

复杂作业模式下车间生产调度的建模与优化*

Modeling and Optimization of Production Scheduling in Complex Operation Pattern

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室 张 蕾 何卫平 蔺小军

[摘要] 针对某航天制造企业的实际生产环境,分析和讨论了复杂作业模式下车间生产的调度问题,并根据实际的业务流程建立了数学模型,通过自动调度与人工调度相结合的方法对其进行优化,最后采用实例对调度结果进行了验证。事实证明,这种调度机制可以同时增强系统的灵活性和稳定性,对提高车间生产效率和管理水平有很大帮助。

关键词: 复杂作业模式 变批量生产 生产调度 启发式规则

[ABSTRACT] Aiming at the actual production environment of some aerospace manufacturing enterprise, the production scheduling in complex operation patterns are analyzed, and a mathematic model is established. An optimization result is obtained by combining the outcome of some automatic dispatch and artificial dispatch, and an example is used to prove its validity. The facts show that this mechanism can enhance both flexibility and stability of the MES, and it will take a great help in improving production efficiency and management level.

Keywords: Complex operation pattern Scalable batch manufacturing Production scheduling Heuristic rules

随着信息技术的快速发展,作为一种先进管理技术的MES已被越来越多的制造企业应用到其日常的生产管理中。然而,由于市场竞争的日趋激烈,企业所面临的生产环境开始逐步恶化,使得MES的应用环境变得越来越复杂。尤其是在航空航天制造领域,其特殊且复杂的生产模式导致了MES的系统功能只能根据用户需求和生产环境定制,这无疑给MES的开发和实施增加了很大难度。在这种情况下,解决好MES核心之一的车间调度问题就显得尤为重要。

由于调度问题本身的复杂性和生产过程的多变性,一般的车间管理系统在解决调度问题时往往大大简化调度模型^[1],使得调度问题的解决处于一种相对理想的

环境中。实际上,这种看似稳定、实则偏离车间生产环境的管理系统大都丧失了准确、快速响应生产扰动的能力,从而弱化了整个MES的系统功能。

基于上述问题,本课题提出了一种面向复杂作业模式的生产调度处理机制——自动调度与人工调度相结合的调度方法。这种方法的优点在于以实际生产环境为基础,综合了典型调度算法单目标的精准性和人工经验的实用性,以人类思维的灵活性弥补了调度算法的单一性,对于解决离散型制造企业的实际生产问题具有更好的效果。

1 复杂作业模式下制造车间生产调度问题

1.1 复杂作业模式分析

目前,复杂作业模式下制造企业的车间管理现状及生产特点主要有:

(1) 变批量生产占主导地位。为适应市场竞争和用户个性化需求,企业的生产过程需根据订单变化随时进行调整,以满足柔性化生产的需要。

(2) 生产过程采用局部流水的作业方式。由于受到制造资源、任务紧急程度及批量变化等诸多因素的影响,一个批次的生产任务在其加工过程中可能会不断地进行调整^[2],包括生产节奏和生产方式的变化等。

(3) 产品设计不断修正,工艺变动频繁。航天制造企业大都具有批产和研制相结合的生产特点,产品的生产过程也是工艺的完善过程。

(4) 工期变更频繁,生产线不断调整。由于受客户订单变化的影响,需要对批次任务的生产时间及相应的加工设备进行实时调整,以保证优先级较高的批次任务先进行生产。

以上特点的存在导致了生产车间在信息采集、数据处理、过程控制、质量追踪等方面的工作量和工作难度都大大增加,从而降低了企业的生产效率和竞争力。

1.2 复杂作业模式下的生产调度问题

生产调度包括静态调度和动态调度2方面内容。静态调度是指在生产加工前就根据已有的生产信息安排好了工序加工顺序,其调度依据是生产作业计划;动态调度则是针对在生产过程中所出现的由紧急插单、交货期提前、设备故障等突发事件而引起的对原有静态排

* 基金项目: 863 重点项目(2007A040701-3); 国家自然科学基金(50605051)。

序的扰乱,并重新对工件的加工顺序进行实时排序或采取其他措施的方法,其调度依据是生产过程中的动态扰动。

本研究所讨论的调度问题主要有4点:

(1) 紧急插单: 有临时任务介入,使得原有的生产秩序被打乱;

(2) 分卡: 在生产过程中,由于交货期提前等因素的影响,需要将一张工艺过程卡(对应一个批次任务)中部分数量的加工任务分离出去,形成2张卡;

(3) 工艺变更: 在工件的加工过程中,发现如果继续按照现有工艺进行生产将不能达到加工要求,从而对未开始加工的部分工艺进行修改,直到达到要求;

(4) 任务改派: 在生产过程中,由于设备、人员能力或交货期等因素的影响,需要将一项或几项已分配到具体人或设备上的任务全部或部分地转派到其他的人或设备上。

2 复杂作业模式下生产调度问题解决方案

2.1 复杂作业模式下生产调度过程建模

基于复杂作业模式下车间生产的特点,可将调度过程中所涉及的生产要求总结为以下4点:

(1) 在同一时刻,每台设备只能加工一个工件,但允许同一批次任务中的同一道工序在同一时刻分配给不同的设备来加工,以协调各制造资源之间的关系,确保工期变更后的生产线畅通。

(2) 在有多个批次任务、并涉及多种加工设备的变批量生产过程中,允许同一道工序被多次分配给同一台设备,且允许该设备一次性加工完成或分批完成,以满足变批量的生产要求。

(3) 在同一批次任务中,只要有部分数量的工件流转到了不同的工序上,就允许这几道工序(使用不同设备)同时在线生产,以满足局部流水的生产需求。

(4) 只要批次任务中还有尚未开始加工的工序信息,那么这些未开始加工的工序就有可能发生工艺变更,以适应制造企业产研结合的生产特点。

根据以上分析,可建立如下数学模型。

生产车间共有 m 个批次任务 $(T_1, T_2, T_3, \dots, T_m)$, 有 n 类加工设备 $(E_1, E_2, E_3, \dots, E_n)$ 。其中,第 i 个批次任务 T_i 的加工数量为 N_i ($i \in 1, 2, \dots, m$), 相应的工序集为 G_i ($i \in 1, 2, \dots, m$), 对应的工序数为 P_i ($i \in 1, 2, \dots, m$)。第 i 个批次任务中第 t ($t \in 1, 2, \dots, P_i$) 道工序表示为 $T(i, t)$, 加工 $T(i, t)$ 所用的设备为 $E(i, t)$, 工序单件加工时间为 $WT(i, t)$ ^[3]。

另外,对于每一类设备都有其相应的设备子集 S_j ($j \in 1, 2, \dots, n$), 且相应设备子集中的设备数量为 K_j

($j \in 1, 2, \dots, n$); 同一批次任务中的每一道工序都有其相应的工序加工子集 $R(i, t)$ ($i \in 1, 2, \dots, m; t \in 1, 2, \dots, P_i$), 且相应工序加工子集中的分批加工次数为 $U(i, t)$ ($i \in 1, 2, \dots, m; t \in 1, 2, \dots, P_i$), 每次分批加工的零件数量为 $V(i, t)$ ($i \in 1, 2, \dots, m; t \in 1, 2, \dots, P_i$)。

由以上分析可知:

$$\sum_{t=1}^U V(i, t) = N_i (i \in 1, 2, \dots, m; t \in 1, 2, \dots, P_i), \quad (1)$$

式(1)中, U 为每道工序分批加工的次数, V 为每次加工的数量。

$$HT(i, t) = PT(i, t) + WT(i, t) \times N_i, \quad (2)$$

式(2)中, $PT(i, t)$ 为工序加工准备时间(假设同一道工序的准备时间相同), $HT(i, t)$ 为一道工序的总加工时间。

$$\begin{cases} \lambda_1 \times WT_{1t} \times V_{1t} = \lambda_2 \times WT_{2t} \times V_{2t} + (ST_{2t} - ST_{1t}) = \\ \dots = \lambda_U \times WT_{Ut} \times V_{Ut} + (ST_{Ut} - ST_{1t}) \\ V_{1t} + V_{2t} + \dots + V_{Ut} = N_i \end{cases}, \quad (3)$$

式(3)中, λ 为每台设备的加工系数,与设备的能力指数成反比。 V_{Ut} 为工序 t 在第 U 批的加工数量, ST_{Ut} 为工序 t 在第 U 批的开始加工时间。在实际生产中,若其他加工条件都相同,通常取 $U=2$, 即在同一条件下,取同类设备中加工能力最强的两台作为主要加工设备。

2.2 复杂作业模式下的生产调度策略

针对复杂作业模式下车间调度问题的多目标性和不确定性,拟采用自动调度和人工调度相结合的双重调度机制^[1](如图1所示)。其中,自动调度层由多个单目标的调度算法组成,每个调度算法对应一个确定的优化目标;人工调度层用来对自动调度层的调度结果进行二次优化,以实现资源的有效利用。

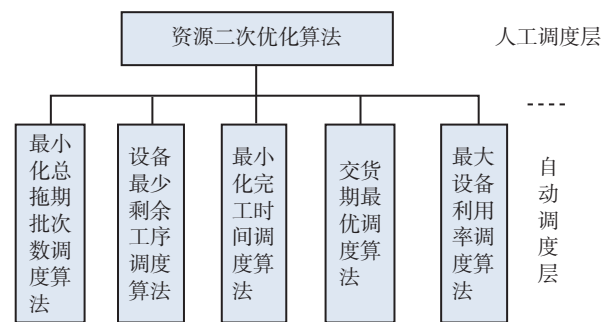


图1 复杂作业模式下的双重调度机制

Fig.1 Dual scheduling mechanism in the complex operation patterns

复杂作业模式下的生产调度策略如图2所示,具体步骤如下。

- (1) 确定异常类型,选择调度目标;
- (2) 根据调度目标启动相应的调度算法,并将初始调度方案显示在客户端;
- (3) 综合人员能力、设备状况等因素,将初始调度方案中同类型、不同个体的加工单元上的生产任务进行工序级的人工再调度;
- (4) 确定出最终的优化调度方案。

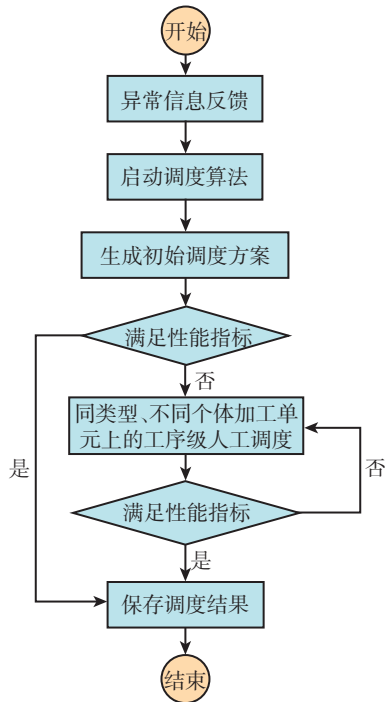


图2 复杂作业模式下的生产调度策略
Fig.2 Production Scheduling strategy in the complex operation patterns

3 基于启发式调度规则的生产调度算法

为解决 1.2 节所描述的生产调度问题,本文以上述调度策略为依托,以最小化工序完工时间为优化目标,采用启发式调度规则来实现车间的生产调度过程^[4-6]。

在本算法中,对于异常类型为“紧急插单”和“分卡”的生产扰动,只需将相应的批次任务看做优先级较高的生产任务,并将其插入到调度列表中;对于“工艺更改”,只需将更改后的工艺插入到调度列表中,并保持原优先级不变;对于“任务改派”,不需初始化调度列表,只需在原调度结果的基础上进行局部人工调整,即可完成工序级生产任务的二次优化。相应的算法流程如图 3 所示,具体步骤如下。

(1) 获取加工信息。包括批次数量、批次编号 m 、工序数、工序加工时间、加工准备时间、优化目标等。对批次任务按加工优先级降序排列,对每个批次任务按工序

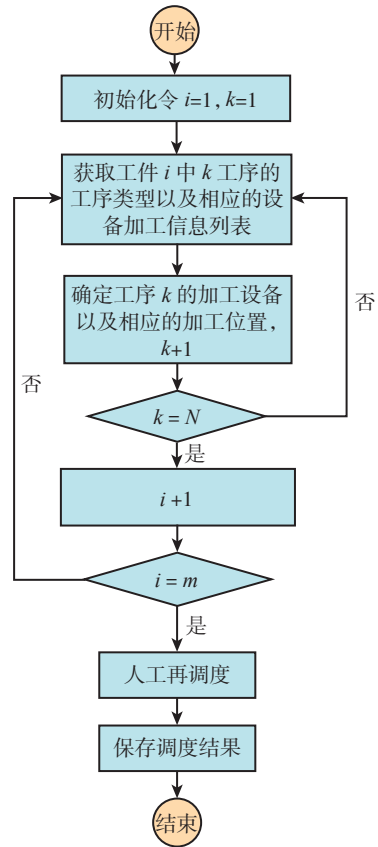


图3 启发式调度算法流程图
Fig.3 Flowchart of heuristic scheduling algorithm

号升序排列,并将相应的排序结果分别保存到任务数组 T_i 和工序数组 G_i 中。

(2) 对于各加工设备,按其任务列表中最后一道工序的完工时间进行升序排列,完工时间越早的设备越靠前。将排序结果按设备类型保存到设备数组 E_j 中。

(3) 初始化。令 $i=1$,即从优先级最高的批次任务开始安排生产。

(4) 自动预调度。将所选批次任务中的所有工序按其类型依次分配给相应类型的加工设备。分配原则为:

a. 获取批次任务 T_i 的工序数 N_i ,并令 $k=1$ 。

b. 获取可加工第 k 道工序的设备数 K_j ,以及每台设备的任务数 l 。若 $l=0$,直接将第 k 道工序分配给相应的设备,并将第 k 道工序的加工开始时间 $ST_k = ET_{k-1} + PT_k$ 、加工结束时间 $ET_k = ST_k + WT_k$ 记录相应设备中,跳转到 d.; 否则,跳转到 c.。

c. 从第 k 道工序开始,遍历相应类型设备组 E_j 中所有设备的任务列表。根据优先级确定第 k 道工序在每台设备中的位置 s 。对于具有相同优先级的加工工序,通过比较加工准备时间来确定其位置,加工准备时间最短的处于先加工的位置。比较每台设备中 $s-1$ 位

置上工序的完工时间,取该时间中大于第 $k-1$ 道工序完工时间的最小值,则该值所对应的设备为第 k 道工序的加工设备。同样,将第 k 道工序的加工开始时间 $ST_k = ET_{k-1} + PT_k$ 、加工结束时间 $ET_k = ST_k + WT_k$ 记录到相应的设备中,同时将位于 S 之后所有工序的开始时间和结束时间加上 WT_k 。

d. 令 $k = k+1$, 跳转到 b., 直到 $K = N_i$ 。

e. 令 $i = i+1$ 跳转到 d., 直到 $i = m$, 即可完成自动调度。

f. 人工再调度。结合设备加工能力、设备运行状态、调度目标等因素,人为将自动调度结果在局部范围内(同类型设备中)进行调整(通过式(3)计算、人工经验分析),以生成更优化的调度方案。

4 实例分析

设某机加车间共有 3 个批次任务 A 、 B 、 C 在 7 台设备 $M1 \sim M7$ 上加工,且 A 、 B 、 C 这 3 个批次任务的紧急程度为 $C > A$, $A = B$ 。具体的加工信息如表 1 所示。

在本文中,以设备的能力指数来表示同类型设备性能的好坏(如表 2 所示),能力指数越大,表示设备的性能越好,加工同一工件所用的时间越短。

表1 加工信息表

批次号	数量/件	工序号	工序名称	加工设备	单件工 时/h	准备工 时/h
A	50	A1	铣	M6/M7	1.4	1
		A2	镗	M3	1	1
		A3	磨	M4/M5	1	0.8
B	100	B1	车	M1/M2	2	1
		B2	磨	M4/M5	3	1
C	30	C1	车	M1/M2	1.5	1
		C2	铣	M6/M7	1.5	0.5
		C3	磨	M4/M5	2	1

表2 设备性能表

设备编号	设备名称	能力指数
M1	车床	1
M2	车床	1.2
M3	镗床	1
M4	磨床	1
M5	磨床	1
M6	铣床	1.1
M7	铣床	1

在 A 、 B 、 C 这 3 个批次任务的生产过程中,需要把 B 中的 40 件从第二道工序开始分出去,并将分出去的任务合并到 C 中。调度的目标是在保证最小化完工时间的前提下,尽量使得设备利用率最大。

从图 4 可以看出,系统优先将 $C1$ 安排给了空闲较早的设备 $M1$ (相对于 $M2$ 而言)来加工,且将从 $B2$ 中分离出来的 40 件合并到了 $C2$ 中,使得工序 $B2$ 的加工数量变为 60 件,而工序 $C2$ 、 $C3$ 的加工数量变为 70 件。加工完所有任务的总工时为 825.3h,总完工时间为 221.3h。

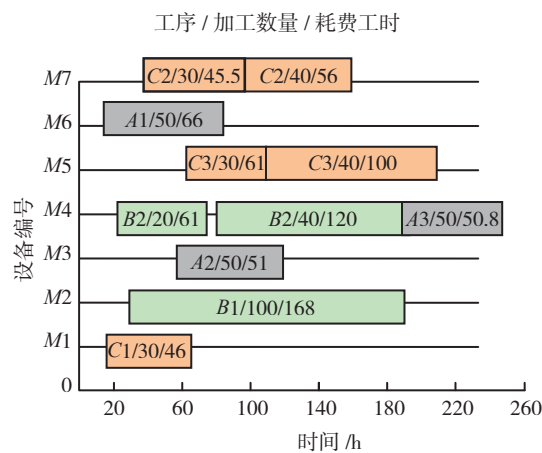


图4 预调度结果

Fig.4 Pre-scheduling results

在自动预调度结果的基础上综合考虑设备加工能力、任务紧急程度以及设备运行状态(忙/闲)等因素的影响,通过式(3)计算得出的优化结果如图 5 所示。加工完所有任务的总工时为 839.3h,总完工时间为: 198.3h。可以看出, $M1$ 、 $M6$ 的设备利用率明显提高,同类型设备的完工时间基本相同,且所有任务的总完工时

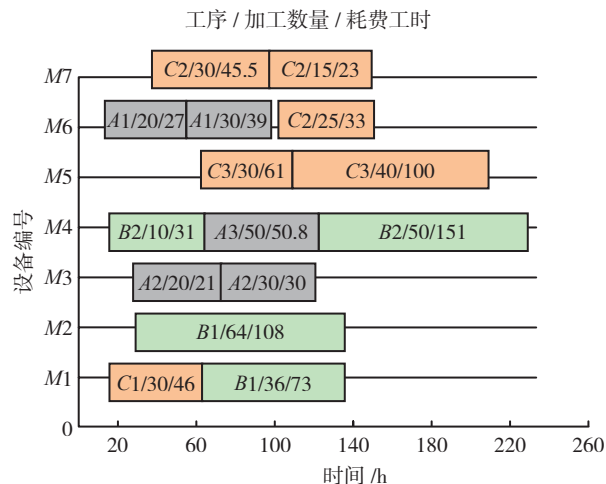


图5 优化结果

Fig.5 Optimization results

(下转第 80 页)