

考虑拖期风险的第四方物流合同设计

王红艳¹, 黄 敏^{1*}, 王洪峰¹, 王兴伟²

(1. 东北大学信息科学与工程学院; 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 辽宁 110819;

2. 东北大学计算机科学与工程学院, 沈阳 辽宁 110819)

摘要: 第四方物流(4PL)为第三方物流(3PL)和客户提供物流交易平台已经成为目前一种主流的物流运作模式. 然而普遍存在的 3PL 配送拖期现象降低了 4PL 的时效性. 因此, 如何有效控制 4PL 的拖期风险已经成为物流管理中一个亟待解决的科学问题. 为了同时反映拖期风险以及对应的拖期概率, 采用要求违反(requirement violation)作为拖期风险度量指标, 进而基于委托代理理论提出 4PL 合同设计机制. 仿真结果表明所设计的合同机制能够激励 3PL 付出更多努力, 在 4PL 和 3PL 都取到保留效用的条件下使 4PL 的拖期风险和拖期发生的最大概率同时最小.

关键词: 第四方物流; 拖期; 风险管理; 合同设计; RV 指标; 委托代理理论

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)06-0773-09

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.06.005

Contract design for the fourth party logistics considering the risk of tardiness

Wang Hongyan¹, Huang Min^{1*}, Wang Hongfeng¹, Wang Xingwei²

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University; State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. College of Computer Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: It is already a common mode for the third party logistics and clients to trade on the 4PL platform. The management of 4PL's tardiness risk has become a scientific problem to be solved, due to the prevalence of 3PL's tardiness which restricts the development of 4PL. Based on principal-agent theory, this paper proposes a 4PL contract design mechanism to measure the magnitudes of the risk of tardiness and the probability of occurrence using the requirement violation (RV) index simultaneously. The simulation results show that the optimal contract can motivate the 3PL to make more efforts to simultaneously minimize the risk of the 4PL and occurrence probability of risk, under the condition that the 4PL obtains the reservation utility.

Key words: fourth party logistics; tardiness; risk management; contract design; requirement violation index; principal-agent theory

1 引 言

在现代物流行业中, 第四方物流是物流供应链的整合者与集成者, 在企业界中得到迅速发展, 并在学术

收稿日期: 2018-07-23; 修订日期: 2019-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金重点国际合作研究资助项目(71620107003); 辽宁省高校创新团队支持计划资助项目(LT2016-007); 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费资助项目(2013ZCX11).

*通信作者

界中得到广泛研究^[1-3]. 例如 2013 年阿里巴巴和三通一达等集团共同组建了菜鸟网络科技有限公司, 其中构建的菜鸟物流市场平台是第四方物流平台, 分别为客户和第三方物流企业(以下简称第三方物流)提供运输服务和货源, 第三方物流进行实际的货物配送活动. 2016 年底, 经过整合, 菜鸟网络推出当日达和次日达等服务, 物流效率得到了极大的提升. 但是, 入驻该平台的第三方物流, 普遍不能按照其在平台上承诺的配送时间送达货物. 有的第三方物流在平台承诺定日达, 但是实际配送时间总是远远超过其承诺的送达时间, 原因是第三方物流在配送货物过程中趋于降低配送成本, 从而造成拖期现象. 在实际运作中第四方物流公司(以下简称为第四方物流)通过合同管理第三方物流, 而第三方物流的配送拖期风险影响了第四方物流的时效性, 因此在第四方物流设计合同时考虑拖期风险是非常关键的. 针对第三方物流的配送拖期现象, 现有文献没有在第四方物流设计合同时刻画出拖期风险.

在第四方物流合同设计方面, 第四方物流与第三方物流构成了典型的委托代理关系, 利用委托代理理论对代理人进行激励是有效的管理方式, 目前已得到广泛研究. Huang 等^[4,5]考虑了不对称成本信息和第三方物流的风险规避等因素, 站在第四方物流的角度分别设计了成本信息对称和成本信息不对称下的最优合同, 激励第三方物流付出更多努力减少配送时间. 王勇等^[6,7]考虑了第四方物流将物流任务分包给多个第三方物流公司时, 由于存在信息不对称现象, 运用委托代理理论研究了第四方物流努力水平对第三方物流努力产出系数的影响. 在第三方物流合同设计方面, 已有许多学者进行了研究. Lim^[8]研究了当第三方物流服务供应商可能有不同的服务质量和成本时, 客户设计合同揭露第三方物流服务供应商的真实类型. Wu 等^[9]考虑经销商外包采购任务给第三方物流服务提供商, 当经销商和第三方物流服务提供商分别作为领导者和追随者或者双方渠道权利相同等三种情况下, 分别设计三种合同研究权利结构对双方的决策行为和渠道性能的影响. Cai 等^[10]考虑了生产商通过第三方物流服务供应商向经销商供应新鲜产品, 在生产商和分销商之间设计了批发—市场清算合同, 在生产商和第三方物流服务提供商之间设计了批发价一折扣共享合同, 结果表明两种合同能够消除三级供应链中的双重边际效应. Wang 等^[11]针对运输过程中的中断风险, 设计了两种线性合同, 研究了运输保险溢价怎样影响运输前的申报值和运输后的赔偿问题. Gong 等^[12]认为第三方物流服务提供商的信息技术能力对制造商来说非常重要, 分别在四种合同结构下分析了第三方物流服务提供商的信息技术投资和它对供应链利润的影响.

在物流运作风险管理方面, Shang 等^[13]认为物流领域中一个关键的性能指标是运输风险, 定义为实际到达时间与计划到达时间的差值, 并运用航空公司半年的航空货运数据评估和预测运输风险. Liu 等^[14]研究了在大规模定制服务环境中, 功能性物流服务提供商的操作时间不确定的调度模型, 并最小化每个服务过程中预定时间和实际时间之间的差值. Jaillet 等^[15]研究了不确定旅行时间下的路径优化问题, 选择了违反软时间窗要求程度最小的路径. Liu 等^[16]建立了医院日常药品管理物流运作的医药物流规划模型, 基于服务弧的成本结构和服务时间的分配, 提出并研究了惩罚权重调整的机制, 以找到有效的惩罚权重. Liu 等^[17]探讨了功能性物流服务提供商的操作时间窗和客户要求时间对调度决策的影响. Heckmann 等^[18]对供应链风险进行综述, 认为基于时间特征的风险描述大多是关于供应链受到事件影响之后的调整, 很少涉及到供应链决策和风险管理. 张浩等^[19]对冷链物流各个运作过程的风险进行分析, 设计了冷链物流风险评估指标体系, 提高了冷链物流风险评估的准确性. Choi 等^[20]对物流系统的风险管理进行了综述, 其中在物流服务风险管理方面, 一部分研究集中在利用鲁棒策略提高物流服务的可靠性, 还有一部分研究集中于在物流服务供应链中达到风险管理和协调.

上述文献分别从物流合同设计和物流运作风险管理方面进行了研究, 但是没有在合同设计时同时刻画出拖期风险. 本文从运作风险管理的角度出发, 应用委托代理理论, 对由第四方物流, 第三方物流和客户所构成的系统中普遍存在的拖期现象进行研究. 主要是在第四方物流合同设计时应用要求违反(requirement violation, RV) 指标度量货物配送过程中的拖期风险(实际配送时间超过截止日期的程度), 该指标不仅可以度量配送时间违反截止日期的大小, 还可以度量拖期现象发生的最大概率^[15,21,22]. 进而本文认为货物配送

时间受到第三方物流努力水平的影响,并在第四方物流的期望效用满足保留效用的条件下,设计了最小化第四方物流拖期风险的合同,激励3PL努力工作为客户提供更准时的物流配送服务。

2 考虑拖期风险的合同模型

2.1 问题描述

考虑模型由一个4PL、一个3PL和一个客户组成,客户在4PL平台找到3PL进行货物配送.决策时序图如图1所示.假设从出发地到目的地配送货物的费用是 B ,3PL承诺的配送截止日期是 τ .3PL的实际配送时间受到许多因素(例如天气和交通状况,选择空运还是陆运,公司是否进行有序管理等)的影响是随机变量.实际配送时间用 $\tilde{t}$ 表示,是3PL努力水平 e 的函数, $\tilde{t} = a - be + \epsilon$, ϵ 为随机变量, a 为3PL常规配送时间, b 为3PL努力产出系数(单位努力节省的时间).

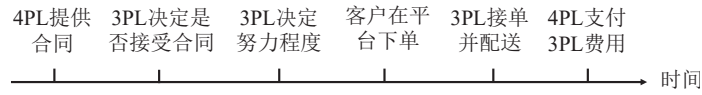


图1 决策时序图

Fig. 1 The sequence of events

模型结构如图2所示.客户给4PL固定支付 B ,若发生拖期,客户针对拖期时长(即超过截止日期的时间长度,用 $[\tilde{t} - \tau]^+$ 表示)对4PL进行相应惩罚 $\rho[\tilde{t} - \tau]^+$, ρ 是单位时间拖期罚款.另外,4PL支付3PL固定费用 μ 和与拖期时长有关的惩罚 $\beta\rho[\tilde{t} - \tau]^+$, β 是3PL承担的惩罚系数, $\beta \geq 0$. ke^2 是3PL的努力成本,满足边际成本递增规律, k 是3PL的努力成本系数.努力水平越高,3PL付出的努力成本也越多,与此同时配送时间越短.因此,4PL需要设计最优的配送合同,激励3PL努力工作,从而控制4PL的拖期风险.4PL给3PL的固定支付 μ 和3PL承担的惩罚系数 β 是需要设计的合同参数。

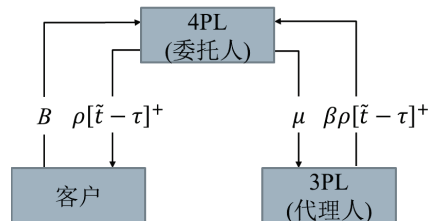


图2 有拖期惩罚的合同模型

Fig. 2 Contract model with tardiness penalty

2.2 合同模型的建立

由问题描述可知,3PL和4PL的利润函数分别为

$$\pi(\mu, \beta, e) = \mu - \beta\rho[\tilde{t} - \tau]^+ - ke^2, \quad (1)$$

$$\Pi(\mu, \beta, e) = B - \mu + (\beta - 1)\rho[\tilde{t} - \tau]^+. \quad (2)$$

假设3PL和4PL都是风险中性的,期望效用等于其期望收益;随机变量 ϵ 服从均匀分布, $\epsilon \sim U(-m, m)$.则3PL和4PL的期望效用函数分别为

$$u(\mu, \beta, e) = E[\pi] = \mu - \frac{\beta\rho(a - be - \tau + m)^2}{4m} - ke^2, \quad (3)$$

$$U(\mu, \beta, e) = E[\Pi] = B - \mu + \frac{(\beta - 1)\rho(a - be - \tau + m)^2}{4m}. \quad (4)$$

Jaillet 等^[15]提出了要求违反(requirement violation, RV)指标, 具有可以同时量化随机量违反要求的风险大小和违反发生的最大概率的优势, 因此本文采用RV指标度量 4PL 的拖期风险. Jaillet 等是受到 Aumann 等的风险量化方法的启发而提出 RV 指标. Aumann 等^[21]认为具有更小风险规避度的人能够接受更大风险的随机量, 从而常数绝对风险规避人的绝对风险规避度的倒数可以度量随机量的风险. 根据 RV 指标, 本文的 4PL 拖期风险是指实际配送时间超过截止日期的程度, 即违反要求的程度. 超过截止日期程度越大, 4PL 的拖期风险越大.

对于给定的截止日期 τ , RV 指标定义为

$$\psi = \min \{r \geq 0 | C_r(\tilde{t}) \leq \tau\}, \quad (5)$$

其中 $C_r(\tilde{t})$ 是负指数效用下随机变量 $\tilde{t}$ 的确定性等值, 表达式为

$$C_r(\tilde{t}) = \begin{cases} r \ln E[\exp(\tilde{t}/r)], & \text{若 } r > 0 \\ \lim_{\delta \rightarrow 0} C_\delta(\tilde{t}), & \text{若 } r = 0, \end{cases} \quad (6)$$

$E[\cdot]$ 代表随机变量的期望值, r 是风险容忍度.

为了最小化 4PL 的拖期风险, 本文引入 RV 指标对其进行度量, 并建立如下模型

$$\text{Min } r, \quad (7)$$

s.t.

$$C_r(\tilde{t}) \leq \tau, \quad (8)$$

$$u(\mu, \beta, e) \geq R_T, \quad (9)$$

$$e^* = \arg \max_e u(\mu, \beta, e), \quad (10)$$

$$U(\mu, \beta, e) \geq R_F, \quad (11)$$

$$\mu, \beta, e, r \geq 0, \quad (12)$$

其中约束(9)是 3PL 的参与约束. 若 3PL 的保留效用是 R_T , 当其期望效用不小于 R_T 时, 3PL 将接受合同. 约束(10)是道德风险约束, 表示 3PL 将付出使自己获得最大期望效用的努力水平 e^* , 代表了 3PL 的决策. 约束(11)表示 4PL 的期望效用要大于其保留效用 R_F .

2.3 模型分析

4PL 和 3PL 之间的关系是委托人和代理人的关系, 4PL 先提供合同参数, 3PL 再由此决定自己的努力水平. 根据逆推法, 求解时先找到 3PL 对合同参数的反应函数, 即先求解 3PL 的努力水平 e^* , 然后代入到 4PL 的决策函数中求解合同参数 μ^* 和 β^* . 由式(10), 利用一阶条件可得 3PL 的最优努力水平.

引理 1 3PL 的最优努力水平为

$$e^* = \frac{b\rho\beta(a+m-\tau)}{b^2\rho\beta+4km},$$

其中 $a+m-\tau > 0$, $a+m$ 表示可能的货物最长配送时间.

将 $e^* = \frac{b\rho\beta(a+m-\tau)}{b^2\rho\beta+4km}$ 分别代入 3PL 和 4PL 的期望效用函数式(3)和式(4)中, 则

$$u(\mu, \beta) = \mu - \frac{k\rho(a+m-\tau)^2\beta}{b^2\rho\beta+4km}, \quad (13)$$

$$U(\mu, \beta) = B - \mu + \frac{4k^2m\rho(a+m-\tau)^2(\beta-1)}{(b^2\rho\beta+4km)^2}. \quad (14)$$

当随机变量 $\tilde{t}$ 的概率分布已知, $C_r(\tilde{t})$ 可以通过矩母函数计算, 有下列结论.

引理 2 当 $\tilde{t} \sim U(a - be - m, a - be + m)$ 时, $C_r(\tilde{t}) = a - be - m + r \ln((\exp(2m/r) - 1)/(2m/r))$, $C_r(\tilde{t})$ 关于 r 单调递减.

证明见附录 1.

定理 1 当 $b^2(B - R_T - R_F) - k(a + m - \tau)^2 < 0$ 且 $(4mk + b^2\rho)(B - R_T - R_F) - k\rho(a + m - \tau)^2 > 0$ 时, 最小化 4PL 的拖期风险, 得 4PL 对 3PL 的最优惩罚系数为

$$\beta^* = \frac{2k(2mb(B - R_T - R_F) + (a + m - \tau)\sqrt{m((4mk + b^2\rho)(B - R_T - R_F) - \rho k(a + m - \tau)^2)})}{b\rho k(a + m - \tau)^2 - b^2(B - R_T - R_F)},$$

4PL 对 3PL 的最优固定支付为

$$\mu^* = R_T + \frac{k\rho(a + m - \tau)^2\beta^*}{b^2\rho\beta^* + 4km} = B - R_F + \frac{4k^2m\rho(a + m - \tau)^2(\beta^* - 1)}{(b^2\rho\beta^* + 4km)^2},$$

3PL 的最优努力水平为

$$e^* = \frac{2mb(B - R_T - R_F) + (a + m - \tau)\sqrt{m((4mk + b^2\rho)(B - R_T - R_F) - \rho k(a + m - \tau)^2)}}{2mk(B - R_T - R_F) + b\sqrt{m((4mk + b^2\rho)(B - R_T - R_F) - \rho k(a + m - \tau)^2)}},$$

3PL 和 4PL 的最优期望效用分别为 $u = R_T, U = R_F$.

求解过程见附录 2.

定理 1 给出了 4PL 的拖期风险最小时, 4PL 给 3PL 的最优惩罚系数和固定支付, 以及在该最优合同下, 3PL 选择付出的努力水平. 最优合同下 4PL 和 3PL 都取到保留效用, 其余支付全部用于降低拖期风险.

由定理 1 中最优的 3PL 努力水平可得下列结论.

推论 1 最优合同下, 3PL 的最优努力水平关于惩罚系数 β 和努力产出系数 b 是单调递增的, 关于单位时间拖期罚款 ρ , 常规配送时间 a 和 3PL 成本系数 k 是单调递减的.

定理 2 最优合同下 4PL 的拖期风险最小, 拖期风险的隐式表达为

$$r^* \ln \frac{\exp(2m/r^*) - 1}{2m/r^*} = 2m - \frac{4km(a + m - \tau)}{b^2\rho\beta^* + 4km}.$$

由定理 2 可以得到推论 2.

推论 2 最优合同下, 4PL 的拖期风险关于惩罚系数 β , 3PL 的努力水平 e 和 3PL 的努力产出系数 b 是单调递减的; 关于单位时间拖期罚款 ρ , 3PL 的努力成本系数 k 和常规配送时间 a 是单调递增的.

由推论 1 和推论 2 可知, 4PL 的拖期风险总是随着 3PL 努力水平的增加而降低. 4PL 可以通过增加惩罚系数来激励 3PL 更努力从而减少配送时间, 降低配送拖期风险. 另外 4PL 可以通过选择能力强(努力产出系数 b 大, 常规配送时间 a 小, 努力成本系数 k 小)的 3PL 配送货物来降低拖期风险.

RV 指标不仅可以度量风险大小, 而且可以度量拖期发生的最大概率, 有下列结论.

定理 3 对于 RV 指标 ψ , 发生拖期时长大于 θ 的概率满足^[15]

$$p(\tilde{t} \geq \tau + \theta) \leq \exp(-\theta/\psi), \quad \forall \theta > 0.$$

上式指出了发生拖期时长大于 θ 的最大概率. 可以看出, 给定 θ , 当 RV 指标 ψ 较小时, 发生拖期时长大于 θ 的最大概率 $\exp(-\theta/\psi)$ 较小; 当 RV 指标 ψ 一定时, 随着拖期时长 θ 增大, 发生拖期时长大于 θ 的最大概率 $\exp(-\theta/\psi)$ 逐渐减小.

3 算例分析

为了直观了解 4PL 拖期风险, 4PL 和 3PL 期望效用随着惩罚系数和参数的变化趋势, 进行了数值研究.

模型参数设置为 $k = 8, b = 4, \tau = 6, a = 7, m = 3, B = 35, R_F = 20, R_T = 10$. 若不作特殊说明, 后文均以该参数进行数值计算. 固定其他参数不变, 当 $\rho = 4$ 时, 得到惩罚系数对 4PL 拖期风险的影响如图 3 所示.

从图 3 可以看出, 随着惩罚系数 β 的增加, 4PL 的拖期风险单调递减, 因此 β 取值越大 4PL 的拖期风险越小.

固定其它参数不变, 当 $\rho = 4$ 时, 得到惩罚系数对 4PL 和 3PL 期望效用的影响如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 随着惩罚系数 β 的增加, 4PL 和 3PL 的期望效用单调递减.

结合图 3 和图 4 可以看出, 拖期风险不能一直减小, 当减小到 4PL 和 3PL 的保留效用时, 所取到的 β 是最优的惩罚系数, 对应的拖期风险是最小的拖期风险.

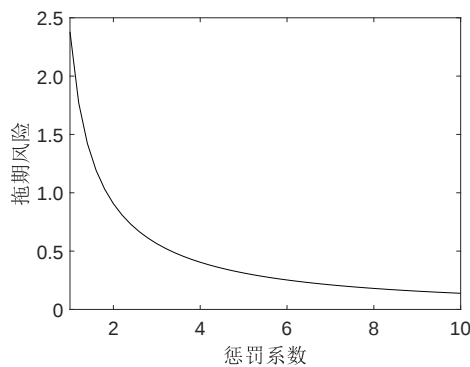


图 3 惩罚系数对 4PL 拖期风险的影响

Fig. 3 The effect of penalty coefficient on 4PL's

tardiness risk

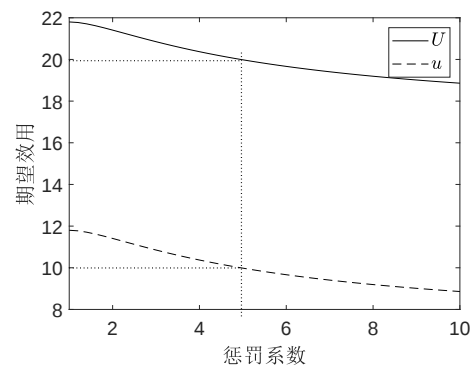


图 4 惩罚系数对 4PL 和 3PL 的期望效用的影响

Fig. 4 The effect of penalty coefficient on 4PL's

and 3PL's expected utility

固定其他参数不变, 分别令 $\rho = 4, 6$, 得到惩罚系数对 4PL 和 3PL 的期望效用的影响如图 5 所示.

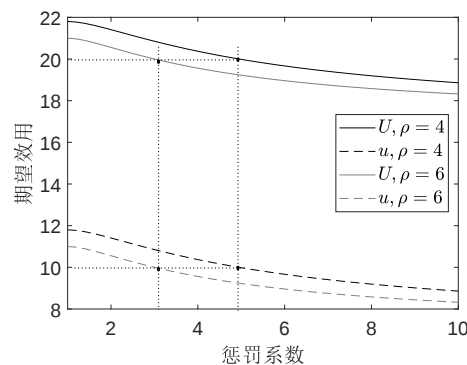


图 5 惩罚系数对 4PL 和 3PL 的期望效用的影响

Fig. 5 The effect of penalty coefficient on 4PL's and 3PL's expected utility

从图 5 可以看出, 当单位时间拖期罚款 ρ 从 4 增加到 6 时, 4PL 和 3PL 的期望效用都是减小的. 另外, $\rho = 6$ 时 4PL 和 3PL 保留效用对应的惩罚系数分别大于 $\rho = 4$ 时 4PL 和 3PL 保留效用对应的惩罚系数, 因此 $\rho = 4$ 时的拖期风险大于 $\rho = 6$ 时的拖期风险. 这是因为较大的最优惩罚系数对应较小的最优拖期风险.

本文设计的合同最小化了拖期风险, 同时也控制了拖期发生的最大概率. 为了直观表达拖期风险和拖期发生概率之间的关系, 当 RV 指标 ψ 分别是 3.5, 1.5 和 0.5 时, 给出了拖期发生的最大概率随着拖期时长变化的曲线如图 6 所示.

可以看出, 当拖期的时间长度一定时, 拖期风险是 3.5 时拖期发生的最大概率大于拖期风险是 0.5 时拖期发生的最大概率, 即较小的拖期风险对应着较小的拖期风险发生的最大概率. 在合同中, 较小的拖期风险对应较大的惩罚系数. 因此, 所设计的合同在最小化 4PL 的拖期风险的同时, 可以最小化 4PL 拖期发生的最大概率.

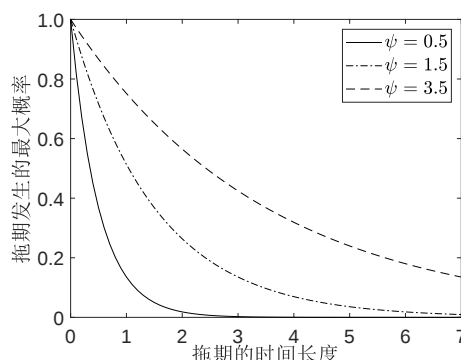


图6 拖期发生的最大概率随着拖期时长的变化

Fig. 6 The effect of the magnitudes of tardiness on maximum probability

4 结束语

在现代物流体系中, 第四方物流是通过合同与第三方物流建立合作关系, 第三方物流进行实际货物配送, 而配送时间是整个物流管理体系的关键指标. 本文针对第三方物流在配送货物时普遍存在的拖期现象, 从第四方物流的角度, 以委托代理理论为指导, 对第四方物流和第三方物流之间的最优机制设计进行了探索. 为了同时控制拖期风险和拖期发生的最大概率, 引入 RV 指标度量拖期风险, 设计了以拖期风险最小化为目标, 以固定支付和拖期惩罚系数为合同参数的合同模型, 并对模型进行求解得到最优合同. 结果表明最优的固定支付和拖期惩罚系数可以激励第三方物流努力配送, 使拖期风险得到有效控制, 同时降低了拖期发生的最大概率. 本文假设了第四方物流和第三方物流是风险中性的, 以及第四方物流可以知道第三方物流的成本信息. 以上假设是对现实情景的简化, 对上述两个假设的拓展是未来进一步研究的方向.

参考文献:

- [1] Cui Y, Huang M, Yang S, et al. Fourth party logistics routing problem model with fuzzy duration time and cost discount. *Knowledge-Based Systems*, 2013, 50: 14–24.
- [2] Huang M, Cui Y, Yang S, et al. Fourth party logistics routing problem with fuzzy duration time. *International Journal of Production Economics*, 2013, 145(1): 107–116.
- [3] Huang M, Ren L, Lee L H, et al. 4PL routing optimization under emergency conditions. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 89: 126–133.
- [4] 徒 君, 黄 敏. 不对称信息下第四方物流配送时间契约设计. *控制与决策*, 2016, 31(8): 1429–1434.
Tu J, Huang M. Delivery time contract design under asymmetric information for fourth party logistics. *Control and Decision*, 2016, 31(8): 1429–1434. (in Chinese)
- [5] Huang M, Tu J, Xu C. Delivery time contract design in outsourcing logistics: A fourth party logistics perspective. *International Information Institute. Information*, 2013, 16(7): 4577–4593.
- [6] 王 勇, 罗富碧, 林 略. 第四方物流努力水平影响的物流分包激励机制研究. *中国管理科学*, 2006, 14(2): 136–140.
Wang Y, Luo F B, Lin L. Fourth party logistics' efforts-influenced subcontract incentive mechanism. *Chinese Journal of Management Science*, 2006, 14(2): 136–140. (in Chinese)
- [7] 王 勇, 杨 金, 廖 冰. 第四方物流作业分包的合同设计. *系统工程学报*, 2007, 22(5): 520–524.
Wang Y, Yang J, Liao B. Contract design of job subcontracting for fourth party logistics. *Journal of Systems Engineering*, 2007, 22(5): 520–524. (in Chinese)
- [8] Lim W S. A lemons market? An incentive scheme to induce truth-telling in third party logistics providers. *European Journal of Operational Research*, 2000, 125(3): 519–525.
- [9] Wu Q, Mu Y, Feng Y. Coordinating contracts for fresh product outsourcing logistics channels with power structures. *International Journal of Production Economics*, 2015, 160: 94–105.

- [10] Cai X, Chen J, Xiao Y, et al. Fresh-product supply chain management with logistics outsourcing. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2013, 41(4): 752–765.
- [11] Wang H, Tan J, Guo S, et al. High-value transportation disruption risk management: Shipment insurance with declared value. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2018, 109: 293–310.
- [12] Gong F, Kung D S, Zeng T. The impact of different contract structures on IT investment in logistics outsourcing. *International Journal of Production Economics*, 2018, 195: 158–167.
- [13] Shang Y, Dunson D, Song J S. Exploiting big data in logistics risk assessment via Bayesian nonparametrics. *Operations Research*, 2017, 65(6): 1574–1588.
- [14] Liu W, Wang Q, Mao Q, et al. A scheduling model of logistics service supply chain based on the mass customization service and uncertainty of FLSP's operation time. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 83: 189–215.
- [15] Jaillet P, Qi J, Sim M. Routing optimization under uncertainty. *Operations Research*, 2016, 64(1): 186–200.
- [16] Liu M, Zhang Z, Zhang D. Logistics planning for hospital pharmacy trusteeship under a hybrid of uncertainties. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 101: 201–215.
- [17] Liu W, Yang Y, Wang S, et al. A scheduling model of logistics service supply chain based on the time windows of the FLSP's operation and customer requirement. *Annals of Operations Research*, 2017, 257(1/2): 183–206.
- [18] Heckmann I, Comes T, Nickel S. A critical review on supply chain risk-definition, measure and modeling. *Omega: The International Journal of Management Science*, 2015, 52: 119–132.
- [19] 张浩, 邱斌, 唐孟娇, 等. 基于改进突变级数法的农产品冷链物流风险评估模型. *系统工程学报*, 2018, 33(3): 412–421.
Zhang H, Qiu B, Tang M J, et al. Risk assessment model of agricultural products cold chain logistics based on the improved catastrophe progression method. *Journal of Systems Engineering*, 2018, 33(3): 412–421. (in Chinese)
- [20] Choi T M, Chiu C H, Chan H K. Risk management of logistics systems. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 90: 1–6.
- [21] Aumann R J, Serrano R. An economic index of riskiness. *Journal of Political Economy*, 2008, 116(5): 810–836.
- [22] Adulyasak Y, Jaillet P. Models and algorithms for stochastic and robust vehicle routing with deadlines. *Transportation Science*, 2015, 50(2): 608–626.
- [23] Laffont J J, Martimort D. *The Theory of Incentives: The Principal-agent Model*. Princeton: Princeton University Press, 2009.

作者简介:

王红艳(1990—), 女, 山东菏泽人, 博士生, 研究方向: 物流与供应链风险管理, Email: amy_wang901@163.com;

黄敏(1968—), 女, 福建长乐人, 博士, 教授, 研究方向: 物流与供应链管理, 制造与服务系统建模与优化, 风险管理, 行为运作管理, 数据解析与机器学习, 智能计算等, Email: mhuang@mail.neu.edu.cn;

王洪峰(1979—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授, 研究方向: 进化计算, 人工智能, 物流与供应链管理等, Email: hfwang@mail.neu.edu.cn;

王兴伟(1968—), 男, 辽宁盖县人, 博士, 教授, 研究方向: 下一代互联网, 光互联网和移动互联网等, Email: wangxw@mail.neu.edu.cn.

附录1 引理2的证明

令 $f(r) = r \ln \frac{\exp(2m/r) - 1}{2m/r}$, 证明 $f(r)$ 关于 r 在 $r > 0$ 时单调递减, 则证明下式成立即可.

$$f'(r) = \ln \frac{\exp(2m/r) - 1}{2m/r} - \frac{\exp(2m/r)(2m/r)}{\exp(2m/r) - 1} + 1 < 0.$$

令 $x = 2m/r$, $y(x) = \ln \frac{\exp(x) - 1}{x} - \frac{x}{\exp(x) - 1} - x + 1$. 证明 $f'(r) < 0$, 亦即证明 $y(x) < 0$.

$$y'(x) = \frac{(x\sqrt{\exp(x)} - \exp(x) + 1)(x\sqrt{\exp(x)} + \exp(x) - 1)}{x(\exp(x) - 1)^2}.$$

因为 $x > 0$ 时, $x\sqrt{\exp(x)} + \exp(x) - 1 > 0$, 故 $x\sqrt{\exp(x)} - \exp(x) + 1$ 决定 $y'(x)$ 是否大于 0.

$$\text{令 } z(x) = x\sqrt{\exp(x)} - \exp(x) + 1,$$

$$z'(x) = \sqrt{\exp(x)}(1 + 0.5x - \sqrt{\exp(x)}).$$

$$\text{令 } v(x) = 1 + 0.5x - \sqrt{\exp(x)},$$

$$v'(x) = 0.5 - 0.5\sqrt{\exp(x)}.$$

$x > 0$ 时, $v'(x) < 0$, $v(x)$ 单调递减, $v(0) = 0$, 所以 $v(x) < 0$, 即 $z'(x) < 0$. 因为 $z(0) = 0$, 所以 $z(x) < 0$, 即 $y'(x) < 0$. 又因为 $\lim_{x \rightarrow 0} (\ln \frac{\exp(x)-1}{x} + \frac{x}{\exp(x)-1} - x + 1) = 0$, 所以 $y(x) < 0$, 即 $f'(r) < 0$, 所以 $f(r)$ 在 $r > 0$ 时单调递减. 证毕.

附录2 定理1的求解

因为 $E[\tilde{t}-\tau]^+ = \frac{(a-be-\tau+m)^2}{4m}$, 3PL 和 4PL 的期望效用 $u(\mu, \beta, e)$ 和 $U(\mu, \beta, e)$ 可以分别表示出来. 对 $u(\mu, \beta, e)$ 求一阶导数, 得到在合同 (μ, β) 下, 3PL 的最优努力程度 e^* . 将 e^* 代入模型, 则模型可以转化为只包含 μ 和 β 两个自变量的形式

Min r ,

s.t.

$$\mu - \frac{k\rho(a+m-\tau)^2\beta}{b^2\rho\beta+4km} \geq R_T,$$

$$B - \mu - \frac{4k^2m\rho(a+m-\tau)^2(\beta-1)}{(b^2\rho\beta+4km)^2} \geq R_F,$$

$$r \ln \frac{\exp(2m/r)-1}{2m/r} \leq 2m - \frac{4km(a-\tau+m)}{b^2\rho\beta+4km},$$

$$\mu, \beta, r \geq 0.$$

由 $r \ln \frac{\exp(2m/r)-1}{2m/r} \leq 2m - \frac{4km(a-\tau+m)}{b^2\rho\beta+4km}$, 令 $f(r) = r \ln \frac{\exp(2m/r)-1}{2m/r}$, $g(\beta) = 2m - \frac{4km(a-\tau+m)}{b^2\rho\beta+4km}$. $f(r)$ 关于 r 单调递减, 求解 r 的最小值是求 $f(r)$ 的最大值. 因为 $\max f(r) \leq 2m - \frac{4km(a-\tau+m)}{b^2\rho\beta+4km}$, 所以求 $f(r)$ 的最大值是求最大的 $g(\beta)$. 又因为 $g'(\beta) > 0$, 求 $g(\beta)$ 的最大值即是求 β 的最大值. 由约束 $\mu - \frac{k\rho(a+m-\tau)^2\beta}{b^2\rho\beta+4km} \geq R_T$ 和 $B - \mu - \frac{4k^2m\rho(a+m-\tau)^2(\beta-1)}{(b^2\rho\beta+4km)^2} \geq R_F$ 求 β 的最大值, 两式相加消去 μ 得

$$b^2\rho^2((B-R_T-R_F)b^2-k(a-\tau+m)^2)\beta^2+8kmb^2\rho(B-R_T-R_F)\beta+16k^2m^2(B-R_T-R_F)-4k^2m\rho(a-\tau+m)^2 \geq 0$$

令 $h(\beta) = b^2\rho^2((B-R_T-R_F)b^2-k(a-\tau+m)^2)\beta^2+8kmb^2\rho(B-R_T-R_F)\beta+16k^2m^2(B-R_T-R_F)-4k^2m\rho(a-\tau+m)^2$. $h(\beta)$ 关于 β 先增后减, $h(\beta)$ 抛物线开口向下, $(B-R_T-R_F)b^2-k(a-\tau+m)^2 < 0$. 又因为对称轴 $\frac{-4kmb^2\rho(B-R_T-R_F)}{(B-R_T-R_F)b^2-k(a-\tau+m)^2} > 0$, 判别式 $16k^2mb^2\rho^2(a-\tau+m)^2((B-R_T-R_F)(b^2\rho+4km)-k\rho(a-\tau+m)^2) \geq 0$, 则 β 最大值在 $h(\beta) = 0$ 右零点取到, 因此

$$\beta^* = \frac{2k(-2mb(B-R_T-R_F)-(a-\tau+m)\sqrt{m((4mk+b^2\rho)(B-R_T-R_F)-\rho k(a-\tau+m)^2)})}{b\rho(b^2(B-R_T-R_F)-k(a-\tau+m)^2)}$$

由 $h(\beta) = 0$, 得

$$\mu^* = R_T + \frac{k\rho(a+m-\tau)^2\beta^*}{b^2\rho\beta^*+4km} = B - R_F + \frac{4k^2m\rho(a+m-\tau)^2(\beta^*-1)}{(b^2\rho\beta^*+4km)^2}$$

由 β^* 和 μ^* 得到 3PL 的最优期望效用是 $u = R_T$, 4PL 的最优期望效用是 $U = R_F$.

证毕.