

基于分层 MTO 订单的准入策略研究^①

曹 裕¹, 吴 堪¹, 熊寿遥^{2*}

(1. 中南大学商学院, 长沙 410083; 2. 长沙理工大学数学与统计学院, 长沙 410114)

摘要: 研究按订单生产 (make to order, MTO) 模式下随机订单的准入策略. 本文提出的准入决策方法分为两步, 首先在考虑随机订单的不同属性基础上, 采用 TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution) 方法计算新到订单与理想订单的接近程度, 以此作为订单的综合收益, 从而对新订单进行分层排序; 其次采用 MDP (Markov decision process) 模型分别计算接受和拒绝订单的期望收益, 从而决定是否接受该订单. 研究发现, 当市场需求接近或大于产能时, 企业可从订单分层中获益; 反之, 市场需求显著小于产能时, 分层不会带来额外收益. 企业分层收益随需求增加或产能减少而递增, 且与生产前置期呈倒 U 型关系. 数值模拟发现, 订单分层越精细, 收益越大, 且分层数约为需求与企业产能的比值时, 订单分层收益接近最大值.

关键词: MTO; MDP; 订单分层; 准入策略

中图分类号: F224.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2017)08-0050-13

0 引 言

按订单生产是企业生产中常见的生产模式^[1-3]. 典型的 MTO 生产方式中, 制造商承诺在某个预定日期前按质保量地交付产品. 合理筛选订单, 既能保证企业按时交货、减少延期交货成本, 又能选出优质订单、增加企业收益. 因此, 好的订单准入策略对企业有重要意义^[4]. 近年来, 学者主要从需求、产能及交货时间、定价等几个层面对 MTO 订单的选择进行相关研究^[5-7].

部分学者从需求与有限产能对订单选择的影响层面对 MTO 生产模式进行了研究. 王迎军^[7]指出制造商在选择 MTO 生产方式时, 相比分销商他们需要承担更高的风险, 因而需要制造商优化订单准入策略. Balakrishnan 等^[8]首先考虑预期总需求超出企业产能时的订单选择问题, 利用

决策理论建立单周期产能分配策略, 通过选择性拒绝单位贡献较低订单类别的方式, 提高订单选择效率. Sridharan 等^[9]在其研究基础上考虑产能等约束条件, 重新对订单选择问题进行了研究. Kalantari 等^[10]首先采用 TOPSIS 方法对订单排序, 然后利用线性最优化方法在充分利用资源的前提下优化订单选择, 从而最大化综合收益. Beemsterboer 等^[11]基于需求高时波动率和延迟交互增加这一现象, 研究了 MTO 的订单接受问题. Akyildiz 等^[12]基于企业的剩余产能筛选潜在订单, 通过确定客户订单选择问题的评估因素及其先后顺序, 从而确定订单准入策略, 为基于产能, 综合考虑订单所有因素的模型设置提供了一个较好的模板. Mlinar 等^[13]运用马氏链决策方法, 研究产能、交货期确定条件下, 两类随机到达订单的准入策略问题, 并把该问题转化为 MDP

① 收稿日期: 2016-12-03; 修订日期: 2017-02-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71573281); 湖南省社会科学成果评审委员会重大课题资助项目(XSP2017ZDA011); 中南大学创新驱动资助项目(2016CX040).

通讯作者: 熊寿遥(1979-), 男, 湖南益阳人, 讲师. Email: xsymail_cscn@sina.com

问题求解. 单纯研究需求和产能对准入策略的影响多见于较早的文献, 随着社会经济的发展及研究的深入, 准入策略中考虑了更多的因素, 而需求和产能作为研究中的常规影响因素依然重要, 但也很大程度上受到其它因素的影响.

也存在部分学者从交货时间对订单选择的影响层面对 MTO 生产模式进行相关研究. Rom 等^[14]采用遗传算法, 节省了寻找最优订单策略的时间. Altendorfer 等^[15]从排队理论角度建立三个订单接受策略, 重点考虑延期与缺货成本影响, 对于无法解决的优化问题, 其提出了启发式算法以作为备选方案. Emami 等^[16]考虑不相同的并行机器环境中的连续订单接受和调度问题, 主要考虑了交货时间、收益、延迟交货罚金等因素, 他们开发了一种 Benders 分解方法来解决订单接受问题, 但模型过于复杂很难求解, 于是引入一些有效的切割以加速经典 Benders 算法的收敛和启发式方法来获得可行解. 交货时间决定了制造商能否在有限产能下按时交货, 本文依然把它看作订单准入策略的重要影响因素.

而关于 MTO 订单相关研究的定价影响层面, 其通常与交货时间同时作为影响订单决策的因素进行相关决策参考. Ebadian 等^[17]也基于价格和交货时间两个标准, 建立针对新进 MTO 订单的综合决策结构, 以选择可行且有利的订单. 范丽繁等^[18]则研究了顾客下订单后可能取消订单的 MTO 型企业的定价策略, 通过分析最优定价和最大化期望利润决定接受何种订单. MTO 订单的定价直接影响了企业的收益, 本文不仅考虑了订单的净收益, 同时还考虑其它因素, 从而评估订单的综合收益性.

还有部分学者综合各因素, 权衡当前订单和未来预期进入的订单利润, 以建立订单准入系统. Hing 等^[19]建立了机会成本不确定时, 企业订单接受问题的马尔科夫决策模型, 并使用强化学习法处理信息不完整决策. 王晓欢等^[20]在考虑生产成本、延期交货成本和缺货成本的前提下, 引入顾客等级概念, 同样基于强化学习的思想, 建立了马尔科夫决策过程的订单接受模型. 张人千^[21]认为不同计划期的订单之间

有可能存在时间序列关联, 从而建立了一个权衡当前与未来利润的订单选择决策模型. Zhang 等^[22]在研究订单进入服从指数分布时, 混合生产模式 (MTO/MTS) 的优化中, 提出通过控制 MTO 订单队列长度, 改进运行成本. 这类研究都是比较当前订单和未来预期进入订单的收益, 以决定是否接受当前订单. Piya 等^[23]开发了数学模型, 以帮助 MTO 企业在面临具有竞争性的多个或有订单时的订单接受策略, 首次将订单接受问题和谈判理论结合在一起. Kuo 等^[24]同样将谈判理论融入准入决策问题中, 通过建立混合整数规划模型以帮助 MTO 企业决策是否接受新到订单. Ghelase 等^[25]根据订单生产过程及到达频率, 通过盈利能力的评估将生产和销售结合起来考虑订单的接受问题, 显著提高了制造系统的性能.

综上所述, 现有文献主要从产能、需求、定价等方面研究订单选择策略, 其较少综合考虑各个方面, 而是只选择其中几个角度作为订单接受的标准. 近年来, 虽有部分学者开始综合考虑订单的各个影响因素, 但往往模型设置过于复杂, 难以快速求解. 此外, 现有文献存在企业决策的分阶段、离散假设, 而对随机进入订单需即时连续决策的订单接受策略的研究屈指可数. 在借鉴前人研究成果的基础上, 将 TOPSIS 方法和 MDP 方法结合起来, 综合考虑订单的各个影响因素, 以更有效的运用 MDP 模型简单快速地及时决策. 在前人研究基础上, 首先综合考虑一个订单的多个影响因素, 采用 TOPSIS 方法对订单进行排序; 其次建立基于 MDP 的订单准入决策模型, 研究 MTO 订单随机进入, 企业需即时决策的订单准入决策问题; 接下来采用数值分析方法分析了需求、产能等对订单准入策略的影响; 最后综合建模过程及数值分析结果得出结论, 并为企业的订单准入决策提供可行的建议.

1 准入决策过程

1.1 问题描述

一个企业有多条生产线, 每条生产线都可用于 MTO 或者其他生产模式, 在生产过程中不允

许抢占. 在持续经营过程中, 客户独立地、随机地下单, 企业接到订单后需立即决定是否接受该订单. 本文为企业建立一个订单准入决策结构(如图1), 当订单进入后, 该决策结构分为四步.

首先, 对订单做初步评价. 初步判断订单是否值得接受, 需要主要考虑完成订单所需要资源是否可获得、该订单是否能盈利等. 如果不能通过初步检验, 如资源难以获得、工艺过于复杂、订单的成本高于收益等, 说明企业无法从该订单中获利, 那么应该拒绝新到订单; 否则, 进入下一步.

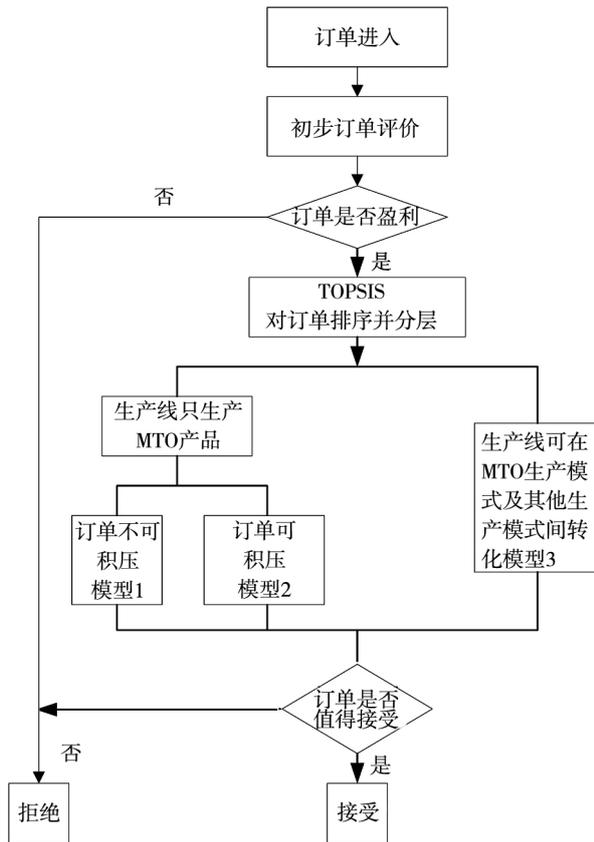


图1 订单准入策略流程图

Fig. 1 The flow diagram of order admission strategy

其次, 对通过初步评价的订单. 根据订单属性, 如产能占用时间、生产前置期、资源可获得性、收益大小和客户重要程度等^[13, 26], 采取TOPSIS方法计算新到订单与理想订单的距离并进行分层.

再次, 对分层过的新到订单, 根据生产系统的设置, 采用MDP模型计算接受和拒绝订单的期望收益. 如果生产线只用于生产MTO产品时, 当订单不可积压时, 使用模型1, 当订单可积压

时, 使用模型2; 如果生产线可以在MTO和其它生产模式之间转化且生产时间服从相同分布时, 使用模型3.

最后, 根据MDP模型的计算结果, 确定订单是否值得接受.

1.2 MTO 订单排序分层

生产企业根据当前资源、生产系统等特点向客户提供可供选择的产品类别, 客户综合生产企业信息及自身需求向生产企业下单. 企业首先对所有客户的历史MTO订单进行排序, 以判断新进MTO订单的收益性, 其中MTO订单筛选排序过程使用TOPSIS方法. TOPSIS法是对有限评价对象与理想化目标的接近程度进行排序的方法, 是对现有对象的相对优劣进行评价的方法. 订单对生产企业的价值受其多方面属性影响, 不妨假设订单属性分别为 C_1, C_2, \dots, C_Z , 初始订单或之前接受订单数量为 Y, x_{yz} 为订单 O_y 中 C_Z 属性值, 具体如下

$$X = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_Z \\ O_1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1Z} \\ O_2 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2Z} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O_Y & x_{Y1} & x_{Y2} & \dots & x_{YZ} \end{matrix}$$

将 $X = \{x_{yz}\}$ 归一化可得, $W = \{w_{yz}\}$, 通过计算各订单与最优订单(各属性中最大值构成, 是TOPSIS方法中的最大理想) 和最差订单(各属性中最小值构成, 是TOPSIS方法中的最小理想) 之间的距离, 可得各订单与最优订单的接近系数. 这一接近系数即为订单的综合质量或收益大小, 对订单接近系数进行排序可得订单综合收益排序. 将 $[0, 1]$ 内所有实数等分为 K 段(除最右边外为左闭右开区间), 易得所有订单的综合收益都必然落在其中一段内, 从而所有订单被分为 K 类, 取每一段的中间值为每一类期望综合收益 r_k . 由前面综合收益的排序及 r_k 定义, 不妨设 $r_1 > r_2 > \dots > r_K$, 并把落在期望综合收益为 r_k 的所有订单称为第 k 类订单.

1.3 基于MDP的订单评价

MDP中, 决策者周期地或连续地观察具有

Markov 性的随机动态系统, 序贯地做出决策. MDP 可以为企业找到一个这样的策略: 找到一个函数 π , 此函数帮助企业处于不同状态 $s \in S$ (其中 S 为状态空间) 时将会选择的相应动作 $a \in A$ (其中 A 为策略集) 从而使 $\pi_a(s)$ 最大化. 以新订单进入时, 企业原有订单量和新到订单的种类为 MDP 中的状态, 求取最优的决策, 可以使得企业在产能有限时尽可能接收并生产优质的订单, 达到最优化企业平均期望收益的目的.

1.3.1 订单准入系统描述

基于 1.2 节的订单分类, 以持续经营过程中平均单位时间综合收益最大化为目标, 基于马尔科夫过程建立订单准入决策模型. 在此模型中, 结合实际情况, 对企业生产系统涉及的订单变量和符号做如下假设.

假设 1 企业有 N 条生产线, 各生产线相互独立且功能相同, 即每条生产线都可独立完成任何一个接受的订单;

假设 2 假设 MTO 订单相互独立, 相邻 MTO 订单到达时间间隔服从参数为 λ 的指数分布, 记为 $F(x)$, 其相应的概率函数为 $f(x)$; 订单按照 FIFO 规则进行生产, 每个订单的生产时间服从参数为 u 的负指数分布, 记为 $G(x)$, 其相应的概率函数为 $g(x)$ [22 26];

假设 3 根据订单分类, 每个新到 MTO 订单属于第 k ($1 \leq k \leq K$) 层的概率为 p_k (如果没有精确估计, 初次分类时第 k 层订单量占总订单量的比例即可作为 p_k 的估计, 后期根据实际进入的订单层数更新此概率), 有 $\sum_{k=1}^m p_k = 1$. 根据 1.2 中假设 $r_1 > r_2 > \dots > r_k$, 第 k 类 MTO 的订单价值设为 r_k ;

假设 4 MTO 订单生产完成视为订单价值实现, 生产完成立即交货, 不产生库存成本. 如果订单在交货前置期内完成, 则取得该订单收益 r_k , 反之, 则需承担延迟交货罚金 q_k , 但依然要交货并取得该订单收益 r_k .

于是到达的 MTO 订单是否接受并生产的过程可构成具有马尔科夫性的动态系统, 以 MTO

订单的综合价值为最优生产决策函数, 则决策过程为马尔科夫过程. 决策即决定是否接受新的 MTO 订单并进行生产, 从而使得企业长期内生产的平均综合价值达到最大.

1.3.2 全部生产线均用于生产 MTO 产品

全部生产线均专门用于生产 MTO 产品, 由于生产线无差异, 所以只要存在生产线闲置, 即说明所有已接受的 MTO 订单均已投入生产, 生产线全部被占用后, 订单开始被积压.

1) 不允许积压的订单准入系统(模型 1)

不存在积压的订单决策系统中, 企业从接受订单时刻开始生产, 记生产过程中任意订单进入时刻为 t , $t+1$ 表示下一订单进入时刻, 以 i 表示 t 时刻用于生产的订单数, k_t 表示 t 时刻所进入的订单类, 用 a_{n_t} 表示 t 时刻企业有 n 条生产线正在生产, 不存在订单积压情形时, t 时刻的订单数即为 t 时刻用于生产的生产线条数, 则 $t+1$ 时刻用于生产的订单数为

$$j = \begin{cases} i + 1 - l, & \text{接受 } k_t \\ i - l, & \text{拒绝 } k_t \end{cases}$$

式中 l 为 t 时刻与 $t+1$ 时刻之间完成的 MTO 订单数.

每当 MTO 订单进入时, 企业都立即做出决策决定是否接受订单并生产, 则从一个订单到下一个订单进入平均耗时长为

$$mean(t) = \int_0^{\infty} t dF(t)$$

以 $p_{ij}(a_n)$ 表示 t 时刻订单到达时, 企业原有订单量 i , 企业使用 n 条生产线对订单进行生产, 到 $t+1$ 时刻即下一个订单到达时, 企业剩余 j 个订单的概率. 由于每条生产线只生产一个订单, 每个订单生产时间均服从参数为 u 的负指数分布 $G(x)$, 所以企业选择接受订单时, 企业从 t 时刻到 $t+1$ 时刻订单量的转移概率如下

$$p_{ij}(a_n) = p_{ij}(a_{i+1}) = \begin{cases} \int_0^{\infty} G_{i+1}^j (1-e^{-u})^{i+1-j} e^{-ju} dF(t), & j \leq i+1 \leq N \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

选择拒绝订单时, 从 t 时刻到 $t+1$ 时刻订单量的转移概率如下

$$\begin{aligned}
p_{ij}(a_n) &= p_{ij}(a_i) \\
&= \begin{cases} \int_0^\infty C_i^j (1 - e^{-ut})^{i-j} e^{-jut} dF(t), & j \leq i \leq N \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)
\end{aligned}$$

企业的状态由原有订单量和新到订单的种类组成,以 $s_t = (k_t, j)$ 表示企业在 t 时刻的状态, $s_{t+1} = (k_{t+1}, j)$ 表示企业在 $t + 1$ 时刻的状态,于是企业从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻状态的转移概率为 $p((k_t, j) \rightarrow (k_{t+1}, j))$. 由于企业的订单量和新到订单的种类是独立的,所以

$$p((k_t, j) \rightarrow (k_{t+1}, j)) = p(k_{t+1}) p_{ij}(a_n) \quad (3)$$

将式(1)和式(2)分别代入式(3),可以分别得到接受和拒绝订单时企业从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻状态的转移概率.

计算收益时,为简化计算,假设每一订单在完成时实现本订单的全部价值,即有接受订单收益为 r_{k_i} ; 而如果拒绝订单,则此订单对企业的价值为 0. 从而,企业持续经营过程中平均期望收益为

$$\pi = \lim_{T^* \rightarrow \infty} \sup E \left[\frac{1}{T^*} \sum_{t=0}^{T^*} \pi_{a_t}(s_t) \right] \quad (4)$$

2) 允许积压的订单准入系统(模型 2)

为充分利用生产前置期的产能,企业会选择积压部分订单,在产能被释放时立即投入生产,而不必等待下一个订单到达. 只要保证订单能在前置期内完成,积压订单不仅不会显著增加企业成本,反而可带来更多收益. 显然,产能不变情形下,前置期越长,企业能完成的订单的可能性越大,因而期望收益也会越大. 不妨设生产前置期为 T .

在两订单到达的间隔期间内可能无订单完成,也可能有多个订单完成,这些已完成订单既可能由一条生产线完成,也可能由多条生产线完成. 不妨设两订单到达间隔时间内生产系统共完成 $l (l > 0)$ 个订单,这 l 个订单共由 s 条生产线完成,则有 $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_s = l$ (其中 $\alpha_{s'} > 0, s' = 1, 2, \dots, s$).

由生产一个订单的时间服从指数分布,可知一条生产线在时间 t 内完成的订单个数服从参数为 u 的泊松分布,记 $B(u, t)$ 为泊松分布的右侧

累计分布函数,则某生产线在 t 时间内完成 l' 个订单并在 t 时刻空转的概率为 $B_{l'}(u, t)$, 而在 t 时间内完成 l' 个订单并在 t 时刻仍在生产第 $(l'+1)$ 个订单的概率为 $f_{l'}(u, t) = (ut)^{l'} e^{-ut} / l!$.

于是企业如果接受订单

① 当 $j \leq i + 1 \leq N$ 时,企业共有 $i + 1$ 条线投入生产,期末剩余 j 个订单未完成. 即此时必有 $s = i + 1$, 于是

$$p_{ij}(a_{i+1}) = NP^{-1} \int_0^\infty C_{i+1}^j (1 - e^{-ut})^{i+1-j} e^{-jut} dF(t)$$

其中 NP^{-1} 为归一化参数, $j \leq i + 1 \leq N$.

② 如果 $i + 1 \geq j \geq N$, 则由 FIFO 规则必有期末所有生产线都处于工作状态,此时 $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_s = l$ (其中 $\alpha_{s'} > 0, s = 1, 2, \dots, l$). 于是可得

$$\begin{aligned}
p_{ij}(a_N) &= NP^{-1} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_s = l} C_N^s f_{\alpha_1}(u, t) \times \\
&\quad f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_s}(u, t) (e^{-ut})^{N-s} dF(t)
\end{aligned}$$

其中 NP^{-1} 为归一化参数, $\alpha_{s'} > 0, s = 1, 2, \dots, i + 1 - j$.

③ 如果 $i + 1 > N > j$, 则由 FIFO 规则及生产线不允许闲置设置,知期初有 N 条生产线投入生产,期末有 $N - j$ 生产线处于闲置状态,有 j 条处于生产状态. 由于企业只用了 s 条生产线生产 $l = i + 1 - j$ 个产品,故剩余 $N - s$ 条生产线处于在生产中,因而必有 $j > N - s$. 同时 s 条生产线中在 $t + 1$ 时刻有 $j - (N - s)$ 条生产线还处于生产中,另 $N - j$ 条生产线生产完产品后处于闲置状态,所以

$$\begin{aligned}
p_{ij}(a_N) &= NP^{-1} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_s = l} C_N^s C_s^{j-N+s} \times \\
&\quad f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_{j-N+s}}(u, t) \times \\
&\quad B_{\alpha_{j-N+s}+1}(u, t) \dots B_{\alpha_s}(u, t) (e^{-ut})^{N-s} dF(t)
\end{aligned}$$

其中 NP^{-1} 为归一化参数, $\alpha_{s'} > 0, s = 1, 2, \dots, i + 1 - j$.

由前面计算知

$$NP = \sum_{j=0}^i p_{ij}(a_N)$$

综合三种情况可得接受订单时,企业从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻订单量的转移概率 $p_{ij}(a_n)$ 为

$$p_{ij}(a_n) = \begin{cases} NP^{-1} \int_0^\infty C_{i+1}^j (1 - e^{-ut})^{i+1-j} e^{-jut} dF(t) , & j \leq i + 1 \leq N \\ NP^{-1} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_s=l} C_N^s f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_s}(u, t) (e^{-ut})^{N-s} dF(t) & N \leq j \leq i + 1 \leq N_1 \\ NP^{-1} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_s=l} C_N^s C_s^{j-N+s} f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_{j-N+s}}(u, t) \times \\ B_{\alpha_{j-N+s}+1}(u, t) \dots B_{\alpha_s}(u, t) (e^{-ut})^{N-s} dF(t) , & j \leq N \leq i + 1 \leq N_1 \\ 0 , & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\alpha_s > 0, s = 1, 2, \dots, i + 1 - j$.

同理如果企业拒绝订单, 则企业从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻订单量的转移概率 $p_{ij}(a_n)$ 为

$$p_{ij}(a_n) = \begin{cases} NP^{-1} \int_0^\infty C_i^j (1 - e^{-ut})^{i-j} e^{-jut} dF(t) , & j \leq i \leq N \\ NP^{-1} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_s=l} C_N^s f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_s}(u, t) (e^{-ut})^{N-s} dF(t) & N \leq j \leq i \leq N_1 \\ NP^{-1} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_s=l} C_N^s C_s^{j-N+s} f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_{j-N+s}}(u, t) \times \\ B_{\alpha_{j-N+s}+1}(u, t) \dots B_{\alpha_s}(u, t) (e^{-ut})^{N-s} dF(t) , & j \leq N \leq i \leq N_1 \\ 0 , & \text{其它} \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\alpha_s > 0, s = 1, 2, \dots, i - j$.

从而类似于不允许积压订单的情形, 企业从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻状态的转移概率如下

$$p((k_t, i) | (k_{t+1}, j)) = p(k_{t+1}) p_{ij}(a_n) \quad (7)$$

当接受订单时, 如果 $i < N$, 接受订单后立即生产, 不会产生违约, 此时收益为所接受订单的收益 r_k ; 如果 $i \geq N$, 接受订单后, 以 p_r 的概率在前置期 T 内完成生产, 而以 $(1 - p_r)$ 的概率无法按期交货, 会承担延期交货损失. 新接受订单在前置期 T 时间内完成生产概率为企业在 T_1 (其中 $0 < T_1 < T$) 时间至少完成 $i - N + 1$ 个订单且在 $T - T_1$ 时间内完成新接受订单的概率.

类似于 $p_{ij}(a_n)$ 的算法及 FIFO, 可得新接受订单在 T_1 时间内能投入生产的概率为

$$p_p = 1 - \sum_{l=0}^{i-N+1} p_l = 1 - \sum_{l=1}^{i-N+1} \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_s=l} C_N^s f_{\alpha_1}(u, T_1) \times f_{\alpha_2}(u, T_1) \dots f_{\alpha_s}(u, T_1) \times (e^{-uT_1})^{N-s} - (e^{-uT_1})^N$$

其中 $\alpha_s > 0, s = 1, 2, \dots, l$.

新接受订单在 $T - T_1$ 时间内完成生产的概率为

$$p_c = 1 - e^{-u(T-T_1)}$$

即新接受的订单在前置期 T 时间内完成生产的概

率为

$$p_r = \int_0^T p_p p_c dT_1 \quad (8)$$

因此, 接受订单的收益为

$$r' = p_r r_k + (1 - p_r)(r_k - q_k) \quad (9)$$

如果企业拒绝订单, 则此订单不能给企业带来收益, 因而拒绝订单时收益为 0. 从而, 企业的平均期望收益为

$$\pi = \limsup_{T^* \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{T^*} \sum_{t=0}^{T^*} \pi_{a_t}(s_t) \right] \quad (10)$$

1.3.3 生产线不仅用于生产 MTO 产品(模型 3)

存在以下可能, 即并不是所有生产线都用于生产 MTO 产品, 而是当存在 MTO 订单时, 企业可选择闲置生产线也可挪作他用. Zhang 等^[22]在研究多生产线混合生产 MTO 和 MTS 两种产品时, 分析了多条生产线可在生产 MTO 和 MTS 两种产品之间进行转化时, 生产系统的优化, 该系统除了保持 MTS 库存外还尽可能满足 MTO 产品的需求, 其将 MTO 订单看作无差异的, 当订单量超过企业设置的最大订单量时拒绝订单^[17]. Kanda 等^[27]在 Zhang 等^[22]研究基础上, 考虑了更多变量对系统的影响, 特别的, 当需求较大时加入价格折扣因子, 以保持库存和订单量的稳

定. 以上研究都未对 MTO 订单的差异性进行相关探索, 这就降低了企业对有限产能的利用效率, 尤其是在需求大于企业产能时^[17,19].

由于每条生产线生产一个产品的时间服从参数为 u 的负指数分布, 所以生产线被闲置的概率也服从该分布. 当生产 MTO 产品和其它产品耗时分布相同时, 设两订单到达间隔时间内生产系统共完成的 l ($l > 0$) 个订单共由 s 条生产线完成, 即 $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_s = l$ (其中 $\alpha_{s'} > 0, s' = 1, 2, \dots, s$). 那么当接受新订单时, 有 $l = i + 1 - j$. 企业在 t 时刻与 $t + 1$ 时刻间恰好完成 l (其中 $l \leq i$) 个订单的概率为

$$p_{ij}(a_N) = \begin{cases} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_N=l} f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_N}(u, t) dF(t), & j \neq 0 \\ (1 - \sum_{j=1}^i p_{ij}(a_N)), & j = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中 $l = i + 1 - j, \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N = l, \alpha_{s'} \geq 0, s' = 1, 2, \dots, N$.

$$p_{ij}(a_N) = \begin{cases} \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_N=l} f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_N}(u, t) dF(t), & j \neq 0 \\ (1 - \sum_{j=1}^i p_{ij}(a_N)), & j = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中 $l = i - j, \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N = l, \alpha_{s'} \geq 0, s' = 1, 2, \dots, N$.

从而企业从 t 时刻状态转移至 $t + 1$ 时刻状态的转移概率为

$$p((k_t, i) | (k_{t+1}, j)) = p(k_{t+1}) p_{ij}(a_n) \quad (13)$$

此时, 若接受新订单, 则它在生产前置期 T 内被生产完的概率为

$$p_r = 1 - \sum_{l=0}^i \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_N=l} f_{\alpha_1}(u, T) f_{\alpha_2}(u, T) \dots f_{\alpha_N}(u, T)$$

因而接受订单的期望收益为

$$r' = p_r r_k + (1 - p_r)(r_k - q_k) \quad (14)$$

如果订单被拒绝, 企业收益为 0. 类似于 1.3.2 节可得企业的平均期望收益为

$$\pi = \lim_{T^* \rightarrow \infty} \sup E \left[\frac{1}{T^*} \sum_{i=0}^{T^*} \pi_{a_i}(s_i) \right] \quad (15)$$

$$p_{ij}(a_N) = \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_N=l} f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_N}(u, t) dF(t)$$

完成 l 个订单的概率实际上为完成至少 l 个订单的概率, 因此

$$p_{i0}(a_N) = 1 - \sum_{j=1}^{i+1} p_{ij}(a_N) = 1 - \sum_{l=0}^i \int_0^\infty \sum_{\alpha_1+\alpha_2+\dots+\alpha_N=l} f_{\alpha_1}(u, t) f_{\alpha_2}(u, t) \dots f_{\alpha_N}(u, t) dF(t)$$

因而当企业接受新订单时, 企业从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻订单量的转移概率为

同理可得, 拒绝订单时, 企业从 t 时刻到 $t + 1$ 时刻订单量的转移概率如下

2 数值模拟

TOPSIS 及分层方法都已成熟, 生产企业只需根据自身环境确定纳入排序中的属性并排序和分层, 因此未对订单具体属性进行讨论, 而只讨论影响 MDP 的因素. 从模型建立过程知, 单条生产线生产率, 生产线条数, 订单到达频率, 生产前置期和订单级别都会对企业是否接受新到订单造成影响, 以下将具体分析这种影响.

2.1 分层对订单准入策略的影响

假设生产系统处于持续经营的某一时刻, 生产企业拥有 3 条生产线. 假设生产各订单耗时服从参数 $u = 1$ 的负指数分布(即平均一个单位的时间能完成三个订单), 订单平均生产时间由生产率决定; 订单到达时间间隔服从参数 $\lambda = 10$ 的指数分布, 它是相邻两个独立客户下单的时间, 一

般无记忆性, 因此服从指数分布; 订单前置期 $T = 2$ [3, 22, 26]. 当用马尔科夫决策模型或者排队论研究 MTO 订单接受及生产优化问题时, 多采用类似假设条件. 出现的订单可分为三类即 $K = 3$, 假设各种订单类型出现概率相同, 即 $p_1 = 1/3, p_2 = 1/3, p_3 = 1/3$, 订单价值依次为 $r_1 = 5/6, r_2 = 1/2, r_3 = 1/6$, 延期交货罚金为双倍的订单收益. 以允许生产线闲置的模型为例, 采用平均马尔科夫决策模型求解.

表 1 基于 MDP 的多生产线分层订单准入策略

Table 1 MDP-based multi-production line hierarchical order admission strategy

	0	1	2	3	4	5	6	7
k_1	A	A	A	A	R	R	R	R
k_2	A	R	R	R	R	R	R	R
k_3	R	R	R	R	R	R	R	R

表 1 模型中变量取值如前所示, 表中第一列为订单类别, 第一行为新订单到达时原有订单数, A 表示接受新到订单, R 表示拒绝新到订单. 由表 1 可得, 当企业原有订单数大于 3 时, 企业会拒绝所有新到订单, 当原有订单介于 1 与 3 之间时, 企业只接受第一类订单, 新接受的订单被积压; 当企业没有订单时, 可接受第

一类和第二类订单; 而第三类订单则全部被拒绝.

接下来讨论订单分层如何影响企业的收益. 假设需求率、生产率、前置期都与订单分层时相同, 只是订单只有一类, 期望收益为 $r = 1/2$. 同样利用 MDP 模型求解未分层的订单的平均收益, 只是企业的状态 s 只与原有订单量 j 有关, 此时拒绝订单收益为 0, 接受订单收益为 $r' = p_r r + (1 - p_r)(r - q)$. 此时, 不管订单是否分层, 其期望收益都为 $1/2$. 由于不管企业是否对订单进行分层, 当前已接受订单的收益都是相同的, 且该收益并不会对后接受订单收益构成影响, 故可假设为 0. 表 2 分析了订单分层对企业收益的影响, 表 2 中第一行同表 1, 第二行到第五行为新到不同层级订单时企业收益及不同原有订单量下的平均收益, 第六行为订单未分层时企业决策, 第七行为相应的收益, 第八行为订单分层时相比订单未分层时的平均收益提高比例. 由表 2 可得, 订单分层显著提高了企业收益, 且提高比例受订单新进入时原有订单量的影响. 随着原有订单量的增加, 收益提高比先增后减, 且当订单量达到一定数量后, 收益提高比趋于稳定.

表 2 订单分层与不分层的收益对比分析

Table 2 Comparison of hierarchical and non-hierarchical revenue of orders

		0	1	2	3	4	5	6	7
订单分层	k_1	10.32	9.79	9.12	8.35	7.62	6.92	6.23	5.54
	k_2	9.99	9.49	8.96	8.31	7.62	6.92	6.23	5.54
	k_3	9.84	9.49	8.96	8.31	7.62	6.92	6.23	5.54
	均值	10.05	9.59	9.01	8.32	7.62	6.92	6.23	5.54
订单未分层	决策	A	A	A	R	R	R	R	R
	收益	7.16	6.70	6.21	5.72	5.25	4.77	4.29	3.81
收益提高比(%)		40.30	43.13	45.22	45.40	45.19	45.19	45.20	45.21

既然订单分层对企业收益有影响, 那么这种影响是什么样的, 订单分成多少层是合适的. 图 2 分析了企业对订单分层变动时收益的变化. 图 2 中横坐标为订单层数, 纵坐标为订单平均收益. 图 2(a) 中生产线为 3 条, 图 2(b) 中生产线为 2 条, 二者每

个订单的期望收益一样, 其它设置同 2.1 节. 由图可得, 忽略生产线数量差异, 订单分层越精细, 企业的收益越多, 但存在有限极限. 此外, 分析图 2 并结合大量数值模拟, 发现订单层数约为需求和产能的比值时, 订单分层收益接近最大值.

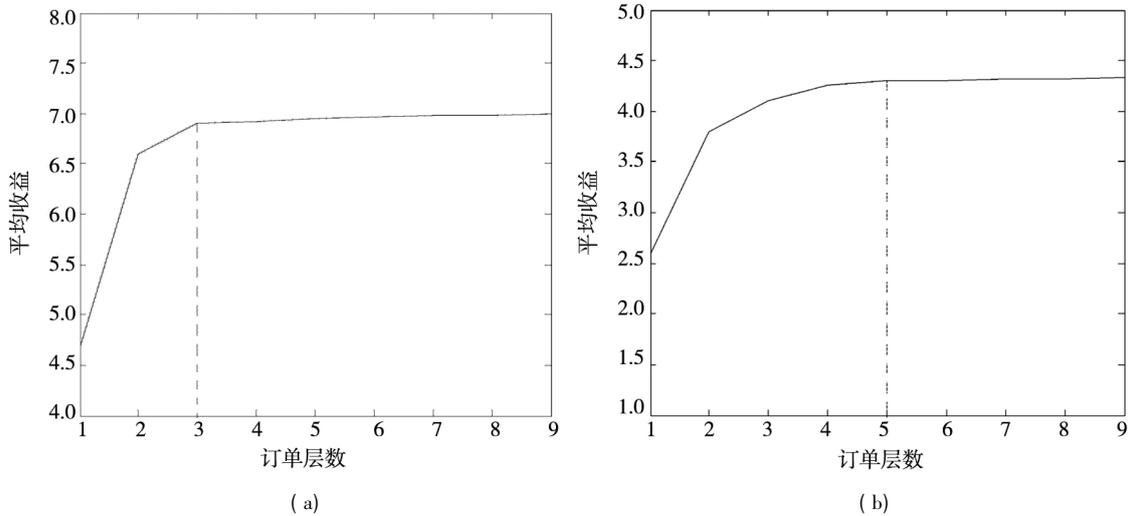


图2 订单层数对企业平均收益的影响

Fig. 2 The impact of order level on the average income of the enterprise

2.2 产能变动对订单准入策略的影响

生产线总数和生产率都是对企业产能造成影响,且二者影响相似,因而在此处只分析生产率变动对企业决策及收益的影响.图3为单条生产线的生产率变动对订单准入策略的影响,图中除生产率外,其它变量与2.1设置相同.图3(a)中纵坐标为新订单进入时企业原有订单量,四条线分别为企业对不同类型的订单接受和拒绝的分界线,当原有订单量在新订单类别 k 的线下,则接受该类订单,否则,拒绝该类订单.图3(b)中纵坐标为订单分类相比不分类提高的收入百分比,

由于订单量大于10之后,收益提高比趋于稳定且大于0,因而只取订单量在10以内的平均收益做对比分析.从图3(a)中可以看出,总的来说,需求固定时,随着生产率的增加,企业可以积压的订单量越多.从各层订单来看,收益高的订单比收益低的订单更可能被接受,并存在严格的序列关系.此外,无论订单是否分层,订单积压到一定量之后订单都会被拒绝.分析图3(b)中可知,订单分层带来的额外收益会随着生产率的提高而降低,当生产率足够大时,使得产能约为需求率的两倍时,订单分层增加的收益基本为0.

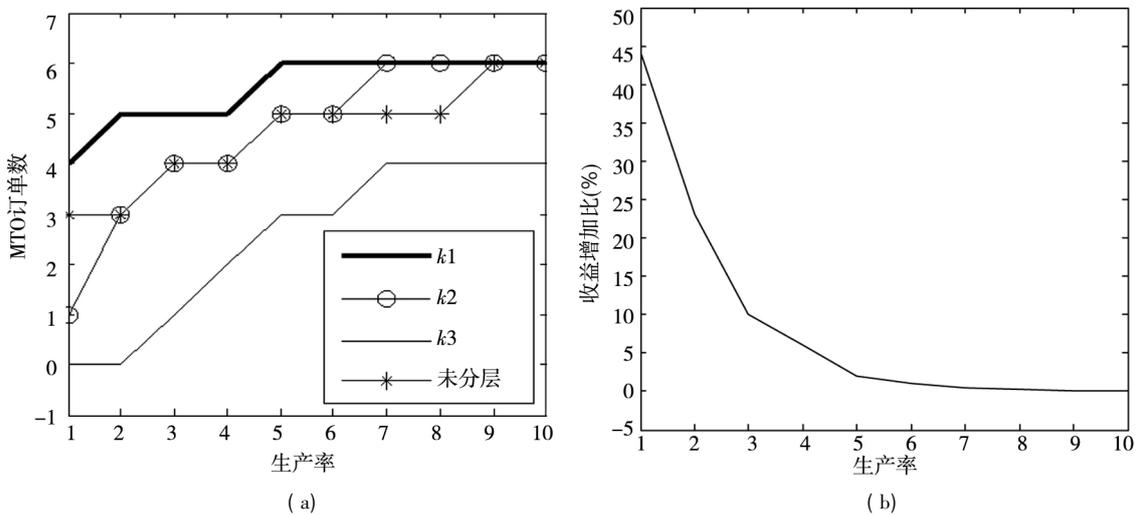


图3 生产率对企业决策及收益对比的影响

Fig. 3 The impact of productivity on business admission strategy and income comparison

2.3 需求率变动对订单准入策略的影响

需求率变动对企业是否接受新到订单有重要影响,图 4 清晰的显示了需求率对订单准入策略的影响. 图 4 中横坐标为需求率,其它变量同 2.1 节设置. 从图 4(a) 可以看出,需求率越高,企业积压的订单越少;反之,积压订单越少. 从订单种类来看,第二层、第三层的订单受需求率变化的影响较大,需求率

越低,这些类别的订单越容易被接受,反之被拒绝;而第一层订单虽然受到和第二层、第三层订单相同的影响,但这种影响显著减小. 从图 4(a) 还可以看出,对于分层订单,当需求足够大之后,企业几乎只接受收益最大的订单,而其它订单都被拒绝. 从图 4(b) 可以看出,随着需求的增加,企业从订单分层策略中得到的收益呈单调上升的趋势.

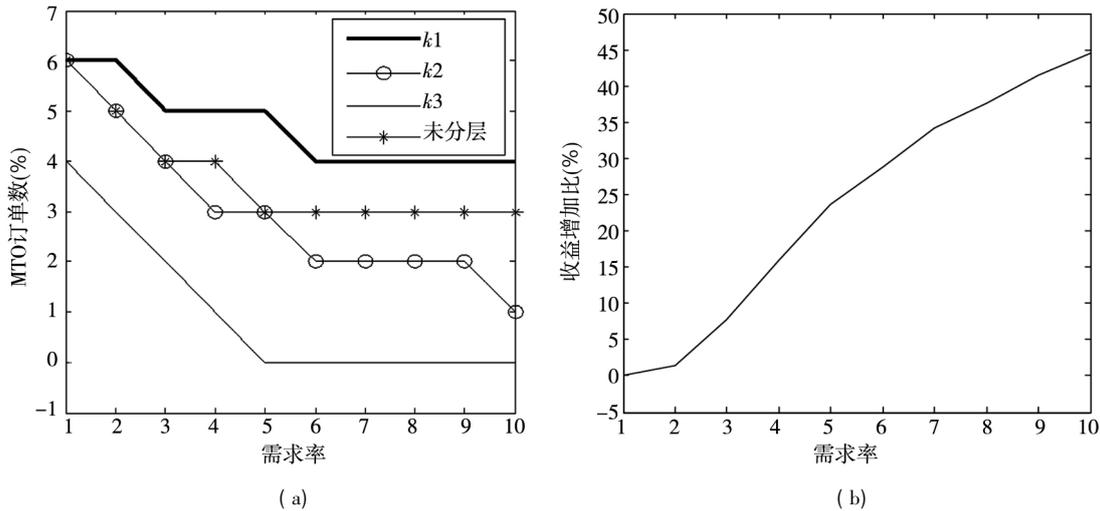


图 4 需求率对企业决策及收益对比的影响

Fig. 4 The impact of demand rate on enterprise admission strategy and income comparison

2.4 生产前置期变动对订单准入策略的影响

生产前置期是企业可用于生产订单的时间,能否按时交货决定了企业能否取得订单收益,因而其很大程度上影响企业决策. 生产前置期越长,企业在前置期内完成的订单越多,因而企业能积压的订单也越多. 图 5 横坐标为订单生产前置期,其它变量设置与 2.1 节相同,图中虚线部分为趋势,而非真实值. 由图 5(a) 中可得 前置期长短显著影响了第一层订单准入策略,随着前置期延长,企业接受该层的订单越多;而第二层、第三层订单受前置期影响很小,只有在前置期较长且已有订单量非常小时才会接受收益较低的订单.

值,如图 5(d). 由图 5(d) 可知,企业收益提高比也呈先增后减的趋势.

生产前置期既影响企业决策,又影响其收益. 观察图 5(b) 知,订单分层时,在 2.1 节参数设置下,前置期约为 5 时,企业收益达到最大,而不是随前置期的延长而无限增加. 如果订单未分层,企业收益随前置期的延长单调上升,但存在极限,如图 5(c),对比分层与不分层,前置期约为 5 时,分层带来的收益增加百分比接近最大

3 结束语

在前人研究基础上,研究企业拥有多条无差异生产线且每个订单收益不同时,企业的订单准入策略.

首先考虑多个影响订单因素,对订单利用 TOPSIS 方法进行排序,把每个订单与理想订单距离作为该订单的综合收益,并对该综合收益进行分层. 其次建立三个 MDP 模型,前两个适用于生产系统只用于生产 MTO 订单时,探讨允许积压订单与不允许积压订单两种情形,第三个模型适用于系统可在 MTO 生产和其它生产方式间切换时订单准入策略的优化. 该模型的建立可帮助企业优化订单准入策略,特别是在企业产能不足以满足市场需求时,该模型可大大提高企业的综合收益.

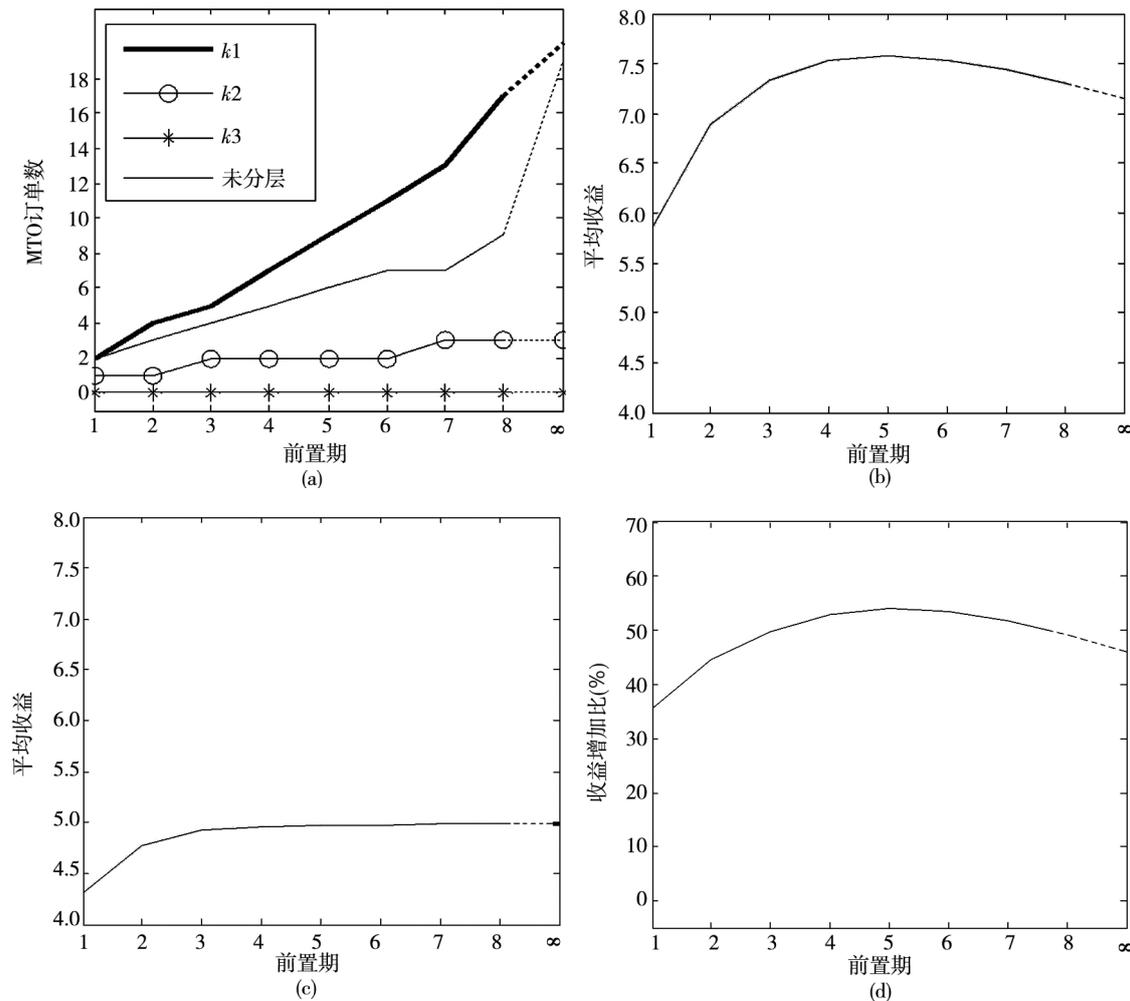


图5 前置期变动对企业决策及收益对比的影响

Fig. 5 The impact of lead time on enterprise admission strategy and income comparison

由仿真分析结果可知,市场需求、企业生产率、前置期、订单分层数等都是影响企业决策的重要变量. 总体而言,需求接近或大于企业产能时,订单分层相比不分层能够给企业带来更多的收益,反之,当需求小于产能时,订单分层几乎不能给企业带来额外收益. 需求接近或大于企业产能时,随需求的增加或产能的减少,企业可从订单分层中获得更多收益,反之,获得收益更少. 而且,订单的分层越精细,分层带来的收益越

多,但存在极限,分层数约为需求和企业产能的比值时,订单分层带来的收益接近最大. 因而通常情况下,企业都应对客户的MTO进行分层,分层数约等于需求和产能的比值,以便选取收益高的订单,增加企业收入. 虽然随企业生产前置期的增加,企业可大量积压订单,但这种无限制的积压并不能持续给企业带来额外收益,因而企业需要针对自身产能和市场需求合理设置生产前置期,最大化自身利润.

参考文献:

[1] Jemai Z, Karaesmen F. The influence of demand variability on the performance of a make-to-stock queue [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(1): 195-205.
 [2] 叶飞, 林强, 莫瑞君. 基于B-S模型的订单农业供应链协调机制研究 [J]. 管理科学学报, 2012, (1): 66-76.

- Ye Fei, Lin Qiang, Mo Ruijun. Contract-farming supply chain coordination mechanism based on B-S model [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, (1): 66-76. (in Chinese)
- [3] Beemsterboer B, Land M, Teunter R. Hybrid MTO-MTS production planning: An explorative study [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 248(2): 453-461.
- [4] Hans A. Towards a better understanding of order acceptance [J]. *International of Production Economics*, 1994, 37(1): 139-152.
- [5] 张涛, 陈琦, 黄颖雷, 等. 钢铁企业 MTO-MTS 混合合同计划管理模式研究 [J]. *管理科学学报*, 2013, 16(6): 35-45.
- Zhang Tao, Chen Qi, Huang Yinglei, et al. Make to order: Make to stock management mode on the order planning problem of steel-iron factories [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2013, 16(6): 35-45. (in Chinese)
- [6] 潘伟. 基于供应中断风险的模糊多目标订单分配模型 [J]. *管理科学学报*, 2015, (3): 45-51.
- Pan Wei. Fuzzy multi-objective order allocation model with supply disruption [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2015, (3): 45-51. (in Chinese)
- [7] 王迎军. 顾客需求驱动的供应链契约问题综述 [J]. *管理科学学报*, 2005, 8(2): 68-76.
- Wang Yingjun. Overview of supply chain contract problems driven by customer demand [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(2): 68-76. (in Chinese)
- [8] Balakrishnan N, Sridharan V, Patterson J W. Rationing capacity between two product classes [J]. *Decision Sciences*, 1996, 27(2): 185-214.
- [9] Sridharan S V. Managing capacity in tightly constrained systems [J]. *International Journal of Production Economics*, 1998, 56: 601-610.
- [10] Kalantari M, Rabbani M, Ebadian M. A decision support system for order acceptance: Rejection in hybrid MTS: MTO production systems [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(3): 1363-1377.
- [11] Beemsterboer B, Land M, Teunter R, et al. Integrating make-to-order and make-to-stock in job shop control [J]. *International Journal of Production Economics*, 2017, 185: 1-10.
- [12] Akyildiz B, Kadaifci C, Topcu Y I, et al. Prioritization of customer order selection factors by utilizing conjoint analysis: A case study for a structural steel firm [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic, Business and Industrial Engineering*, 2014, 8(2): 498-502.
- [13] Mlinar T, Chevalier P. Dynamic admission control for two customer classes with stochastic demands and strict due dates [J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(20): 6156-6173.
- [14] Rom W O, Slotnick S A. Order acceptance using genetic algorithms [J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(6): 1758-1767.
- [15] Altendorfer K, Minner S. Influence of order acceptance policies on optimal capacity investment with stochastic customer required lead times [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 243(2): 555-565.
- [16] Emami S, Moslehi G, Sabbagh M. A benders decomposition approach for order acceptance and scheduling problem: A robust optimization approach [J]. *Computational and Applied Mathematics*, 2016, 1-45.
- [17] Ebadian M, Rabbani M, Jolai F, et al. A new decision-making structure for the order entry stage in make-to-order environments [J]. *International Journal of Production Economics*, 2008, 111(2): 351-367.
- [18] 范丽繁, 陈旭. 顾客可能取消订单的 MTO 企业订单定价策略 [J]. *管理学报*, 2012, 9(5): 729-734.
- Fan Lifan, Chen Xu. MTO enterprise orders pricing strategy for customers may cancel orders [J]. *Chinese Journal of Management*, 2012, 9(5): 729-734. (in Chinese)
- [19] Hing M M. Order Acceptance Under Uncertainty: A Reinforcement Learning Approach [M]. Netherlands Enschede: University of Twente, 2006.
- [20] 王晓欢, 王宁宁, 樊治平. 基于强化学习的订单生产型企业的订单接受策略 [J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3121-3129.

- Wang Xiaohuan , Wang Ningning , Fan Zhiping. Order acceptance policy for order-based enterprises based on reinforcement learning [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice* , 2014 , 34(12) : 3121–3129. (in Chinese)
- [21] 张人千. 考虑时间序列关联的订单选择决策比较研究 [J]. *管理科学学报* , 2009 , 12(3) : 44–55.
Zhang Renqian. A comparative study of order selection decision-making considering time series correlation [J]. *Journal of Management Sciences in China* , 2009 , 12(3) : 44–55. (in Chinese)
- [22] Zhang Z G , Kim I , Springer M , et al. Dynamic pooling of make-to-stock and make-to-order operations [J]. *International Journal of Production Economics* , 2013 , 144(1) : 44–56.
- [23] Piya S , Khadem M M R K , Shamsuzzoha A. Negotiation based decision support system for order acceptance [J]. *Journal of Manufacturing Technology Management* , 2016 , 27(3) : 443–468.
- [24] Kuo Y , Yang T , Parker D , et al. Integration of customer and supplier flexibility in a make-to-order industry [J]. *Industrial Management & Data Systems* , 2016 , 116(2) : 213–235.
- [25] Ghelase D , Daschievici L , Marinescu V , et al. Method for control of the make-to-order manufacturing system on the base of earning power assessment [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 2013 , 65(9) : 1439–1458.
- [26] Carr S , Duenyas I. Optimal admission control and sequencing in a make-to-stock: Make-to-order production system [J]. *Operations Research* , 2000 , 48(5) : 709–720.
- [27] Kanda S , Takahashi K , Morikawa K. A flexible service rule for the dynamic make-to-stock: Make-to-order hybrid production system [J]. *Procedia Manufacturing* , 2015 , (2) : 46–50.

Admission decision based on hierarchical MTO order

CAO Yu¹ , WU Kan¹ , XIONG Shou-yao^{2*}

1. Business School , Central South University , Changsha 410083 , China;

2. School of Mathematics and Statistics , Changsha University of Science & Technology , Changsha 410114 , China

Abstract: This paper studies order admission strategy for a Make to Order (MTO) production system with random arriving orders. Our method includes two steps. In the first step , the Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution (TOPSIS) is adopted to calculate the degree of closeness between new orders and ideal orders which will be regarded as the comprehensive income of the orders , which is used to further prioritize the new order. In the second step , whether to accept the new order or not is analyzed through Markov Decision Process (MDP) model. The result shows that when demand is close to or more than capacity , order hierarchy can increase benefits but not when the demand is largely less than the capacity. The income by stratifying orders will increase with the demand , decrease with the capacity , and has an inverted U-shaped relationship with production lead time. The numerical result shows that the income is higher with more exquisite order hierarchy. When the hierarchy number is closer to the number of production lines , the income is closer to the maximum.

Key words: MTO; MDP; order hierarchy; admission decision