

控制与决策

Control and Decision

考虑追责机制的复杂武器装备交付链式多任务激励模型

张叶卉, 朱建军

引用本文:

张叶卉, 朱建军. 考虑追责机制的复杂武器装备交付链式多任务激励模型[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 301–310.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0655>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

考虑企业社会责任和公平偏好的绿色供应链决策

Green supply chain considering fairness preference and corporate social responsibility

控制与决策. 2021, 36(7): 1743–1753 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1102>

考虑供应商技术截断的“主-供”合作机制演化博弈分析

Evolutionary game analysis of “main manufacturer–supplier” collaboration mechanism considering supplier's technology truncation

控制与决策. 2021, 36(10): 2547–2552 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1678>

信息非对称下考虑制造商回收行为的闭环供应链协调

Coordination of closed supply chain under asymmetric information considering manufacturer's recycling behavior

控制与决策. 2021, 36(7): 1723–1731 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1657>

考虑扶贫偏好的三级农产品供应链决策及协调

Decision making and contract coordination of three-level agricultural products supply chain with consumer poverty alleviation preference

控制与决策. 2020, 35(11): 2589–2598 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0201>

损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion

控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

考虑追责机制的复杂武器装备交付链式多任务激励模型

张叶卉, 朱建军[†]

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 2111061)

摘要: 复杂武器装备的交付效率直接影响国防战斗力的转化, 为提高交付效率, 基于复杂武器装备交付问题处理的多任务特点, 建立考虑追责机制的交付链式激励契约模型, 探究在信息对称和信息不对称两种情况下追责机制、公平偏好、风险类型、依赖等因素对激励契约的影响. 研究表明: 公平偏好因素对各技术业务部门的努力水平有明显激励作用; 代理人在相对重要且成本系数低的交付任务上投入了更多的努力; 部门的综合技术水平、依赖系数、公平偏好对最优激励契约的影响与其风险偏好类型以及风险偏好程度相关; 追责机制在一定程度上能够提高整体努力水平和收益分成比例, 但是过高的追责能力水平反而会降低交付积极性. 研究结论可为复杂装备交付环节激励契约设计提供理论支撑和依据.

关键词: 复杂武器装备; 多任务; 交付; 委托代理; 激励契约; 追责机制

中图分类号: F224; F284 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0655

引用格式: 张叶卉, 朱建军. 考虑追责机制的复杂武器装备交付链式多任务激励模型[J]. 控制与决策, 2024, 39(1): 301-310.

A chain multi-task incentive model for complex weapon equipment delivery based on accountability mechanism

ZHANG Ye-hui, ZHU Jian-jun[†]

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The delivery efficiency of complex weapon equipment directly affects the transformation of national defense combat effectiveness. In order to improve the delivery efficiency, based on the multi-task characteristics of the complex weapon equipment delivery problem, we establish the delivery chain incentive contract model under accountability mechanism to explore the impact of accountability mechanism, equity, risk, dependence and other factors on incentive contract under information asymmetry and information asymmetry. It shows that fair factors have obvious incentive effects on the departments' effort level and the agents invest more efforts on relatively important and low-cost tasks. The comprehensive technical level, the fair preferences, the dependency coefficient have an impact on the optimal incentive contract, and the optimal incentive contract is affected by its risk type and degree. The accountability mechanisms can improve the overall effort level and the proportion of the income in certain conditions. The research conclusion can provide theoretical support for complex weapon equipment delivery.

Keywords: complex weapon equipment; multi-task; delivery; principal-agent; incentive contract; accountability mechanisms

0 引言

复杂武器装备制造代表国家科技工业的最高发展水平和国防安全威慑力, 其交付环节管理是生产全流程的“最后一公里”, 直接影响着产品交付效率和客户满意度. 据公开资料显示, 航空武器装备的复杂特性和高质量需求使其交付流程复杂且质量问题频出,

多部门协调处理时存在激励动力不足的现象, 导致该领域长期存在交付周期长和满意度低的问题. 复杂武器装备交付是一个多任务、多主体的决策过程, 持续加快交付进程是深化武器装备现代化管理体系建设的重点问题^[1].

交付管理是企业现代化管理的重要组成部分, 华

收稿日期: 2022-04-19; 录用日期: 2022-08-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(72071106).

责任编委: 李登峰.

[†]通讯作者. E-mail: zhujianjun@nuaa.edu.cn.

*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

为、中国商飞等成立专门的交付部门以应对交付过程,同时学者们建立了交付的最优决策框架^[2-4],涵盖软件产品、电商产品交付等,但是针对复杂武器装备交付的研究较少.为加快交付进程,管理者下放部分权利委托他人完成交付任务,基于委托代理的激励和契约优化得到了关注.王绪民等^[5]基于单位时间设计激励契约以实现成本控制的目标;Xing等^[6]基于区块链技术研究企业与创新者间的价值创造和利益分享机制,构建了链式协同创新模型;Zhou等^[7]考虑了存在渠道选择和定价决策时服务成本以及服务质量信息不对称对服务契约的影响.

这些研究大多只讨论了单一任务对激励的影响,然而现实中委托代理关系大多存在于复杂系统工程中,需要结合多项任务综合考虑激励契约的设计过程. Dai等^[8]引入审查信号,研究当代理人承担运营和营销任务时设计最优契约驱动代理人全力投入; Manthei等^[9]研究了在多任务情况下客观绩效信息的激励效应,通过对比分析可知当获得客观绩效信息时的努力和利润高于未获得时.

上述文献对多任务委托代理进行了拓展研究,均采用线性加成刻画产出,实际上各项任务间存在不完全替代性,简单线性加权与现实相悖.对此,陈勇强等^[10]引入Cobb-Douglas生产函数以弥补线性表达式的不足.此外大部分研究沿用HM^[11]模型中关于参与者完全自利且委托人风险中性、代理人风险规避的假设,忽略了代理人情感和 risk 对其行为的影响,有学者对公平偏好经典FS、BO模型^[12-13]进行了拓展^[14-16],并考虑了代理人风险特征修正激励契约.陈晓红等^[17]考虑双方风险偏好研究了污染治理外包合同的设计;牛晓琴等^[18]研究了当经理人存在公平偏好且面对长短期业绩两项目标时风险对激励契约的影响.传统委托代理理论研究本质上为单重委托代理,现实中企业内部的多层管理或多级供应链结构^[19]等导致委托代理关系的多重性,郭汉丁等^[20]打破传统理论的制约并进行深入研究,而赵宸元等^[21]

则对多重委托代理的定义进行了阐释.

此外,为保障激励契约的效果一些学者对相关监督机制进行研究.如Chen等^[22]在激励设计中引入审查或抽查机制以满足质量和经济要求;徐若芬等^[23]针对食品供应链的追溯制度和检查制度进行探索,研究表明低检查精度下追溯制度对食品生产商的安全努力起正向作用.复杂武器装备产品的高质量要求使得交付过程中需检验问题处理质量,同时追责机制从上至下追溯责任方,当追责成功时责任方需承担惩罚费用,引入追责机制能够使得激励机制更贴近交付现状,实现有效内部激励.

基于上述研究现状,本文综合考虑复杂武器装备交付的追责机制、多任务性以及参与者情感和 risk 偏好因素,均衡质量、周期与成本3项任务并采用Cobb-Douglas生产函数刻画其产出;考虑参与者 risk 偏好特征构建追责机制下的复杂武器装备交付环节链式多任务激励模型,通过分析公平偏好、追责机制以及 risk 偏好特征对最优激励契约的影响,为加快复杂武器装备交付进程提供理论依据.

1 问题描述与模型建立

1.1 问题描述

复杂武器装备经过采购、制造、验收、交付4个环节实现产权转移,交付环节作为最后一公里需要对产品质量严格把关,涵盖交付计划制定和执行、接装项目检查、交付问题优化处置归0、回访总结等流程,具有以下特点:1)交付问题处置涵盖多项任务,企业内部资源有限,需根据任务具体情况均衡决策;2)问题处理涉及多部门,部门间存在层级关系需协同处理;3)为保障交付质量,需检验问题处置结果,当质量检验不通过时需再次处理,并就成本损失向责任方索赔,目前交付动力不足、问题处置积极性不高,不利于企业和国防事业的发展,因此亟需设计一种激励契约使得交付问题高效处理进而加快国防战斗力的转化.

本文研究委托人(交付主要管理部门,称之为交

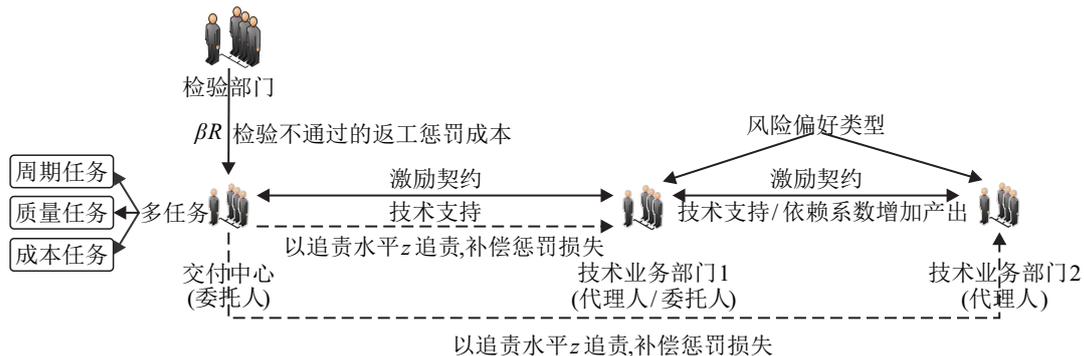


图1 存在追责机制的复杂武器装备交付环节

付中心)、中间人(交付问题处理部门,称之为技术业务部门1)、代理人(交付问题处理部门,称之为技术业务部门2)间的链式委托代理关系(如图1所示),中间人具有双重身份,既是第1重关系中的代理人也是第2重关系中的委托人.本文基于追责机制,关注代理人风险偏好类型,分别探究其为风险偏好型、风险中性型、风险规避型时对激励契约设计的影响.此外,考虑到代理人心理因素对行为的影响,将公平偏好引入模型中.综上,本文研究交付中心在追责机制下如何设计激励契约保证代理人在存在不同风险偏好时均可有效激励其高效处理交付问题,模型符号及其含义如表1所示.

表1 符号及其含义

符号	含义
π_i	技术业务部门 <i>i</i> 收益
π_m	交付中心的收益
b	激励强度
B_0	技术业务部门需满足的最低绩效
μ_m	交付中心的效用
μ_i	技术业务部门 <i>i</i> 效用
k_i	技术业务部门 <i>i</i> 的综合技术水平
p_s	第 <i>s</i> 项任务重要性
c_s	第 <i>s</i> 项任务的努力成本系数
λ	公平偏好系数
ρ	各部门风险规避系数
π^0	保留收益
e_{3i+s-3}	技术业务部门 <i>i</i> 对第 <i>s</i> 项任务的努力水平
S^0	技术业务部门 <i>i</i> 的固定收入
ε	正态分布的随机变量
η	代理人对中间人依赖系数
a_i	技术业务部门 <i>i</i> 工作奉献创造的努力产出
s_i	技术业务部门 <i>i</i> 收入水平
z	追责能力水平
T	惩罚成本上限

1.2 模型假设

假设1 各技术业务部门在面临着质量、周期和成本3项任务时,用 e_{3i+s-3} 表示针对第*s*项任务技术业务部门*i*付出的努力,其中 $e_{3i+s-3} > 0 (i = 1, 2, s = 1, 2, 3)$.由文献[24]可知,努力产出函数可用CES函数表示,当任务完全不可替代时,CES函数转化为Cobb-Douglas生产函数,因此各技术业务部门直接创造的努力产出函数表达式为

$$a_i(e_{3i-2}, e_{3i-1}, e_{3i}) = k_i \prod_{s=1}^3 e_{3i+s-3}^{p_s}$$

其中 $k_i > 0$ 为技术业务部门*i*的综合技术水平,即努力转化为产出的比例, k_i 由其信息掌握程度、职员素质组合、管理能力水平等综合决定,满足 $\frac{\partial a_i}{\partial e_{3i+s-3}} > 0, \frac{\partial^2 a_i}{\partial e_{3i+s-3}^2} < 0$,符合边际收益递减规律.为体现复

杂武器装备交付不同发展阶段对任务的侧重程度,用 p_s 表示第*s*项任务的相对重要程度, $p_s \in (0, 1)$,且 $p_1 = p, p_2 = q, p_3 = 1 - p - q$.此外,区别于一般的线性努力产出研究^[8-9],应用拓展型Cobb-Douglas生产函数可弥补线性的不足,与实践“质量标准不达标一票否决”的政策相符合.在现实中,企业发展目标随着市场环境和国家政策的变化而变化,各项任务权重会影响各参与者的决策,本文引入任务相对重要程度可刻画多任务间的均衡.

假设2 根据文献[21]的研究,在传统HM模型基础上将复杂武器装备交付环节拓展为链式双重委托代理结构,包含纯委托人、中间人和纯代理人3个参与者.基于二维绩效模型分别建立中间人和纯代理人的产出函数,中间人参与两重委托代理关系,其产出函数为 $w_1 = a_1 + \eta a_2 + \varepsilon (0 \leq \eta \leq 1)$. η 为依赖系数,表示中间人间接依赖纯代理人努力产出的比例,与实际情况下同事间良好的人际关系和工作互惠帮助能够促进周边绩效提升的现象相符.纯代理人只涉及一层委托代理关系,其产出函数为 $w_2 = a_2 + \varepsilon, \varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 体现了交付环境的不确定程度.交付中心根据Holmstrom^[11]模型对努力产出采取线性激励的方式, $s_i = S^0 + b(w_i - B_0) (i = 1, 2)$, B_0 为最低绩效,体现复杂武器装备企业的权威性,除市场手段外还存在行政手段强制完成交付任务.

假设3 根据陈勇强等^[10]的研究,假设交付问题处理的质量、周期、成本任务的努力成本系数相互独立,且所处环境、交付相关资源、信息等均相同,其各项任务努力成本系数也相同.各项任务的努力成本函数为

$$C_i(e_{3i+s-3}) = \frac{1}{2} \left(\sum_{s=1}^3 c_s e_{3i+s-3}^2 \right), i = 1, 2.$$

其中: $c_s > 0$ 为完成第*s*项任务的努力成本系数,且 $C_i(e_{3i+s-3})$ 严格递增.

假设4 根据Fehr等^[12]的研究,考虑公平偏好对复杂武器装备交付环节的影响,本文以收益衡量公平偏好效用,各技术业务部门既关注自身收益也关注其他参与方的收益,嫉妒心理使得不利于自身的不公平分配引起负效用,自豪心理引起正效用, λ_1 为嫉妒偏好程度, λ_2 为自豪偏向程度,为简化计算令 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$.各技术业务部门对公平的感知一致,因此二者公平偏好程度相同.

假设5 一般框架中委托人呈风险中性,代理人为风险规避,但实际中代理人风险偏好类型不定.结合复杂武器装备交付环节特点,可知交付中心作为委托人对于合作的态度是正向的且可向下方分摊风险,因此假设其为风险中性.各技术业务部门作为代理人对于合作的态度是不确定的,因此其风险类型不定,可分为风险偏好型、风险中性型和风险规避型3

种. 风险效用函数为 $u = -e^{-\rho s_i}$, 其中 ρ 为风险系数, 风险偏好类型由 ρ 的取值决定. 当 $\rho > 0$ 时为风险规避型, 当 $\rho = 0$ 时为风险中性型, 当 $\rho < 0$ 时为风险偏好型^[18].

假设6 为保障产品质量安全, 在问题处理后外部检验部门需按照质量标准文件进行检验. 当质量不达标时, 交付中心需承担惩罚 βR , 其中 $\beta \in (0, 1)$ 为检验精度, R 为惩罚成本. 交付中心向下追溯责任方并索取惩罚成本 $(T - e_1^2 c_z / 2)z$, T 为惩罚上限, $z \in (0, 1)$ 为追责能力水平. 随着努力水平的提高索赔成本非线性下降, 且质量惩罚成本系数与单位质量任务努力成本相同, 即 $c_z = c_1$.

1.3 模型构建

本节基于复杂武器装备交付现状设计激励契约, 构建考虑追责机制的链式多任务激励模型. 交付中心制定线性激励契约激励各技术业务部门完成交付任务; 然后, 各技术业务部门根据激励契约决策其努力水平完成交付任务. 外部检验部门对问题处理的质量进行检验, 检验不通过时向交付中心索取一定的期望惩罚成本; 最后, 交付中心启动追责机制以 z 的追责水平向中间人/纯代理人追责并索取一定赔偿, 各参与方的收益函数如下式所示:

$$\pi_1 = S^0 + b \left(k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} + k_2 \eta \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} - B_0 \right) - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 c_s e_s^2 - \left(T - \frac{1}{2} e_1^2 c_z \right) z, \quad (1)$$

$$\pi_2 = S^0 + b \left(k_2 \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} - B_0 \right) - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 c_s e_{s+3}^2 - \left(T - \frac{1}{2} e_4^2 c_z \right) z, \quad (2)$$

$$\pi_m = (1 - b) \left(k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} + k_2 (\eta + 1) \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} \right) - 2S^0 + 2bB^0 - \beta R + z \left(2T - \frac{1}{2} c_z (e_4^2 + e_1^2) \right). \quad (3)$$

其中: S^0 为固定激励部分, $b > 0$ 为单位努力产出分成, $k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} + k_2 \eta \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} - B_0$ 为中间人高于最低绩效的综合自身创造以及纯代理人创造的有效努力产出部分, $k_2 \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} - B_0$ 为纯代理人创造的高于最低绩效标准的努力产出, βR 为交付中心需承担的赔偿成本. 由于交付中心为风险中性, 其效用等于期望收入, 即 $EU_m = E\pi_m$, 各技术业务部门具有公平偏好且风险类型不定, 根据确定性等价收益得到技术业务部门的效用函数为

$$\begin{aligned} U_1 = & \pi_1 + \lambda \{ \max[(s_1 - s_m), 0] + \max[(s_1 - s_2), 0] \} - \\ & \lambda \{ \max[(s_m - s_1), 0] + \max[(s_2 - s_1), 0] \} - \\ & \frac{1}{2} \rho (b' \sigma)^2 = \\ & (3\lambda + 1)S^0 + (3b\lambda - \lambda + b)k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} - \\ & \left(T - \frac{1}{2} e_1^2 c_z \right) z + (3b\lambda\eta - \eta\lambda - \lambda + b\eta)k_2 \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} - \\ & (3\lambda + 1)bB_0 - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 c_s e_s^2 - \frac{1}{2} (3\lambda b + b - 2\lambda)^2 \rho \sigma^2, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} U_2 = & (3\lambda + 1)S^0 - \lambda k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} - (3\lambda + 1)bB_0 + \\ & (3b\lambda - \eta\lambda - \lambda + b)k_2 \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^3 c_s e_{s+3}^2 - \\ & \left(T - \frac{1}{2} e_4^2 c_z \right) z - \frac{1}{2} (3\lambda b + b - 2\lambda)^2 \rho \sigma^2. \end{aligned} \quad (5)$$

2 模型求解

2.1 信息对称情况下的多任务激励模型

在信息对称情况下, 交付中心与各技术业务部门间不存在信息壁垒, 各技术业务部门的私人信息即努力水平可被观测, 不具备信息优势. 信息对称情况下的多任务激励模型为

$$\begin{aligned} \max EU_m = & (1 - b) \left(k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} + k_2 (\eta + 1) \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} \right) - 2S^0 + \\ & 2bB^0 - \beta R + z \left(2T - \frac{1}{2} e_4^2 + e_1^2 \right) c_z; \\ \text{s.t. (IR): } & U_1 U_2 \geq \pi^0. \end{aligned} \quad (6)$$

上述多任务激励模型旨在保障代理人参与合作的前提下委托人实现效用最大化. IR 为参与约束保障代理人参与合作, 当且仅当各技术业务部门的期望效用大于保留收益即机会成本 π^0 时激励契约有效, 此时通过该模型可得到代理人参与合作且委托人利益最大化下的最优激励契约.

令 $c_1 - z c_z = c_1(1 - z) = c'_1$, $c_2 = c'_2$, $c_3 = c'_3$, 将 U_1 、 U_2 相加得到 S^0 的表达式为

$$S^0 = \frac{1}{2(3\lambda + 1)} \left(2\pi^0 + \frac{1}{2} \left(\sum_{s=1}^3 c'_s e_{s+3}^2 + \sum_{s=1}^3 c'_s e_s^2 \right) \right) +$$

$$(3\lambda b + b - 2\lambda)^2 \rho \sigma^2 - ((1 + 3\lambda)b - 2\lambda) \left(k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} + (1 + \eta) k_2 \prod_{s=1}^3 e_{s+3}^{p_s} \right) + 2Tz + bB_0. \quad (7)$$

将 S^0 代入 $E\pi_m$ 中, 分别对 b 、 e_s 、 e_{3+s} 求一阶偏导数得到最优激励系数 b^* , 固定激励 S^0 以及最优努力水平 e_s^* 和 e_{s+3}^* 的表达式, 即

$$b^* = \frac{2\lambda}{3\lambda + 1}, \quad (8)$$

$$e_s^* = k_1(1 + \lambda) \left(\frac{p_s}{c'_s} \right)^{\frac{1+p_s}{2}} \prod_{m=1, m \neq s}^3 \left(\frac{p_m}{c'_m} \right)^{\frac{p_m}{2}}, \quad (9)$$

$$e_{s+3}^* = k_2(1 + \lambda)(1 + \eta) \left(\frac{p_s}{c'_s} \right)^{\frac{1+p_s}{2}} \prod_{m=1, m \neq s}^3 \left(\frac{p_m}{c'_m} \right)^{\frac{p_m}{2}}, \quad (10)$$

$$S^0 = \frac{\pi^0 + \frac{(\lambda + 1)^2(k_1^2 + (1 + \eta)^2 k_2^2)A}{4} + zT + 2\lambda B_0}{3\lambda + 1}, \quad (11)$$

其中 $A = \left(\frac{p}{c'_1} \right)^p \left(\frac{q}{c'_2} \right)^q \left(\frac{1-p-q}{c'_3} \right)^{1-p-q}$.

2.2 信息不对称情况下的多任务激励模型

信息对称情况通常为理想状态, 现实中往往存在信息壁垒, 信息不对称的情况更为普遍. 当信息不对称时各技术业务部门拥有信息优势, 交付中心无法直接观测到其努力水平信息, 技术业务部门以自身利益最大化为目标, 此时参与者目标不一致, 信息不对称情况下的多任务激励模型为

$$\begin{aligned} \max EU_m = & (1 - b) \left(k_1 \prod_{s=1}^3 e_s^{p_s} + k_2(\eta + 1) \prod_{s=1}^3 e_{3+s}^{p_s} \right) - 2S^0 + \\ & 2bB^0 - \beta R + z \left(2T - \frac{1}{2} e_4^2 + e_1^2 \right) c_z. \\ \text{s.t. (IR): } & U_1 U_2 \geq \pi^0; \\ \text{(IC): } & e_s \in \arg \max U_1, e_{s+3} \in \arg \max U_2. \end{aligned} \quad (12)$$

交付中心无法直接观测到其努力水平信息, 因此设计激励契约时需要同时考虑 IR 和 IC 约束以实现自身效用最大化. IC 为激励相容约束表示代理人以自身效用最大化为目标决策其努力水平, 此时通过该模型可得到代理人参与合作且委托人和代理人同时达到效用最大化的最优激励契约. 令 (IC) 分别对 e_s 、 e_{s+3} 求一阶偏导数并令其为 0, 得到

$$c'_s e_s =$$

$$((3\lambda + 1)b - \lambda) k_1 (1 + \lambda) p_s e_s^{p_s - 1} \prod_{m=1, m \neq s}^3 e_m^{p_m}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} c'_s e_{s+3} = & ((3\lambda + 1)b - (1 + \eta)\lambda) k_2 p_s e_{s+3}^{p_s - 1} \prod_{m=1, m \neq s}^3 e_{m+3}^{p_m}. \end{aligned} \quad (14)$$

联立求得 (IC) 驻点 $M(e_{3i+s-3}^*)_{i=1,2,s=1,2,3}$ 为

$$\begin{aligned} e_s = & ((3\lambda + 1)b - \lambda) k_1 \left(\frac{p_s}{c'_s} \right)^{\frac{1+p_s}{2}} \prod_{m=1, m \neq s}^3 \left(\frac{p_m}{c'_m} \right)^{\frac{p_m}{2}}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} e_{s+3} = & ((3\lambda + 1)b - (1 + \eta)\lambda) k_2 \times \\ & \left(\frac{p_s}{c'_s} \right)^{\frac{1+p_s}{2}} \prod_{m=1, m \neq s}^3 \left(\frac{p_m}{c'_m} \right)^{\frac{p_m}{2}}. \end{aligned} \quad (16)$$

由于 IC 二阶偏导数存在且连续, 易知该驻点为极大值点. 对约束条件 (IR) 取等式, 相加得到固定激励 S^0 的表达式, 并将 S^0 和 $M(e_{3i+s-3}^*)_{i=1,2,s=1,2,3}$ 代入 EU_m , 对其求关于 b 的一阶偏导数令其为 0, 可得最优激励系数 b^* 为

$$b^* = \frac{(\lambda + 1 + \lambda B)A(k_1^2 + (1 + \eta)k_2^2) + 4\lambda\rho\sigma^2}{((k_1^2 + k_2^2)AB + 2\rho\sigma^2)(3\lambda + 1)}. \quad (17)$$

由于 $\frac{\partial^2 EU_m}{\partial b^2} < 0$, b^* 为极大值所对应的最优激励强度. 将 b^* 代入 e_s 和 e_{3+s} , 得到最优努力水平 e_s^* 、 e_{s+3}^* , 即

$$\begin{aligned} e_s^* = & \left(\frac{(\lambda + 1)A(k_1^2 + (1 + \eta)k_2^2) + \lambda B A \eta k_2^2 + 2\lambda\rho\sigma^2}{((k_1^2 + k_2^2)AB + 2\rho\sigma^2)} \right) \times \\ & k_1 \left(\frac{p_s}{c'_s} \right)^{\frac{1+p_s}{2}} \prod_{m=1, m \neq s}^3 \left(\frac{p_m}{c'_m} \right)^{\frac{p_m}{2}}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} e_{s+3}^* = & \left(\frac{(\lambda + 1)A(k_1^2 + (1 + \eta)k_2^2) - \lambda B A k_1^2 \eta + 2\lambda\rho\sigma^2(1 - \eta)}{((k_1^2 + k_2^2)AB + 2\rho\sigma^2)} \right) \times \\ & k_2 \left(\frac{p_s}{c'_s} \right)^{\frac{1+p_s}{2}} \prod_{m=1, m \neq s}^3 \left(\frac{p_m}{c'_m} \right)^{\frac{p_m}{2}}, \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $B = \frac{zp(3\lambda + 1)}{1 - z} + 1$.

式 (18) 和 (19) 即为信息不对称下的均衡解, 表示各技术业务部门根据自身特征、企业内部环境以及发展态势等因素综合决策的均衡情况.

3 模型分析

3.1 信息对称情况下的分析

命题1 最优努力水平与自身综合技术水平、公平偏好系数、追责能力水平呈单调递增关系,与各项任务努力成本系数呈单调递减关系,与其他部门综合技术水平无关;纯代理人最优努力水平与依赖系数呈单调递增关系。

命题1表明,信息对称情况下最优努力水平与自身综合技术水平、公平偏好系数、依赖系数以及追责能力水平正相关,与努力成本系数负相关。当追责能力水平提升时,各部门被索要的惩罚成本增加,为降低惩罚成本提高自身收益,努力水平随之提高;当依赖系数增加时,对努力水平产生正激励,促使纯代理人增加努力程度;各部门的努力水平与其他部门的技术水平无关,只受自身综合技术水平影响,高综合技术水平对应高努力产出转化,其努力的积极性越高努力水平越高;当各部门间存在公平偏好时,公平偏好系数越大对努力水平的正向激励效果越强;当任务边际努力成本增加时总努力成本增加,为维持原有收入则需付出更高的努力水平,从而导致其积极性下降,努力水平随之降低。

命题2 最优激励系数只受公平偏好的影响,与风险无关,且取值范围为 $(0, \frac{2}{3})$;依赖系数对参与者收益起正激励作用且对收益的影响与追责能力水平有关;当公平偏好系数为0时,依赖系数仍然对纯代理人最优努力水平起正向激励作用。

命题2表明,当信息对称时最优激励系数只受公平偏好的影响,同时参与者收益情况会受依赖系数和追责机制的影响。较高的依赖系数激励纯代理人采取较高的努力水平,在提高自身努力产出的同时增加中间人的努力产出。对于交付中心而言,其收入情况除了受到依赖系数和公平偏好的影响外,自身的追责能力水平同样会影响其收入。当追责能力水平超过 $1/(p(1+3\lambda))+1$ 时,尽管高追责能力水平会迫使各技术业务部门提高自身努力水平,但是交付中心收入会随着依赖系数的增加而降低,究其原因是在较高的追责水平下,高依赖系数使得固定激励部分大幅增加,委托人的实际收入随之下降,因此当追责机制较为完善时,交付中心需降低部门间的依赖系数以提高收益。

3.2 信息不对称情况下的分析

命题3 当风险偏好类型不同时,依赖系数对于最优努力水平激励的影响程度与风险偏好的类型以及风险系数大小有关。不同风险偏好类型和风险偏好程度影响依赖系数的激励效果。

命题3表明,风险偏好的程度和类型影响各技术业务部门关于最优努力水平的决策,当其为风险规避型时,依赖系数对于中间人而言始终为正激励,此时二者间的依赖关系会增加其努力产出从而提高其积极性,对于下层部门而言,过大的风险偏好程度反而会导致负激励,此时风险偏好存在阈值,即使其为风险偏好型过大的风险同样会降低其积极性。当其为中性时,依赖系数对于最优努力水平的激励只与两者的综合技术水平比值有关。当其为偏好型时,只有适中的依赖系数才会对最优努力水平产生正激励。因此交付中心在制定激励契约时,除了明确二者间的依赖关系外,还需根据不同环境对应的风险动态调整激励契约。

命题4 在信息不对称情况下,当风险偏好类型不同时,最优激励系数与依赖系数、综合技术水平、努力成本系数的关系不同。

命题4表明,当 $k_2^2/k_1^2 + k_2^2 < Q$ 时风险系数越大最优激励系数越大,且风险规避型时各项成本系数与最优激励系数呈正相关关系,风险偏好型时结论相反;当 $k_2^2/k_1^2 + k_2^2 > Q$ 时,风险系数与最优激励系数呈负相关关系,且风险规避型时各项成本系数与最优激励系数负相关,风险偏好型时结论相反。当其风险规避型时依赖系数与最优激励系数正相关,当其风险偏好型时,风险系数较大时依赖系数与最优激励系数正相关,较小时负相关。当其风险中性型时,综合技术水平越强,依赖系数越大,最优激励系数越大,且努力成本与最优激励系数无关。当其风险规避型时, $Q > 0$ 时中间人综合技术水平与最优激励系数负相关, $Q < 0$ 时,风险偏好较小时中间人综合技术水平与最优激励系数负相关,风险偏好程度时中间人综合技术水平与最优激励系数正相关; $Q - 1 < 0$ 时,纯代理人综合技术水平与最优激励系数正相关, $Q - 1 > 0$ 时,风险偏好较小时,纯代理人综合技术水平与最优激励系数正相关,风险偏好较大时,纯代理人综合技术水平与最优激励系数负相关;当其风险偏好型时,结论与风险规避型相反。因此当各技术业务部门为不同风险类型和偏好程度时交付中心需根据实际情况调整激励契约。

命题5 在信息不对称情况下,激励契约的有效性与依赖系数 η 、公平偏好系数 λ 、风险系数 ρ 、各部门综合技术水平 k_i 等参数有关。

命题5表明,交付中心在设计激励契约时应控制所处环境的风险因素,当各部门为风险偏好型时应当采取措施适当增大环境的风险系数,否则部门间的依赖系数为负与实际不符,使得激励契约失去激励

效果.此外,激励契约采取线性产出共享机制,当激励系数大于1时交付中心无法获得收益,此时激励契约不具有激励作用,因此在制定激励契约时需依据所处环境的风险因素、部门综合技术水平、公平偏好、部门间的依赖等信息综合考虑.

命题6 追责能力水平与最优激励系数间的关系与质量任务重要程度相关,最优激励系数在一定条件下与追责能力水平存在单调关系;最优努力水平与追责能力水平间的关系受综合技术水平、质量任务相对重要程度等影响.

命题6表明,对于交付中心而言最优激励系数越小线性分成比例越小,剩余产出收益越大,但是较小的激励系数对各部门的激励效果也随之下降.此外,追责能力水平同样会影响努力水平,总体努力水平呈下降趋势,追责能力水平趋近1时会使得中间人努力水平增加,纯代理人最优努力水平始终呈下降趋势.交付中心在制定激励契约时需均衡考虑最优激励系数和追责机制对激励的影响.

3.3 多任务重要程度差异分析

命题7 无论信息对称与否,各技术业务部门在交付质量、周期和成本3项任务上决策的最优努力水平的比值与相对重要程度、任务努力成本比值、外部质量检验精度有关.相对重要程度越大,相对努力成本越小,同一部门在2项任务上投入的最优努力水平之比越大.

命题7表明,各部门会在相对重要且成本低的交付任务上投入更多努力.当追责能力水平对比值呈正激励作用,各项任务相对重要程度不变时追责能力水平越高,质量与周期任务努力水平比值越大,在质量任务上投入的努力越多,较强的追责机制迫使其提高努力水平,因此交付中心需加强质量监督管理机制,当存在交付质量不达标时快速、准确向下追责有助于交付效率的提升.无论信息对称与否,当 $c_1(1-z) = c_3$ 时,质量与周期任务上的努力水平比值仅与任务相对重要程度有关,随着质量任务重要度的增加比值随之增加,当质量任务重要程度接近0时,质量任务努力水平远远小于周期任务,此时交付

中心为完成交付的绩效考核指标会选择降低质量任务把控标准,重点关注交付周期以按时交付;当质量任务重要程度接近1时,质量任务努力水平远远大于周期任务,此时交付中心以交付质量达标为首要目标,与工程项目中质量红线的概念类似.同理可知,当 $c_2 = c_3$ 时,周期与成本任务的努力水平比值仅与任务相对重要程度有关,且呈正相关关系,复杂武器装备制造企业作为军工企业为国防战斗力提供保障,当国家形势变化亟需国防战斗力转化时,周期与成本任务的重要程度比值极大,此时交付中心为尽快交付而忽略成本因素,力求保质高效完成交付任务.此外,为响应国家政策持续深化国企改革,企业为提高自身经济效益会逐渐提高成本任务的重要程度.

4 数值仿真

为进一步验证复杂武器装备交付环节激励契约的设计方法,针对信息不对称下的任务重要程度和追责机制进行仿真,为参与者交付决策提供依据.

4.1 追责机制对最优激励曲面的影响

结合复杂武器装备交付的特点,分析当综合技术水平、依赖系数等信息已知时,交付质量、周期和成本3项任务的重要程度差异以及追责机制的存在对于最优激励曲面的影响.根据文献[21]以及复杂武器装备交付现状,假设 $k_1 = 2, k_2 = 1, \sigma = 0.5, \lambda = 1, \eta = 0.5, \rho = 0.5$.当不启动追责机制,即 $z = 0$ 时,可得到不同努力成本组合下的最优激励曲面.由图2可见,当 $c_1 = 1, c_2 = 2, c_3 = 3$ 时,最优激励曲面最低点为 $(1/6, 1/3, 1/2)$;当 $c_1 = 2, c_2 = 2, c_3 = 2$ 时,最优激励曲面最低点为 $(1/3, 1/3, 1/3)$;当 $c_1 = 3, c_2 = 2, c_3 = 1$ 时,最优激励曲面最低点为 $(1/2, 1/3, 1/6)$,上述3种情况中最低点任务成本系数与重要程度比值相等且最小值均为0.596.由此可知,当不启动追责机制,各项任务努力成本占比与重要程度相等时即为最优激励曲面的最低点,此时最优激励系数最小,收益共享比例最低,存在弱激励区.由于资源、人力等有限,当某项任务的努力投入加大时其他任务的努力投入减少,需

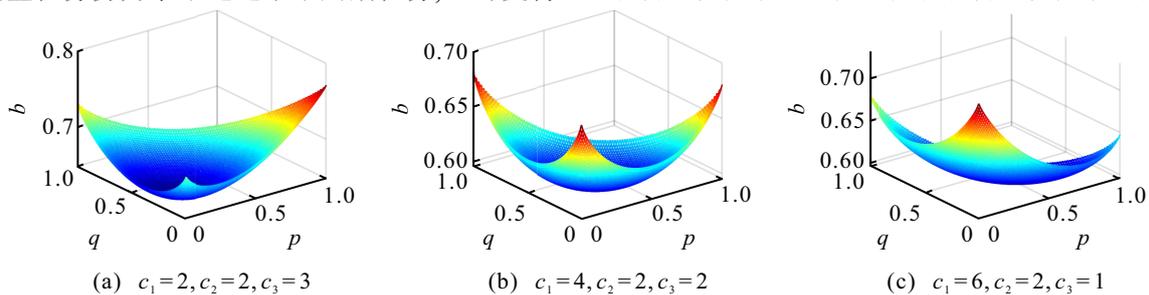


图2 不启动追责机制下的最优激励曲面

均衡考虑各项任务的成本、重要程度等信息. 理想状态下交付中心将激励契约制定在弱激励区附近,但实际上从企业职工的角度而言,弱激励区的存在反而会降低其积极性,一旦达到基本要求将不愿继续努力,不利于企业的长久发展. 当各项任务成本占比与相对重要程度不等时,在曲面上偏离弱激励区,对于成本低且重要的任务委托人会选择较高的激励系数,表明对于重要任务采取高激励会创造更多交付产出.

当启动追责机制时,分别探究当追责能力水平较弱、适中、较强情况下最优激励曲面的变化,即 $z = 0.25, z = 0.5, z = 0.75$, 可得到不同追责能力水平下各技术业务部门不同努力成本组合下最优激励曲面. 当追责能力水平为0.25时,成本组合 $(c_1, c_2, c_3) = (1, 2, 3)$ 时,最优激励系数最小值为0.512,成本组合 $(c_1, c_2, c_3) = (2, 2, 2)$ 时,最优激励系数最小值为0.510,成本组合 $(c_1, c_2, c_3) = (3, 2, 1)$ 时,最优激励系数最小值为0.509,同理可知当追责能力水平为0.5、0.75时不同成本组合下的最优激励系数的最小值. 在相同追责能力水平下,不同成本组合下的最优激励曲面变化趋势相似,当成本组合 $(c_1, c_2, c_3) = (1, 2, 3)$ 时最优激励系数的最小值最大,当成本组合 $(c_1, c_2, c_3) = (3, 2, 1)$ 时最优激励系数的最小值最小,相同成本组合下随着追责能力水平的提升,最优激励系数最小值逐渐降低且最优激励曲面弯曲的弧度增加即最优激励系数下降的速度加快. 由此可知,当启动追责机制时,随着交付中心追责能力水平的提升,追责机制的效果逐渐显现,一旦质量检验不通过,交付中心向下追溯到责任方并索取惩罚成本,从交付中心的角度可知随着追责能力水平的提升,最优激励系数越小,其效用越大. 由于边际惩罚成本与质量任务的边际努力成本相等,质量任务相对重要程度越大,边际努力成本越大,交付质量任务不达标被索赔的惩罚成本越多. 为获得更高的经济收益,各技术业务部门会以更高的努力水平完成质量任务创造更高的社会效益,因此交付中心完善相应的追责制度,明确界定问题责任方增加自身的追责能力水平会在一定程度上加快复杂武器装备高质量交付进程.

4.2 追责机制对最优努力水平的影响

结合复杂武器装备交付特点,分析当综合技术水平、依赖系数等信息已知时,任务重要程度差异以及追责机制的存在对最优努力水平的影响. 根据文献[21]以及复杂武器装备制造企业交付环节现状,同样假设 $k_1 = 2, k_2 = 1, \sigma = 0.5, \lambda = 1, \eta = 0.5, \rho = 0.5, c_1 = c_2 = c_3 = 1$. 追责机制的存在使得交付中心

对于质量任务的关注程度明显大于其余任务,基于此,对3项任务的相对重要程度作以下假设: $(1/2, 1/3, 1/6), (1/2, 1/4, 1/4)$, 探究交付周期任务与交付成本任务相对重要程度差异对代理人决策的影响. 由图3可见,当周期与成本任务的相对重要程度不等时,追责机制的存在会使得质量任务努力水平明显高于其余任务,此时追责机制对于质量任务的影响大于其余2项. 整体努力水平呈下降趋势,表明追责机制在一定程度上会降低代理人的交付积极性,属于负激励手段. 当追责能力水平趋近于1时,中间人的各项

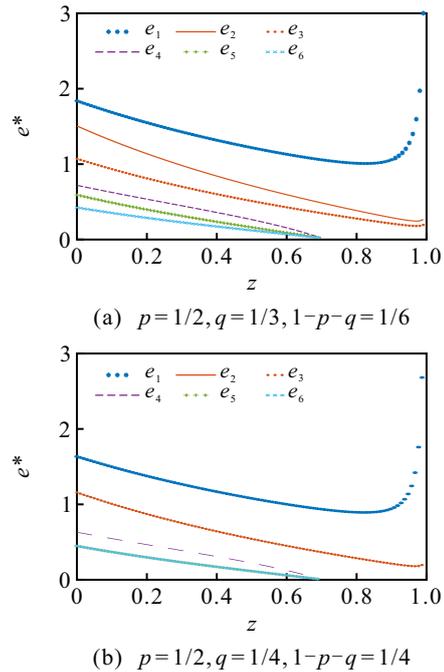


图3 不同任务相对重要程度对最优努力水平的影响

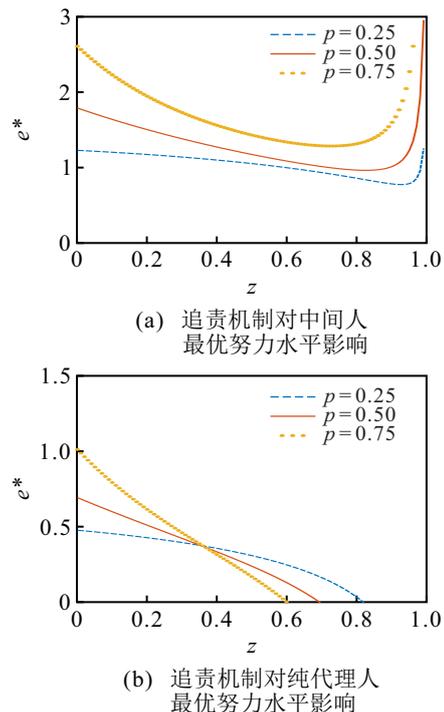


图4 追责能力水平对最优努力水平的影响

任务努力水平激增,其中质量任务尤为明显.当周期与成本任务的相对重要程度相等时,其余2项任务的最优努力水平相等,且中间人最优努力水平普遍大于纯代理人的努力水平,实际上中间人的收益有赖于底层技术业务部门,因此无论是追责机制的抑制或促进作用的效果对其均更为明显.由于追责机制对于质量任务的影响明显且影响程度与任务相对重要程度相关,分别探究当交付质量任务相对重要程度较小、适中、较大时中间人和纯代理人的最优努力水平变化趋势,即 $p=0.25$, $p=0.5$, $p=0.75$.由图4可见,纯代理人最优努力水平随着追责能力的提高而降低,质量任务越重要追责机制对中间人最优努力水平的影响越大, p 值较大提前到达转折点.综上,复杂武器装备交付亟需探索一种可抵消现有追责机制负效应的正向激励手段,保障无论追责机制是否存在、追责能力水平高低均可使得激励效果偏离弱激励区,以实现优质、准时、低成本的交付目标.

5 结论

本文基于存在追责机制的复杂武器装备链式交付的实际情况,综合考虑代理人情感和 risk 因素对交付决策的影响,构建了链式多任务激励模型,探索提高交付效率的激励手段.研究发现:1)在交付过程中各部门会根据任务重要程度和努力成本均衡决策,偏向于在相对重要且成本低的交付任务多投入,目前产品交付的质量安全为第一优先级,交付中心暂时放松成本控制努力提高交付质量,同时交付内部的追责机制对质量任务的完成起积极作用,若企业内部尚有余力可完善追责机制设立更合理的监督措施;2)部门个人特征会对交付决策产生影响,对公平分配的意识越强,收益越大,各部门风险偏好类型以及两者综合能力水平差异对于激励效果均有重要影响;3)各参与者的收益情况受依赖系数的影响,完善的追责机制迫使各层级间资源依赖的程度增加,使得交付中心偏被动,可推动企业内部组织结构升级,降低部门间依赖程度以提高收益;4)追责机制会提高交付中心自身收益分成,通过完善相应追责制度,明确界定问题责任方、提高追责能力会在一定程度上加快复杂武器装备高质量交付进程.实际交付问题处理过程中涉及到的影响因素众多,基于企业内部的组织结构各部门还面临着交付任务与日常任务的冲突,完成交付任务的机会成本随着企业内部发展动态变化,任务相对重要程度随之改变,因此可在所提出模型的基础上动态考量各项任务的重要程度变化以及交付任务与日常任务的冲突,进一步深化复杂武器装备交付问题

处置激励契约的设计研究.

参考文献(References)

- [1] 乔浩, 战仁军, 林原. 面向使命任务的武器装备体系能力规划方法[J]. 控制与决策, 2020, 35(8): 2042-2048. (Qiao H, Zhan R J, Lin Y. Mission oriented capability planning method for weapon system of systems[J]. Control and Decision, 2020, 35(8): 2042-2048.)
- [2] 任廷海, 张旭梅, 周茂森, 等. 考虑交付质量和交付期约束的移动应用供应链决策与协调[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(3): 615-634. (Ren T H, Zhang X M, Zhou M S, et al. Decision and coordination of mobile application supply chain considering under delivery quality and delivery time constraints[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2019, 39(3): 615-634.)
- [3] 牛攀峰, 侯文华. 考虑供应商产品交付水平的供应链融资策略研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(10): 70-83. (Niu P F, Hou W H. Research on supply chain financing decision considering supplier product delivery level[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(10): 70-83.)
- [4] 郎晓, 邵晓峰. 消费者导向类型与电商全渠道决策研究[J]. 中国管理科学, 2020, 28(9): 164-175. (Lang X, Shao X F. Study on consumer-oriented types and E-tailer's omnichannel decision[J]. Chinese Journal of Management Science, 2020, 28(9): 164-175.)
- [5] 王绪民, 熊娟娟, 苏秋澜. 基于委托-代理模型的施工过程成本博弈[J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 390-394. (Wang X M, Xiong J J, Su Q L. Construction process cost game based on principal-agent model[J]. Control and Decision, 2019, 34(2): 390-394.)
- [6] Xing G Y, Duan Z, Yan W J, et al. Evaluation of "innovation chain + supply chain" fusion driven by blockchain technology under typical scenario[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 242: 108284.
- [7] Zhou R, Liao Y, Shen W J, et al. Channel selection and fulfillment service contracts in the presence of asymmetric service information[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 222: 107504.
- [8] Dai T L, Ke R Z, Ryan C T. Incentive design for operations-marketing multitasking[J]. Management Science, 2021, 67(4): 2211-2230.
- [9] Manthei K, Sliwka D. Multitasking and subjective performance evaluations: Theory and evidence from a field experiment in a bank[J]. Management Science, 2019, 65(12): 5861-5883.
- [10] 陈勇强, 傅永程, 华冬冬. 基于多任务委托代理的业主与承包商激励模型[J]. 管理科学学报, 2016, 19(4): 45-55. (Chen Y Q, Fu Y C, Hua D D. A multi-task incentive model between the owner and contractor[J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(4): 45-55.)
- [11] Holmstrom B, Milgrom P. Multitask principal-agent

- analyses: Incentive contracts, asset ownership, and job design[J]. *The Journal of Law, Economics, and Organization*, 1991, 7: 24-52.
- [12] Fehr E, Schmidt K M. A theory of fairness, competition, and cooperation[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1999, 114(3): 817-868.
- [13] Bolton G E, Ockenfels A. ERC: A theory of equity, reciprocity, and competition[J]. *American Economic Review*, 2000, 90(1): 166-193.
- [14] Sun D Q, Ma X Y, Wang D J, et al. Principal-agent problem for returns handling in a reverse supply chain with one manufacturer and two competing dealers[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 66: 118-140.
- [15] 王开弘, 丁川. 基于零售商具有公平偏好的渠道网络委托-代理模型[J]. *控制与决策*, 2015, 30(3): 565-571. (Wang K H, Ding C. Principal-agent model with channel network based on retailers having fairness preference[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(3): 565-571.)
- [16] 潘林伟, 鲁皓. 分权竞争、协同意愿与城市群建设: 考虑公平偏好的委托代理解释[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(11): 226-231. (Pan L W, Lu H. Decentralized competition, willingness to cooperate and urban agglomeration construction: A principal-agent explanation considering fairness preference[J]. *Operations Research and Management Science*, 2021, 30(11): 226-231.)
- [17] 陈晓红, 余章美, 李金霖. 考虑风险偏好的污染治理外包合同设计[J]. *控制与决策*, 2019, 34(12): 2690-2697. (Chen X H, Yu Z M, Li J L. Outsourcing contract for pollution abatement service with risk preference consideration[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(12): 2690-2697.)
- [18] 牛晓琴, 谢琨, 顾海, 等. 代理人公平偏好下的长短期业绩目标与薪酬激励契约研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(2): 372-386. (Niu X Q, Xie K, Gu H, et al. Research on long-term and short-term performance task and agent's compensation incentive based on fairness preference[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2019, 39(2): 372-386.)
- [19] 李翀, 刘思峰, 方志耕, 等. 多级供应链系统成本分析随机网络模型及算法研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(4): 105-111. (Li C, Liu S F, Fang Z G, et al. The study of multi-stage supply chain cost distribution based on GERT model[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2013, 21(4): 105-111.)
- [20] 郭汉丁, 张印贤, 张宇, 等. 工程质量政府监督多层次激励协同机理研究综述[J]. *建筑经济*, 2013, 34(2): 100-103. (Guo H D, Zhang Y X, Zhang Y, et al. A summarization of multi-level cooperative incentive of government supervision on construction quality[J]. *Construction Economy*, 2013, 34(2): 100-103.)
- [21] 赵宸元, 蒲勇健, 潘林伟. 链式多重委托-代理关系的激励——基于完全理性与过程性公平偏好模型的比较[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(6): 121-131. (Zhao C Y, Pu Y J, Pan L W. The incentive mechanism of chain-like multiple principal-agent model—A comparative study based on entirely rational and process fairness preference model[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(6): 121-131.)
- [22] Chen W D, Li L M. Incentive contracts for green building production with asymmetric information[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(6): 1860-1874.
- [23] 徐若芬, 徐畅, 范体军. 考虑追溯水平的食品厂商竞争决策研究[J]. *中国管理科学*, 2021, 29(1): 116-126. (Xu R F, Xu C, Fan T J. Production decisions of competitive manufacturers under traceability system[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2021, 29(1): 116-126.)
- [24] 田盈, 蒲勇健. 多任务委托——代理关系中激励机制优化设计[J]. *管理工程学报*, 2006, 20(1): 24-26. (Tian Y, Pu Y J. Optimal designment for the incentive mechanism among multi-task principal-agent[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2006, 20(1): 24-26.)

作者简介

张叶卉(1999—), 女, 硕士生, 从事供应链管理的研究, E-mail: zyh9931002@163.com;

朱建军(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事应急管理决策、智能决策与风险分析、物流与供应链管理等研究, E-mail: zhujianjun@nuaa.edu.cn.