带有跨工序约束的柔性 job shop 调度问题*

沈益民，范玉顺
(清华大学 自动化系，北京 100084)

摘　要：飞机制造企业的金属加工车间是一种小批量、多品种生产，其生产指挥是一种带有跨工序约束的柔性 job shop 调度问题。针对这个 NP-hard 问题，提出一种三阶段启发式方法，通过依次完成瓶颈工作中心的判定、设备分配和任务排序，使这一问题的复杂度得以逐步降低，从而可以在多项式时间内得到有效的调度方案。实际运行表明，依据该启发式方法产生的调度方案，其关键路径的等待时间占总完工时间的比例不足 1.5%，取得了满意的效果。

关键词：柔性作业车间；调度问题；跨工序约束；启发式算法
中图分类号：TP202.7　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2008)07-2023-04

Scheduling flexible job shop problem with inter-stage constraint

SHEN Yi-min, FAN Yu-shun
(Dept. of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The metal-processing shop of airplane manufacturing is a small-batch and multi-variety production where a job shop scheduling problem with inter-stage constraint needs to be solved. This paper presented a three-phase heuristic approach to deal with this NP-hard problem. During the process of determining the bottleneck work center, arranging the devices, and ordering the jobs, reduced the complexity of the problem gradually. Therefore obtained an effective solution within polynomial time. Application sample shows that the heuristic approach is satisfactory as the idle time of the critical path is less than 1.5% of the completing time.

Key words: flexible job shop; scheduling problem; inter-stage constraint; heuristic algorithm

0　引言

中国航空工业第一集团公司直属特大型企业成都飞机工业(集团)有限责任公司，是我国设计、研制和生产歼击机的重要基地。由于具有批量小、品种多、工艺多样化的特点，生产调度一直是其经营管理中的重要内容和难点。本文研究其金属加工车间的作业调度问题。

该车间包括两个柔性工作中心 W_1、W_2。其中，拉伸中心 W_1 包含 $m_1=4$ 台拉伸机 $U_1=\{M_{11}, M_{12}, M_{13}, M_{14}\}$，完成零件的预拉伸和拉伸；热处理中心 W_2 包含 $m_2=2$ 台热处理炉 $U_2=\{M_{21}$(六米硝盐炉)，M_{22}(八米电炉)$\}$，完成零件的清洗及淬火。

设有 n 种零件 $J=\{J_1, J_2, \cdots, J_n\}$，每种零件有 $x_j(j=1, 2, \cdots, n)$ 件。一个完整的加工流程包括如下工序：

a) 换模，在拉伸工作中心 W_1 中进行。J_j 在某台拉伸机上进行预拉伸、拉伸前，需用 $t_j>0$ 时间在该设备上安装相应模具。不同零件模具各不相同，因此如果某台拉伸机在某种零件完成全部预拉伸、拉伸之前，中途进行其他零件的加工，然后继续进行该种零件的加工，或者某种零件在不同的设备上进行拉伸、预拉伸，则需要多次换模。

b) 预拉伸。J_j 的每件零件的预拉伸时间为 $p_j\geq 0$。受工艺限制，J_j 只能在 U_1 的一个非空子集 $U_{1j}\subseteq U_1$ 上的任何一台进行加工，U_{1j} 由 J_j 决定。

c) 清洗，预拉伸之后进行清洗。J_j 的每件零件的清洗时间为 $c_j\geq 0$，清洗工序不占用设备时间。

d) 淬火，经过清洗后，在热处理炉上进行淬火。受工艺限制，J_j 只能在 U_2 的一个非空子集 $U_{2j}\subseteq U_2$ 上的任何一台进行加工。根据 J_j 的尺寸和所选择热处理炉 M_{2k} 的不同，每批可同时淬火 y_{jk} 件零件，每批淬火时间为 q_{jk}。

e) 拉伸，淬火后，零件在拉伸机上拉伸。J_j 每件零件的拉伸时间为 s_j。

上述完整过程如图 1 所示。在这个例子中，$x_j=5$，$y_{jk}=2$。图中所标数字为该种零件的件次编号。

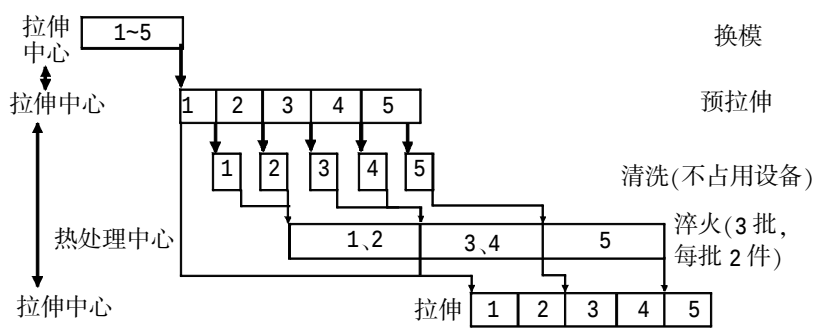

图 1　完整生产工艺流程

收稿日期：2007-07-05；修回日期：2008-03-04　　基金项目：国家“863”计划资助项目(2006AA04Z166, 2006AA04Z157)；国家自然科学基金资助项目(60504028)

作者简介：沈益民(1968-)，男，浙江仙居人，教授，博士，主要研究方向为应用数学、作业调度、分形几何学、软件工程、面向服务体系结构(sym@ieee.org)；范玉顺(1962-)，男，江苏扬州人，教授，博导，博士，主要研究方向为工作流技术与企业经营过程重组、系统集成与集成平台、企业建模与仿真优化、网络化制造、面向对象与柔性软件系统.

并非所有的零件均需经过换模→预拉伸→清洁→淬火→拉伸这一完整流程。特别地,当不需要预拉伸和清洁工序时,换模工序可在淬火之后或同时进行,如图 2 所示。

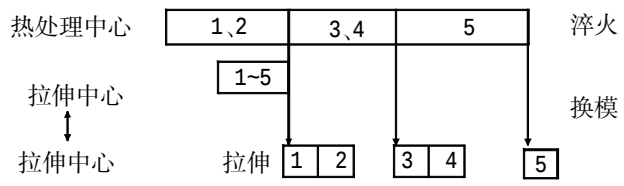

图 2 仅有淬火和拉伸工序的零件生产工艺流程

该问题可以定义为一种特定的柔性作业车间调度问题(flexible job shop scheduling problem, FJSP) FJ2 |recrc, M_j, p-batch |$C_{\max}$,即 2 工序柔性 job shop(FJ2)、任务可以重复进入一个中心(recirculation)、每中心各设备不同(M_j)、混批加工(p-batch),并附带如下约束: a) 跨工序准备(set-up) 时间。预拉伸和拉伸如连续在同一设备加工,则只需一次 set-up 时间。b) 跨工序时间窗约束。淬火后应力及拉伸矫直,一般要在淬火后若干小时以内完成。因此为保持新淬火状态,零件必须在一定时间内在拉伸机上进行拉伸。本文研究的优化目标是 $C_{\max}$,即使总完成时间(makespan) 最小。

1 相关文献

由于柔性 job shop 调度问题拓展了传统 job shop 问题,具有了更大的适应性和更高的难度[1]。目前已有一系列文献解决 FJSP,主要方法包括数学规划方法[2]、启发式方法[3]、遗传算法[4]、禁忌搜索[5]、蚁群算法[6]、模拟退火等[7]。然而这些方法均未考虑跨工序约束。

文献[8] 考虑到了跨工序的设备选择约束,并给出了相应的线性规划和整数规划方法,但仅适合可抢先或小规模调度问题; 文献[9] 认为在 job shop 问题中常用的移动瓶颈启发式方法(shifting bottleneck heuristic, SBH)[10] 可以移植到柔性问题上,但该方法仍然无法应用于具有跨工序约束的 FJSP; 文献[11] 针对带有跨工序约束的柔性 flow shop 问题提出一种遗传算法,但不适合 FJSP。

由于 FJSP 是 NP-hard 问题,为了在多项式时间内获得满意解,本文提出一种三阶段的启发式方法,依次完成瓶颈工作中心的判定、设备分配、任务排序来解决具有跨工序约束的 FJSP。最后通过实际运行数据验证本方法的有效性。

2 算法概述

本问题的难点主要在于: a) 跨工序约束,不同工作中心需要协调一致,以保证新淬火状态,并减少换模次数; b) 设备选择的灵活性,每个任务可以选择不同的设备进行加工; c) 任务排列的灵活性,每个设备上任务可以选择不同的排列方式。

上述三个难点造成可行调度方案空间的指数增长,很难通过一个方法一次性解决,因此本文提出一种三阶段启发式方法来逐一解决这三个问题:

(a) 瓶颈工作中心判定,在不考虑跨工序约束的情况下,通过计算各工作中心的各设备负荷来获得中心关键路径下界,并据此判断本车间的瓶颈工作中心。

(b) 首先确定瓶颈工作中心的设备指派,然后通过求解至多 nm_1 个相同任务 $F3 \parallel C_{\max}$ 问题,完成对非瓶颈所有任务指定相应的加工设备,从而将问题简化为 job shop 问题。

(c) 采用启发式规则,同时对两个工作中心设备上的任务进行排序,并完成整个调度工作。

3 瓶颈工作中心判定

为了有效降低可行解空间的大小,首先按照最大负荷任务优先的原则对所有零件进行一次设备预分配,并据此得到各工作中心的关键路径下界,从而判定瓶颈工作中心。具体算法如下所示:

计算每个任务 J_j 在每个工序 i 的设备 k 的负荷:

$$h_{ijk} = \begin{cases} 0 & M_k \mid U_{ij} \\ t_j + (p_j + s_j)\, x_j & i = 1,\ M_k \in U_{ij} \\ q_{ij}[\, x_j / y_{ij}] & i = 2,\ M_k \in U_{ij} \end{cases}$$

对 i 从 1 到 2 循环

对 $k = 1, 2, \cdots, m_i$ 循环

将集合 V_{ik} 初始化为只能在设备 M_{ik} 上加工的零件集合,即

$V_{ik} = \{ J_j \mid k \in U_{ij},\ k' \mid U_{ij}(\mathrm{P}\ k' \neq k) \}$

计算设备 M_{ik} 的当前负荷: $h_{ik} = \sum_{j=1, j \in V_{ik}}^{n} h_{ijk}$

对 i 从 1 到 2 循环

循环,直到 $J - \bigcup_{k=1}^{m_i} V_{ik}$ 为空集

从尚未分配的零件集合 $J - \bigcup_{k=1}^{m_i} V_{ik}$ 中选择负荷 h_{ijk} 最大零件 J_j

在集合 U_{ij} 中,选择负荷 h_{ik} 较小的设备 M_{ik}

将 J_j 添加到集合 V_{ik} 中

$h_{ik} = h_{ik} + h_{ijk}$

工作中心 i 的关键路径下界为 $h_i = \max_{k=1}^{m_i} h_{ik}$

对比 h_1、h_2,设 $i = b$ 使 h_i 最大,则将对应的工作中心 W_b 设置为瓶颈工作中心。

其中[a] 表示取不小于 a 的最小整数。上述算法的计算复杂度为 $O(2n + m_1 + m_2)$。这一算法的结果使后续得以紧密围绕瓶颈工作中心进行调度,从而解决了第 2 章中的难点 a)。

4 设备指定

4.1 瓶颈工作中心

由于上述算法终止时,$J - \bigcup_{k=1}^{m_i} V_{bk}$ 为空集,$J = \bigcup_{k=1}^{m_i} V_{bk}$。且由上述算法过程可知,不同 k 对应的 V_{bk} 交集为空,$\{V_{bk}\}_{k=1}^{m_b}$ 构成了对 J 的一个分类。

据此,若 $J_j \in V_{bk_j}$,即可指定零件 J_j 在瓶颈工作中心 W_b 的加工设备为 M_{bk_j}。

4.2 非瓶颈工作中心

在瓶颈工作中心加工设备已经选定的基础上,以下进行非瓶颈工作中心加工设备的选择。

4.2.1 构造 $F3$ |recrc |$C_{\max}$ 问题

本节构造一种 flow shop 调度问题,通过对这一调度问题的求解,就能够给出各种零件从 0 时刻开始安排的最佳排程方案,并解决其设备选择问题,即第 2 章中的难点 b)。

对于非瓶颈工作中心 W_d ($d = 3 - b$) 的每一台设备 M_{dk} 和其上可以加工的任一任务 J_j,构造一个特殊的 flow shop 问题 $F3$ |recrc |$C_{\max}$ 如下:

a) 三个独立设备 A_1、A_2、A_3(分别对应拉伸设备、虚拟清洁

设备、热处理设备);

b) x_j 个相同的任务在上述设备上加工;

c) 设备按照相同的顺序,依次完成五个工序 $T_1 \sim T_5$(分别对应换模、预拉伸、清洁、淬火和拉伸),每个工序的加工设备依次为 A_1、A_1、A_2、A_3、A_1;

d) T_1、T_3 同时可以加工任意多个任务,T_2、T_5 同时只能加工一个任务,T_3 同时可以加工 y_{jk}个任务;

e) 每个任务在每个设备上的加工时间,依次为 t_j、p_j、c_j、q_{jk}、s_j;

f) 优化目标为完成时间 $C_{\max}$。

4.2.2　求解 $F3|\text{recrc}|C_{\max}$问题

已经证明,以 $C_{\max}$为优化目标的 flow shop 问题仅有 $F2\|C_{\max}$是多项式时间可解的[12]。由于上述 $F3\|C_{\max}$问题的任务相互完全相等,可以有如下的多项式时间算法:

a) 从 $\text{start}_{1j}=0$ 时刻开始,到 t_j 时刻止,将所有 T_1 任务在 A_1 上完成。

b) 从 t_j 时刻开始,到 $t_j+x_jp_j$ 时刻止,A_1 依次完成 x_j 个 T_2 任务。

c) 分别从 $t_j+p_j, t_j+2p_j, \cdots, t_j+x_jp_j$ 时刻开始,到 $t_j+p_j+c_j, t_j+2p_j+c_j, \cdots, t_j+x_jp_j+c_j$ 为止,A_2 依次完成 x_j 个 T_3 任务。

d) 如果 $x_jp_j>q_{jk}+c_j+y_{jk}p_j$,即淬火时间足够短,可以保证预拉伸全部完成前,完成一批满载淬火(即首批批次 $=y_{ij}$),如图 3 所示,则(a) 从 $\text{start}_{2j}=t_j+y_{jk}p_j+c_j$ 时刻开始到 $\text{end}_{2j}=\max(t_j+y_{jk}p_j+c_j+[x_j/y_{jk}]q_{jk},\ t_j+x_jp_j+q_{jk})$ 时刻为止,A_3 每批完成 y_{jk}个 T_4 任务(末批任务数为 $x_j-([x_j/y_{jk}]-1)y_{jk}$),共进行 $[x_j/y_{jk}]$ 批次。(b) 从 $\max(t_j+y_{jk}p_j+c_j+q_{jk}, t_j+x_jp_j)$ 时刻开始到 $\text{end}_{1j}=\max(t_j+y_{jk}p_j+c_j+[x_j/y_{jk}]q_{jk}+(x_j-([x_j/y_{jk}]-1)y_{jk})s_j, t_j+x_jp_j+x_js_j)$ 时刻为止,A_1 完成 x_j 个 T_5 任务。

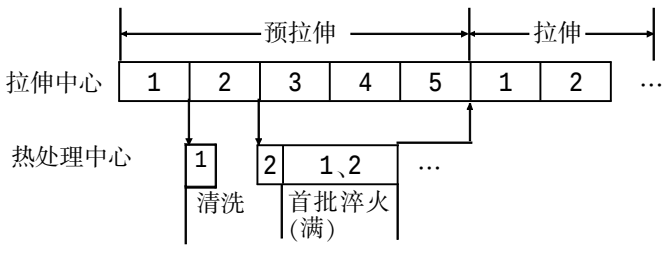

图 3　首批满载淬火的排程

e) 否则,如果 $q_{jk}+c_j<x_jp_j\le q_{jk}+c_j+y_{jk}p_j$,即淬火时间不够短,不能保证预拉伸全部完成前完成一批满载淬火,但可以完成一批不满载的淬火(即首批批次 $<y_{ij}$),如图 4 所示,则(a) 从 $\text{start}_{2j}=t_j+x_jp_j-q_{jk}$时刻开始到 $\text{end}_{2j}=\max(t_j+y_{jk}p_j+c_j+([(q_{jk}+c_j)/p_jy_{jk}]+1)q_{jk}, t_j+x_jp_j+q_{jk})$ 时刻为止,A_3 每批完成 y_{jk}个 T_4 任务(首批任务数为 $x_j-(q_{jk}+c_j)/p_j$,末批任务数为 $(q_{jk}+c_j)/p_j-([(q_{jk}+c_j)/p_jy_{jk}]-1)y_{jk}$可能小于 y_{jk}),共进行 $[(q_{jk}+c_j)/p_jy_{jk}]+1$ 批次。(b) 从 $t_j+x_jp_j$ 时刻开始到 $\text{end}_{1j}=\max(t_j+y_{jk}p_j+c_j+([(q_{jk}+c_j)/p_jy_{jk}]+1)q_{jk}+((q_{jk}+c_j)/p_j-([(q_{jk}+c_j)/p_jy_{jk}]-1)y_{jk})s_j, t_j+x_jp_j+x_js_j)$ 时刻为止,A_1 完成 x_j 个 T_5 任务。

(6) 否则(即 $x_jp_j<q_{jk}+c_j$) 即淬火时间过长,如图 5 所示。则(a) 从 $\text{start}_{2j}=t_j+y_{jk}p_j+c_j$ 时刻开始到 $\text{end}_{2j}=t_j+y_{jk}p_j+c_j+[x_j/y_{jk}]q_{jk}$时刻为止,$A_3$ 每批完成 y_{jk}个 T_4 任务(末批任务数可能小于 T_4),共进行$[x_{ij}/y_{ij}]$ 批次。(b) 从 $t_j+y_{jk}p_j+c_j+q_{jk}$时刻开始到 $\text{end}_{1j}=t_j+y_{jk}p_j+c_j+[x_j/y_{jk}]q_{jk}+s_j$ 时刻为止,A_1 依次完成 x_j 个 T_5 任务。

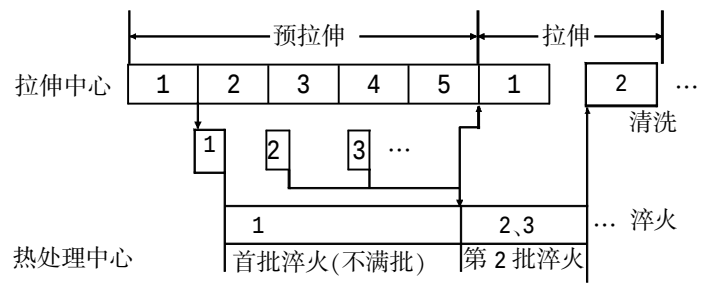

图 4　首批不满载淬火的排程

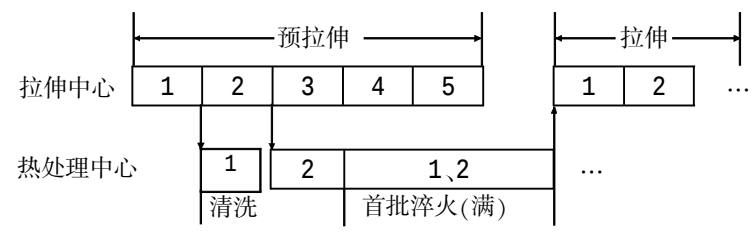

图 5　淬火时间过长的排程

对于如图 2 的加工流程,只需对上述 $F3\|C_{\max}$问题的设备环境进行适当变更即可相应处理,本文不再赘述。

4.2.3　设备选择

对于每个任务 J_j,按照如下优先顺序选择非瓶颈工序的加工设备 M_{dk_j}: a) 使上述 $F3|\text{recrc}|C_{\max}$问题最优解 $C_{\max}$最小的 M_{dk}优先; b) 相同 $C_{\max}$的设备,其负荷 h_{dk}最小的 M_{dk}优先。

本阶段的计算复杂度为 $O(n^2m_1)$。

5　零件排程

通过前述两个阶段,达到了两个目的: a) 每种零件 J_j 的每个工序都分配给了惟一的设备 M_{dk_j}和 M_{bk_j}。b) 以 0 时刻为基准,即假设 J_j 从 0 时刻开始加工,start_{ij}、end_{ij}给出了 J_j 在两个工作中心开始、完成加工的相对时间。

在此基础上,第三阶段对零件进行排序,计算各工序加工的绝对时间,即解决第 2 章中的难点 c)。算法流程如下所示:

将每一设备的空闲时间窗设置为 0 到无穷大(或一个足够大的正数)

将所有任务加入到待排程任务集合 J^W 中

循环,直到 J^W 为空集

对 J^W 中的任务 J_j 循环

求最小的时间 T_j,使其相应加工设备 M_{bk}、M_{dk}上均存在足够大的剩余时间窗,能够分别容纳$[T_j+\text{start}_{bj}, T_j+\text{end}_{bj}]$和$[T_j+\text{start}_{dj}, T_j+\text{end}_{dj}]$

按照以下启发式优先规则从 J^W 中选择一个零件 J_j:

优先安排 W_b 中负荷 h_{bk}大的设备可加工的零件;

负荷相同时优先安排 T_j 小的零件;

T_j 相同时优先安排负荷 h_{bjk}大的零件

将上述步骤选出的任务 J_j 安排在$[T_j+\text{start}_{bj}, T_j+\text{end}_{bj}]$和$[T_j+\text{start}_{dj}, T_j+\text{end}_{dj}]$加工

将$[T_j+\text{start}_{bj}, T_j+\text{end}_{bj}]$和$[T_j+\text{start}_{dj}, T_j+\text{end}_{dj}]$分别从设备 M_{bj}和 M_{dj}的时间窗中删除

将 J_j 从 J^W 中删除

启发式优先规则的原理在于: a) 优先安排 W_b 中负荷 h_{bk}大的设备可加工的零件,能够使瓶颈生产设备的利用率尽量提高; b) 优先安排 T_j 小的零件有助于降低设备空闲时间; c) 由于随着调度的进行,大的时间窗会被逐步分割为小的时间窗,负荷 h_{bjk}大的零件优先安排,有助于提高时间窗利用效率。

本阶段的算法复杂度为 $O(n^2)$。

6 实际运用效果

将本文方法应用于成飞集团金属加工车间 2007 年 9 ～11 月的实际生产任务,该组任务包含 432 个批次任务,涉及不同的零件 425 种、7 438 件,平均每种零件 17.50 件,属于典型的小批量、多品种生产。

经过本算法第一步后,各设备负荷下界如表 1 所示。

表 1 各设备负荷下界

设备 M_{ik}	负荷下界 h_{ik}/min	零件批数(V_{ik}中元素个数)
M_{11}	98 710	270
M_{12}	62 390	139
M_{13}	11 960	17
M_{14}	1 410	6
拉伸机合计	174 470	432
M_{21}	32 065	338
M_{22}	23 180	94
热处理炉合计	55 245	432

从表 1 中得出,拉伸、热处理中心的关键路径下界分别为 98 710 和 32 065 min,因此拉伸机被确定为关键工作中心。

运行第二、第三阶段算法后得到一种调度方案,按照这一调度方案,自 9 月 1 日开始投产到 11 月 9 日所有任务全部完成,历时 70 天。所有设备的完工总时间及利用率如表 2 所示。

表 2 各设备完工总时间、利用率

设备 M_{ik}	完工总时间/min	有效拉伸时间/min	空闲时间/min	设备利用率/%
M_{11}	99 920	98 710	1 210	98.79
M_{12}	68 410	62 390	6 020	91.20
M_{13}	38 420	11 960	26 460	31.13
M_{14}	6 120	1 410	4 710	23.04
M_{21}	99 810	32 065	67 745	32.13
M_{22}	97 950	23 180	74 770	23.67

由于拉伸机 M_{11} 负荷最重,M_{11} 的加工流程是整个调度问题的关键路径。在调度方案中,M_{11} 的总时间为 99 920 min,相比其有效工作负荷 98 710 min,仅超出不足 1.5%,等待时间仅 1 210 min,设备利用非常充分。因此该调度结果已极为接近最优解。将整个生产期间的投产任务负荷按旬进行统计,如图 6 所示。

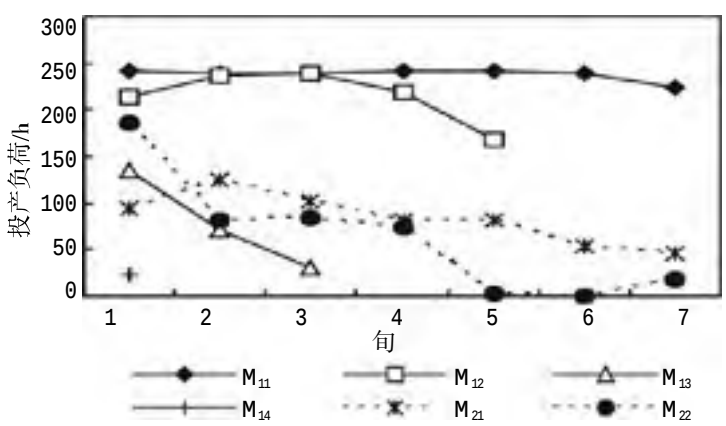

图 6 按旬统计的设备负荷

从图 6 中可以看出,各设备的负荷未出现明显起伏。各加工设备,特别是主要的重负荷设备(M_{11} 和 M_{12})呈现均衡投产的良好态势。

上述调度结果是在保证了预拉伸、淬火、拉伸连续进行的条件下达成的,因此能够确保跨工序的时间窗和设备选择约束得以满足。不仅如此,这样的连续加工调度方案,在实际运行中便于执行,且对于各种异常情况(如设备故障、订单变更)的适应能力很强。

7 结束语

Job shop 是调度问题中最困难的问题之一,而柔性 job shop 问题 FJSP 又是其中的难点。本文针对飞机制造中的一个具体 FJSP 提出一种三阶段调度算法,能够在多项式时间 $O(nm_1)$ 内获得满意解,具有很强的实用性。

这一方法,可以很容易地扩展到更广泛的场合,如: a) 带有设备时间窗的场合。当设备需要定期保养、维修时,可将第三阶段第一步的空闲时间窗进行裁减,使之反映相应的停工时间,即可继续使用本文算法。b) 带有投产、完工时间约束的场合。调整第三阶段的启发式优先规则,使投产、完工时间处于时间窗以外的任务具有最低的优先级即可。进一步的工作,是对该调度问题的在线调度算法进行研究,以支持各种滚动任务的调度。

参考文献:

[1] 吴秀丽,孙树栋,杨展,等.多目标柔性 job shop 调度问题的技术现状和发展趋势[J].计算机应用研究,2007,24(3): 1-9.

[2] TORABI S A, KARIMI B, GHOMI S M T F. The common cycle economic lot scheduling in flexible job shops: the finite horizon case[J]. International Journal of Production Economics, 2005, 97(1): 52-65.

[3] 陈华平,古春生.随机柔性 flow shop 加权完成时间调度问题的启发式策略性能分析[J].控制理论与应用,2006,23(4):523-525.

[4] 张超勇,饶运清,李培根,等.柔性作业车间调度问题的两级遗传算法[J].机械工程学报,2007,43(4):119-124.

[5] SCRICH R C, ARMENTANO V A, LAGUNA M. Tardiness minimization in a flexible job shop: a tabu search approach[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2004, 15(1):103-115.

[6] VINCENT T, NICOLAS M, FABRICE T, *et al*. An ant colony optimization algorithm to solve a 2-machine bicriteria flow shop scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 142(2): 250-257.

[7] 余建军,孙树栋,王军强,等.免疫模拟退火算法及其在柔性动态 job shop 中的应用[J].中国机械工程,2007,18(7): 793-799.

[8] 沈益民,范玉顺.调度问题微结构及其柔性优化[J].自动化学报,2006,32(2): 264-270.

[9] PINEDO M. Scheduling: theory, algorithms, and systems[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 181.

[10] ADAMS J, BALAS E, ZAWACK D. The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling[J]. Management Science, 1988, 34(3):391-401.

[11] SHEN Yi-min, FAN Yu-shun, ZENG Sen. Switching serial-number coding scheme and its application in FFS scheduling problem with inter-stage constraints[C]//Proc of the 3rd International Conference on Natural Computation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2007: 375-379.

[12] BRUCKER P. Scheduling algorithm[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1998: 165.