

## 【制造技术】

# 面向装配成套的多品种小批量环境下 均衡生产的实时控制策略

李 创,王时龙,任亨斌,洪革委

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**为实现均衡生产,提高装配成套率,提出了一种基于实时控制策略的生产计划新方法。该方法针对生产产品制造 BOM 链的不同特点及成套规律,对生产网络进行区间划分,建立了整体离散、局部连续的实时控制机制。该方法已在一个多品种小批量混流加工的装备企业生产管理系统中成功应用,验证了其可行性和有效性。

**关键词:**多品种小批量;装配成套;均衡生产;生产计划;实时控制

**中图分类号:**TH166

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2011)06-0097-04

随着信息工程的深入,以准时制(just in time, JIT)和 MRP II 为代表的生产管理模式的广泛用于大批量少品种的生产环境,并收到了良好的经济效益。但目前针对多品种小批量生产管理的研究大都停留在理论阶段,工程应用效果均不太好,主要原因有:①产品结构复杂,零部件数量多(其中长周期零部件较多),生产周期长;②产品各部件之间的时序约束关系和成套性要求严格,零部件计划层层相扣,一个零部件计划的变动都可能会影响整个生产周期;③生产过程能力波动大,物流不均衡,物流、信息流复杂,控制较为困难,很难实现均衡生产。

因此,研究如何在多品种小批量生产环境下提高装配成套率和生产效率,实现均衡生产具有重要的实用价值。本文将面向装配成套的多品种小批量环境下的均衡生产为目标,分别从计划层的计划排配算法和控制层的实时控制策略2方面对生产控制体系进行研究,提出了一种成功用于实践的控制策略。

## 1 基于实时控制计划方法

### 1.1 问题描述

均衡生产是指在完成计划的前提下,产品的实物产量、工作量或工作项目,在相等的时间内完成的数量基本相等或稳定递增。

计划层和控制层在生产管理中有机的统一,计划层是控制层的基础,控制层从上层接受生产计划,下达生产指令,并监控生产过程,快速稳定地调度生产。计划层与控制层的相互协作是制程系统中生产计划、进度安排、过程控制等一体化的保证。

因此,柔性高效的计划模式和实时快速的控制机制成为了本文控制策略的核心。

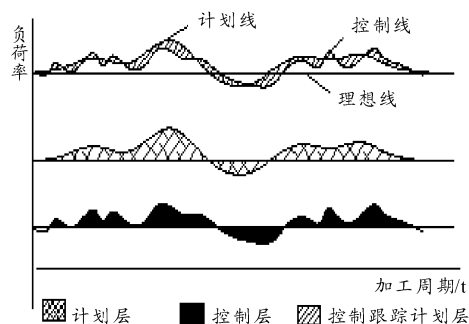


图1 计划层与控制层关系示意图

### 1.2 生产计划的排配模式

#### 1.2.1 生产链项目分类体系(HKN)

根据复杂产品的生产特点和生产流程,对产品生产线上项目进行分类汇总,将生产链项目归为瓶颈项目,关键项目,普通项目3种类型,对生产网络结构进行简化,如图2所示。

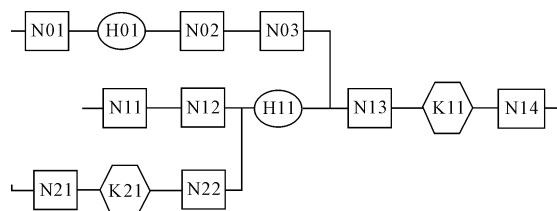


图2 HKN体系下的生产网络简化图

瓶颈项目(H):通常指生产中最不顺畅、产能最低的项目

收稿日期:2011-03-20

基金项目:国家杰出青年科学基金(50925518);国家自然科学基金(51005260);重庆高校优秀成果转化资助项目(kjzh08223)

作者简介:李 创(1985—),男,硕士研究生,主要从事企业信息化研究;  
王时龙(1966—),男,博士,教授,主要从事制造系统自动化研究。

目,生产调度中易出现拥堵,排队现象或者设备陈旧,加工效率低下等。瓶颈项目所在的节点称为瓶颈节点。瓶颈项目实际加工时间和计划加工时间有较大差距。因此瓶颈项目的计划编制是否合理,将直接影响到企业的计划执行率、设备利用率和成本控制率等,是生产全过程中至关重要的环节。鉴于瓶颈项目加工时间的不确定性,在模型中对加工周期采用模糊化处理,在计划制定时,在瓶颈节点上插入项目安全缓冲(KB)来提高瓶颈项目计划编制的柔性。因此瓶颈项目通过时间  $KT_{ij}$  与该项目基础通过时间  $T_i$  的关系:

$$KT_{ij} = T_{ij} + KB_{ij} \quad (1)$$

其中: $KT_{ij}$ 为第*i*生产线上第*j*个瓶颈项目的通过时间; $T_{ij}$ 为第*i*生产线上第*j*个项目的基础通过时间,一般为企业产品加工基础数据; $KB_{ij}$ 为第*i*生产线上第*j*个项目的安全缓冲,由专家知识提供关键项目(K):对产品质量起决定性作用的项目。它是主要质量特性形成的项目,也是生产过程中需要严密控制的项目。关键项目在生产调度中加工优先级最高,生产效率高。对于车间工序来说,喷漆、焊接、热处理、热压成型等都是关键工序。关键项目所在的节点为关键节点。关键项目需要在生产过程中严密控制,对生产进度的影响最大,除了严格控制通过时间外,还要保证关键节点上下物流供应连续,减少上下项目间的物流冲突。因此,关键项目的通过时间  $HT_{ij}$  严格依赖专家知识。

另外,依据安全库存的生产理论,在关键节点设置单级库存缓冲,关键节点只考虑自身的情况来确定各自的库存管理策略。

普通项目(N):指一条生产链上除了瓶颈项目和关键项目以外的项目,主要是指加工周期短,加工技术要求不高,缺货时可以迅速补给的项目。普通项目的通过时间  $NT_{ij}$ ,按照基础加工时间确定即可。

### 1.2.2 生产链项目监控结构

生产过程中,需要随时监控实际的加工进度,从而在进度滞后的情况下可以及时调度,保证物流供应的连续顺畅。

本文在HKN体系生产网络的基础上,构建了生产链项目的监控结构,该结构通过监控点的合理设置,控制计划层的粒度,使计划编制具有更强的指导性和生产弹性,监控点的设置坚持3个原则:

1) 关键节点和瓶颈节点需设置监控点,这样可以保证关键项目和瓶颈项目数据的实时性,控制这些项目的实际加工进度。

2) 装配成套项目所在节点需设置监控点,即生产线的交叉点。这样为提高成套率,保证装配子零件按时交货打下基础。

3) 一条生产线上监控点的粒度依据计划粒度和实际的生产运作而定,保证监控点的粒度与计划粒度相匹配,是监控结构具有一定的柔性,从而增强生产计划的弹性。

根据以上原则,给出了生产线上监控点的设置样例,如图3所示。

本文计划模式是在生产链项目监控结构的基础上得到项目与项目之间的交货期,监控点即是计划层的交货点,监控点的设置决定了计划的层次和粒度,根据监控点的设置,是计划的排配区分了监控项目与非监控项目,强调重点关注

对象,屏蔽普通对象,使计划模式层次分明,为适应控制层的调度打下基础。

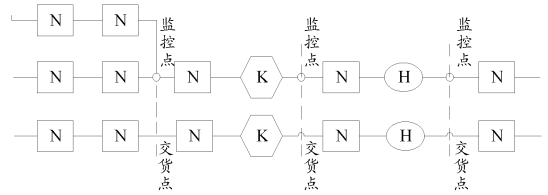


图3 监控结构简化图

### 1.2.3 基于均衡生产策略的计划排配算法

本文定义凡是设置监控点的项目统称为监控项目,比如零件关键工序称为监控工序。

生产链项目计划采用拉式计划,生产链上项目的监控点存储在监控专家知识库中,项目计划元知识由以下属性构成:零件ID、承制部门、监控项目(监控点)、计划用量、截止时期。计划的粒度由项目粒度和监控结构的粒度决定。比如项目若以零件的加工工序为最小单位,则计划为工序级的计划。

按照BOM倒推约束关系,监控项目的产出是与其零部件的配套为基础的,所以在制定监控项目生产计划的同时,与其配套的非监控项目的生产计划也相应地制定完成。

产品中的零件按用途分为正件和备件,正件用量和备件用量通过BOM表得到。计划数计算关系为:

$$PA = NA \cdot N + SA \cdot S \quad (2)$$

其中: $PA$ 为计划数; $NA$ 为计划正件数; $N$ 为正件用量; $SA$ 为计划备件数; $S$ 为备件用量。

因为生产过程中的灵活性,在实际生产过程中不一定完全按照计划执行,对一些小的零部件生产量可能大于计划量,故计划时考虑该因素后修正计划数为:

$$PSA = PA - Wa - Swa \quad (3)$$

其中: $PSA$ 为实际计划数; $PA$ 为计划数; $Wa$ 为当前库存数; $Swa$ 为最小安全库存数。

由专家知识库提供监控模板,以产品BOM表为基础,计划提前期的计算如下:

$$StartTime = PDeadLine - Max(DeadLine_{ij}) \quad (4)$$

其中: $StartTime$ 为计划提前期; $PDeadLine$ 为产品交货时间; $Max(DeadLine_{ij})$ 为专家知识中最长监控时间,即产品生产周期。

零件在某一项目最迟到达时间满足以下关系:

$$DeadLine_{ij} = workDayAfter(StartTime, DetectTime_{ij}) \quad (5)$$

其中: $DeadLine_{ij}$ 为零件*i*第*j*个监控项目截止时间; $StartTime$ 为计划提前期; $DetectTime_{ij}$ 为零件*i*第*j*个监控项目监控时间; $workDayAfter(p_1, p_2)$ 为函数值*p*<sub>1</sub>后的*p*<sub>2</sub>个工作日。

根据零部件的成套要求,监控项目的监控时间计算公式为:

$$DetectTime_{ij} = Max(sonDTime) + \sum_{P_i}^{P_i} workTime \quad (6)$$

其中: $DetectTime_{ij}$ 为零件*i*第*j*个监控项目监控时间; $Max(sonDTime_{i})$ 为零件*i*的子零件中最长监控时间; $P_i$ 为零件开

始监控项目号; $D_n$  为零件结束监控项目号; $workTime_{ij}$  为零件  $i$  的第  $j$  监控项目的通过时间。

基于实时控制的计划排配算法为:

**Step 01:** 从计划数据表中获得本次计划正件数量  $N_{Amout}$ , 备件数量  $S_{Amount}$ , 产品交货时间  $P_{Deadline}$ 。

**Step 02:** 定义零件列表  $AccMapList$ , 遍历产品零件基础数据表和监控知识库, 得到零件项目通过时间, 放入  $AccMapList$  中。

**Step 03:** 从 BOM 根节点开始遍历, 从  $AccMapList$  提取通过时间, 利用式(6)计算监控项目监控时间并放入监控知识库中。

**Step 04:** 利用式(4), 计算产品的计划提前期。

**Step 05:** 获得监控项目列表  $detectAccList$ , 遍历  $detectAccList$ , 利用式(5)计算监控项目的交货期  $DeadLine$ , 利用式(2)、(3)计算监控项目的计划数。

**Step 06:** BOM 遍历是否完成, 若未完成, 则跳转 Step 03, 否则结束算法。

## 2 生产过程的实时控制机制

### 2.1 实时控制机制建立的原则

实际的生产加工作为一个动态、不确定性和非决定性的时变系统, 其基本内容, 简单地说就是“计划 + 控制”<sup>[2]</sup>。其过程的不确定性使项目管理的真正落脚点在于控制, 通过控制使项目进度、成本和质量等始终处于计划目标之内。

生产计划实施的过程, 按照时间顺序基本上为串行结构, 由此产生的级联效应使得前一项目提前完工时间不能为项目周期所利用, 而延误却传递到后一项目, 这就是链上项目的向后传递受到延误, 在生产加工过程中, 生产进度波动严重, 出现生产进度与生产计划不协调, 产品成套率低, 不能达到均衡生产, 甚至不能按时完成计划任务。

实时控制机制强调生产控制的快速性和稳定性, 目标是达到生产作业平稳有序。根据实践经验, 在一条关键链上, 项目工期的延误总是由一些有规律的项目延迟导致, 另外生产过程的各环节具有大体相等的生产率是实现均衡生产(节奏生产)的物质基础。因此, 本文对生产链项目进行区间划分, 使其属性相关或者管理相关的项目组成项目包, 在本文中称其为框。比如对于某一产品生产线, 由很多项目(工序)所组成, 而工序可以按照所属的加工车间打包, 每一个在其生产线上的加工车间称为一个框。对于某一个加工车间, 派工所用的工序包也可以称其为一个框。

在本文框模型的基础上, 控制机制建立原则为:

1) 在实际的生产过程中, 避免框与框之间计划调整, 框与框之间只存在信息流的前向反馈, 计划排配中严格控制框与框的交货日期, 即生产网络整体的离散控制。

2) 框内部的项目联系密切, 项目之间存在双向的反馈联系, 框内建立连续的实时控制体系, 快速稳定消化实际进度与计划进度的偏差, 形成框内物流的闭环控制, 保证框与框之间的级联关系按照计划进行, 即生产网路局部的连续控制。

控制机制建立的原则模型如图 4 所示。

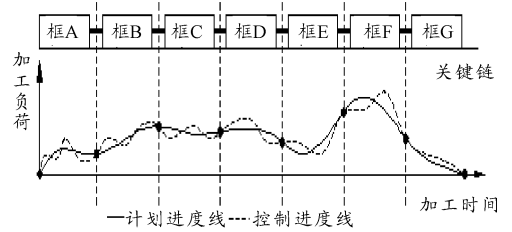


图 4 计划控制机制建立原则示例图

依据以上生产链的分类体系, 框模型和生产结构的监控体系, 以部件 00 为例, 00 有 2 个子零件 01 和 02, 其中 02 的工艺路线为  $0X-16-17-21 * 17 * 21-29$ , 图 5 给出了 02 整个监控体系的模型示例。

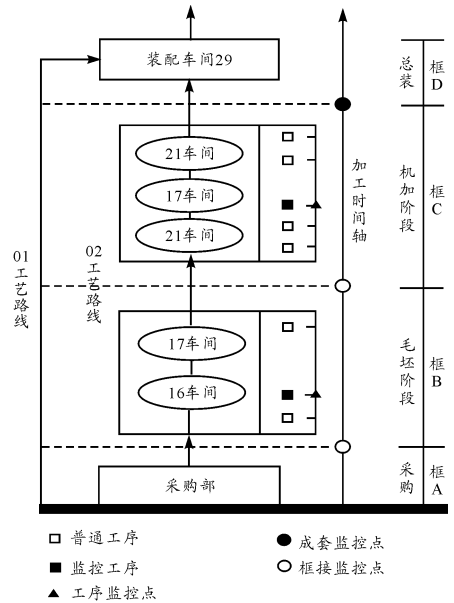


图 5 监控体系模型示例

### 2.2 实时控制机制的实现算法

从计划控制机制的建立原则可以得到, 框与框之间的生产联系只有产品的需求数量和交货日期, 即上单位只需要知道本单位的计划, 需要在什么时间交多少物料给下单位, 对于生产的波动需要本单位对自身所有项目的进度进行调整, 保证供应链的顺畅运作。

在计划的编制中, 框内项目的监控项目、监控点已经确定, 在生产过程中, 通过实时监控监控点的物流速度, 得到当前某零件在所属框的加工进度与计划加工进度的物流速度的吻合度, 从而使系统及时做出响应。吻合度的计算公式为:

$$Mf_{ij} = RS_{ij} / PS_{ij} \quad (7)$$

其中:  $Mf_{ij}$  为零件  $i$  第  $j$  监控点的物流吻合度;  $RS_{ij}$  为零件  $i$  第  $j$  监控点实际物流速度, 单位时间内经过监控点的物料数量;  $PS_{ij}$  为零件  $i$  第  $j$  监控点计划物流速度, 计划单位时间内经过监控点的物料数量。

物流速度的吻合度  $Mf_{ij}$  的大小反映了实际进度与计划进度的吻合程度。通过  $Mf_{ij}$  预测生产加工的进度, 以此来调节加工进度, 以保证框的交货日期, 为了可以实时监控加工进

度, 计调员等人为经验的参与是计划控制机制实现的关键, 计调员需要根据生产计划制定每个监控项目的监控周期  $T$  和监控周期内的计划物流量  $PS_p$ 。计划实施的监控机制具体实现在于每一个监控周期内统计监控点的物流量, 与计划物流量比较, 若反馈调节条件成立, 打开物流反馈开关。

实时控制模型如图 6 所示, 其实现算法为:

**Step 01:** 得到监控项目列表 detectAccList, 遍历 detectAccList, 得到项目监控周期  $T$ , 项目的计划物流量  $PS$  和实际物流量  $RS$ 。

**Step 02:** 根据式 (7) 计算物流吻合度  $Mf$ , 若  $Mf$  小于  $1 - a$  ( $a$  为可接受偏差系数), 则表示当前生产效率低于计划效率, 跳转 Step 04, 否则跳转 Step 01。

**Step 03:** detectAccList 遍历是否完成, 若没有, 跳转 Step 01, 否则结束算法。

**Step 04:** 加工滞后提示, 合理调度生产, 提高加工效率。

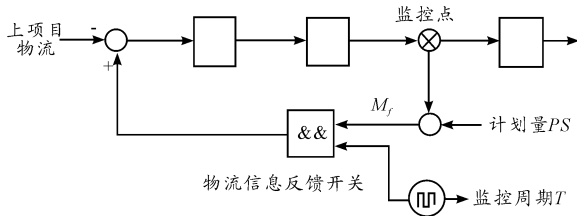


图 6 实时控制模型

### 3 应用实例

实例中所取对象为某一制造企业的年度生产计划项目管理中的一部分, 产品代号为 00, 产品的交货期为当年的 12 月 1 日, 其 BOM 结构如图 7 所示, 监控知识表部分如表 1 所示。

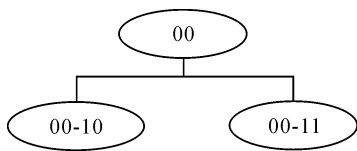


图 7 产品 00 的部分 BOM 结构树

表 1 监控知识

零件代号	承制单位	监控工序号	加工时间	监控时间
00	32 车间	20	20	147
00-10	OX	1	3	99
00-10	25 车间	4	14	110
00-10	25 车间	10	25	121
00-11	OX	1	3	101
00-11	16 车间	3	8	106
00-11	32 车间	12	13	111
00-11	32 车间	13	23	121

生产计划实际效果与控制图如图 8、9、10 所示, 从计划图可以得到监控工序的加工进度, 从而掌握整个生产线的加工进度, 从监控图可以得到每周的加工进度以及监控点的物流速度, 从而指导后序的生产作业。

零件代号	计划门数		单位用量		现有数	尚差数	工序号	截止时间
	正件	备件	正件	备件				
00	15	15	5	0	18	57	20	2010-07-31
00-10/QYZ165	15	15	10	0	25	125	4	2010-07-03
00-10/QYZ165	15	15	10	0	18	132	10	2010-07-13
-11(Z)/QYZ165	15	15	10	0	25	125	3	2010-06-29
-11(Z)/QYZ165	15	15	10	0	18	132	12	2010-07-12
-11(Z)/QYZ165	15	15	10	0	18	132	13	2010-07-13

图 8 机加计划图

零件代号	计划门数	单位用量		现有数	尚差数	工序号	截止时间
		正件	备件				
00-10/QYZ165	15	10	0	25	125	1	2010-06-24
11(Z)/QYZ165	15	10	0	35	115	1	2010-06-24

图 9 毛坯计划图

零件代号	现有数	尚差数	周差数	在制数	工序号	完工时间
00-11(Z)/QYZ165	30	120	2	2	1	2010-06-26
00-11(Z)/QYZ165	25	125	1	1	3	2010-06-29
00-11(Z)/QYZ165	22	128	3	2	6	2010-07-03
00-11(Z)/QYZ165	18	132	2	2	10	2010-07-10
00-11(Z)/QYZ165	18	132	3	2	12	2010-07-12
00-11(Z)/QYZ165	18	132	3	2	13	2010-07-13

图 10 周期为 1 周的监控页面

### 4 结束语

在对装备制造企业的生产运行方式进行分析的基础上, 建立了一种多品种、小批量环境下均衡生产的实时控制模型, 该模型强调装配成套环境下计划编制的柔性和对生产进度的控制, 实现计划层和控制层的有机结合, 保证在确定环境下编制的项目计划在动态环境下的顺利执行, 从而使生产作业平稳有序, 并在此基础上开发完成了生产信息管理系统, 成功用于实践, 显著提高了生产效率, 建立了正常的生产秩序, 使生产能力得到了充分利用, 效果良好。