

考虑监管惩罚的两类运作系统应急运作模型

包兴^{1,2}, 鲁其辉³, 牛保庄⁴

(1. 中共浙江省委党校, 杭州 310018; 2. 浙江省科学发展观与浙江发展研究中心, 杭州 310018;
3. 浙江工商大学工商管理学院, 杭州 310058; 4. 中山大学岭南学院, 广州 510275)

摘要: 针对电力、石化等区域垄断性运作系统能力因突发事件受损的情况, 从运作管理的视角探讨监管惩罚、管理者应急态度和应急决策之间的关系, 并以此构造相应的单阶段和多阶段应急运作模型. 从理论上证明了监管惩罚的边界和惩罚机制参数与应急决策变量的相关关系, 在此基础上对服务和生产两类系统的监管机制和管理者应急决策进行数值模拟分析. 仿真结果表明, 所提出的方法对监管部门制定惩罚机制、管理者改善应急管理绩效具有较好的启示.

关键词: 监管惩罚; 运作系统; 应急运作; 应急态度

中图分类号: C93

文献标志码: A

Disruption management of two-types operation systems with supervision penalty

BAO Xing^{1,2}, LU Qi-hui³, NIU Bao-zhuang⁴

(1. Party School of Zhejiang Provincial Committee of CPC, Hangzhou 310018, China; 2. Zhejiang Scientific Development Research Center, Hangzhou 310018, China; 3. Zhejiang Gongshang University, School of Business Administration, Hangzhou 310058, China; 4. Linnan Colledge, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China. Correspondent: BAO Xing, E-mail: goldbxing@gmail.com)

Abstract: Great loss would occur when some regional monopoly operation systems(OS), such as the power grid and refinery, loss their critical capacities after some shock of unexpected events. Therefore, a situation is considered that a third-party regulator, such as public sector, launches the supervision penalty to motivate the OS's manager to accelerate its recovery procedure. The relationship of supervision penalty, the manger's contingent attitude and decision variables in a single and a multiple-periods environment. Some numerical analysis of the two-types of OS are made. Simulation results show that the proposed method can help the regulator to setup up an effective supervision-penalty mechanism, and also can help the OS's manager to make a decision during the recovery procedure.

Keywords: supervision penalty; operation systems; disruption management; contingency attitude

0 引言

电力、通信和石化等大型运作系统是国家、社会基础服务和能源的提供商, 任何突发事件造成的运营中断都会造成严重的经济和社会损失. 为了保障经济安全和公共利益, 许多国家对上述运作系统进行了监管, 确保企业从应急预案和应急运作两个方面预防或降低突发事件的负面影响. 过失惩罚是大多监管条例中重点明确的内容, 不同国家有不同的做法, 大致可以分为两类: 1) 诉讼赔偿的仲裁式惩罚. 例如,

美国公共事业监管委员会负责接受消费者赔偿申请后, 依据监管条例对赔偿进行仲裁. 该惩罚方式理论上会使企业陷入为数庞大的消费者诉讼, 以增加过失成本来促进企业事前的积极预防, 但事实上突发事件爆发后, 企业为降低损失会对事故进行隐瞒, 如2003年美加停电事故中, 美国第一能源公司将事故原因归结于软件故障而非缺乏必要维护之故; 另外, 企业通过政治游说极大地削弱了该机制的威慑力, 如美加大停电特别工作组的调查工作报告中提出的整改措施之一: “确保电力公司与监管机构运营独立,

收稿日期: 2013-06-27; 修回日期: 2014-01-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71302033, 71002084); 教育部博士点基金项目(2011332612002); 浙江省自然科学基金项目(LQ12G01004); 浙江省社科规划“之江青年课题研究”成果项目(13ZJQN048YB).

作者简介: 包兴(1981—), 男, 副教授, 从事供应链管理、应急管理研究; 鲁其辉(1977—), 男, 副教授, 从事供应链管理、运营管理等研究.

…由政府出面监督,对违规者进行处罚”。类似地,Aoki等^[1]对2011年日本福岛核事故分析之后指出:出于自身利益最大化的垄断企业(如电力),在缺乏一个独立且高尚的安全机构监管下,并不必然将社会福利纳入其安全运营的考虑之内。事实上,该惩罚机制在全球范围内处于一个非常尴尬的境地。2)强制性的行政惩罚。该监管机制直接以法规条文的形式规定了惩罚的措施,如中国国务院颁布的493号令(2007)和599号令(2011),都明确了不同事故对应的强制性惩罚金额。对比第1种监管惩罚机制,第2种监管机制因为有明确的法规条文规定、政府出面监管的公正性和独立性,越来越受到全球范围内监管部门的关注和认可,然而惩罚边界难以确定是该机制的最大弊病,条例规定的惩罚机制也没有实际或理论的支持和说明,针对不同类型运作系统采取同样的监管原则能否改善应急管理绩效也没有相关的案例支持。

从上述情况来看,对电力、石化等社会基础服务和能源提供商加强行政监管是世界范围内的一个趋势。因此,在确保上述运作系统在应急管理过程中充分考虑社会福利和公共安全的同时,如何在强制性监管惩罚的背景下,从运作管理的视角增强监管效率和管理者应急决策绩效是本文研究的两个重要出发点。首先对相关研究文献进行回顾和评述,对模型和符号进行约定,并构建了相应的数学模型;然后基于最优化和动态规划的视角对模型进行数理证明,并设计算法对关键参数进行数值分析;最后给出研究结论和未来的研究展望。

1 文献综述

在过去的10年中,国内外诸多学者对企业的应急管理进行了较多的研究。从定性研究的文献来看,当前国内外学者主要从实证和框架分析两个角度研究供应链中发生概率小但影响巨大的运作中断事件,并从防范供应链中断、保持业务可持续性的角度提出如战略联盟、能力冗余、协调分配等应急策略^[2-4]。从定量化的模型研究来看,现有应急运作管理的文献大致可以从以下4个方面进行分类和回顾:

1)面向应急中断的供应商选择问题。这方面研究的主要出发点是:如何通过供应商基数的选择防范突发事件对供应链造成的失效。如Berge等^[5]首次在灾难和极端事件情景下将供应失效纳入到供应商数量的选择问题,后来一些学者在该研究的基础上放松了供应商失效概率唯一的假设^[6];或增加了服务水平最大化情况下应急预算和成本约束,对供应商选择问题重新进行了研究^[7]。

2)应急采购和应急库存策略的问题。这方面研究吸引了最多学者的关注,其理论模型的主要出发

点是:如何在应急期间进行订单分配和库存协调。如供应链上游中断后,下游如何通过预防性的库存控制、供应商之间的订单分配或启用备份供应商^[8];或考虑风险中性、规避和CVaR风险控制下的保护预防策略^[9];或主要供应商发生中断后,下游愿意等待其恢复的情景下,研究供应恢复速度对订单分配和库存策略的影响^[10];或供应商中断时间长短对预防性库存设置的影响^[11]。

3)应急生产和调度计划方面的研究。考虑系统能力中断或被削弱情况下的重新排程问题,其理论模型主要出发点是:如何最小化初始目标和应急计划之间的偏移成本。一些学者对运作系统中断后的应急调度模型和数学求解算法进行了研究,关注的是应急期间调度算法效率和优化问题^[12-14];另一些学者从“生产-库存”角度对应急环境下的生产计划、能力恢复等问题进行了研究,目的是在能力建设和联盟战略方面给出相关建议^[15-16]。

4)激励机制和契约协调缓解应急损失方面的研究,可以从供应链成员间的援助、上下游风险信息披露的角度理解。如一些学者从防止供应链中断的角度对成员间的援助机制、援助金额决策进行了研究^[17-18],或价格和订单承诺在激励供应商事前保留冗余能力方面的激励作用^[19];另一些学者认为信息共享在应急期间的作用非常重要,如何通过风险信息租金或采购合同中的费率设计来鼓励上下游披露应急期间的风险信息^[20-21]。

从现有文献回顾来看,上述理论模型大多集中于供应链应急管理领域,其运作模型和协调策略的构建均基于市场竞争环境假设下的供应链应急运作管理。然而,对于电力、石化等具有极强公共属性和区域垄断特性的运作系统而言,还有以下两个问题应得到进一步关注,同时本文的研究也将围绕这两个问题展开:

1)突发事件对上述区域垄断性运作系统造成冲击后会产生极强的负外部效应,社会安全、环境污染和经济停滞将严重危害到社会福利,仅以降低缺货惩罚为主要目标的应急运作和协调策略^[8-11,18,20],显然无法解释北美大停电事故中社会福利受损的现象,而以降低社会福利损失的监管惩罚如何确定在上述模型中并没有得到关注。此外,在强制性的行政监管机制下,“是否存在一个具备管理学意义上的监管惩罚边界,这既能迫使企业积极应急,同时又不至于恶化企业未来的运营绩效”这一问题也未见到相关研究。

2)与风险不同的是,突发事件具有小概率性、突发性、破坏性和不可重复性等特点,管理者在应急过程中充满了经验主义,其决策的科学性和有效性往往

难以得到验证^[22]. 例如: 突发事件对系统运营能力造成损坏后, 管理者通常认为外部存在的临时能力替代支援越多越好, 如更多的应急发电车、更大容量的应急基站或通信卫星、能够提供更多燃料等实物支援的伙伴企业、租用尽可能得到的临时生产线等. 另外, 管理者也会认为自身能力恢复水平越高越有助于结束应急状态, 并降低成本. 因此, 管理者依据经验做出的能力投资、联盟和维修技术投资决策都倾向于做出“越多越好”的判断, 但这些外部能力支援和内部能力恢复对应急管理绩效的贡献是否相同? 是否会对企业未来经营绩效产生负面的影响? 这些问题均没有得到相关理论和案例的支持.

2 模型假设和符号约定

不同系统运作能力输出的表现形式有所不同, 从能力是否可以通过实物库存对跨期需求进行满足的角度, 可将运作系统分为服务和生产两类系统, 前者提供如电力、通讯等服务型产品, 后者提供如石油炼化、芯片等实物产品. 当突发事件造成系统能力损伤后, 两类运作系统的应急运作模式如图1所示. 当突发事件对运作系统能力造成冲击后, 系统原有可供运营的能力水平降至正常水平之下, 设为 d_0 . 企业修复技术水平、应急备件供给情况等会造成能力应急管理呈现多阶段的特点, 单个阶段内系统能力恢复存在上限, 即 $r_n \leq R$, 而已恢复的能力在应急阶段末投入运营, 第 n 阶段末 (即第 $n+1$ 阶段期初) 系统持有的能力水平为 $d_{n+1} = d_n + r_n$, 经过 N 个阶段能力水平恢复到 d_N 后应急结束. 两类运作系统的本质差异是生产系统中存在实物库存, 服务系统则无法跨期存储剩余服务能力.

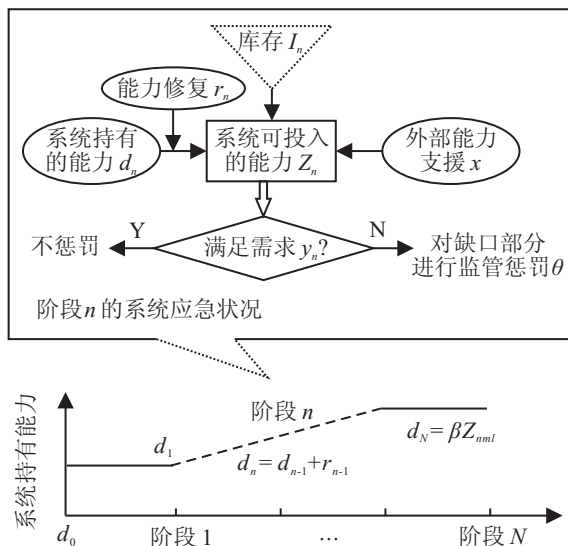


图1 两类运作系统能力受损后的应急模型

由于电力、石化等运作系统往往具有一定的区域独占性, 应急期间的外部需求 y_n 可依据历史数据

进行推断^[10], 设其概率密度和分布函数为 $f(y_n)$ 和 $F(y_n)$. 应急期间, 系统可向外部伙伴企业发出 u_n 的能力支援需求, 外部企业可提供能力支援数量 x_n 为 $[0, S]$ 之间的随机变量, 概率密度和分布函数为 $g(x_n)$ 和 $G(x_n)$, 单个应急阶段内系统实际获得的能力支援数量为 $\min\{u_n, x_n\}$.

在能力应急恢复阶段, 企业将付出能力恢复成本 $P(r_n)$, 如果 $P(r_n)$ 非常高, 则管理者宁可中断合同, 向客户支付缺货赔偿, 也不会积极恢复受损能力^[1]. 从政府监管的角度看, 电力、燃料这些基础要素无法正常供给将在更大范围内造成社会福利的损失, 因此政府通常会对这些大型运作系统施加监管惩罚 θ 来迫使管理者积极应急, 将受损能力恢复至正常水平或匹配外界需求.

为了平衡应急期间运作系统的运营成本和监管惩罚, 在每个应急阶段的期初, 管理者决策当期能力投入水平 Z_n 、能力恢复量 r_n 和外部支援能力使用数量 $\min\{u_n, x_n\}$, 相应的单阶段应急成本函数为 (为简便起见, 除必须说明外, 以下各式的参数中省略阶段下标 n)

$$\begin{aligned} \phi_n(Z, r, u) = & h(Z - y)^+ + k(Z - y)^- + c_0(d + r) + \\ & c_1 \min\{u, x\} + P(r) + \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

其中: 第1项为投入能力过多产生的库存成本, 对于服务运作系统而言, 单位库存成本 $h = 0$; 第2项为投入不足产生的缺货成本, k 为单位缺货成本; 第3项为自身能力投入的运营成本, d 为第 n 阶段系统持有的能力, r 为恢复的受损能力, c_0 为单位能力运营成本; 第4项为外部能力支援的使用成本, c_1 为单位外部能力的使用成本, 且 $c_1 > c_0$; 第5项为受损能力的恢复成本, 考虑到电力、石化等系统能力修复成本昂贵, 具有明显的规模不经济特点, $P'(r) > c_1$, $P''(r) \geq 0$, $P'(r) > c_1$ 表示单位能力恢复的成本要高于外部能力使用成本; 第6项为监管部门的惩罚, 即

$$\theta = w(\beta Z_{nml} - d - I - r)^+, \quad (2)$$

w 为能力缺口部分的单位惩罚成本, Z_{nml} 为正常情况之下系统投入运营的能力水平, β ($0 \leq \beta \leq 1$) 为监管惩罚系数, I 为第 n 阶段的累积库存水平, 对于服务运作系统, $I = 0$. 因为当前监管条例中约定的惩罚是以系统实有能力和应急目标之间的缺口计算, 并没有考虑外部支援对需求缺口的补充, 所以 θ 中忽略了外部能力支援 x .

由式(2)可见, 两类运作系统最大的不同在于, 生产运作系统可以通过实物库存对外部需求进行缓冲. 一个简单的直觉是: 即使监管部门对两类系统采用相

同的 w, β 值也应有不同, 否则不同系统管理者的应急绩效会存在较大差异. 因此, 本文定义 $\beta = 1$ 表示无限度惩罚, 即系统能力输出恢复到正常水平时免除惩罚; $0 \leq \beta < 1$ 表示有限度惩罚, 即恢复到一定水平后免除惩罚.

3 最优应急决策及其特性分析

首先从管理者角度分析应急期间的最优运作决策, 并分析监管部门采取的惩罚边界和不同惩罚机制下运作系统的应急绩效; 然后研究管理者的应急决策路径, 分析可供改善应急决策的参数调节方向.

式(1)构造了单阶段应急成本和相应的决策变量, 能够降低决策优化的难度且符合应急特点. 假设管理者首先决策当期最优的能力投入水平 Z_{nml} , 然后决策恢复能力 r , 最后决策外部能力支援 u . 由于 $Z_{nml} = u + r + d + I$, 管理者实际需要决策的只有 r 和 u . 此外, 借鉴 Weng^[23]关于风险测度的定义, 根据 $u + r$ 和能力缺口之间的比值构造管理者的应急态度因子 α , 有

$$u + r = \alpha(Z_{nml} - d - I). \quad (3)$$

可以看出, α 越大表示管理者应急态度越激进, 并且倾向于决策更多的 u 和 r . 进一步将式(3)重写为 $u = \alpha(Z_{nml} - d - I) - r$ 并代入式(1), 则单阶段应急成本函数可以简化为只有单个决策变量的目标函数 $\phi(r)$, 由此对第 n 阶段的应急成本函数 $\phi(r)$ 求期望成本函数 $\Phi(r)$, 即

$$\begin{aligned} \Phi(r) = & (1 - G(u)) \left\{ h \int_{y=0}^{Z_{nml}} (Z_{nml} - y) f(y) dy + c_1 u + \right. \\ & c_0(d + r) + P(r) + k \int_{y=Z_{nml}}^{+\infty} (y - Z_{nml}) f(y) dy \left. \right\} + \\ & h \int_{x=0}^u \int_{y=0}^{\xi} (\xi - y) f(y) g(x) dy dx + \\ & k \int_{x=0}^u \int_{y=\xi}^{+\infty} (y - \xi) f(y) g(x) dy dx + \\ & \int_{x=0}^u (P(r) + c_0(d + r) + c_1 x) g(x) dx + \theta, \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $\xi = I + x + d + r$.

定理1 对于两类运作系统, 其单阶段应急成本函数 $\Phi(r)$ 为凸函数, 存在最优值 r^* 使得应急成本最低, u^* 采用 order-up-to 策略, 且 $u^* = (\min\{\alpha(Z_{nml} - d - r), S\})^+$.

证明 对式(4)求关于 r 的一阶导数, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(r)}{\partial r} = & (h + k) \int_{x=0}^u g(x) F(\xi) dx + P'(r) + c_0 - c_1 + \\ & (h + k)(1 - G(u)) F(Z_{nml}) + \partial \theta / \partial r. \quad (5) \end{aligned}$$

由式(2)可知, 当 $\beta Z_{nml} - d - I - r < 0$ 时, $\theta = 0$;

当 $\beta Z_{nml} - d - I - r > 0$ 时, $\partial \theta / \partial r = -w$. 进一步求其二阶导数, 得

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi(r)}{\partial r^2} = & (h + k) \int_{x=0}^u g(x) f(\xi) dx + \\ & P''(r) + (h + k)(1 - G(u)) f(Z_{nml}). \quad (6) \end{aligned}$$

式(6)中, 等式右边各项均为非负, 因此 $\partial^2 \Phi(r) / \partial r^2 \geq 0$, 即 $\Phi(r)$ 是凸函数, 且与参数 θ 无关. 进而得到, 满足式(5) $\partial \Phi(r) / \partial r = 0$ 的解 r^* 是最优解, 且 $u^* = (\min\{\alpha(Z_{nml} - d - r), S\})^+$, 其中 S 为外部能力支援的上限. \square

定理2 对于两类运作系统, 当 $w > P'(r) + h + k + c_0 - c_1$ 时, $\partial \Phi(r) / \partial r < 0$, 能力恢复最优决策 $r^* = R$; 当 $w < P'(r) + c_0 - c_1$ 时, $\partial \Phi(r) / \partial r > 0$ 且 $r^* = 0$; 其余情况下, $\Phi(r)$ 为凸函数, r^* 为满足 $\partial \Phi(r) / \partial r = 0$ 的解.

证明 考虑式(5)中 $\theta > 0$ 的情况. 对式(5)进行条件放缩可得

$$\begin{aligned} P'(r) + c_0 - c_1 - w \leq & \\ \partial \Phi(r) / \partial r \leq P'(r) + h + k + c_0 - c_1 - w. \quad (7) \end{aligned}$$

若 $w > P'(r) + h + k + c_0 - c_1$, 则对于式(7)右边有 $\partial \Phi(r) / \partial r < 0$, 即 Φ 是关于 r 的单调递减函数, 管理者最优的决策是全力恢复受损能力, $r^* = R$. 当 $w < P'(r) + c_0 - c_1$ 时, 式(7)左边有 $\partial \Phi(r) / \partial r > 0$, 即 Φ 是关于 r 的单调递增函数, 管理者最优的决策是 $r^* = 0$, 在此条件下管理者将不再恢复受损能力. 其余情况中, 由定理1可知, Φ 为凸函数, r^* 为满足 $\partial \Phi(r) / \partial r = 0$ 的解. 此外, u^* 依然采用 order-up-to 策略, 如定理1所示. \square

推论1 对于服务运作系统, $\Delta \beta, \Delta w \propto \Delta r$, 即提高 w, β 均能迫使管理者恢复更多的受损能力 r ; 相反会降低 r 的决策.

证明 定理1已经证明 r^* 为令式(5)等于零的解, 当 $\beta Z_{nml} - d - I - r > 0$ 时, 对于式(5)有 $\partial \Phi / \partial r \leq h + k + P'(r) + c_0 - c_1 - w$. 可以看出, w 增加时 r 增加, 因此 Δw 和 Δr 正相关, 即 $\Delta w \propto \Delta r$. 对式(2)进行变形, 得到 $\theta = w\beta(Z_{nml} - (d + I + r) / \beta)^+$. 将 $w\beta$ 视为新的单位惩罚值 \bar{w} , 可以看出, 提高 β 与提高 w 的效果相同, 因此在定理1的保证下 $\Delta \beta$ 与 Δr 正相关, 即 $\Delta \beta \propto \Delta r$. \square

推论2 对于生产运作系统, $\Delta \beta, \Delta w \propto \Delta r, \Delta I$, 提高 w, β 不仅会迫使管理者恢复更多的受损能力 r , 而且会增加应急期末的库存水平 I ; 相反, 管理者会降低 r 和 I .

证明 推论2证明与推论1相同, 可得 $\Delta \beta, \Delta w$

$\alpha \Delta r$, 根据对偶原理, $\Delta\beta, \Delta w$ 与 ΔI 正相关, 即 $\Delta\beta, \Delta w \propto \Delta I$. \square

定理2证明了能力恢复到正常水平时的监管惩罚下界, 即 $w > P'(r) + h + k + c_0 - c_1$. 但是, 不同运作系统能力满足需求的形式有所不同, 例如, 电力、通信等服务运作系统无法通过库存缓冲外部需求, 监管机制的设计导向应该是迫使此类管理者积极恢复受损能力. 根据推论1和当前中国监管的实际(国务院493和599号令), 本文认为不应该降低对电力等服务运作系统的监管惩罚下界, 同时应采取 $\beta = 1$ 的无限度惩罚机制, 以迫使管理者完全恢复受损的能力. 但是, 对于石化等生产运作系统, 外部需求可由实物库存满足, 由推论2可以看出, 如果一味强调受损能力的完全恢复, 反而会增加其应急期末的库存水平, 不利于企业的经营绩效. 因此, 对此类运作系统的监管惩罚, 可采用有限度惩罚(即 $\beta < 1$) 来降低应急期末的库存水平, 但定理2、推论1和推论2无法确保最优 β 的存在.

推论3 对于两类运作系统, $\Delta\alpha \propto \Delta r, \Delta u$, 即 α 越高, 管理者应急决策越倾向于 $r^* \rightarrow R, u^* \rightarrow S$.

由式(3)可知, u 和 r 满足对偶原理, 证明方法类似于推论1和推论2, 此略.

由推论3可知, 管理者激进的应急态度将抬高 r^* 和 u^* , 从方便应急决策的角度而言, 管理者应急态度越激进, 决策越简单. 但结合推论2, 过于激进的应急态度会推高生产运作系统应急期末的库存水平.

定理1、定理2、推论1~推论3仅讨论了单个应急阶段的情景, 与服务运作系统不同的是, 生产运作系统由于库存 I 的存在, 使得单阶段应急成本最优的决策组合无法保证 N 个阶段的总应急成本最优, 还需额外证明.

定理3 当 $\alpha \geq 2k/(3k + h - c_1)$ 时, 生产运作系统的应急总成本 $\Sigma\Phi_n$ 为 r 的凸函数, 存在唯一 $\{r_n^*\}$ 序列使得 $\Sigma\Phi_n$ 存在最小值.

证明 采用逆向归纳法证明. 设 $J_n(I_n)$ 是从第 n 阶段开始到结束的应急成本, $T_n = J_n(I_n)|_{I_n=I_n^*}$, $J_n(I_n)$ 为

$$\begin{aligned}
 J_n(I_n) = & \Phi_n + \rho \int_{y=0}^{\infty} \int_{x=0}^{u_n} T_{n+1}(x, y) f(y) g(x) dx dy + \\
 & \rho(1 - G(u_n)) \int_{y=0}^{\infty} T_{n+1}(y) f(y) dy, \\
 & n = 1, 2, \dots, N. \tag{8}
 \end{aligned}$$

其中

$$T_{n+1}(x, y) = T_{n+1}(\xi - y),$$

$$T_{n+1}(y) = T_{n+1}(Z - y),$$

设折现因子 $\rho = 1$. 对于生产运作系统, 应急阶段间的状态转移方程 $I_n = I_{n-1} + u_{n-1} + d_{n-1} + r_{n-1} - y$.

首先证明, 第 N 阶段 J_N 的凹凸性. 由于 N 为最后一个应急阶段, 有 $J_N = T_N = \Phi_N$, 可得

$$\partial^2 J_N / \partial I_N^2 \geq \alpha g(u)(c_1 \alpha + k(2 - \alpha) - \alpha(h + k)). \tag{9}$$

当 $\alpha \geq 2k/(3k + h - c_1)$ 时, 有 $\partial^2 J_N / \partial I_N^2 \geq 0$, 则 J_N 关于 I_N 是凸函数.

下面分析当 $n < N$ 时 J_n 的凹凸性. 假设 T_{n+1} 是 I_N 的凸函数(即 $T_{n+1}'' \geq 0$), 由式(8)可得

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 J_n}{\partial I_n^2} = & (1 - G(u_n))(1 - \alpha^2) \int_{y=0}^{\infty} T_{n+1}''(y) f(y) dy + \\
 & \partial^2 \Phi_n / \partial I_n^2. \tag{10}
 \end{aligned}$$

由于式(10)第2项非负, $\alpha \geq 2k/(3k + h - c_1)$ 时第1项也为非负, J_n 关于 I_n 是凸函数. 根据对偶原理, T_n 也是 r_n 的凸函数, 因此当 $\alpha \geq 2k/(3k + h - c_1)$ 时, 存在唯一能力恢复决策序列 $\{r_n^*\}$ 使得应急成本最小. \square

4 数值仿真分析

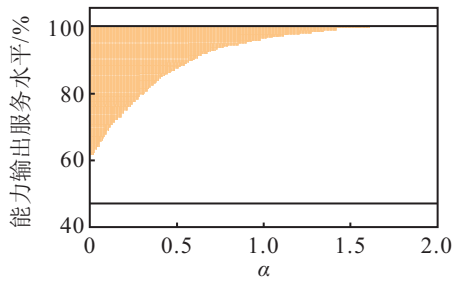
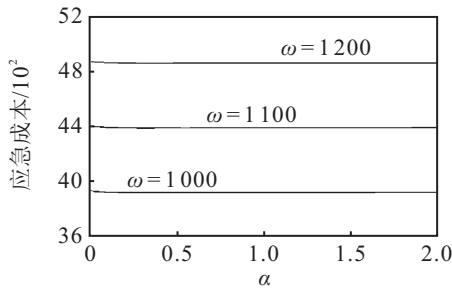
在前述理论分析的基础上, 针对服务和生产两类运作系统分别设计不同的算法对本文模型进行求解, 并对其中关键参数进行灵敏度分析, 以便更直观地分析监管惩罚对应急决策的影响趋势.

数值仿真中采用的基础数据为: 突发事件发生后, 系统剩余可供运行的能力 $d_0 = 0.8$; 受损能力恢复的成本函数 $P(r) = 1000r^2$; 外部需求 y 服从分布 $\text{Gamma}(10, 0.1)$; $k = 80, h = 1, I_0 = 0$ (对于服务运作系统 $h = 0, I_0 = 0$), $c_0 = 2, c_1 = 10$; 外部能力支援 x 服从均匀分布 $U(0, S)$, 外部能力供给上限 S 和系统可恢复的能力上限 R 在下文中进行灵敏度分析. 易知, 服务和生产运作系统正常情况下的投产能力为 $Z_{nml}^{srv} = 1.71, Z_{nml}^{mfr} = 1.63$.

4.1 w 和 α 对应急的影响分析

图2为 w 和 α 对系统能力恢复水平的影响 ($S = 0.2, R = 0.1, \beta = 1$), 图3为 w 和 α 对服务运作系统应急成本的影响 ($S = 0.2, R = 0.1, \beta = 1$). 数值模拟的结果与理论证明吻合, 并有以下结论:

1) 当惩罚值 $w = [P'(r) + c_0 - c_1, P'(r) + h + k + c_0 - c_1]$ 时, 服务运作系统受损的能力可能无法完全恢复(见图2中的阴影部分). 且当惩罚值下降约一 k 值便会使管理者选择不积极应急, 这表明如果缺货成本 k 无法满足外部社会损失值时, 监管部门应该做的是加大惩罚力度 w . 当惩罚值 $w > P'(r) + h +$

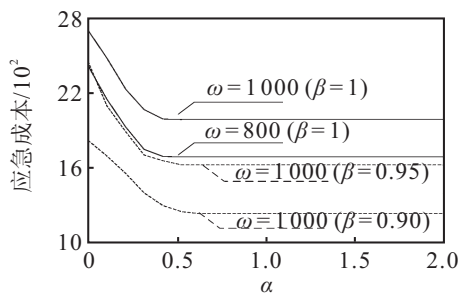
图2 w 和 α 对服务运作系统能力恢复水平的影响图3 w 和 α 对服务运作系统应急成本的影响

$k + c_0 - c_1$ 时, 增加 w 值对应急效果无任何影响 (见图2), 管理者只能采取 $r = R$ 的决策. 若将受损能力完全恢复, 则应急所需时间仅受 R 值的影响, 即 $N = (Z_{nml} - d_0)/R$.

2) 由图3可知, 若 $w > P'(r) + h + k + c_0 - c_1$, 则 α 越大 (当 $\alpha > 2$ 时), 管理者的应急决策越简单 ($r^* = R, u^* = S$), 即只需全力投入可用于能力恢复的全部资源, 并最大化使用外部可获得的能力支援. α 的增加几乎不会对应急成本产生影响, 应急成本的上升主要来自于 w 的增加. 从该角度来看, 服务运作系统的管理者在应急过程中态度越激进越有助于降低决策难度.

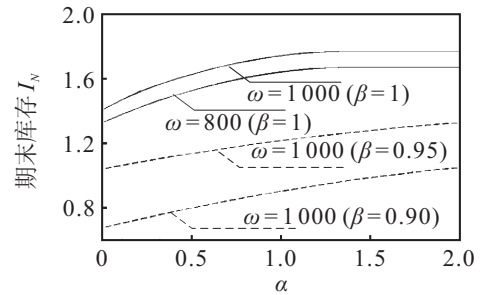
对于生产运作系统 (如石化、能源等制造商), 采用遗传算法 (GA) 对该随机动态规划进行模拟, 计算 w 和 α 对应急成本和应急期末库存水平 I_N . 与服务运作系统不同的是:

1) 降低 w, β 值均能够较大地降低生产运作系统的应急成本, 但从效果来看, 降低 β 对减少应急成本方面的贡献更大一些 (如图4所示, $S = 0.2, R = 0.1$).

图4 w 和 α 对生产运作系统应急成本的影响

2) w 和 β 会使生产运作系统在应急结束时积累过量的库存 I_N , 降低 w, β 值均能够降低应急成本, 但

从减少应急期末库存来看, 降低 β 更有效 (如图5所示, $S = 0.2, R = 0.1$).

图5 w 和 α 对生产运作系统应急期末库存的影响

3) 当 $\alpha > 2/3$ 时, α 对应急成本几乎无影响, 但管理者采取过于激进的应急态度会造成 I_N 的上升. 结合定理3, 生产运作系统的管理者采取相对保守的应急态度反而更有利于应急管理绩效.

综合1)~3)的仿真结果, 对于监管者本文建议: 不降低惩罚值, 并辅以有限度惩罚机制会更有利于生产运作系统降低应急成本, 同时也更有利于企业的未来绩效.

4.2 [S, R] 对应急的影响分析

下面从管理者的角度, 就两类运作系统的 $[S, R]$ 参数进行灵敏度分析, 目的是给企业进行能力联盟、恢复投资指出方向.

表1为服务运作系统 $[S, R]$ 参数对于应急运作影响的仿真结果.

表1 $[S, R]$ 对服务运作系统应急成本和时间的影响

S	$R = 0.1$	$R = 0.2$	$R = 0.3$	$R = 0.4$
0	4219.8(10)	2038.7(5)	1430.4(4)	1103.4(3)
0.1	3833.1(10)	1855.1(5)	1239.2(4)	990.1(3)
0.2	3831.5(10)	1854.9(5)	1238.4(4)	989.3(3)
0.3	3830.4(10)	1852.5(5)	1236.3(4)	988.1(3)

由表1可见:

1) 由 $S = 0$ 到 $S > 0$ 时, 系统应急成本有较大的降幅, 降幅区间为 $[-15.4\% \sim -9.8\%]$; 当 $S > 0$ 后, S 的增加对降低应急成本非常有限. 从该角度看, 对于服务运作系统而言, 有外部支援即可, 但不必强求过多的外部支援, 这意味着“对通信卫星扩容”的建议更多出于保障应急期间的通信安全, 但对降低应急成本的贡献并不大.

2) 相对于 S, R 的增加, 更有助于降低服务运作系统的应急成本和缩短应急时间. 从仿真结果看, R 对降低应急成本的边际贡献率呈下降趋势. 从应急准备投资看, 服务运作系统在提高内部恢复能力 R 值上的投资并不经济, 如果能够与外部伙伴企业进行修复技术的联盟则是更好的选择. 从该角度看, 2008年国家

电网向受灾地区派遣超过25万员工进行能力修复是能够大幅度提高应急绩效的。

表2为生产运作系统 $[S, R]$ 参数对于应急运作影响的仿真结果。

表2 $[S, R]$ 对生产企业应急成本(期末实物库存)的影响

S	$R = 0.1$	$R = 0.2$	$R = 0.3$	$R = 0.4$
0	2155(1.83)	1457(1.92)	1006(2.00)	865(2.29)
0.1	1992(2.35)	1149(2.47)	897(2.63)	729(2.89)
0.2	1695(2.58)	1075(2.66)	839(2.87)	723(3.01)
0.3	1314(2.73)	985(2.98)	829(3.12)	718(3.32)

由表2可见:

1) S 对生产运作系统应急成本的下降具有更高的贡献率,但是随着 R 的增加, S 的贡献率逐渐下降。从该角度看,在生产系统能力恢复水平较高的情况下,外部能力支援可相对减少;反之,则应该加强外部能力支援的获取。

2)与服务运作系统类似, R 值更有利于降低应急成本,但其边际贡献率也呈下降趋势。此外, R 值的增加会显著提高应急期末的库存水平 I_N ,且 I_N 远高于 Z_{nml}^{mfr} ,库存贬值的风险增加。因此,从该角度看,过度投资内部维修部门的恢复水平(如增加备件库存)并非最佳选择,可效仿国家电网的应急实践,尽量在应急期间获得伙伴企业的恢复技术支持(或备件支持)能够改善应急绩效。

5 结 论

本文从运作管理的研究视角,讨论了监管惩罚约束情境下两类运作系统的应急决策,建立了相应的理论模型,并通过数值仿真分析了监管惩罚和其他相关参数对应急决策的影响,所得结论对政府监管部门改善监管惩罚机制和管理者提高应急绩效具有一定的理论借鉴意义。本文主要研究结论如下:

1)从监管者的角度,本文希望对监管惩罚机制做如下补充建议:

①从迫使管理者完全恢复受损能力的角度看,监管机制约定的惩罚 w 不能低于下界值 $P'(r) + h + k + c_0 - c_1$,高于该惩罚值能够确保管理者积极应急,并使受损能力完全恢复到正常水平。需要注意的是, w 稍有下降(约 $h + k$),管理者便不会将受损能力完全恢复。此外,当 w 无法弥补社会福利(如发生环境污染等次生灾害)时,监管部门应该实施更为高昂的惩罚以迫使管理者积极应急。

②针对不同类型的运作系统,应采取不同的惩罚机制,例如对于电力、通讯等服务运作系统,应从严制定监管惩罚(即本文所提 $\beta = 1$ 的无限度惩罚),目的是促使其完全恢复受损能力;对于石化等生产运作

系统,应采用有限度惩罚机制(对应 $\beta < 1$),即系统能力恢复到某一水平后免除惩罚,目的是避免管理者过度应急造成应急期末大量库存的积压。需要注意的是,并不存在最优的惩罚系数 β ,这意味着需要监管者根据经验进行判断。

2)从管理者的角度,本文研究有助于提升其决策质量和应急绩效:

①在选择外部能力支援的伙伴时,“支援越多应急成本越低”的结论只适用于石化等生产运作系统;对于电力等服务运作系统,外部能力支援“有即可”。这主要归结于服务运作系统在满足外界需求时,其能力无法像生产运作系统一样通过实物库存来缓冲应急期间的能力缺口。

②受损能力的修复水平对降低两类运作系统的应急成本起到主要贡献,但其边际贡献率会下降。这意味着,对能力恢复部门进行合理的投资(如应急修复演练、增加技术投入)、维持良好的备件供应商关系(以便应急期间加快核心备件供应)、获得伙伴企业能力恢复技术支持等都能大幅降低应急损失。需要注意的是:对于石化等生产运作系统而言,过高的能力修复水平会造成应急期末库存的急剧上升(意味着库存跌价风险加大,未来运营绩效可能被损害),应急期间浪费现象增加,应谨慎增加能力修复水平。

③总体来看,管理者应急态度越激进,应急决策越简单,最大化利用内外所有可获得能力即可无需复杂计算。但不同类型运作系统管理者的应急态度对应急成本的影响有所不同:对于服务运作系统而言,管理者激进的应急态度对应急成本影响不大;对于生产运作系统而言,激进的应急态度反而推高应急期末的库存水平,造成应急过度的现象。综合来看,服务运作系统的管理者应选择更为激进的应急态度(即 $\alpha > 1$),生产运作系统的管理者则应相对审慎,同时注意其应急态度因子存在下界,即 $\alpha \geq 2/3$ 。

本文研究过程中放松了一些假设,如:一些关键运作系统的能力损毁可能存在巨大的负外部效应(如2008年电网损毁后的春运交通瘫痪、工厂停工、2011年福岛地震后的核泄漏等)。应急期间管理者的一些行为将如何影响到企业的应急绩效还有待进一步的模型和实证研究,应急过程中监管部门和应急管理者的动态博弈行为还需要进一步探讨。

参考文献(References)

- [1] Aoki M, Rothwell G. A comparative institutional analysis of Fukushima nuclear disaster: Lessons and policy implications[J]. Energy Policy, 2013, 53: 240-247.
- [2] Kleindorfer P R, Saad G H. Managing disruption risks in

- supply chains[J]. *Production and Operation Management*, 2005, 14(1): 53-68.
- [3] Zsidisin G, Melnyk S, Ragatz G. An institutional theory perspective of business continuity planning for purchasing and supply chain management[J]. *Int J of Production Research*, 2005, 43(16): 3401-3420.
- [4] 傅克俊, 胡祥培, 王旭坪. 供应链系统中的应急策略与模型[J]. *中国软科学*, 2007(5): 119-124.
(Fu K J, Hu X P, Wang X P. The emergency strategies and models in supply chain systems[J]. *China Soft Science*, 2007(5): 119-124.)
- [5] Berge P D, Gerstenfeld A, Zeng A Z. How many suppliers are best? A decision-analysis approach[J]. *Omega*, 2004, 32(1): 9-15.
- [6] Ruiz-Torres A J, Mahmoodi F. The optimal number of suppliers considering the costs of individual supplier failures[J]. *Int J of Production Economics*, 2007, 35(1): 104-115.
- [7] Meena P L, Sarmah S P, Sarkar A. Sourcing decisions under risk of catastrophic event disruptions[J]. *Transportation Research Part E*, 2011, 47(6): 1058-1074.
- [8] Tomlin B T. On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks[J]. *Management Science*, 2006, 52(5): 639-657.
- [9] Sawik T. Selection of resilient supply portfolio under disruption[J]. *Omega*, 2013, 41(2): 259-269.
- [10] Qi L. A continuous-review inventory model with random disruptions at the primary supplier[J]. *European J of Operational Research*, 2013, 225(1): 59-74.
- [11] Schmitt A J. Strategies for customer service level protection under multi-echelon supply chain disruption risk[J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(8): 1266-1283.
- [12] Yu G, Qi X T. *Disruption management: Framework, models and applications*[M]. River Edge: World Scientific Publishing Co, 2004.
- [13] Qi X T, Bard J F, Yu G. Disruption management for machine scheduling: The case of spt schedules[J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 103(1): 166-184.
- [14] 唐恒永, 唐春晖, 赵传立. 突发事件应急管理中的中断-继续随机排序模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(4): 751-757.
(Tang H Y, Tang C H, Zhao C L. A preemptive-resume stochastic scheduling model with disruption[J]. *Systems Engineering - Theory & Practice*, 2010, 30(4): 751-757.)
- [15] Mohebbi E. A production-inventory model with randomly changing environmental conditions[J]. *European J of Operational Research*, 2006, 174(1): 539-552.
- [16] 包兴. 能力共享可降低服务运作系统的应急成本么? 基于两种能力支援的应急决策模型研究[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(1): 123-128.
(Bao X. Can disruption cost be greatly cut down via capacity-sharing? A model research based on two kinds of capacity trading mode[J]. *Chinese J of Management Science*, 2012, 20(1): 123-128.)
- [17] Wadecki A A, Babich V, Wu O Q. Manufacturer competition and subsidies to suppliers[C]. *Supply Chain Disruptions*. London: Springer, 2012: 141-163.
- [18] 于辉, 邓亮, 孙彩虹. 供应链应急援助的 CVaR 模型[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(6): 68-75.
(Yu H, Deng L, Sun C H. A CVaR model of supply chain emergency assistance[J]. *J of Management Sciences in China*, 2011, 14(6): 68-75.)
- [19] Hu X X, Gurnani H, Wang L. Managing risk of supply disruptions: Incentives for capacity restoration[J]. *Production and Operations Management*, 2013, 22(1): 137-150.
- [20] Yang Z, Aydin G, Babich V, et al. Supply disruptions, asymmetric information and a backup production option[J]. *Management science*, 2009, 55(2): 192-209.
- [21] Gao L, Li Z. Managing supply interruptions with contract coordination and information sharing[D]. Riverside County: Anderson Graduate School of Management, University of California Riverside, 2010.
- [22] Tang C S. Review: Perspectives in supply chain risk management[J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 103(2): 451-488.
- [23] Weng Z K. The power of coordinated ordering decisions for short-life-cycle products in a manufacturing and distribution supply chain[J]. *IIE Trans*, 1999, 31(11): 1037-1049.

(责任编辑: 郑晓蕾)