

# 考虑风险传导情形的订单接受决策方法

于超<sup>1,2,3†</sup>, 刘洋<sup>3</sup>, 樊治平<sup>3</sup>

(1. 沈阳工业大学 管理学院, 沈阳 110870; 2. 沈阳工业大学 机械工程  
博士后流动站, 沈阳 110870; 3. 东北大学 工商管理学院, 沈阳 110169)

**摘要:** 制造商收到产品订单申请后通常需要综合考虑订单收益和交货违约风险进而作出是否接受订单的决策. 现实中交货违约风险可能沿供应链向下游传导, 如何在考虑风险传导情形的基础上估计订单交货违约风险进而作出正确的订单接收决策, 这是一个需要关注的研究课题. 对此, 提出一种考虑风险传导情形的订单接受决策方法. 首先, 依据供应链自身的构成和特点, 针对导致订单产品交货违约的两种情况, 即订单产品质量不达标和订单产品交货延迟, 构建涉及多级供应商的描述订单产品交货违约事件的故障树; 其次, 依据故障树分析的原理计算订单产品交货违约的概率; 再次, 通过计算制造商接受订单的预期收益, 作出是否接受订单的决策; 最后, 通过一个算例表明所提出方法的可行性及潜在应用.

**关键词:** 订单接受; 交货违约风险; 风险评估; 风险传导; 故障树分析

**中图分类号:** C934      **文献标志码:** A

## Decision making method for order acceptance considering risk propagation

YU Chao<sup>1,2,3†</sup>, LIU Yang<sup>3</sup>, FAN Zhi-ping<sup>3</sup>

(1. School of Management, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Post-doctoral Research Station of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 3. School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** The manufacturer usually needs to evaluate the earnings and the product delivery default risk to decide whether to accept the product order after receiving the product order. In reality, the product delivery default risk may propagate downstream along the supply chain. However, how to evaluate the product delivery default risk considering the risk propagation so as to make the correct order acceptance decision is a research topic that needs to be concerned. In this paper, a decision making method for order acceptance considering the risk propagation is proposed. Firstly, according to the structure and characteristics of the supply chain, the fault tree including multiple suppliers is constructed aiming to the two cases leading to the product delivery default, i.e., below-standard product quality and product on backorder. Then, the probabilities of basic events in the fault tree are estimated. Furthermore, the probability of the product delivery default event is calculated according to the principle of fault tree analysis (FTA). On this basis, the prospective earnings of accepting the order are calculated and the order acceptance decision is made. According to the assessment result, the manufacturer can decide whether to accept the product order. Finally, a practical example is used to illustrate the feasibility and potential application of the proposed method.

**Keywords:** order acceptance; delivery default risk; risk evaluation; risk propagation; FTA

## 0 引言

订单接受决策, 即制造商收到产品订单申请后要作出是否接受订单的决策, 制造商在作出决策之前除了要考虑接受订单并顺利完成订单任务后会获得的收益, 更要着重考虑接受订单后是否能确保按照合

同约定完成订单并顺利交货, 即制造商要对订单的交货违约风险进行评估<sup>[1]</sup>. 若某订单的交货违约风险较高, 则制造商可能会考虑拒绝该订单或通过协商调整交货时间、违约赔偿金额等条款以降低该订单的交货违约风险. 订单产品交货违约主要表现在交付的

收稿日期: 2017-08-24; 修回日期: 2018-01-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71771043, 71571039); 中国博士后科学基金项目(2018M630305); 辽宁省社科联 2018 年度辽宁省经济社会发展研究课题(2018lsktqn-054).

作者简介: 于超(1987—), 女, 讲师, 博士后, 从事运作管理与决策分析的研究; 樊治平(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事运作管理与决策分析等研究.

†通讯作者. E-mail: yuchao\_neu@163.com.

订单产品质量不达标和订单产品交货不及时两个方面<sup>[2]</sup>,这可能是由于制造商自身生产能力限制、上游零部件供应商违约、产品运输环节出现事故等多方面原因造成的,值得注意的是,交货违约风险可能沿供应链向下游传导<sup>[3]</sup>.例如,路虎(Land Rover)公司在接受了“发现”系列越野车生产订单后,其汽车底盘的独家供应商UPF-Thompson公司因经营不善宣告破产而无法继续向路虎公司供应汽车底盘,最终造成路虎公司高达4千万英镑的巨大经济损失<sup>[4]</sup>.因此,制造商在作出订单接受决策之前,有必要在考虑供应链风险传导情形下有效地对订单交货违约风险进行评估,而如何在供应链环境中合理地考虑风险传导情形并对订单交货违约风险进行有效评估进而支持制造商作出订单接受决策,有关这方面的研究值得关注.

从已有研究来看,关于制造商订单接受决策方法已取得了一些研究成果.例如:张欣等<sup>[5]</sup>针对制造商在生产能力和产出缓存有限的情况下的订单接受决策问题,通过构建以制造商利润最大化为目标的优化模型来确定最优的订单接受策略;张人千<sup>[6]</sup>针对制造商订单接受决策问题,提出了一个考虑在不同计划期的订单之间有可能存在时间序列关联情形的订单接受决策方法;Oguz等<sup>[7]</sup>针对订单接受与调度决策问题,构建了一个考虑交货延迟损失的以制造商总收益最大化为目标的优化模型并给出了求解算法;王晓欢等<sup>[8]</sup>以制造商长期利润最大化为目标,提出了一个基于强化学习思想的最优订单接受策略求解方法;宋李俊等<sup>[9]</sup>针对竞争环境下MTO企业订单接受决策问题,提出了一个考虑总人工时约束的MTO企业订单竞争决策方法;王雷等<sup>[10]</sup>针对多节点订单接受决策问题,建立了一种考虑缓冲区约束对订单接受的影响的订单接受模型,并给出了模型的求解算法;周兴建等<sup>[11]</sup>针对供应链跨链订单并行配置问题,建立了基于两条单链进行柔性动态订单配置情形的基本模型,并扩展构建了用来机动处理能力内和能力外的跨链订单的订单跨链并行配置模型,同时还给出了求解算法;Lin等<sup>[12]</sup>针对生产能力有限且订单带有送货需求情形下的订单接受与调度问题,建立了以总收益最大化为目标的优化模型,并给出了求解算法;Lei等<sup>[13]</sup>针对流水车间中的订单接受与调度问题,以完工时间最短和总收益最大为优化目标,建立了一个混合整数线性规划模型,并有针对性地给出了一个并行邻域搜索算法用于模型求解;Xie等<sup>[14]</sup>针对单机器环境下的订单接受与调度问题,构建了以总收益最大化为目标的优化模型,该模型中考虑加工时间、交货期、

订单收益、调整时间已知,并给出了一个强化ABC算法用于求解模型;Ou等<sup>[15]</sup>针对制造商服务水平与可拒绝订单数量均有限情形下的订单接受与调度问题,提出了一个优化决策方法;Jiang等<sup>[16]</sup>针对分批次交货情形下的订单接受与调度问题提出了一个优化决策方法;Chaurasia等<sup>[17]</sup>提出了两种混合式元启发式算法用于求解单机器环境下的订单接受与调度问题;Noroozi等<sup>[18]</sup>针对集成生产分销调度中的订单接受与分批次送货问题,构建了以总收益最大化为优化目标的混合整数线性规模模型,模型中综合考虑了订单收益、送货费用和订单交货延迟的罚金,并给出了求解算法,通过求解模型进行订单接受与分批次送货的决策;Silva等<sup>[19]</sup>针对带有顺序相关调整时间的订单接受与调度问题,构建了以总收益最大化为目标的优化模型,并给出了一个启发式算法用来求解得到接受的订单任务集合和调度方案;Li等<sup>[20]</sup>针对集群式供应链情景下的订单接受与调度问题,分别构建了跨链合作模式下和非跨链合作模式下的以总收益最大化为目标的订单接受与调度的联合决策模型,并给出了求解算法;Wu等<sup>[21]</sup>针对同速并行机器环境下的订单接受与调度问题,同时考虑了交货期、订单收益、违约惩罚和顺序相关调整时间四方面因素,构建了一个整合的优化模型,并给出了一个改进的水流式算法.

已有研究成果从不同角度给出了订单接受决策方法,为解决订单接受决策问题提供了较好的思路与支撑.但需要指出的是,已有研究大多仅考虑制造商自身收益和交货延迟风险,对于订单产品的质量风险较少考虑,且较少考虑到交货违约风险沿供应链传导的情形,不能很好地解决现实中多级供应链环境中的订单接受决策问题.对此,本文提出一种考虑风险传导情形的订单接受决策方法.该方法的核心思想是,将订单产品生产涉及到的供应链视为一个系统,将订单产品交货违约事件视为故障树分析的顶上事件;根据供应链中各节点企业之间的供应关系,综合考虑产品交付时的质量和交货时间两个方面,构建包含多级供应商的采购、生产、质检和运输等环节的描述订单产品交货违约事件的故障树;依据故障树分析的原理计算订单产品交货违约事件发生的概率;在此基础上,对订单产品交货违约风险和制造商预期收益进行评估,进而作出正确的订单接受决策.

## 1 问题描述

制造商收到某一产品订单申请,制造商可以选择接受或拒绝该订单.在接受该订单的情况下,若制造商按照合同约定完成订单并顺利交货,则制造商可以

获得一定的报酬;反之,若制造商交货违约,则需支付给客户一定额度的经济赔偿.该订单产品的生产涉及到多种零部件或原材料,制造商自身不具备零部件的生产能力,需要向上游供应商(即制造商的一级供应商)进行采购.经过进一步调研得知,一级供应商在生产制造商所需的零部件的过程中,亦会向其上游供应商(即制造商的二级供应商)采购相关零部件,对于制造商的二级供应商以及更高级的多个供应商亦是如此.本文所要研究的问题是,在考虑风险传导的情形下,如何有效地评估订单产品的交货违约风险进而支持制造商正确作出订单接受决策.为此,下面给出该问题中所涉及的集和量的具体描述.需要指出的是,造成订单产品质量不达标的主要原因是制造商自身在采购、生产、质检和运输等环节的失误,而造成订单产品交货延迟的主要原因是多级供应商在采购、生产和运输等环节发生的延误.为了方便符号的描述和说明,在下面的符号定义过程中,采用上标 $Q$ 来表示订单产品质量不达标所涉及到的相关因素和事件,采用上标 $D$ 来表示订单产品交货延迟所涉及到的相关因素和事件.

$RM = \{RM_1, RM_2, \dots, RM_n\}$ :生产订单产品所需的 $n$ 种零部件的集合,其中 $RM_j$ 表示生产订单产品所需的第 $j$ 种零部件, $j = 1, 2, \dots, n$ .

$S_j = \{S_{j1}, S_{j2}, \dots, S_{jl_j}\}$ :原材料 $RM_j$ 的 $l_j$ 个供应商的集合,其中 $S_{jk}$ 表示零部件 $RM_j$ 的第 $k$ 个供应商, $j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, l_j$ .通常,制造商会针对一种零部件指定两个甚至更多个供应商,这种情况下,当主供应商无法及时供货时可由备用供应商进行供货,从而有效降低采购风险<sup>[22]</sup>.

$P^{PQ} = (p_1^{PQ}, p_2^{PQ}, \dots, p_n^{PQ})$ :采购入库的订单产品所需的零部件质量不达标的概率向量,其中 $p_j^{PQ}$ 表示采购入库的第 $j$ 种零部件质量不达标的概率, $j = 1, 2, \dots, n$ .

$p_E^{MQ}$ :制造商在生产过程中造成订单产品质量不达标的概率.通常,在生产工艺和流程等因素不变的情况下,可以通过对历史数据的分析估计 $p_E^{MQ}$ 的值.

$p_E^{OQ}$ :订单产品出库检查出现误检现象的概率.这里出库检查出现误检现象是指出库检查过程中错将质量不达标的订单产品认定为合格品.通常, $p_E^{OQ}$ 的值可以通过对历史数据的分析确定.

$p_E^{TQ}$ :订单产品在运输过程中造成质量破损的概率.通常, $p_E^{TQ}$ 的值可以根据天气状况和运输道路的交通情况估计得到.

$P^{PD} = (p_1^{PD}, p_2^{PD}, \dots, p_n^{PD})$ :订单产品所需的零

部件采购延误的概率向量,其中 $p_j^{PD}$ 表示订单产品生产所需零部件 $RM_j$ 在采购环节发生延误的概率, $j = 1, 2, \dots, n$ .

$p_E^{MD}$ :制造商在订单产品生产环节发生延误的概率.通常,在生产能力和设备维护等情况不变的情况下,可以通过对历史数据的分析估计 $p_E^{MD}$ 的值.

$p_E^{TD}$ :制造商在订单产品运输环节发生延误的概率.通常, $p_E^{TD}$ 的值可以根据天气状况和运输道路的交通情况估计得到.

$f_E$ :订单产品交货违约情况下可能会给制造商带来的经济损失.通常,交货违约将为制造商造成多种经济损失,包括:成本损失、机会损失、赔偿金等.为了便于研究,这里考虑 $f_E$ 是已进行综合处理后的订单产品交货违约导致的经济损失之和.

$r_E$ :制造商按照合同约定完成订单并顺利交货而获得的收益.

$a_E$ :制造商可接受的风险容量.

$f_{jk}^Q$ :供应商 $S_{jk}$ 提供的零部件 $RM_j$ 质量不达标需支付给制造商的赔偿金, $j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, l_j$ .

$f_{jk}^D$ :供应商 $S_{jk}$ 提供的零部件 $RM_j$ 交货延迟需支付给制造商的违约金, $j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, l_j$ .

本文要解决的问题是,如何依据 $P^{PQ}$ 、 $p_E^{MQ}$ 、 $p_E^{OQ}$ 、 $p_E^{TQ}$ 、 $P^{PD}$ 、 $p_E^{MD}$ 、 $p_E^{TD}$ 、 $f_E$ 、 $f_{jk}^Q$ 和 $f_{jk}^D$ ,作出是否接受订单的决策.

## 2 故障树的构建

为了对订单产品交货违约事件发生的概率进行估计,首先需要构建描述订单产品交货违约事件的故障树.依据现实中大量交货违约事件的实际背景,结合故障树分析的思想,给出构建描述订单产品交货违约事件的故障树的具体步骤.

1) 确定顶上事件,即将订单产品交货违约作为顶上事件.

2) 确定边界条件,即确定在分析风险事件时需要考虑哪些零部件以及考虑到几级的供应商.通常,订单产品在交货前需要经过产品生产、产品质检和产品运输等多个环节,会涉及到多种零部件和多级供应商.一般而言,订单产品的质量仅与关键部件密切相关,因为对于一般性的零部件,即使质量出现问题也可以及时购买更换,通常不至于影响到订单产品的质量.另一方面,一般性的零部件可以很方便地通过现货市场购买补给,不至于影响订单产品的生产进度,故订单产品的生产进度只有当关键部件在采购、

生产和运输环节发生延误时才会受到影响,进而影响订单产品的交货时间.因此,在构建故障树时,仅需考虑产品关键部件对订单产品交货的影响.另外,由于级数较大的供应商(如三级或四级供应商)对订单产品交货的影响相对较小,且对其采购、生产和运输的相关信息获取较为困难,在构建故障树时亦不做考虑.

3) 确定中间事件和基本事件.通常,导致订单产品交货违约的主要原因包括订单产品质量不达标和交货延迟两种情况.对于订单产品质量不达标,主要是结合企业生产加工的实际情况,侧重制造商在零部件采购、生产加工、出库检验和产品运输等可能造成产品质量不达标多个环节,逐层向下分解直至找到可能导致订单产品质量不达标的所有事件或情况.另一方面,对于订单产品交货延迟,主要是结合企业所处供应链的实际情况,侧重于零部件采购、生产加工和产品运输等可能造成产品交货延迟的多个环节,逐层向下分解直至找到可能导致订单产品交货延迟的所有事件或情况.这里,将可以进一步分解的事件作为中间事件,将无需再分解的事件作为基本事件.

4) 添加逻辑门.依据故障树中各事件节点之间的逻辑关系,如果有一个下层事件发生就会导致上层事件发生,则采用“或”门连接;如果下层事件全部发生才会导致上层事件发生,则采用“与”门连接.

按照上述步骤,可以针对具体的产品构建描述订单产品交货违约事件的故障树.下面通过一个简单的例子进一步说明描述订单产品交货违约事件的故障树的构建过程.考虑一个仅由采购方 $C$ 、制造商 $E$ 和一级供应商 $S$ 组成的供应链.在该供应链中,制造商 $E$ 在接受了采购方 $C$ 的订单后,通过向一级供应商 $S$ 采购零部件 $RM$ 来完成订单产品的生产.针对该供应链,构建描述订单产品交货违约事件的故障树如图1所示,其中各符号的含义如下.

$T$ : 制造商 $E$ 交货违约;

$M_1$ : 订单产品质量不达标;

$M_2$ : 订单产品交货延迟;

$M_3$ : 出库的订单产品质量不达标;

$M_4$ : 制造商在零部件 $RM$ 的采购环节发生延误;

$M_5$ : 订单产品出库前质量不达标;

$X_1$ : 订单产品出库检查时出现误检现象造成质量不达标产品未被检查出来;

$X_2$ : 采购入库的订单产品零部件 $RM$ 质量不达标;

$X_3$ : 生产过程造成订单产品质量不达标;

$X_4$ : 订单产品在运输过程中破损;

$X_5$ : 制造商在订单产品生产环节发生延误;

$X_6$ : 供应商 $S$ 在零部件 $RM$ 的原材料或零部件的采购环节发生延误;

$X_7$ : 供应商 $S$ 在零部件 $RM$ 生产环节发生延误;

$X_8$ : 供应商 $S$ 在零部件 $RM$ 运输环节发生延误;

$X_9$ : 制造商在订单产品运输环节发生延误.

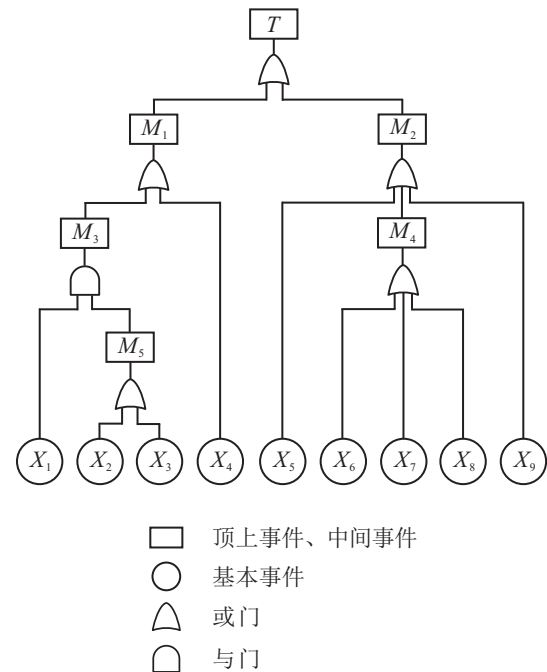


图1 描述订单产品交货违约事件的故障树

### 3 交货违约概率的计算

下面给出依据故障树分析原理计算订单产品交货违约概率的过程描述.

首先,对考虑供应链风险传导情形的订单产品交货违约的概率进行估计.依据构建的描述订单产品交货违约事件的故障树,令 $X_1, X_2, \dots, X_r$ 表示构建的故障树中的 $r$ 个基本事件,可以建立反映事件间逻辑关系的订单产品交货违约事件的逻辑表达式

$$ET = F_T(X_1, X_2, \dots, X_r). \quad (1)$$

其中: $T$ 表示订单产品交货违约事件,即故障树的顶上事件; $F_T(\cdot)$ 为包含基本事件 $X_1, X_2, \dots, X_r$ 间逻辑关系的逻辑表达式.令逻辑表达式中的符号 $\otimes$ 表示两个事件之间由“与”门连接,符号 $\oplus$ 表示两个事件之间由“或”门连接.以图1中的故障树为例,易知

$$T = M_1 \oplus M_2. \quad (2)$$

其中

$$M_1 = M_3 \oplus X_4, \quad (3)$$

$$M_2 = X_5 \oplus M_4 \oplus X_9, \quad (4)$$

$$M_3 = X_1 \otimes M_5, \tag{5}$$

$$M_4 = X_6 \oplus X_7 \oplus X_8, \tag{6}$$

$$M_5 = X_2 \oplus X_3. \tag{7}$$

这样,依据式(1)~(7),最终可得

$$T = ((X_1 \otimes (X_2 \oplus X_3)) \oplus X_4) \oplus (X_5 \oplus (X_6 \oplus X_7 \oplus X_8) \oplus X_9). \tag{8}$$

令  $p_1, p_2, \dots, p_r$  分别表示  $r$  个基本事件  $X_1, X_2, \dots, X_r$  发生的概率. 通常,  $p_1, p_2, \dots, p_r$  可以通过对定性数据的处理<sup>[23]</sup> 和历史事件的分析<sup>[24]</sup> 以及专家的主观评估<sup>[25]</sup> 来确定. 记订单产品交货违约的概率为  $p_T$ , 依据逻辑表达式  $F_T(X_1, X_2, \dots, X_r)$  和基本事件概率  $p_1, p_2, \dots, p_r$ , 可以计算订单产品交货违约的概率为

$$p_T = f_T(p_1, p_2, \dots, p_r), \tag{9}$$

其中  $f_T(\cdot)$  为与逻辑表达式  $F_T(\cdot)$  对应的概率运算公式. 逻辑表达式  $F_T(\cdot)$  中: 如果事件  $X_h$  和  $X_{h'}$  采用  $\otimes$  连接, 则在概率运算公式  $f_T(\cdot)$  中表示为  $p_h p_{h'}$ ; 如果事件  $X_h$  和  $X_{h'}$  采用  $\oplus$  连接, 则在概率运算公式  $f_T(\cdot)$  中表示为  $p_h + p_{h'} - p_h p_{h'}$ . 例如, 针对图1中的故障树, 依据式(2)可以得到

$$p_T = p_{M_1} + p_{M_2} - p_{M_1} p_{M_2}, \tag{10}$$

其中  $p_{M_1}$  表示订单产品质量不达标的概率. 依据式(3),  $p_{M_1}$  可以进一步表示为

$$p_{M_1} = p_{M_3} + p_4 - p_{M_3} p_4, \tag{11}$$

其中  $p_{M_3}$  表示订单产品出库时质量不达标的概率. 依据式(5),  $p_{M_3}$  的计算公式为

$$p_{M_3} = p_1 p_{M_5}, \tag{12}$$

其中  $p_{M_5}$  表示订单产品出库前质量不达标的概率. 依据式(7),  $p_{M_5}$  的计算公式为

$$p_{M_5} = p_2 + p_3 - p_2 p_3. \tag{13}$$

另一方面, 在式(10)中,  $p_{M_2}$  表示订单产品交货延迟的概率, 由式(4)可知,  $p_{M_2}$  的计算可以表示为

$$p_{M_2} = p_5 + p_{M_4} + p_9 - p_5 p_{M_4} - p_5 p_9 - p_{M_4} p_9 + p_5 p_{M_4} p_9, \tag{14}$$

其中  $p_{M_4}$  表示制造商在原材料或零部件采购环节发生延误的概率, 即一级供应商延迟交货的概率. 依据式(6),  $p_{M_4}$  的计算公式为

$$p_{M_4} = p_6 + p_7 + p_8 - p_6 p_7 - p_6 p_8 - p_7 p_8 + p_6 p_7 p_8. \tag{15}$$

这样, 依据确定的  $p_1, p_2, \dots, p_r$  可以由下至上逐层计

算相关事件发生的概率, 最终确定订单产品交货违约的概率  $p_T$ .

### 4 订单接受决策的制定

在确定订单产品交货违约概率的基础上, 给出制定订单接受决策的方法.

首先, 要对订单产品交货违约风险损失进行估计. 在对订单产品交货违约风险进行估计时, 需要同时考虑订单产品交货违约的概率  $p_T$ 、订单产品交货违约情况下可能给制造商带来的经济损失  $f_E$  以及供应商  $S_{jk}$  提供的零部件  $RM_j$  质量不达标的概率  $p_j^{PQ}$ 、供应商  $S_{jk}$  提供的零部件  $RM_j$  质量不达标需支付给制造商的赔偿金  $f_{jk}^Q$  和供应商  $S_{jk}$  的零部件  $RM_j$  交货延迟的概率  $p_j^{PD}$ 、供应商  $S_{jk}$  因零部件  $RM_j$  交货延迟需支付给制造商的违约金  $f_{jk}^D$ . 记  $R$  表示订单产品交货违约情况下的风险损失, 其计算公式为

$$R = p_T f_E - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{l_j} f_{jk}^Q p_j^{PQ} - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{l_j} f_{jk}^D p_j^{PD}. \tag{16}$$

其中:  $p_T$  表示订单产品交货违约的概率,  $f_E$  表示订单产品交货违约情况下制造商需承受的经济损失, 因此, 制造商承受经济损失的期望值可表示为  $p_T f_E$ ;  $p_j^{PQ}$  表示零部件  $RM_j$  质量不达标的概率,  $f_{jk}^Q$  表示供应商  $S_{jk}$  提供的零部件  $RM_j$  质量不达标需支付给制造商的赔偿金, 制造商从各零部件供应商处因零部件质量不达标而获得的赔偿金的期望值表示为  $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{l_j} f_{jk}^Q p_j^{PQ}$ ;  $p_j^{PD}$  表示零部件  $RM_j$  交货延迟的概率,  $f_{jk}^D$  表示供应商  $S_{jk}$  因交货延迟需支付给制造商的违约金, 制造商从各零部件供应商处因零部件交货延迟而获得的违约金的期望值表示为  $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{l_j} f_{jk}^D p_j^{PD}$ .

然后, 计算制造商接受订单的预期收益. 记  $G$  表示制造商接受订单的预期收益, 其计算公式为

$$G = (1 - p_T) r_E - R. \tag{17}$$

当制造商接受订单的预期收益  $G$  大于制造商的期望值, 且订单产品交货违约情况下的风险损失小于制造商可接受的风险容量  $a_E$  时, 制造商可以考虑接受订单, 否则, 制造商应该拒绝订单申请.

### 5 算例

本部分以某冷凝器生产企业是否接受一充填式冷凝器订单申请的决策问题为例, 来说明本文所提出方法的潜在应用.

制造商  $E$  是一家冷凝器生产企业, 收到了一批充

填充式冷凝器的生产订单,该批订单要求按照规定日期保质保量交货,若制造商按时交货,则会获得500万元的收益;若订单产品不能顺利交货,则预计会给制造商带来200万元的经济损失. 制造商E需要对是否接受该订单作出决策.

制造商E在确定了订单产品生产所需的关键部件后,对其当前的库存储备情况进行了分析. 结果显示,若制造商E接受该订单,则需向其上游一级供应商采购制冷剂压力控制器和制冷剂回路控制器两种零部件,分别为 $RM_1$ 和 $RM_2$ . 制冷剂压力控制器的供应商为制冷剂压力控制器生产企业 $S_{11}$ ,制冷剂回路控制器的供应商为制冷剂回路控制器生产企业 $S_{21}$ ,制冷剂压力控制器生产企业 $S_{11}$ 和制冷剂回路控制器生产企业 $S_{21}$ 与制造商E有着长期的合作关系,供应商 $S_{11}$ 和供应商 $S_{21}$ 向制造商E提供的订单产品零部件若按时到货则直接入库,无需通过入库检查. 依据制造商与其上游供应商签订的采购合同,若供应商 $S_{11}$ 交货延迟,则其需向制造商E支付违约金50万元;若供应商 $S_{11}$ 向制造商E提供的制冷剂压力控制器质量不达标,则其需向制造商E支付赔偿金30万元. 若供应商 $S_{21}$ 交货延迟,则其需向制造商E支付违约金20万元;若供应商 $S_{21}$ 向制造商E提供的制冷剂回路控制器质量不达标,则其需向制造商E支付赔偿金10万元.

企业 $S_{11}$ 生产制冷剂压力控制器需向其上游的制冷剂压力控制器配件生产企业采购制冷剂压力控制器的关键配件(压力开闭器、输出压力调节阀等),这里统一表示为 $RM_{11}$ ,制冷剂压力控制器生产企业

上游有两个关键配件供应商,一个是主供应商,记为 $S_{111}$ ,另一个是备用供应商,记为 $S_{112}$ ,当且仅当主供应商 $S_{111}$ 不能及时供货的情况下才会由备用供应商 $S_{112}$ 向企业 $S_{11}$ 供货. 填充式冷凝器产品的上游供应链如图2所示. 制造商E可接受的风险容量为50万元.

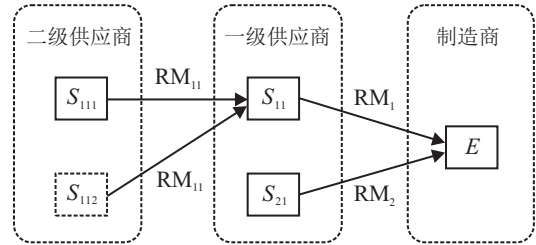


图2 填充式冷凝器产品的供应链

为了解决上述填充式冷凝器订单接受决策问题,下面简要给出运用本文给出的方法进行决策的部分计算过程和结果.

首先,针对该批填充式冷凝器产品生产、运输涉及的供应链网络,使用第2节给出的故障树构建方法,构建描述制造商交货违约事件的故障树如图3所示.

图3中各符号的含义如下.

$T$ : 制造商E的填充式冷凝器产品交货违约;

$M_1$ : 制造商E的填充式冷凝器产品订单交货延迟;

$M_2$ : 制造商E的填充式冷凝器产品质量不达标;

$M_3$ : 订单产品的零部件采购延误;

$M_4$ : 出库的制造商E的填充式冷凝器产品质量不达标;

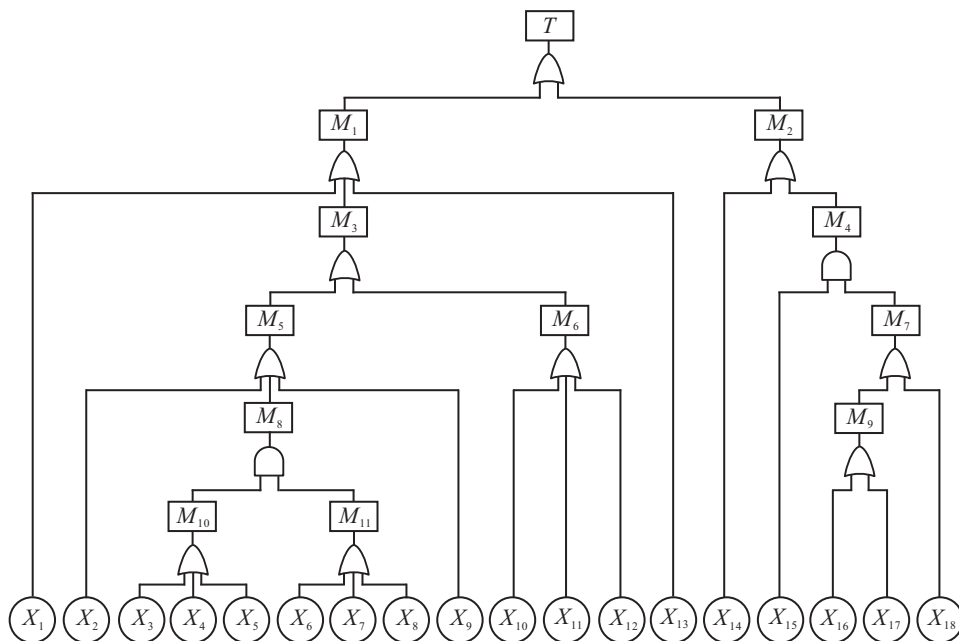


图3 描述填充式冷凝器订单产品交货违约事件的故障树

$M_5$ : 一级供应商  $S_{11}$  为制造商  $E$  提供的制冷剂压力控制器  $RM_1$  交货延迟;

$M_6$ : 一级供应商  $S_{21}$  为制造商  $E$  提供的制冷剂回路控制器  $RM_2$  交货延迟;

$M_7$ : 制造商  $E$  的充填式冷凝器产品出库前质量不达标;

$M_8$ : 制冷剂压力控制器  $RM_1$  的零部件采购延误;

$M_9$ : 采购入库的订单产品零部件质量不达标;

$M_{10}$ : 二级主供应商  $S_{111}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  交货延迟;

$M_{11}$ : 二级备用供应商  $S_{112}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  交货延迟;

$X_1$ : 订单产品生产延误;

$X_2$ : 一级供应商  $S_{11}$  为制造商  $E$  提供的制冷剂压力控制器  $RM_1$  生产延误;

$X_3$ : 二级主供应商  $S_{111}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  生产延误;

$X_4$ : 二级主供应商  $S_{111}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  的零部件采购延误;

$X_5$ : 二级主供应商  $S_{111}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  运输延误;

$X_6$ : 二级备用供应商  $S_{112}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  生产延误;

$X_7$ : 二级备用供应商  $S_{112}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  的零部件采购延误;

$X_8$ : 二级备用供应商  $S_{112}$  为一级供应商  $S_{11}$  提供的制冷剂压力控制器配件  $RM_{11}$  运输延误;

$X_9$ : 一级供应商  $S_{11}$  为制造商  $E$  提供的制冷剂压力控制器  $RM_1$  运输延误;

$X_{10}$ : 一级供应商  $S_{21}$  为制造商  $E$  提供的制冷剂回路控制器  $RM_2$  生产延误;

$X_{11}$ : 一级供应商  $S_{21}$  为制造商  $E$  提供的制冷剂回路控制器  $RM_2$  的零部件采购延误;

$X_{12}$ : 一级供应商  $S_{21}$  为制造商  $E$  提供的制冷剂回路控制器  $RM_2$  运输延误;

$X_{13}$ : 订单产品运输延误;

$X_{14}$ : 制造商  $E$  的充填式冷凝器产品在运输过程中破损;

$X_{15}$ : 制造商  $E$  的充填式冷凝器产品出库检查时误检造成质量不达标产品未被检查出来;

$X_{16}$ : 采购入库的制冷剂压力控制器  $RM_1$  质量不达标;

$X_{17}$ : 采购入库的制冷剂回路控制器  $RM_2$  质量不达标;

$X_{18}$ : 生产过程造成订单产品质量不达标.

然后, 依据图3所示的故障树, 采用式(1)~(8), 构建制造商  $E$  的充填式冷凝器产品交货违约事件发生的逻辑表达式, 即

$$\begin{aligned}
 T = & F_T(X_1, X_2, \dots, X_{17}) = M_1 \oplus M_2 = \\
 & (X_1 \oplus M_3 \oplus X_{13}) \oplus (X_{14} \oplus M_4) = \\
 & (X_1 \oplus (M_5 \oplus M_6) \oplus X_{13}) \oplus (X_{14} \oplus (X_{15} \otimes M_7)) = \\
 & (X_1 \oplus ((X_2 \oplus M_8 \oplus X_9) \oplus (X_{10} \oplus X_{11} \oplus X_{12})) \oplus \\
 & X_{13}) \oplus (X_{14} \oplus (X_{15} \otimes (M_9 \oplus X_{18}))) = \\
 & (X_1 \oplus ((X_2 \oplus (M_{10} \otimes M_{11}) \oplus X_9) \oplus (X_{10} \oplus X_{11} \oplus \\
 & X_{12})) \oplus X_{13}) \oplus (X_{14} \oplus (X_{15} \otimes ((X_{16} \oplus X_{17}) \oplus \\
 & X_{18}))) = \\
 & (X_1 \oplus ((X_2 \oplus ((X_3 \oplus X_4 \oplus X_5) \otimes (X_6 \oplus X_7 \oplus \\
 & X_8)) \oplus X_9) \oplus (X_{10} \oplus X_{11} \oplus X_{12})) \oplus X_{13}) \oplus \\
 & (X_{14} \oplus (X_{15} \otimes ((X_{16} \oplus X_{17}) \oplus X_{18}))).
 \end{aligned}$$

进一步, 通过对历史事件的分析 and 专家的主观评估确定故障树中各基本事件发生的概率. 令  $p_1, p_2, \dots, p_{18}$  分别表示 18 个基本事件发生的概率, 设由历史事件分析和专家主观评价确定的故障树中各基本事件发生的概率分别为  $p_1 = 0.014$ 、 $p_2 = 0.017$ 、 $p_3 = 0.018$ 、 $p_4 = 0.009$ 、 $p_5 = 0.011$ 、 $p_6 = 0.007$ 、 $p_7 = 0.018$ 、 $p_8 = 0.017$ 、 $p_9 = 0.015$ 、 $p_{10} = 0.012$ 、 $p_{11} = 0.012$ 、 $p_{12} = 0.006$ 、 $p_{13} = 0.013$ 、 $p_{14} = 0.012$ 、 $p_{15} = 0.003$ 、 $p_{16} = 0.006$ 、 $p_{17} = 0.004$ 、 $p_{18} = 0.036$ .

依据式(9)~(15), 可逐步计算得到制冷剂压力控制器  $RM_1$  在采购环节发生延误(制冷剂压力控制器  $RM_1$  交货延迟)的概率  $p_1^{PD}$ (即事件  $M_5$  发生的概率  $p_{M_5}$ )、制冷剂回路控制器  $RM_2$  在采购环节发生延误(制冷剂回路控制器  $RM_2$  交货延迟)的概率  $p_2^{PD}$ (即事件  $M_6$  发生的概率  $p_{M_6}$ )和订单产品交货违约的概率  $p_T$ , 计算结果为  $p_1^{PD} = p_{M_5} = 0.033$ 、 $p_2^{PD} = p_{M_6} = 0.029$ 、 $p_T = 0.098$ . 易知, 采购入库的制冷剂压力控制器  $RM_1$  质量不达标的概率  $p_1^{PQ} = p_{16} = 0.006$ , 采购入库的制冷剂回路控制器  $RM_2$  质量不达标的概率  $p_2^{PQ} = p_{17} = 0.004$ . 依据式(16), 可求得订单产品交货违约情况下的风险损失为 17.144 万元; 依据式(17), 可计算得到制造商  $E$  接受订单的预期收益为 433.856 万元.

经分析, 制造商  $E$  接受订单的预期收益远高于交货违约情况下的风险损失, 交货违约概率较低, 且订

单产品交货违约情形下的风险损失小于制造商可接受的风险容量,因此,制造商 $E$ 可考虑接受该订单.此外,制造商 $E$ 可以根据故障树分析结果采取有效的方法对交货违约风险进行防范和控制.

为了进一步说明基本事件发生概率对订单产品交货违约情况下的风险损失以及订单接受决策结果的影响,下面对其进行敏感性分析.需要说明的是,在上文构建的描述订单产品交货违约事件的故障树中:基本事件 $X_1$ 、 $X_{13}$ 、 $X_{14}$ 、 $X_{15}$ 和 $X_{18}$ 发生在制造商经管环节,制造商可以通过提高技术、加强管理等手段降低该事件发生的概率;基本事件 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{16}$ 和 $X_{17}$ 发生在供应商经管环节,而非制造商经管环节,其中,基本事件 $X_2$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$ 、 $X_{16}$ 和 $X_{17}$ 发生在一级供应商经管环节;基本事件 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 和 $X_8$ 发生在二级供应商经管环节,制造商很难通过加强管控来降低该事件发生的概率.此外,在这18个基本事件中, $X_1, X_2, \dots, X_{13}$ 与订单产品交货延迟事件有关, $X_{14}, X_{15}, \dots, X_{18}$ 与订单产品质量不达标事件有关.值得注意的是,由统计学知识可知,基本事件 $X_{15}$ 发生的概率与产品出库前的不合格率和产品的抽检率有关,而产品出库前的不合格率会直接受到基本事件 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 和 $X_{18}$ 发生概率的影响.可见,基本事件 $X_{15}$ 发生的概率与基本事件 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 和 $X_{18}$ 发生的概率之间存在关联,难以针对单个事件进行分析.需要指出的是,供应商 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 与制造商 $E$ 已建立长期的合作关系,其提供的零部件的合格率不会出现较大变动,且一旦提供的零部件质量不达标,则供应商 $S_{11}$ 和 $S_{21}$ 需按照采购合同要求进行赔付,不会对制造商造成巨大的影响,因此,这里针对基本事件 $X_{15}$ 、 $X_{16}$ 、 $X_{17}$ 和 $X_{18}$ 不做深入讨论.综上,这里选取基本事件 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 和 $X_{14}$ 进行敏感性分析.考虑基本事件 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 和 $X_{14}$ 发生的概率 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 和 $p_{14}$ 分别变为 $p'_1$ 、 $p'_2$ 、 $p'_3$ 和 $p'_{14}$ ,当 $p'_1$ 、 $p'_2$ 、 $p'_3$ 和 $p'_{14}$ 分别取不同的值时,对应的订单产品交货违约情况下的风险损失如图4所示.

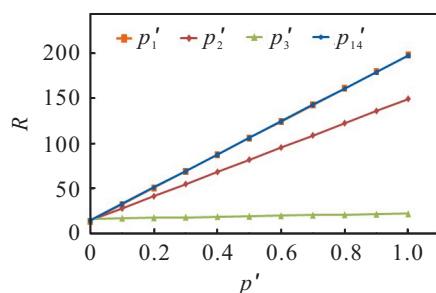


图4 对应 $p'_1$ 、 $p'_2$ 、 $p'_3$ 和 $p'_{14}$ 不同取值的订单产品交货违约情况下的风险损失

由图4可知,订单产品交货违约情况下的风险损失分别随着基本事件 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 和 $X_{14}$ 发生的概率 $p'_1$ 、 $p'_2$ 、 $p'_3$ 和 $p'_{14}$ 的增加而增加,订单产品交货违约情况下的风险损失对 $p'_1$ 、 $p'_2$ 和 $p'_{14}$ 的取值变化相对敏感.可见:在制造商和一级供应商经管环节发生事故会大大提升订单产品交货违约事件发生的概率,进而大幅度地增加制造商的风险损失;在二级供应商或更高级供应商经管环节发生事故对订单产品交货违约事件发生的概率的影响较弱,给制造商带来的风险损失增幅较小.当订单产品交货违约情况下的风险损失超出制造商可接受的风险容量时,制造商不会接受订单.因此,制造商有必要加强对自身经管环节的管控,以便将可能发生在自身经管环节的各种事件发生的概率控制到最小,同时有必要重视来自于上游一级供应商的风险,可以考虑增加备用供应商或在与一级供应商签订采购合同时增加规避自身风险损失的条款等,以降低和控制来自于一级供应商的风险.

## 6 结论

本文提出了一种考虑风险传导情形的订单接受决策方法.该方法是通过构建描述供应链环境下订单产品交货违约事件的故障树计算订单产品交货违约的概率进而计算制造商接受订单的预期收益,在此基础上作出制造商是否接受下游企业(采购方)的订单申请的决策.本文所提出的方法考虑根据企业和产品所处供应链的实际情况有针对性地构建描述交货违约事件的故障树,可以适用于各种订单生产型企业制定订单接受决策,具有较好的可扩展性和实际应用价值.

## 参考文献(References)

- [1] Rom W O, Slotnick S A. Order acceptance using genetic algorithms[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(6): 1758-1767.
- [2] Michalski G. Inventory and risk management: Decreasing delivery risk of purchasers[J]. *Romanian J of Economics*, 2008, 27(2): 95-103.
- [3] Mizgier K J, Wagner S M, Holyst J A. Modeling defaults of companies in multi-stage supply chain networks[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 135(1): 14-23.
- [4] Christopher M, Peck H. Building the resilient supply chain[J]. *Int J of Logistics Management*, 2004, 15(2): 1-14.
- [5] 张欣, 马士华. 基于有限生产能力和产出缓存的订单接受策略[J]. *工业工程与管理*, 2008, 13(2): 34-38.

- (Zhang X, Ma S H. Order acceptance with limited capacity and finite output buffers in MTO environment[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2008, 13(2): 34-38.)
- [6] 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 R Q. Comparative study of order selection decision considering time series association[J]. *J of Management Sciences in China*, 2009, 12(3): 44-55.)
- [7] Oguz C, Salman F S, Yalçın Z B. Order acceptance and scheduling decisions in make-to-order system[J]. *Int J of Production Economics*, 2010, 125(1): 200-211.
- [8] 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 X H, Wang N N, Fan Z P. Reinforcement learning based order accepted policy in make-to-order enterprises[J]. *System Engineering — Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3121-3129.)
- [9] 宋李俊, 李攀, 向波. 考虑总人工时约束的MTO企业订单竞争决策方法[J]. *系统工程*, 2015, 33(9): 25-31.  
(Song L J, Li P, Xiang B. Order competition decision method considering total man hour constrains in MTO enterprise[J]. *Systems Engineering*, 2015, 33(9): 25-31.)
- [10] 王雷, 许绍云, 赵扬, 等. 有限缓冲区的多节点订单接受模型与算法[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(12): 135-141.  
(Wang L, Xu S Y, Zhao Y, et al. Model and algorithm order acceptance on multi-node production environment with limited buffer[J]. *Chinese J of Management Science*, 2015, 23(12): 135-141.)
- [11] 周兴建, 黎继子, 刘春玲, 等. 基于 Lagrange 算法的集群式供应链跨链订单并行配置优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(8): 2179-2190.  
(Zhou X J, Li J Z, Liu C L, et al. Optimization and parallel allocation of cross-chain orders in cluster supply chain lagrange algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(8): 2179-2190.)
- [12] Lin S W, Ying K C. Order acceptance and scheduling to maximize total net revenue in permutation flowshops with weighted tardiness[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 30(c): 462-474.
- [13] Lei D, Guo X. A parallel neighborhood search for order acceptance and scheduling in flow shop environment[J]. *Int J of Production Economics*, 2015, 165: 12-18.
- [14] Xie X, Wang X. An enhanced ABC algorithm for single machine order acceptance and scheduling with class setups[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 44(c): 255-266.
- [15] Ou J, Zhong X. Order acceptance and scheduling with consideration of service level[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 248(1/2): 429-447.
- [16] Jiang D, Tan J, Li B. Order acceptance and scheduling with batch delivery[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2017, 107: 100-104.
- [17] Chaurasia S N, Singh A. Hybrid evolutionary approaches for the single machine order acceptance and scheduling problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 52: 725-747.
- [18] Noroozi A, Mazdeh M M, Heydari M, et al. Coordinating order acceptance and integrated production-distribution scheduling with batch delivery considering third party logistics distribution[J]. *J of Manufacturing Systems*, 2018, 46: 29-45.
- [19] Silva Y L T V, Subramanian A, Pessoa A A. Exact and heuristic algorithms for order acceptance and scheduling with sequence-dependent setup times[J]. *Computers and Operations Research*, 2018, 90: 142-160.
- [20] Li J, Zeng X, Liu C, et al. A parallel Lagrange algorithm for order acceptance and scheduling in cluster supply chains[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 1433: 271-283.
- [21] Wu G H, Cheng C Y, Yang H I, et al. An improved water flow-like algorithm for order acceptance and scheduling with identical parallel machines[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.015>.
- [22] Sting F J, Huchzermeier A. Ensuring responsive capacity: How to contract with backup suppliers[J]. *European J of Operational Research*, 2010, 207(2): 725-735.
- [23] Purba J H, Lu J, Zhang G, et al. A fuzzy reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2014, 243: 50-69.
- [24] Gigerenzer G, Hoffrage U. How to improve Bayesian reasoning without instruction: Frequency formats[J]. *Psychological Review*, 1995, 102(4): 684-704.
- [25] Winkler R L, Poses R M. Evaluating and combining physicians' probabilities of survival in an intensive care unit[J]. *Management Science*, 1993, 39(12): 1526-1543.

(责任编辑: 李君玲)