

文章编号: 1001-0920(2011)03-0332-07

## 弹性资源约束的动态调度决策

徐赐军<sup>1,2</sup>, 李爱平<sup>1</sup>, 刘雪梅<sup>1</sup>

(1. 同济大学 现代制造技术研究所, 上海 201804; 2. 黄石理工学院 机电工程学院, 湖北 黄石 435003)

**摘要:** 针对产品开发过程中由于活动变化导致原调度需要重新调整的问题, 提出一种利用弹性资源特性进行动态调度决策的方法. 以活动添加的变化为对象, 根据活动间时序约束、资源约束等特点, 分别构建时序冲突消解模型以及基于资源推拉技术的资源冲突消解模型. 为提高活动冲突消解效率, 提出一种虚拟前置活动和虚拟后续活动的构建方法, 并确定动态调度决策指标值. 最后通过船舶分段制造实例, 验证了弹性资源约束的动态调度决策方法的可行性和有效性.

**关键词:** 弹性资源; 动态调度; 冲突消解; 调度决策

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

## Decision making for dynamic scheduling with flexible resource constraints

XU Ci-jun<sup>1,2</sup>, LI Ai-ping<sup>1</sup>, LIU Xue-mei<sup>1</sup>

(1. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Mechanical and Electronic Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China. Correspondent: XU Ci-jun, E-mail: xucijun818@163.com)

**Abstract:** A dynamic scheduling strategy using the properties of flexible resource is presented for rescheduling problems caused by activity changes in product development process. Mainly to the adding activity in product development process, the timing-conflict resolution model and the resource-conflict resolution model based on resource Push-Pull technology are constructed according to the characteristics of timing constraints and resource constraints, respectively. In order to improve efficiency of conflict resolution, virtual upstream activity and virtual downstream activity are defined and their construction methods are given. Finally, the value of decision index for dynamic scheduling is calculated according to the duration of flexible resources under the condition of full load. The feasibility and effectiveness of the dynamic scheduling strategy with flexible resource constraints are demonstrated by an illustrative example showing block construction scheduling.

**Key words:** flexible resource; dynamic scheduling; conflict resolution; scheduling decision

## 1 引言

市场全球化和技术变革为企业竞争提供了更多的动力, 变化和不确定性已经成为新的竞争环境的标志. 因此, 柔性将成为企业生成和发展的决定性因素, 促使企业将竞争的焦点逐步从成本、质量转移到柔性上<sup>[1]</sup>. 资源柔性是指资源具有快速有效地对环境变化作出反应的能力, 具有该能力的资源称为柔性资源<sup>[2]</sup>. 目前, 关于柔性资源的研究主要集中在柔性资源受限的车间调度问题. Olafsson 等人<sup>[3]</sup>综合了柔性资源受限的平行机调度问题, 并采用具有全局枚举和启发式局部搜索性能的巢分区法进行求解; Daniels 等人<sup>[4]</sup>针对部分柔性资源构造资源能力矩阵, 并通过流

水车间调度模型验证了该方法在生产率上与资源完全调度具有同样的效果. Ruiz-Torres 等人<sup>[5]</sup>以最大完工时间最小化为目标, 提出了表调度与装箱算法相结合的启发式算法, 以实现柔性资源分配计划的修改; 罗荣桂等人<sup>[1]</sup>建立了柔性人力资源约束的作业车间模型, 并分析了不同的资源柔性 with 系统绩效之间的关系. 近年来, 人们又开始对项目管理问题中柔性资源的配置方法与策略进行研究, 如吴兵等人<sup>[6]</sup>将资源受限的多模式项目调度问题中的资源拓展为柔性资源, 并建立了该调度问题的混合整数规划模型. 以往所研究的柔性资源属性主要是指资源在多种不同场合的应用和供应量有限的情况<sup>[6]</sup>. 然而, 实际上柔性

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-04-08.

基金项目: 国家863计划项目(2007AA04Z117, 2008AA04Z113); 上海市科委基础研究重点项目(08JC1419400).

作者简介: 徐赐军(1979—), 男, 博士生, 从事并行工程、决策支持等研究; 李爱平(1951—), 女, 教授, 博士生导师, 从事网络化制造、制造业信息化等研究.

资源可以在一定条件下提高效率, 延长工作时间, 因此本文将资源具有快速有效地对环境变化作出反应并在一定时间内返回正常状态的能力定义为资源弹性, 具有该能力的资源称为弹性资源. 资源弹性与传统资源柔性既有区别又有紧密联系.

在产品实际开发过程中, 大量随机发生的问题导致了几乎所有的预调度都需要安排重调度. 动态调度区别于静态调度的两个最主要特征是调度的鲁棒性和对突发事件的反应能力<sup>[7]</sup>, 所以交互式调度和在线调度是今后的研究方向<sup>[8]</sup>. Willy 等人<sup>[9]</sup>针对不确定性项目调度问题综述分析了反应式调度、随机调度、模糊调度和鲁棒调度等; 王国磊等人<sup>[7]</sup>针对动态调度环境下系统状态空间过大的特点, 采用基于模糊聚类的Q-学习的标书选择策略, 提高了调度系统对动态调度环境的适应能力; 包振强等人<sup>[10]</sup>针对基于知识的调度系统在实际应用中存在的缺陷, 提出一种基于知识的动态调度决策方法. 由此可见, 动态调度的现有研究主要集中在算法上, 尚未充分考虑柔性资源的特性, 尤其弹性资源.

动态调度势必改变原调度计划, 但具有柔性资源约束的调度问题是一类新型调度问题<sup>[2]</sup>, 且弹性资源受限的动态调度所面临的活动时序约束与资源约束关系等将更加复杂. 因此, 本文根据活动所占用弹性资源的属性, 针对不同的约束关系提出相应的动态调度模型, 在尽量维持原调度计划的基础上实现产品开发过程自适应动态调度决策方法.

## 2 弹性资源属性

资源弹性主要表现在环境变化时资源工作效率和工作时间的弹性变化, 例如人力资源在特定情况下可以更高效地工作, 而且可以适当延长工作时间. 在实际应用中, 弹性资源一般在一定能力范围内工作, 即处于非满负荷的工作状态. 弹性资源在一定时间内处于满负荷工作之后必须恢复到正常工作状态; 否则, 资源的各方面性能将可能受损. 因此, 弹性资源侧重于对变化作出反应后迅速恢复到正常状态的能力.

**定义 1** 活动工作量以资源工作效率为基准, 折算成时间表示的工作量称为活动当量 ( $E_Q$ ).

**定义 2** 在具体活动中, 资源最高工作效率与正常工作效率 ( $\eta$ ) 的比值称为资源裕度系数 ( $\gamma$ ).

**定义 3** 在具体活动中, 资源工作时间最大延长值与正常工作时间的比值称为资源拉伸系数 ( $\epsilon$ ).

**定义 4** 在具体活动中, 资源满负荷工作所允许的最长持续时间称为资源弹性极限 ( $D_L$ ).

资源在不同活动的作用过程中, 由于作用对象不同, 导致资源工作效率及其完成工作量的计量单位

不统一, 这便为资源在不同活动中的定量分析带来很大的困难. 活动当量将与资源相关的分析量折算成一量, 以便于对资源在不同活动中的执行情况进行比较、分析和运算. 当资源在活动中以正常工作效率执行时, 该活动的活动当量在数值上等于活动工期. 资源裕度系数与资源作用的活动紧密相关, 同一资源在不同的活动中, 资源裕度系数可能不一样, 即资源在不同的活动中工作效率提高的程度不一样. 资源拉伸系数主要与资源本身的属性相关, 但活动的工况同样影响资源拉伸系数的变化. 资源弹性极限是资源在活动过程中满负荷工作的持续时间峰值, 一旦超过该值, 资源便被锁定, 暂时不能参与任何活动.

弹性资源的特殊性能决定了它在活动动态调度过程中必定承担一个重要的角色. 为了便于分析弹性资源的工作性能, 并为项目管理者提供可靠的决策意见, 将弹性资源在活动过程中的信息提炼成知识, 并采用适当的知识表示方法予以存储.

## 3 动态调度模型

在产品开发初始阶段, 制定的调度计划只能在大体上反映产品开发过程的趋势, 而在产品开发过程中大量不确定因素会影响产品开发流程, 导致产品开发项目调度的变化. 因此, 在产品开发过程中, 需要合理地动态修改调度计划, 保证产品开发的顺利进行. 在执行初步计划的过程中, 设计活动可能发生的变化主要有活动添加、活动删除、活动返工和活动修改. 活动返工和活动修改在初始调度中可根据设计活动的相关知识将其分解成若干耦合的虚拟子活动予以考虑; 活动删除虽然可能导致相关活动开始时间的提前, 但若不是为了更加优化调度结果, 则可维持原调度计划. 因此, 本文主要研究产品开发过程中活动添加给原调度计划带来的影响, 以及尽量在维持原调度计划的基础上所作出的动态响应策略.

本文令添加活动所占用资源的开始时间相对于活动开始时间或资源的结束时间相对于活动结束时间的关系至少有一种关系不变. 当添加活动嵌入原调度计划后, 由于活动的时序要求和资源的竞争, 可能会导致一些活动延迟执行. 因此, 本文利用弹性资源的特性来解决时序冲突和资源冲突, 保证产品开发项目的顺利进行.

### 3.1 时序约束下的调度模型

假设添加活动  $a_c$  嵌入在原调度计划中的活动  $a_i$  与  $a_j$  之间, 即存在时序约束. 若资源按正常状态工作时活动  $a_c$  与其他活动存在时序冲突, 则添加活动必须在紧前活动结束后、紧后活动开始前完成, 因此添加活动嵌入原调度计划的模型如图 1 所示. 图

中: 虚线表示资源或活动在资源满负荷工作时的结束或开始时间;  $T_B$  表示活动的开始时间;  $T_E$  表示活动的结束时间;  $T_{RB}$  表示活动所占用资源的开始时间;  $T_{RC}$  表示活动所占用资源的开始时间相对于活动开始时间的差值; 下标  $i, c, j$  表示活动;  $h, k$  表示资源. 下文中的符号定义无特别说明时与此相同.

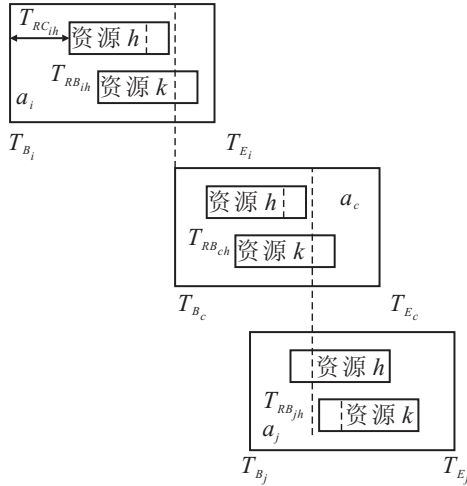


图 1 时序约束下的活动嵌入模型

图1显示, 根据弹性资源特性, 添加活动及其紧前活动的相关资源可以提前结束, 但活动的结束时间为所有资源最后结束的时间; 添加活动的紧后活动的相关资源则可以推迟开始, 但紧后活动的开始时间为所有资源最早开始的时间. 因此, 在时序约束下添加活动能嵌入原调度计划必须满足以下条件:

$$\begin{aligned} & \max_{h \in R_c} \{T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{C_{ch}}\} - \\ & \min_{h \in R_j} \{T_{RB_{jh}} + D_{O_{jh}} - D_{C_{jh}}\} \leq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $D_{O_{jh}}$  表示资源在活动中正常工作状况下的持续时间;  $D_{C_{ch}}, D_{C_{jh}}$  表示资源在活动中满负荷工作状态下的持续时间;  $R_c, R_j$  表示活动所占用资源的集合. 弹性资源在活动过程中满负荷工作状态下的最大持续时间为

$$D_{C_{ih}} = \frac{D_{O_{ih}}}{(1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih}}, \quad (2)$$

此时添加活动的最早开始时间为

$$T_{B_c} = \max_{h \in R_i} \{T_{RB_{ih}} + D_{C_{ih}}\}. \quad (3)$$

当弹性资源在添加活动的紧前活动阶段满负荷工作后, 添加活动便能顺利嵌入原调度计划, 添加活动和后续活动的弹性资源工作状态不变. 由图1可知, 此时添加活动的最晚开始时间为

$$T'_{B_c} = T_{B_j} - D_{O_c}, \quad (4)$$

式中  $D_{O_c}$  表示活动在原调度计划中的活动工期. 此时添加活动需要弹性资源满负荷工作所完成的活动当量为

$$E_{Q_c} = \frac{(T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - T'_{B_c}) \times \eta_{ch}}{\eta_{ch}} = \frac{T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - T'_{B_c}}{\eta_{ch}}. \quad (5)$$

紧前活动的弹性资源在单位时间内超额完成的活动当量为

$$E_{Q_i} = \frac{1 \times (1 + \varepsilon_{ih}) \times \eta_{ih} \times \gamma_{ih}}{\eta_{ih}} - \frac{\eta_{ih} \times 1}{\eta_{ih}} = (1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih} - 1. \quad (6)$$

此时紧前活动弹性资源在满复合工作状态下的持续时间为

$$D_{S_{ih}} = \begin{cases} \frac{T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - T'_{B_c}}{(1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih} - 1}, & T'_{B_c} < T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}}; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (7)$$

$$D_{S_{ch}} = D_{S_{jh}} = 0. \quad (8)$$

同理可得, 添加的活动分别在其自身阶段满负荷工作和在其紧后活动阶段满负荷工作后才能顺利嵌入原调度计划时, 弹性资源在满负荷工作状态下的持续时间. 因此, 在时序约束下, 弹性资源在相应活动中满负荷状态下的持续时间为

$$D_{S_{ih}} = \begin{cases} \frac{\max\{0, T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - T'_{B_c}\}}{(1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih} - 1}, & T_{B_c} + D_{O_c} \leq T_{B_j}; \\ \frac{\max\{0, T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - T_{B_c}\}}{(1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih} - 1}, & \text{其他.} \end{cases} \quad (9)$$

$$D_{S_{Ch}} = \begin{cases} 0, & T_{B_c} + D_{O_c} \leq T_{B_j}; \\ \frac{\max\{0, T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{O_{ch}} - T_{B_j}\}}{(1 + \varepsilon_{ch})\gamma_{ch} - 1}, & D_{C_c} \leq (T_{B_j} - T_{B_c}) < D_{O_c}; \\ \frac{\max\{0, T_{RC_{ch}} + D_{O_{ch}} - D_{C_c}\}}{(1 + \varepsilon_{ch})\gamma_{ch} - 1}, & \text{其他.} \end{cases} \quad (10)$$

$$D_{S_{jh}} = \begin{cases} \frac{\max\{0, T_{B_c} + D_{C_c} - T_{RB_{jh}}\}}{(1 + \varepsilon_{jh})\gamma_{jh} - 1}, & T_{B_j} < T_{B_c} + D_{C_c}; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $D_{C_c}$  表示活动在资源满负荷工作状态下的活动工期, 且  $D_{C_c} = \max_{h \in R_c} \{T_{RC_{ch}} + D_{C_{ch}}\}$ .

### 3.2 资源约束下的调度模型

在产品开发过程中资源是不可缺少的, 但又是受限制的. 资源对产品开发项目进度的约束因素主要有资源可用时间窗口、资源容量和资源补充方式等. 资源在开发活动过程中作用的时间也可能是不一样的, 有些资源可能只在活动过程中某个时间段作用, 也可能在整个活动过程中都在使用. 另外, 资源在活动中的驱动方式也不一样. 资源本身不能对活动作

出选择,当某活动激活后,资源采用推式驱动,即活动向资源池提出资源请求,获取该活动的资源需求并执行该活动;当资源在活动过程中的作用结束后,若资源为可更新资源,则采用资源拉式驱动,即资源主动去拉动相关的活动,这一过程便是资源推拉技术的实现过程.当资源在相关活动中的作用都结束后释放资源,并加入资源池等待重新分配.因此,根据资源在活动中的激活方式构建资源冲突消解模型,如图2所示.图2中活动 $a_i$ 与 $a_j$ 关于资源 $h$ 冲突,且冲突消解后,活动 $a_j$ 需延迟的时间为 $d_{jih}$ .

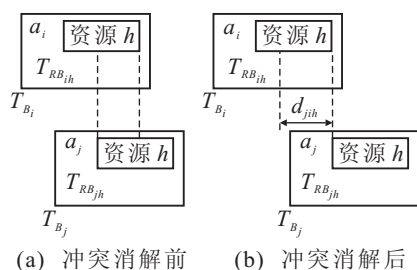


图2 资源冲突消解模型

若添加的活动 $a_c$ 在嵌入原调度计划时与活动 $a_i$ 和 $a_j$ 仅存在资源冲突,且活动所占用的资源在执行过程中相互独立,则根据资源推拉技术的冲突消解模型和弹性资源的特性,构建添加活动嵌入模型,如图3所示.因此,在资源约束下添加活动能嵌入原调度计划,而在时序约束下添加活动也能嵌入原调度计划必须满足以下条件:

$$\max_{h \in C_{R_{cj}}} \{T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{C_{ch}} - (T_{RB_{jh}} + D_{O_{jh}} - D_{C_{jh}})\} \leq 0. \quad (12)$$

式中:  $C_R$  表示冲突资源集合,  $T_{B_c} = \max_{h \in C_{R_{ic}}} \{T_{RB_{ih}} + D_{C_{ih}} - T_{RC_{ch}}\}$ .

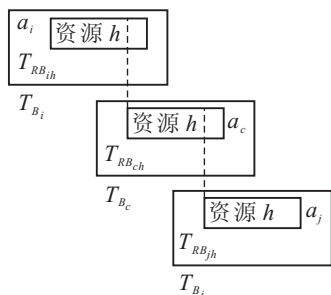


图3 资源约束下的活动嵌入模型

当弹性资源在其前置活动阶段开始满负荷工作后添加活动便能顺利嵌入原调度计划时,添加活动和后续活动的弹性资源工作状态不变,则根据图2的资源冲突消解模型和图3的嵌入模型即可得到此时添加活动的最晚开始时间为

$$T'_{B_c} = \min_{h \in C_{R_{cj}}} \{T_{RB_{jh}} - D_{O_{ch}} - T_{RC_{ch}}\}, \quad (13)$$

此时添加活动需弹性资源满负荷工作的活动当量为

$$E_{Q_c} = T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - (T'_{B_c} + T_{RC_{ch}}). \quad (14)$$

因此,结合式(6)可知,此时弹性资源在满负荷工作状态下的持续时间为

$$D_{S_{ih}} = \frac{E_{Q_c}}{E_{Q_i}} = \frac{T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - (T'_{B_c} + T_{RC_{ch}})}{(1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih} - 1}, \quad (15)$$

$$D_{S_{ch}} = D_{S_{jh}} = 0. \quad (16)$$

同理可得,添加活动分别在其自身阶段满负荷工作和在其后续活动阶段满负荷工作才能顺利嵌入原调度计划时弹性资源在满负荷工作状态下的持续时间.因此,在资源约束下弹性资源在相应活动中满负荷状态下的持续时间为

$$D_{S_{ih}} = \begin{cases} \frac{\max\{0, T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - (T'_{B_c} + T_{RC_{ch}})\}}{(1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih} - 1}, \\ \max_{h \in C_{R_{cj}}} \{T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{O_{ch}} - T_{RB_{jh}}\} \leq 0; \\ \frac{\max\{0, T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - (T_{B_c} + T_{RC_{ch}})\}}{(1 + \varepsilon_{ih})\gamma_{ih} - 1}, \text{其他}. \end{cases} \quad (17)$$

$$D_{S_{ch}} = \begin{cases} 0, \max_{h \in C_{R_{cj}}} \{T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{O_{ch}} - T_{RB_{jh}}\} \leq 0; \\ \min \left\{ \frac{\max\{0, T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{O_{ch}} - T_{B_j}\}}{(1 + \varepsilon_{ch})\gamma_{ch} - 1}, D_{C_{ch}} \right\}, \\ \max_{h \in C_{R_{cj}}} \{T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{C_{ch}} - T_{RB_{jh}}\} > 0; \\ \frac{\max\{0, T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{O_{ch}} - T_{RB_{jh}}\}}{(1 + \varepsilon_{ch})\gamma_{ch} - 1}, \text{其他}. \end{cases} \quad (18)$$

$$D_{S_{jh}} = \begin{cases} \frac{\max\{0, T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{C_{ch}} - T_{RB_{jh}}\}}{(1 + \varepsilon_{jh})\gamma_{jh} - 1}, \\ \max_{h \in C_{R_{cj}}} \{T_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{C_{ch}} - T_{RB_{jh}}\} > 0; \\ 0, \text{其他}. \end{cases} \quad (19)$$

### 3.3 两种约束共存的调度模型

当添加活动 $a_c$ 嵌入在原调度计划中的活动 $a_i$ 与 $a_j$ 之间时,可能还与其他活动 $a_l$ 存在资源冲突,即添加活动与其前面活动存在时序冲突而与后面活动存在资源冲突,或与其前面活动存在资源冲突而与后面活动存在时序冲突.当两种冲突共存时,添加活动可通过合理选择和组合活动在时序约束和资源约束下的调度模型进行调度.组合过程的关键是正确区分弹性资源在满负荷工作阶段的判断条件和添加活动的开始时间.

### 3.4 多活动冲突的调度模型

在实际项目执行过程中,添加活动并不一定只与其前后的单独活动冲突,即可能同时与几个活动冲突,此时活动冲突将变得更加复杂.为了提高活动冲突消解的效率,本文提出虚拟前置活动和虚拟后续活动,即将与添加活动存在时序冲突或资源冲突的多个活动中的资源按一定规则提取出来,构成一个虚拟活动,活动和资源的工作参数不变.因此,虚拟活动的构建步骤如下:

1) 根据时序约束或时间限制条件初步确定添加活动的开始时间.

2) 检测与添加活动存在冲突的资源冲突集  $C_{R_i}$  和活动冲突集  $C_{A_i}$ .

3) 根据下式选择虚拟前置活动的作用资源:

$$P_H = \{(i, h) | T_{RB_{ih}} < T_{RB_{ch}}, i \in C_{A_i}, h \in C_{R_i}\}. \quad (20)$$

4) 根据前置虚拟活动确定添加活动正常工作状态和满负荷工作状态下的开始时间

$$T'_{B_c} = \max_{(i,h) \in P_H} \{T_{RB_{ih}} + D_{O_{ih}} - T_{RC_{ch}}\}, \quad (21)$$

$$T_{B_c} = \max_{(i,h) \in P_H} \{T_{RB_{ih}} + D_{C_{ih}} - T_{RC_{ch}}\}. \quad (22)$$

5) 检测此两种工作状态下与添加活动存在冲突的资源冲突集  $C_{R_j}$  和活动冲突集  $C_{A_j}$ .

6) 根据下式选择虚拟后续活动的作用资源:

$$S_H = \{(j, h) | T_{RB_{jh}} > T'_{B_c} + T_{RC_{ch}} + D_{O_{ch}}, \\ \text{且 } T_{B_c} + T_{RC_{ch}} > T_{RB_{jh}} + D_{O_{jh}}, \\ j \in C_{A_j}, h \in C_{R_j}\}. \quad (23)$$

针对某种弹性资源,若虚拟前置活动或虚拟后续活动中的单独活动与添加活动无冲突,但其中多个活动的并行执行导致它们冲突,则此时冲突的消解过程采用本文冲突消解方法与递归算法相结合,进一步优化弹性资源满负荷工作的持续时间.

## 4 动态调度策略

动态调度决策表示产品开发过程处于某个阶段的某个状态时,对于项目活动的变化可以作出不同的决定(或选择),从而动态确定该变化的状态.针对产品开发过程中添加活动的动态决策,弹性资源处于满负荷工作状态的持续时间必须在其相应活动的工况下允许的弹性极限时间内,即若  $D_{S_{ih}} > D_{L_{ih}} ((i, h) \in (P_H \cup S_H \cup \{a_c, h\}))$ , 则添加活动在该方案中无法嵌入原调度计划.为了延长资源寿命,在产品开发过程中往往设定资源的满负荷率( $\theta$ ),因此弹性资源满负荷率必须满足以下条件:

$$\sum_{i \in C_{A_i} \cup C_{A_j} \cup a_c} \frac{D_{S_{ih}} \cdot R_{I_{ih}}}{R_{K_h} \cdot T_D} \leq \theta_h. \quad (24)$$

式中:  $R_{I_{ih}}$  表示活动  $a_i$  占用弹性资源  $h$  的数量,  $R_{K_h}$  表示弹性资源  $h$  的容量,  $T_D$  表示产品开发项目工期.若式(24)不成立,则添加活动不能在基本维持原调度计划的基础上被嵌入,即产品开发活动必须重调度.

当添加活动能嵌入原调度计划时,动态决策指标定义为

$$D_I = \sum_{h=1}^K \omega_h (D_{S_{ih}} + D_{S_{ch}} + D_{S_{jh}}). \quad (25)$$

式中:  $K$  表示冲突资源类型总数;  $\omega_h$  表示冲突资源的权重,主要由该资源在整个项目中的负荷、成本等因素决定.动态决策指标值越小,表明冲突资源满负荷工作的持续时间越少,资源损坏可能性越小,且成本、负荷等越合理,因此添加活动嵌入该决策方案的位置越合理.

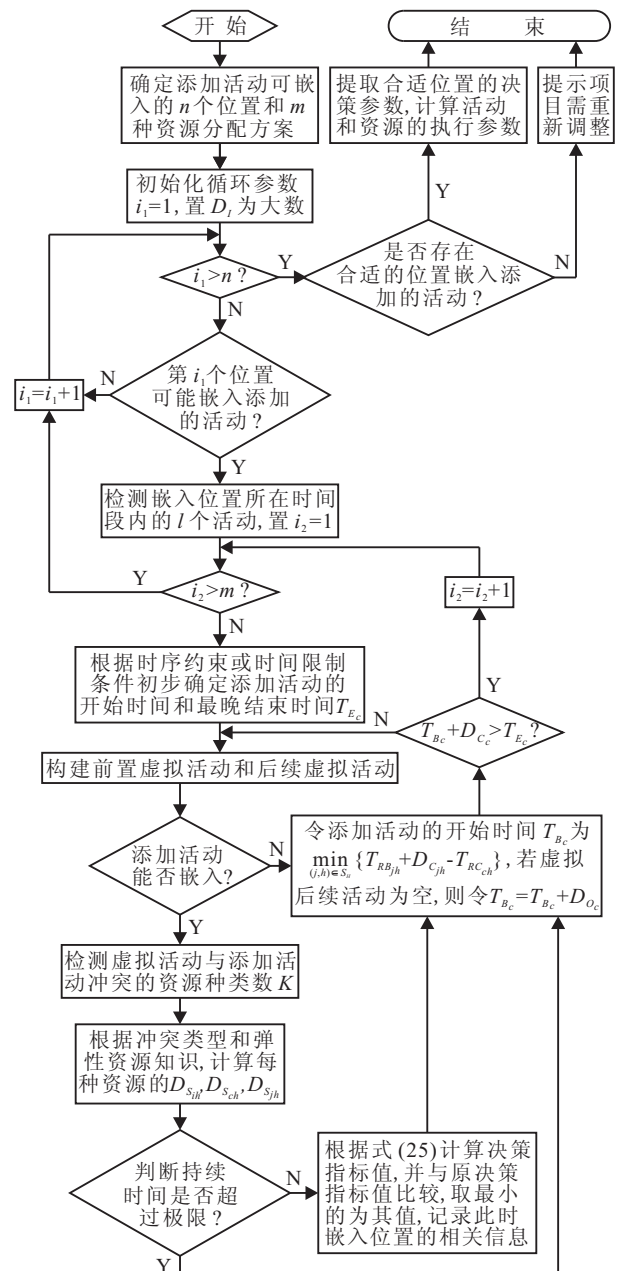


图 4 动态调度决策流程图

产品开发过程中,活动的变化必然导致原调度计划的变化.在活动添加过程中只有分配合适的资源和选择适当的嵌入位置,才能尽量减少原调度计划的变化.因此,根据前文分析,可构建添加活动动态调度决策流程,如图4所示.

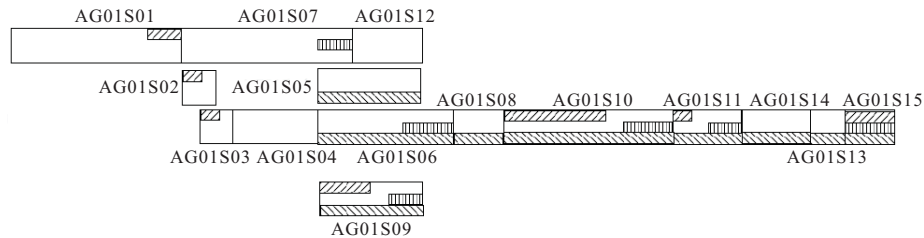
### 5 应用实例

船舶制造是一个多专业、多工种、多分段形式并存的复杂系统,每个分段制造计划可被视为一个项目.在船舶制造过程中存在大量的不确定因素,导致船舶生产活动调度不断变化,因此在船舶生产活动的调度过程中,需要一种能够动态修改调度计划,产生一个能反应变化的调度计划.分段制造主要包括物资准备、钢板预处理、车间底漆、切断作业、平面制作、曲面制作、分段舾装件制作、胎架制作、框架制作、分段制作、脱胎翻身焊接、托盘集配、分段涂装、分段舾装、分段合拢等关键活动,并按序编号为01~15.施工队甲主要承担项目AG01S,拥有吊车(台)、高级焊工(个)和施工场地(m<sup>2</sup>)3种紧缺的可更新资源,资源容量分别为1,2,200.活动参数如表1所示,

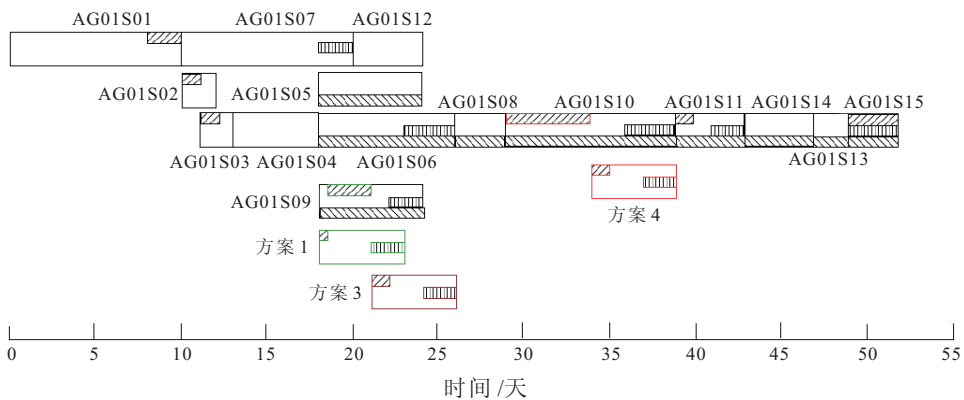
其中:  $r$  表示活动对资源的需求量,  $r_b$  表示资源在相应活动中的开始时间,  $t$  表示资源在相应活动中的持续时间(单位为天).项目AG01S的原调度计划如图5(a)所示.施工队乙主要承担几个小项目,为节约成本,有些生产活动需要外包.假设施工队乙的生产

表1 分段制造活动参数

活动	活动工期	吊车			高级焊工			施工场地		
		$r$	$r_b$	$t$	$r$	$r_b$	$t$	$r$	$r_b$	$t$
AG01S01	10	1	8	2	0	0	0	0	0	0
AG01S02	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
AG01S03	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0
AG01S04	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AG01S05	6	0	0	0	0	0	0	40	0	6
AG01S06	8	0	0	0	1	5	3	50	0	8
AG01S07	10	0	0	0	1	8	2	0	0	0
AG01S08	3	0	0	0	0	0	0	120	0	3
AG01S09	6	1	0	3	1	4	2	40	0	6
AG01S010	10	1	0	6	1	7	3	120	0	10
AG01S011	4	1	0	1	1	2	2	120	0	4
AG01S012	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AG01S013	2	0	0	0	0	0	0	120	0	2
AG01S014	4	0	0	0	0	0	0	120	0	4
AG01S015	3	1	0	3	1	0	3	120	0	3
HD0211	5	1	0	1	1	3	2	0	0	0



(a) AG01S调度计划



(b) HD0211嵌入方案

项目活动 吊车 高级焊工 施工现场

图5 动态调度计划

表2 动态调度决策方案

方案	检测时刻	嵌入时刻	虚拟前置活动	虚拟后续活动	$\{D_{S_{ih}}\}, \{D_{S_{ch}}\}, \{D_{S_{jh}}\}$	$D_I$
1	13	18	{(AG01S04,-)}	{(AG01S09,吊车)}	({0},{0.694,0},{0.496})	1.071
2	19.25	19.25	{(AG01S09,吊车)}	{(AG01S06,高级焊工)}	({1.25},{0.1.389},{1.452})	3.682
3	20.39	21	{(AG01S09,吊车),(AG01S09,高级焊工),(AG01S06,高级焊工)}	-	({0,0,0},{0,0,-})	0
4	31.5	34	{(AG01S10,高级焊工)}	{(AG01S11,吊车),(AG01S11,高级焊工)}	({0.714},{0,0},{0,0})	0.643

活动 HD0211 由施工队甲协作完成, 并共享吊车和高级焊工的资源. 令两种资源的拉伸系数分别为 1 和 0.2, 裕度系数均为 1.2, 弹性极限均为 3 天, 满负荷率均为 0.2, 权重均为 0.9, 其他资源满足该弹性资源变化的要求. 若施工队乙要求活动 HD0211 在活动 AG01S04 与活动 AG01S11 之间完成, 则动态调度计划的部分方案如图 5(b) 所示, 相关参数如表 2 所示.

方案 1 的虚拟前置活动实际上是添加活动 HD0211 的紧前活动, 即它们存在时序约束, 但活动 AG01S04 不占用重要资源, 故令活动 HD0211 完全在其结束后开始. 若虚拟后续活动与添加活动关于资源吊车存在资源冲突, 则根据式 (18) 和 (19) 即可求解资源满负荷持续时间及其相应的工作时间. 对于方案 2, 虚拟前置活动和虚拟后续活动与添加活动只存在资源冲突, 则根据本文相应的方法直接可以求解. 对于方案 3, 虚拟前置活动与添加活动只存在资源冲突, 且虚拟后续活动为空集, 则根据虚拟后续活动构建过程可知, 活动 HD0211 可以在不改变原计划的基础上被嵌入, 即虚拟前置活动中的冲突可通过递归算法逐个解决, 所以此时活动 HD0211 的开始时间为 21. 对于方案 4, 虚拟前置活动与添加活动只存在资源冲突, 但虚拟后续活动即为紧后活动, 存在时序冲突, 因此根据式 (9) 便可将活动 HD0211 顺利嵌入原调度计划. 图 5(b) 显示了活动 HD0211 被嵌入后, 原调度计划相关活动和资源的变化.

由表 2 可知, 方案 3 的决策指标值最小, 因此该方案是活动 HD0211 顺利嵌入原调度计划的最佳方案. 若施工队甲在即将完成活动 AG01S04 时, 施工队乙要求活动 HD0211 在 7 天内完成, 则根据本文冲突消解方法的动态调度方案只有表 2 中的方案 1 和方案 2. 此时由动态调度决策指标可知, 活动 HD0211 的调度方案应选择方案 1. 因此, 本文动态调度决策方法可根据活动时序限制和时间要求等不同项目需求, 在尽量维持原调度计划的基础上, 自适应地调整产品开发活动的变化.

## 6 结 论

具有弹性资源约束的动态调度问题突破了传统动态调度问题对资源类型、确定性和可运算性的假设, 在求解时不仅要考虑资源的使用情况, 而且应考虑资源的弹性. 本文在分析弹性资源特性的基础上, 重点针对活动添加这种活动变化类型, 提出了时序冲突消解模型和基于资源推拉技术的资源冲突消解模型, 实现了多种约束条件下基本维持原调度计划的动态调度策略. 资源推拉技术的应用使得资源得到充分利用, 缩短了产品开发周期. 针对产品开发活动冲突的复杂性, 提出虚拟前置活动和虚拟后续活动的概念, 以便同时解决多个活动的冲突, 提高动态调度的效率,

并应用局部搜索技术构建虚拟活动. 根据虚拟活动与添加活动的冲突类型选择合适的冲突消解模型, 计算弹性资源在满负荷工作状态下的持续时间, 进而确定动态调度决策指标值. 在产品开发过程中, 根据动态调度决策指标值即可动态修改原调度计划, 保证新环境下的产品开发顺利进行. 最后, 通过应用实例验证了本文提出的动态调度决策方法能够合理响应产品开发过程的活动变化, 并为其提供自适应调整的参考方案.

## 参考文献(References)

- [1] 罗荣桂, 吴兵, 黄敏镁. 作业车间中人力资源柔性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(6): 121-123.  
(Luo R G, Wu B, Huang M M. Research on the flexibility of human resource in job shop[J]. J of Wuhan University of Technology, 2006, 28(6): 121-123.)
- [2] 黄敏镁. 具有柔性资源约束的优化调度问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学管理学院, 2007.  
(Huang M M. Research on flexible resource constrained optimal scheduling problems[D]. Wuhan: Management School, Wuhan University of Technology, 2007.)
- [3] Olafsson S, Shi L. A method for scheduling in Parallel manufacturing systems with Flexible resources[J]. IIE Transactions, 2000, 32(2): 135-146.
- [4] Daniels R L, Mazzola J B, Shi D. Flow shop scheduling with partial resource flexibility[J]. Management Science, 2004, 50(5): 658-669.
- [5] Ruiz-torres A J, Centeno G. Scheduling with flexible resources in parallel workcenters to minimize maximum completion time[J]. Computers & Operations Research, 2007, 34(1): 48-69.
- [6] 吴兵, 刘继印, 罗荣桂. 柔性资源受限的多模式项目调度问题的建模[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(11): 176-179.  
(Wu B, Liu J Y, Luo R G. Modeling of the flexible resource-constrained multi-mode project scheduling problem[J]. J of Wuhan University of Technology, 2008, 30(6): 176-179.)
- [7] 王国磊, 林琳, 钟诗胜. 基于模糊聚类的Q-学习在动态调度中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(4): 751-757.  
(Wang G L, Lin L, Zhong S S. Dynamic scheduling with fuzzy clustering based Q-learning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(4): 751-757.)
- [8] 钱晓龙, 唐立新, 刘文新. 动态调度的研究方法综述[J]. 控制与决策, 2001, 16(2): 141-145.  
(Qian X L, Tang L X, Liu W X. Dynamic scheduling: A survey of research methods[J]. Control and Decision, 2001, 16(2): 141-145.)