

复杂装备企业的敏捷化生产计划管理系统研究

薛冬娟^{*1,2}, 蒙秋男¹, 吕志军¹, 刘晓冰¹

(1. 大连理工大学 CIMS 中心, 辽宁 大连 116024;
2. 大连水产学院 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对复杂装备企业生产计划的完整性和动态计划变更的一致性问题的, 提出了基于网络计划的敏捷化多层推 / 拉式生产计划管理体系. 通过研究多层生产计划的动态过程管理和资源优化的实现方法, 构建了企业生产计划控制模型. 提出了基于工作流的生产计划与调度并行运行机制, 并针对物料拖期问题, 建立了动态网络计划的编制和动态协调算法, 保证了生产作业计划的准确性和生产计划变更的一致性.

关键词: 复杂装备; 计划变更; 工作流; 物料拖期
中图分类号: TH166; TP31 **文献标识码:** A

0 引言

复杂装备生产具有面向订单、变型设计为主要的特征. 产品零部件之间具有复杂的先后装配关系和严格的齐套性要求. 这些都要求企业采用有效的生产管理模式, 快速制定并调整相应的生产计划与调度^[1]. 因此, 结合复杂装备生产特点, 针对企业生产计划动态变更的一致性问题的, 本文从生产计划体系及控制模型、基于工作流的系统并行运行机制、网络计划的编制及动态协调算法等方面对适合机车等复杂装备制造企业的敏捷化生产计划管理系统进行研究和探讨.

1 复杂装备生产计划体系研究

对于大型复杂装备产品而言, 很难编制出产品所有零部件之间的工序关系图, 所以可利用网络图反映出只是关键零部件关键资源的利用关系^[2]. 而对于非关键件, 其生产能力相对充足, 所以可将网络计划和 MRPII 相结合来安排生产计划. 本文将网络计划、MRPII、JIT 相结合, 采用基于网络计划的敏捷化多层推 / 拉式生产计划管理体系, 以解决复杂装备企业的生产集成管理问题^[3].

多层推 / 拉式生产计划管理体系从层次上分

为 5 层: 生产经营规划层、网络计划层、MRPII 计划层、装配计划层和 JIT 生产执行层, 如图 1 所示.

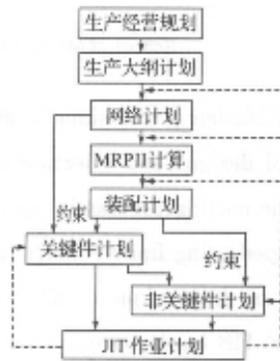


图 1 多层生产计划体系

Fig. 1 Multilayer production plan architecture

(1) 生产经营规划层

企业需要制定长远的生产规划. 由于复杂装备企业产品的生产周期较长, 大多需要制定展望期为 1 ~ 3 年的生产经营规划.

(2) 网络计划层

① 生产大纲网络计划: 根据企业生产能力安排产品的年度或季度生产计划. 利用时间 - 资源能力平衡生成相应的年度或季度生产计划.

收稿日期: 2006-07-20; 修回日期: 2007-10-05.

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2003AA415830).

作者简介: 薛冬娟*(1970-), 女, 副教授; 刘晓冰(1956-), 男, 教授, 博士生导师.

② 关键件网络计划：将生产大纲网络计划按月细化，通过网络图生成关键件的生产计划。为了约束非关键件的 MRPII 计划，需要将关键件的生产计划结合关键件的作业计划和工厂行程计划（考虑生产的提前期、加工周期、在制量、最小发送批量、废品率等期量数据的生产行程计划）。

(3) MRPII 计划层

各个子装配根据相应的网络图事项的约束时间按照产品结构进行 MRPII 计算分解，得到各装配件的 BOM 零件计划，按照工艺路线和生产期量数据中的提前期和加工周期分解其工艺计划和工厂行程计划。即子装配的 MRPII 分解本身依旧是一个多层结构。

(4) 装配计划层

装配计划受关键件网络计划的约束。所有非关键装配件都可以看做是装配于关键件网络图的某些事项上，每个装配件由多个零部件按照其产

品 BOM 结构组成。该装配件的完工时间受相应事项的约束，以保证该装配件的齐套性。该层相当于以该装配为产品的主生产计划层。

(5) JIT 生产执行层

关键件和非关键件的工序计划通过部门计划和调度算法生成派工单。当所有准备计划完成时计划下达到具体的设备执行。

2 生产计划控制模型

2.1 生产计划控制模型的建立

在多层推 / 拉式生产计划体系的基础上，构建了企业生产计划控制模型，如图 2 所示。该模型是多层推 / 拉式生产计划体系在企业系统开发应用中的具体化。该控制模型强调了两个重要的概念，一个是产品物料清单 BOM，另一个是产品操作过程清单（即产品的工厂行程管理），它描述的是生产一个产品所需要经历的所有生产过程，

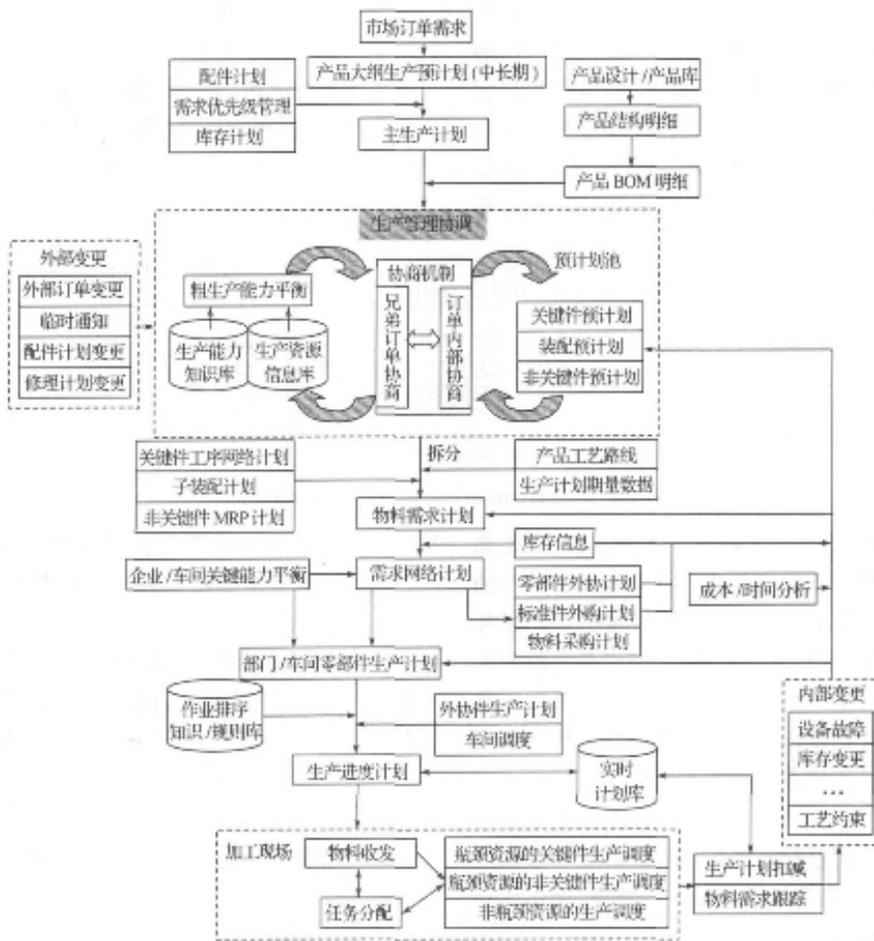


图 2 多层生产计划控制模型

Fig. 2 Multilayer production plan control model

其中包括必要的准备工作,如刀量具的准备过程、辅助工具的准备过程以及加工该零件所需要经历的工序、加工周期、提前期、在制量、废品率等计划期量数据等。

动态计划变更的整体一致性成为企业生产控制的瓶颈问题。因此,计划在生成过程中需要有反馈流程(事前反馈),并且反馈应尽可能在小范围内进行。而装配计划则除外,其不需要向上反馈,即不能反馈到网络计划层。因为子装配计划必须满足相应关键件的网络计划,否则影响整个产品的交货期。如果子装配能力不能满足,可以通过外协或加班等形式进行能力补充。同时,在计划执行过程中,由于临时通知、设备故障等不确定因素,计划可能不能按期完成,计划执行过程中也要进行反馈(事后反馈),即通过反馈控制计划的执行。

这种生产计划控制模型中,在资源能力约束下生产管理协调模块利用“推”的方式解决关键件的生产进度计划,而非关键件的作业任务的排定则完全依赖于整个生产网络中的约束条件,通过JIT的“拉”的方式进行自动安排,这样可以大大减少排序与资源负荷分配的难度,缩短企业制订生产计划的时间。同时,利用不同范围、不同层次的动态信息交互,保证了计划实施的一致性和

有效性。

2.2 基于工作流的系统并行控制机制

鉴于生产计划系统中的任务分配、工作调度和控制、任务和资源的协调等都属于典型的工作流问题^[4,5],本文探讨把工作流管理思想融入到多层生产计划中,研究支持多层生产计划的动态过程管理的实现方法。

2.2.1 定义工作流模板 系统中的工作流服务由一个或多个工作流机组成^[6],它完成以下功能:

- ① 根据计划的层次和计划任务解释工作流定义的元模型,生成过程实例,并管理其实施过程。
- ② 依据工作流相关数据实现流程活动决策,包括顺序、条件、部分并行、全部并行等操作。
- ③ 根据流程生成的任务项,从任务管理器获取任务的完成或其他状态信息。
- ④ 维护工作流控制数据和工作流相关数据,并向用户和上层传送必要的相关数据。

工作流过程定义的元模型如图3所示。上层规划下达的任务和本层时间段反馈的遗留任务共同构成了当前层当前计划的输入。对生产任务分批或者组批之后,根据产品工艺路线、物料清单以及设备状态、库存状态等制定当前计划的工序计划、物料需求计划和工装需求计划等。

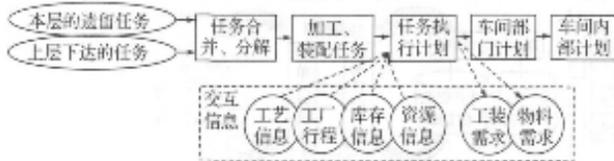


图3 工作流过程定义的元模型

Fig. 3 Metamodel of workflow process

2.2.2 工作流机的计划和调度并行运行过程系统采用了基于工作流的生产计划与调度并行的工作方式,如图4所示。生产计划根据生产任务流,考虑企业的生产能力约束,调整任务分配和生产调度;同样,生产调度也及时将车间的各种信息反馈给生产计划部门。工作流机的生产计划和调度并行运行过程包含5个基本阶段:

(1) 预计划

根据工作流过程定义生成初步的工作流执行序列,或在上层决策结果的基础上转换、细化或分解合并,得到适合当前层集成决策需要的工作流活动序列。

(2) 任务变更

动态监测、收集外部任务需求和本层及下层

任务执行情况的信息,为调整计划前进行企业资源能力平衡校核提供及时准确数据。

(3) 能力平衡校核

将工作流活动序列转换成分时间段的资源负荷,通过与相应时间段的资源可用能力(总能力减去在制负荷)比较得到资源能力使用情况报告。

(4) 加工中心协调

对生产计划及执行监控、资源能力校核、下层工作反馈等信息进行综合指标评价,为下一步计划和调度调整提供参考技术数据。

(5) 调整

针对系统的瓶颈对相应的活动进行本层局部的、有限度的调整,以缓解或消除瓶颈,但当这种调整需要涉及工作流的多个活动重组或超出了原

有 workflow 活动的范围时,则应由预计划甚至上层功能来完成。

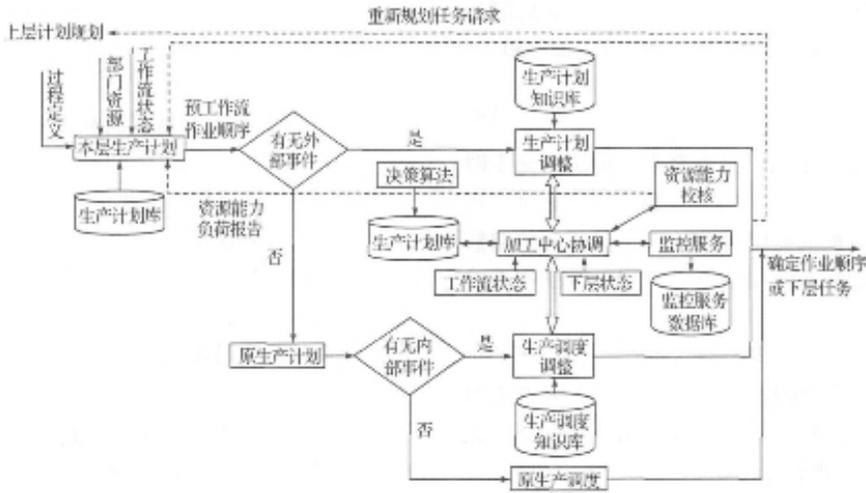


图 4 工作流机并行运行过程

Fig. 4 Parallel running process of workflow engine

3 网络计划编制及动态协调算法

对于复杂装备制造来说,生产提前期确定比较困难. 因此,为了解决物料拖期问题,本文采用关键路径节点伸缩控制协调算法^[7]来进行网络图编制及协调以求解子目标,并在伸缩算法中给出零部件生产计划的提前期修正系数的概念,在该系数指定的范围内对生产计划进行伸缩控制. 在调整生产计划时,尽可能在局部范围内协调生产计划.

设过程 i , 其初始关键路径上有 m 个节点, 分别为 $u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}$, 非关键路径上有 $(n - m)$ 个节点. n_{ij} 表示加工数量; t_{ijs}, t_{ije} 表示节点 j 的开始加工时间和结束加工时间; t_{ijw}, t_{ijp} 表示节点 j 的等待时间和准备时间; t_{ijm} 表示节点 j 的加工时间; LT_{ij} 表示节点 j 的提前期, $LT_{ij} = t_{ijw} + t_{ijp} + t_{ijm} \times n_{ij} = t_{i(j+1)s} - t_{ijs}$; 节点目标 $G_{ij} = (n_{ij}, LT_{ij}, t_{ijs}, t_{ije})$; ET_i 表示过程 i 的最早完工时间; DT_i 表示过程 i 的交货期; 则关键路径上活动的总伸缩时间 $FT_i = DT_i - ET_i$; $\eta_{i1}, \eta_{i2}, \dots, \eta_{im}$ 表示过程 i 中某个事项对应的伸缩系数. 则对于关键路径上节点, 有

$$G_{i1} = (n_{i1}, LT_{i1}, t_{i1s}, t_{i1e} + t_{i1m} + \eta_{i1} \times FT_i),$$

$$G_{ij} = (n_{ij}, LT_{ij}, t_{i(j-1)e}, t_{i(j-1)e} + t_{ijm} + \eta_{ij} \times FT_i);$$

$$j = 2, 3, \dots, m, \sum_{j=1}^m \eta_{ij} = 1 \quad (1)$$

对于非关键路径上的节点, 有

$$G_{ik} = (n_{ik}, LT_{ik}, t_{i(k-1)e}, t_{i(k-1)e} + t_{ikm} + \eta_{ik} \times FT_i);$$

$$k = m + 1, \dots, n, \eta_{ik} = 1/[m(n - m)] \quad (2)$$

协调算法主要采用两种驱动机制: 周期性驱动机制, 即生产任务执行一定的时间后, 对正在执行的零部件计划进行重新调度协调; 事件驱动机制, 即当意外事件 / 扰动因素发生时, 立即进行重新调度协调. 当发生某种扰动因素时, 采用如下 3 种协调方法:

(1) 事件驱动局部协调

仅针对加工时间不准确的扰动事件实行的动态协调算法, 以提高运算效率.

复杂装备通常是单件小批量生产, 所以零件加工时间不准确是装备制造过程中发生频率最高的事件, 也是经常引发重调度的事件. 如果每次发生加工时间不准确事件, 都利用调度算法的寻优机制重新分配资源, 并利用相应算法为每道工序确定起始加工时间, 必然会影响调度算法运算效率. 因此, 当生产监控中心预报某些零部件预期的完工时间晚于计划交货时间时, 尽可能在局部范围内调整生产计划, 即在单个车间或分厂内调整生产. 如果零部件在某个或几个车间或分厂产生拖期, 则可以通过对该零部件的计划目标进行松弛控制, 实现在局部范围内调整生产计划, 避免拖期.

在局部协调中, 从拖期零部件节点出发, 对原来的计划目标进行松弛, 增大该缺件物料的提前期修正系数, 减少关键路径其他节点的提前期修正系数. 局部协调方法是只通过重新确定各工序的起始加工时间, 而不必利用调度算法为每道工序重新分配加工资源. 因此, 可以较好地适应重调度敏捷性的要求.

在进行局部协调时,设过程 i 的关键路径上有 m 个活动,分别为 $1, 2, \dots, m$. 如果根据拖期情况, r 为拖期节点,则可以通过式(3)进行局部协调:

$$\max_{z \in up(r)} (t_{aze}^i) + \sum_{j=r}^m t_{pjw}^i (1 + \eta_j^i) < t_{pme}^i \quad (3)$$

式中: t_{aze}^i 表示 i 上某个上游节点 z 的实际完工时间; t_{pme}^i 表示节点 m 的计划完工时间; t_{pjw}^i 表示节点 j 的加工或装配提前期; η_j^i 表示节点 j 的提前期修正系数(必须为正数); $up(r)$ 为节点 r 的所有上游节点的集合.

(2) 事件驱动全局协调

针对设备资源故障及修复、具有更紧迫工期的零件到达、客户订单变更等扰动事件发生时必须立即执行的动态协调策略.

以上几种事件的发生会对调度计划的实施产生严重影响. 因此,必须对所有零件重新确定加工资源和工序起始时间. 对于生产计划执行过程中的拖期情况,由于车间或分厂的生产能力及以上几种不可预测的事件因素无法通过局部进行协调,需要在所有零部件生产过程的全局范围内进行全局协调. 但由于以上事件不是频发事件,全局协调也不会对运算效率产生很大影响. 全局协调时,从产品节点出发,对原来的目标进行松弛,增大该目标相对应的提前期修正系数,同时在整个生产过程范围内改变关键路径其他节点的提前期修正系数. 由于其他节点的松弛控制,需要在整个生产过程范围内对生产计划进行调整.

设某过程 i 的关键路径上有 m 个活动,分别

为 $1, 2, \dots, m$. 如果根据拖期情况, r 为拖期节点,则可以通过式(3)进行全局协调:

$$\max_{z \in up(r)} (t_{aze}^i) + \sum_{j=r}^m t_{pjw}^i (1 + \eta_j^i) < t_{pme}^i \quad (3)$$

其中 η_j^i 表示节点 j 的提前期修正系数(可以为正也可以为负).

(3) 周期驱动全局协调

加工过程到达预先设定的协调周期时或者在事件驱动局部协调和全局协调都无法使任务按原定计划执行时所必须实行的动态协调策略.

周期驱动全局协调的目的:一是把新到达的、工期不紧迫的加工任务纳入生产调度计划中来,二是当生产任务执行过程中的拖期情况无法通过松弛控制进行协调时,生产控制中心将不得不为拖期部分的生产任务进行再分配. 当然,必须选择合适的协调周期,如果协调周期太短,则要经常进行全局协调调度,使计算效率降低;反之,协调周期过长,又会由于拖期情况迟迟不能得到解决,无法起到更改任务计划的需要,还会使已经到达的工期不紧迫的零部件迟迟不能纳入到生产调度计划. 协调周期由生产控制中心根据生产进度进行确定.

4 系统实例

依据集成化多层推 / 拉式生产计划体系和多层生产计划控制模型,开发了某机车车辆有限公司的生产计划管理 PPS 系统,其管理界面如图 5 所示.



图 5 生产计划与紧急任务插单管理界面

Fig. 5 Correlative interface for production plan and the management of urgent job insertion

该 PPS 系统主要模块及功能如下.

(1) 网络计划模块. 主要依据网络图参数和能力约束条件编制网络计划,确定各网络工序的

起始 / 结束日期.

(2) 主生产计划管理模块. 主要实现主生产计划的管理,包括订单导入管理、部件(部套)准

备计划、主计划调整、主计划审核、主计划批准、主计划报表。其主要任务是依据市场订单生成工厂的主生产计划,后经部门领导的审核及批准,成为正式的主生产计划,作为MRPII计划的输入。

(3) 配件/大修计划管理模块。该模块可以进一步细分为配件/大修计划编制、配件/大修工作号管理和配件/大修综合查询3个二级子模块。其主要任务是依据市场订单或路用/大修需求生成工厂的配件/大修生产计划。

(4) MRPII计划编制模块。结合工厂行程中的生产周期和发出批量的定义,根据主生产计划,按产品结构分解求得所有非关键件零件计划。然后,吸纳关键件计划、关键件分部门及其分月计划编制、零件计划、零件分部门及其分月计划。最后,将这些计划下达到各执行部门/分厂。

(5) 分厂/工段计划编制模块。该模块包括分厂分工段计划、工段作业计划、派工单管理,将MRPII计划中的零件计划细化落实到工段、工序、设备、工班和操作者。

(6) 派工单数据采集汇总模块。依据派工单,按劳动力、设备、任务分别进行采集。经过汇总,可得到各级计划的汇总数据。然后,根据执行情况编制各级滚动计划,实现整个企业生产计划管理的敏捷化闭环控制。

5 结 语

基于网络计划的多层生产管理体系借助于基

于 workflow 思想的生产计划和调度并行运行机制,克服了机车等复杂装备企业因生产提前期不准确而导致的计划安排不合理等问题。并通过动态网络计划编制和协调算法,较好地解决了企业生产计划的完整性和动态计划变更的一致性问题。为企业合理安排生产计划和动态了解生产进度、制定面向订单和细化到零件的生产计划管理等提供了一种有效的企业信息化解决方案。

参考文献:

- [1] 赵晓颖, 巩应奎, 梅中义, 等. 基于MRPII-MES的生产计划控制和调度[J]. 航空维修与工程, 2004, 3: 31-33
- [2] 王军强, 孙树栋, 余建军, 等. 集成化生产计划管理与控制模型[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(9): 1223-1228, 1233
- [3] 朱云龙, 于海斌. 面向客户的随机动态生产管理模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(3): 14-18
- [4] ARPINAR B. Formalization of workflows and correctness issues in the presence of concurrency [J]. *Distributed and Parallel Database*, 1999, 7(2): 199-248
- [5] 范玉顺, 罗海滨, 林慧苹, 等. workflow 管理技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001
- [6] 蒙秋男. 可重构制造执行系统(MES)研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004
- [7] 林慧苹, 范玉顺, 吴澄. 基于分层调度模型的生产计划和调度集成研究[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(8): 602-606

Agility-oriented production planning management system for complex equipment enterprise

XUE Dong-juan^{*1,2}, MENG Qiu-nan¹, LÜ Zhi-jun¹, LIU Xiao-bing¹

(1. CIMS Cent., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2. School of Mech. Eng., Dalian Fisheries Univ., Dalian 116023, China)

Abstract: To solve the problem of the production plan integrality and dynamic modification consistency for complex equipment enterprises, an integrated multilayer PUSH-PULL production plan management system based on CPM (critical path method) is put forward, and a production plan control model based on the realization methods of dynamic process management of multilayer production plan and resources optimization is constructed. A parallel operational mechanism of production planning and scheduling based on workflow management is advanced. And aiming at the problem of materials tardiness, CPM dynamic planning and coordinating algorithm are set up. These measures guarantee the veracity of the activity planning and modification consistency of production planning.

Key words: complex equipment; plan modification; workflow; materials tardiness