

文章编号:1000-582X(2010)01-0047-07

基于 TOC 和 CPM 的定制型制造车间生产控制模式

刘颖¹, 王光禹¹, 尹华川², 彭丽娟¹, 韩乐¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

(2. 重庆市经济和信息化委员会, 重庆 400020)

摘要:针对定制型制造车间生产过程中经常发生的生产订单延迟问题,在保证均衡物料流动的前提下,首先通过对生产车间控制方法的分析,结合约束理论(Theory of Constraint, TOC)和关键路线分析法(Critical Path Method, CPM),提出以定制设计模块、生产管理模块、优化控制模块为基础的定制型生产控制模型。其次通过对以车间生产加工成本最小化为目标函数的建模分析,构建基于 TOC 和 CPM 的定制型制造车间生产控制方法,保证车间限制资源的合理有效利用,实现了车间产能最大化。最后,结合具体实例说明该生产控制模式的有效性和实用性。

关键词:定制化生产;约束理论;关键路线分析法;生产物流

中图分类号:TH1186

文献标志码:A

Control mode in customized manufactory based on TOC and CPM

LIU Ying¹, WANG Guang-yu¹, YIN Hua-chuan², PENG Li-juan¹, HAN Le¹

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

(2. Chongqing Economic and Information Technology Commission, Chongqing 400020, P. R. China)

Abstract: Focusing on the order delay problem in the process of production, a control model based on the Theory of Constraints (TOC) and Critical Path Method (CPM) are proposed with the analysis of control method, in which it is composed of custom design module, manufacturing management module and optimizing control module. And with the processing costs minimization as objective function, a control mode for production is put forward for minimization of resource consumption and maximization of production. With the case study, it is found that the proposed control mode was effective and applicable.

Key words: customization; constrained theory; critical path analysis; logistics

定制型生产车间作业控制不但受到加工设备、员工、运输工具和工装夹具等生产资源的限制,而且还受到各种生产订单、瓶颈工序等的制约。定制型生产车间作业控制是提高生产效益和快速响应订单生产的基础和关键,对实现先进制造具有重要的理论意义和实际价值^[1],历来是中外学者广泛的研究

课题。比如,为了稳定定制型制造车间的生产过程,采用计划下达点和定制点作为过程分离点和关键控制点来对整个生产过程进行分段控制^[1];为了满足定制型制造车间的柔性要求,提出生产控制规则、集成的控制框架^[3-4];为了降低车间生产加工的成本,建立制造成本最优函数,并用启发式算法、遗传算法

收稿日期:2009-09-30

基金项目:重庆市科技攻关计划项目(CSTC,2009AB2049);重庆市科技攻关重大项目(CSTC,2006AA2023-09);国家科技支撑计划子课题(2006BAF01A27-2-9)

作者简介:刘颖(1973-),女,重庆大学机械工程学院讲师,主要研究方向为供应链管理、网络化制造、电子商务方向的研究,(E-mail)lyjfb@sina.com.cn。

等进行求解^[5-6]。

目前关于定制型制造车间生产控制的解决方法大致可以分为基于专家系统的人工智能(AI)方法和基于仿真实验的方法。基于人工智能的方法能够根据系统的当前状态和给定优化目标,对知识库进行搜索,选择最优的生产控制策略。但这种方法对新环境的适应性差,开发周期长、成本高^[7-8]。而仿真模型能较理想地描述定制型的制造系统,但由于仿真本身具有实验的特点,很难从特定的实验中提炼出一般规律^[10-11,13]。以上可以看出,虽然各种研究已经历了很长的发展阶段,但由于实际生产活动中变动因素多、随机性大,使得解决定制型车间作业控制这一问题的方法都不尽理想。

基于以上研究,以工序的工艺流程为切入点,针对当子工序完成后,父工序才能依照工艺流程进行生产加工的定制型制造车间实际作业情况,提出结合约束理论(TOC)和关键路线法(CPM)的定制型制造车间生产控制模式,并通过实例验证本方法的有效性和实用性。

1 关键路线法和约束理论基础

关键路线法^[16](Critical Path Method, CPM)适用于工序间具有严格紧前约束的进度计划中,该方法依赖于工艺流程图和活动持续时间估计,通过正推法计算活动的最早时间,通过逆推法计算活动的最迟时间,在此基础上确定关键路线,并对关键路线进行调整和优化,从而使工期最短,使进度计划最优。

约束理论(Theory of Constraint, TOC)是以色列物理学家、企业管理专家戈德拉特博士(Dr. Eliyahu M. Goldratt)提出来的^[18],它是关于进行改进和如何最好地实施改进的一套管理理念和管理原则,可以帮助企业识别出在实现目标的过程中存在着哪些制约因素,并进一步指出如何实施必要的改进来消除这些约束。TOC的核心就是,用鼓-缓冲器-绳子(drum-buffer-rope, DBR)系统来控制整个生产过程,以实现系统与瓶颈的同步化生产,如图1所示。

把关键路线法和约束理论结合起来,可以有效的识别和控制生产流程中的瓶颈工序,其具体表现如下:由关键路线法找出关键路线,并根据关键路线上的瓶颈资源和能力约束资源来确定企业的最大物流量,作为约束全局的“鼓”,由“鼓点”确定的生产节拍作为生产的“绳子”,各道工序和其它需要控制的工作如同用一根传递信息的“绳子”牵住

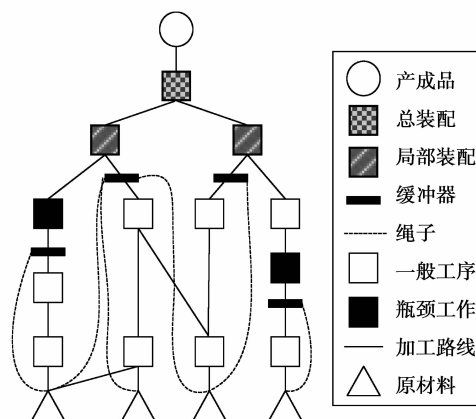


图1 DBR系统示意图

同一节拍,控制在制品流量,以保持均衡的物料流动条件下进行生产。

2 基于TOC和CPA的定制型制造车间生产控制模型

传统的车间作业管理系统在保证库存量最小的前提下力图使生产效率最高,但在计划排产时缺乏对订单的管理和控制,对于生产过程中普遍存在的瓶颈工序与非瓶颈工序并不加以区别,故在车间作业管理模块中不能抓住制约生产的关键因素——瓶颈工序,往往依赖现场管理人员根据经验对计划的执行情况进行控制。这必然一方面会使在制品在瓶颈工序前的库存过多,另一方面导致定制型生产计划的完成难以得到保证。基于此提出了基于关键路线法和约束理论的生产控制模型。该生产控制模型,是以控制和平衡生产线的物流为核心,以与主生产计划(MPS)系统及其他功能模块的集成为实现方式,以优化车间的资源配置、改善瓶颈环节为目标,在联通管理层和车间作业层情况下,提高定制型车间的生产效率。生产控制模型如图2所示。

提出的生产控制模型图分为定制设计模块、生产管理模块和优化控制模块。定制设计模块不但包括了基础信息的采集、传递、监控、交互,而且包含了产品的定制化设计。定制型企业在接到产品订单后,会依据市场对产品的需求进行设计。在这个设计过程中,就要分析产品本身的制造约束。首先要确定已有的库存资源和原材料信息,做到对所需要资源的初步估算。其次对已设计的产品进行评价,确定其可制造性,对于不能满足制造约束要求的产品,要进行优化设计方案,并将此优化方案反馈到设计部门。最后,设计部门根据定制型产品制造所提出的修改意见,对产品进行再设计,然后把结果传递

给策划产品制造部门进行再评价。就这样反复进行设计和评价,最终得到既满足加工制造要求,又满足订单需求的产品。

生产管理模块是以生产周期尽可能短、生产成本尽可能低、加工质量尽可能好为生产目标,以主生产计划 MPS 为核心,以生产过程管理为主线,集成了物料管理、库存管理、生产成本管理、生产进度管理等管理方式。结合主生产计划得到计划加工的产

品/零部件的物料需求,再根据工艺规程进行工序分解,由工时定额计算得到各物料加工工时的累加和。

优化控制模块的运作逻辑为:1)充分利用产能;2)辨识瓶颈工序;3)保持物流的连续性;4)各种资源服从优化决策安排。优化处理模块以瓶颈资源进行排产,重点控制车间瓶颈资源,进行作业排产,生成车间各工序的作业计划,下达工单,进行车间作业。

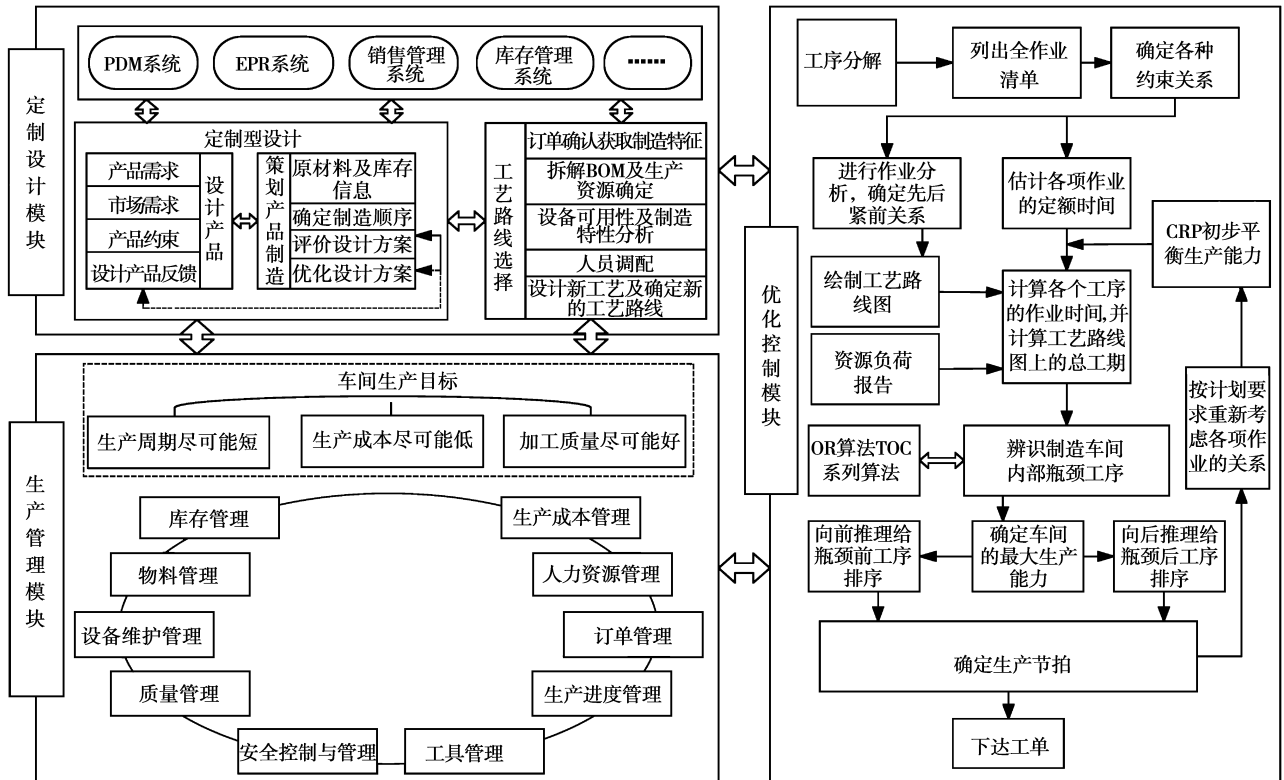


图 2 生产控制模型图

3 定制型生产车间模型建立及基于 TOC 和 CPM 的生产控制方法

3.1 定制型生产车间模型建立

定制型生产车间由 I 台生产设备 i ($i \in \{0, 1, 2, \dots, I\}$, 0 表示虚工序) 组成,生产的输入是 N 个待加工的产品 n , $n \in \{1, 2, \dots, N\}$, 它们分别属于 R 种不同的类型,类型 $r \in \{1, 2, \dots, R\}$, 记 r 类型待加工产品的集合为 G_r , 其个数为 g_r , 则有 $g_1 + g_2 + \dots + g_R = N$ 。生产加工满足 FCFS 法则,某一 r 类型待加工产品在生产设备上加工时,只有当其都加工完成才能加工第 $r+1$ 类型。假定每台生产设备对应一个工序,也就是说待加工产品依次经过各个加工设备后,就成为生产成品进入成品库。

设在周期 $[0, T]$ 内有 M 个交货时间点,在每个交货时间点 t_m ($m \in \{1, 2, \dots, M\}$, $t_M = T$) 的产品类型 r 的需求量为 $d(t_m, r)$, 在交货时间点 t_m 的 r 类型产品的车间实际生产量为 $x_{m,r}$ 。这样就会有 2 种情况:1)当 $x_{m,r} \geq d(t_m, r)$ 时,说明有一部分生产成品转入成品库,等待在下一次交货时刻满足产品类型 r 的需求量。2)当 $x_{m,r} < d(t_m, r)$ 时,说明在交货时间点 t_m 需要通过成品库的补充来满足实际需求。这就需要对产品 r 设定缓冲安全库存量 I_r^* 。

r 类型待加工产品在生产设备 i 上加工,生产准备时间和生产加工时间分别为 $Q_{r,i}$ 和 $P_{r,i}$, 则对于整个定制型车间来说,总的准备时间和加工时间分别为: $Q = \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R Q_{r,i}$ 和 $P = \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^R P_{r,i}$ 。对于 r 类型工件,在生产设备 i 上的起始加工时间为 $y_{r,i}$, 则

r 类型工件生产车间加工的投放时间为 $y_{r,0}$ 。设每台生产设备的准备成本系数为 α , 工件库存成本系数为 β 。基于以上定制型生产车间的数学描述, 建立了以生产加工成本最小为目标的生产控制模型 (P1)

P1

$$\min \sum_{m=1}^T \sum_{r=1}^R \left[\frac{\alpha \sum_{i=1}^I Q_{r,i} + \beta \sum_{i=1}^I P_{r,i}}{x_{m,r}} + \beta I_r^* T \right], \quad (1)$$

$$s. t. \quad y_{r,i} + x_{m,r} P_{r,i} + Q_{r,i} \leq y_{r+1,i}, \quad (2)$$

$$\sum_{r=1}^R (x_{m,r} + I_r^*) \geq \sum_{r=1}^R d(t_{m,r}), \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^R \left[\frac{\sum_{i=1}^I Q_{r,i} + \sum_{i=1}^I P_{r,i}}{x_{m,r}} \right] \leq T, \quad (4)$$

$$r \in \{1, 2, \dots, R\}, i \in \{0, 1, 2, \dots, I\},$$

$$m \in \{1, 2, \dots, M\}, x_{m,r} \geq 0, I_r^* \geq 0,$$

其中: 式(1)表明目标函数为生产加工成本最小化; 式(2)说明了定制型制造车间工序之间的先后加工时间关系; 式(3)为制造产品的要满足订单的实际需求; 式(4)为生产制造过程要满足订单交货期; 使式(3)与(4)结合表明要在订单交货期内提供满足订单需求数量的产品。

从模型 P1 可以看出, 由于生产设备、交货时间等的限制, 理论上可以通过优化组合方法得出最优解, 但是该问题属于 NP 难题, 因此必须从全局角度考虑来寻求该问题的解决方案。

3.2 基于 TOC 和 CPM 的生产控制方法

瓶颈工序的利用率决定了生产车间的产出率。为防止随机波动造成的瓶颈饥饿状况, 可设置一定的时间缓冲区 (time buffer), 使物料提前一段时间投料。根据瓶颈的生产安排和缓冲区的配合, 推导出订单的投料时间, 驱动生产车间所有工序按照瓶颈工序的节拍进行生产, 使非瓶颈工序作业与瓶颈工序作业同步。为了实现对定制型生产车间的控制, 结合 TOC 和 CPM 理论, 从车间运作全局上考虑, 设计了以下几个核心步骤。

3.2.1 绘制工艺流程图

按照产品结构树, 即以物料清单为基础展开的树状结构来确定该产品的工艺流程, 缩排式物料清单描述了产品结构的层次关系^[19], 因此, 在制定某一产品的工序流程时, 应以此为依据, 先绘制出产品架构图, 即 BOM Tree。由此可看出完成该产品所需的大概工艺流程。针对每道工艺流程, 确定相应的工序, 每道工艺流程具有不同的人力和设备需要

完成不同的生产加工任务, 因此需要结合生产线的实际情况进行更进一步的分析, 制定工序流程以及绘制相应的工序流程图。

3.2.2 确定关键路线

采用步骤 3.2.1 后得到的工艺流程图, 只是该产品生产的一个初始方案, 还需进一步找到关键路线。根据约束理论, 关键路线的生产进度决定了整个产品的产出进度。在现有的工艺流程图中, 可通过计算工艺流程的各个参数找出加工时间最长的路径, 即关键路线。假设 $T_E(i)$ 表示工序 i 的最早开工时间, $T_L(i)$ 表示工序 i 的最晚结束时间, $\Delta T(i)$ 表示工序时差即

$$\Delta T(i) = T_L(i) - T_E(i). \quad (5)$$

3.2.3 识别瓶颈工序及其控制方法

确定关键路线后, 就需要针对关键路线找到瓶颈环节。在没有机器故障、在制品 (WIP) 耽搁、订单变化等情况下, 通过计算各个工序资源的负荷、忙闲率, 来确定系统在当前任务下的瓶颈资源。假设关键路线上共有 J ($J \leq I, j \in \{1, 2, \dots, J\}$) 个加工工序, S^* 指该关键路线上的瓶颈工序, P_{jm} 指工序 j 在第 m 个时段上的负荷率, $\sum_{r=1}^R T_{jmr}$ 指工序 j 在第 m 个时段上的所有任务的总时间, ΔT_{jm} 指工序 j 在第 m 个时段上的可用时间。瓶颈识别算法如下所示

$$S^* = \max S_{jm}$$

$$s. t. \quad \begin{cases} S_{ij} = \frac{\sum_{r=1}^R T_{jmr}}{\Delta T_{jm}}, \\ j \in \{1, 2, \dots, J\}, r \in \{1, 2, \dots, R\}, \end{cases} \quad (6)$$

在找到瓶颈工序 S^* 后, 就要确定瓶颈工序的缓冲量。采用文献[16]的建议, 将瓶颈缓冲区大小设定为实际生产前置时间 (lead time) 的 $\frac{1}{4}$, 即瓶颈缓冲时间 $A = [r$ 类型工件的加工量 \times 瓶颈工序之前各工序的累计加工时间 $+$ 瓶颈工序之前各工序的累计准备时间 $]/4$ 。然后对瓶颈工序上的作业进行规划调度, 瓶颈工序采用 FIFO 调度策略, 为了减少工序的调整准备时间, 同一类型的产品优先加工, 以提高瓶颈利用率。

3.2.4 确定生产节拍

随着订单需求量以及订单交货期的确定, 生产车间瓶颈工序上的满足订单需求的生产节拍就随之确定下来。这就会产生以下两种情况: 1) 订单确定的生产节拍大于或等于瓶颈工序单件产品的实际加工时间。2) 订单确定的生产节拍小于瓶颈工序单件

产品的实际加工时间。第 1 种情况说明,在现有的生产资源配置下,能够保证生产订单按时完成生产加工。考虑到应该留有一定的生产准备时间以及设备检修时间,因此生产节拍确定为瓶颈工序单件产品的实际生产加工时间。第 2 种情况说明,现有的生产资源不能满足订单加工的需要,因此就要针对瓶颈工序进行一系列的改进,通常采用的方法是,组织多班制生产等、瓶颈资源优化排程、增加瓶颈工序的设备数。

算法如下所示

$$\omega = \frac{F \cdot \eta}{N}, \quad (7)$$

式中: ω 表示生产节拍; $F = P + Q$ 表示计划期有效工作时间; η 表示时间的有效利用系数,其大小根据实际情况由经验确定; $N = \sum_{r=1}^R x_{m,r}$ 表示计划期产品产量(件)。

3.2.5 非瓶颈工序排程的计算

在瓶颈工序和生产节拍确定后,以瓶颈工序为基准点依据前拉后推的原则,确定任务的各个非瓶颈工序的排程调度。瓶颈工序之前的工序采用拉式的排程方式,即以该瓶颈工序的作业开始时间倒推来确定瓶颈资源前一道工序的完工时间,从而得到各个作业在不同工序的作业开始时间。具体的做法是,求得瓶颈资源的作业开始时间减去该任务的瓶颈缓冲时间和瓶颈前作业时间以及生产准备时间,即得到瓶颈前工序的作业开始时间。瓶颈工序之后的工序采用推式的排程方式,也就是瓶颈工序的作业完成时间加上瓶颈后作业时间以及生产准备时间,就得到瓶颈后工序的作业完成时间。

假设工序 k 表示瓶颈工序, TS_k^* 指瓶颈工序开始加工时间, j 表示非瓶颈工序的工序。则瓶颈前作业时间和瓶颈后作业时间,计算如下

瓶颈工序之前的作业时间

$$P_{r,i} = TS_k^* - A - \sum_{j=i}^k \sum_{r=1}^R P_{r,i} - \sum_{j=i}^{k-1} \sum_{r=1}^R Q_{r,i} \quad (8)$$

瓶颈工序之后的作业时间

$$P_{r,i} = TS_k^* + \sum_{j=i}^k \sum_{r=1}^R P_{r,i} + \sum_{j=k}^{l-1} \sum_{r=1}^R Q_{r,i} \quad (9)$$

3.2.6 确定加班天数

为了保证订单的按时完成,就要尽可能的挖掘生产线设备产能的潜能。并在此基础上重新平衡所有关键工序上的物流。挖掘生产线设备的潜能需要投入较大的成本,有时可能需要购买新的设备,但购

买新设备往往给企业造成很大的负担,尤其对定制型制造企业来说,更是不易。因此,针对企业的实际情况,采取组织多班制的生产方式来保证订单的按期完成。具体加班时间的确定如下式所示

$$Q = \left\lceil \frac{M}{F \cdot \eta} \right\rceil - W, \quad (10)$$

式中: Q 表示加班的天数; M 表示整个生产作业在瓶颈工序上的加工时间; W 表示从接到订单生产加工开始到生产订单完成提交所花费的工作日数。

4 实例研究

以重庆市某著名门业制造企业的防火门生产车间为例来验证本方法。近年来,随着企业生产规模和知名度的不断扩大,企业的订单数量也相应的增加。企业虽然采用了一些先进的设备和管理方法,在一定程度上提高了生产效率,但是订单交货期依然难以保证。在这种情况下,就以该车间的工艺流程为切入点,确定该车间作业的关键路线,并运用约束理论进行优化,从而找到一种解决该问题的方案。

4.1 关键路线的求解

该车间作业的主要围绕实木质防火门进行生产运作,防火门的生分为门框的生产、门面的生产以及防火物料的加工,当门框和门面都生产完后要进行二者的组装,最后经过包装出厂。其工艺流程表 1 所示。

表 1 车间工艺流程表

工序名称	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
加工时间/min	5	10	15	12	10	18	15	6	12	15	30	8	13	15	20	10	
紧前工序	无	A	B	C	D	无	F	J	H	I,N	J	无	L	M	E	K	O

其中各字母所代表的工序为: A 为门框截断; B 为门框刨加工; C 为开止口; D 为开榫; E 为后加工; F 为粗加工; G 为防火阻燃处理; H 为纵解; I 为开榫; J 为压门; K 为装饰面板; L 为防火物料压缩; M 为裁剪防火物料; N 为交合防火板; O 为组装门框和门面; P 为包装出厂。

通过车间工艺流程表可以绘制车间的工艺流程图,如图 3 所示。该工艺流程图是产品生产的加工方案,需要采用关键路线法进行进一步分析。关键路线法是用来确定项目最短工期的规划分析技术,

该技术可应用于具有严格紧前约束和有明确开始和结束的相关活动中。关键路线确定了加工制造过程的最短制造工期,这是因为在工艺流程图中关键路线上活动的总工期比任何其它完成加工的顺序的活动工期长。

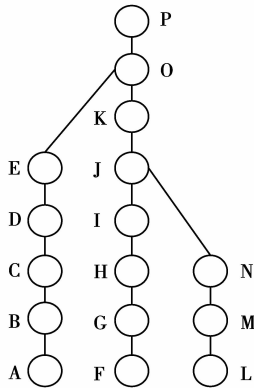


图 3 车间工艺流程图

结合图 3 和表 1,通过正推法计算活动的最早开始加工时间,通过逆推法计算活动的最迟完成加工时间,在此基础上确定关键路线,如图 4 所示。也就是在 F→G→H→I→J→K→O→P 工艺流程顺序上加工时间最短。

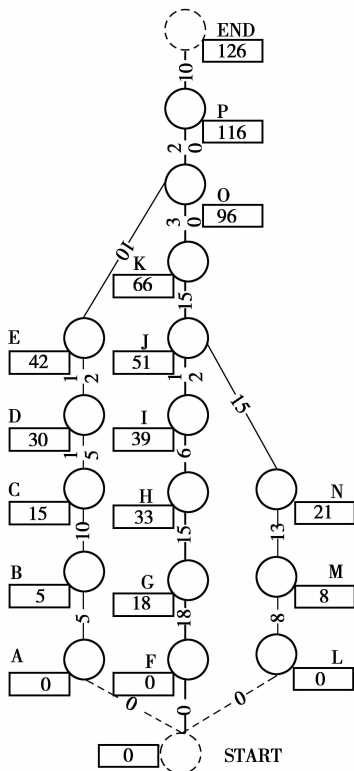


图 4 关键路线图

表 2 调整后工序安排时刻表

工序名称	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
加工时间/min	5	10	15	12	10	18	15	6	12	15	30	8	13	15	20	10
开始时间/min	44	49	59	74	86	0	18	33	39	51	66	15	23	36	96	116

4.2 运用约束理论优化生产流程

该实心防火木质门生产车间采用的是多品种、小批量依照订单组织生产的模式。现有的情况是该企业接到了一批生产订单,要求在一个星期生产 100 套实心木质防火门(该企业一周有 5 个工作日,每天工作时间为 8 h)。

在这种情况下确定该订单要求的生产节拍 r ,

$$r = \frac{5 \times 8 \times 60 \times 95\%}{100} = 22.8(\text{min})$$

在生产节拍确定以后,就用约束理论的 DBR 运行模式,以瓶颈工序的生产节拍为“绳子”,采用前拉后推的方法,来调整各个生产工序的加工时间。如表 2 所示。

因为订单要求的生产节拍小于瓶颈工序单件产品的加工时间,所以就要对该订单进行赶工,实行增加班组制来在规定的时间内完成生产加工任务。限于该车间长时间作业对机器有比较大的损坏,因此两班倒的生产作业时间安排是比较合理的,既保证了生产订单的按期完成,又保证了机器每天有 8 h 的保养时间。

在这种情况下,加班天数 $Q = \left\lceil \frac{30 \times 100}{480 \times 95\%} \right\rceil - 5 = 2(\text{d})$ 。也就是要在订单交货期内完成生产加工任务,就需要组织 2 d 的加班。

5 结 论

根据定制型制造车间依据订单制造的生产特点,以控制瓶颈工序的制约为目标,以平衡生产过程中的物流为出发点,提出了基于 TOC 和 CPM 的定制型制造车间生产控制模型。另外,由于定制型制造车间的最优化问题属于典型的 NP 难题,当生产的规模达到一定程度时,一般的启发式方法也只能给出其问题的近似最优解,基于此,提出了首先运用 CPM 找到流程型制造车间的关键路线;其次通过能力负荷情况找到关键路线上的瓶颈工序;最后结合

TOC理论,以瓶颈工序为“鼓”、以生产节拍为“绳子”,并讨论了“缓冲器”时间设置的问题,实行以瓶颈工序为“鼓点”的前拉后推式的控制方法。通过实例论证,说明了该控制方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 计国君. 生产物流运作及模型[M]. 北京:中国物资出版社, 2006.
- [2] MYUNG S, HAN S. Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method[J]. *Export System with Application*, 2001, 21(2): 99-107.
- [3] SWANSON R E. A generalized approach to demand buffering and production leveling for JIT make-to-stock application[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2008, 86(10): 859-868.
- [4] SHISHIR BHAT B N. A new framework concept for production planning systems in cellular manufacturing[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2008, 78(7): 439-446.
- [5] 王万良,姚明海,吴云高,等. 基于遗传算法的混合Flow-shop调度方法[J]. *系统仿真学报*, 2002, 14(7): 863-867.
WANG WAN-LIANG, YAO MING-HAI, WU YUN-GAO, WU QI-DI. Hybrid flow-shop scheduling approach based on genetic algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2002, 14(7): 863-867.
- [6] KUO R J, HO L M, HU C M. Cluster analysis in industrial market segmentation through artificial neural network [J]. *Computer & Industrial Engineering*, 2002, 42(2/4): 391-399.
- [7] 巨博,奚立峰. 基于约束理论的智能维护模型及策略[J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(9): 1576-1532.
JU BO, XI LI-FENG. The theory of constraints based intelligent maintenance system modeling and maintenance strategy [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(9): 1576-1532.
- [8] YUAN S, GE M, QIU H, et al. Intelligent diagnosis in electromechanical operations systems [C] // *Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 26 - May 1, 2004, New Orleans, LA, USA. [S. l.]: IEEE, 2004 (3): 2267-2272.
- [9] SOON T H, DE SOUZA R. Intelligent simulation-based scheduling of work cell: an approach [J]. *Integrated Manufacturing Systems*, 1997, 8(1): 6-22.
- [10] 贾国柱,程杨. 基于约束理论和系统动力学的生产系统再造方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(4): 683-691.
JIA GUO-ZHU, CHENG YANG. Reengineering method of production system based on theory of constraint and system dynamics [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(4): 683-691.
- [11] 孙志峻,安进,黄卫青. 作业车间多工艺路线批量作业计划优化[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(2): 183-187.
SUN ZHI-JUN, AN JIN, HUANG WEI-QING. Lot scheduling with multiple process routes in job shop [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(2): 183-187.
- [12] SUH N P. *Axiomatic design* [M]. New York: Oxford University Press, 2001.
- [13] 肖永利,方晓平. 基于关键路线法和约束理论的生产物流工序流程的优化[J]. *物流科技*, 2007(3): 117-120.
XIAO YONG-LI, FANG XIAO-PING. Optimization of production logistics process flow in enterprises based on the critical path method and theory of constraints [J]. *Logistics Sci-tech*, 2007, (3): 117-120.
- [14] GOLDRATT E M, COX J. *The Goal* [M]. 2nd ed. Great Barrington, MA: North River Press, 1992.
- [15] 何卫平,张广锋,张维,等. 制造品质BOM在车间中的研究与应用[J]. *计算机工程*, 2008, 34(11): 231-242.
HE WEI-PING, ZHANG GUANG-FENG, ZHANG WEI, et al. Study and application of manufacture quality BOM in workshop [J]. *Computer Engineering*, 2008, 34(11): 231-242.
- [16] WU S Y, JOHN S M, THOMAS G. A simulation analysis of the effectiveness of Drum-Buffer-Rope scheduling in furniture manufacturing [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1994, 26(4): 757-764.

(编辑 赵静)