

飞机复合材料制件车间生产计划研究*

Study on Aircraft Composites Workshop Production Plan

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 丛培勇 梅中义 范玉青 刘忠献

[摘要] 为了实现复合材料数字化生产线中的计划排产系统,使其更具有可操作性,本文基于复合材料制件生产排产中,主要工序生产对象的不同,给出了复合材料生产计划的2个阶段:分区计划和机组计划的划分方法,并对2个阶段进行了详细论述。通过分析复合材料制件生产计划的项目实例,给出复合材料构件生产计划制定过程中分区计划和机组计划的实现方法,并应用于复合材料数字化生产线中的复合材料制件厂中。实践表明,该方法可以有效地制定切合实际的生产计划,并能提高系统开发和维护的效率,具有良好的扩展性。

关键词: 复合材料制件 生产计划 瓶颈工序 约束

[ABSTRACT] In order to achieve product plan for the composite digital production line and make it more operational, Based on the difference of material used to main process of production line, the composite production plan is departed in two stages: Partition plan and Machine plan. By analyzing project of aircraft composites workshop production plan, the methods are given to make partition plan and machine plan for composite components, and this system is taken into practices for composite workshop in digital production line. Practice shows that this type of approach can be effective during making practical production planning, and improve the system's development, maintenance, and good scalability.

Keywords: Composite product Product plan Bottleneck process Constrain

1 生产计划的安排

目前对生产计划全程管理和跟踪的模型,主要有

* 国防基础科研项目:“直升机复合材料数字化生产线技术”项目资助。

ERP和MES系统,前者拥有生产计划和能力计划模块,后者拥有工序计划模块^[1]。ERP和MES两个管理模型在生产方面以生产计划(能力计划)和生产排程为分界线分成2部分:一部分主管公司级的生产计划,一部分以车间为单位用销售订单和虚拟订单并合理使用ERP分配给自己的生产能力^[2]。航空企业中的复合材料制件生产车间也不例外,在系统集成方面也是通过ERP给出的生产能力计划,根据当前车间的复材制件订单执行生产排程、生产排序及制造协同的管理。在车间内部,从有限资源角度看生产计划,是一个决策过程,是为完成ERP下达的订单,在规定的时间内有效使用车间生产能力的计划;生产排程是根据确定的生产计划和订单交货期,按照产品的加工工艺路线,合理安排有限的资源,决定何时开始,由哪部设备加工,完成哪项工作;生产排序是依据生产排程,给出零件的合理加工顺序,并设法达到预定的交货期和提高设备利用率。但是在当生产任务之间有优先约束时,问题变得比较复杂,对于一般优先约束,问题就是非多项式复杂度深处法可解(non-deterministic poly nomial-time hard, NP-hard)的,导致生产排程和排序计算复杂,难以实现。为了解决上述问题,本课题对生产排程和生产排序作了重新划分,并且转换复杂优先约束为简单约束,获取合理而简单的生产排序。

2 复合材料制件车间的生产组织

航空复合材料制件车间产品多样,并且生产流程复杂,例如某民用机型每架飞机有900多个外型和性能要求不同的复合材料制件,受到这2个方面因素的影响,形成了具有航空复合材料制件特点的生产组织方式。在生产方面,车间通常按照复合材料制件生产过程分成3个区域:下料铺层区、成型区和装配区;人员方面依据产品机型和在不同的生产区域分成班组管理;生产计划执行方面,多数航空企业按订单生产体制组织生产,生产车间通常管理到月计划,把车间月计划按照机型的PBOM分解成班组的月生产计划,但目前由于系统集成

程度低,大部分工作以手工编制为主,并且依靠纸张跟踪计划。

现行的复合材料制件的生产组织方式,虽然能够把月生产计划下发,并且按照月计划形式进行管理,但是这种方式不能满足复合材料数字化生产线中的生产计划多层精细管理,导致 ERP 和 MES 系统在对生产计划制定和管控方面失去了精细和准确的计划和生产信息的支撑^[3],因此数字化生产线的生产计划集成要以车间生产计划的制定和执行为基础向上集成,形成一级化计划体制。

3 复合材料制件的生产排程

3.1 复合材料制件生产排程分析

复合材料车间制定生产排程过程中,不仅要考虑企业商务因素造成的加急、延时、返修等特殊订单,还要考虑由其他车间供应的外协件和本车间的制造资源如材料、设备和人员等因素。基于目前实际的厂情,暂时抛开这些约束条件,可以得到以复合材料厂的生产对象为订单或生产任务,具体的表现形式通常为一定时间范围内要生产的飞机架次或具体部件。复合材料构件下料工序通常使用自动下料机排版后一次为多个零件下料;然后进行热压、固化或成型工序。受到成本和生产效率的影响,工序的机组资源通常在一个工作单元内同时生产多个具有相同制造参数的零部件;其它主要工序如铺层和装配工序等,加工对象为单一零件,具体如图 1 所示。在生产过程中生产计划的对象已经细分为一组或某一个零件。

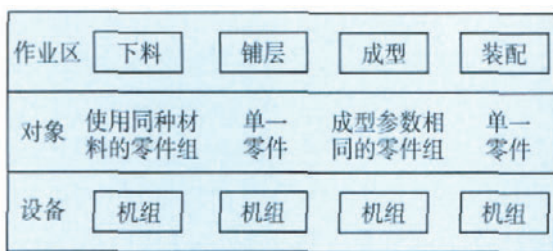


图 1 复合材料制件主要工序的生产对象

Fig.1 Production targets of composite product main processes

根据生产对象在复材制件车间不同的存在形式,把生产计划划分为 3 个部分:分区计划、机组计划、生产调度,如图 2 所示。

3.2 分区计划

在计划排产的过程中每个阶段排产的对象和时间精度不同,每个部分的职能范围也不同。具体看分区计

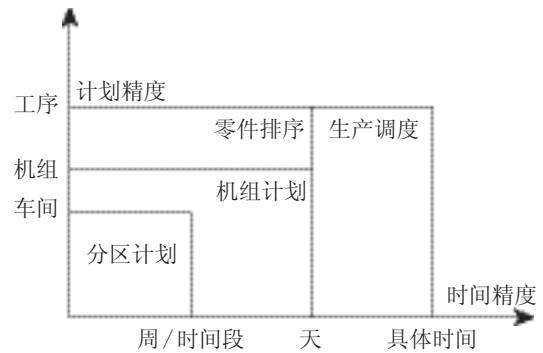


Fig.2 Important scheduling stages of composite component

划,它是实现销产转换的关键环节:首先把订单按照优化的目标进行排序;其次划分 ERP 系统的产能计划,以时间为分界线把产能计划分成多个生产能力区域,这些能力区域不必同样大小,例如计划员可以把紧接着计划开始日期的能力区域定义的比较短,来提高销产转换的精确性,而把靠近计划结束日期的能力区域定义得比较长,增加分区计划的柔性;最后把订单填充到能力区域,形成分区计划。

3.3 机组计划

设备和劳动力在生产计划中统称为资源。计划对产能的计算和使用是按生产中心(production centre)为单位进行的,一个生产中心可以只包含一个机组。在大多数情况下,资源包括主要的机组设备或一组功能相近的机组,在这些资源上产品被生产出来,这些机组设备就被称为生产中心。通常一条生产线或一个主要的机组就可以构成一个生产中心,如一条复合材料制件生产线是一个生产中心,一套或多套固化设备也可以认为是一个生产中心^[4]。每个资源的详细信息包括机组的生产能力,以及影响产能的因素:比如什么产品可以在该资源上生产和以及加工该产品的产出率等等,根据机组的属性把分区计划内的零件按机组生产能力分配,形成车间的机组计划。分区计划所分配的生产对象通常为订单或生产任务,而机组计划针对的是具体的一组或某个零件。

4 应用实例

4.1 案例概述

排产系统一般存在于生产管理系统中,飞机复合材料制件排产系统与工艺管理、调度管理、生产进程管理、库房管理和物流跟踪模块,共同组成复合材料生产管理

系统。排产系统主要完成企业资源管理(ERP)与车间生产信息的贯通,建立适合复合材料制件车间的生产管理软件平台;与产品工艺管理系统衔接,把产品设计和变更及时准确地传递到车间,并根据实际情况转化或更新生产零件列表;在生产计划方面排产系统能够根据生产零件列表自动分解月计划为生产过程中实际使用的生产订单,匹配好工艺文件,直接分配到各个工序;在生产组织方面建立了以生产订单拉动生产各个工序以及相关的材料库、工装库、工具库和成品半成品库的拉式生产体制。各方案数据流向如图3。排产平台的基础数据源主要来自生产部的月生产计划、工艺管理系统的零件清单和零件组套信息,经过排产后形成生产指令,生产指令匹配工艺文件和生产所需要的复合材料明细,通过对生产过程的跟踪拉动工装工具和成品库房,同时反馈物流信息给计划模块。

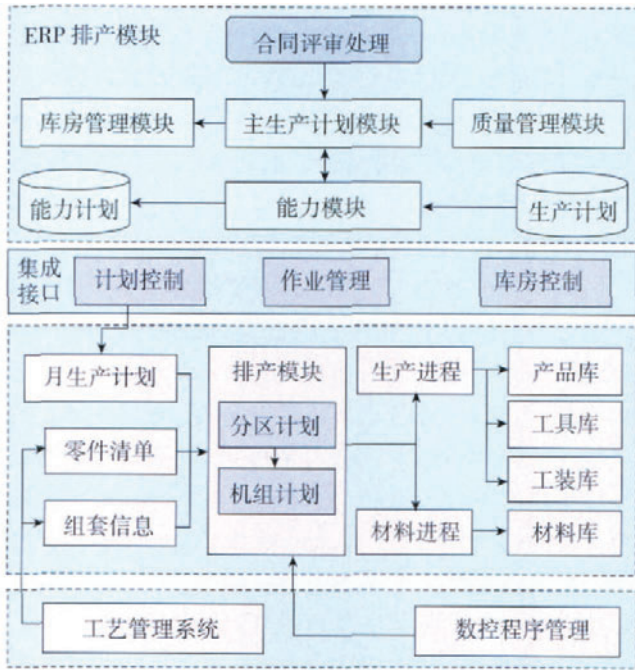


图3 系统功能结构图
Fig.3 System function architecture

4.2 复合材料生产计划的编制

针对某航空企业复合材料车间,建立计划排产系统,具体排产的模型序列图如图4所示。生产部门下发生产计划到车间的生产科,生产科要求计划科室制定分区计划,完成后下发任务给调度室制定机组计划(生产顺序),并且向中央库房发出生产准备请示,把详细生产计划反馈给生产部,从而完成整个计划制定。从管理层面上来看,复合材料生产线的排产过程是由生产部下发

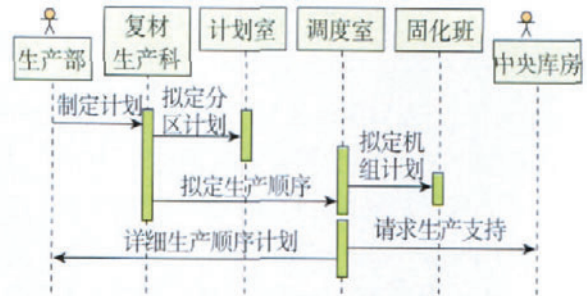


图4 复合材料产品计划制定顺序
Fig.4 Plan work-flow of composite component

生产任务,由车间生产科根据车间资源状态确定排产时间范围内的车间生产能力,再由计划室和调度室根据机组能力情况,把生产科的生产能力转化为产品的生产顺序和具体生产时间,从而完成复合材料的计划排产。

目前航空企业生产部门,通常给定生产车间具体月份的生产任务,由中央库房管理每月每个分厂生产的产品数量,发布给所有分厂确定下个月的生产任务,集团生产部门对各个车间监控周期通常为一个月以上。导致这种状态的主要原因是集团生产部门对车间内部生产信息掌控不足,而上述排产方式,可以改善这种状况,由复合材料生产车间直接把生产部下发的任务转化为可执行的产能计划并安排生产顺序,每周或每段特定时间反馈给集团生产部,因此生产部调整计划的周期由一个月变为一个月或该段特定时间,可以加快产品的交货周期,同时直接监控复材制件的生产线。

4.3 分区计划的制定

4.3.1 问题描述

分区计划实际表现在工厂里面的通常为周计划或具体时间段计划,它的设计目标就是要满足产品的交货期,同时最小化生产流程的时间。但是这种方式往往导致短期内机组资源利用率不足或过载,因此只依靠分区计划不能完成复合材料生产计划的制定。飞机复合材料制件厂通常接到多机型多架次的生产计划,复合材料厂进行零件加工,装配后以部件形式缴库,作为原料进入其他车间。

设定1:复合材料车间为一个生产整体。

设定2:每个机型的复合材料部件组成一个链 L , L_1 链中的部件设为任务 T_1, T_1, \dots, T_k , L_2 链中还有另一个机型的部件设为任务 $T_{k+1}, T_{k+2}, \dots, T_{k+m}$,直到最后一个机型任务链的最后一个任务 T_n 。

设定3:第 j 个任务的加权完工时间用 $w_j c_j$ 表示。

以上设定中,复合材料制件厂为一个生产整体,不同机型组成的任务链显然为平行链,因此采用三元组方

式描述该问题为^[5]:

$$1 | chains \sum w_j c_j \quad (1)$$

4.3.2 整机优先约束

整机优先约束即相同机型的飞机按照实际需要分组,同机型的一架或多架定义为一个链,要求一旦加工某个链,就必须加工完该链的所有任务,然后再接着加工另一个链的任务,在实际的排产过程中通常用来处理加急任务。为了处理这种情况先考虑两个链情形,设链1中含有 T_1, T_2, \dots, T_k ,链2中含有 $T_{k+1}, T_{k+2}, \dots, T_n$,每个链内的优先约束如下:

$$L_1: T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_k$$

$$L_2: T_{k+1} \rightarrow T_{k+2} \rightarrow \dots \rightarrow T_n$$

令顺序 Π 为: $[L_1, L_2]$,则加权总完工时间等于

$$\begin{aligned} (\sum w_j c_j)_{\Pi} &= w_1 p_1 + \dots + w_k \sum_{j=1}^k p_j + \\ &w_{k+1} \left(\sum_{j=1}^{k+1} p_j \right) + \dots + w_n \sum_{j=1}^n p_j \end{aligned} \quad (2)$$

令顺序 Π' 为: $[L_2, L_1]$,则加权总完工时间等于

$$\begin{aligned} (\sum w_j c_j)_{\Pi'} &= w_{k+1} p_{k+1} + \dots + w_n \sum_{j=k+1}^n p_j \\ &+ w_1 \left(\sum_{j=k+1}^n p_j + p_1 \right) + \dots + w_k \sum_{j=1}^k p_j \end{aligned} \quad (3)$$

计算 $\sum (w_j c_j)_{\Pi} - \sum (w_j c_j)_{\Pi'}$

$$= \left(\sum_{j=1}^k p_j \right) \left(\sum_{j=k+1}^n w_j \right) - \left(\sum_{j=k+1}^n p_j \right) \left(\sum_{j=1}^k w_j \right)$$

令等式小于零,可以得到结论1:即如果

$$\frac{\sum_{j=1}^k w_j}{\sum_{j=1}^k p_j} > \frac{\sum_{j=k+1}^n w_j}{\sum_{j=k+1}^n p_j} \quad (4)$$

则由任务 T_1, T_2, \dots, T_k 组成的链在由 T_{k+1}, \dots, T_n 组成的链前加工可获得最短加权完工时间,并且把不等式的左边称为链 L_1 的排序因子。

对于多个链的情况,由结论1可以知,任意两个链之间均可以确定加工顺序,因此方便得出最优排序的具体步骤:

步骤1:对当前未加工的链,计算排序因子,选择排序因子最大的链。

步骤2:继续选择已经选择的链上的任务,直到完成链上的所有任务为止。

步骤3:若已经完成全部链,则停止,否则转步骤1。

4.3.3 部件优先约束

整机约束通常用于加急订单的组合中,但在普通订

单分解过程中,则不一定要要求整架机所有部件加工完毕后,才能进行其他机型的加工,即根据所有部件的优先级可以调整不同链中的部件进行生产,即链可以中断。

定义:对于链 $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots \rightarrow T_k$,令 ρ 满足

$$\frac{\sum_{j=1}^{\rho} w_j}{\sum_{j=1}^{\rho} p_j} = \max_{1 \leq i \leq k} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^i w_j}{\sum_{j=1}^i p_j} \right\} \quad (5)$$

上式左端的值称为链的 ρ 因子,记为 $\rho(1, 2, \dots, k)$ 。

由定义可知链的 ρ 因子一定存在。假设: T_i^* 是决定链 T_1, T_2, \dots, T_k 的 ρ 因子的任务,最优排序中含有子顺序 $\pi: [T_1, T_2, \dots, T_u, T_v, T_{u+1}, T_i^*]$,其中 T_v 是来自其他的链, π', π'' 分别表示子顺序 $[T_v, T_1, \dots, T_i^*]$ 和 $[T_1, T_2, \dots, T_i^*, T_i^*]$ 。

由结论1以及假设 π 是最优排序有

$$\begin{aligned} \frac{w_v}{p_v} &< \frac{w_1 + \dots + w_u}{p_1 + \dots + p_u} \\ \frac{w_v}{p_v} &> \frac{w_{u+1} + \dots + w_{i^*}}{p_{u+1} + \dots + p_{i^*}} \end{aligned} \quad (6)$$

另一方面,由于 T_i^* 决定了链 $[T_v, T_1, T_k]$ 的 ρ 因子,故由定义可知:

$$\frac{w_1 + \dots + w_u + w_{u+1} + \dots + w_{i^*}}{p_1 + \dots + p_u + p_{u+1} + \dots + p_{i^*}} < \frac{w_1 + \dots + w_u}{p_1 + \dots + p_u},$$

从上式推得:

$$\frac{w_{u+1} + \dots + w_{i^*}}{p_{u+1} + \dots + p_{i^*}} > \frac{w_1 + \dots + w_u}{p_1 + \dots + p_u},$$

$$\text{因此易知 } \frac{w_v}{p_v} > \frac{w_1 + \dots + w_u}{p_1 + \dots + p_u}, \quad (7)$$

与假设矛盾,同理可证子顺序 $[T_1, T_2, \dots, T_k]$ 被多于一个来自其他链任务打断的情况。

结论2:如果 T_i^* 是决定链 T_1, T_2, \dots, T_i^* 的 ρ 因子任务,则存在一个最优排序,在该排序中,任务 $[T_1, T_2, \dots, T_i^*]$ 连续加工而不被打断。

在多个链并且可中断的情况下,优先选择 ρ 因子最大的链加工,加工到 ρ 因子任务后,依次循环,直到所有链加工完毕,即可获得最短的加工时间,具体步骤如下:

步骤1:在当前未加工的链中,计算 ρ 因子,选择 ρ 因子最大的一个链。

步骤2:选择该链中的任务,直到选择完决定该链 ρ 因子的任务。

步骤3:若已选择全部的任务,则停止,否则转1。

4.4 机组计划的制定

分区计划和机组计划在计划的对象和执行者方面不同。分区计划执行对象为整个车间,任务对象为飞机主要部件或架次,目的是为车间分配一个时间段的生产

任务,体现车间在某段时间的产能,其任务链通常由多架同型号飞机其中的部件组成;机组计划表现为车间生产线上关键瓶颈机组的生产任务,执行对象是车间中的一个或多个瓶颈工序,任务对象为飞机工艺 MBOM 中的零件列表,实际排产过程通常转化为 PBOM 中的具体零件,目的是为生产现场进行任务排序,体现出每道工序的零件加工顺序。机组计划的制定要采用分区计划制定的方法,需要确定某一个瓶颈工序,或者几个工序之间确定一个瓶颈区域,把这个瓶颈工序或者区域抽象为一个生产单元,独立的零件视为一个链,装配件中所有的子零件按照安装顺序制定一个工作链。显然这些链组成了平行链。

在飞机复合材料生产线中,可以把热压和固化工序抽象为一个生产单元。把经过分区计划产生的零件列表进行分组,分组是以能否同炉固化或热压为依据,其主要的参数为压力或固化曲线、工装材质和零件的尺寸等。对经过分组后的零件列表划分任务链,每个链的任务个数与选择的优化对象的处于的 PBOM 中的层数相关。开始应用时,为了节约维护基础数据数量,以根节点即第一层开始实施,可以减少系统初始化工作量,任务链上的任务个数均为 1,逐渐涵盖子零件;伴随系统使用不断应用,任务链上每个任务的加工时间更为准确,达到更好的机组计划编制结果。具体流程参加图 5。

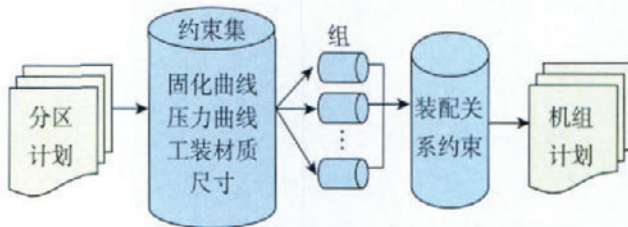


图 5 复合材料产品机组计划制定过程

Fig.5 Group planning process of composite component

4.5 排产系统的实现方法及画面样例

排产系统一般不涉及人力管理,系统业务实现一般不能完全脱离工厂的实际,尤其注意与现有组织结构的结合,通常要把系统的功能分解到目前各个职能科室,只是改变科室目前工作的内容。如图 6,为业务建立数据物理模型时,严格把工厂的计划部门和工艺部门分开,基本保持各科室的职能不变,深色部分为工厂计划部门数据的物理模型,主要是月计划、班组月计划明细表和班组日计划表。浅色部分为工厂工艺管理部门需要为生产计划编制而准备的数据,依次有月计划明细表

制定需要的零件 BOM,制定 BOM 需要的机型零件清单、材料定额,以及代表零件重要属性的数控程序表和为每架飞机生成的使用零件和零件属性的清单。图 6 只是给出各表的主外键并没有给出所有属性。



图 6 计划系统数据模型

Fig.6 Data module of planning system

软件实现方面采用 3 层 B/S 结构,前台包含系统显示层和数据规则处理,主要为人机交互界面和为中间层传递参数;中间层主要为业务模型层;后台为数据存储层,数据存储层主要对数据进行存储功能的实现,相对简单。前台和中间层为了减少由于业务变更和数据信息不全带来的改动,采用如图 7 所示的设计方法。在整个程序中,参数的传递不以单个变量的方式传递,而对所有变量进行分组,分别放在集合类对象中,所有的人机交互界面都按照规则为业务层传递集合对象,通过业务规则解析集合对象,分配给不同的业务规则模型,模型经过计算后同样生成集合对象,集合对象经过数据层解析后,生成数据库调用脚本,调用数据库中的数据包,存放于数据库中,完成数据库的存储。例如:班组月计

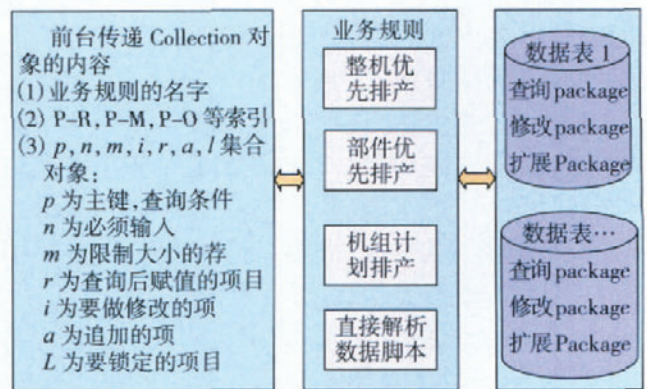


图 7 数据参数的管理方法

Fig.7 Management methods of data parameters

划制定页面选定后,前台传出的参数 MC 中含有部件优先排产(业务规则颗粒的名字),数据表的索引(用于业务规则结果调用数据表的参数), p, n, m, i, r, a, l 按照相应的图示规则的集合放入前台页面相应的控件对象或控件传递的内容,用于返回结果集合。其中 p 中存放的控件对象的内容为业务规则的输入项,包括计划号、批架次号、机型; n 和 m 为需要系统按照要求作数据检查的项目。这种方式能够解决在实施过程中对系统进行更改的时间上的要求,同时对于实施人员来说,在产生变化的情况下,做快速交接方面具有一定优势,而且当存在异构接口时,方便转化为 XML 文件,提供通用接口。

5 结束语

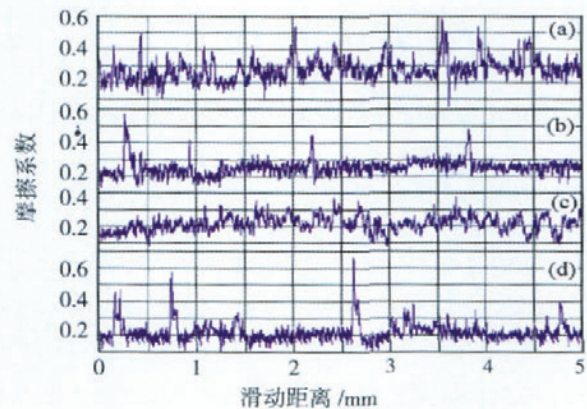
目前,复合材料数字化生产线建设过程中,第一目标就是要打通整个产线的数据流,在打通数据流的过程中,单一产品数据源无疑起着重要的作用,但是制造过程中,产品信息的“完整、有效、唯一”这3个特性需要复材制件生产管理系统的支持,因此计划排产和计划执行跟踪在数据流的打通中起着重要的作用。关于复材制件生产管理平台,下一步的重点工作必将转移到数据流的优化方面,本文给出在分析复合材料制件生产排产过程中的任务对象基础上,合理为复合材料车间生产计划进行分段制定,结合现场实际进行复合材料生产计划顺序的制定,在实际应用中更具有可操作性,并发挥其指导作用,可以有效地完成设计和制造的信息集成。同时在完工时间问题上给出优化的方法,在软件的实现方面给出了扩充优化业务模型的方法,对于进一步优化数据流具有一定的指导意义。该方法在国内某航空集团的复合材料数字化生产线中使用,针对批量生产任务取得了非常好的效果,目前正开发新的业务规则颗粒,完成适应异常生产任务的计划模型。

参 考 文 献

- [1] 李中阳,齐二石,安景玲. 生产排程与模型构建研究. 制造业自动化,2005,27(2): 17-20.
- [2] 张晓东,严洪森. 多级车间生产计划和调度的集成优化. 机械工程学报,2005,41(9): 98-105.
- [3] Jing Shaohong, Meng Qingjin. Research on MES architecture and application for cement enterprises. IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, CHINA, 2007.
- [4] 覃一宁,王伟,王建军. 流程工业生产计划与调度系统的对象建模方法. 计算机集成制造系统,2006,12(1): 44-49.
- [5] 唐横永,赵传立. 排序引论. 北京:科学出版社,2002.

(责编 侧卫)

(上接第 85 页)



(a) Mo/Si=4.2;(b) Mo/Si=2;(c)Mo/Si=0.6;(d)MoN_x

图 5 不同薄膜的摩擦系数

Fig.5 Friction coefficient of various films

3 结束语

随着航空工业的迅猛发展,相继开发出许多新型铝合金、钛合金和高温镍基合金。铝合金虽然较易切削,但切削时容易粘刀,产生积屑瘤,降低了表面加工质量,特别是随着铝合金中硅含量的增加,加工难度也增大;钛合金和高温镍基合金属于难加工材料,在高速加工中有切削力大、切削温度高、加工硬化、粘刀现象严重、刀具易磨损等优点。因此,航空铝、钛合金等材料的性能特点要求刀具涂层材料具有高的化学稳定性和红硬性、摩擦系数小、附着力高等良好的综合性能,以克服切削时容易粘刀、切削力大、刀具易磨损等优点。而具有低摩擦系数的 MoN 基硬质涂层具有较好的综合性能,基本能够满足上述要求。如果对其性能进行进一步优化,预期该类材料将会在航空工业中得到广泛的应用。

本文有参考文献 30 篇,由于篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 岩石)

2009 直升机发展论坛将于 11 月天津召开

2009 年 11 月 5 日,记者从中国航空工业集团公司成立一周年媒体日活动现场获悉,11 月中旬中航将在天津举办中国直升机发展论坛。

据介绍,此次论坛主办方将就国家航空应急救援体系建设、直升机在航空应急救援过程中的能力和应用、国产直升机在国家航空应急救援体系装备建设中发挥的主导作用及通用航空在国家航空应急救援体系建设中的地位和作用等议题展开探讨。(本刊记者 七丁)