

# 工序间存在零等待约束的复杂产品调度研究

谢志强<sup>1</sup> 李志敏<sup>1</sup> 郝淑珍<sup>1</sup> 谭光宇<sup>2</sup>

**摘要** 针对实际装配生产中工序之间存在零等待约束的复杂产品的调度问题, 提出了一种把存在零等待约束的工序虚拟成一个工序的方法. 该方法在提出复杂产品、标准工序、虚拟工序、零等待和扩展加工工艺树的概念基础上, 对扩展加工工艺树中的标准工序采用拟关键路径法和最佳适应调度的车间调度算法进行调度, 对虚拟工序采用移动交换算法在相应设备上分离调度, 将存在零等待约束的调度问题转化为存在虚拟工序的无零等待约束的调度问题. 实例表明, 所提出的调度算法能够较好地解决具有实际意义的工序间存在零等待约束的复杂产品的调度问题, 且易于实现.

**关键词** 零等待约束, 标准工序, 虚拟工序, 移动交换算法, 复杂产品调度  
**中图分类号** TP278

## Study on Complex Product Scheduling Problem with No-wait Constraint between Operations

XIE Zhi-Qiang<sup>1</sup> LI Zhi-Min<sup>1</sup> HAO Shu-Zhen<sup>1</sup> TAN Guang-Yu<sup>2</sup>

**Abstract** For the complex product scheduling problem with no-wait constraint between operations in practical assembling manufacture, a method to change operations with no-wait constraint into a virtual operation is proposed. Based on the concepts of complex product, standard operation, virtual operation, no-wait and the expansion processing tree defined in this paper, the standard operations are processed by allied critical path method (ACPM) and best fit scheduling method (BFSM), and the virtual operations are processed respectively on corresponding machine with movement and exchange algorithm in order to translate scheduling problem with no-wait operations into the general scheduling problem with virtual operations. The result of the examples shows that the scheduling algorithm proposed is an effective solution to the complex product scheduling problem with no-wait constraint between operations and can be easily realized.

**Key words** No-wait constraint, standard operation, virtual operation, movement and exchange algorithm, complex product scheduling

车间作业调度问题是最困难的约束组合优化问题和典型的 NP-Hard 问题<sup>[1]</sup>, 其特点是没有一个有效的算法能在多项式时间内求出最优解<sup>[2]</sup>. 但由于其与许多实际生产密切相关, 已成为制约企业高效生产的瓶颈之一. 因此, 对它的深入研究具有重要的理论意义和工程使用价值. 经过几十年的研究, 调度问题在理论和方法上已经取得了很大的成果. 现在的学者已经把研究方向扩展到很多其他方面来处理实际生产中的问题, 如基于多代理的车间调度<sup>[3]</sup>、基

于人机协同的动态车间生产调试<sup>[4]</sup>、重调度<sup>[5]</sup>、工序间存在零等待约束的车间作业调度<sup>[6]</sup> 和无等待流水车间调度<sup>[7-8]</sup> 等. 对于在实际生产中, 当产品是由一组存在约束关系的工件按照树状工艺图装配而成, 而工件是由一串前后约束的工序组成, 即产品中同时存在加工和装配的复杂产品. 为了简化复杂产品调度分析, 将加工、装配设备定义为设备统一调度, 并统一定义加工、装配为加工.

由于复杂产品调度问题的复杂化, 已有的研究主要以缩短产品的加工时间为主, 并没有考虑到工序间存在零等待约束的实际情况<sup>[9]</sup>, 而当实际生产中出现了零等待的要求时, 忽略其所产生的调度方案不仅不符合实际, 甚至是不可行的. 对于工序间存在零等待约束的问题, 只有少数学者在进行研究, 而且都停留在非复杂产品的研究上<sup>[10-13]</sup>, 目前尚无复杂产品的零等待调度问题的研究成果. 针对这种情况, 本文结合文献 [14] 提出的拟关键路径法 (Allied critical path method, ACPM) 和最佳适应调度法 (Best fit scheduling method, BFSM) 的车间调度算法, 提出了把存在零等待约束的工序虚拟成一个工序的方法来解决这个问题.

收稿日期 2008-07-18 收修改稿日期 2009-01-07  
Received July 18, 2008; in revised form January 7, 2009  
国家自然科学基金 (50575062, 60873019), 黑龙江省自然科学基金项目 (F200608), 黑龙江省教育厅海外学人科研资助重点项目 (1152hq08) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (50575062, 60873019), Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (F200608), and the Key Project of Scientific Research Subsidy of Abroad Scholars of Heilongjiang Provincial Education Department of China (1152hq08)  
1. 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150080 2. 哈尔滨理工大学机械动力工程学院 哈尔滨 150080  
1. School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080 2. School of Mechanical Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00983

## 1 问题研究分析

通常情况下, 车间调度问题的数学描述为<sup>[9]</sup>: 设有  $K$  个产品, 每个产品的工序数为  $J_l, l = 1, 2, \dots, K$ , 总工序数  $N = \sum_{l=1}^k J_l$ . 在  $M$  个设备上加工, 要求一台设备在某一时刻只能加工一道工序; 一道工序在某一时刻只能被一台设备加工; 一台设备一旦加工某道工序, 则直到该工序加工完毕后, 这台设备才能加工其他工序; 每道工序都必须在其紧前工序加工完后, 方可开始加工; 当上一道工序完工后, 立即送下一道工序加工; 每道工序的加工时间已知, 且与加工顺序无关; 允许工序之间等待, 允许设备在工序达到之前闲置.

由于产品工序的开始加工时间必须等其紧前工序加工完毕, 产品全部加工完毕的时间为各设备完工的最大时间值, 所以求产品全部加工完毕的最短时间值的数学描述为

$$T = \min\{\max\{t_{ij1} + t_{ij2}\}\}$$

$$\text{s. t. } \min(t_{ij1}), t_{i(j+1)1} \geq t_{ij1} + t_{ij2}$$

$$i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N$$

$t_{xy1} \geq \max(t_{ij1} + t_{ij2})$ , 当工序  $ij$  是工序  $xy$  的紧前工序. 其中,  $t_{ij1}$  为设备  $i$  的第  $j$  个工序的开始加工时间,  $t_{ij2}$  为设备  $i$  的第  $j$  个工序的连续加工时间.

由上述的车间调度问题的描述可以看到, 通常在研究车间调度问题的时候, 只考虑了工艺约束<sup>[15]</sup>, 工艺约束是指一个零件内部所定义的工艺路线顺序约束<sup>[16]</sup>. 事实上, 在许多实际加工生产中, 还存在着其他的约束, 如顺序约束外的延时约束<sup>[17]</sup>, 即工件的某一工序加工完成后, 其下一道工序需要延期一定的时间后才能开始加工. 实际生产中最常见的例子有, 铸造工厂中的生钢冷轧处理, 当某一铸造工序完成后, 需要进行一段时间的时效处理, 其下一道工序才能开始加工. 而本文所考虑是在实际生产中与延时约束相反的另一情况, 顺序约束外的工序间存在零等待约束, 即工件的某一工序加工完成后, 其下一道工序需要与上一个工序之间零等待, 工序之间不能存在时间空隙. 例如用模具加工铁制品, 必须趁钢水炽热时浇铸<sup>[18]</sup>; 化学工业生产中的混合配料, 当某一配料加工完成之后, 必须马上进入下一道工序, 工序之间不能存在时间空隙, 以防化学配料的变质, 对生产产生不利影响<sup>[19]</sup>.

由于工序间存在零等待约束的调度问题不仅考虑工序间的前后顺序约束关系, 还要考虑工序间前后无空闲时间的约束关系, 增加了工序间的限制. 如果简单地用一般调度方法处理, 再考虑工序间存在

零等待约束, 由于工序间的连动, 使得调度工作非常复杂, 特别是工序之间存在零等待约束的复杂产品的调度问题. 为了简化工序间存在零等待约束的复杂产品的调度问题, 通过对工序间存在零等待约束的复杂产品生产工艺约束分析, 定义如下:

**定义 1 (复杂产品).** 在实际生产中, 产品是由一组存在约束关系的工件按照树状工艺图装配而成, 而工件是由一串前后约束的工序组成. 这样的产品定义为复杂产品.

**定义 2 (标准工序).** 实际紧前紧后无零等待要求的工序.

**定义 3 (虚拟工序).** 在考虑工序之间存在零等待问题的基础上, 把工序间存在零等待的一串工序虚拟成一道工序, 虽然存在零等待的工序被虚拟成一道工序, 但是这些工序还是在原设备上加工, 只不过工序之间零等待, 不允许有时间间隔.

**定义 4 (零等待调度).** 工序之间不能存在时间空隙, 即前一工序加工完成下一工序必须立刻开始加工, 相应的工序调度称为零等待调度.

**定义 5 (扩展加工工艺树).** 在复杂产品的加工流程中, 根据标准工序和虚拟工序之间的加工工艺约束形成的树状描述, 称之为扩展加工工艺树. 其中, 扩展加工工艺树上的每一个节点表示一个独立的工序, 每个工序由工序名、所需设备名和加工时间三元素组成. 如  $A1/3/4$ , 表示工序  $A1$  在设备  $3$  上加工, 加工时间为  $4$  个工时. 特别地, 每个虚拟工序由存在零等待约束的一串工序虚拟而成, 并用虚线矩形在扩展加工工艺树中标出. 扩展加工工艺树中的边代表工序间加工顺序的工艺约束.

**定义 6 (移动交换算法).** 对存在零等待约束工序的虚拟工序, 当其紧前工序和紧后工序插入后, 没有满足零等待约束条件时, 采取移动或交换位置的方法使其满足零等待约束条件和工序尽早加工条件, 这种方法称为移动交换算法. 相应的工序调度称为紧凑调度.

在产品加工工艺树中将存在零等待约束的工序虚拟成一个工序, 使产品加工工艺树变为扩展加工工艺树. 将存在零等待约束的调度问题转化为存在虚拟工序的无零等待约束的调度问题, 实现对问题的简化. 对扩展加工工艺树中的标准工序采用拟关键路径法和最佳适应调度的车间调度算法进行调度<sup>[14]</sup>, 对虚拟工序采用能够有效地利用调度中工序间的空闲时间段的移动交换算法在相应设备上分离调度, 实现标准工序全局近优调度, 虚拟工序零等待调度. 由于移动交换算法的紧凑调度在标准工序全局近优调度的基础上调整部分相关工序, 以工序尽早加工为目标, 可以实现调整步骤简单且总加工时间延迟少.

## 2 算法设计

如何解决实际生产中工序间存在零等待约束的复杂产品的调度问题. 本文把存在零等待的一串工序虚拟成一个工序, 于是在虚拟工序和标准工序之间无零等待要求. 此时, 对虚拟工序和标准工序的调度可用拟关键路径法 (ACPM) 和最佳适应调度法 (BFSP) 的车间调度算法; 对虚拟工序中的加工工序采取移动交换算法在相应设备分离调度. 下面是移动交换算法的描述.

**步骤 1.** 如果虚拟工序中第一个工序  $p$  的加工设备  $k$  上已排工序  $n$  和  $n+1$  之间有足够空隙, 可安排工序  $p$  插入, 即  $(t_{k(n+1)1} - (t_{kn1} + t_{kn2})) \geq t_{kp2}$ , 则将工序  $p$  插入合适的空闲段, 转步骤 2; 如果工序  $p$  的加工设备  $k$  上的空隙无法安排新增工序  $p$ , 转步骤 7.

**步骤 2.** 如果虚拟工序中第一个工序  $p$  的紧后工序  $q$  的加工设备  $j$  上已排工序  $n$  和  $n+1$  之间有足够空隙, 可安排工序  $q$ , 即  $(t_{j(n+1)1} - (t_{jn1} + t_{jn2})) \geq t_{jq2}$ , 则设备  $k$  上第  $n+1$  个及以后的已排工序后移  $t_{js1} \rightarrow t_{j(s+1)1}$ , 将工序  $q$  插入合适的空闲段, 转步骤 3; 如果工序  $q$  的加工设备  $j$  上无法安排新增工序  $q$ , 转步骤 6.

**步骤 3.** 如果工序  $p$  的结束时间  $t_{kp1} + t_{kp2}$  等于工序  $q$  的开始时间  $t_{jq1}$ , 转步骤 8; 否则转步骤 4.

**步骤 4.** 如果工序  $p$  的结束时间  $t_{kp1} + t_{kp2}$  早于工序  $q$  的开始时间  $t_{jq1}$ , 且设备  $k$  上工序  $p$  的下一个工序  $p^1$  的开始时间  $t_{kp^1}$  晚于或等于工序  $q$  的开始时间  $t_{jq1}$ , 则将工序  $P$  向后移动 (如果移动过程中涉及到已经移动调整成功的虚拟工序, 那么将虚拟工序也一起向后移动), 移动时间  $T$  为工序  $q$  开始时间  $t_{jq1}$  减去工序  $P$  结束时间  $t_{kp1} + t_{kp2}$ , 即  $T = t_{jq1} - (t_{kp1} + t_{kp2})$ , 转步骤 8; 否则转步骤 5.

**步骤 5.** 如果工序  $p$  的结束时间  $t_{kp1} + t_{kp2}$  早于工序  $q$  的开始时间  $t_{jq1}$ , 则: 1) 设备  $k$  上工序  $P$  的下一个工序  $p^1$  的开始时间  $t_{kp^1}$  早于工序  $q$  的开始时间  $t_{jq1}$ ; 2) 如果受工序  $p^1$  影响的已排序工序为  $t_{xy1}$ , 即  $t_{kp^1} < t_{xy1}$ ; 3) 将工序  $p, p^1$  和 2) 中的已排工序向后移动, 移动时间  $T$  为工序  $q$  开始时间  $t_{jq1}$  减去工序  $P$  结束时间  $t_{kp1} + t_{kp2}$ , 即  $T = t_{jq1} - (t_{kp1} + t_{kp2})$ , 转步骤 8; 如果在移动过程中出现以下的三种情况, 则采取移动交换方法进行解决:

情况 1): 工序  $A$  和工序  $B$  已经零等待调整完毕, 工序  $D$  和工序  $E$  之间存在零等待约束, 因为有工序  $C$  的存在, 无论怎样向后移动调整工序  $D$  和工序  $B$  的位置, 都不能满足工序  $A$ 、工序  $B$ 、工序  $D$  和工序  $E$  同时零等待, 所以, 交换工序  $D$  和工序  $B$  的加工次序, 将工序  $D$  排在工序  $B$  后, 调整, 满足工序  $D$  和工序  $E$  之间零等待要求. 如图 1 所示.

情况 2): 工序  $A$  和工序  $B$  已经零等待调整完毕, 工序  $C$  和工序  $D$  也要求零等待, 无论怎样向后调整工序  $A$  的位置, 都不能满足工序  $A$ 、工序  $B$ 、工序  $C$  和工序  $D$  同时零等待的要求, 所以交换工序  $C$  和工序  $A$  位置, 调整, 满足工序  $C$  和工序  $D$  的零等待要求. 如图 2 所示.

情况 3): 工序  $C$  的紧前工序  $A$  和工序  $B$  在同一台机器上加工, 要求工序  $A$  和工序  $C$  零等待, 无论怎样向后移动工序  $A$  的位置, 都不会满足零等待要求, 交换工序  $A$  和工序  $B$  的位置, 满足工序  $A$  和工序  $C$  零等待要求. 如图 3 所示.

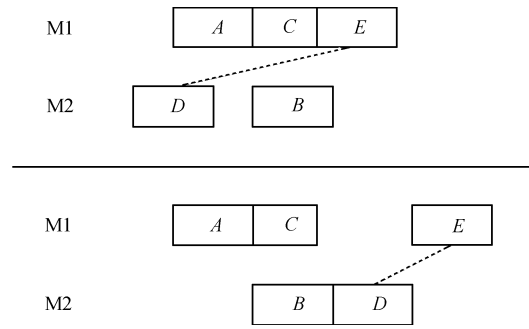


图 1 工序  $A$  和工序  $B$ , 工序  $D$  和工序  $E$  存在零等待约束  
Fig. 1 No-wait constraint between operations  $A$  and  $B$ ,  $D$  and  $E$

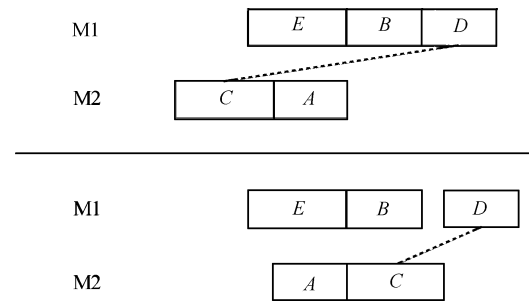


图 2 工序  $A$  和工序  $B$ , 工序  $C$  和工序  $D$  存在零等待约束  
Fig. 2 No-wait constraint between operations  $A$  and  $B$ ,  $C$  and  $D$

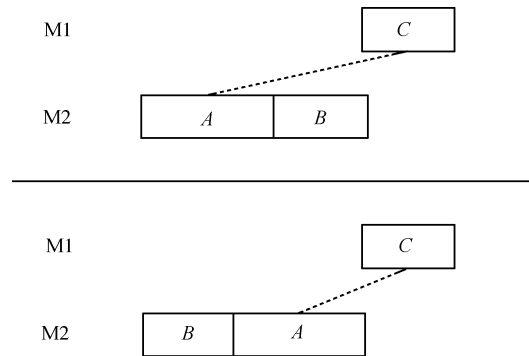


图 3 工序  $A$  和工序  $C$  存在零等待约束  
Fig. 3 No-wait constraint between operations  $A$  and  $C$

**步骤 6.** 1) 如果工序  $q$  的加工设备  $j$  上已排工序  $n$  和  $n + 1$  之间有空隙, 但不能安排新增紧后工序  $q$ , 即  $0 < (t_{j(n+1)1} - (t_{jn1} + t_{jn2})) < t_{jq2}$ ; 2) 如果受  $t_{j(n+1)1}$  影响的已排序工序为  $t_{xy1}$ , 即  $t_{j(n+1)1} < t_{xy1}$ ; 3) 向后移动  $t_{j(n+1)1}$  和 2) 中的已排工序, 移动时间为  $t_{jq2} - (t_{j(n+1)1} - (t_{jn1} + t_{jn2}))$ ; 4) 在设备  $j$  上已排工序  $n$  和  $n + 1$  之间安排新增工序  $q$ , 则设备  $j$  上第  $n + 1$  个及以后的已排工序后移  $t_{js1} \rightarrow t_{j(s+1)1}$ , 将  $q$  插入合适的空闲段, 转步骤 3.

**步骤 7.** 如果工序  $p$  的加工设备  $k$  上的空隙无法安排新增工序  $p$ , 则将工序  $p$  排在设备  $k$  已排工序的最后, 转步骤 2.

**步骤 8.** 如果工序  $q$  的紧前工序  $p, p_1, \dots, p_m, p_n, \dots, p_k$  中, 工序  $p_1, \dots, p_m, p_n, \dots, p_k$  的加工结束时间都早于工序  $p$  的加工结束时间, 转步骤 11; 否则转步骤 9.

**步骤 9.** 如果工序  $q$  的紧前工序  $p, p_1, \dots, p_m, p_n, \dots, p_k$  中, 工序  $p_1, \dots, p_m$  的加工结束时间早于工序  $p$  的加工结束时间, 工序  $p_n, \dots, p_k$  的加工结束时间晚于工序  $p$  的加工结束时间, 则将工序  $p$  向后移动, 移动时间  $T$  为工序  $p_n, \dots, p_k$  中加工结束时间最晚工序的加工结束时间减去工序  $p$  的加工结束时间, 同时, 移动调整完成的虚拟工序也相应一起向后移动相同的时间, 转步骤 11; 否则转步骤 10.

**步骤 10.** 如果工序  $q$  的紧前工序  $p, p_1, \dots, p_m, p_n, \dots, p_k$  中, 工序  $p_1, \dots, p_m, p_n, \dots, p_k$  的加工结束时间都晚于工序  $p$  的加工结束时间, 则将  $p$  向后移动, 移动时间  $T$  为工序  $p, p_1, \dots, p_m, p_n, \dots, p_k$  加工结束时间最晚的加工结束时间减去工序  $p$  的加工结束时间, 同时, 移动交换完成的虚拟工序也相应一起向后移动相同的时间, 转步骤 11.

**步骤 11.** 如果工序  $q$  存在紧后工序  $d$ , 则将移动调整后的已排工序  $p, q$  看成一个工序 ( $p, q$  看成一个同步骤 2 中的工序  $p$ ), 作为工序  $d$  (同步骤 2 中的  $q$ ) 的紧前工序, 转步骤 2, 否则结束.

移动交换算法的简略流程图如图 4 所示.

下面对移动交换算法进行复杂度分析:

设产品工序数是  $n$ , 设备数是  $m$ . 零等待工序数一般为  $n/2$ , 其中紧前工序数和紧后工序数一般为  $n/4$ .

1) 紧前工序在各相关设备上调度排序.

将总数为  $n/4$  的紧前工序分配到  $m$  台设备上, 平均每台设备上分配到的工序数为  $n/(4m)$ , 所以各设备上紧前工序按开始时间的约束及设备空闲时间段的大小插入相应位置的排序需要最多比较的次数为  $(n/(4m)) \times (n/m)$ . 全部紧前工序加工调度排序需要比较的总次数为  $n^2/(4m)$ .

2) 紧后工序在各相关设备上调度排序与紧前工

序调度排序相同, 需要比较的总次数为  $n^2/(4m)$ .

3) 虚拟工序进行移动交换时, 每个虚拟工序最多移动相关设备全部工序, 按每个虚拟工序含有 2 个工序, 虚拟工序数一般为  $n/4$ , 所以, 全部虚拟工序移动交换需要最多移动工序数为  $(n/4) \times 2 \times (n/m) = n^2/(2m)$ .

综上所述, 移动调整算法的计算次数为  $n^2/m$ , 因为  $1 \leq m \ll n$ , 所以, 该算法的复杂度为  $O(n^2)$ .

由于拟关键路径法和最佳适应调度的车间调度算法的复杂度为  $O(n^2)$ <sup>[14]</sup>, 所以本文工序间存在零等待约束的复杂产品调度算法的复杂度为  $O(n^2)$ .

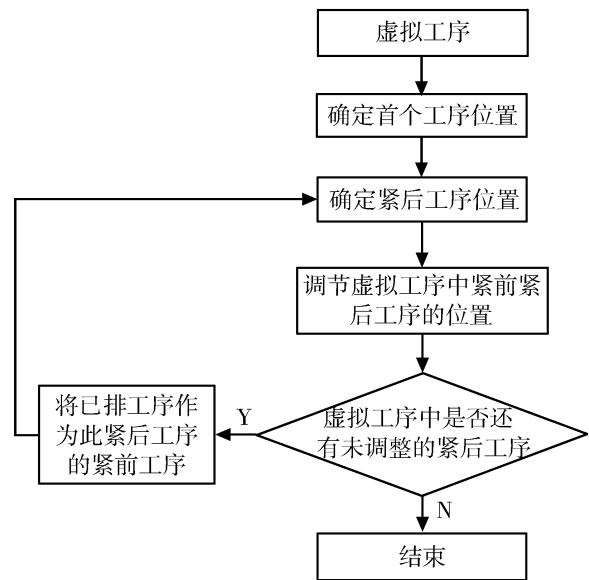


图 4 移动交换算法简略流程图

Fig. 4 Flow chart of movement and exchange algorithm

### 3 实例分析

设有产品 A 和产品 B, 产品 A 的加工工艺树如图 5 所示, 产品 B 的加工工艺树如图 6 所示. 其中, 在产品 A 的加工中, 由于加工需要, 工序 A2 和工序 A6, 工序 A5 和工序 A7 之间存在零等待约束, 在产

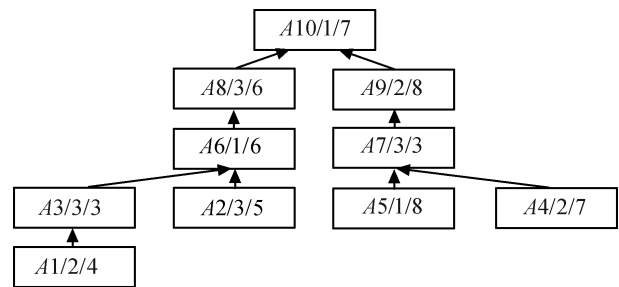


图 5 产品 A 的加工工艺树

Fig. 5 Processing tree of product A

品 *B* 的加工中, 由于加工需要, 工序 *B1* 和工序 *B3*, 工序 *B4* 和工序 *B5* 之间存在零等待约束, 产品 *A*, *B* 属于加工工序间存在零等待约束的复杂产品调度问题.

通过本文提出的把存在零等待约束的工序虚拟成一个工序的方法, 将产品 *A* 和产品 *B* 的加工工艺树转换为只具有顺序约束的扩展加工工艺树, 产品 *A* 的扩展加工工艺树如图 7 所示, 产品 *B* 的扩展加工工艺树如图 8 所示.

对产品 *A* 和产品 *B* 按照图 5 和图 6 所示, 运用

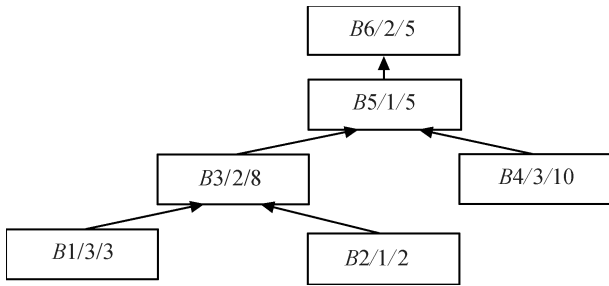


图 6 产品 *B* 的加工工艺树  
Fig. 6 Processing tree of product *B*

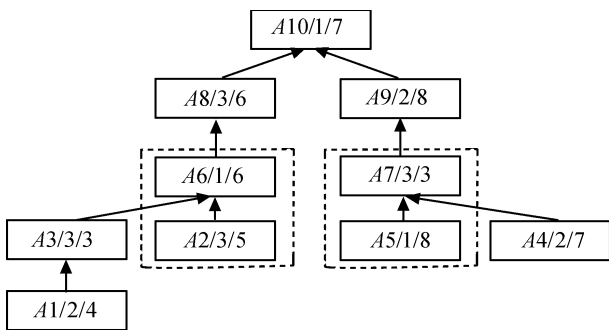


图 7 产品 *A* 的扩展加工工艺树  
Fig. 7 Expansion processing tree of product *A*

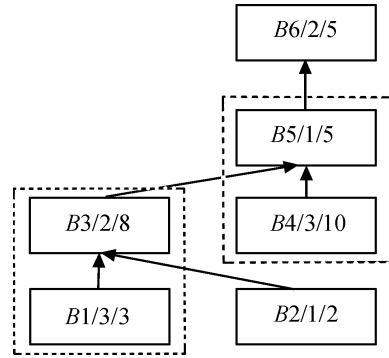


图 8 产品 *B* 的扩展加工工艺树  
Fig. 8 Expansion processing tree of product *B*

基于 ACPM 和 BFSM 的车间调度算法<sup>[14]</sup> (基于拟关键路径法 (ACPM) 和最佳适应调度法 (BFSM) 的车间调度算法是一种较新的车间调度问题的近优解决方案. 其通过对加工工艺树的分解, 将工序分为唯一紧前、紧后工序和独立工序, 对这两类工序分批采用拟关键路径法和最佳适应调度法进行调度, 同时考虑使关键设备上的工序尽量紧凑, 取得了较好的调度效果) 进行调度, 加工甘特图如图 9 所示, 加工总时间为 44 个工时. 对产品 *A* 和产品 *B* 按照图 7 和图 8 所示, 遇到标准工序采用基于 ACPM 和 BFSM 的车间调度算法进行调度, 遇到虚拟工序采取移动交换算法在相应设备分离调度, 加工甘特图如图 10 (见下页) 所示, 加工总时间为 46 个工时.

由于图 9 得到的调度结果不满足工序零等待约束条件, 说明文献 [14] 方法忽略工序零等待约束条件不符合该实际问题. 图 10 是本文提出算法的调度结果, 由于该算法把存在零等待的工序虚拟成一个工序, 虽然在加工时间上和原算法比较并没有缩短, 但是通过虚拟零等待工序, 建立扩展加工树, 能够将工序间存在零等待约束的调度问题, 转化为一般调度

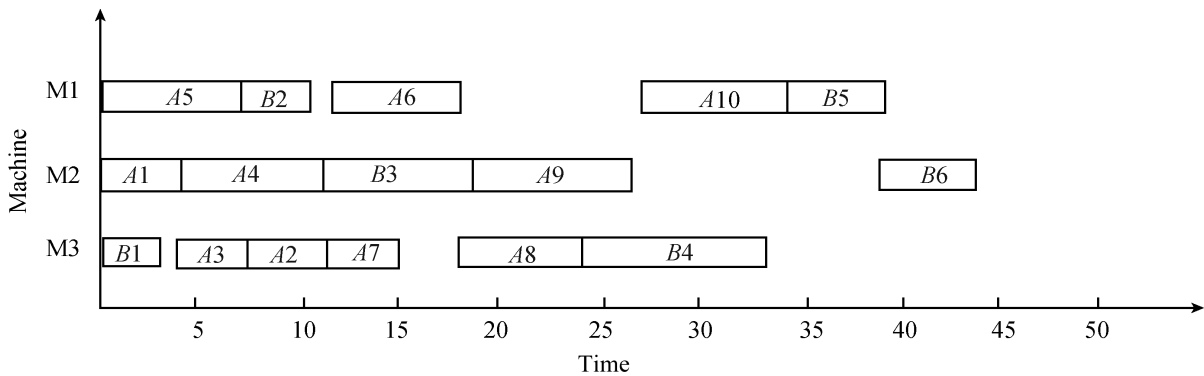


图 9 产品 *A* 和 *B* 的加工调度甘特图  
Fig. 9 Gantt chart of products *A* and *B*

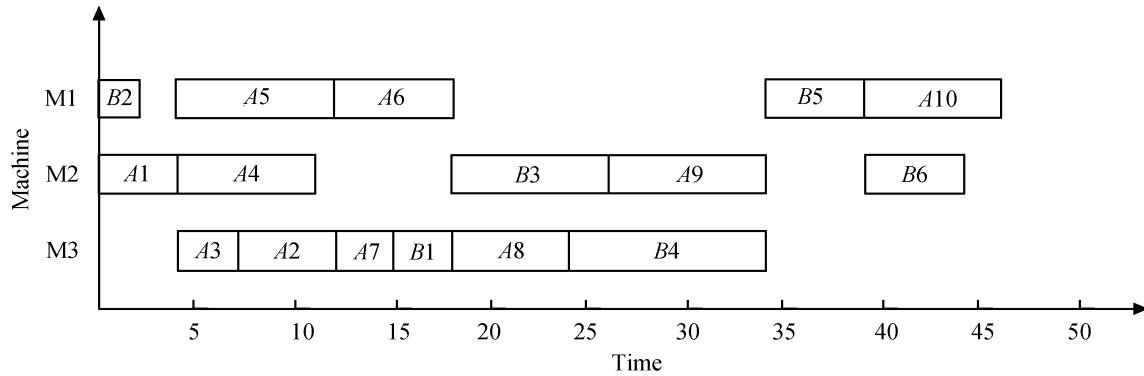


图 10 零等待约束下产品 A 和 B 的加工调度甘特图

Fig. 10 Gantt chart of products A and B with no-wait constraint

问题, 实现的调度结果满足工序零等待约束条件, 可以解决实际生产中遇到的零等待情况. 实例表明, 本文提出的调度方案不仅符合实际, 而且有效可行.

#### 4 结论

1) 针对复杂产品工序间存在零等待约束调度问题的特点, 提出在加工过程中引入虚拟工序的方法, 将工序间存在零等待约束转换为顺序约束.

2) 对虚拟工序采用移动交换算法在相应设备上分别调度, 对标准工序采用 ACPM 和 BFSM 算法进行调度, 并通过实例验证了该算法的有效性和优越性.

3) 提出的调度算法不仅能够较好地解决工序间存在零等待约束的复杂多产品调度问题, 而且可以作为研究工序间存在零等待约束的动态复杂产品调度问题的基础.

#### References

- Garey M R, Johnson D S. *Computer and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. San Francisco: Freeman, 1979
- Zeng Li-Ping, Huang Wen-Qi. A local search method with hybrid neighborhood for the job shop scheduling problem. *Computer Science*, 2005, **32**(5): 177-181  
(曾立平, 黄文奇. 一种求解车间作业调度问题的混合邻域结构搜索算法. 计算机科学, 2005, **32**(5): 177-181)
- Jin Zhi-Yong, Zhou Zu-De, Hu Ye-Fa. Study on job-shop scheduling system based on multi-agent system. *Mechanical Engineering and Automation*, 2006, **139**(6): 34-36  
(金志勇, 周祖德, 胡业发. 基于多代理的画间调度系统研究. 机械工程与自动化, 2006, **139**(6): 34-36)
- Wu Zhi-Jun, Ning Ru-Xin, Wan Chun-Hui, Wang Guo-Xin. Research and realization of dynamic job shop scheduling problem based on human-computer collaborative. *Computer Systems and Applications*, 2006, **15**(4): 21-24  
(武志军, 宁汝新, 万春辉, 王国新. 基于人机协同的动态车间生产调度问题的研究和实现. 计算机系统应用, 2006, **15**(4): 21-24)
- Liu Lin, Gu Han-Yu, Xi Yu-Geng. Rescheduling algorithm based on rolling horizon decomposition for a dynamic job shop with uncertain arriving time. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, **44**(5): 68-75  
(刘琳, 谷寒雨, 席裕庚. 工件到达时间未知的动态车间滚动重调度. 机械工程学报, 2008, **44**(5): 68-75)
- Mascis A, Pacciarelli D. Job-shop scheduling with blocking and no-wait constraints. *European Journal of Operational Research*, 2002, **143**(3): 498-517
- Liu B, Wang L, Jin Y H. An effective hybrid particle swarm optimization for no-wait flow shop scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, **31**(9-10): 1001-1011
- Pan Q K, Wang L, Zhao B H. An improved iterated greedy algorithm for the no-wait flow shop scheduling problem with makespan criterion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, **38**(7-8): 778-786
- Qiao Pei-Li, Xie Zhi-Qiang. Classified and grouped job-shop scheduling algorithm based on key equipment's compact procedures. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(8): 17-21  
(乔佩利, 谢志强. 基于关键设备工序紧凑的工序分类、分批的 Job-Shop 调度算法. 机械工程学报, 2004, **40**(8): 17-21)
- Gerhard G J, Woeginger J. Inapproximability results for no-wait job shop scheduling. *Operations Research Letters*, 2004, **32**(4): 320-325
- Schuster C J. No-wait job shop scheduling: tabu search and complexity of subproblems. *Mathematical Methods of Operations Research*, 2006, **63**(3): 473-491
- Schuster C J. No-Wait Job Shop Scheduling: Komplexitat and Local Search [Ph.D. dissertation], University of Duisburg-Essen, Germany, 2003
- Framinan J M, Schuster C J. An enhanced timetabling procedure for the no-wait job shop problem: a complete local search approach. *Computers and Operations Research*, 2006, **33**(5): 1200-1213
- Xie Zhi-Qiang, Liu Sheng-Hui, Qiao Pei-Li. Dynamic job-shop scheduling algorithm based on ACPM and BFSM. *Journal of Computer Research and Development*, 2003, **40**(7): 977-983

(谢志强, 刘胜辉, 乔佩利. 基于 ACPM 和 BFSM 的动态 Job-Shop 调度算法. 计算机研究与发展, 2003, 40(7): 977-983)

- 15 Holthaus O. Scheduling in job shops with machine breakdowns: an experimental study. *Computers and Industrial Engineering*, 1999, 36(1): 137-162
- 16 Xiong He-Gen, Li Jian-Jun, Kong Jian-Yi, Yang Jin-Tang, Jiang Guo-Zhang. Heuristic method for dynamic job shop scheduling problem with operation relativity. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(8): 50-55  
(熊禾根, 李建军, 孔建益, 杨金堂, 蒋国璋. 考虑工序相关性的动态 Job-Shop 调度问题启发式算法. 机械工程学报, 2006, 42(8): 50-55)
- 17 Xie Zhi-Qiang, Mo Tao, Tan Guang-Yu. Dynamic job-shop scheduling algorithm of the non-close-joining operations. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(1): 155-160  
(谢志强, 莫涛, 谭光宇. 非紧密衔接工序动态车间调度算法. 机械工程学报, 2008, 44(1): 155-160)
- 18 Wismer D A. Solution of the flow shop scheduling-problem with no intermediate queues. *Operation Research*, 1972, 20(3): 689-697
- 19 Rajendran C. A no-wait flow shop scheduling heuristic to minimize makespan. *The Journal of the Operation Research Society*, 1994, 45(4): 472-478



谢志强 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院博士研究生, 教授. 主要研究方向为生产计划调度, 先进制造系统和计算机集成制造系统. 本文通信作者.

E-mail: xzq011@tom.com

(XIE Zhi-Qiang Professor, Ph. D. candidate at the School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology. His research interest covers production planning and scheduling, advanced manufacturing system, and computer integrated manufacturing system. Corresponding author of this paper.)



李志敏 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 2005 年获长春工业大学计算机科学与技术学院学士学位. 主要研究方向为生产计划调度和先进制造系统.

E-mail: lizhimin\_1102@126.com

(LI Zhi-Min Master student at the School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology. She received her bachelor degree from Changchun University of Technology in 2005. Her research interest covers production planning and scheduling, and advanced manufacturing system.)



郝淑珍 哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 2005 年获聊城大学计算机科学与技术学院学士学位. 主要研究方向为生产计划调度和先进制造系统. E-mail: hszhao1983@163.com

(HAO Shu-Zhen Master student at the School of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology. She received her bachelor degree from Liaocheng University in 2005. Her research interest covers production planning and scheduling, and advanced manufacturing system.)



谭光宇 哈尔滨理工大学教授. 主要研究方向为数字化设计与先进制造技术.

E-mail: guangyutan@sohu.com

(TAN Guang-Yu Professor, Ph. D. at Harbin University of Science and Technology. His research interest covers digitized designing and manufacturing technology.)