

# 基于库存和在线生产的仓库发货配置方法<sup>①</sup>

张杰, 陈进, 杨洋, 邓玉锋, 刘琴, 崔峻华

(江南大学 机械工程学院, 无锡 214122)

**摘要:** 针对离散型加工装配企业不同订单复杂产品的零部件发货配置最优化问题, 提出了一种全新的仓库发货配置方法. 它以按时交货和订单损失最小作为评价准则, 以当前的生产状态为基础, 找出当前产品加工和装配的工艺中余留最长的生产路线, 并结合库存状态和订单的重要程度确定发货的优先程度, 最终分别通过整单出厂和分步出厂两种发货模式实现了零部件的最优发货配置.

**关键词:** 在线生产; 库存状态; 发货配置; 物料清单(BOM)

## Warehouse Delivery Configuration Method Based on Inventory and Online Production

ZHANG Jie, CHEN Jin, YANG Yang, DENG Yu-Feng, LIU Qin, CUI Jun-Hua

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** A new warehouse delivery configuration method is proposed for the delivery configuration optimization problem of component parts of complex product of different orders in discrete processing and assembly enterprises. It takes on time delivery and minimum loss of order as the evaluation criterion. It is based on the current production status to find out the longest remaining production line in the processing and assembly process. The priority level of deployment is determined by inventory status and the importance of the order. In conclusion corresponding optimal delivery configurations are developed by the mode of delivery in whole order and the mode of delivery in several times.

**Key words:** online production; inventory status; delivery configuration; BOM(Bill of Material)

### 1 引言

企业接受的订单必须按时交货, 否则不仅面临赔偿问题, 更有可能失去市场. 每笔订单的交货时间和重要性不同, 其相互之间既有联系又有冲突, 当因生产进程发生变化而不能按原有计划发货时, 为了保证企业的总体利益, 应该及时调整生产计划, 减少损失. 针对离散型加工装配企业, 装配的要求是齐套完整、交货及时. 中间仓库接受的半成品或零部件都是逐步完工的, 发料时一般根据生产计划进行, 但是当各个生产工序受意外因素的干扰而偏离计划时, 中间仓库的出库配置却不敢改变原有发货计划, 常常不能在最需要的时间发出最合适的零部件, 从而对企业利益造成不必要的损失.

对于离散型加工装配企业小批量多品种的生产模

式, 并没有合适的方法能够有效的减少生产等待时间过长, 出厂延迟的通病. MRP 的生产组织方法能够精确地安排各个生产工序, 并根据现场的实际情况作出调整, 但是该方法由于生产状态的不透明而难以实现. 近些年随着技术的进步, 较多的学者开始研究这种方法的应用技术问题, 但要达到完全的成熟还需要努力.

本文提出一种全新的发货配置的方法. 该方法以中间仓库作为控制节点, 通过中间仓库的发货配置调节生产计划, 使得重要的订单优先获得生产, 保证企业的利益最大化. 这种方法能够考虑所有已经入库的库存, 调整的工作量较小, 对现场生产没有冲击, 作业转换的成本最小, 管理控制极为容易.

国外研究者多从评价方法、订单到达、设备、物料特性、仓库环境等不同的角度探索最优的发货方法.

<sup>①</sup> 收稿时间:2013-09-08;收到修改稿时间:2013-10-22

他们很关注从仓库货架取货到出库过程中的货品选取、传输的效率问题,并且这些问题可分为三类: Jose 把研究对象集中在仓库出库时如何用最短的时间从货架上取得产品,分析了动态订单和静态订单的两种处理算法,即后续插入法和再调度方法.前者具有在线竞争性,后者则能够减少配置时间.他认为静态订单是不随时间变化的稳定订单,动态订单则是随机到达的订单,解决办法是生成各货架上产品的出货顺序,达到传输距离短、耗时短的要求.采用以获取和传输时间最短的启发式算法<sup>[1]</sup>;确定的订单与随机到达的订单相结合的情况,其是以排队论方法解决在线调度问题,其文献见<sup>[2]-[3]</sup>;有一些理论关注到了抓取和传输设备的问题,不同的设备代表着不同的抓取和运送方式,效率差异较大,算法也就不一样,见<sup>[4]-[9]</sup>.

国内有关库存的前沿研究是将其作为供应链的节点,在生产、贮存、运输各个环节追求总成本的最低,有三种基本思路:其一是基于数量的发货策略,即将小批量的发货按规则集中成大批量的发货,追求成本的最小化<sup>[10]</sup>;另一种是按一定周期固定时间发货,追求服务水平的最优;其三是前两者的混合发货模式,兼顾成本和顾客满意度二者的平衡<sup>[11]-[12]</sup>.

综上,就笔者所查文献而言,还没有发现将生产过程的需求与仓库发货关联起来的研究,就是说利用中间仓库调整生产计划的执行还鲜有关注.

传统的方法为了保证不同产品中的相同零部件不会混用而影响订单的及时交货,一般采用“锁库”操作,即明确每样半成品或零部件归属的订单不可逾越发货.这样做虽然保证了零部件与产品批次的关系清晰,但是失去了灵活性从而降低了及时交货率,例如生产中常有相同的物料的急件和慢件,而且慢件可能早已生产出来而不必马上交货,但人们却不敢随便动用慢件的储备满足急件的需要,因为担心会导致一系列的物料混乱影响总的效益.

### 1 数据建模

加工-装配式的产品结构如图 1 表示的制造 BOM.

加工-装配式的生产的工艺路线用两层实体关系来建模,如图 2 所示.产品依照加工和装配关系由部件、零件、毛坯构成,层次和配置的零件数以及构成的实体随各个产品而变.制造 BOM 中所有的元素都具备实体和子实体两类角色,作为实体表示其在指定

的设备上以一定的加工时间被加工,同时它是由 0 到多个子实体构成,子实体构成实体的数目就是结构系数 k.如果实体是产品的最下一级的结构如毛坯、零件等,则其子实体就为空.

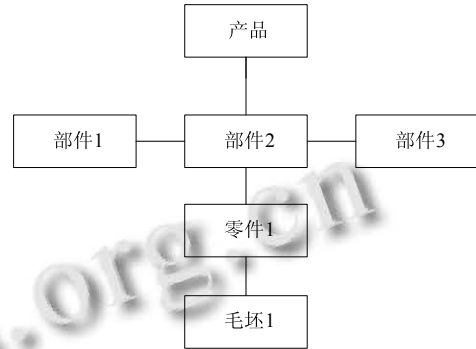


图 1 加工-装配式的产品制造 BOM

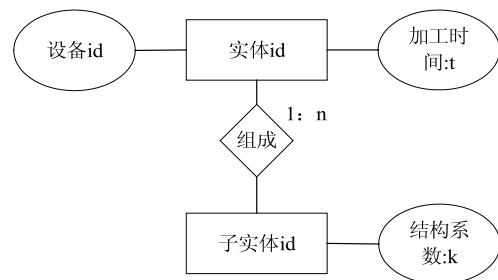


图 2 加工-装配式生产的工艺路线实体关系

发货可能在 BOM 的各个层次进行,我们约定:如果实体有需求数,则其子实体也同时有不低于该实体需求数与结构系数的乘积的需求数,而当实体的需求数被满足或部分满足后,其相关的子实体的需求数应被扣减.

设 s 为产品批号, i 为产品或其部件实体的识别号,  $t_{si}$  为制造实体 i 在 s 批生产任务中耗费的时间.在上述制造 BOM 中,每个子实体对应一个实体,于是通过递推方式可以算出每个实体对应的一系列上级实体,直到最上面的产品.  $\hat{i}$  表示子实体 i 的上级实体标识,用函数 f 表示该递推过程:  $\hat{i} = f(i)^{(1)}$ ,  $\hat{\hat{i}} = f(\hat{i}) = f(f(i)) = f(i)^{(2)}$ ,假设从实体 i(不包括 i)到最上层的产品共有 m 层,则表示成  $\hat{\hat{\hat{i}}} = f(i)^{(m)} =$  产品 id. 同时设:

$$L_{si}(t) = \max \left\{ \lambda \sum_{h=0}^m t_{s, f(i)^{(h)}} \right\}$$

$L_{si}(t)$  表示从实体 i 开始直到其所有上层实体的

最长加工时间与宽放度  $\lambda$  的乘积, 宽放度  $\lambda$  表示实际经历的加工周期与净加工时间的比值,  $\lambda$  根据经验或统计数据取值,  $\lambda > 1$  并随车间的任务量、生产系统的稳定性和计划排产的优劣而变化.

$\Delta s_i$  表示  $s$  批实体  $i$  交货时间与当前时间差值,  $\Delta s_i = \tau_{\hat{f}(i)} - X_{s_i}$ ,  $\tau_{\hat{f}(i)}$  表示实体  $i$  的交货时间,  $X_{s_i}$  表示当前时间.

$\Gamma_{\hat{f}(i)}$  表示产品订单的重要性, 可以依据订单价值或潜在价值取值.  $\Gamma_{\hat{f}(i)} = p_{\hat{f}(i)} \cdot q_{s,i} / k_{s,i}$  其中表  $p_{\hat{f}(i)}$  示产品  $\hat{f}(i)$  的单价,  $q_{s,i}$  表示实体  $i$  剩余未产出的欠缺量,  $k_{s,i}$  表示实体  $i$  的结构系数.

为准确地估计每张订单的重要程度, 设置配置指数  $\beta_{s_i}$ , 该指数应能体现以下原则: (1) 订单的重要性(价值, 潜在价值等), 重要性越大则指数越大. (2) 完成订单的难度, 难度越大配置指数应越高, 难度与以下因素有关; 离交货期时间短, 同时余留的工作量大, 则难度大; 时间短, 而设备却很忙, 则难度大; 余留的作业出意外的可能性大, 难度大. (3) 离交货期的时间长度小于  $L_{s_i}(t)$  时, 其重要程度迅速增加, 否则其重要程度迅速降低. 综合以上因素, 设计实体  $i$  的配置指数为:

$$\beta_{s_i} = \max \left\{ \frac{|L_{s_i}(t) - \Delta_{s_i}|}{1 + e^{3(L_{s_i}(t) - \Delta_{s_i})}} \Gamma_{\hat{f}(i)} \right\} \quad (1)$$

令  $d_{s_i}$  表示实体  $i$  在本次仓库发出的原料数量.

针对 BOM 统计欠缺量时的规则:

上层已经完工的量包含其下层已经完工的量;

上层的欠缺量, 在以下各层均要标示, 各自统计;

共用件的总欠缺量是各个产品该共用件欠缺量的总和, 但是在各自的产品内部的共用件的欠缺量各自统计.

为便于按照统一的标准评价紧急程度, 设  $\tilde{q}_i$  是实体  $i$  在整个生产订单中的初始总需求量,  $\bar{q}_i$  是实体  $i$  在整个生产订单中的已经入库的总量,  $\hat{q}_{s_i}$  是实体  $i$  在  $s$  批订单中的初始需求量. 在每次计算配置系数时每个 BOM 节点的零部件的欠缺量按以下公式计算:

$$q_{s_i} = \hat{q}_{s_i}, \text{ 当 } \hat{q}_{s_i} < \tilde{q}_i - \bar{q}_i \text{ 时.}$$

$$q_{s_i} = \tilde{q}_i - \bar{q}_i, \text{ 当 } \hat{q}_{s_i} \geq \tilde{q}_i - \bar{q}_i \text{ 时,}$$

在车间发货时, 由计算机根据当前每个订单的每个产品的实际生产进度, 及订单的价值和后续的提前期数据, 算出各个参数, 最后得到配置系数  $\beta$ , 发货时要保证配置系数高的订单首先满足零部件的供应,

这样发货以后余留的产品的配置系数就降低. 从全局来看企业追求总的订单的损失最小, 所以发货的策略应该使所有产品余留的配置系数之和最小. 配置方案包括配置的零部件的数量和发货时间, 如果发货配置方案允许部分满足产品的数量要求, 则每一个配置方案实现后, 余留的配置系数之和最小的配置方案才是最优的方案.

有两种不同的仓库发货配置方案: 整单出厂和分步出厂.

整单出厂是指在现有件号库存量一定的情况下, 依据  $\max(\beta_A, \beta_B, \beta_C)$  确定配置系数最高的订单, 并进一步确定该订单中配置系数最高的件号  $i_1$ , 在发货配置时优先配置该件号的零部件, 直至  $\bar{q}_{i_1} = 0$  或  $q_{s_{i_1}} = 0$ . 当件号  $i_1$  配置结束后重新计算  $\beta_A, \beta_B, \beta_C$ , 再参照  $i_1$  的配置方法配货  $i_2$ .

分步出厂是指为实现企业总的订单的损失最小, 在现有件号库存量不变的情况下, 分割订单数量, 确定件号  $i$  所对应的  $d_{A_i}, d_{B_i}, d_{C_i}$  的值使得所有产品余留的配置系数之和最小, 即:

$$B = \min(\sum \beta_{s_i}) = \min(\sum \beta_{A_i} + \sum \beta_{B_i} + \sum \beta_{C_i}) = \min(\sum_{i=1}^8 (\beta_{A_i} + \beta_{B_i} + \beta_{C_i})) \quad (2)$$

下面以具体算例详细分析整单出厂和分步出厂的具体步骤.

## 2 算例

现有三个产品订单 A、B、C, 分别订货 30、40、50 件, 交货期分别为 25、35、45, 其 BOM 如图 3 所示. 图中方框内的字符表示实体名称, 括号内的数字表示紧接上面的实体的加工时间, 三个订单的单价分别为 2、3、4, 当前时间设为 10.

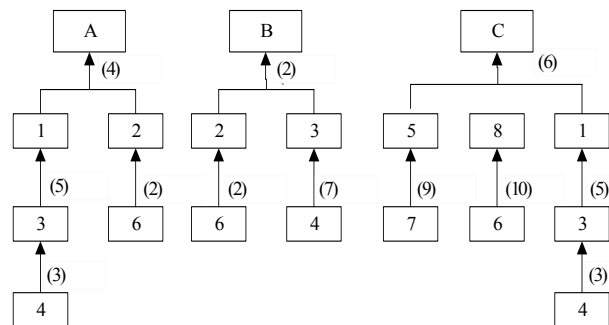


图 3 产品 BOM 图

最底层零部件的实际需要数量如表 1:

表 1 底层零件实际需求量

件号	4	6	7
需求数	120	120	50

仓库目前接受入库的零部件如表 2 所示:

根据现场采集的数据预测剩余的工件的数量和完工时间, 取  $\lambda=2$ .

表 2 零部件库存配置统计表

件号	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tilde{q}_i$	80	70	120	120	50	120	50	50
$\bar{q}_i$	30	20	40	20	0	50	35	0
$\hat{q}_{si}$	30, 0, 50	30, 40, 0	30, 40, 50	30, 40, 50	0, 0, 50	30, 40, 50	0, 0, 50	0, 0, 50
$q_{si}$	50	50	80	100	50	70	15	50
$\Delta si$	15, 0, 35	15, 25, 0	15, 25, 35	15, 25, 35	0, 0, 35	15, 25, 35	0, 0, 35	0, 0, 35
$L_{si}(t)$	8, 0, 12	8, 4, 0	18, 4, 22	24, 18, 28	0, 0, 12	12, 8, 32	0, 0, 30	0, 0, 12
$p_{\hat{f}(t)}$	2, 0, 4	2, 3, 0	2, 3, 4	2, 3, 4	0, 0, 4	2, 3, 4	0, 0, 4	0, 0, 4
$\Gamma_{\hat{f}(t)}$	100, 0, 200	100, 150, 0	160, 240, 320	200, 300, 400	0, 0, 200	140, 210, 280	0, 0, 60	0, 0, 200
$\beta_i$	$5.31 \times 10^{-7}$ 0 $4.97 \times 10^{-27}$	$5.31 \times 10^{-7}$ $1.37 \times 10^{-24}$ 0	479.94 $2.20 \times 10^{-24}$ $4.80 \times 10^{-14}$	1800 $1.59 \times 10^{-6}$ $2.12 \times 10^{-6}$	0 0 $4.97 \times 10^{-27}$	0.05 $2.53 \times 10^{-19}$ 0.1037	0 0 $9.18 \times 10^{-5}$	0 0 $4.97 \times 10^{-27}$

根据式(1), 可计算出产品 A, B, C 的配置系数:

$$\beta_A = \max \left\{ \frac{|L_{ij}(t) - \Delta_{ij}(t)|}{1 + e^{3(L_{ij}(t) - \Delta_{ij}(t))}} \Gamma \right\} = \frac{24 - 15}{1 + e^{3(15-24)}} \cdot 200 = 1800$$

$$\beta_A = \max \left\{ \frac{|L_{ij}(t) - \Delta_{ij}(t)|}{1 + e^{3(L_{ij}(t) - \Delta_{ij}(t))}} \Gamma \right\} = \frac{|18 - 25|}{1 + e^{3(18-25)}} \cdot 300 = 1.5923 \times 10^{-6}$$

$$\beta_A = \max \left\{ \frac{|L_{ij}(t) - \Delta_{ij}(t)|}{1 + e^{3(L_{ij}(t) - \Delta_{ij}(t))}} \Gamma \right\} = \frac{|32 - 35|}{1 + e^{3(32-35)}} \cdot 280 = 0.1037$$

发货时要保证配置系数高的订单首先满足零部件的供应, 这样发货以后余留的产品的配置系数就降低. 故应首先满足 A 订单的零部件需求, 其次是 C 的零部件需求, 再次为 B 的零部件需求. 下面依据整单出厂和分步出厂两种不同的方法确定最优配置方案.

整单出厂: 由表 2 可知, A 产品件号 4 最紧急, 故应将仓库中的 20 件件号 4 首先配置给 A 产品. 重新确定各项  $\beta$  值确定新的配置统计表 3, 由于件号 4、5、8 入库数为 0, 所以在新的配置表中不在体现.

表 3 配置统计表

件号	1	2	3	6	7
$\tilde{q}_i$	80	70	120	120	50
$\bar{q}_i$	30	20	40	50	35
$\hat{q}_{si}$	30, 0, 50	30, 40, 0	30, 40, 50	30, 40, 50	0, 0, 50
$q_{si}$	50	50	80	70	15
$\Delta si$	15, 0, 35	15, 25, 0	15, 25, 35	15, 25, 35	0, 0, 35
$L_{si}(t)$	8, 0, 12	8, 4, 0	18, 4, 22	12, 8, 32	0, 0, 30
$p_{\hat{f}(t)}$	2, 0, 4	2, 3, 0	2, 3, 4	2, 3, 4	0, 0, 4
$\Gamma_{\hat{f}(t)}$	100, 0, 200	100, 150, 0	160, 240, 320	140, 210, 280	0, 0, 60
$\beta_i$	$5.3078 \times 10^{-7}$ 0 $4.9709 \times 10^{-27}$	$5.3078 \times 10^{-7}$ $1.3733 \times 10^{-24}$ 0	479.9408 $2.1972 \times 10^{-24}$ $4.8041 \times 10^{-14}$	0.0518 $2.5331 \times 10^{-19}$ 0.1037	0 0 $9.1771 \times 10^{-5}$

由表 3 可知, A 产品件号 3 最紧急, 故应将仓库中的 30 件件号 3 首先配置给 A 产品. 重新计算各项  $\beta$  值确定新的配置统计表, 并依据  $\beta$  值完成仓库中剩下各

个零件的配置。

分步出厂：从全局来看企业追求总的订单的损失最小，所以发货的策略应该是使所有产品余留的

配置系数之和最小，依据式(2)有：

$$B = \min(\sum \beta_{si}) = \min(\sum \beta_{Ai} + \sum \beta_{Bi} + \sum \beta_{Ci})$$

$$= \min(\sum_{i=1}^8 (\beta_{Ai} + \beta_{Bi} + \beta_{Ci}))$$

由于每个件号的 $\beta$ 互不影响，故只需确保每个件号的 $(\beta_A + \beta_B + \beta_C)$ 取得最小值即可。

例如，当 $i=3$ 时，

$$\min(\beta_A + \beta_B + \beta_C) = \frac{|18-15|}{1+e^{3(18-15)}} * 2 * (30-d_A) + \frac{|4-25|}{1+e^{3(4-25)}} * 3 * (40-d_B) + \frac{|22-35|}{1+e^{3(22-35)}} * 4 * (50-d_C) = 6(30-d_A) + 2.7 * 10^{-26} (40-d_B) + 6 * 10^{-16} (50-d_C)$$

其中约束条件为：

①  $d_A + d_B + d_C \leq 40$ ，总的发货数应小于入库数；

②  $0 \leq d_A \leq 30$ ，发货数应小于需求数；

③  $0 \leq d_B \leq 40$ ；

④  $0 \leq d_C \leq 40$ ，发货数应小于入库数。

上式可转换为一般线性规划问题的求解，即：

$$\min(\beta_A + \beta_B + \beta_C) = \text{常数} - 60 * d_A - 6 * 10^{-16} * d_C - 2.7 * 10^{-26} * d_B$$

在满足约束条件的情况下，取 $d_A=30$ ， $d_B=0$ ， $d_C=10$ 时， $(\beta_A + \beta_B + \beta_C)$ 取得最小值，所以当仓库发货件号3时，应首先给A产品发货30件，再给C产品发货10件。

同理可求得件号1,2,4,5,6,7,8的 $d_A$ ， $d_B$ ， $d_C$ ，分别使得 $(\beta_A + \beta_B + \beta_C)$ 取得最小值。

### 3 结语

本文所研究的仓库发货配置方法在库存状态和生产状态的基础上通过发货配置来达到控制生产优先顺序的目的，这种方法能够考虑每个订单的重要程度和所有已经入库的零部件，调整的工作量较小，管控过程简单，使得中间仓库能在最需要的时间发出最合适的零部件来引导生产，解决了当生产工序受意外因素的干扰而偏离计划时调整过程的繁琐和不及问题。另外本方法有以下几点说明：

(1) 利用中间仓库的发货调整生产计划是以生产过程的状态为依据的，这些状态就是当前的加工处于工艺路线的位置；

(2) 要有完备的工艺计划，作为计算剩余工作量的依据；

(3) 中间库发货的调整通过配置指数作为优先级，

以订单的重要程度，完工的紧迫性为参数：

(4) 根据配置指数最高或订单的损失最小，有整单出厂或分步出厂的最优发货策略。

### 参考文献

- Rubrico JIU, Higashi T, Tamura H, Ota J. Online rescheduling of multiple picking agents for Warehouse management. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(1): 62-71.
- Parikh PJ, Meller RD. A travel-time model for a person-onboard order picking system. European Journal of Operational Research, 2010, 200(2): 385-394.
- Pan JCH, Wu MH. Throughput analysis for order picking system with multiple pickers and aisle congestion considerations. Computers & Operations Research, 2012, 39(7): 1661-1672.
- Min X, Liu J, Wang YQ. Optimal semi-online algorithms for scheduling problems with reassignment on two identical machines. Information Processing Letters, 2011, 111(9): 423-428.
- Albers S. Recent advances for a classical scheduling problem. Automata, Languages, and Programming. Lecture Notes in Computer Science. 2013, 7966: 4-14.
- Albers S, Hellwig M. On the value of job migration in online makespan minimization. Algorithms-ESA 2012. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7501:84-95.
- Sanders P, Sivadasan N, Skutella M. Online scheduling with bounded migration. Mathematics of Operations Research, 2009, 34(2): 481-498.
- He Y, Dósa G. Extension of algorithm list scheduling for a semi-online scheduling problem. Central European Journal of Operations Research, 2007, 15 (1):97-104.
- Averbakh I. Online integrated production-distribution scheduling problems with capacitated deliveries. European Journal of Operational Research. 2010, 200(2): 377-384.
- 李华,刘志学,汪小京,郑长征.考虑运输能力约束的VMI补货发货动态批量研究.工业工程与管理,2011,16(1):41-46.
- 全江华.生产-库存系统的仿真及优化[硕士学位论文].上海:华东师范大学,2005.
- 徐卫,陈晓.需求预测在库存与发货策略中的应用.计算机时代,2009,(5):44-45.