

考虑时间序列关联的订单选择决策比较研究^①

张人千

(北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

摘要: 在不同计划期的订单之间有可能存在时间序列关联, 而现有生产计划模型大多不考虑这一关联关系对订单选择决策的影响. 针对这一问题, 以接单生产方式为背景, 基于时间序列关联规则, 建立了一个权衡当前与未来利润的订单选择决策模型, 而将不考虑时序关联关系的订单选择模型作为比较研究的 Benchmark 问题. 在数值仿真实验中, 设计了一个动态随机的订单到达流, 采用分阶段求解策略, 以权重优先算法针对不同决策情景, 分别基于两个模型进行决策并比较其决策结果. 数据显示, 在订单流中存在关联性的情况下, 考虑时序关联关系的决策模型较优, 证明在生产计划中考虑需求在时间方向上的关联性是必要的.

关键词: 订单选择; 时间序列关联; 接单生产

中图分类号: F203 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2009)03-0044-12

0 引言

出于应对需求不确定和控制库存的考虑, 接单生产方式 (Make-To-Order MTO / Built-To-Order BTO) 已有了广泛应用^[1~6]. 在 MTO / BTO 中, 生产能力在短期内相对固定, 有可能难以满足市场需求, 因而企业就需要进行订单选择决策, 其目的即是要确定一个最优的产品组合策略, 以使收益最大. 近十年来, 订单选择问题已经有了很多研究^[7~10], 其模型可以描述如下^[7, 8]:

设一个工厂收到了 n 个订单, 对于某订单 i , 其处理时间为 a_i , 交货期为 d_i , 销售收入为 p_i . 考虑生产能力限制, 某些订单可能需要延迟生产, 因而招致一个惩罚, 设 w_i 表示延迟惩罚系数, c_i 为订单 i 的完成时间. 设 S 为所有订单的某个子集, o 是订单子集 S 的一个排序. 则订单选择的决策目标就是寻找一个订单集合 S 和订单排序 o 以最大化收益函数: $z(S, o) = \sum_{i \in S} [p_i - w_i(c_i - d_i)]$. Ghosh 证明这是一个考虑订单排序的 0-1 整数规划问

题, 且具有 NP-hard 的计算复杂性^[8]. 因此, 目前多数关于订单选择的研究集中于寻找一种高效的求解算法.

在上述模型中, 所有的订单信息在决策的初始阶段都是已知的, 不涉及多计划期转换, 因而是一个单阶段的静态决策问题. 且假设产出量或者订单选择决策不影响未来的市场需求——需求在时间序列方向上统计独立或不具有因果关系. 但实际上, 需求会受到季节性因素的影响^[11], 或者是时间的函数^[12], 甚至依赖于库存产品对于顾客的满足程度^[13]. 另一方面, 由于产品之间的配套关系、前一计划期的销售对后一计划期需求的诱导作用、相关需求^[14] 等问题的存在, 有研究发现不同时间段的需求之间是序列关联的. 因此文献 [15] 假设第 t 期需求是第 $t-1$ 期需求和库存的函数, 即 $d_t = g(S) + kd_{t-1} + r_t$, 其中 $g(S)$ 为库存 S 的一个函数, 而由于随机因素的影响, 还考虑了一个随机噪声项 r_t . 总之, 如果进行多阶段订单选

① 收稿日期: 2007-07-16; 修订日期: 2009-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70501002 70871005); 航空科学基金资助项目 (2007ZC51075).

作者简介: 张人千 (1974—), 男, 陕西商洛人, 副教授, 博士. Email: zhangrenqian@buaa.edu.cn

择生产计划决策, 则有必要考虑当前需求 / 订单和将来需求 / 订单的相关性.

对于多阶段订单选择问题, Slotnick and Lewis建立的模型假设所有订单信息在决策开始时就是已知的, 包括单价、数量、交货期和生产时间. 而且还假设, 如果某个订单在某计划期 k 被拒绝, 则相应的顾客在此后的计划期 $(k + 1, \dots, T)$ 将永远流失而不可挽回^[16].

考虑相反的情况: 有时候工厂可能会收到一个利润一般甚至很低的产品订单, 如果按照当前利润确定订单生产计划, 则该订单可能会被拒绝. 但是, 从以往的经验可以知道, 该订单很可能在未来引致一个高附加值的订单. 此时, 决策者完全有可能拒绝某些常规订单, 而转向接受该小附加值的订单——甚至不顾当前可能的局部亏损. 也就是说, 如果接受一个订单能够以一定的概率在未来某个计划期引致另一个高额利润的订单到达, 则该如何决策?

基于这个思路, 本文考虑两种生产计划模型: 一种认为订单的到达是时序独立的, 不考虑生产系统当前决策对未来需求的影响, 因而是一种“近视”的决策模型; 另一种是带关联关系的订单选择决策模型. 该模型考虑生产系统当前决策对未来需求的影响, 是一种比较有“远见”的生产计划模型. 本文将分别建立这两个模型, 以比较考虑关联关系的决策与传统不考虑关联性的订单选择决策的差别, 探讨订单的时间序列关联对生产计划的影响.

为简化计, 模型定位于综合计划层, 暂不考虑订单生产的排序问题

1 时序独立的订单选择模型

考虑 Balakrishnan 等人研究过的一种产品具有典型的季节性和即时性需求的综合生产计划问题^[17]. 因为产品的季节性和易逝性, 要求在某个计划期拿到的订单基本上要在该计划期内完成, 否则将失去订单. 诸如流行服装生产、季节性食品生产等, 都具有这类特点. 本文也考虑类似的生产系统, 为简化决策模型和分析过程, 对生产系统所处的决策情景作如下假设:

• 由于产品的季节属性, 生产能力和市场需求不能推迟或转移到以后的计划期;

• 订单一旦到达, 就应该立即决策是否接受该订单, 决策一旦做出, 将不能随意改变;

• 一个订单只包括一种产品, 如果有多个产品的订单, 则拆分为单产品订单;

• 严格的 JIT 和 MTO, 不允许延迟和提前生产, 因而不考虑延迟惩罚 (可用外包来解决产能不足);

• 企业不能接受某订单的部分需求, 它或者全部接受, 或者全部拒绝;

按照上述假设, 若不考虑不同计划期订单之间的关联关系, 则可以建立一个时序独立的订单选择决策模型, 作为关联性订单选择模型比较研究的 Benchmark 问题 (Model Benchmark——MB). 表 1 给出了该模型的所有参数符号和决策变量.

表 1 时序独立的订单选择决策模型符号

Table 1 Notations of order selection decision model in which orders are independent

参数 / 变量	说明
t	决策计划期 ($t = 1, \dots, T$)
x_{ij}	计划期 t 是否接受产品 i 的第 j 个订单 ($x_{ij} = 1$ 接受, 0 拒绝)
i_{ij}	某计划期 t 产品 i 的第 j 个订单
$m_i(t)$	计划期 t 所到达的产品 i 的订单总数
$m(t)$	计划期 t 生产的产品种类数
p_{it}	计划期 t 订单 i 的单位产品销售收入, $1 \leq i \leq m(t)$
d_{ij}	计划期 t 某订单 ij 的产品订货量
b_t	计划期 t 企业的最大生产能力
a_i	计划期 t 单位产品 i 的产能消耗
c_i	计划期 t 单位产能的费用

对计划期 t 以利润最大为目标函数, 决策模型如下

$$\max f_t(x) = \sum_{i=1}^{m(t)} \sum_{j=1}^{m(i,t)} x_{ij} (p_{it} - a_{it} \cdot c_t) d_{ij} \quad (1)$$

能力约束

$$\sum_{i=1}^{m(t)} \sum_{j=1}^{m(i,t)} x_{ij} \cdot a_{it} \cdot a_{ij} \leq b_t \quad (2)$$

注意, 虽然该决策模型并没有考虑某订单所可能引起的未来订单, 但这并不等于说在订单流中, 订单关联关系不存在. 假设在历史数据上, 计划期 t 的某订单 ij 能在 $t + \Delta t$ 计划期引起另一个高额利润订单 $i'j'$, 如果订单 i 在第 t 计划期被选中, 则它应该以一定的概率引起计划期 $t + \Delta t$ 订单 $i'j'$ 的到达 —— 虽然决策模型没有考虑关联性. 当然, 如果该模型在第 t 计划期的决策没有选择订单 ij 则未来不会以一定概率引致订单 $i'j'$ 的到达.

2 时间序列关联的订单选择模型

2.1 时间序列关联

在关联挖掘中, 普通关联规则可以表达同时出现的订单 / 需求之间的相关关系^[18, 19]. 而时间序列关联规则是表达时间序列相关性的一个重要方法^[20-22].

如引言所述, 订单之间是具有时序关联性的. 但是需求之间的序列相关性并不一定能如文献 [15] 那样容易的表示成解析形式, 而时间序列关联规则却可以不依赖于解析函数表达式直接从已知数据集中发现关联性. 因此, Zhang 和 L 提出从历史订单信息库中挖掘订单的时间序列关联规则来表示不同计划期的需求或订单之间的时间序列关系^[23].

设集合 $S_t (t = 1, \dots, T)$ 是企业 在计划期 t 收到的订单集合. $S_t = \{s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_{n_i(t)}, \dots\}$ 由 $\sum_{i=1}^{m(t)} m_i(t)$ 个订单组成. 每个订单信息可以使用一个三元组表示: $s_j = \{z_1, z_2, z_3\}$, 其中 z_1 是产品种类, z_2 是产品订货量, z_3 是交货期.

已经有文献对属性值的离散化方法作了深入研究^[24], 本文重点放在生产计划问题上, 而假设订单数量等属性值的离散化结果已知. 例如, 在订单信息中, 可将订货数量 z_2 离散化为数量高 - H , 数量中等 - M , 数量低 - L , 则得到类似表 2 的订单统计信息 (符号 A, B, C, D 表示产品种类).

表 2 订单信息数据表

Table 2 Orders information

计划期 t	(种类, 数量) / (Z_1, Z_2)
1	(A, H); (C, M); (A, M)
2	(A, L); (B, M); (C, H)
3	(D, M); (D, L)
4	(B, L); (D, H)
...	...

对订单信息进行挖掘, 就可以得到订单之间的时序关联关系, 形式化描述如式 (3).

$$P_i V_j (\Delta t) \xrightarrow{h_{ij'}} P_i' V_j' \quad (3)$$

式 (3) 表示在某计划期, 产品 P_i 的一个订货量为 V_j 的订单, 将会在 Δt 个计划期之后, 以概率 $h_{ij'}$ 引起产品 P_i' 的一个订货量为 V_j' 的订单. 将产品 P_i 称为前件订单 (*antecedent*), 产品 P_j 称为后件订单 (*consequent*), $h_{ij'}$ 为该时序关联规则的置信度 (*confidence*).

例如, 时间序列关系 $(A, M) (3) \xrightarrow{60\%} (B, H)$, 就表示如果企业满足了产品 A 的中等数量 M 的一个订单, 则会以 60% 的概率在 3 个计划期之后引致产品 B 的一个高订货量 H 的订单.

2.2 考虑时序关联性的订单选择模型

如果考虑当前和未来的订单关联性, 则决策者需要在某个订单的当前利润和未来利润之间做出权衡, 结果订单选择标准是不同的. 对于那些不能引起后续需求的订单, 在某计划期所拥有的选择权重就是其当前自身的利润, 而那些能够引起后续需求的订单, 他们在某计划期所拥有的选择权重可能就是对应未来订单的利润. 一个理性决策者会将生产能力分为两部分: 一部分用来进行正常订单决策, 即不考虑未来利润情况, 为满足当前需求而生产, 当前利润大者被优先选择; 另一部分能力用于对每个订单可能引起的未来利润进行决策, 未来利润大的当前订单被选择.

为在模型中反映决策者对放眼未来和立足当前的决策偏好, 设 w_t 为本期分配给正常订单决策的产能比例, 代表决策者对当前利润实现的偏好程度. 下面基于表 3 的参数和变量, 建立考虑时间序列关联的订单选择决策模型 (model considering association MA).

表 3 时序关联的订单选择决策模型符号

Table 3 Notations of order selection decision model based on time series association between orders

参数 / 变量	说明
t	决策计划期 ($t = 1, \dots, T$)
x_{Oij}	计划期 t 按照当前利润决策所接受的产品 i 的订单 j ($x_{Oij} = 1$, 接受; 0 拒绝)
x_{Aij}	计划期 t 按照后件订单利润决策所接受的产品 i 的订单 j ($x_{Aij} = 1$ 接受; 0 拒绝)
x_{Oij}^{\prime}	计划期 t 所接受的订单集合 $\{x_{Oij}\}$ 中可依时序关联引起未来需求的订单
x_{Aij}^{\prime}	计划期 t 所接受的订单集合 $\{x_{Aij}\}$ 中可依时序关联引起未来需求的订单
$m_i(t)$	计划期 t 按照当前利润作订单选择的产品 i 的订单总数
$m_i^{\prime}(t)$	计划期 t 按照后件订单利润作订单选择的产品 i 的订单总数
$m(t)$	计划期 t 生产的产品种类数
p_{it}	计划期 t 产品 i 的单价
d_{ij}	计划期 t 某产品 i 的第 j 订单的产品订货量
$p_{i'j'}$	计划期 t' , 订单 j' 的单位产品销售收入, 该订单是计划期 t 的订单 ij 的后件订单
$d_{i'j'}$	计划期 t' , 某产品 i' 的订单 j' 的产品订货量, 该订单是计划期 t 的订单 ij 的后件订单
b_t	计划期 t 企业的最大生产能力
a_{it}	计划期 t 单位产品 i 的产能消耗
c_t	计划期 t 单位产能的费用
$h_{ijj'}$	订单 ij 和订单 $i'j'$ 的关联置信度

在决策模型中, 由正常决策方法获得的订单集合 $\{x_{Oij}\}$ 中也有可能存在某些时序关联订单中的前件订单, 所以在表 3 中, 这些订单形成的集合设为 $\{x_{Oij}^{\prime}\}$. 同理, 按照未来利润选择的订单集合 $\{x_{Aij}\}$, 也有相应的前件订单集合 $\{x_{Aij}^{\prime}\}$. 以利润最大为目标, 决策模型如下

$$\begin{aligned} \max f_t(x) = & \sum_{i=1}^{m(t)} \sum_{j=1}^{m_i(t)} x_{Oij} (p_{it} - a_{it} \cdot c_t) d_{ij} + \\ & \sum_{i=1}^{m(t)} \sum_{j=1}^{m_i^{\prime}(t)} x_{Aij} (p_{it} - a_{it} \cdot c_t) d_{ij} + \\ & \sum_{i=1}^m \sum_{t=t}^T \sum_{i'=1}^{m_i^{\prime}(t)} h_{ijj'} \cdot (p_{i't'} - a_{i't'} \cdot c_{t'}) \cdot d_{i't'} + \end{aligned}$$

$$\sum_{i=1}^m x_{Aij}^{\prime} \sum_{t=t}^T \sum_{i'=1}^{m_i^{\prime}(t)} h_{ijj'} \cdot (p_{i't'} - a_{i't'} \cdot c_{t'}) \cdot d_{i't'} \quad (4)$$

能力约束

$$\sum_{i=1}^{m(t)} \sum_{j=1}^{m_i(t)} x_{Oij} \cdot a_{it} \cdot d_{ij} \leq w_t b_t \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{m(t)} \sum_{j=1}^{m_i^{\prime}(t)} x_{Aij} \cdot a_{it} \cdot d_{ij} \leq (1 - w_t) b_t \quad (6)$$

目标函数式 (4) 中, 前两项为当前利润, 而当前订单所对应的可能的未来订单引起的收益, 在式 (4) 的后两项使用基于置信度的期望利润来表示.

关于约束, 这里分为两部分: 式 (5) 为当前利润准则下的生产能力约束, 其意义就是, 按照订单实际的利润进行优选, 直到达到所分配的生产能力. 式 (6) 是未来利润准则下的生产能力约束, 在这个约束中, 产能消耗仍然按照所拿到的订单计算, 而订单的优先选择规则是按照其未来可能引起的关联订单的利润大小来确定. 其中 w_t 将根据决策者对当前和未来利润的偏好程度选取. 如果决策者更偏好于实现当前的利润, 则应该选择较大的 w_t . 反之, 若想给那些能引起未来需求的订单充足的生产能力, 则选择较小的 w_t . 以图更强烈的诱导未来需求.

3 分阶段决策策略与求解算法

在考虑时序关联性的订单选择决策模型中, 由于后面计划期的需求状态会随着前一个甚至前几个计划期的决策而发生变化, 因而模型 MA 的 T 个计划期的目标函数值是互相关联的. 而且, 当前面计划期决策未定时, 后面计划期的时序关联订单是不定的, 所以得不到订单备选集. 这样, 难以将上述各个计划期的决策目标进行简单加总来整体求解. 类似某些随机生产计划决策, 由于未来的不确定性在决策时还未出现, 所以这类问题应该采取“走着看”的分阶段决策策略, 在完成某计划期 t 之后, 按照决策结果观察未来的订单到达情况, 再进行下一计划期的订单决策, 整体过程如图 1

表 4 订单信息描述

Table 4 Description of order information

符号	说明
t	订单决策计划期
i	订单对应的产品种类编号
j	产品在计划期 t 的订单编号
r	订单的单位利润
a	订单的单位能力消耗
v	订货量
t'	后续关联订单将出现的计划期
i'	后续关联订单的产品种类编号
r'	后续关联订单的单位利润
a'	后续关联订单产品的单位能力消耗
v'	后续关联订单订货量
$h_{ij'}$	时序关联规则置信度

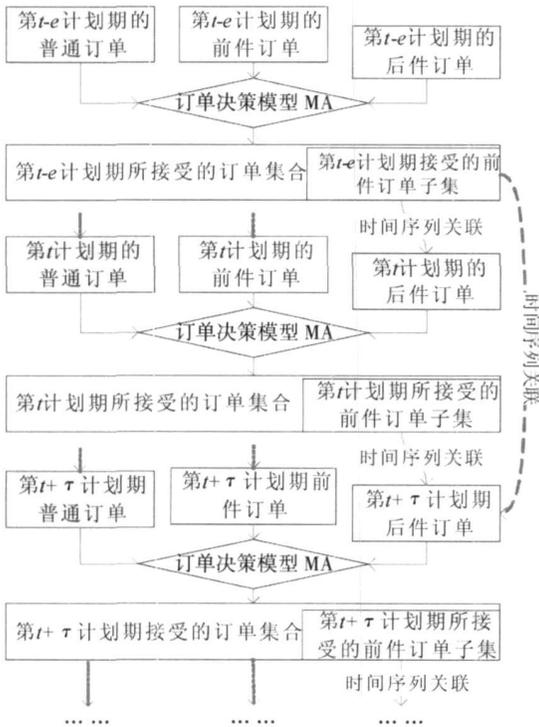


图 1 分阶段订单选择决策过程

Fig. 1 Make order selection decision period by period

对某计划期 t 而言, 模型中涉及三种订单: 第 1 类是需求独立的普通订单 (ordinary orders), 第 2 类是关联规则中的前件订单 (antecedent orders), 第 3 类是前件订单引起的后件订单 (consequent orders).

为方便起见, 可将这些订单统一成一种形式, 即假设每个订单都可能引起未来订单, 而通过具体的参数设定来区分其不同属性. 设某订单所携带的信息如式 (7), 信息描述如表 4

$$Order = \{t, i, j, r, a, v, t', i', r', a', v', h_{ij'}\} \quad (7)$$

在订单信息中, 如果某订单是个普通订单, 或者其置信度小于强关联规则所规定的最小置信度, 则将置信度设置为 0. 如果该订单以时序关联的形式引致后续订单的到达, 则可在历史订单挖掘结果中获取其后件订单特性. 注意, 在计划期 t 时, 后件订单中并没有订单编号项, 这是因为未来还没有发生, 因而无法确定该产品的后件订单在计划期 t' 的流水号.

对于计划期 t 而言, 如果其产能充足, 则不存在订单选择问题, 只要订单个体不造成局部亏损就接受全部订单. 因此, 本文应该考虑产能稀缺的情况方具有比较意义. 而在产能稀缺时, 企业势必追逐单位产能利润高的产品. 基于这个思路, 可以使用类似权重优先策略 (W SPT) 的贪婪算法, 以单位产能获得的利润为权重, 大者优先. 算法如下:

步骤 1 从数据库中查询计划期 t 所有订单及其相关信息, 并将这些订单按照其自身的单位产能利润 r/a 由高到低排序;

步骤 2 按照上述排序, 依次选择订单, 并计算其产能消耗总量 $\sum_{j=1}^{J_0} v_j a_j$ 是否超过了按照当前订单利润进行订单选择决策的产能分配 $w_t b_t$. 如果超过, 则停止选择, 所选择的订单数量为 $J_0 - 1$. 否则继续步骤 2.

步骤 3 将上述剩余订单按照其后续订单的单位产能的期望利润 $h_{ij'} r' / a'$ 由高到低排序;

步骤 4 针对剩余能力 $(1 - w_t) b_t$, 依次选择剩余订单, 直到 $\sum_{j=J_0}^J v_j a_j > (1 - w_t) b_t$, 所选择的订单总数即为 $J - 1$.

上述针对模型 MA 的权重优先算法分为两阶段, 第 1 阶段是基于当前利润的订单选择决策, 第

2阶段是基于未来利润标准的订单选择决策, 为区别起见, 该算法记为 MA-W SPT. 对于前述作为 Benchmark问题的模型 MB的求解, 只需要采用上述算法的第一阶段, 并将 w_i 设为 1 即可, 不再赘述. 为方便, 将 MB模型的权重优先求解算法命名为 MB-W SPT.

4 数值仿真试验设计

构造一个动态的决策过程来比较时序关联的订单选择决策与时序独立的订单选择决策之间的差异, 其中涉及订货量随机生成、订单随机到达、关联规则设定等问题

4.1 决策模型 MA的订单选择过程

按照图 1 的思路, 在计算试验中, 如文献 [25], 可以假设普通订单和前件订单服从泊松到达过程, 而后件订单将按照前件订单的选择决策在相应的计划期以等于支持度的置信度概率随机生成. 另外, 普通订单的订货量可设定为均值和方差决定的正态分布^[26], 而关联订单的订货量取自时序关联规则中确定的订货量. 随机过程相关参数如表 5

表 5 随机仿真试验过程的相关参数

Table 5 Parameters of stochastic simulation experiment

参 数	意 义
$\lambda_{O_i}(t)$	计划期 t 普通产品 i 的订单的泊松到达率
$u_{O_i}(t)$	计划期 t 普通产品 i 的订货量的正态分布期望值
$\sigma_{O_i}(t)$	计划期 t 普通产品 i 的订货量的正态分布标准差
$O_o(t)$	计划期 t 某普通产品的所有订单集合
m_o	普通订单产品种类数
$O_c(t)$	计划期 t 的后件订单集合
$\lambda_{A_i}(t)$	计划期 t 前件产品 i 的订单的泊松到达率
$u_{A_i}(t)$	计划期 t 前件产品 i 的订货量的正态分布期望值
$\sigma_{A_i}(t)$	计划期 t 前件产品 i 的订货量的正态分布标准差
$O_A(t)$	计划期 t 某前件产品的所有订单集合
m_A	前件订单产品种类数
$O'_A(t)$	某计划期所接受的前件订单

模型 MA的仿真试验过程如下:

步骤 1 从计划期 1 开始, 按照每个普通产品的订单到达率 $\lambda_{O_i} = \lambda_{O_i}(1)$ 产生普通订单集合

$O_o(1)$, 每个订单订货量服从正态分布

$$N(u_{O_i} = u_{O_i}(1), \sigma_{O_i} = \sigma_{O_i}(1));$$

步骤 2 按照每个前件产品的订单到达率 $\lambda_{A_i} = \lambda_{A_i}(1)$ 产生前件订单集合 $O_A(1)$, 每个订单订货量服从正态分布 $N(u_{A_i} = u_{A_i}(1), \sigma_{A_i} = \sigma_{A_i}(1));$

步骤 3 基于时序关联订单选择决策模型 MA 的求解算法 MA-W SPT, 对订单集合 $O_o(1) \cup O_A(1)$ 作订单选择决策, 当期最优利润为 $R_A(1)$, 所接受的前件订单集合为 $O'_A(1);$

步骤 4 对于第 2 计划期, 类似步骤 1 和步骤 2 按照泊松过程到达率 $\lambda_{O_i} = \lambda_{O_i}(2)$ 和 $\lambda_{A_i} = \lambda_{A_i}(2)$ 以及正态分布 $N(u_{O_i} = u_{O_i}(2), \sigma_{O_i} = \sigma_{O_i}(2))$ 和 $N(u_{A_i} = u_{A_i}(2), \sigma_{A_i} = \sigma_{A_i}(2))$, 分别产生普通订单集合 $O_o(2)$ 和前件订单集合 $O_A(2);$

步骤 5 对于计划期 1 所接受的前件订单集合 $O'_A(1)$, 按照时序关联的后件订单时间间隔, 如果后件订单能在第 2 计划期出现, 则依置信度概率 $h_{qij'}$ 产生对应的后件订单, 所有的后件订单形成后件订单集合 $O_c(2);$

步骤 6 使用算法 MA-W SPT 基于订单集合 $O_o(2) \cup O_A(2) \cup O_c(2)$ 作订单选择决策, 当期最优利润为 $R_A(2)$, 所接受的前件订单集合为 $O'_A(2);$

步骤 7 对计划期 t 类似步骤 1 和步骤 2 分别产生普通订单集合 $O_o(t)$ 和前件订单集合 $O_A(t);$

步骤 8 对于计划期 t 之前所接受的所有前件订单集合 $\bigcup_{\tau=1}^{t-1} O'_A(\tau)$, 按照时序关联规则产生计划期 t 的所有后件订单, 形成后件订单集合 $O_c(t);$

步骤 9 基于订单集合 $O_o(t) \cup O_A(t) \cup O_c(t)$ 作订单选择决策, 当期最优利润为 $R_A(t)$, 所接受的前件订单集合记为 $O'_A(t);$

步骤 10 重复上述步骤, 直到计划期 T , 计算总利润: $R_A^1 = \sum_{t=1}^T R_A(t);$

步骤 11 重复随机试验过程 S 次, 计算平均利润: $R_A = 1/S \cdot \sum_{s=1}^S R_A^s$, 作为决策模型 MA 的计算结果.

4 2 决策模型 MB的订单选择决策过程

作为 Benchmark问题, 模型 MB在决策时, 不考虑决策对未来订单的影响. 但是, 若订单关联性客观存在于订单的时间序列当中, 则在订单到达过程里, 仍需要考虑关联订单问题. 也就是说, 主观的决策模型不能决定订单本身的属性, 因此, 模型 MB的决策过程和 MA类似, 只不过在订单选择决策时使用的决策模型和算法是 MB-W SPT, 结果自然不同.

为简洁计, 这里不再赘述模型 MB的订单选择过程, 只需将模型 MA的订单选择决策算法 MA-W SPT换成 MB-W SPT, 记最终结果为 $R_B = 1/S \cdot \sum_{s=1}^S R_B^s$ 即可.

4 3 仿真决策情景

前面所设定的订单决策是一个随机过程, 所以只通过某次决策来对比两个模型的决策效果是不客观的. 因而本文在不同的决策情境下, 独立重复进行多次随机决策, 通过数据统计探讨其决策表现. 所设定的情境包括: 产能分配策略、关联订单的支持度、后件订单的单位利润, 则数值计算仿真试验情景组合如图 2



图 2 随机仿真试验情景组合

Fig 2 The scenario portfolio of stochastic simulation experiment

每个情境分为 5种情况, 总共 125种情境组合. 对于当前预留的产能比例, 分别设定为 10%, 30%, 50%, 70%, 90%.

关联规则的支持度高高低可以通过调整前件订单的到达率来实现. 设从低到高, 将前件订单的到达率分别设定为普通订单平均到达率的 1倍, 3倍, 5倍, 7倍和 9倍, 分别表示支持度极低、低、中、高、极高.

后件订单利润方面, 若后件订单利润很低, 则不论是决策模型 MA还是 MB, 都不会选择这种订单, 因而对决策结果没有影响. 所以, 这里将后件订单的单位利润设定为普通产品利润的 1倍, 3

倍, 5倍, 7倍和 9倍, 分别表示其利润从中等到极高, 而不考虑后件订单利润低的情况.

5 数值计算与结果分析

5 1 订单到达流与生产系统构造

设某企业生产 10种产品, 其中 6种为普通订单产品 ($i = 1, \dots, 6$), 其余 4种为关联订单产品. 将订货量离散化之后, 其关联规则为

$$P_7 100(2) \xrightarrow{0.80} P_9 300 \quad (8)$$

$$P_8 50(1) \xrightarrow{0.95} P_{10} 200 \quad (9)$$

式 (8) 表示, 若在某计划期接受产品 7的订货量为 100的一个订单, 则 2个计划期之后, 会有 80% 的概率, 到达一个产品 9的订货量为 300的订单. 式 (9) 表示若在某计划期接受产品 8的订货量为 50的一个订单, 则 1个计划期之后, 会有 95% 的概率, 到达一个产品 10的订货量为 200的订单. 注意, 因为进行了离散化处理, 因此上述关联规则中的每个订货量代表了一个离散化之前的区间.

设每个计划期的生产能力均为 20 000作业单位, 每单位作业能力的费用为 15 若进行 12个计划期的决策, 则模型中的参数为 $m(t) = 10, b_i = 20 000, T = 12, c_i = 15$

在每种情境下, 假设产品单价、单位产能消耗、订单到达率、订货量正态分布期望值以及标准差随着计划期的不同而随机波动, 在数值计算试验中, 它们分别按照均匀分布的区间随机产生, 即: $p_i \sim U[25, 40], a_i \sim U[10, 15], u_i \sim U[100, 200], \sigma_i \sim U[10, 30], \lambda_i \sim U[5, 10]$. 作为示例, 表 6给出了第 1个情境下第 1计划期的产品单位利润等信息.

表中产品 7、产品 8、产品 9和产品 10的订货量直接取自关联规则中的数量关系. 而产品 7和产品 8的订单到达率根据支持度和产品 1~ 6的平均到达率确定. 产品 9和产品 10的单位利润根据产品 1~ 6的平均利润按照 4.3中的情境生成, 其订单到达数量是根据关联规则结合模型决策结果动态生成的, 因此不提前设定产品 9、10的订单到达率.

此外, 这里也给出第 1计划期各情境组合下的支持度对应的前件订单到达率和后件订单产品的单位利润如表 7和表 8. 其余计划期类似.

表 6 第 1 情景下第一个计划期的各产品信息

Table 6 Product information for scenario 1 in period 1

产品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
单位利润 r_i	25.00	26.20	35.00	38.50	30.40	32.90	39.50	32.50	37.20	27.90
单位产能消耗 a_i	3.00	4.50	3.40	3.60	3.70	4.50	3.20	4.40	3.90	3.80
订货量期望值 u_i	186	149	157	135	162	157	/	/	/	/
订货量标准差 σ_i	60	94	62	74	89	61	/	/	/	/
订单到达率 λ_i	6	7	6	5	7	9	7	7	/	/

表 7 第 1 计划期产品 7 和产品 8 在各个情境下的订单到达率

Table 7 Order arrival rate of product 7 and product 8 for every scenario in period 1

支持度	极低	低	中等	高	极高
λ_7	7	21	35	42	63
λ_8	7	21	35	42	63

表 8 第 1 计划期产品 9 和产品 10 在各个情境下的单位利润

Table 8 Unit profit of product 9 and product 10 for every scenario in period 1

单位利润	极低	低	中等	高	极高
r_9	37.20	100.92	162.50	219.24	283.32
r_{10}	27.90	93.84	164.00	226.10	266.94

5.2 计算结果与分析

按照 4.1 和 4.2 的决策过程, 平均每个情景在 12 个计划期内处理约 1400 个左右的订单. 设定随机试验次数为 $S = 30$, 将不同的情境下, 两个模

型的决策结果平均值的相对差别列于表 9 (为观察极端情况, 将产能分配的 0% 和 100% 的结果也一并列出). 其中设定的相对差异定义为 $Err = (R_A - R_B) / R_B \times 100\%$.

表 9 模型 MA 和模型 MB 的决策结果相对差异 (%)

Table 9 The relative difference of decision results between model MA and model MB

支持度	利润	产能分配 (%)							平均差异
		0	10	30	50	70	90	100	
极低	中	-0.54	-0.56	-0.86	0.27	0.72	0.25	-0.06	-0.11
	较高	19.79	21.13	17.01	19.03	18.62	4.25	-0.14	14.24
	高	21.68	22.07	18.36	21.13	21.34	15.39	0.48	17.21
	很高	31.51	29.81	22.31	29.83	29.02	2.49	0.34	20.76
	极高	47.89	47.95	33.12	49.09	45.63	26.96	0.62	35.89
平均差异		24.07	24.08	17.99	23.87	23.07	9.87	0.25	
低	中	-4.77	-4.41	-3.44	-2.58	-1.28	-0.18	0.05	-2.37
	较高	22.75	21.77	18.73	23.90	18.00	11.76	-0.32	16.66
	高	9.14	10.45	7.94	8.34	1.60	5.27	0.09	6.12
	很高	62.76	61.32	38.65	57.52	47.65	33.51	1.02	43.20
	极高	41.75	40.46	26.41	31.94	29.15	12.40	-0.16	25.99

续表 9

平均差异		26.33	25.92	17.66	23.82	19.02	12.55	0.14	
中等	中	-3.73	-2.36	-0.59	-1.20	-0.50	0.51	-0.05	-1.13
	较高	7.27	8.69	2.59	2.76	1.87	4.29	-0.12	3.91
	高	27.33	31.43	29.89	35.50	22.84	7.24	0.18	22.06
	很高	16.53	17.16	12.48	15.03	15.07	15.23	-0.02	13.07
	极高	25.16	23.23	15.17	16.25	13.69	4.30	0.40	14.03
平均差异		14.51	15.63	11.91	13.67	10.60	6.31	0.08	
高	中	-6.73	-5.99	-5.07	-2.99	-1.39	-0.64	0.00	-3.26
	较高	33.49	36.02	27.07	38.42	28.28	9.87	-0.07	24.73
	高	48.53	48.34	31.55	54.31	51.62	18.64	-0.28	36.10
	很高	9.53	9.33	5.57	9.93	13.58	2.15	-0.85	7.03
	极高	0.71	3.47	4.63	9.22	12.53	10.75	0.04	5.91
平均差异		17.11	18.23	12.75	21.78	20.92	8.15	0.23	
极高	中	-5.45	-4.79	-4.10	-3.30	-1.91	-0.65	0.06	-2.88
	较高	-6.83	-7.93	-8.71	-4.98	-1.03	-3.60	0.25	-4.69
	高	4.61	8.50	18.52	35.31	28.96	15.66	-0.07	15.93
	很高	49.82	44.43	30.40	43.77	33.30	10.14	-0.02	30.26
	极高	12.54	13.61	14.46	21.41	33.15	19.54	0.00	16.39
平均差异		10.94	10.76	10.11	18.44	18.49	8.22	0.04	

1) 预期后件订单的单位产品利润影响分析

将不同产能分配比例下的决策差异进行平均, 不同的支持度下决策结果相对差异随后件订单产品单位利润的变化关系整理如图 3

数据显示, 当后件订单产品的单位利润和普通订单相当时(即中等的情况), 时序关联的决策模型 MA 和时序独立的决策模型 MB 所得结果接近(相对误差在 0 左右), 这是比较符合逻辑的, 因为此时相当于后件订单和普通订单区别不大, 因而考虑未来的影响效果并不明显。

进一步可以发现, 在这种预期利润较低的情况下, 模型 MA 比 MB 的决策结果普遍要稍差。其原因可能在于当前计划期对未来的预期不一定能够实现——相关联的后件订单是依概率出现的, 而后件订单又和普通订单相差不多, 相比较而言, 关联订单处于较脆弱状态, 所以只要稍有预期不符, 即会造成决策效果变差, 因而考虑未来订单的关联性就成了正常决策的劣化因素。这说明, 当订单之间存在时序关联, 但是后件订单的利润并不十分突出时, 不应过多考虑未来影响——这符合实际的决策逻辑。

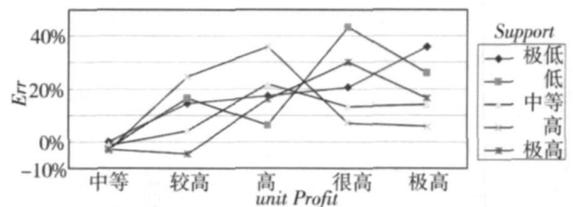


图 3 不同后件订单产品单位利润下的平均相对决策差异
Fig 3 The average relative profit difference under different unit profit of consequent product

而在高利润的情况下, 考虑未来订单的决策模型 MA 明显优于时序独立的“近视”决策模型 MB。因为在这种情况下, 只要企业能拿到高额利润的后件订单, 就会使得企业利润有巨大增长。这也反映了一个企业经营中的实际情况: 企业在决策过程中, 通常会对那些能引起未来高额利润的订单“另眼看待”, 凭感觉进行一定的预期。

随着后件订单单位利润增加, 除了的支持度极低时, 模型 MA 的相对决策效果是单调增而外, 其余支持度下, 都是当后件订单利润极高时, 反倒使模型 MA 的相对决策效果降低。这可能是因为当利润极高而支持度也高时, 模型 MA 和 MB 的整个利润基数都变大(随着后件订单单位利润增

加, 整体的绝对利润仍然是递增的, 如图 4), 结果高额订单利润的相对影响会趋弱, 因而“近视”模型和关联模型决策结果的相对差异变小。

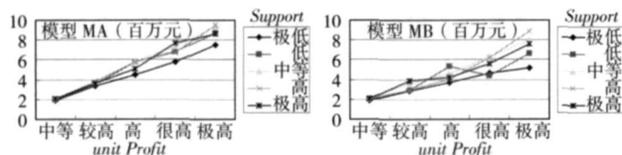


图 4 后件产品不同单位利润下的决策利润总和

Fig 4 Total profit under different unit profit of consequent product

2) 时序关联支持度影响分析

如图 5 是不同产能分配和不同支持度下, 基于后件产品单位利润的相对决策差异简单平均的结果。从数据中可以发现, 不管后件订单产品单位利润和产能分配如何变化, 总体上, 两个模型的决策差异随着支持度的增加会有微弱的减小的趋势, 而在某个支持度下又可能达到最大或者最小。

对于支持度较低的情况, 由于关联订单较少, 所以时序独立的模型 MB 选择到关联订单的几率较小, 因而未来的高额利润可能丢失, 结果就比模型 MA 的决策效果差。

对于支持度极高的情况, 由于此时订单流中几乎全部都是关联订单, 那么模型 MA 和 MB 都可能以很大概率选择上关联订单并由此带来未来的预期利润, 结果两者决策差异将会缩小。所以, 随着支持度的增加, 决策差异有很弱的减小的趋势。

而在中等支持度下, 利润差异会出现一个低谷。从原始数据表 9 上看, 每种支持度情景下, 总有一个与其配合的未来利润情景会造成一个决策差异高峰 (如表 9 中阴影行)。这个高峰会拉升整体平均差异。而支持度中等时, 其高峰差异比其他情景并不突出, 结果造成在中等支持度下, 平均相对决策差异较小。这个现象无法直观解释, 可能是决策模型所面临的订单到达流具有非线性的随机过程特性造成的, 需要进一步研究。

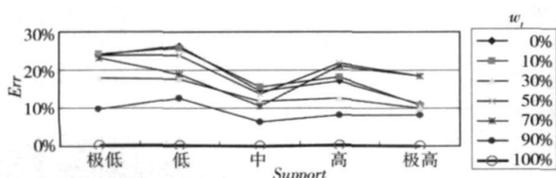


图 5 不同支持度下的平均相对决策差异

Fig 5 The average relative profit difference under different support

3) 产能分配的影响

产能分配比例是决策者唯一能有效控制的决策参数。如图 6 从总体来看, 给当前订单分配的产能越多, 两个模型的决策结果差别就越小。这是因为当 w_t 越来越大时, 考虑给未来订单的产能就越来越小, 也就表示决策者对未来预期利润越不重视。当 w_t 接近 100% 时, 决策模型 MA 将彻底退化成为模型 MB, 两者决策结果理应趋于一致。进一步可以发现, 应该存在一个比较好的产能比例分配, 它会使得决策结果最佳。也就是说, 在生产决策中, 势必要在现实和未来之间作一个好的权衡, 方能达到产能的有效利用。

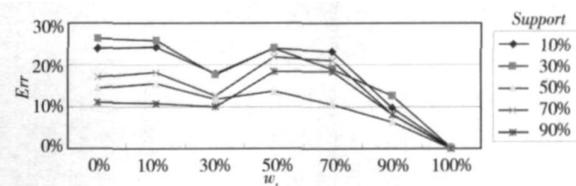


图 6 不同产能分配比例下的平均相对决策差异

Fig 6 The average relative profit difference under different ratio of production capacity allocation

另外, 当决策者分配给当前正常订单的产能极小时 (如 $w_t = 0$ 和 $w_t = 10$), 模型 MA 的决策结果也大大好于模型 MB 的结果。

这是因为由于关联性的存在, 如果能给未来订单充分的“诱惑”, 则使得未来到达的订单有很多是因为关联性而引起的高额利润订单。那么, 那些依靠未来预期的高额后件订单利润进行竞争的前件普通订单, 所面临的竞争对手多数也是具有高额利润的后件订单, 于是会有很多后件订单被选择, 从而生产决策的结果会较好。这实质上是企业通过自身的生产改变了订单流, 提高了订单的利润品质。从营销的角度来看, 由于产品需求关联性的存在, 企业通过选择性的推出产品来引导需求是可能的。

6 结 论

从当前的文献来看, 考虑前后计划期订单之间的时序关联关系而进行生产计划或订单选择的决策还不多见。本文考虑订单需求的相关关系, 基于时序关联规则建立了考虑时间序列关联的订单选择决策模型, 以期比较它和时序独立假设下的订单选择模型决策结果之差异。

本文设计了一个动态随机到达过程的订单流作为决策备选集,采用分阶段的策略,按不同计划期依次进行订单选择决策.数值计算的比较分析证明了考虑时序关联性的订单选择决策结果一般会优于不做任何预期的生产决策.计算结果也解释了一些直观的实践经验,诸如权衡现时和未来的决策行为、生产系统可能主动诱导顾客需求的现象等等.

数据结果也反映了一些极端情况下的决策特异性,以及在一些决策情景组合下存在较优的决

策模式等.其中有意义的就是反映决策预期心理的产能分配比例问题.本研究是直接赋予参数值,并且假定一旦确定了,各个计划期就不再改变.而现实中,每个计划期可能都会有不同考虑.在一定的场景下,如何寻找最优的产能分配策略,是应当进一步研究的问题.

另外,本文还没有研究带延迟惩罚因而需要考虑排序生产的更一般的订单选择决策问题,而在这类问题中考虑订单的时序关联性,应该会得到更具一般意义的结果.

参 考 文 献:

- [1] Gunasekaran A, Ngai E W T. Built-to-order supply chain management: A literature review and framework for development [J]. *Journal of Operations Management*, 2005, 23(5): 423—451.
- [2] Ball M O, Chen C Y, Zhao Z Y. Material compatibility constraints for make-to-order production planning [J]. *Operations Research Letters*, 2003, 31(6): 420—428.
- [3] Kingsman B, Hendry L, Mercer A, Souza A. Responding to customer enquiries in make-to-order companies: problems and solutions [J]. *International Journal of Production Economics*, 1996, 46—47(1): 219—231.
- [4] 采峰, 曾凤章. 基于订货型的流程型生产物流平衡方法研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(1): 158—164.
Cai Feng, Zeng Fengzhang. Method of process production logistics equilibrium based on MTO [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(1): 158—164 (in Chinese).
- [5] TAN H armq, Pei Ren-qing. Risk analysis and assessment for make-to-order manufacturing [J]. *Journal of Shanghai University (English Edition)*, 2006, 10(6): 535—540.
- [6] 张涛, 王梦光, 唐立新, 等. 基于MTO管理系统的钢厂合同计划方法 [J]. *控制与决策*, 2000, 15(6): 649—653.
Zhang Tao, Wang Mengguang, Tang Lixin, et al. The method for the order planning of the steel plant based on the MTO management system [J]. *Control and Decision*, 2000, (6): 649—653 (in Chinese).
- [7] Slotnick S A, Morton T E. Selecting jobs for a heavily loaded shop with lateness penalties [J]. *Computers & Operations Research*, 1996, 23(2): 131—140.
- [8] Ghosh J B. Job selection in a heavily loaded shop [J]. *Computers & Operations Research*, 1997, 24(2): 141—145.
- [9] Calosso T, Cantamessa M, Vu D, Villa A. Production planning and order acceptance in business-to-business electronic commerce [J]. *International Journal of Production Economics*, 2003, 85(2): 233—249.
- [10] Slotnick S A, Morton T E. Order acceptance with weighted tardiness [J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(10): 3029—3042.
- [11] 张锦特, 赖玟玲. 季节性需求下受资源限制及缺货之存货模型 [J]. *管理科学学报*, 2005, 8(3): 72—80.
Chang Jing-te, Lai Wen-ling. Inventory models with resource constraints and shortages allowed on seasonal demand [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(3): 72—80 (in Chinese).
- [12] 陈宪章, 汪定伟, 刘崇. 冲击型负荷下的生产存储模型研究 [J]. *管理科学学报*, 2004, 7(4): 33—39.
Chen Xian-zhang, Wang Ding-wei, Liu Chong. Research of product inventory under impact load [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2004, 7(4): 33—39 (in Chinese).
- [13] Zhou Y W, Yang S L. A two-warehouse inventory model for items with stock-level-dependent demand rate [J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 95(2): 215—228.
- [14] 禹海波. 具有不确定性产出库存系统的随机比较 [J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(7): 105—112.
Yu Hai-bo. Stochastic comparison on a inventory system with yield uncertainty [J]. *System Engineering-Theory & Practice*, 2005, 25(7): 105—112 (in Chinese).
- [15] Urban T L. A periodic review model with serially-correlated, inventory-level-dependent demand [J]. *International Journal*

- of Production Economics 2005, 95(3): 287—295.
- [16] Sbitnick S A, Levish H F. Multiperiod job selection: Planning work loads to maximize profit[J]. Computers & Operations Research 2002, 29(9): 1081—1098.
- [17] Bakkrishnan N, Patterson J W, Sridharan V. Robustness of capacity rationing policies[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 115(2): 328—338.
- [18] Chen M C, Huang C L, Chen K Y, *et al*. Aggregation of orders in distribution centers using data mining[J]. Expert Systems with Applications 2005, 28(3): 453—460.
- [19] Chen M C, Wu H P. An association-based clustering approach to order batching considering customer demand patterns[J]. Omega 2005, 33(4): 333—343.
- [20] Das G, Lin K-I, Mannila H, Renganathan G, Smyth P. Rule discovery from time series[A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining[C]. New York, USA, August 27—31, 1998. 16—22.
- [21] Last M, Klein Y, Kandel A. Knowledge discovery in time series databases[J]. IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics—Part B: Cybernetics 2001, 31(1): 160—169.
- [22] Ullah A M M S, Harb K H. Knowledge extraction from time series and its application to surface roughness simulation[J]. Information Knowledge Systems Management 2005, 5(2): 117—134.
- [23] Zhang R-Q, Li J. An MTO planning model considering timing association rules in orders[A]. Proceedings of ISM 2007[C]. Shanghai, China, July 25—28, 2007.
- [24] 程岩, 卢涛, 黄梯云. 在数据库中挖掘定量关联规则的方法研究[J]. 管理科学学报, 2001, 4(4): 41—48.
Cheng Yan, Lu Tao, Huang Tiyun. Research on methods of mining quantitative association rules in database[J]. Journal of Management Sciences in China 2001, 4(4): 41—48 (in Chinese).
- [25] Bertrand J W M, Sridharan V. A study of simple rules for subcontracting in make-to-order manufacturing[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 128(3): 509—531.
- [26] 张慧颖, 寇纪淞, 李天生, 赵先德. 基于 σ/Q 的库存控制中安全库存的优选策略[J]. 管理科学学报, 2004, 7(6): 46—51.
Zhang Huiying, Kou Jirong, Lee Tiansheng *et al*. Optimal decisions of safety stock for individual item inventory systems based on σ/Q [J]. Journal of Management Sciences in China 2004, 7(6): 46—51. (in Chinese).

Comparative study of order selection decision considering time series association

ZHANG Ren-qian

School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Time series association exists in orders of different planning periods, however, the influences on order selection/acceptance of this association have not been considered in existing production planning models. To study this problem, the paper sets up an order selection decision model based on time series association rules. The model makes decisions after balancing the current and the future profit. As a benchmark for comparison, an order selection model that does not consider time series association of orders is built. In the numerical experiment, we design a dynamic and stochastic orders arrival process, and make decisions using the two models respectively. Under different scenarios, these two models are solved period by period based on a heuristic algorithm of weighted shortest processing time (WSPT). The comparative results demonstrate that the model which considers time series association is better than the benchmark model if there is time series association in orders. So, it is necessary to take account order association influences in the production planning decision.

Key words order selection; time series association; make-to-order/build-to-order