

基于重要基础设施构成网络的防灾投资行动分析

马 锋

(重庆市电力公司江北供电局, 重庆 401147)

摘 要: 文章以港口为例来研究重要基础设施的安全性投资问题。对于存在互助关系和竞争关系的四个港口, 根据有互助关系的港口过少防灾投资及有竞争关系的港口过大防灾投资这个事实组建模型, 用博弈论来进行分析得出最优防灾投资的方案。

关键词: 基础设施; 网络; 防灾投资

中图分类号: X43

文献标识码: A

引 言

重要的基础设施, 即物理设施、物资供给系统、信息技术、信息通信网络等等, 若在某个时段遭受破坏、机能低下、无法利用等状况, 可能会对社会以及经济活动带来较大影响^[1]。防止这类重要的基础设施陷入机能停止的状态是很有必要的, 但事实上, 我们对此的防护措施并不到位。本文将作为重要基础设施的港口为例来进行研究重要基础设施的安全性投资问题。

由于大量的港口之间存在互通运输的情况, 所以可能存在这样一种情况, 即自身没有受到任何灾害, 却由于对方港口陷入机能停止而间接性地受到损害或者反而享受到利益, 我们称之为外部性因素。因此, 在考虑耐震强度或浪潮防护等防灾投资计划的时候, 常常没有考虑到由于自身机能停止而给对方带来的损害或者利益这样的外部性因素问题。本研究, 将把港口防灾投资问题当做相互依存的决策性问题^[2]来考虑, 并用博弈论 (Game theory) 来分析它的构造。此时, 根据两个港口的关系是互助关系还是竞争关系, 社会最优防灾投资计划将不相同。这样一来, 只基于利己动机的均衡解和社会最优解进行比较, 结果显示为互助关系的情况投资过少, 而竞争关系的情况投资过多。本研究探讨为使所有港口都重视自身利益的制度框架, 将提出在互助关系下促进防灾投资, 在竞争关系下抑制防灾投资的方案。

1 现有研究

Auerswald等^[3]就关于相互依存的安全性投资的问题进行了讨论。Heal等^[4]还探讨了能够将属于这个问题范畴的所有问题都包含进来处理的模型。除此之外, 他们^[5]也关注于具代表性的相互依存的安全性投资问题, 即关于飞机携带行李的安全检查问题。但是, 这些研究没有定义从社会角度来看的最优状态, 没有谈到社会最优行动和个人动机行动之间的差距。另外, 关于促进防灾投资的政策, 没有使用具体的公式来说明, 这一点使论述显得不够充分。

2 解析存在互助关系和竞争关系的港口网络的防灾投资行动

以下, 针对四个同时存在互助关系和竞争关系的港口的防灾投资行动进行分析, 提出在互助关系下促进防灾投资, 在竞争关系下抑制防灾投资的方案。具体的, 根据互助关系的港口的防灾投资过少, 而竞争关系的港口防灾投资过大这个事实组建为一个模型, 用博弈论来进行分析并建立最优防灾投资的方案。

2.1 模型的前提条件

在这里, 我们将设定互相之间进行着货物流通的四个港口。四个港口分别为港 1 港 2 港 3 港 4。假设从港 1 到港 4 管理着他们的是不同的国家, 并假定出各个国家对于港口防灾投资的水准。管理港 i ($i = 1, 2, 3, 4$)

的国家防灾投资的水准为可以定为 $k_i (0 \leq k_i \leq 1)$ 。在这里, 关于投资费用 k_i 可以假设出 $\frac{\partial C(k_i)}{\partial k_i} \geq 0, \frac{\partial^2 C(k_i)}{\partial k_i^2} \geq 0, C(\cdot) = \infty, C(\cdot) = 0, C(\cdot) = \infty, C(\cdot) = 0$ 等关系。另外, 港 i 存在一定的因遭受这样那样的灾害而导致机能停止的风险, 如果不进行任何防灾对策, 这个风险的发生率则为 r 。假定根据防灾投资, 发生率为 $(1 - k_i)r$ 。当港 i 受灾的时候, 港口设施将受到损害。国家和港口管理者等承担这个港口的修复费用设为 L 。另外, 港 i 受灾的同时, 和港 $j (j = 1, 2, 3, 4, i \neq j)$ 之间的货物流通停止。由于国际物流的停止, 国家受到损害用 M_{ij} 来表示。并且, 港 i 受灾的时候, 受害者并不止港 i 一个。由于两个港口的交易停止, 港 j 同样受害。这个受害值用 M_{ij} 来表示。港 i 为了把防灾投资费用同被害额期望值的和降为最小, 将决定一个防灾投资水准。这个和将被称为风险成本 (risk cost), 港 i 的风险成本将记作 $RC_i(k_1, k_2, k_3, k_4)$ 。

另外, 在四个港口中, 港 1 被作为货物的输出地。然后经过港 2 和港 3 中的一个, 最终到达港 4。当港 1 机能停止的时候, 不光是港 4, 港 2, 港 3 都将成为连锁扩大的受害者。也就是说, 港 1 和港 2 的关系, 港 1 和港 3 的关系以及港 1 和港 4 的关系都可以说是互助关系。同时港 4 和其他港之间的关系也和港 1 相同。而港 2 和港 3 之间没有网络连接, 他们将被当做竞争关系。具体的, 当港 2 机能停止的时候, 假定由港 1 输出欲经过受灾港口到达港 4 的货物, 可以全部经由另一个港口港 3 来运输。也就是说, 当港 2 机能停止的时候, 港 1 和港 4 将不会受害, 而港 3 反而能获利。港 3 受灾的情况也与此相同。为了简化对这样的状况的考虑和分析, 作出以下假定。

$$\begin{aligned} M_{11} &= M_{44} = M_{14} = M_{41} = M_1, \\ M_{21} &= M_{31} = M_{24} = M_{34} = 0 \\ M_{22} &= M_{12} = M_{42} = M_{33} = M_{13} = M_{43} = M_2, \\ M_{32} &= M_{23} = -M_2 \end{aligned}$$

以上设定均成立。

这样的模式如图 1 所示。

2.2 非合作博弈的防灾投资模型

下面将港 i 的风险成本公式化。港 i 决定了防灾投资水准为 k_i , 则需要支付防灾投资费用 $C(k_i)$ 。在此关注港 1 决定了防灾投资水准, 则陷入机能停止的概率为 $(1 - k_1)r$, 由于自身机能停止造成受害额的期望值则为 $(1 - k_1)r(L + M_1)$ 。另外港 4 机能停止的概率为 $(1 - k_4)r$, 由于港 4 受灾港 1 受到间接损害额为 $(1 - k_4)r(L$

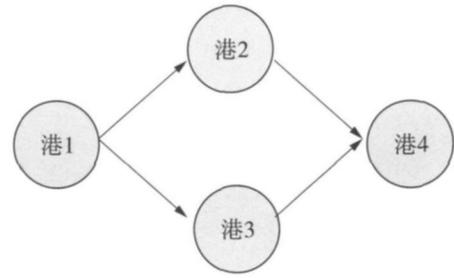


图 1 4 个港口的网络

+ M_1)。对于港 4 完全按照港 1 来考虑则可。

接下来关注港 2 决定了防灾投资水准之后, 陷入机能停止的概率为 $(1 - k_2)r$, 由于自身机能停止造成受害额的期望值则为 $(1 - k_2)r(L + M_2)$ 。另外港 1 和港 4 机能停止的概率分别为 $(1 - k_1)r, (1 - k_4)r$, 所以由于港 1 或者港 4 机能停止而受到的损害额的期望值则分别为 $(1 - k_1)rM_2, (1 - k_4)rM_2$ 。另外, 港 3 机能停止的概率为 $(1 - k_3)r$, 由于港 3 机能停止港 2 获利的期望值为 $(1 - k_3)rM_2$, 可以理解为受到了 $-(1 - k_3)rM_2$ 的损害。对于港 3 完全按照港 2 来考虑则可。

在此, 港 i 的风险成本 $RC_i(k_1, k_2, k_3, k_4)$ 由各个港口的防灾投资战略 $k = (k_1, k_2, k_3, k_4)$ 所决定, 表示为以下的式子。

$$RC_1(k) = C(k_1) + (1 - k_1)r(L + M_1) + (1 - k_4)M_1$$

$$RC_2(k) = C(k_2) + (1 - k_2)r(L + M_2) - (k_1 + k_3 + 1 + k_4)M_2$$

$$RC_3(k) = C(k_3) + (1 - k_3)r(L + M_3) - (k_1 + k_3 + 1 + k_4)M_2$$

$$RC_4(k) = C(k_4) + (1 - k_4)r(L + M_1) + (1 - k_1)M_1$$

此时, 港口 1 防灾投资水准表示为纳什均衡解 (k_1, k_2, k_3, k_4) , 得出以下式子。港口 2, 3, 4 类似。

$$RC_1(k^*, k^*, k^*, k^*) = \arg \min_{k_1} RC_1(k_1, k^*, k^*, k^*)$$

设由此得出的解设为 $(k^*, k^*, k^*, k^*) = (k^*, k^*, k^*, k^*)$ 。满足一切条件的解就是纳什均衡解, 由以下的式子来表示。

$$C(k^*) = r(L + M_1),$$

$$C(k^*) = r(L + M_2),$$

$$C(k^*) = r(L + M_2),$$

$$C(k^*) = r(L + M_1)。$$

2.3 社会最优防灾投资行动模型

在此, 我们将推导出社会最优防灾投资水准。首先来定义从港 1 到港 4 各自承担的社会费用的总和。这时, 社会费用 $SC(k_1, k_2, k_3, k_4) = SC(k)$ 则由以下式子表示。

$$SC(k) = \sum_{j=1}^4 RC_j(k_1, k_2, k_3, k_4)$$

然后, 社会最优防灾投资水准由以下式子导出。

$$\min_{k_1, k_2, k_3, k_4} SC(k)$$

由此得出的解设为 $(k^*, k^*, k^*, k^*) = (k^*, k^*, k^*, k^*)$ 。满足一切条件的解就是社会最优解, 由以下式子来表示。

$$C_1'(k^*) = r(L + 2M_1 + 2M_2), C_2'(k^*) = rL,$$

$$C_3'(k^*) = rL, C_4'(k^*) = r(L + 2M_1 + 2M_2)$$

然后, 和前面的 (k^*, k^*, k^*, k^*) 比较, 得到以下不等式。

$$k^* \leq k^*, k^* \leq k^*, k^* \leq k^*, k^* \leq k^*$$

由此, 和社会最优防灾投资相比, 港 1 和港 4 呈现出过小的防灾投资, 而港 2 和港 3 则进行了过大的防灾投资。也就是说, 港 1 和港 4 作为互助关系, 在互助关系的情况下, 和社会最优防灾投资相比, 他们的投资过少。然而港 2 和港 3 作为竞争关系, 在竞争关系的情况下, 和社会最优防灾投资相比, 他们的投资过大。

2.4 社会最优防灾投资的策略

2.4.1 通过在港口网络内下发援助金来促进防灾投资

首先, 了解了港 1 和港 4 同社会最优防灾投资相比呈现过少投资, 下面考虑的对策将为解决这个问题。为了解决这个问题, 可以考虑这样一种契约, 即港 2 和港 3 向港 1 和港 4 的防灾投资提供援助金。四个港口将达成以下契约。各个港口都决定自己的防灾投资水准, 其中港 1 和港 4 的防灾投资水准分别为 k_1, k_4 。然后港 2 和港 3 分别按照港 1 的防灾投资水准 k_1 来向港 1 支付 $I_1(k_1), I_1(k_1) (\frac{\partial I_1(k_1)}{\partial k_1} \geq 0)$ 的援助金。对于港 4 港 2 和港 3 也同样按照港 4 的防灾投资水准 k_4 来支付 $I_1(k_4), I_1(k_4) (\frac{\partial I_1(k_4)}{\partial k_4} \geq 0)$ 的援助金。同时, 只有在达成契约后各个港口的风险成本都能够降低的情况下, 各个港口才会给出达成契约的承诺, 而必须在四个港口都承诺以后契约才能成立。

总结这一连串的博弈结果, 首先第一阶段, 各个港口将决定是否参加这个契约。然后, 在每个港口都决定参加的情况下, 在第二阶段各个港口才开始决策防灾投资。然后在第三阶段针对港 1 和港 4 的防灾投资水准, 港 2 和港 3 开始支付援助金。最后在第四阶段若遭受灾害, 则称这一顺序为受灾的顺序。如果至少有一个港口没有同意契约, 而就这样下达了防灾投资的决策, 当发生灾害的时候, 也称之为受灾的顺序。

这个契约的样子如图 2 所示。

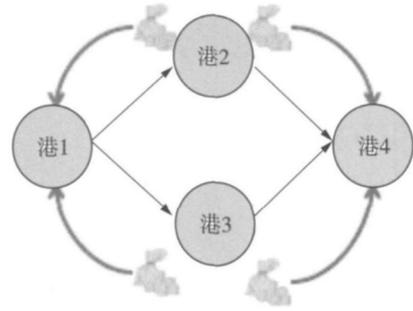


图 2 借助援助金来促进防灾投资

另外, 由于社会最优防灾投资的决策是以两个港口的总成本的和来定义的, 所以即便使用这个契约, 但因为三个港口是在内部形成的金钱移动, 社会最优防灾投资的决策问题也不会发生变化。

这时, 港 i 的风险成本为 $RC_i(k)$ 。在这里, $k = (k_1, k_2, k_3, k_4)$ 。这时, 按照各个港口的防灾投资战略 (k_1, k_2, k_3, k_4) , 各个港口的风险成本如以下式子所示。

$$RC_1(k) = C(k_1) + (1 - k_1)r(L + M_1) + (1 - K_4)M_1 - 2I_1(k_1)$$

$$RC_2(k) = C(k_2) + (1 - k_2)r(L + M_2) + I_1(k_1 + k_4) + (k_3 + 1 - k_1 - k_4)M_2$$

$$RC_3(k) = C(k_3) + (1 - k_3)r(L + M_2) + I_1(k_1 + k_4) + (1 + k_2 - k_1 - k_4)M_2$$

$$RC_4(k) = C(k_4) + (1 - k_4)r(L + M_1) + (1 - K_1)M_1 - 2I_1(k_4)$$

这时, 港口 1 的防灾投资水准用纳什均衡解 (k_1, k_2, k_3, k_4) 来表示如下。港口 2, 3, 4 类似。 $RC_1(k^*, k^*, k^*, k^*) = \arg \min_k RC_1(k_1, k^*, k^*, k^*)$ 由此得到的解设为 $(k^*, k^*, k^*, k^*) = (k^*, k^*, k^*, k^*)$ 。满足一切条件的解就是纳什均衡解, 用以下式子来表示。

$$C(k^*) - 2I_1'(k^*) = r(L + M_1)$$

$$C(k^*) = r(L + M_2) = C(k^*)$$

$$C(k^*) = r(L + M_2) = C(k^*)$$

$$C(k^*) - 2I_1'(k^*) = r(L + M_1)$$

另外, 在至少有一个港口不同意制度的情况, 则和上一章相同, 解为以下的式子所示。

$$(k^*, k^*, k^*, k^*) = (k^*, k^*, k^*, k^*) = k^*$$

两者相比较, 当港 2 和港 3 赞同这个制度, 防灾投资就会被抑制, 而当港 1 和港 4 赞同这个制度, 防灾投资则会加强。

在此, 为表示影响是否赞同这些博弈制度的制约条件式, 得到以下式子。

$$0 \leq I_1(k^*), I_1(k^*)$$

$$RC_1(k^{**}) \leq RC_1(k^*), RC_2(k^{**}) \leq RC_2(k^*)$$

$$RC_3(k^{**}) \leq RC_3(k^*), RC_4(k^{**}) \leq RC_4(k^*)$$

在这些制约条件式中, 第一个表示了准备金 $I_1(k_1)$, $I_4(k_4)$ 必须大于 0 的条件。制约条件式的第二, 第三, 第四和第五个都是为了促使赞同该制度的双利性的制约条件式。但是, 由于港 1 和港 4 的制约条件, 以及港 2 和港 3 的制约条件都是不相等的, 于是得到三个事实。这三个事实经整理, 得到以下式子。

$$0 \leq I_1(k^{**})$$

$$C(k^{**}) - k^{**} r(L + M_1) - 2I_1(k^{**}) \leq C(k^{**}) - k^{**} r(L + M_1) - 2k^{**} rM_2 + 2I_1(k^{**}) \leq -2k^{**} rM_2$$

在此, 如果准备金 $I_1(k_j)$ ($j = 1, 4$) 如以下式子来考虑的话, 上面的制约条件就可以满足。

$$I_1(k_j) = \begin{cases} (k_j - k_{jn}^*) rM_2 & (k_j \geq k_{jn}^*) \\ 0 & (k_j \leq k_{jn}^*) \end{cases}$$

在此, 港 1 和港 4 的风险成本可写为以下式子。

$$RC_1(k_1) = C(k_1) + (1 - k_1) r(L + M_1) + (1 - k_4) M_1 - 2(k_1 - k_{1n}^*) M_2$$

$$RC_4(k_4) = C(k_4) + (1 - k_4) r(L + M_1) + (1 - k_1) M_1 - 2(k_4 - k_{4n}^*) M_2$$

上述式子的最小化问题如下所示。

$$\min_{k_1} RC_1(k_1^*)$$

$$\min_{k_4} RC_4(k_4^*)$$

满足一切条件的解就是纳什均衡解, 这样是接近于社会最优防灾投资水准的。

2.4.2 通过将间接的受害和获利内部化来促进社会最优防灾投资

在达成了前面叙述的关于援助金的契约之后, 更进一步地在政策上去探讨。由于互助关系的港 1 和港 4 同社会最优防灾投资相比较还处于过小防灾投资状况, 有必要就这一点进行探讨。为此, 事先从两个港口收集准备金 I_3 。然后, 由于其他某个港口受灾而受到间接损害的港口, 将能够得到从两个港口收取的准备金 $2I_3$ 。

另外, 由于竞争关系的港 2 和港 3 同社会最优防灾投资相比较处于过大防灾投资状况, 也有必要就这一点进行探讨。为此, 事先从两个港口收集准备金 I_2 。然后, 某个受灾港口将能够得到从两个港口收取的准备金 $2I_2$ 。

总结这一连串的博弈, 在已决定援助金的金额的状况下, 首先, 在第一阶段, 各个港口将决定是否参与这个制度。此时, 我们设定准备金为 I_2, I_3 , 同时也设定在四个港口因参与了这个制度而风险成本降低的范围内, 四

个港口的风险成本总和将尽可能地得到改善。如果不论怎么设定准备金 I_2, I_3 , 都无法使两方港口的风险成本同时降低的话, 就不执行这个制度, 而直接进入第二阶段决策防灾投资, 决定援助金额, 在第三阶段遭受灾害。另外, 如果能够设定那样的准备金, 则执行这个制度, 此后进入第二阶段决策防灾投资, 决定援助金额。然后, 在第三阶段遭受灾害。最后在第四阶段, 分配收集到的准备金, 设定事件按照这样的顺序进行。

这个契约如图 3 所示。

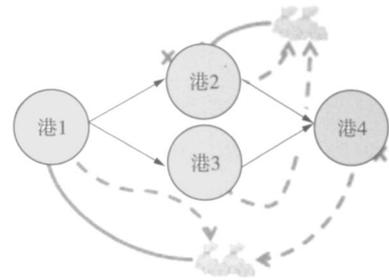


图 3 内部化间接受害或获利的契约

注: 图中虚线的箭头表示事先收集的准备金。
X号表示受灾的港口, 实线箭头表示受灾后收集的
准备金被分配的状态。

由于社会最优防灾投资的决策是用四个港口的总成本来定义的, 而无论是否执行这个契约, 金钱移动都是在四个港口内部进行的, 所以社会最优防灾投资的决策问题是不会有变化的。

此时, 港 i 的风险成本为 $RC_i(I, k)$ 。在此, $I = (I_2, I_3)$, $k = (k_1, k_2, k_3, k_4)$ 。这时, 由各个港口的防灾投资战略 (k_1, k_2, k_3, k_4) 所决定的各个港口的风险成本可表示为以下式子。

$$RC_1(I, k) = C(k_1) + (1 - k_1) r(L + M_1 + I_3) + (1 - k_4) r(M_1 - I_3) - 2(k_1 - k_{1n}^*) M_2$$

$$RC_2(I, k) = C(k_2) + (1 - k_2) r(L + M_2 + I_2) + (1 - k_{1n}^* - k_{4n}^* + k_3) M_2 + I_2 r(1 - k_3)$$

$$RC_3(I, k) = C(k_3) + (1 - k_3) r(L + M_2 + I_2) + (1 - k_{1n}^* - k_{4n}^* + k_2) M_2 + I_2 r(1 - k_2)$$

$$RC_4(I, k) = C(k_4) + (1 - k_4) r(L + M_1 + I_3) + (1 - k_1) r(M_1 - I_3) - 2(k_4 - k_{4n}^*) M_2$$

这时, 港口 1 的防灾投资水准的纳什均衡解 $k^* = (k_1^*, k_2^*, k_3^*, k_4^*)$ 由以下式子表示。港口 2, 3, 4 类似。

$$RC_1(I, k^*) = \arg \min_{k_1} RC_1(I, k_1, k_2^*, k_3^*, k_4^*)$$

满足一切条件的解就是纳什均衡解, 表示为以下式子。

$$C(k^*(I_3)) = r(L + M_1 + 2M_2 + I_3)$$

$$C(k^*(I_2)) = r(L + M_2 - I_2)$$

$$C(k^*(I_2)) = r(L + M_2 - I_2)$$

$$C(k^*(I_3)) = r(L + M_1 + 2M_2 + I_3)$$

另外,当至少有一个港口不同意这个制度的情况,就和加入了援助金的情况相同,如以下式子所示。

$(k^*, k^*, k^*, k^*) = (k^{**}, k^{**}, k^{**}, k^{**}) = k^{**}$ 两者相比较显示出,当港 2 和港 3 赞同这个制度,防灾投资就会被抑制,而当港 1 和港 4 赞同这个制度,防灾投资则会加强。

要表示影响是否赞同这个博弈制度的条件,得到以下模型。

$$\begin{aligned} \min_{I_2, I_3} & \sum_i RC_i(I, k^{**}(I)) \\ \text{s.t.} & 0 \leq I_2, I_3 \\ & RC_1(I, k^{**}(I)) \leq RC_1(Q, k^{**}) \\ & RC_2(I, k^{**}(I)) \leq RC_2(Q, k^{**}) \\ & RC_3(I, k^{**}(I)) \leq RC_3(Q, k^{**}) \\ & RC_4(I, k^{**}(I)) \leq RC_4(Q, k^{**}) \end{aligned}$$

在这些制约条件式中,第一个条件为准备金 I_2, I_3 必须大于 Q 制约条件式第二,第三,第四和第五都是为了促使赞同该制度的双利性的制约条件式。但是,由于港 1 和港 4 的制约条件,以及港 2 和港 3 的制约条件都是不相等的,上述条件可以简化 3 个事实(参照上节)。

满足库恩塔克条件的解为 $(I_2, I_3, \lambda_2, \lambda_3) = (M_2, M_1, Q, 0)$ 。由此可以看出,执行了这个制度能够促进社会最优防灾投资。

3 结束语

针对基础设施的安全性投资问题,我们建立了数理模型和促进社会最优防灾投资的方法。在这些分析中,我们理解到在决策防灾投资之前的阶段收取准备金,并发放给过小投资却间接受害,或者过大投资却直接受害的港口,是有效果的。

参考文献:

- [1] Heal G, Kunreuther H. IDS models of airline security [J]. Journal of Conflict Resolution, 2005, 49(2): 201-217.
- [2] Hutter B, Powers M. Organizational Encounters with Risks [M]. Massachusetts: Cambridge University Press, 2005.
- [3] Auerswald P, Branscomb L, Laporte T, et al. Seeds of Disaster: Roots of Response [M]. New York: Cambridge University Press, 2006.
- [4] Heal G, Kunreuther H. Modeling Interdependent Risks [M]. Risk Analysis, 2007, 27(3): 621-634.
- [5] Heal G, Kunreuther H. Interdependent Security [M]. Journal of Risk and Uncertainty (Special Issue on Terrorist Risks), 2003, 26(2/3): 231-249.

Analysis of Risk Governance in Network of Critical Infrastructure

MA Feng

(Jiangbei Power Supply Bureau of Chongqing Power Company, Chongqing 401147, China)

Abstract We use the gulf port as an example to analyze the risk governance in network of critical infrastructure. We propose model and method of analyzing the relationships among ports by using the game theory to obtain the best disaster prevention investment.

Key words critical infrastructure; network; risk governance