不相同的并行多机上任务排序问题进行了分析, 设计了一种解决并行多机提前/拖期调度的启发式近似求解算法。大量实验数据和应用实例充分表明文章所提的启发式算法是有效的。

**关键词:** 提前/拖期调度 并行多机 启发式算法

## Heuristic Algorithms for Parallel Machines Earliness and Tardiness Scheduling

WEI Jian YANG Jian-jun

(Department of Industrial & Manufacturing Systems Engineering, BEIHANG University, Beijing 100083, CHN)

**Abstract:** In just-in-time production, jobs need to be completed as close to their due dates as possible. However, in many real-world situations, the problem is greatly complicated by many constraints. This paper analyses the parallel machines earliness and tardiness scheduling problem with distinct ready times, sequence dependent setup-times, distinct job due date, and distinct earliness and tardiness penalties for each job and develops a heuristic algorithm for an approximate solution. The great number of experiments and application instances show that the algorithm can behave efficiently.

**Keywords:** Earliness and Tardiness (E/T) Scheduling; Parallel Machines; Heuristic

近年以准时生产(JIT)为目标的提前/拖期(E/T)调度已成为调度研究中的一个重要方向。从文献看,

渠道培养人才是当务之急。

首先, 全员培训, 要动员和组织企业全体员工共同参与。其次, 重点培养。积极培养信息化专门人才。据信息产业部统计: 截止 2005 年, 我国企业信息人才缺口每年约为 10 万。在这一巨大的需求空间面前, 面临的是软件人才的相对滞后。在信息社会中, 人才作为生产要素的作用越来越明显。因此, 企业务必拥有一批技术素质较高的信息化专业人才, 或者说, 必须拥有工业工程应用、研究方面的信息技术人才。有条件的企业, 还应培养信息系统开发人员。第三, 健全制度, 要获得优秀人才, 用好优秀人才, 一靠教育, 二靠制度。有关部门要出台相应的人才引进、培养政策与法规, 以吸引、培养和使用人才。使各类型各方面人才在信息化建设和实现跨越式发展中充分发挥作用。

## 4 结语

加快信息化步伐是推动工业工程发展和创新的强

目前的研究大多针对单机<sup>[1][2]</sup>和公共交货期的并行多机提前/拖期调度问题<sup>[3~5]</sup>。文献[6]用遗传算法探

有力的动力。信息化将在实现我国新型工业化的进程中发挥重大作用。将国外经验与中国国情紧密结合, 以计算机、信息技术作为强大工具, 将推动工业工程的技术和方法在我国广泛应用和不断创新, 实现信息化与工业工程的互动发展, 进而加快推动我国经济跨越式发展。

## 参 考 文 献

- 1 齐二石等. 企业管理创新与工业工程. 中国机械工程, 2001(1)
- 2 李富清. 中小企业的信息化与技术创新体系建设. 管理科学, 2001(2)

作者: 汤猷则, 高级工程师, 湖南师范大学工学院, 中国机械工程学会高级会员, 湖南省长沙市河西岳麓山, 邮编: 410081, 电话: (0731) 8871609

(编辑 李 静)

(收稿日期: 2004-02-20)

文章编号: 4410

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

讨论了不同交货期下的并行多机提前/拖期调度问题,但由于遗传算法的计算复杂性,它只能对较小规模的问题求解。如果对于不同交货期下的并行多机提前/拖期调度,考虑任务转换的调整时间,并假设任务动态到达、任务的提前/拖期单位成本依赖于任务而不同,这将更能反映实际的生产情况,但同时也增加了问题的难度。本文对这类问题做了探讨,对文献[1]提出的解决单机提前/拖期调度的算法进行了改进,加入了对任务转换调整时间的考虑,设计了一种解决并行多机提前/拖期调度的启发式算法。将该算法与典型的调度规则求得的解进行对比,最后用实例进行了验证。

## 1 问题描述

本文研究的并行多机提前/拖期调度是针对短期调度的,其调度环境具体可描述如下:

有  $N$  项任务要在  $M$  台完全相同的机床上加工。每个任务只有一道工序,均可由  $M$  台机床中的任一台完成。任务一旦开始加工直到完成为止,不会被另外的任务所中断。任务动态到达,任务的交货期、提前/拖期单位成本依赖于任务而不相同。考虑任务转换的装卡调整时间,同类零件的前后两项任务转换时的装卡调整时间为零。

下面是各种变量和性能指标的数学符号表示形式:

(1)  $J$  表示任务的集合,  $J = \{1, 2, \dots, j, \dots, N\}$ 。这里  $j$  表示第  $j$  项任务,  $N$  表示第  $N$  项任务,同时  $N$  还表示任务总数为  $N$  项。

(2)  $\Omega$  表示机床的集合,  $\Omega = \{1, 2, \dots, m, \dots, M\}$ 。这里  $M$  表示第  $M$  台机床,同时  $M$  还表示机床总数为  $M$  台。

(3)  $d_j$  表示任务  $j$  的交货期,  $r_j$  表示任务  $j$  的到达时间,  $p_j$  表示任务  $j$  在机床上的加工处理时间,  $\forall j \in J$ 。

(4)  $s_{0j}$  表示机床空闲时任务  $j$  的装卡调整时间,  $s_{jk}$  表示同一台机床上由任务  $j$  转换到任务  $k$  的装卡调整时间,  $\forall j \in J$ 。

(5)  $e_j$  表示任务  $j$  提前的单位成本值,  $t_j$  表示任务  $j$  拖期的单位成本值,  $\forall j \in J$ 。

(6)  $C_j$  表示任务  $j$  的完工时间,  $E_j$  表示任务  $j$  完成时间的提前量,  $T_j$  表示任务  $j$  完成时间的拖后量,  $\forall j \in J$ 。

性能指标:  $\text{Minimize } \sum_j (e_j E_j + t_j T_j)$ , 其中  $E_j = \max(0, d_j - C_j)$ ,  $T_j = \max(C_j - d_j, 0)$ ,  $\forall j \in J$ 。

## 2 算法设计

目前对于这类问题,尚没有有效的算法求解中大规模的问题。本文设计的启发式算法的思路是将并行多机提前/拖期调度的求解分解为两层:首先将任务合理的分派到机床上,然后在这个合理分派下解决每台机床上的单机排序问题。这样就可以简化问题的求解,并且能够构成一个优化的调度方案。对于复杂组合优化问题的求解,这种分层处理的方法能够有效地简化问题。Bank 和 Werner<sup>[3]</sup> 及 Cheng<sup>[4]</sup> 等对公共交货期的并行多机提前/拖期调度采用这种分层方法从而构造了有效的求解算法。本文的启发式算法在第一层中按照平衡各机床负荷的原则将任务分派到机床上即确定每台机床上将要加工的任务集,然后根据最小化提前/拖期总成本的原则,确定每台机床上任务的加工顺序和完成时间。

### 2.1 确定每台机床上的加工任务集

为了将任务合理地分派到每台机床上,确定每台机床上要加工的任务集,首先需要确定任务指派到的机床上的顺序规则;然后确定选出的任务将要分派到的机床。

需要分派的任务确定以后,紧接着就要判断选出的任务分派到哪台机床上。针对平衡各机床负荷的典型分派规则有:将任务分派到当前任务队列最短的机床上,将任务分派到当前总处理时间最短的机床上,将任务分派到转换调整时间最少的机床上等规则。Bank 和 Werner<sup>[3]</sup> 经过大量的实验,验证了一种优先指标规则:  $\min \{C_{\max}^*[J_i \cup \{k\}]\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ , 能够得到较合理的任务分派结果。其中集合  $J_i$  代表目前机床  $i$  上已经分派的任务集;任务  $k$  是需要分派的任务;  $C_{\max}^*[J_i]$  代表集合  $J_i$  中的任务,依  $r_j$  的递增顺序依次加工得到的任务的最大完成时间。这个优先指标的含义是将需要分派的任务  $k$ , 首先试分派到每台机床上,选取任务最大完成时间最小的机床,把任务  $k$  分派到上面。利用 Bank 和 Werner<sup>[3]</sup> 得到的结论,本文在这里设计了一种启发式分派程序,具体过程如下:

(1) 将任务  $k$  临时插入机床  $m$  上任务集合  $J_m$ 。

(2) 假设机床  $m$  上的任务按照插入  $J_m$  的顺序依次加工,计算机床  $m$  上所有任务的最大完成时间  $C_{\max}^*$  为

$$C_{\max}^* = \sum_{j \in J_m} \max \{r_j, C_{j-1}\} + s_{j-1,j} + p_j$$

(3) 对于所有的  $m \in \Omega$ , 重复上述步骤。

(4) 挑选出  $C^*_{\max}$  最小的机床, 把任务  $k$  分派到上面。

任务经过这一层的分配, 简化了求解的问题, 而且为下一层的单机排序提供了一个可行的任务集。最优调度虽然不一定产生于这一层分派的结果中, 但是这一层的分派结果为构成一个优化的调度方案奠定了基础。研究更加合理的分派程序, 将能得到更好的调度结果。这将是笔者下一步的研究方向之一。

## 2.2 确定每台机床上任务的加工顺序和完成时间

为了确定每台机床上任务的加工顺序和完成时间, 本文在此参考 Sridharan 和 Zhou<sup>[1]</sup> 提出的一种解决任务动态到达的单机提前/拖期调度问题的决策理论, 设计了任务转换存在调整时间的求解  $C_j$  的算法。

假设机床将在  $t_0$  时刻加工完成任务  $j_0$  变成等待状态, 在  $t_0$  时刻以前已经到达的任务集为集合  $Q$ , 把在  $t_0 + \Delta$  时刻以前到达的任务作为  $t_0$  时刻选择下一个要加工任务时的候选集  $S(t_0)$ 。 $\Delta$  的作用是决定机床是否等待一个即将到达的任务还是选择一个已经到达的任务。显然  $\Delta$  越大,  $S(t_0)$  中的任务选项越多, 做出正确决策的机会越大。 $\Delta$  对最好的选择是机床将占用的时间。然而, 对机床将占用的时间的分析是异常困难的。本文近似取  $\Delta$  为  $\max\{p_j, j \in Q\}$ 。候选集  $S(t_0)$  确定后, 就要从  $S(t_0)$  中选择下一个最佳调度的任务。完整的过程如下, 假设候选任务集  $S(t_0)$  中的任务总数为  $n, j \in S(t_0)$ 。

(1) 发现任务  $j$  最可行的完成时间  $C_j^*$  为

$$C_j^* = \max\{s_{j,0j} + t_0 + p_j, r_j + p_j, d_j\}$$

(2) 估计候选任务集  $S(t_0)$  中剩余  $n-1$  项任务的平均完成时间  $\bar{C}$  为

$$\bar{C} = \bar{a} + \bar{s} + C_j^* + \frac{1}{2}(P - \bar{P}) + \bar{P}$$

其中

$$P = \sum_{i \in S(t_0), i \neq j} (p_j + s_{i-1,i}), \bar{s} = \frac{1}{n-1} \sum_{i \in S(t_0), i \neq j} s_{i-1,i}$$

$$\bar{a} = \frac{1}{n-1} \sum_{i \in S(t_0), i \neq j} \max\{r_i, t_0\}, \bar{P} = P/(n-1)$$

(3) 计算候选任务集中剩余  $n-1$  项任务的拖期单位成本的平均值和计划交货期的平均值为

$$\bar{t} = \frac{1}{n-1} \sum_{i \in S(t_0), i \neq j} t_i, \bar{d} = \frac{1}{n-1} \sum_{i \in S(t_0), i \neq j} d_i$$

(4) 如果  $\bar{C} > \bar{d}$ , 并且  $e_j \leq \bar{t}$ , 则任务  $j$  的完成时间为

$$C_j = \max\{C_j^* - (\bar{C} - \bar{d}), r_j + p_j, t_0 + p_j + s_{p,j}\}$$

否则,  $C_j = C_j^*$ 。

(5) 估计剩余其他  $n-1$  项任务的完成时间为

$$C_i = \max\{r_i + p_i, d_i, C_j + \frac{1}{2}(P - p_i) + p_i + s_{i-1,i}\}$$

$$\forall i \in S(t_0), i \neq j$$

(6) 计算在调度任务  $j$  时的总成本为

$$TC(j) = \sum_{i \in S(t_0)} (e_i E_i + t_i T_i)$$

(7) 对候选任务集中的所有任务  $j$  重复上述 6 步。

(8) 挑选出在综合估计中总成本最小的任务作为下一个要调度的任务, 这个任务的最佳开始时间已经在 (4) 中确定了。

显然, 上述的派工算法允许考虑合理的机床空闲, 允许任务未到达前开始装卡调整工作。

## 3 计算实例与分析

为了测试该算法的有效性和效率, 本文进行了仿真实验。在仿真实验中, 算法采用 C++ 语言编写, 并在 P II 400 微机上运行。

### 3.1 参数选取<sup>[1,6]</sup>

(1) 为了简化问题, 本文假设零件类型数为 3, 随机产生与任务的对应关系。

(2)  $p_j$  在区间  $[5, 100]$  中也按均匀分布随机产生,  $r_j$  在区间  $[0, R_{\max}]$  中按均匀分布随机产生,  $R_{\max} = \sum_{j \in N} p_j / M$ 。

(3)  $s_{0j}$  在区间  $[20, 80]$  上按均匀分布随机产生, 如果任务  $j, k$  是相同的零件种类, 则  $s_{0j} = s_{0k}$ , 并且  $s_{jk} = 0$ , 否则  $s_{jk}$  在区间  $[s_{0k}, s_{0k} + s_{0j}]$  中按均匀分布随机产生。

(4) 根据每项任务的  $r_j, p_j, s_{0j}$ , 在  $r_j + s_{0j} + 5 \times p_j$  和  $r_j + s_{0j} + 9 \times p_j$  之间按均匀分布随机产生  $d_j$ 。

(5)  $e_j$  和  $t_j$  分别满足区间  $[0, 2]$  和  $[4, 6]$  上的均匀分布。

### 3.2 计算实例

为了表明该启发式算法的工作过程, 本文提供了一个  $N=10, M=2$  的调度问题。其基本数据按照 3.1 产生。

(1) 任务指派的顺序

$$J_{10,A} \leftarrow J_{9,B} \leftarrow J_{6,B} \leftarrow J_{3,A} \leftarrow J_{5,B} \leftarrow J_{7,A} \leftarrow J_{8,C} \leftarrow J_{4,B} \leftarrow J_{2,B} \leftarrow J_{1,C}$$

(2) 任务分派后每台机床上的任务集:

$$M1: J_{10,A} + J_{3,A} + J_{7,A} + J_{8,C} + J_{1,C}$$

$$M2: J_{9,B} + J_{6,B} + J_{5,B} + J_{4,B} + J_{2,B}$$

(3) 调度完成后每台机床上任务的加工顺序

$$M1: J_{10,A} + J_{3,A} + J_{7,A} + J_{8,C} + J_{1,C}$$

$$M2: J_{9,B} + J_{5,B} + J_{4,B} + J_{6,B} + J_{2,B}$$

表1 各项任务的基本数据表

任务号	零件类型	$r_j$	$s_{0j}$	$p_j$	$d_j$	$e_j$	$t_j$
1	C	262	55	80	773	1	6
2	B	259	25	51	707	1	6
3	A	58	39	70	543	0	6
4	B	234	25	26	452	0	5
5	B	121	25	100	646	0	4
6	B	43	25	41	434	2	6
7	A	127	39	67	534	0	5
8	C	215	55	15	376	2	6
9	B	43	25	94	579	0	6
10	A	7	39	57	392	0	6

这一调度方案的目标函数值是0,即提前/拖期总成本为0,该启发式算法对这个实例得到了最优解。从任务分派后的结果可以看出任务的分派程序为下一层的任务排序提供了一个可行的任务集;还有该启发式算法对小规模的问题有时可以得到最优解。

### 3.3 算法比较

每组  $M$ 、 $N$  下都随机产生 20 个问题,表 2 中比较了应用本文提出的启发式算法(简称 HET)与应用典型调度规则 EDD 解决问题时的提前/拖期平均成本指数和 CPU 平均运行时间。

表2 本启发式算法 HET 与 EDD 的性能比较

$M$	$N$	机床平均利用率(%)	任务平均拖期率(%)	EDD		HET	EDD
				提前/拖期平均成本指数	提前/拖期最大成本指数	平均 CPU 时间(s)	平均 CPU 时间(s)
10	200	60.6%	3.3%	0.91	1.28	1.15	0.23
10	300	67.5%	8.8%	0.69	1.34	2.83	0.37
10	400	73.3%	12.2%	0.54	0.97	11.01	0.69
10	500	76.7%	13.8%	0.36	0.92	66.58	1.79
20	400	60.1%	2.5%	0.72	1.14	8.10	1.49
20	600	67.9%	7.8%	0.61	0.91	12.15	1.98
20	800	72.2%	9.9%	0.49	0.874	8.12	4.34
20	1000	76.5%	12%	0.37	0.62	142.56	7.25

提前/拖期成本指数的计算公式为:  $(f - f_{\text{HET}}) / f_{\text{HET}}$ , 其中  $f_{\text{HET}}$  是用本文提出的启发式算法得到的提前/拖期成本。

结果分析:表 2 的实验结果表明该调度算法能有

效地解决较大规模的并行多机提前/拖期调度问题;由于该算法在确定候选任务集  $S(t_0)$  时,仅考虑了  $\Delta$  范围内将要到达的任务,因此在考虑全局,进行取舍上能力不足,不能使提前/拖期性能指标为最优;但从表 2 中可以看出该启发式算法的性能优于 EDD 的性能;表 2 中关于 CPU 运行时间的实验则显示该启发式算法能以较小的时间代价获得算法性能的提高。

### 3.4 应用实例

为检验所提启发式算法的实际有效性,笔者利用某厂数控加工中心上的实际数据进行仿真,结果令人满意。

## 4 结语

任务动态到达、任务转换存在调整时间的并行多机提前/拖期调度问题在生产调度和其他组合优化领域有广泛的应用前景。本文的这个启发式算法可以通过设计更好的分派程序和求  $C_j$  的程序来改善它的性能。如果把这个启发式算法得到的结果作为迭代算法的初始值,还能得到更好的调度结果,这是笔者下一步的研究方向之一。

### 参 考 文 献

- 1 Sridharan V, Zhou Z. A decision theory based scheduling procedure for single-machine weighted earliness and tardiness problems, European Journal of Operational Research, 1996, 94: 292-301
- 2 Renata Mazzini, Vinicius A, Armentano. A heuristic for single machine scheduling with early and tardy costs, European Journal of Operational Research, 2001, 128: 129-146
- 3 Bank J, Werner F. Heuristic Algorithms for Unrelated Parallel Machine Scheduling with a Common Due Dates, Release Dates, and Linear Earliness and Tardiness Penalties, Mathematical and Computer Modeling, 2001, 33: 363-383
- 4 Edwin Cheng T C, Dirk Biskup. Multiple-machine scheduling with earliness, tardiness and completion time penalties, Computers & Operations Research, 1999, 26: 45-57
- 5 Hongyi Sun, Guoqing. Parallel machine earliness and tardiness scheduling with proportional weights, Computers & Operations Research, 2003, 30: 801-808
- 6 Funda Sivrikaya-Serifoglu, Gunduz Ulusoy. Parallel machine scheduling with earliness and tardiness penalties, Computers & Operations Research, 1999, 26: 773-787

第一作者:魏健,北京航空航天大学逸夫馆 412 室,邮编:100083,电话:(010)82316783, E-mail: weijian2000@vip.sina.com

(编辑 李 静)

(收稿日期:2004-02-13)

文章编号:4411

如果您想发表对本文的看法,请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。