

## 基于系统动力学的大型客机供应链质量管控契约优化

周金华, 朱建军, 张玉春

引用本文:

周金华, 朱建军, 张玉春. 基于系统动力学的大型客机供应链质量管控契约优化[J]. *控制与决策*, 2020, 35(1): 215–227.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0649>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 基于混合契约的生鲜电商供应链协调策略

E-commerce of fresh agricultural products supply chain coordination based on compound contract

*控制与决策*. 2018, 33(11): 2104–2112 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0850>

### 零售商竞争下考虑产品商誉的纵向联合促销微分博弈

Differential game on vertical joint promotion considering goodwill and retailers' competition

*控制与决策*. 2017, 32(12): 2210–2218 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1298>

### 制造商主导型双渠道供应链协调决策模型

Supply chain coordination decision model of manufacture-led dual-channel supply

*控制与决策*. 2016, 31(8): 1519–1525 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0866>

### 产量和需求随机下基于收益共享契约的供应链决策

Decision of supply chain based on revenue-sharing contract with random yield and random demand

*控制与决策*. 2016, 31(8): 1435–1440 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0830>

### 大数据服务商参与的三级供应链动态合作策略及其比较

Comparison on dynamic cooperation strategies of a three-echelon supply chain involving big data service provider

*控制与决策*. 2016, 31(7): 1169–1177 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0700>

### 高科技易逝品的三层联合定价与订货决策

Tri-level joint pricing and lot-sizing decisions for hi-tech perishable product

*控制与决策*. 2016(2): 367–372 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1779>

### 不同渠道权力结构下制造商回收闭环供应链绩效分析

Performance analysis of manufacturer collecting closed-loop supply chain under different channel power structures

*控制与决策*. 2016, 31(11): 2095–2100 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1120>

### 公平偏好、参照点效应和三级供应链的运作

Fairness preference, reference point effect and operation research in three layer supply chains

*控制与决策*. 2015, 30(5): 859–864 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.0121>

# 基于系统动力学的大型客机供应链质量管控契约优化

周金华<sup>1†</sup>, 朱建军<sup>1</sup>, 张玉春<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106; 2. 兰州理工大学 经济管理学院, 兰州 730050)

**摘要:** 研究再制造视角下我国大型客机供应链质量控制问题. 根据大型客机制造三级供应链中供应商、主制造商及销售商的运作特点, 刻画三者内在的动力学参数特征; 构建基于质量奖惩和成本分摊的供应链控制契约, 建立主制造商质量控制契约协调优化规则; 设计大型客机供应链质量控制仿真的系统动力学模型; 以液压系统为例仿真分析管控策略, 并通过对比分析得出管控策略的有效性.

**关键词:** 大型客机供应链; 质量控制; 契约协调; 再制造; 系统动力学

中图分类号: C931

文献标志码: A

## Contracts and optimization to quality control in supply chain of large-scale passenger aircraft based on system dynamics

ZHOU Jin-hua<sup>1†</sup>, ZHU Jian-jun<sup>1</sup>, ZHANG Yu-chun<sup>2</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Economics and Management, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The paper studies the supply chain's quality control of China's large-scale passenger aircrafts from the perspective of remanufacturing. The dynamic parameter characteristics among suppliers, main manufacturers and retailers are described according to the operation of the three-level supply chain of large-scale passenger aircrafts. And the control contracts based on the quality reward-punishment and cost allocation in the supply chain are built, and the rules of contracts coordination of the main manufacturer are established. The paper also designs a quality control and coordination system dynamics model for the three-level supply chain of China's large-scale passenger aircrafts. Finally, we emulate and analyze the validity of the system dynamics(SD) model through a sample of a hydraulic system.

**Keywords:** large-scale passenger aircraft; quality control; contracts coordination; remanufacturing; system dynamics

## 0 引 言

大型客机制造属于典型的复杂产品系统,其制造质量控制对确保大型客机研制过程高效运行具有重要意义<sup>[1]</sup>. 大型客机制造具有高成本、技术密集等重要特征,由众多供应链上下游企业协同生产和制造,产品质量反映了整个供应链企业质量水平及企业间质量管理协同水平的高低,因此,其制造质量控制不仅需重点关注过程质量控制,还需聚焦供应链上下游企业质量控制的协调. 大型客机的循环再制造可以将旧客机改装成其他用途的飞机,可将其中还具备使用价值的零部件直接循环利用或经逆向供应链循环再制造后利用,在工业技术水平及国民经济发展中扮演着重要的作用<sup>[2]</sup>. 目前我国大型客机制造产业还处于初始发展阶段,建设规模、工程质量等方面存在极大不确定性,着眼于大型客机再制造供应链质量控制

及研究供应链上下游企业质量决策协调,成为未雨绸缪而又亟待解决的科学问题.

从理论研究来看,供应链质量控制的研究较为丰富,包括供应链产品质量建模与控制、供应链企业质量控制激励等方面,典型的成果有:Hwang等<sup>[3]</sup>从评估和认证视角监测供应商质量努力信息并以惩罚为主要策略实现卖方质量控制;Yan等<sup>[4]</sup>研究如何激励供应商进行质量改进,认为在质量信息不对称情形下设计合理的质量契约能够有效激励供应商质量改进. 随着供应链的不断发展及循环经济要求,逆向物流及再制造闭环供应链应运而生,再制造质量问题逐渐成为经济发展研究的新要求. 主要集中在再制造产品质量水平对再制造供应链生产决策影响、再制造产品过程质量控制及企业再制造质量水平决策等方面. 如谢家平等<sup>[5]</sup>研究产品质量内生时,如何优化

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-07-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71171112, 71502073); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYCH17\_0223).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: zhoujh0891@163.com.

再制造的生产决策问题;刘明周等<sup>[6]</sup>以再制造装配过程为研究视角,从工序质量控制的角度研究了再制造产品质量控制;Panagiotidou等<sup>[7]</sup>研究了回收质量信息不完全情形下的再制造供应链制造及再制造产品批量的联合优化.值得一提的是少数研究探讨了供应链质量控制协调问题,如张玉春等<sup>[8]</sup>基于系统动力学研究了闭环供应链的质量控制问题,认为收益共享契约能够有效协调闭环供应链质量控制,得出了再制造条件下的二级闭环供应链质量控制协调方案.

对复杂产品系统及大型客机制造的关键问题研究是相关研究的热点<sup>[9-10]</sup>,复杂产品、大型客机“主供”模式的利益分配与协调、大型客机质量管理流程优化、供应商质量控制等方面是现有研究的重点.大型客机属于典型的复杂产品系统,通常采取“主供”模式生产运作,Chen等<sup>[11]</sup>基于协同论对大型客机研制主供模式的合作机制进行了研究;Zhao等<sup>[12]</sup>从博弈视角研究“主供”供应链的协调问题,通过设计利润激励机制激励供应商投入更多的努力以确保主制造商与供应商的长期合作关系;易凯凯等<sup>[13]</sup>研究了不完全信息下的大型客机“主供”供应链主制造商与供应商的协同合作策略.鉴于复杂产品制造质量控制在实现复杂产品系统价值链提升、成本控制以及制造业发展方面的重要作用,马珍珍<sup>[14]</sup>对大型客机质量管理流程进行优化,研究了大型客机供应商质量控制优化.

文献调研表明,由于再制造供应链质量控制理论研究依然有待完善,加之大型客机复杂装备制造特性下再制造供应链质量控制的复杂性,如何有效进行大型客机再制造情景下的质量控制、明晰大型客机再制造质量控制与原有供应链质量控制影响的交互、有效协调大型客机再制造过程中众多利益主体质量决策是现有研究有待系统深入的方面.本文的主要创新在于,构建了再制造视角下大型客机三级闭环供应链质量控制的系统动力学仿真模型;考虑大型客机采取的主供模式特征,提出了针对供应商质量管控的质量奖惩契约及应对回收商质量控制的质量成本分摊契约,以期为我国大型客机复杂产品研制闭环供应链质量控制协调提供参考.

## 1 问题描述

大型客机供应链质量管控需要着眼于两个主要特点:一是采取的“主供”模式,这是长期实践的最优研发生产模式;二是大型客机再制造质量控制.如2016年我国哈尔滨为对接“一带一路”建设建成专业飞机循环再制造产业基地,说明大飞机再制造已

对航空产业及循环经济发展产生重要意义.由于中国大型客机自主研发生产还处于初创期<sup>[13]</sup>,主制造商研发能力及综合实力亟待提升,在这种情境下,主制造商如何实现质量管控并有效协调、激励供应链相对强势企业提供更多技术支持,增强其研发和供应链管控能力是我国大型客机主制造商面临的关键问题.从这个角度上,大型客机供应链质量控制的关键问题有必要立足主供模式,并从研发生产环节延伸到销售及回收再制造环节,将大型客机生产研发、销售、回收再制造作为整体进行系统研究.

影响大型客机制造质量水平的因素,贯穿整个供应链企业技术水平差异及质量决策的始终.制造方面的设计定型至生产过程反映了主制造商的技术实力、管理能力等,会对大型客机最终的质量水平产生重要影响;采购面临着供应商的选择,供应商提供产品的质量水平会对大型客机最终的质量水平产生直接影响;交付使用后的技术及售后服务质量水平是影响大型客机销售的重要因素.如何协调各成员的质量决策使其在满足自身利益的同时,又能满足供应链整体利润目标是主制造商重点解决的问题.本文以大型客机制造三级供应链供应商(S)、制造商(M)及销售商(R)为主要研究对象,研究其内在的动力学机制.

### 1.1 供应商参数与系统动力学机制

调研分析供应商在大型客机供应链质量控制中的关键作用,考虑到大型客机供应链按订单生产、生产周期长等特点,供应商主要参数涉及库存、原材料零部件生产、质量水平及利润等几个方面,主要包含供应商的原材料库存、安全库存、安全库存覆盖时间、库存调整率、预期库存、原材料生产率、生产延迟、质量预防水平和总利润等.

#### 1) 供应商库存机制.

大型客机供应链供应商库存管理机制有类似于普通产品供应链的特点,如供应商库存管理需要依据下游企业的订货率、自身预期生产率以及安全库存覆盖时间等确定库存调整率及产品生产率等,但也需要综合考虑大型客机供应链的特色,特别是由于大型客机研制过程中的复杂性和高技术性,主制造商往往难以按时定型.另外,由于供应商协同的不确定性,过程复杂性、产品复杂性、按订单生产等导致生产需要一定周期才能完成,即存在生产延迟.

#### 2) 供应商利润机制.

供应商利润由收入与成本决定,当主制造商订单规定严格的质量标准时,需要重点考虑供应商在此方

面的质量投入成本,包括采购成本、生产成本、库存成本、运输成本、预防成本等.其中供应商质量预防水平指供应商提供原材料及零部件符合质量要求的比率,预防成本是表示大飞机制造过程中供应商为达到相应质量预防水平的成本投入,通常可以采用 Cooper & Ross 广义经典成本函数度量<sup>[7,15]</sup>.

## 1.2 主制造商参数与系统动力学机制

大型客机主制造商扮演整个供应链的系统集成角色,对整个生产流程的质量把控及各供应链企业质量决策的协调直接关系到自身及整个供应链的利润.主制造商的主要参数包含库存、产品生产、主制造商利润及质量控制等方面,主要包含制造商的新品库存、再制造品库存、新品安全库存、安全库存覆盖时间、新品库存调整率、预期新品库存、制造率、再制造率、生产延迟、质量监督水平、质量监督成本和总利润等.

### 1) 主制造商库存机制.

以主制造商的新产品库存为例分析主制造商的库存机制,参考文献[5]等,主制造商库存机制也是基于生产率、订货率、预期产品库存及安全库存等方面的反馈机制,同样需要考虑大型客机生产过程复杂性等因素,其生产过程存在延迟.主制造商的制造率取决于自身的预期产品库存及安全库存覆盖时间等,受限于供应商的原材料供应.再制造产品的库存机制与新产品库存机制类似,不再赘述.

### 2) 主制造商利润机制.

主制造商的总收入主要由两部分组成:一部分为新产品的销售收入;另一部分为再制造产品的销售收入.综合考虑主制造商的新产品及再制造产品运营机制,参考文献[8]等关于主制造商的成本结构表征,主要由采购成本、生产成本、库存成本以及质量监督成本等组成.任何成本变动均能够引起主制造商利润的变化,质量监督成本是主制造商质量控制成本的决定因素.

### 3) 主制造商质量控制机制.

主制造商的质量控制是大型客机供应链质量控制的关键,主制造商能对供应商提供原材料质量水平检测,制造质量及发展状况主要取决于生产及销售环节.参考文献[15-16]等,主制造商工序能力指数  $C_p$  能测量生产过程能力对技术标准等方面的要求,工序质量能够有效测量主制造商的生产过程及产品质量状况,因此以工序质量水平  $C_p = T/6\sigma$  测量产品质量水平,其中  $T$  为公差,  $\sigma$  为标准差.参考文献[15]等,主制造商需要通过检测来验证 S、R 提供的原材料及回

收产品是否达标,这会对应一定的检测投入,将其称为主制造商 M 质量监督成本,以 Cooper & Ross 广义经典成本函数度量.

## 1.3 销售商参数与系统动力学机制

参考文献[17],由于销售商最接近终端市场,熟悉掌握市场状况,同时现有研究证明距离终端市场最近的供应链成员负责回收成本最低,本文考虑销售商负责回收.大型客机作为技术密集型产品,其销售环节的质量状况影响供应链效率,参考现有研究以销售服务质量水平作为此部分的度量,销售商对新产品及再制造产品不同的销售及售后服务等决定新产品质量水平及再制造产品质量水平,分别记为服务质量水平 1、服务质量水平 2,用以表示函数度量<sup>[18]</sup>.销售商 R 按照主制造商 M 的回收要求进行产品的回收与处理,为达到主制造商的回收标准,销售商 R 需要进行回收投入,相应产生的成本称为 R 回收努力成本,同时还包括回收成本、库存成本、订货成本、运输成本等.

销售商的库存、利润机制与供应商及主制造商 M 的库存及利润机制类似,不再赘述.

## 1.4 再制造视角下的差别定价机制

从大型客机研制来看,经济性是影响大型客机需求的重要因素之一,价格是影响大型客机订单量的重要因素,但再制造后的大型客机会存在不同形式,如改装成其他用途或者使用部分零部件再制造,因此有必要对新产品及再制造产品实行差别定价.对于按订单生产的大型客机制造来说,是否具备适航认证等质量标准会影响我国大型客机市场需求的分布,若无法获取适航认证等将会影响我国大型客机进军欧美市场并与波音、空客等老牌主制造商竞争,质量水平也是影响我国大型客机市场需求的重要因素.依据文献[17]等研究,市场需求由价格及质量水平决定,不同之处在于,大型客机新产品及再制造产品需求会彼此影响,主要取决于二者的性价比,因此价格  $P_i (i = 1, 2)$  分别代表新产品及再制造产品市场价格,质量水平  $q_i, q_j (i = 1, 2, i \neq j)$  分别代表新产品、再制造产品质量水平,是影响大型客机需求的关键因素,得出大型客机三级供应链的需求函数为  $D_i = \alpha - \beta P_i + \gamma q_i - \mu q_j$ .其中:  $\beta$  为产品价格弹性,  $\gamma$  为质量弹性,  $\mu$  为新旧产品替代系数,即新旧产品异质并进行差别定价.

## 2 质量控制契约协调 SD 模型构建

### 2.1 主制造商质量控制协调契约模型建立

主制造商可选择对供应商提供产品的质量水平进行检测以防止产生外部损失,考虑到在一些情况

下,主制造商的核心部件研发技术能力相对较弱,供应商可能存在以次充好行为,导致主制造商处于高成本、低质量的被动地位,对此提出应对道德风险及逆向选择的契约模型。

1) 基于质量奖惩的供应链控制契约设计。

调研发现,供应商在大型客机质量控制中占据重要的地位,如主制造商向国外知名企业派克宇航公司采购液压系统,主制造商的初始要求以1000 PSI的标准提供,但依据派克宇航公司长期的供应经验,较为合理的标准应该为1200 PSI或者1500 PSI,经此大型客机主制造商论证后得出供应商提供的技术标准更为合理。可以看出主制造商因为设计能力不完善可能会造成很多损失,而相对强势供应商则更有能力和经验提供质量水平较高的产品。从长期来看,供应商可能因为不需为主制造商要求的低质量预防水平承担损失而选择安于现状不进行质量水平提升和改进,这对主制造商来说不但需要花费较高的检测成本也会因此而耽误生产计划。大型客机主制造商为规避这种潜在损失,可对相对强势供应商进行激励,参考现有研究认为质量奖惩契约可作为一种有效的激励策略。主制造商以质量奖惩契约对液压系统供应商进行激励,当供应商提供的液压系统质量水平不达标时,对其进行一定额度的惩罚,当供应商提供的液压系统质量水平超过谈判规定的质量水平时,对其所做的质量改进施以一定额度的奖励进行激励。对于主制造商来说,其质量决策变量为质量奖惩比例 $\alpha$  ( $\alpha \geq 0$ ),供应商的质量决策变量为提供质量水平高于还是低于谈判所规定的液压系统。具体契约 $C_t$ 为:主制造商对供应商产品质量水平要求为 $\{L, H\}$ ,其中 $L$ 代表

供应商提供液压系统的最低质量规格,若低于 $L$ ,则主制造商依据自身的质量监督成本制定惩罚额度,即 $\alpha * M$ 质量监督成本; $H$ 代表奖励基准,当供应商提供的液压系统规格不低于 $H$ 或液压系统供应商提供更科学的系统输入参数时,为激励供应商,主制造商对供应商进行同样额度的奖励,即 $\alpha * M$ 质量监督成本。

2) 基于成本分摊的供应链控制契约设计。

在大型客机制造过程中,如果销售商选择追求高的回收比例,则对销售商来说,不但要投入的固定投资会加大,而且加大回收环节的固定投资将会使得销售商在销售环节的投资能力受到限制,从长期实施效果来看,可能出现因为较高的回收投资而影响对主营业务投资的风险。为激励销售商提升回收比例,同时又不使销售商过高的回收环节投入影响销售环节的服务质量,以液压系统的回收为例,主制造商可与销售商进行谈判,设计质量成本分摊契约,即当销售商回收的液压系统比例较高时,主制造商为降低销售商因回收费用投入带来的经营风险,承诺以一定的比例 $\beta$  ( $\beta \geq 0$ )对其回收努力成本进行分摊。对于制造商来说,其质量控制决策变量为质量成本分摊比例,而供应商的质量决策变量则为选择高回收比例还是维持现状。因此成本分摊契约为: $M$ 成本分摊 =  $\beta * R$ 回收努力成本。

2.2 主制造商质量控制协调契约优化规则

依据前文对大型客机三级供应链质量控制的系统动力学机制以及质量控制契约协调系统动力学机制分析,可以详细建立系统动力学流程图,即再制造视角下我国大型客机供应链质量控制契约协调SD模型,如图1所示。

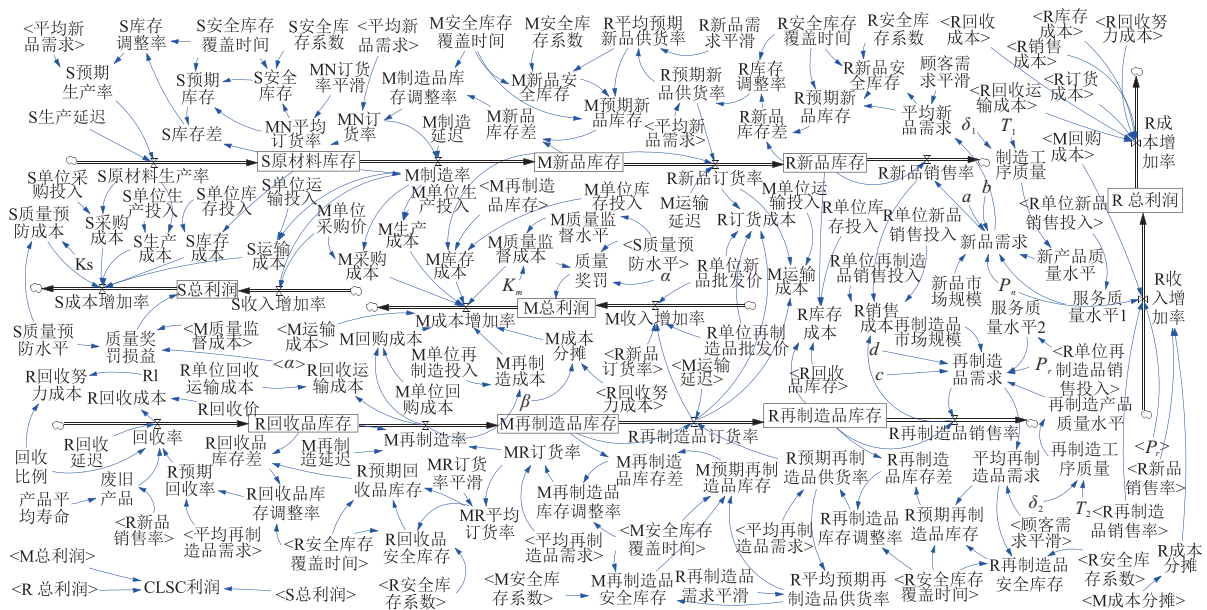


图1 质量控制契约协调SD模型(系统流图)

模型主要是由供应商子系统、主制造商子系统以及销售商子系统组成的高阶非线性反馈系统。令  $T$  为仿真周期,  $t$  代表系统第  $t$  时刻,  $\zeta$  表示延迟。当质量奖惩比例  $\alpha$  以及质量成本分摊比例  $\beta$  均为 0, 即主制造商不使用契约激励, 此时各成员决策均以无契约时自身利润最大化为决策目标, 令  $\pi_M$ 、 $\pi_S$ 、 $\pi_R$  分别为主制造商、供应商、销售商收益, 各成员的收益是在整个供应链系统所有因素反馈机制下的高阶次非线性系统, 以状态变量利润表征系统状态, 其决策规则为综合其他成员质量决策基础上选择最优质量水平最大化自身收益, 即决策规则 NP<sup>1</sup> 为

$$\begin{aligned} \max \pi_M &= \int f(q_i, P_j, c_g^M, c_h^S, c_l^R, q_n, t, \zeta) dq_M, \\ \max \pi_S &= \int f(q_i, P_j, c_g^M, c_h^S, c_l^R, q_n, t, \zeta) dq_S, \\ \max \pi_R &= \int f(q_i, P_j, c_g^M, c_h^S, c_l^R, q_n, t, \zeta) dq_R. \end{aligned}$$

当质量奖惩比例  $\alpha$  以及质量成本分摊比例  $\beta$  不为 0, 即主制造商使用契约激励各成员决策最大化供应链利润, 令  $\pi_M^Y$ 、 $\pi_S^Y$ 、 $\pi_R^Y$  分别为主制造商、供应商、销售商收益,  $\pi_T^Y$  为契约协调下供应链总利润, 各成员的收益是在整个供应链系统所有决策反馈机制下的高阶次非线性系统, 反馈机制如图 2 所示。主制造商是大型客机供应链质量控制的主导者, 从供应商原材料供应、主制造商制造, 到需求实现, 再到销售商回收给主制造商再制造的整个过程, 三者之间的物流、资金流、信息流以及市场需求信息不断地交互反馈, 形成了系统的反馈机制。

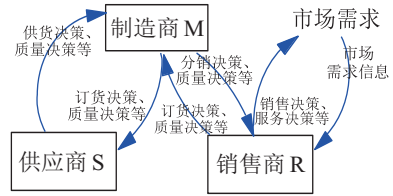


图 2 决策反馈机制

以状态变量利润表征系统状态, 系统决策目标为主制造商设计契约最大化供应链利润并保证供应链成员接受契约时的利润不低于无契约时的利润, 即实现帕累托改进, 主要变量及方程如表 1 所示, 决策规则 NP<sup>2</sup> 为

$$\begin{aligned} \max \pi_T^Y &= \pi_M^Y + \pi_S^Y + \pi_R^Y, \\ \text{s.t.} & \left\{ \begin{aligned} \pi_M^Y &= \int f(q_i, P_i, c_g^M, c_h^S, c_l^R, q_n, t, \zeta, \alpha, \beta) d(q_M, \alpha, \beta); \\ \pi_S^Y &= \int f(q_i, P_i, c_g^M, c_h^S, c_l^R, q_n, t, \zeta, \alpha, \beta) d(q_S, \alpha, \beta); \\ \pi_R^Y &= \int f(q_i, P_i, c_g^M, c_h^S, c_l^R, q_n, t, \zeta, \alpha, \beta) d(q_R, \alpha, \beta); \\ \pi_M^Y &\geq \pi_M, \pi_S^Y \geq \pi_S, \pi_R^Y \geq \pi_R; \\ c_n &= \frac{1}{2} K_n c_1^n, 0 \leq q_i \leq 1, 0 \leq c_n \leq \frac{1}{2} K_n, \\ t &\leq T, i = 1, 2, 3, 4, n = S, M, R, \\ j &= 1, 2, \alpha \geq 0, \beta \geq 0. \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

表 1 主要变量系统动力学方程

变量类型	变量名称	变量含义	系统动力学方程
速率变量	M再制造率	主制造商再制造产品生产量	DELAY1(MIN(MR 订货率, R 回收品库存), M再制造延迟)
	R新品订货率	销售商新产品订货量	DELAY1(MIN(M新品库存, R预期新品供货率), M运输延迟)
	R再制造品订货率	销售商再制造产品订货量	DELAY1(MIN(M再制造品库存, R预期再制造品供货率), M运输延迟)
	R新品销售率	销售商新产品销售量	MIN(R新品库存, 新品需求)
	R再制造品销售率	销售商再制造产品销售量	MIN(R再制造品库存, 再制造品需求)
	回收率	销售商产品回收量	DELAY1(MIN(废旧产品*回收比例, R预期回收率), R回收延迟)
辅助变量	制造工序质量	主制造商生产工序质量	$T_1/\sigma_1$ ( $T_1$ 为原材料公差, $\sigma_1$ 为标准差)
	再制造工序质量	主制造商再制造工序质量	$T_2/\sigma_2$ ( $T_2$ 为回收品公差, $\sigma_2$ 为标准差)
	平均新品需求	新产品需求平滑	SMOOTH(新品需求, 顾客需求平滑)
	R预期新品库存	销售商预期新产品库存	平均新品需求 * R安全库存覆盖时间
	R新品库存差	销售商预期库存与产品库存差值	MAX(R预期新品库存 - R新品库存, 0)
	R库存调整率	销售商库存调整量	R新品库存差 / R库存调整期
	废旧产品	使用寿命结束的产品数量	DELAY1(R新品销售, 产品平均寿命)

从建立的模型来看, 大型客机研制质量控制是个复杂的系统工程, 主制造商不仅要提升自身的质量控制能力, 更要全面控制协调大型客机供应链各环节以及各成员的质量控制决策。各供应链成员之间的质量决策依赖于彼此的竞争和合作关系, 为了更清晰大

型客机供应链质量控制的内在机制, 下文通过系统动力学仿真软件 VENSIM 进行仿真分析。首先通过无契约控制机制的仿真分析得出影响新产品、再制造产品质量水平的重要因素及其对大型客机供应链质量控制机制的影响; 在此基础上通过加入质量控制

机制即质量控制契约协调机制,仿真分析得出有效的质量控制契约及契约控制的有效范围;最后通过对比分析验证所设计策略的有效性.

### 3 数值仿真及分析

#### 3.1 数值及模型有效性测试

##### 3.1.1 数值设置

对国内某大飞机主制造商调研显示,燃油及液压系统研制是很重要的环节,主要与国外某知名燃油液压系统供应商合作,此供应商具备给国际先进航空制造企业提供液压系统的长期经验,因此如何对供应商管控并激励其在输入设计时提供支持,对主制造商质量控制具有重要意义. 本文结合现有研究以及中国大型客机自主研发的实际情况,研究大飞机主制造商及其液压系统供应商以及销售商组成的三级供应链系统,重点运用部分调研数据、资料数据及文献研究数据作为算例仿真数据设置的基本依据,部分常量初始设置如表2所示.

表2 常量设置

变量	变量含义	数值
M新制造延迟	M新产品生产周期	3
M再制造延迟	M再制造产品生产周期	3
M运输延迟	M运输周期	3
M单位回购成本	M回购回收产品单位价格	5
M安全库存覆盖时间	M安全库存周期	4
$a$	新产品价格弹性系数	600
$c$	再制造产品价格弹性系数	500
M单位再制造成本	M再制造单位成本	2
$P_n$	新产品单位价格	100
$P_r$	再制造产品单位价格	80
$\alpha, \beta$	契约比例系数	0
R回收延迟	R产品回收周期	3
R回收价格	R产品单位回收价格	1
顾客需求平滑	平均顾客需求	3
R安全库存覆盖时间	R安全库存周期	4
$b$	新产品质量系数	600
$d$	再制造产品质量系数	500
产品平均寿命	产品平均使用周期	50
R单位新品批发价	R单位新产品采购价格	50
R单位再制造品批发价	R单位再制造产品采购价格	40

注:模型中所有变量均采用 Units Dmnl(无量纲).

对于服务质量水平而言,销售商对销售环节的销售投入以及售后服务等投资决定了服务质量水平,通常随着投资的增加服务质量水平也会增加,但质量水平不会随着投资的增加无限制增加,而是符合技术进步曲线<sup>[16]</sup>,因此借助表函数及插值法设置相应的服务质量水平如下:

服务质量水平1 =

with lockup (R单位新品销售投入,

[(0, 0) - (1, 1)], (0, 0), (0.058 104, 0.271 93),

(0.146 789, 0.526 316), (0.235 474, 0.618 421),

(0.345 566, 0.697 368), (0.464 832, 0.771 93),  
(0.559 633, 0.837 719), (0.675 841, 0.899 123),  
(0.795 107, 0.938 596), (1, 1));

服务质量水平2 =

with lockup (R单位再制造品销售投入,

[(0, 0) - (1, 1)], (0, 0), (0.082 568 8, 0.210 526),

(0.183 486, 0.399 123), (0.284 404, 0.552 632),

(0.412 844, 0.697 368), (0.553 517, 0.824 561),

(0.712 538, 0.916 667), (1, 1)).

##### 3.1.2 模型测试

1) 基本市场规模是在某个区间内的随机需求,假定基本市场规模 = RANDOM UNIFORM(500, 800, 3);以时间为基础建立的系统动力学模型具有极其复杂的动态关系,需对模型进行检测. 以软件对模型的测试“check model”“units check”得出,模型通过逻辑测试及变量量纲一致性测试. 为进一步检测模型的动态行为模式对实际系统的模拟,进行阶跃需求测试.

2) 阶跃需求测试:依据文献[18]等,阶跃需求测试能够更进一步说明模型的真实性及有效性,因此本文使用两组阶跃需求对所建立的模型进行测试,新品需求阶跃测试函数CONS<sub>1</sub>、再制造品需求阶跃测试函数CONS<sub>2</sub>分别为

$$CONS_1 = 300 + STEP(800, 100),$$

$$CONS_2 = 100 + STEP(200, 100).$$

仿真系统波动情况如图3所示,可以看出:1) 各级成员的新品库存水平,在  $t = 100$  时刻新品需求突增,从而导致M、S、R新品库存存在该时刻产生明显的震荡,得益于新品需求的突增,震荡结束后各供应链企业的库存水平维持在一个较高的安全状态以响应较高水平的大型客机新品需求. 同时对比M、S、R库存水平可以看出,震荡后S的库存水平高于M的库存水平并高于R的库存水平,即产生了供应链牛鞭效应. 2) 各级成员的再制造品库存水平如图3所示,  $t = 100$  时刻新品需求突增,导致M、S、R再制造品库存水平出现反复震荡,并在一段时间后趋于稳定状态,这是由于大型客机三级供应链质量控制的平衡型回路主导其恢复稳定状态.

通过对模型的测试可以看出,在不同测试方案下,模型测试、量纲测试以及阶跃需求测试的系统动态行为模式都能够很好地模拟相同条件下的实际系统. 产生的变化都能够给出合理的解释,说明建立的系统动力学模型能够再现大型客机三级供应链系统的动态行为模式.

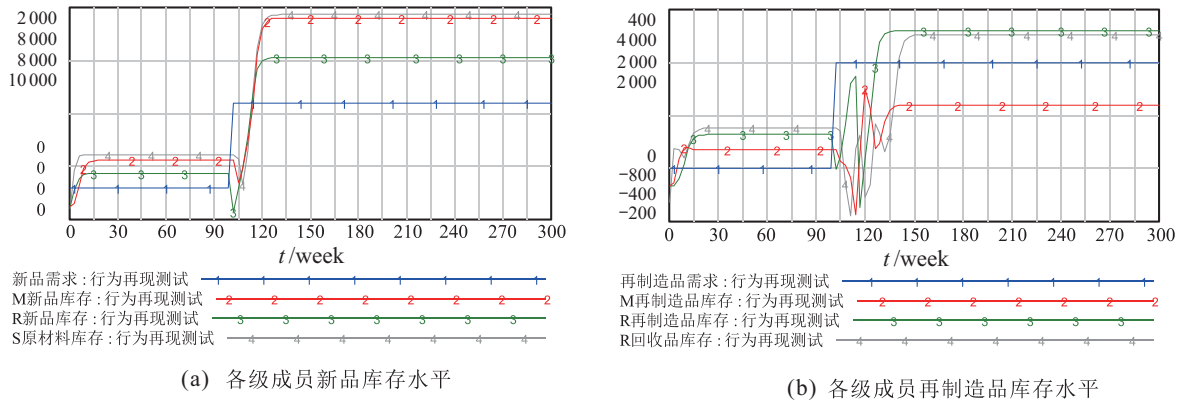


图3 各级成员库存水平变动

3.2 新产品质量控制分析

图4和图5为供应商在液压系统供应时,选择不同的质量预防水平,基准质量标准差为 $\sigma$ ,以单位标准差度量,分析质量标准差波动为 $3\sigma$ 时的质量控制系统.当原材料质量性能标准差分别为 $\sigma_1 = 2, \sigma_2 = 3, \sigma_3 = 4$ 三种情形时,供应链质量水平变动及质量预防水平变动对供应链动态行为影响的仿真结果如图3所示,当供应商液压系统的质量性能波动越小时,大型客机产品质量水平越高,高的新产品质量水平能带来市场对新产品的高的需求量.结合液压系统质量性能标准差波动情况可以看出,新产品质量水平及需求随着原材料质量性能的波动,初期会产生短期的大

幅震荡且原材料质量标准差越大振幅越大,而长期内则趋于小幅震荡.

图4(c)和图4(d)为不同仿真设置条件下各级成员的订货率等变动情况,供应商提供原材料质量波动越小,对应越高的新产品质量水平并产生高的市场需求,而高的市场需求水平能使R新品销售率维持在一个较高的水平.同时R新品销售率及订货率在仿真初期产生较大的震荡后维持在一个较高水平,结合供应商原材料标准差变动可以发现,原材料质量越偏离标准质量水平越容易使得生产和销售产生不稳定性,同样,M制造率及S原材料生产率也在发生较大震荡后恢复稳态.

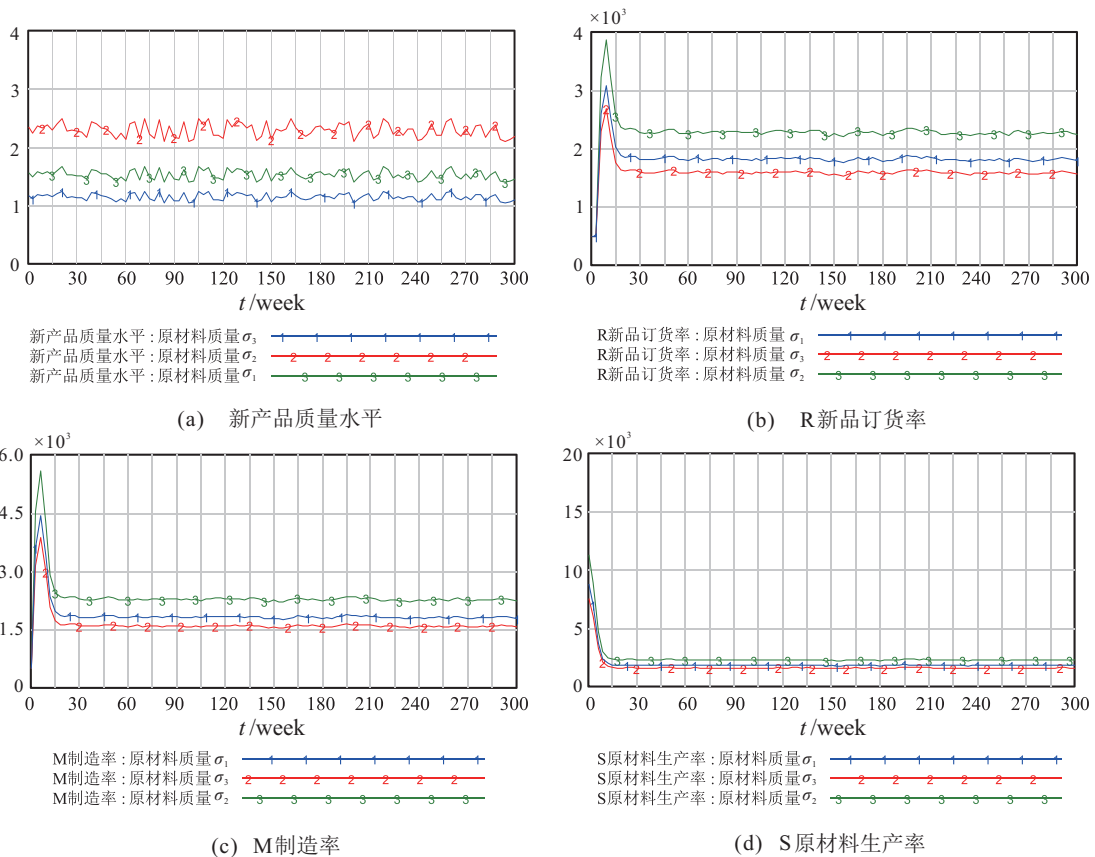


图4 质量及各级成员生产率变动

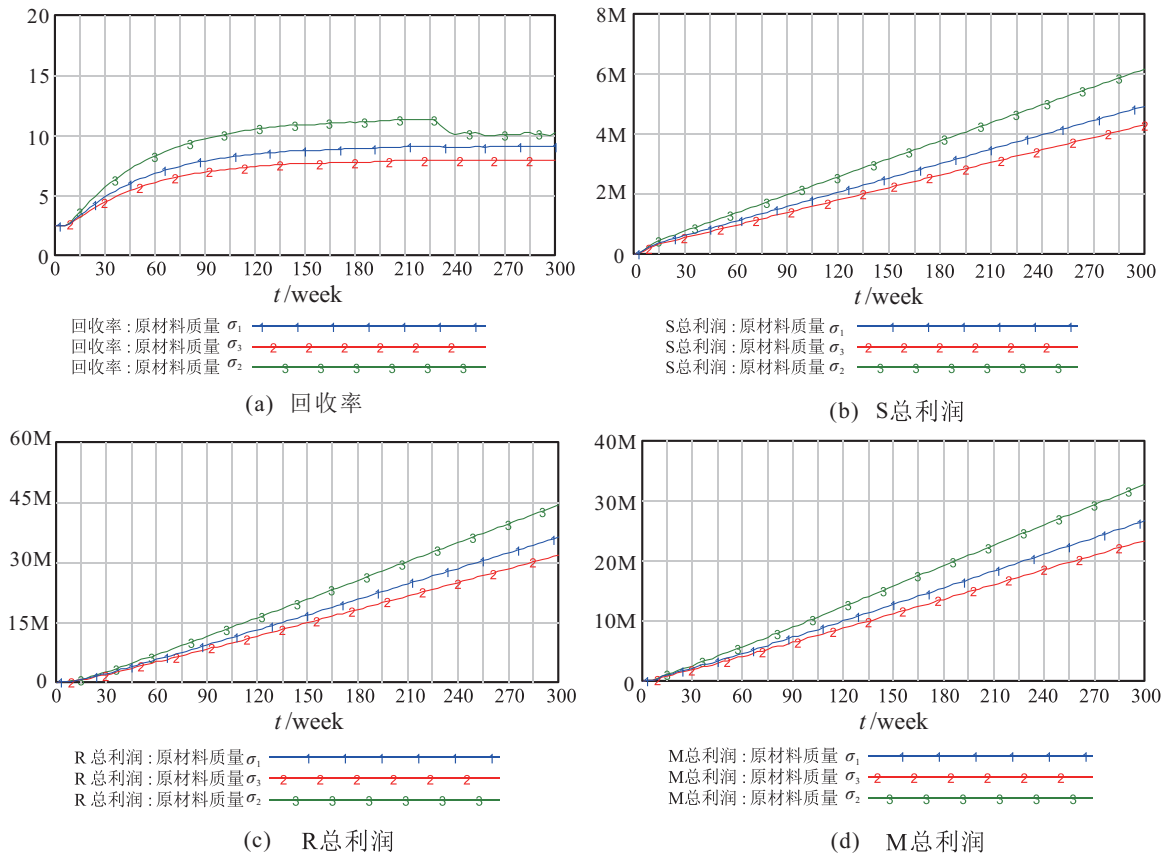


图5 回收率及各级成员利润水平

图5(a)说明,退役大型客机数量的增加使得符合用于再制造需求的回收产品数量越来越多,这使得销售商可回收的废旧产品数量增加,进而提升了销售商的回收率.图5(b),图5(c)和图5(d)结合图4产品质量水平、制造率等的变动分析显示,回收率是影响大型客机再制造的重要因素之一,原材料质量水平波动越小产品质量水平越稳定,且供应链各级成员的总利润水平都处于较高的水平.

图4和图5所有的仿真结果对我国大型客机制造供应链质量控制有重要的管理启示,大型客机的部分重要原材料及零部件,如液压系统、发动机、飞控系统等都属于技术密集型产品,而液压系统、发动机、飞控系统等重要零部件的质量水平也是我国大型客机自主研制水平的重要体现,因此应该重点在这些原材料及零部件方面进行管控,并且需要对供应商制定严格的质量标准,否则原材料质量水平可能会使得大型客机最终的产品质量产生较大波动.

### 3.3 再制造产品质量控制分析

图5(a)为回收品质量 $1 = 4$ 、回收品质量 $2 = 3$ 、回收品质量 $3 = 2$ 时,供应链质量水平变动及质量水平变动对供应链动态行为的仿真结果.如图6所示,回收品质量性能波动越小,再制造产品质量水平越高,高的再制造品质量水平能带来市场对再制造产品的高的需求量.对应回收品质量性能标准差变化及

再制造产品质量、再制造品需求震荡情况分析可以看出,回收品质量波动能够引起再制造产品质量水平的小幅波动,但再制造产品的需求却产生大幅震荡,这说明再制造产品需求对再制造产品质量变化较为敏感.结合大型客机供应链分析,大型客机经再制造后,如果质量性能达不到市场要求,将会很大程度影响大型客机再制造产品需求,长期内甚至影响大型客机循环再制造产业的健康发展.由此可以得出,大型客机再制造产业发展的关键之一是严格控制再制造产品质量.

再制造过程中,对回收产品的质量性能影响较为明显的因素就是回收比例,当销售商追求较高的回收比例时,为保证回收品质量性能需投入较高的管理成本.图6(b)、图6(c)和图6(d)对应回收比例分别为0.5、0.6、0.7时供应链的动态行为模式.图6(b)的仿真结果显示,随着销售商回收比例增加,其回收率也在不断增加,但是当销售商所定回收比例为0.7时,回收率在仿真开始后约150周左右出现短暂下跌并恢复至一个较低的水平,这是由于再制造品需求得到很好的响应后,回收商根据自身库存调整率及平均再制造品需求调整回收率,以一个较低的回收率便可以响应制造商的再制造率.从图6(c)和图6(d)可以看出,高的回收比例下,M的再制造率、R的再制造品订货率、R的再制造品销售率能够更快地恢复至平衡状态,分

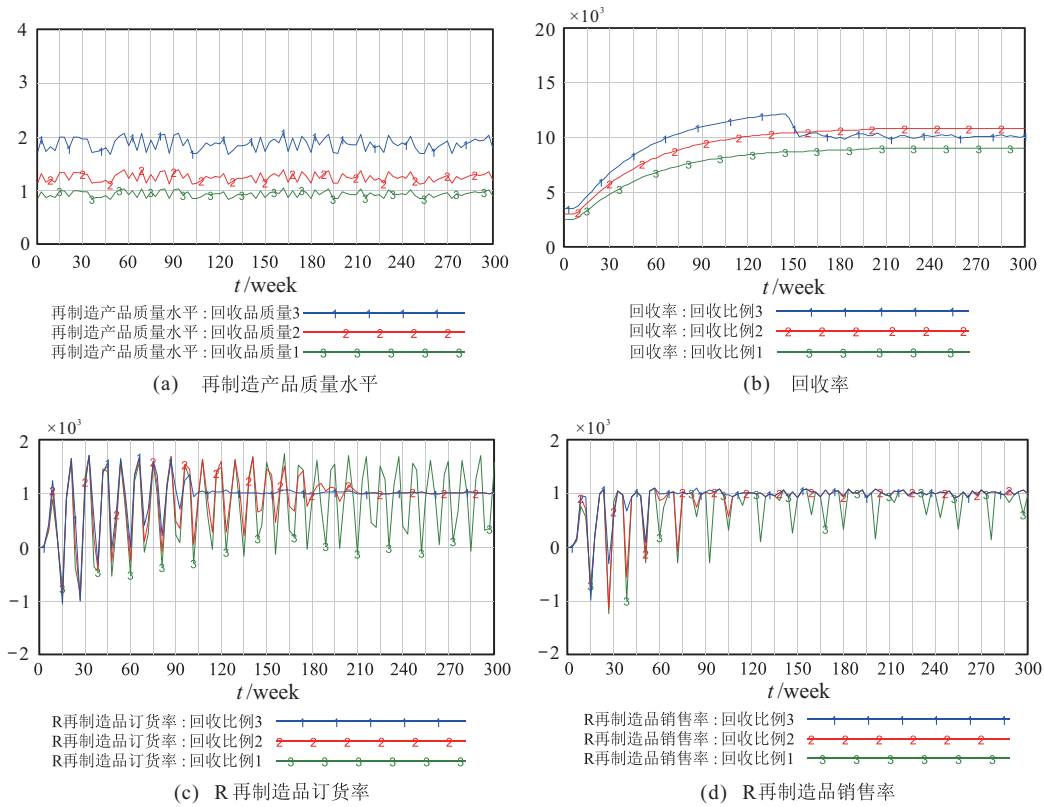


图6 不同回收比例下各级成员订货率等

析利润变化可知高回收比例能够使得供应链制造商及销售商的总利润得到提升,也就是说回收比例增加能使再制造过程更加稳定。

以仿真实验为基础分析,无契约协调时供应商液压系统质量性能、销售商回收产品质量性能、回收比例增加时,系统处于最优水平。认为此时我国大型客机供应链新产品质量水平、再制造产品质量水平的提升均能够使得大型客机主制造商、供应商以及销售商的利润得到提升并能够提升大型客机供应链整体绩效。再制造产品市场需求对再制造产品质量水平的变动较为敏感,是整个大型客机再制造产业的发展关键。为有效应对和减少大型客机新产品供应链的生产震荡,提高各供应链企业的利润,应该严格要求相对强势供应商的产品质量水平。为有效促进大型客机再制造产业的健康发展,需要有效协调销售商回收品质量性能以及回收比例以稳定再制造大型客机的质量水平。因此,中国大型客机主制造商为了更好地实现质量控制,需要严格控制供应商提供产品及销售商提供的回收产品的质量,但供应商及销售商要提供较高质量的产品就会增加相应的成本投入。若主制造商不对二者进行有效激励,则供应商及销售商都不会主动去提升原有的质量水平,以下将设计解决此问题的质量奖惩契约、质量成本分摊契约并通过仿真得出具体实施方案。

### 3.4 契约协调质量控制分析

质量奖惩契约以质量监督成本为基本依据制定奖罚额度,对未达到质量标准的供应商原材料订货量实施惩罚,奖励其质量改进后的高质量原材料供应。质量奖惩契约以一定的违约成本约束供应商的道德风险,同时对供应商的质量改进予以奖励,从而达到供应商原材料及新产品质量控制的目的。质量成本分摊契约以销售商回收产品努力成本为依据设定成本分摊比例,通过分摊销售商的回收成本激励销售商改善提高回收产品质量及回收比例,最终达到回收产品质量控制的目的。对于大型客机质量控制而言,需要同时兼顾新产品及再制造质量管控,同时激励供应商和销售商进行质量控制,因此质量奖惩成本分摊组合契约具有同时兼顾上下游的质量控制与协调的优势。本部分意在通过契约协调质量控制仿真分析得出具体实施方案。

数值仿真的主要目的是得出并验证质量奖惩成本分摊契约是否能够有效协调大型客机供应链质量控制,并最终通过仿真得出质量奖惩成本分摊契约的有效协调范围和方案。仿真契约设置方案如表3所示,表3显示为3种仿真方案,即单独使用契约及契约组合方案,实验策略有2种,即对“质量奖惩契约参数”和“成本分摊契约参数”进行“初始投资”和“投资改进”仿真。值得说明的是3.1节~3.3节均是在契

约比例 $\alpha$ 、 $\beta$ 为0时进行仿真,即在无质量控制措施和质量契约时大型客机三级供应链质量管理机制分析,后续将此仿真设置定义为质量控制“初始投资”. 3.4节通过设置不同的契约参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 取值,仿真分析质量控制措施及契约的有效协调范围,后续将对应的仿真设置定义为质量控制“投资改进”. 当主制造商分别使用质量奖惩契约、质量成本分摊契约或者二者的组合策略协调时,供应商S和销售商R的质量决策既可以是接受契约并改进,也可以不做改进即维持最初的质量水平.

表3 仿真契约设置方案

契约方案	策略	
	质量奖惩契约参数 $\alpha$	成本分摊契约参数 $\beta$
质量奖惩契约	投资改进	初始投资
质量成本分摊契约	初始投资	投资改进
质量奖惩-成本分摊契约	投资改进	投资改进

通过不同的数值算例仿真来实验在既定条件下主制造商如何实现质量控制优化,相应的参数设置如表4所示(数值设置依据同表2),其中 $K_s$ 和 $R_1$ 分别表示供应商质量预防成本规模系数及销售商回收成本

规模系数.

图7为不同方案下服务质量水平变动情况,质量成本分摊及组合契约下服务质量水平2即再制造产品销售环节的服务质量高于质量奖惩契约下的水平,这是由于单独实施质量奖惩契约只是实现了对供应商的原材料质量水平的控制,最终反应在新产品质量水平的提升,这也与图6显示出的产品质量水平变动情况吻合. 同时可以看出,单独实施质量奖惩契约及质量成本分摊契约时,顾客需求总是低于质量奖惩-成本分摊契约协调时的顾客需求,这是因为组合契约条件下,新产品质量水平及再制造产品服务质量同时得到了提升.

图8的仿真结果显示,M总利润、R总利润、CLSC利润水平在单独实施质量奖惩契约时最低,实施质量成本分摊契约时次之,组合契约下最高,S总利润在质量奖惩契约下最低. 这说明,对新产品质量控制来说,供应商的原材料质量水平起主导作用,而最有效的控制方法是实施质量奖惩契约进行协调,但从提升供应链整体效益的角度来说,严把产品质量关很重要,但是服务质量也同样有着至关重要的作用. 总结

表4 参数设置

参数	方案							
	S质量预防水平	$K_s$	$\sigma_1$	$\alpha$	R回收比例	$R_1$	R单位再制造销售投入	$\beta$
初始投资	[0.60, 0.70]	10 000	[3, 4]	0.00	40%	10 000	0.2	0.00
投资改进	[0.71, 0.80]	20 000	[2, 3]	0.65	60%	30 000	0.3	0.40

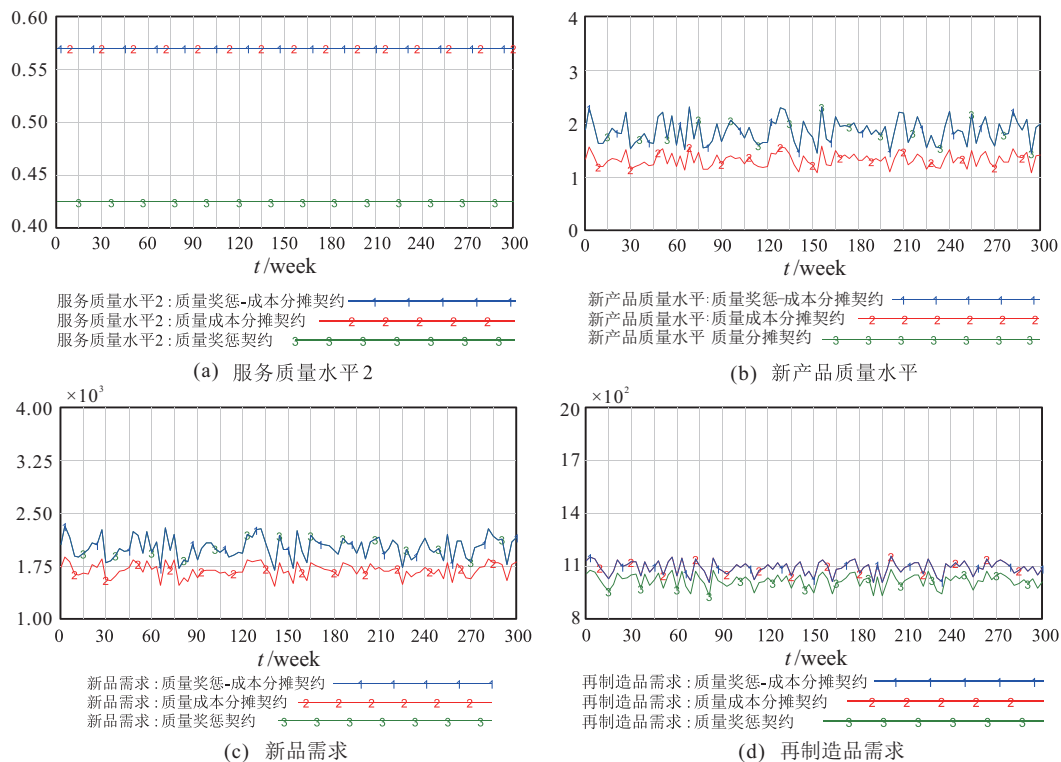


图7 各方案下质量及顾客需求水平

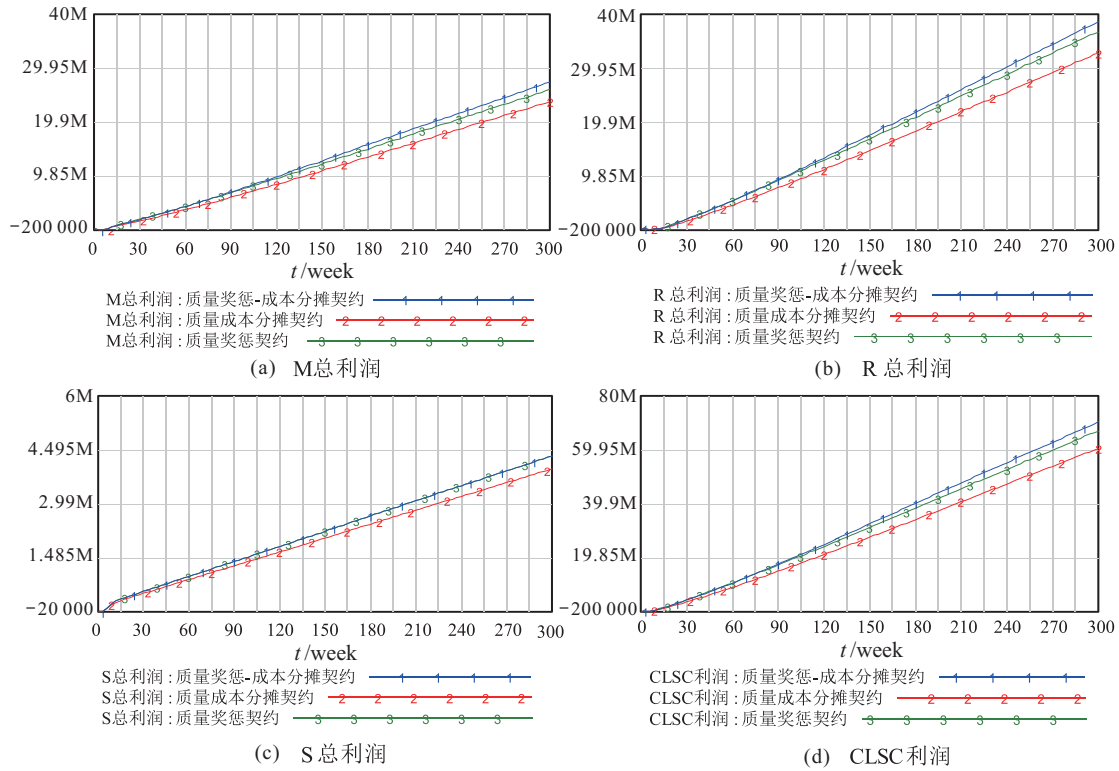


图8 各方案下成员利润水平及CLSC利润

契约协调质量控制仿真分析实验结果,质量奖惩-成本分摊契约是优化大型客机三级供应链质量控制的有效策略,此优化方案下,供应商最优质量预防水平为[0.71 ~ 0.80],主制造商最优契约比例 $\alpha$ 、 $\beta$ 分别为0.65、0.40,销售商最优回收比例为60%。

### 3.5 质量奖惩-成本分摊契约协调有效性分析

契约是供应链协调和管控的重要手段和有效策略,如文献[8]说明了收益共享契约对销售商负责回收的二级闭环供应链产品质量控制的有效性,不仅如此,文献[19]也证明了收益共享契约在协调两个主导企业博弈、利润分配及渠道选择策略方面的优势。究其本质是通过影响供应链成员之间的利润分配达到供应链协调和控制的目的,但不同于经典的收益共享契约,成本分摊契约及奖惩契约的优势则是通过改变供应链企业之间的成本结构达到供应链协调与控制的目的,如文献[20]验证了可变质量成本分摊契约在LR-型模糊需求的两级供应链质量控制中的优势,文献[21]研究了4种不同类型契约对市场需求和质量控制要求互动环境下的供应链协调效果,并证明了质量奖励惩罚契约的有效性。为验证本文设计的质量奖惩-成本分摊组合契约在协调大型客机供应链质量控制中的有效性,本文利用文献[8, 19-21]的收益共享契约、成本分摊契约、奖励惩罚契约的思想进行对比分析。尽管与文献的相关研究存在区别,但利用其主要思想在本文所建立的模型中进行仿真对比,一

方面可以验证现有策略的适用性,另一方面一定程度上也能够针对性地对本文设计的大型客机供应链质量管控策略进行有效性检验。

如表5所示,同本文的仿真设置一致,初始投资是不使用质量控制契约的仿真数据和结果,a方案为文献[21]使用策略,b方案对应文献[20]、c方案对应文献[8]及[19]的协调策略,d方案为本文的质量管控策略,表6为协调效果仿真数据对比分析,考虑到篇幅受限,表5在不影响结论的前提下,仅选取部分数据展开分析。“↑”、“-”、“↓”分别表示与初始投资相比相应指标值提升、不变和下降。可以看出:a方案奖励惩罚契约下,服务质量水平2(由 $q_4$ 表示)无变动,b方案成本分摊契约下新产品质量水平 $q_1$ 无变动,c方案下新产品质量水平 $q_1$ 、再制造产品质量水平 $q_2$ 均无提升,而d方案质量奖惩-成本分摊契约能够协调大型客机供应链质量及总利润、各级成员利润 $\pi_M$ 、 $\pi_S$ 、 $\pi_R$ 均提升。为进一步分析各方案的协调效率,定义各方案总利润与初始投资总利润的平均增加率为契约协调效率,为初始投资总利润,计算依据如下:

$$\Delta\pi_{T_i}^Y = \frac{1}{T} \sum_{(time=0)}^{300} \frac{\pi_{T_i}^Y - \pi_{T_0}^Y}{\pi_{T_0}^Y} \times 100\%$$

得出 $\Delta\pi_{T_a}^Y = 22.25\%$ ,  $\Delta\pi_{T_b}^Y = 9.20\%$ ,  $\Delta\pi_{T_c}^Y = 8.30\%$ ,  $\Delta\pi_{T_d}^Y = 25.74\%$ ,  $\Delta\pi_{T_d}^Y > \Delta\pi_{T_a}^Y > \Delta\pi_{T_b}^Y > \Delta\pi_{T_c}^Y$ ,通过对比分析得出各方案均能够协调大型客机质量控制供应链,但本文设计的质量奖惩-成本分

摊契约效果更优.

表5 质量奖惩成本分摊契约协调有效性分析

	time	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>	$\pi_T^Y(10^6)$	$\pi_S$	$\pi_M$	$\pi_R$
初始投资	0	1.32	0.78	0.39	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
	51	1.52	0.68	0.39	0.42	6.43	0.52	2.89	3.02
	102	1.36	0.82	0.39	0.42	15.63	0.95	6.70	7.99
	150	1.23	0.79	0.39	0.42	24.82	1.34	10.59	12.89
	201	1.09	0.74	0.39	0.42	34.99	1.77	14.77	18.45
	252	1.14	0.74	0.39	0.42	45.16	2.19	19.08	23.90
	300	1.41	0.71	0.39	0.42	54.69	2.58	23.08	29.03
a. 奖励惩罚契约	0	1.87	0.97	0.58	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00
	51	2.21	0.85	0.58	0.42	8.57	0.84	3.47	4.26
	102	1.88	1.03	0.58	0.42	19.92	1.55	7.79	10.57
	150	1.74	0.99	0.58	0.42	31.09	2.23	12.14	16.73
	201	1.47	0.93	0.58	0.42	43.29	2.95	16.80	23.54
	252	1.56	0.93	0.58	0.42	55.69	3.66	21.53	30.50
	300	1.98	0.88	0.58	0.42	67.09	4.33	26.02	36.74
b. 成本分摊契约	0	1.32	0.97	0.58	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00
	51	1.52	0.85	0.58	0.57	7.17	0.76	2.92	3.48
	102	1.36	1.03	0.58	0.57	17.32	1.42	6.84	9.07
	150	1.23	0.99	0.58	0.57	27.44	2.04	10.85	14.55
	201	1.09	0.93	0.58	0.57	38.62	2.69	15.14	20.78
	252	1.14	0.93	0.58	0.57	49.93	3.35	19.59	26.99
	300	1.41	0.88	0.58	0.57	60.46	3.97	23.73	32.77
c. 收益共享契约	0	1.32	0.78	0.50	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00
	51	1.52	0.68	0.50	0.49	7.17	0.56	3.29	3.32
	102	1.36	0.82	0.50	0.49	17.28	1.01	7.81	8.46
	150	1.23	0.79	0.50	0.49	27.20	1.43	12.29	13.47
	201	1.09	0.74	0.50	0.49	38.14	1.88	17.18	19.08
	252	1.14	0.74	0.50	0.49	49.11	2.32	22.17	24.62
	300	1.41	0.71	0.50	0.49	59.50	2.75	26.78	29.98
d. 质量奖惩-成本分摊契约	0	1.87	0.97	0.58	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00
	51	2.21	0.85	0.58	0.57	8.45	0.84	3.41	4.20
	102	1.88	1.03	0.58	0.57	20.44	1.55	7.99	10.90
	150	1.74	0.99	0.58	0.57	32.42	2.23	12.69	17.51
	201	1.47	0.93	0.58	0.57	45.38	2.95	17.77	24.66
	252	1.56	0.93	0.58	0.57	58.27	3.66	22.71	31.90
	300	1.98	0.88	0.58	0.57	70.34	4.33	27.38	38.63

表6 协调效果仿真数据对比分析

	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>	$\pi_T^Y$	$\pi_S$	$\pi_M$	$\pi_R$
a	↑	↑	↑	-	↑	↑	↑	↑
b	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
c	-	-	↑	↑	↑	↑	↑	↑
d	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

$\Delta\pi_{Ta}^Y = 22.25\%$      $\Delta\pi_{Tb}^Y = 9.20\%$   
 $\Delta\pi_{Tc}^Y = 8.30\%$      $\Delta\pi_{Td}^Y = 25.74\%$

通过契约协调仿真分析认为,再制造策略能够为我国大型客机自主研发“初创期”的主制造商带来竞争优势,再制造产品质量水平会影响大型客机再制造产业的发展.为有效实现大型客机供应链质量控制与各级供应链企业质量决策的有效协调,设计质量奖惩-成本分摊契约能够有效激励供应商进行原材料质量控制并改善新产品质量水平,激励销售商提升回收产品质量并提升再制造产品质量及服务质量水平.我国大型客机供应链主制造商的有效质量管控

策略需兼顾自身技术能力的提升以及供应链上下游成员质量决策协调,最终助力我国大型客机供应链的市场开拓和主制造商能力提升.

### 4 结论

本文所构建的中国大型客机再制造供应链质量控制契约协调系统动力学模型,通过了敏感性测试,并能够再现真实系统的动态行为.通过新产品、再制造产品对大型客机供应链的影响分析得出,主制造商进行制造和再制造的原材料及回收品的质量性能以及各生产环节的技术水平状况对新产品及再制造产品质量水平影响较大,原材料的质量水平越高,工序质量保证能力越强,产品质量水平越高.因此,为实现大型客机再制造供应链质量控制,主制造商应该重点控制供应商所提供的原材料水平、销售商提供的回收品质量水平、回收比例以及生产环节的技术投入水平.相比新产品需求,再制造产品需求对质量水平波动更为敏感.主制造商可使用质量奖惩契约激励供应商致力于原材料质量水平的提升,设计质量成本分摊契约激励约束销售商进行回收品质量及回收比例的提升.研究结果显示,对我国大型客机再制造供应链质量控制而言,只实施质量奖惩契约或者质量成本分摊契约仅能够实现新产品或者再制造产品质量的控制,而实施组合契约协调能够实现产品质量及服务质量的改进,并使得供应链整体绩效更优.因此,对于我国大型客机主制造商来说:1) 再制造策略能够有效改善我国大型客机主制造商的“初创期”现状,为我国大型客机主制造商更好地开拓市场和能力提升贡献优势;2) 有效的质量管控策略能够提升我国大型客机产品质量及市场竞争力;3) 全面的质量管控必须在主制造商提升自身技术能力的同时兼顾协调供应链上下游成员的质量行为.本文研究基于一定的假设,后续可以继续放宽相关假设的基础上深入研究我国大型客机供应链质量控制难题.

### 参考文献(References)

- [1] 曾德麟, 欧阳桃花, 周宁, 等. 基于信息处理的复杂产品制造敏捷性研究:以沈飞公司为案例[J]. 管理科学学报, 2017, 20(6): 1-17.  
(Zeng D L, Ouyang T H, Zhou N, et al. Manufacturing agility of complex products from the perspective of information processing: The case of SF company[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(6): 1-17.)
- [2] Majidpour M. Technological catch-up in complex product systems[J]. Journal of Engineering & Technology Management, 2016, 41(7): 92-105.
- [3] Hwang I, Radhakrishnan S, Su L. Vendor certification

- and appraisal: Implications for supplier quality[J]. *Management Science*, 2006, 52(10): 1472-1482.
- [4] Yan X, Zhao H, Tang K. Requirement or promise? An analysis of the firstmover advantage in quality contracting[J]. *Production and Operations Management*, 2015, 24(6): 917-933.
- [5] 谢家平, 迟琳娜, 梁玲. 基于产品质量内生的制造/再制造最优生产决策[J]. *管理科学学报*, 2012, 15(8): 12-23.  
(Xie J P, Chi L N, Liang L. Optimal manufacturing/remanufacturing production decision based on en-dogenous product quality[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(8): 12-23.)
- [6] 刘明周, 王强, 赵志彪, 等. 机械产品再制造装配过程动态工序质量控制系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(4): 817-824.  
(Liu M Z, Wang Q, Zhao Z B, et al. Dynamic assembly process quality control system for mechanical products remanufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(4): 817-824.)
- [7] Panagiotidou S, Nenes G, Zikopoulos C, et al. Joint optimization of manufacturing/remanufacturing lot sizes under imperfect information on returns quality[J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 258(2): 537-551.
- [8] 张玉春, 周金华. 再制造优先闭环供应链质量控制与优化系统动力学模型及仿真[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(2): 92-99.  
(Zhang Y C, Zhou J H. Systematic dynamics model and simulation for quality control and optimization of closed-Loop supply chain with remanufacturing priority[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(2): 92-99.)
- [9] Ethiraj S K. Allocation of inventive effort in complex product systems[J]. *Strategic Management Journal*, 2007, 28(6): 563-584.
- [10] 陈傲. 开放环境下中国大型客机研制的技术集成模型[J]. *科研管理*, 2009, (S1): 29-34.  
(Chen A. The technology integration model for manufacture of Chinese huge-airliner under open circumstance[J]. *Science Research Management*, 2009, (S1): 29-34.)
- [11] Chen H Z, Hu H D, Yang Z. Profits distribution within main manufacturer and suppliers in supply chain based on synergetic theory[C]. *Advanced Materials Research*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2013, 647: 944-949.
- [12] Zhao H, Jian L, Liu Y. A maximum entropy incentive model for “main manufacturer-suppliers” cooperation relationship of large civil aircraft[J]. *The Journal of Grey System*, 2015, 27(3): 151-165.
- [13] 易凯凯, 朱建军, 张明, 等. 基于不完全信息动态博弈模型的大型客机主制造商-供应商协同合作策略研究[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(5): 125-134.  
(Yi K K, Zhu J J, Zhang M, et al. Analysis on the main manufacturer supplier cooperative strategies of airliner based on dynamics games of incomplete information[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(5): 125-134.)
- [14] 马珍珍. 大型客机供应商质量管理流程优化及绩效评价研究[D]. 南京: 南京航空航天大学经济与管理学院, 2014.  
(Ma Z Z. Study on the optimization and performance evaluation of suppliers' quality management process in large aircraft industry[D]. Nanjing: College of Economics and Management, University of Aeronautics and Astronautics, 2014.)
- [15] 曹俊. 闭环供应链中再制造件的质量水平选择和价格决策[D]. 重庆: 重庆大学经济与工商管理学院, 2008.  
(Cao J. Price and quality decisions in closed-loop supply chain[J]. *Chongqing: Economics and Business Administration of Chongqing University, Chongqing University*, 2008.)
- [16] 陈传明, 周小虎. 管理学原理[M]. 南京: 南京大学出版社, 2013: 325-334.  
(Chen C M, Zhou X H. Principles of management[J]. *Nanjing: Press of Nanjing University*, 2013: 325-334.)
- [17] 熊中楷, 王凯, 熊榆. 经销商从事再制造的闭环供应链模式研究[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(11): 1-9.  
(Xiong Z K, Wang K, Xiong Y. Research on the closed-loop supply chain that the distributor engages in re-manufacturing[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2011, 14(11): 1-9.)
- [18] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 206-223.  
(Wang Q F. System dynamics[M]. Beijing: Press of Tsinghua University, 1995: 206-223.)
- [19] Zhao S, Zhu Q. Remanufacturing supply chain coordination under the stochastic remanufacturability rate and the random demand[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 257(1/2): 661-695.
- [20] 林晶, 王健. LR-型模糊需求下供应链的质量控制与成本分担[J]. *控制与决策*, 2016, 31(4): 678-684.  
(Lin J, Wang J. Quality control and cost sharing of the supply chain under LR-type fuzzy demand[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(4): 678-684.)
- [21] 胡军, 张镓, 芮明杰. 线性需求条件下考虑质量控制的供应链协调契约模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(3): 601-609.  
(Hu J, Zhang J, Rui M J. Supply chain coordination model contract considering quality control under the condition of linear demand[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2013, 33(3): 601-609.)

## 作者简介

周金华(1991—), 女, 博士生, 从事供应链管理、复杂系统建模的研究, E-mail: Zhoujh0891@163.com;

朱建军(1976—), 男, 教授, 博士, 从事供应链管理、决策理论方法等研究, E-mail: zhujianjun@nuaa.edu.cn;

张玉春(1971—), 男, 教授, 博士, 从事物流与供应链管理、决策分析等研究, E-mail: nanhangzhyuch@163.com.

(责任编辑: 孙艺红)