



中国科技论文统计源期刊 (核心期刊)

国家自然科学基金委员会管理科学部认定管理科学类期刊

中文社会科学引文索引 (CSSCI) 来源期刊

中文核心期刊



工业工程与管理

INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

VOLUME 25, NUMBER 2

April 2020

2/2020

目录

情形下的库存决策研究综述与展望	祁玉青;吴静
视角下CEO包容型领导与创业绩效的关系研究	魏峰;曹星;贝玉洁
情况下动态混合应急策略研究	李妮妮;何勇
求下快递枢纽中转站选址模型问题	裴利奇;刘晓
时间和惩罚的租赁设备维护策略研究	金玉兰;刘莹;严嘉欣
保鲜努力成本分担契约研究	王道平;朱梦影;王婷婷
靠时下游企业投资上游企业的供应链协调	付红;李良强
约束的呼叫中心排班优化模型与算法	胡修武;王瑞程;王秀丽
供应链绿色运营动力因素及关联效应研究	韩兵;廖娟娟;匡海波
委托监管模式下基于双边道德风险的收益分配模型研究	李丽君;衣峻林;程富
定下制造商的采购策略:回收或双渠道采购	李良;刘芷言;李增涛;聂佳佳
披露的双渠道供应链两周期定价策略	赵瑞娟;周建亨
下科技资源平台与小微企业创新行为演化博弈分析	李文鹏;张羊;王涵;陆文茜;郭本海
定下农产品生产商预售策略研究	陈军;伏红勇
求下制造商渠道入侵与信息收集披露激励	经有国;刘翼;李胜男
对科技型中小企业协同创新联盟稳定性的影响	苏妮娜;朱先奇;史竹琴
模式的动态回收闭环供应链最优决策与协调研究	刘亮;李芹头
易政策下考虑消费者低碳偏好的供应链定价与协调	郭军华;孙林洋;张诚;倪明;朱佳翔
权力结构的O2O供应链合作广告策略研究	舒良友;王义宝
OSM的产品服务系统流程模块化设计	金运婷;耿秀丽
NSGA-II的云制造服务组合优化问题研究	杨欣;曾珍香;夏玉洁
下游企业持股弱势上游企业的供应链决策与协调	付红;李良强
度角色外行为的契约激励机制研究	许志远;曹吉鸣;冯晓威;汤洪鑫;刘明强
下废钢铁再加工生产调度优化	张燕华;陈伟达;杨烽

文章编号: 1007-5429(2020)02-0017-07

DOI: 10.19495/j.cnki.1007-5429.2020.02.003

供应中断情况下动态混合应急策略研究

李姗姗, 何 勇

(东南大学 经济与管理学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 动态刻画市场需求中断反应行为: 自动留存订单、等待制造商应急采购延迟完成订单、由安全库存完成订单、取消订单。综合考虑应急采购的提前期及成本、安全库存储备量、企业恢复能力, 构建以中断负面影响最小化为目标的最优控制模型。应用最大值原理, 提出三种最优的制造商动态响应策略, 包含一种纯库存与两种混合策略, 决策如何基于库存量、中断持续时长等相关因素实时消耗库存, 同时进行应急采购。

关键词: 应急采购; 安全库存; 供应中断

中图分类号: F253.4

文献标识码: A

Dynamic Mixed Reactive Strategies for Supply Disruption

LI Shanshan, HE Yong

(School of Economics and Management, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Market demand reacts in four ways: automatically backordering, waiting to be satisfied with contingent sourcing, immediately being met by safety inventory, and canceling order. By capturing the dynamic post-disruption customer reaction, an optimal control model is formulated to minimize the negative disruption impact. The following contributing factors are considered: the lead time and the cost of contingent sourcing, the reserved amount of safety inventory, and the recovery ability. Via Pontryagin's Maximum Principle theory, three types of optimal dynamic mixed mitigation strategies are presented. Analytical guidance is provided on how to dynamically adjust the optimal time and quantity of contingent sourcing, as well as the inventory consuming rate.

Key words: contingent sourcing; safety inventory; supply disruption

1 引言

随着全球化采购等趋势的发展, 供应链中断风险逐渐增加。Schmitt 等^[1]发现, 73% 的公司在过去五年中经历了损失巨大的中断事件。为避免或减缓中断给企业带来的严重不利后果, 大量学者对中断管理进行了研究并提出预防或应急策略, 如, 需

求转载、库存、应急/多元采购、中断恢复等。李新军等^[2]基于推拉式两种订货模式, 对中断下是否采用备份供应商进行了决策分析。何远和李华^[3]基于不确定中断持续时间研究了三级供应链中断后的恢复优化问题。

在实际管理中, 大量生产系统通过储备一定量的库存来应对供应风险, 即安全库存策略。在供应

收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71771053, 71371003, 71531004); 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2018385); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介: 李姗姗(1984-), 女, 江西永新人, 博士研究生, 主要研究方向为物流与供应链管理。E-mail: 230159161@seu.edu.cn。

何勇(联系人), 教授, E-mail: hy@seu.edu.cn。

中断发生后,企业可通过库存来满足顾客需求,避免损失。然而,长时间囤积库存要求大量成本投入,可能影响企业的长期盈利能力。因此,公司管理者倾向于预留小规模库存。2018年4月,因美国商务部禁运令,中兴通讯的供应商中止软件等部件供应,而其储备存货仅满足约一个月的产能,给中兴通讯及其零售商造成了大量损失。鉴于中断时长的不确定性,仅通过库存预防或其他静态策略已不足以应对复杂的生产系统和市场环境。如何通过设置动态及混合策略,有效提升管理效率,已成为供应链中断管理领域的研究重点。

近几年,部分学者研究了动态及混合管理方法。在顾客行为预测分析基础上,He等^[4]对采购时间与数量进行了深入研究,并提出动态应急采购策略。基于双源采购、应急库存和多产品柔性订货策略,Tomlin^[5]提出多种混合策略。Snyder等^[6]对中断管理研究进行综述并指出,由多种静态或动态管理组合的混合策略比纯策略更有效。Shao和Dong^[7]提出一个基于双源备货、顾客补偿以及延迟交货策的混合应急方法。

现有文献关于混合策略的研究较少,尤其是考虑顾客的动态反应方面。因此本文重点研究如何通过纯库存和应急采购构建一个最优动态混合策略。许多企业采用临时采购作为降低风险的主要应对方式(Saghafian和Van Oyen^[8])。通过应急采购,企业在主要供应商发生中断时转向备货供应商或现货市场进行原材料采购,从而恢复生产。该策略在很多情况下优于多源采购、最优分配采购、恢复策略(Li等^[9])等。然而,应急采购通常伴随一定的提前期及高价格。如何根据价格和提前期优化采购决策是一个重要的研究问题。

本文在现有研究基础上,从一个储备安全库存的制造商角度出发,提出一种由库存和应急采购组成的供应中断动态应急策略。通过综合考虑应急供应商的提前期及成本、企业在中断发生前库存储备量和中断结束后恢复能力、企业与顾客的动态行为,构建中断下的最优控制模型。

2 模型建立

2.1 参数与假设

本文参数如表1所示。其中: $c_s > c_m$,应急采购价格高于常规采购; $c_l > c_p + c_s$,否则没有必要采购。 $c_l > c_p + c_m$,否则中断发生前没有生产的

必要。

表1 参数说明

c_m :常规供应商原材料单位价格;
c_s :应急供应商原材料单位价格;
c_l :单位订单流失成本;
c_p :单位生产成本;
c_h :单位库存持有成本/单位时间;
t_s :应急采购提前期;
t_f :安全库存完全消耗的临界时间点;
I_m :安全库存量;
M :制造商最大产能;
T :中断持续时长;
θ :客户关于等待时间敏感度;
$r(t)$:订单留存率;
$R(t)$:累计留存订单量;
r_s :应急采购接受率;
$x(t)$:应急采购策略提供量
$y(t)$:中断期间订单完成量

2.2 问题描述

考虑一个按实时订单生产的生产库存系统(MTO),包括一个制造商、一个常规供应商和多个顾客。制造商根据顾客订单从供应商进行原材料即时采购、并连续性生产某产品,产能有限。常规供应商存在中断风险,但原材料供应价格低,具备无限容量。现货市场中存在可替代的应急供应商,原材料供应价格相对较高,且只能在固定提前期后才能获取。为避免中断损失,制造商预留一定数量原材料作为安全库存。假定产品市场成熟,需求稳定。不失一般性,本文假设单位时间市场需求率为1。根据需求率,中断发生前制造商单位时间生产量为1。

假设在0时刻发生供应中断,中断持续时间确定。若制造商不采取任何应急措施,被动地等待常规供应商恢复供应,则生产暂时停止,制造商缺货事件产生。面对该缺货事件,部分客户选择取消订单,即订单流失;部分客户具有等待的耐心从而自动接受延期交货,即订单留存。根据大量已有研究结果可知,订单留存率主要取决于两个因素:延迟等待的时间长度 T_0 以及客户关于等待时间的敏感度 θ 。考虑到中断发生前不存在订单流失,本文将订单留存率描述为一个线性函数 $r(t)=[1-\theta T_0]^+$,即累计留存订单量 $R(t)$ 可由表达式 $\frac{dR(t)}{dt}=r(t)$ 确定。留存订单在供应中断结束后按“先到先得”原

则依次完成。

为避免或减少因顾客等待而产生的订单流失,制造商采取两种措施:通过安全库存内储备的原材料来恢复生产;通过应急采购获取原材料并恢复生产。二者的区别是,由于应急采购提前期导致顾客需要等待 t_s 时间,只有 r_s 部分客户接受该策略, $r_s = 1 - \theta t_s$,其余拒绝。制造商决策顺序如下:对于在时刻 t 到达的客户群体,首先告知其中断信息,观察订单留存率,承诺留存订单在中断结束后按“先到先得”依次完成;对于非留存订单,制造商决策:恢复多少产量从而满足非留存订单;分别从应急采购和安全库存渠道获取多少原材料。设对 $x(t)$ 非留存订单顾客提供应急采购策略, $0 \leq x(t) \leq 1 - r(t)$,则有 $r_s x(t)$ 顾客接受并在时间段 t_s 后完成订单。记非留存订单完成量为 $y(t)$,则有如下关系式

$$y(t) = r_s x(t) - dI(t)/dt$$

其中 $\left| \frac{dI(t)}{dt} \right|$ 代表了由消耗库存所满足的订单数量。

库存水平随时间递减,即 $\frac{dI(t)}{dt} < 0$ 。综合 $y(t) \leq 1 - r(t)$ 可得订单完成量限制条件如 $r_s x(t) \leq y(t) \leq 1 - r(t)$ 所示。基于制造商的应对措施,顾客呈现四种反应行为; $r(t)$ 自动留存订单; $r_s x(t)$ 接受应急采购并在时刻 $t_s + t$ 完成订单; $\left| \frac{dI(t)}{dt} \right|$ 由安全库存即时完成订单; $1 - r(t) - y(t)$ 取消订单。

$$r(t) = \begin{cases} [r(t_{r1}) - M + 1] e^{-\frac{\theta}{M-1}(t-t_{r1})} + M - 1, & \text{当 } t \in \{T + \frac{\int_0^t r(\tau) d\tau}{M-1} - t < \frac{1}{\theta}\} \\ 0, & \text{当 } t \in \{T + \frac{\int_0^t r(\tau) d\tau}{M-1} - t \geq \frac{1}{\theta}\} \end{cases} \quad (1)$$

t_{r1} 为进入状态 $0 < r(t) < 1$ 的初始点。

综上,供应中断影响时期包括两个阶段:中断持续期 $(0, T)$ 和中断恢复期 (T, T_r) 。本文基于制造商的角度探讨以下动态决策问题: $(0, T)$ 内不留存订单的完成量 $y(t)$,以及如何通过动态调整应急采购策略提供量 $x(t)$ 与安全库存消耗率 $-dI(t)/dt$ 来实现该订单完成量。通过该联合动态决策,构建基于应急采购 S 以及库存消耗 I 的最优混合动态应急策略,最大限度地减少中断带来的损失。

2.3 模型构建

基于顾客与制造商的中断反应行为,评估中断造成的影响。

在 T 时刻中断结束后,生产系统内积累一定量的待完成订单 $R(T)$,安全库存完全或部分消耗。因此,考虑一个中断恢复期 (T, T_r) 。在恢复期间,制造商从常规供应商采购,以最大产能恢复生产,尽快满足实时订单与积压订单,并重新补充安全库存。考虑到库存持有成本以及常规供应商的无限容量,本文假设在积压订单陆续完成后一次性补充安全库存。即制造商以单位时间生产量 M 进行生产,在满足实时需求1的基础上,以 $M-1$ 的速率减少积压订单量,促使积压订单在 $T_r = T + \frac{R(T)}{M-1}$ 时刻达到0;另一方面,库存水平维持在一个常量 $I(T)$ 直至在时刻 T_r 瞬时恢复到原安全水平。考虑到 $M-1$ 决定了中断恢复所需时长 $T_r - T$,本文以该速率来区分不同企业的恢复能力。

根据“先到先得”原则,在点 $t \in (0, T)$ 留存的订单将在点 $T + \frac{R(t)}{M-1}$ 得到满足。因此,自动留存率 $r(t)$ 表示为 $r(t) = [1 - \theta T_0]^+ = [1 - \theta(T + \frac{R(t)}{M-1} - t)]^+$ 。其中,订单完成的等待时间 $T_0 > 0$,因此有 $0 \leq r(t) < 1$ 。基于恢复能力 $M-1$, $R(t) = \int_0^t r(\tau) d\tau$,自动留存订单率 $r(t)$ 呈现两种不同状态: $r(t) = 0$ 与 $0 < r(t) < 1$,如定理1所示。

定理1 顾客在 $(0, T)$ 内动态留存订单率 $r(t)$ 为

2.3.1 中断影响

在 $(0, T)$ 阶段,由于应急采购策略的实施,产生如下成本。

- (i) 应急采购成本: $\int_0^T c_s r_s x(t) dt$, 其中 $r_s x(t)$ 为需要采购的原材料数量。
- (ii) 生产成本: $\int_0^T c_p y(t) dt$ 。
- (iii) 库存持有成本: $\int_0^T c_h I(t) dt$ 。
- (iv) 订单流失成本: $\int_0^T c_l [1 - r(t) - y(t)] dt$ 。

在 (T, T_r) 阶段,需要完成留存订单并恢复库存,产生成本如下。

(v) 生产成本: $c_p \int_T^{T_r} M dt = c_p M (T_r - T)$ 。

(vi) 库存持有成本: $c_h \int_T^{T_r} I(T) dt = c_h I(T) \times (T_r - T)$ 。

(vii) 恢复成本: 制造商从常规供应商处采购原材料恢复生产并补充安全库存,产生两部分恢复成本: $c_m M (T_r - T) + c_m [I_m - I(T)]$ 。

综上,结合 $T_r - T = \frac{R(T)}{M-1}$ 可得中断在 $(0, T_r)$ 内产生的总成本如下: $[c_m M + c_p M + c_h I(T)] \frac{R(T)}{M-1} + c_m [I_m - I(T)] + \int_0^T \{c_s r_s x(t) + c_p y(t) + c_h I(t) + c_l [1 - r(t) - y(t)]\} dt$ 。

2.3.2 决策模型

基于中断影响评估,制造商决定最优订单完成量 $y^*(t)$, 应急采购策略提供量 $x^*(t)$ 与库存消耗率 $-dI^*(t)/dt$ 。以最小化中断影响为目标,构建如下最优控制模型。

$$\min \left\{ [c_m M + c_p M + c_h I(T)] \frac{R(T)}{M-1} + c_m [I_m - I(T)] + \int_0^T \{c_s r_s x(t) + c_p y(t) + c_h I(t) + c_l [1 - r(t) - y(t)]\} dt \right\} \quad (2)$$

s.t.

$$\frac{dI(t)}{dt} = r_s x(t) - y(t) \quad (3)$$

$$0 \leq x(t) \leq 1 - r(t) \quad (4)$$

$$r_s x(t) \leq y(t) \quad (5)$$

$$y(t) \leq 1 - r(t) \quad (6)$$

$$I(t) \geq 0 \quad (7)$$

其中,决策变量为 $x(t)$ 和 $y(t)$, 状态变量是 $I(t)$ 。式(3)刻画库存的消耗速度;式(4)表明应急采购策略

提供量的范围;式(5)-式(6)为订单完成量的取值范围;式(7)确保库存非负。初始库存量 $I(0) = I_m$, 且 $0 \leq t \leq T$ 。探索该模型的最优解 $(x^*(t), y^*(t))$ 及对应的最优路径 $I^*(t)$, 制造商的最优动态应急措施可确定。因此,下文中,最优策略以决策 $(x^*(t), y^*(t))$ 来量化表示。为叙述方便,将 $x(t), y(t), I(t), \lambda_1(t), r(t)$ 等简记为 x, y, I, λ_1, r 。

3 最优混合动态策略

通过庞特里亚金最大值原理(Seierstad 和 Sydsæter^[10])求解以上模型,提出管理中断的最佳策略。首先,将最小值模型公式(2)-(7)转换为最大值,构建如下哈密顿函数。

$$H = -c_s r_s x - c_p y - c_h I - c_l (1 - r - y) + \lambda_1 (r_s x - y) \quad (8)$$

其中, λ_1 代表库存状态的共态变量,表示使用预留安全库存的单位影子价格/时间。最小值求解问题转化成约束条件下哈密顿函数最大值问题。

由公式(8)可知,哈密顿函数关于决策变量 x 和 y 的偏导数如下

$$H_x = -c_s r_s + \lambda_1 r_s$$

$$H_y = -c_p + c_l - \lambda_1$$

哈密顿函数关于 x 和 y 是线性的。因此可得如下最优控制 (x^*, y^*) , 且遵循 bang-bang 条件。

$$x^* = \max x, \text{ 当 } \lambda_1 > c_s; x^* = \min x, \text{ 当 } \lambda_1 < c_s。$$

$$y^* = \max y, \text{ 当 } \lambda_1 < c_l - c_p; y^* = \min y, \text{ 当 } \lambda_1 > c_l - c_p。$$

根据 $c_l - c_p > c_s$, 结合 x 和 y 的约束条件(4)-(6), 最优控制 (x^*, y^*) 可进一步明确为表2。在此基础上,根据(3)式得库存消耗速率 $-dI^*/dt$, 从而确定制造商的最优应急策略。

表2 最优决策与策略

最优决策条件	最优决策 (x^*, y^*)	$-dI^*/dt$	最优应急策略
$\lambda_1 < c_s$	$(0, 1-r)$	$1-r$	纯库存策略 I
$c_s < \lambda_1 < c_l - c_p$	$(1-r, 1-r)$	$(1-r_s)(1-r)$	“采购+库存”混合策略 SI
$\lambda_1 > c_l - c_p$	$(1-r, r_s(1-r))$	0	纯采购策略 S

(i) 当 $\lambda_1 < c_s$: 应急采购价格高于使用库存的影子价格, 制造商不采购原材料, 即 $x^* = 0$ 。对于非留存订单 $1-r$, 使用库存恢复生产即时完成全部订单。本文称该策略为纯库存策略 I。

(ii) 当 $c_s < \lambda_1 < c_l - c_p$: 从库存中使用原材料生产单位产品的成本为 $\lambda_1 + c_p$ 。此时, 消耗库存恢

复生产的成本低于订单流失, 高于从现货市场采购原材料恢复生产的成本。制造商的最优决策为: 对所有非留存订单的顾客提供应急采购策略, 对于不接受该策略顾客使用库存满足, 即采用“采购+库存”混合策略 SI。

(iii) 当 $\lambda_1 > c_l - c_p$: 使用安全库存的影子价格

高于订单流失成本,制造商的最优决策为纯采购S:对所有非留存订单的顾客提供应急采购策略,并让不接受该策略的顾客取消订单。

综上,最优决策 (x^*, y^*) 确定三种最优应急策略:I, SI, 和S。每种策略的使用时间由共态变量 λ_1 决定。下面通过 λ_1 构建由I, SI, 和S组成的最优动态中断管理策略。 λ_1 由正则方程(9)以及边界条件决定。

$$\frac{d\lambda_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial I} = c_h \quad (9)$$

其边界条件与库存终端状态 $I(T)$ 有关。考虑到库存约束 $I \geq 0$,且目标函数中含有涉及库存终端状态 $I(T)$ 的函数 $F = -[c_m M + c_p M + c_h I(T)] \frac{R(T)}{M-1} - c_m [I_m - I(T)]$,讨论以下两种情况: $I(T) > 0; I(T) = 0$ 。

3.1 情况 $I(T) > 0$ 下的最优应急策略

在实际情况中,如果中断频繁发生但持续时间较短,制造商倾向于储备大量库存从而实现即时应急响应。因此,即使以最大速率持续消耗安全库存、满足顾客订单,依然有可能在中断结束时有一部分剩余库存,即 $I(T) > 0$ 。鉴于库存的单调递减性可得 $I(t) > 0$ 。在该末端状态约束下,最优解满足边界条件:

$$\lambda_1(T) = \frac{\partial F}{\partial I(T)} = c_m - \frac{c_h R(T)}{M-1}$$

结合正则方程(9),共态变量 λ_1 确定为

$$\lambda_1 = c_h(t - T) + c_m - \frac{c_h R(T)}{M-1} \quad (10)$$

由 $\lambda_1 < c_m < c_s$,表2以及 $I(T) = I_m - \int_0^T (1-r(\tau))d\tau$ 得定理2。

定理2 若 $I_m > \int_0^T (1-r(\tau))d\tau$,纯库存策略I为最优应急策略。

由定理2知,若中断持续时间短,或者预留库存量足够多使得 $I_m > \int_0^T (1-r(\tau))d\tau$,则最优应急措施为:在整个中断持续期间以实时速率 $1-r$ 使用库存恢复生产,满足所有非留存订单,即纯库存策略I。其中 $r(t)$ 由式(1)给出。

3.2 情况 $I(T) = 0$ 下的最优应急策略

若预留安全库存量不足,则中断结束前库存完全耗尽,即 $I(T) = 0$ 。模型最优解不需要满足固定

的边界条件。库存在 t_l 取到0,由单调递减性知该点唯一。根据库存状态, $(0, T)$ 分为两个区间: $(0, t_l), I > 0; (t_l, T), I = 0$ 。由于I状态在点 t_l 发生转换,其对应的共态变量 λ_1 在该点可能不连续,满足如下跳跃条件:

$$H(x^*(t_l^-), y^*(t_l^-), \lambda_1(t_l^-), I^*(t_l), t_l) = H(x^*(t_l^+), y^*(t_l^+), \lambda_1(t_l^+), I^*(t_l), t_l) \quad (11)$$

分两个步骤探索该情况下最优策略: $(0, t_l)$ 及 (t_l, T) 内最优决策;根据跳跃条件组合两阶段决策。

(1)阶段1 $(0, t_l)$

最优决策在如下约束下获取: $I > 0$ 且 $I(t_l) = 0$,即库存水平维持在正值,但在阶段1终端 t_l 处取到0。根据表2知,在 $\lambda_1 > c_l - c_p$ 区间内库存无消耗,可排除在该阶段使用纯策略S。

引理1 在 $(0, t_l)$ 内,制造商的最优应急措施为:当 $\lambda_1 < c_s$,采用纯库存策略I;当 $c_s < \lambda_1 < c_l - c_p$,采用混合策略SI。

若安全库存在初始时刻0与 $(0, t_l)$ 终端 t_l^- 的影子价格均小于应急采购价格,即 $\lambda_1(0) < c_s$ 且 $\lambda_1(t_l^-) < c_s$,则在阶段1采用纯库存策略I。若 $\lambda_1(0) < c_s < \lambda_1(t_l^-)$,从0时刻起采用策略I;并在 $\lambda_1 = c_s$ 处转换为策略SI,本文称该动态混合策略为I-SI。若库存初始时刻影子价格 $\lambda_1(0) > c_s$,阶段1内的最优应急措施为策略SI。共态变量 λ_1 连续且由式(12)给出:

$$\lambda_1 = c_h(t - t_l) + \lambda_1(t_l^-) \quad (12)$$

λ_1 单调递增,则 $\lambda_1(t_l^-) > \lambda_1(0)$ 。又 $\lambda_1(0) = -c_h t_l + \lambda_1(t_l^-)$,记点 $\lambda_1 = c_s$ 为 t_1 ,该点由式(13)给出。

$$t_1 = t_l - \frac{\lambda_1(t_l^-) - c_s}{c_h} \quad (13)$$

结合引理1及表2,得定理3。

定理3 在 $(0, t_l)$ 内,

(i) 若 $\lambda_1(t_l^-) < c_s$:采用纯策略I,点 t_l 由方程 $I_m - \int_0^{t_l} (1-r(\tau))d\tau = 0$ 给出。

(ii) 若 $\lambda_1(t_l^-) - c_h t_l < c_s < \lambda_1(t_l^-)$:采用动态混合策略I-SI,点 t_l 由 $I_m - \int_0^{t_1} (1-r(\tau))d\tau - (1-r_s) \int_{t_1}^{t_l} (1-r(\tau))d\tau = 0$ 给出。

(iii) 若 $\lambda_1(t_l^-) - c_h t_l > c_s$:采用混合策略SI,点

t_l 由 $I_m - (1-r_s) \int_0^{t_l} (1-r_2(\tau)) d\tau = 0$ 给出。

在库存完全消耗前可能存在三种应急方法:策略 I , 策略 SI , 以及由 I 转换至 SI 的动态 $I-SI$ 。每种策略的使用条件与多种因素相关,如库存取 0 时的影子价格 $\lambda_1(t_l^-)$, 库存消耗的时间长度 t_l , 应急采购的成本 c_s 等。其中, $\lambda_1(t_l^-)$ 暂未确定, 需要根据阶段 1 与 2 的最优决策得出。在中断持续期间, 除了时间、成本等因素外, 库存消耗前后的阶段性最优决策也相互影响。

(2) 阶段 2(t_l, T)

鉴于 $I=0$, 订单完成量只能通过应急采购实现, $y=r_s x$, 状态方程 $\frac{dI(t)}{dt}=0$, 无需考虑共态变量, 只需决策 x 。哈密顿函数式(8)转变:

$$H=(-c_s-c_p)y-c_l(1-r-y) \quad (14)$$

根据 $H_y=c_l-c_p-c_s>0$ 知其最优采购决策为 $x^*=1-r$ 。订单完成量可确定为 $y^*=r_s(1-r)$, 即最优策略为表 2 中 S 。

(3) $(0, T)$ 内最优决策

本节通过跳跃条件判定阶段 1 的终端策略 I 与 SI 是否可以跳跃到阶段 2 策略 S , 从而确定 $(0, T)$ 内最优应急策略。由式(14)及 $y^*(t_l^+)=r_s(1-r)$ 得,

$$H(x^*(t_l^+), y^*(t_l^+), \lambda_1(t_l^+), I^*(t_l), t_l) = (-c_s-c_p)r_s(1-r)-c_l(1-r_s)(1-r) \quad (15)$$

(i) 策略 I 到 S 的跳跃

由表 2, 策略 I 对应的决策变量值为 $x^*=0, y^*=1-r$ 。由式(8)得

$$H(x^*(t_l^-), y^*(t_l^-), \lambda_1(t_l^-), I^*(t_l), t_l) = -c_p(1-r)-\lambda_1(t_l^-)(1-r)$$

根据(11)得

$$\lambda_1(t_l^-)=c_s r_s+(c_l-c_p)(1-r_s) \quad (16)$$

由 $c_l>c_p$ 知 $\lambda_1(t_l^-)>c_s$, 与定理 3 中使用 I 的条件矛盾。因此, 策略 I 无法跳跃到 S , 得引理 2。

引理 2 动态策略 $I-S$ 可排除为最优应急策略。

在实际应用以及大量文献中, 通常假设: 若预留有安全库存, 则先以最大速率消耗库存直至为 0, 再使用应急采购满足实时订单。与该假设相反, 引理 2 结果证明: 若中断持续时间较长, 导致库存在 T 前完全消耗, 该“先库存消耗, 后应急采购”的顺序

并非最优中断管理方案。

(ii) 策略 SI 到 S 的跳跃。

策略 SI 对应的决策变量取值为 $x^*=1-r, y^*=1-r$ 。类似地, 由(8)得

$$H(x^*(t_l^-), y^*(t_l^-), \lambda_1(t_l^-), I^*(t_l), t_l) = -c_s r_s(1-r)-c_p(1-r)-\lambda_1(t_l^-)(1-r_s)(1-r)$$

结合跳跃条件(11)及(15)得

$$\lambda_1(t_l^-)=c_l-c_p \quad (17)$$

制造商的最优应急策略在临界点 t_l^- 从策略 SI 转换成 S 。

综上, 得定理 4。

定理 4 在 $I(T)=0$ 情况下,

(i) 若 $c_l-c_p-c_h t_l < c_s$, 最优应急策略为 $I-SI-S$, 即在 $(0, t_l - \frac{c_l-c_p-c_s}{c_h})$ 内采用 I , $(t_l - \frac{c_l-c_p-c_s}{c_h}, t_l)$ 内采用 SI , 最后 (t_l, T) 内采用 S 。其中, t_l 由 $I_m - \int_0^{t_l - \frac{c_l-c_p-c_s}{c_h}} (1-r(\tau)) d\tau - \theta t_s \int_{t_l - \frac{c_l-c_p-c_s}{c_h}}^{t_l} (1-r(\tau)) d\tau = 0$ 确定。

(ii) 若 $c_l-c_p-c_h t_l > c_s$ 时, 最优应急策略为 $SI-S$, 即在 $(0, t_l)$ 内采用 SI , (t_l, T) 内采用 S 。 t_l 由 $I_m - \theta t_s \int_0^{t_l} (1-r(\tau)) d\tau = 0$ 确定。

若供应中断持续时间长, 制造商没有储备足够库存, 最优应急策略有两种: $I-SI-S$ 与 $SI-S$ 。若应急采购成本高于 $c_l-c_p-c_h t_l$, 中断发生后首先以最大速率 $1-r$ 消耗库存, 直至时间点 $t_l - \frac{c_l-c_p-c_s}{c_h}$; 然后在使用库存的同时从现货市场采购原材料, 即策略 SI , 直至库存完全消耗至 0; 最后对所有非留存订单提供纯采购策略 S 。反之, 若 c_s 低于 $c_l-c_p-c_h t_l$, 则在初始时刻就使用 SI , 直至库存完全消耗后转换为 S , 即 $SI-S$ 。中断持续时长 $T \geq t_l$ 。与定理 2 纯策略不同, 这两种混合策略均能有效管理持续时间较长的供应中断。其中, 纯策略 I 的使用区间长度随初始库存量 I_m 增加而增加。

4 数值分析

下面通过数值分析对以上策略进行直观解释及性质分析。为此, 设立一组基本参数值: $\theta=0.7, T=30, M=1.8, I_m=5, t_s=0.5, c_l=6, c_p=1, c_s=2, c_h=0.5$ 。通过定理 2-4 知, 在该条件下, 最优应

急策略为混合 $I-SI-S$, 如图1所示。

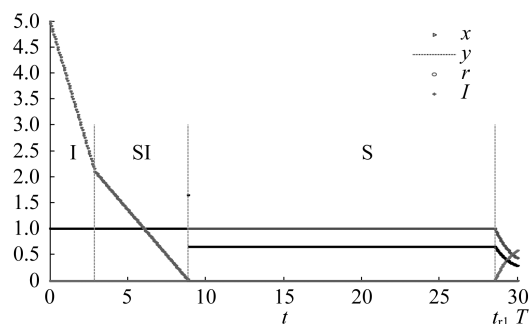


图1 $T=30$ 下最优策略 $I-SI-S$

由图1中 r 知, 中断发生后, 在被告知中断持续时长为 $T=30$ 后, 源于对等待时间的低耐心度 ($\theta=0.7$), 陆续到达的顾客均不自动留存订单, 直至点 t_{r1} 。考虑到中断趋近点 T , 自动留存订单顾客逐步增加。由 y, x , 与 I 所示, 制造商最优措施如下: 在 $(0, t_1)$ 内使用库存满足顾客需求; 由于库存量不足以最大速率持续消耗, 因此在 (t_1, t_r) 内对顾客先提供应急采购, 对不接受该策略的顾客以库存满足其需求。没有顾客流失。从点 t_r 开始, 无库存可用, 只能对顾客提供应急采购, 拒绝该策略的订单直接流失。

下面就应急策略关于其影响因素的变化进行分析, 以中断时长与库存持有成本为例。其他参数不变, 若中断持续时长为10, 最优策略如图2示; 若库存持有成本变为0.3, 最优策略如图3所示。

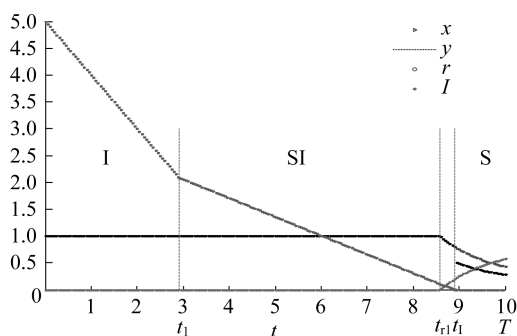


图2 $T=10$ 下最优策略 $I-SI-S$

根据图2, T 变短, 顾客不留存订单状态持续时间相对较短。不同于图1, 这里大部分时间可通过 $I-SI$ 满足所有顾客, 避免订单流失, 中断成本明显减少。特别是, 在 (t_{r1}, t_l) 内, 不需要对所有顾客提供应急采购, 只需对非留存订单部分提供该策略, 减少了单位时间应急成本。由图3知, 库存持有成本对应急策略的结构有明显影响。随 c_h 递减, 策略形式由 $I-SI-S$ 转变为 $SI-S$ 。库存在图1中时刻

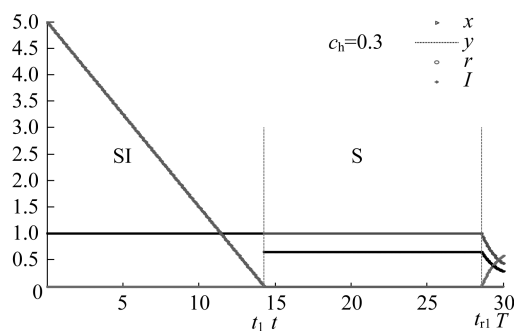


图3 $c_h=0.3$ 下最优策略 $SI-S$

$t_l \approx 9$ 取到0, 之后订单出现流失; 而在图3中, $t_l \approx 14$ 。若 c_h 小, 可以适当减缓库存消耗速度, 从而减少订单流失量。该结果与实际情况相符。

5 结论

面向MTO生产库存系统, 基于安全库存与双源采购策略, 本文研究了供应中断的有效混合动态管理策略。基于顾客对制造商应急策略动态反应, 评估中断负面影响, 构建中断影响最优控制模型。基于该模型, 提出优于纯库存及采购, 适用于管理不同时中断的应急策略。研究结果表明: 在预留有一定量安全库存的前提下, 纯库存策略仅适用于管理持续时间短的中断。对于持续时间长的中断, 本文提出两种混合动态管理策略。若应急采购成本高, 则在中断发生后首先以最大速率消耗库存, 然后在使用库存的基础上结合应急采购, 最后在库存消耗结束后进行应急采购。若应急采购成本低, 则在中断初始时刻进行库存与采购联合策略。

未来研究可从多个方面进行拓展, 如随机需求、多次供应中断等, 从而进一步推动供应中断应对策略的研究。

参考文献:

- [1] Schmitt, T G, Kumar S, Steckel K E, et al. Mitigating disruptions in a multi-echelon supply chain using adaptive ordering [J]. Omega, 2017, 68: 185-198.
- [2] 李新军, 王建军, 达庆利. 供应中断情况下基于备份供应商的应急决策分析[J]. 中国管理科学, 2016, 24(7): 63-71.
- [3] 何远, 李华. 基于中断持续时间不确定的三级供应链恢复模型优化研究[J/OL]. 工业工程与管理.
- [4] He Y, Li S, Xu H, et al. An in-depth analysis of contingent sourcing strategy for handling supply disruptions [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2018: 1-19.

(下转第16页)

- Psychology: An International Review, 1998, (47): 285-342.
- [10] Loch C H, Huberman B A, Stout S K. Status competition and performance in work groups[J]. Journal of Economic Behavior & Organization, 2000, 43(1): 35-55.
- [11] Vitello S J, Mithuag D E. Inclusive schooling: National and international perspective [M]. 1998, Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. 98-112.
- [12] Holvino E. Intersections: The simultaneity of race, gender and class in organization studies[J]. Gender Work & Organization, 2010, 17(3): 248-277.
- [13] Blau P M. Justice in Social Exchange[J]. Sociological Inquiry, 2010, 34(2): 193-206.
- [14] Yin L W. Inclusive leadership and employee voice: Mediating roles of psychological safety and leader-member exchange (Unpublished undergraduate thesis). 2013, Hong Kong Baptist University.
- [15] Sangmi C, Mich  le E, Mor B. Understanding of diversity and inclusion in a perceived homogeneous culture: A study of organizational commitment and job performance among Korean employees[J]. Administration in Social Work, 2008, 32(4): 100-126.
- [16] Groysberg B, Polzer J T, Elfenbein H A. Too many cooks spoil the broth: How high-status individuals decrease group effectiveness[J]. Organization Science, 2016, 22(3): 722-737.
- [17] Brett J M, Olekalns M, Friedman R, et al. Sticks and stones: Language, face, and online dispute resolution[J]. Academy of Management Journal, 2007, 50(1): 85-99.
- [18] Polzer J T, Caruso H M. Identity negotiation processes amidst diversity[J]. Diversity at Work, 2008, (25): 89-126.
- [19] Ridgeway C L, Boyle E H, Kuipers K J, et al. How do status beliefs develop? The role of resources and interactional experience[J]. American Sociological Review, 1998, 63(3): 331-350.
- [20] Porath C L, Overbeck J R, Pearson C M. Picking up the gauntlet: How individuals respond to status challenges [J]. Journal of Applied Social Psychology, 2008, 38(7): 1945-1980.
- [21] Berger J, Ridgeway C L, Fisek M H, et al. The legitimation and delegitimation of power and prestige orders[J]. American Sociological Review, 1998, 63(3): 379.
- [22] Samaddar S. Inter-organizational information sharing: The role of supply network configuration and partner goal congruence [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(2): 744-765.
- [23] Tjosvold D, Law K S, Sun H. Effectiveness of Chinese teams: The role of conflict types and conflict management approaches [J]. Management and Organization Review, 2006, 2(2): 231-252.
- [24] Alper S, Tjosvold D, Law K S. Conflict management, efficacy, and performance in organizational teams [J]. Personnel psychology, 2000, 53(3): 625-642.
- [25] Zahra S. Business strategy, technology policy and firm performance [J]. Strategic Management Journal, 1993, (14): 451-478.
- [26] Hofstede G. The cultural relativity of the quality of life concept [J]. Academy of Management Review, 1984, 9(3): 389-398.

(上接第 23 页)

- [5] Tomlin B. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks [J]. Management Science, 2006, 52(5): 639-657.
- [6] Snyder L V, Atan Z, Peng P, et al. OR/MS models for supply chain disruptions: A review[J]. Iie Transactions, 2016, 48(2): 89-109.
- [7] Shao X F, Dong M. Supply disruption and reactive strategies in an assemble-to-order supply chain with time-sensitive demand [J]. IEEE Transactions on engineering management, 2012, 59(2): 201-212.
- [8] Saghaian S, Van Oyen M P. Compensating for dynamic supply disruptions: Backup flexibility design[J]. Operations Research, 2016, 64(2): 390-405.
- [9] Li S, He Y, Chen L. Dynamic strategies for supply disruptions in production-inventory systems [J]. International Journal of Production Economics, 2017, 194: 88-101.
- [10] Seierstad A, Sydsaeter K. Optimal control theory with economic applications[M]. Elsevier North-Holland, Inc., 1986.