

# 不确定经济环境下基于EVA的鲁棒供应链网络设计模型

邱若臻<sup>†</sup>, 陈瑞颖, 关志民, 黄小原

(东北大学 工商管理学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 针对由制造商、仓库、分销中心和客户组成的四级供应链网络设计问题, 考虑以产品需求、短期利率、长期利率、无风险利率、预期市场回报、证券承销费用和市场流动性等因素描述的经济环境不确定性, 建立以供应链经济增加值绩效为目标, 网络设计、物流和财务运作为约束条件, 设施选择、连接路径等为网络要素, 生产、运输等物流量和负债、保理、应收账款等财务项为决策变量的多产品、多周期供应链网络鲁棒设计模型. 数值结果表明, 基于经济增加值的鲁棒供应链网络能够有效应对经济不确定性的影响. 特别地, 与传统随机优化方法相比, 鲁棒优化能够确保供应链网络具有更好的鲁棒性和财务状况.

**关键词:** 供应链; 经济增加值; 鲁棒优化; 经济不确定; 网络设计

中图分类号: F274

文献标志码: A

## Robust supply chain network design model based on economic value added under economic uncertainty

QIU Ruo-zhen<sup>†</sup>, CHEN Rui-ying, GUAN Zhi-min, HUANG Xiao-yuan

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The problem of designing a four-echelon supply chain network(SCN) which consists of manufacturers, warehouses, distribution centers and customers is studied. By considering the economic uncertainty described by factors of product demand, short-term interest rate, long-term interest rate, risk-free rate of interest, expected return of the market, underwriting cost and market liquidity, a multi-product and multi-period and robust SCN design model is proposed, which takes the supply chain operation performance measured by economic value added(EVA) as objective, supply chain structure design, logistics and financial operations as constrains, and network elements including facility selection and connection path, logistics operation including production, transportation, etc, and financial factors contained by debt, factoring and accounts receivable and so on as decision variables. The numerical results show that the designed robust supply chain network based on EVA can effectively cope with the impact of economic uncertainty. Specifically, comparing with the traditional stochastic optimization, robust optimization can be applied to a supply chain network with better robustness and healthy financial position.

**Keywords:** supply chain; economic value added; robust optimization; economic uncertainty; network design

## 0 引言

供应链网络设计作为融合企业战略和战术层决策的问题, 备受学术界和企业关注<sup>[1-2]</sup>. 然而, 作为一个跨地域、多主体参与的复杂系统, 供应链网络运作绩效易受到成本、供应等企业内部和需求、经济环境等外部不确定性的影响<sup>[3]</sup>. 在日益激烈的竞争环境中, 如何设计能有效抑制不确定性扰动的鲁棒供应链网络, 对于每一个参与企业而言都至关重要.

作为处理不确定性问题的有效手段, 鲁棒优化方法自20世纪90年代以来一直受到人们的普遍关注<sup>[4]</sup>. 随后, 这一方法被广泛地应用于供应链网络设计领域<sup>[5-7]</sup>. Mulvey等<sup>[8]</sup>最早给出了基于情景的鲁棒优化方法, 并定义了解鲁棒和模型鲁棒. 如果规划问题的解对于任一情景都接近于最优, 则称之为解鲁棒; 如果规划问题的解对于任一情景几乎总是可行, 则称为模型鲁棒<sup>[8]</sup>. 此后, 许多学者采用这一方法进

收稿日期: 2016-01-01; 修回日期: 2016-04-13.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71372186, 70972100); 教育部人文社会科学研究一般项目(11YJC630165); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N150604005).

作者简介: 邱若臻(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理与鲁棒优化等研究; 陈瑞颖(1990—), 女, 硕士生, 从事供应链管理的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: rzqiu@mail.neu.edu.cn

行供应链网络设计问题的研究. 例如,文献[9]在供应链网络设计中考虑了设施和链接中断情景,提出了一个更可靠的供应链网络设计框架,分析了中断对网络效率和鲁棒性绩效的影响;文献[10]针对一个三级供应链网络设计问题,考虑了由制造商设施故障导致的供应中断和产品运送路径不可行造成的连接中断问题,采用鲁棒优化方法给出了供应链网络结构;文献[11]采用同样的方法研究了关于灾难中血液供应的动态供应链网络设计问题,并将该鲁棒模型应用到一个真实的案例;最近,文献[12]研究了一种新的能够同时考虑两个互斥不确定性集的鲁棒优化方法,并将该方法用于制造过程不确定下以总成本最小为目标的四级供应链网络设计问题中,结果表明,应用该方法得到的解具有很高的置信度,且接近最优解;文献[13]认为,设计具有鲁棒和可靠的网络可以创造巨大的竞争优势,并在运作和中断风险下采用基于情景的鲁棒优化方法给出了设计方案.

上述研究在考虑不确定性因素时大多集中于供应、需求或成本方面,并采用传统的利润或成本指标.然而,就中长期运营角度而言,企业的核心目标在于利用有限资源为股东创造价值,而传统绩效指标存在诸多缺陷,如不能有效反应公司资本的真正增值量等.因此,合理的企业经营业绩评价指标对于实现这一目标具有重要指导意义.正如文献[14]指出,未来的供应链网络设计问题应该进一步考虑价值增值因素,采用一系列基于价值绩效的指标衡量供应链运作情况;在此基础上,文献[15]针对供应链销售与运营计划问题,在经济增加值绩效准则下采用鲁棒优化方法处理由不确定性导致的供应链运营风险问题;文献[16-17]进一步将财务因素集成到不确定条件下的供应链设计问题,给出了基于财务绩效的供应链网络设计方案.

在上述研究基础上,本文针对由制造商(工厂)、仓库、分销中心和客户构成的四级供应链网络设计问题,考虑以产品需求、短期利率、长期利率、无风险利率、预期市场回报、证券承销费用和市场流动性等因素描述的经济不确定性,采用情景树方法对经济不确定性进行建模,在同时考虑供应链解鲁棒和模型鲁棒基础上,通过资产负债表和损益表等财务工具衔接供应链网络物流运作与财务运作,建立基于经济增加值绩效的鲁棒供应链网络设计模型,并给出相应的设计方案.

### 1 供应链网络结构与不确定性描述

考虑一个多产品、多周期运作的备货型四级供应链网络,如图1所示.

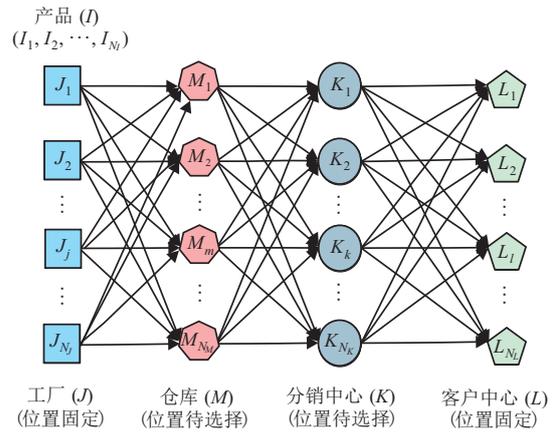


图1 供应链网络结构

供应链网络由位置固定的 $N_J$ 个工厂和 $N_L$ 个客户中心,以及位置待选的 $N_M$ 个备选仓库和 $N_K$ 个备选分销中心组成.其中,工厂可以生产 $N_I$ 种产品,但产品产量受生产能力、资源利用率、库存容量和市场需求等限制.为了满足客户需求,工厂生产的产品将根据需要通过仓库运往分销中心,经由分销中心抵达最终客户.特别地,考虑到生产、运输等时滞因素,允许工厂、仓库和分销中心存在相应的库存.

传统供应链网络设计问题研究通常仅考虑运作层面的不确定因素,很少涉及经济环境不确定性.当考虑EVA绩效时,经济环境不确定性将直接影响供应链运作中的一系列因素.基于这一考虑,借助经济周期理论将经济不确定分为如下3种情景:高涨期、停滞期和衰退期.不同经济周期将对产品需求、短期利率、长期利率、无风险利率、预期市场回报、承销费用和市场流动性等参数产生直接影响.为了刻画不同经济周期下的不确定参数,采用情景方法对经济不确定性进行描述,如图2所示.

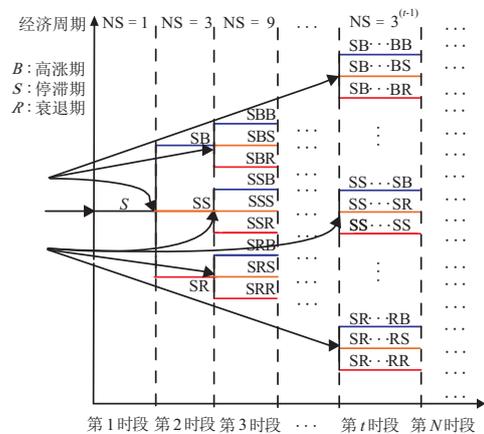


图2 情景树分析框架

由图2可以看出:由于计划期初通常很少涉及经济不确定,此时只有一种情景,而与经济不确定性有关的信息将在上周末获得,在这一时点上将产生3个分支,分别代表高涨期、停滞期和衰退期,以此类

推. 因此,  $t$  周期内总的确定情景数为  $NS = 3^{t-1}$ . 针对每一种情景, 上述7个参数都将对应不同的数值, 以此反映经济不确定性. 需要指出的是, 在供应链网络设计决策过程中, 包括两种类型的决策变量: 设计变量和控制变量. 设计变量又称即刻决策 (here and now), 需要在计划周期的初始阶段确立, 主要涉及网络结构决策, 如仓库和分销中心的数量、位置以及运输线路的建立等; 控制变量又称观望决策 (wait and see), 是在供应链运营过程中获得与未来时段经济不确定性有关的信息后做出的决策, 包括不同周期的产品产量、从工厂到仓库各个线路中的运输量、仓库的库存水平、固定资产、流动资产及资本结构等.

## 2 经济不确定下基于EVA的鲁棒供应链网络设计模型

### 2.1 符号定义

1) 集合和下标:  $e \in E = \{1, 2, \dots, N_E\}$  表示生产资源 (设备、劳动力等);  $i \in I = \{1, 2, \dots, N_I\}$  表示产品;  $j \in J = \{1, 2, \dots, N_J\}$  表示工厂;  $m \in M = \{1, 2, \dots, N_M\}$  表示潜在仓库;  $k \in K = \{1, 2, \dots, N_K\}$  表示潜在分销中心;  $l \in L = \{1, 2, \dots, N_L\}$  表示客户中心;  $s \in S = \{1, 2, \dots, NS\}$  表示经济不确定情景;  $t = 1, 2, \dots, T$  表示周期.

2) 参数:  $C_k^D, C_m^W$  表示分销中心  $k$  和仓库  $m$  的固定建设成本;  $C_{ij}^I, C_{ik}^I, C_{im}^I$  表示产品  $i$  在工厂  $j$ 、分销中心  $k$  和仓库  $m$  的单位存储成本;  $C_{ij}^P, C_{im}^{WH}, C_{ik}^{DH}$  表示产品  $i$  在工厂  $j$  和仓库  $m$ 、分销中心  $k$  的单位生产成本和单位处理成本;  $C_{ijm}^{TR}, C_{ikl}^{TR}, C_{imk}^{TR}$  表示产品  $i$  从工厂  $j$  到仓库  $m$ 、分销中心  $k$  到客户中心  $l$ 、仓库  $m$  到分销中心  $k$  的单位运输成本;  $D_k^{\min}, D_k^{\max}$  表示分销中心  $k$  的最小和最大容量;  $W_m^{\min}, W_m^{\max}$  表示仓库  $m$  的最小和最大容量;  $P_{ijt}^{\min}, P_{ijt}^{\max}$  表示  $t$  周期内工厂  $j$  对  $i$  产品的最小和最大生产能力;  $PRICE_{ilt}^{[s]}, DM_{ilt}^{[s]}$  表示客户中心  $l$  的产品  $i$  在  $t$  周期情景  $s$  下的价格和需求量;  $Q_{ijm}^{\max}, Q_{imk}^{\max}, Q_{ikl}^{\max}$  表示产品  $i$  从工厂  $j$  到仓库  $m$ 、仓库  $m$  到分销中心  $k$ 、分销中心  $k$  到客户中心  $l$  的最大运输量;  $Q_{jm}^{\min}, Q_{mk}^{\min}, Q_{kl}^{\min}$  表示产品从工厂  $j$  到仓库  $m$ 、仓库  $m$  到分销中心  $k$ 、分销中心  $k$  到客户中心  $l$  的最小运输量;  $SAE_t, DPR_t, TR_t$  表示  $t$  周期内销售管理费用、红利派息率和税率;  $EFAD_t, NFAD_t$  表示  $t$  周期内已有和新增固定资产的折旧率和;  $NVS, MVS, OEFA$  表示已发行股票的票面价值、市场价值和已有固定资产的原始价值;  $UD_t^{[s]}, CFP_t^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下的证券承销折扣和与现金流相关的留存收益增加值的百分比;  $r_{ft}^{[s]}, r_{mt}^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下

的无风险报酬率和市场平均报酬率;  $STR_t^{[s]}, LTR_t^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下的短期利率和长期利率;  $fd, \beta$  表示保理折扣率和企业投资组合的系统风险系数;  $\gamma_{ik}, \gamma_{im}$  表示与分销中心  $k$  和仓库  $m$  容量相关的产品  $i$  的持有库存系数;  $\rho_{ije}, R_{je}$  表示工厂  $j$  为生产产品  $i$  对资源  $e$  的利用率系数和工厂  $j$  对资源  $e$  的总可利用率;  $\psi^{[s]}$  表示情景  $s$  发生的概率;  $\lambda, \omega$  表示偏差权重和风险规避权重;  $NS, NT$  表示总的经济不确定情景数量和总周期数.

3) 决策变量:  $D_k, W_m$  表示分销中心  $k$  和仓库  $m$  的库存容量;  $I_{ijt}^{[s]}, I_{ikt}^{[s]}, I_{imt}^{[s]}$  表示在  $t$  周期末情景  $s$  下, 工厂  $j$ 、分销中心  $k$  和仓库  $m$  持有产品  $i$  的库存水平;  $P_{ijt}^{[s]}, \delta_{ilt}^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下工厂  $j$  中产品  $i$  的生产率以及客户中心  $l$  对产品  $i$  的未满足需求量;  $Q_{ijmt}^{[s]}, Q_{imkt}^{[s]}, Q_{iklt}^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下产品  $i$  从工厂  $j$  到仓库  $m$ 、仓库  $m$  到分销中心  $k$ 、分销中心  $k$  到客户中心  $l$  的运输量;  $NTS_t^{[s]}, NOPAT_t^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下净销售额和税后净营业利润;  $WACC_t^{[s]}, VCO_t^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下加权平均资本成本和可变经营成本;  $EBIT_t^{[s]}, C_t^{[s]}$  表示  $t$  周期内情景  $s$  下息税前收益和现金;  $RA_t^{[s]}, RA_t^{-[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下的应收账款和应收账款保理部分;  $CA_t^{[s]}, E_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下的流动资产和股东权益;  $RE_t^{[s]}, ARE_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下的留存收益及留存收益增加值;  $EFA_t^{[s]}, NFA_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下已有固定资产和新建固定资产;  $FA_t^{[s]}, TA_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下总固定资产和总资产;  $IC_t^{[s]}, CCP_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下总投入资本和已投股本;  $INR_t^{[s]}, MVE_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下的库存价值和权益市值;  $NIS_t^{[s]}, NOS_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下新发行股票的所得和已发行股票数量;  $NSF_t^{[s]}, NSW_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下为固定资产投资和为运营资本投资而新发行的股票所得;  $STL_t^{[s]}, LTL_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下的短期负债和长期负债;  $TL_t^{[s]}, WC_t^{[s]}$  表示  $t$  周期末情景  $s$  下的总负债和营运资本;  $BD_K, BW_m$  表示 0-1 变量, 若分销中心  $k$  或仓库  $m$  被建立, 则为 1, 否则为 0;  $BDL_{kl}, BWD_{mk}$  表示 0-1 变量, 若有产品从分销中心  $k$  或仓库  $m$  被运输到客户中心  $l$  或分销中心  $k$ , 则为 1, 否则为 0.

### 2.2 优化目标

作为一种考核企业经营业绩的价值总量指标, EVA 能够真实反映企业的价值创造能力, 刻画的是净营业利润与投资者用同样资本投资其他风险相近的有价证券的最低回报相比, 超出或低于后者的量

值<sup>[18]</sup>. 根据文献[19], EVA定义为公司的税后净营业利润(NOPAT)中扣除资本成本所得. 其中, 资本成本是指企业取得和使用资本时所付出的代价, 包括发行债券、股票的费用, 向非银行金融机构借款的手续费用, 以及使用资本所付出的股利、利息等, EVA计算公式如下:

$$EVA = NOPAT - WACC \times IC.$$

其中: NOPAT为税后净营业利润, 可由损益表中导出; WACC为加权平均资本成本; IC为投入资本, 由总负债和股东权益两部分组成. 当EVA > 0时, 企业为股东创造了额外的财富; 当EVA = 0时, 企业只维持股东原有财富值; 当EVA < 0时, 企业耗损了股东的原有财富值. 与传统的利润指标不同, 经济增加值考察的是“剩余盈利”, 即扣除借入资本的直接成本和权益资本的间接成本之后的净值, 可用于综合评估企业战略目标实现程度. 根据文献[19],  $t$ 周期情景 $s$ 下的EVA可表述为

$$EVA_t^{[s]} = NOPAT_t^{[s]} - WACC_t^{[s]} \times IC_t^{[s]}, \forall t, s. \quad (1)$$

其中: 与传统以要求的资本回报率代替加权平均资本成本不同, WACC <sub>$t$</sub> <sup>[ $s$ ]</sup>将根据资本资产定价模型确定, 如下式所示<sup>[17]</sup>:

$$WACC_t^{[s]} = \left[ \frac{E_t^{[s]}}{IC_t^{[s]}} (r_{f_t}^{[s]} + (r_{m_t}^{[s]} - r_{f_t}^{[s]})\beta) \right] + \left[ \frac{STL_t^{[s]} + LTL_t^{[s]}}{IC_t^{[s]}} \times \left( \frac{STL_t^{[s]}}{TL_t^{[s]}} STR_t^{[s]} + \frac{LTL_t^{[s]}}{TL_t^{[s]}} LTR_t^{[s]} \right) \right] (1 - TR_t), \forall t, s. \quad (2)$$

式(2)所示的加权平均资本成本反映企业通过股权和债务方式进行融资的平均成本, 项目融资的收益率只有在高于加权平均资本成本时才具有投资价值. WACC <sub>$t$</sub> <sup>[ $s$ ]</sup>由两部分组成: 第1部分为(股东权益/投入资本)×股权成本, 其中股权成本用资本资产定价模型估算; 第2部分为(总负债/投入资本)×债务成本×(1-企业所得税税率). 对所得税税率的考虑主要是因为债务融资可以使企业少缴企业所得税. 注意到, 在计算利润时需要把利息扣除, 这在某种程度上反应了利息可以抵税. 在上述EVA标准计算公式基础上, 基于经济增加值的供应链网络运作绩效最大化目标可表示为

$$\max \frac{1}{NT} \sum_t \sum_s \psi_t^{[s]} EVA_t^{[s]}. \quad (3)$$

### 2.3 约束条件

当采用经济增加值对供应链运作绩效进行度量时, 鲁棒供应链网络设计问题包括网络结构与物流运

作约束和财务运作约束两部分.

#### 2.3.1 网络结构与物流运作约束

在供应链网络结构和物流运作方面, 主要涉及基本网络结构、产品运输、物料平衡、生产能力与资源和库存容量要求等方面的约束, 如式(4)~(22)所示.

$$BWD_{mk} \leq BW_m, \forall m, k; \quad (4)$$

$$BWD_{m,k} \leq BD_k, \forall m, k; \quad (5)$$

$$BDL_{kl} \leq BD_k, \forall k, l. \quad (6)$$

约束(4)~(6)确保构建合理的网络结构, 即只有在某个节点被选择建立相应设施的情况下, 从已知节点到该节点的运输路径才可能存在.

$$Q_{ijmt}^{[s]} \leq Q_{ijm}^{\max} BW_m, \forall i, j, m, t, s; \quad (7)$$

$$Q_{imkt}^{[s]} \leq Q_{imk}^{\max} BWD_{mk}, \forall i, m, k, t, s; \quad (8)$$

$$Q_{iklt}^{[s]} \leq Q_{ikl}^{\max} BDL_{kl}, \forall i, k, l, t, s. \quad (9)$$

约束(7)~(9)表明, 如果相邻节点间存在运输路径, 则运输量不得超过允许的最大数量; 否则, 运输量为0.

$$\sum_i Q_{ijmt}^{[s]} \geq Q_{jm}^{\min} BW_m, \forall j, m, t, s; \quad (10)$$

$$\sum_i Q_{imkt}^{[s]} \geq Q_{mk}^{\min} BWD_{mk}, \forall m, k, t, s; \quad (11)$$

$$\sum_i Q_{iklt}^{[s]} \geq Q_{kl}^{\min} BDL_{kl}, \forall k, l, t, s. \quad (12)$$

约束(10)~(12)表明, 如果相邻节点间存在运输路径, 则所有产品运输量之和不能低于允许的最小运输量; 否则, 总的运输量为0.

$$I_{ijt}^{[s]} = I_{ij,t-1}^{[s]} + \left( P_{ijt}^{[s]} - \sum_m Q_{ijmt}^{[s]} \right), \forall i, j, t, s; \quad (13)$$

$$I_{imt}^{[s]} = I_{im,t-1}^{[s]} + \left( \sum_j Q_{ijmt}^{[s]} - \sum_k Q_{imkt}^{[s]} \right), \forall i, m, t, s; \quad (14)$$

$$I_{ikt}^{[s]} = I_{ik,t-1}^{[s]} + \left( \sum_m Q_{imkt}^{[s]} - \sum_l Q_{iklt}^{[s]} \right), \forall i, k, t, s; \quad (15)$$

$$\sum_k Q_{iklt}^{[s]} \leq DM_{ilt}^{[s]}. \quad (16)$$

约束(13)~(15)保证了工厂、仓库和分销中心的物料平衡, 即持有库存等于上周末的库存加上产品流入量减去产品流出量. 约束(16)表明, 所有分销中心 $k$ 运往客户中心 $l$ 的产品 $i$ 的数量之和不得高于客户中心 $l$ 对产品 $i$ 的需求.

$$P_{ijt}^{\min} \leq P_{ijt}^{[s]} \leq P_{ijt}^{\max}, \forall i, j, t, s; \quad (17)$$

$$\sum_i \rho_{ije} P_{ijt}^{[s]} \leq R_{je}, \forall j, e, t, s. \quad (18)$$

约束(17)表明, 任一情境 $s$ 下工厂 $j$ 对产品 $i$ 的生产量不得超出其最小和最大生产能力范围. 约束(18)保

证生产某种产品所需的资源不超过可利用的资源量.

$$W_m^{\min} BW_m \leq W_m \leq W_m^{\max} BW_m, \forall m; \quad (19)$$

$$D_k^{\min} BD_k \leq D_k \leq D_k^{\max} BD_k, \forall k; \quad (20)$$

$$W_m \geq \sum_i \gamma_{im} I_{imt}^{[s]}, \forall m, t, s; \quad (21)$$

$$D_k \geq \sum_i \gamma_{ik} I_{ikt}^{[s]}, \forall k, t, s. \quad (22)$$

约束(19)~(22)限定了仓库和分销中心的库存容量. 其中:约束(19)和(20)分别限定了仓库和分销中心的库存容量不超过其最大库存容量,同时不低于最小库存容量;约束(21)和(22)要求仓库和分销中心的库存容量不得低于其持有的总库存量.

### 2.3.2 财务运作约束

文中考虑的供应链网络设计问题所涉及的财务约束主要来源于资产负债表和损益表. 其中损益表主要包括供应链网络收入、息税前收益、税后净利润、红利、留存收益等描述,如式(23)~(29)所示.

$$NTS_t^{[s]} = \sum_{i,l} PRICE_{ilt}^{[s]} \sum_k Q_{iklt}^{[s]}, \forall t, s; \quad (23)$$

$$EBIT_t^{[s]} = NTS_t^{[s]} - VCO_t^{[s]} - FC_t, \forall t, s; \quad (24)$$

$$\begin{aligned} VCO_t^{[s]} = & \sum_{i,j} C_{ij}^P P_{ijt}^{[s]} + \sum_{i,j,m} C_{ijm}^{TR} Q_{ijmt}^{[s]} + \sum_{i,m,k} C_{imk}^{TR} Q_{imkt}^{[s]} + \\ & \sum_{i,k,l} C_{ikl}^{TR} Q_{iklt}^{[s]} + \sum_{i,m} C_{im}^{WH} \sum_j Q_{ijmt}^{[s]} + \\ & \sum_{i,k} C_{ik}^{WH} \sum_m Q_{imkt}^{[s]} + \sum_{i,j} C_{ij}^I \frac{I_{ijt}^{[s]} + I_{ij,t-1}^{[s]}}{2} + \\ & \sum_{i,m} C_{im}^I \frac{I_{imt}^{[s]} + I_{im,t-1}^{[s]}}{2} + \sum_{i,k} C_{ik}^I \frac{I_{ikt}^{[s]} + I_{ik,t-1}^{[s]}}{2} + \\ & RA_t^{-[s]} fd, \forall t, s; \end{aligned} \quad (25)$$

$$FC_t = SAE_t + EFAD_t OEFA_t + NFAD_t \times \left( \sum_m C_m^W BW_m + \sum_k C_k^D BD_k \right), \forall t. \quad (26)$$

约束(23)计算了净销售额. 由式(16)可以看出,由于允许存在未满足客户需求的情况,净销售额等于产品售价乘以运往客户中心的产品数量. 式(24)表明,息税前收益等于净销售额减去可变运营成本再减去销售管理费用和固定资产折旧费用. 可变运营成本包括产品生产成本,从工厂到仓库、仓库到分销中心及分销中心到客户中心的运输成本,工厂、仓库及分销中心的处理成本(如手续费、装卸搬运费等)和存储成本,保理折扣费用等,如式(25)所示. 式(26)主要反映了销售及行政开支(如销售人员的工资、广告费、办公费、销售店面折旧等费用),已有固定资产和新建

固定资产的折旧费用.

$$\begin{aligned} NOPAT_t^{[s]} = & (EBIT_t^{[s]} - STR_t^{[s]} STL_t^{[s]} - \\ & LTR_t^{[s]} LTL_t^{[s]}) \times (1 - TR_t), \forall t, s; \end{aligned} \quad (27)$$

$$DIV_t^{[s]} = NOPAT_t^{[s]} DPR_t, \forall t, s; \quad (28)$$

$$ARE_t^{[s]} = NOPAT_t^{[s]} - DIV_t^{[s]}, \forall t, s. \quad (29)$$

约束(27)表明,税后净营业利润等于息税前收益减去短期利息和长期利息后乘以(1-税率). 税后净营业利润将主要用于股利分红和增加留存收益,如式(28)、(29)所示.

由上述损益表描述的财务等式关系可以看出,在计算相关财务指标,如税后净营业利润时,还涉及到长短期负债情况. 下面进一步给出资产负债表中反应的相关财务等式约束,如式(30)~(50)所示.

$$\begin{aligned} FA_t^{[s]} + C_t^{[s]} + RA_t^{[s]} + INR_t^{[s]} = \\ E_t^{[s]} + STR_t^{[s]} + LTL_t^{[s]}, \forall t, s; \end{aligned} \quad (30)$$

$$TA_t^{[s]} = FA_t^{[s]} + C_t^{[s]} + RA_t^{[s]} + INR_t^{[s]}, \forall t, s; \quad (31)$$

$$FA_t^{[s]} = EFA_t^{[s]} + NFA_t^{[s]}, \forall t, s. \quad (32)$$

约束(30)反映了资产负债表中的基本等式关系,即总资产等于总负债加所有者权益. 其中:总资产由固定资产、现金流、应收账款和库存构成,如式(31)所示;而固定资产包括已有固定资产和新建固定资产两部分,如式(32)所示.

$$EFA_t^{[s]} = EFA_{t-1}^{[s]} - EFAD_t \times OEFA_t, \forall t, s; \quad (33)$$

$$\begin{aligned} NFA_t^{[s]} = & (1 - NFAD_t) \left( \sum_m C_m^W BW_m + \right. \\ & \left. \sum_k C_k^D BD_k \right), \forall t = 1, s; \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} NFA_t^{[s]} = & NFA_{t-1}^{[s]} - NFAD_t \left( \sum_m C_m^W BW_m + \right. \\ & \left. \sum_k C_k^D BD_k \right), \forall t > 1, s. \end{aligned} \quad (35)$$

约束(33)定义了已有固定资产等于上期已有固定资产减去折旧额. 由于只允许在整个计划期初存在新建固定资产,新建固定资产相当于 $t = 1$ 时刻新建设施的建设成本乘以(1-折旧率),如式(34)所示. 当 $t > 1$ 时,新建立固定资产等于上期新建固定资产减去折旧额,如式(35)所示.

$$CA_t^{[s]} = C_t^{[s]} + RA_t^{[s]} + INR_t^{[s]}, \forall t, s; \quad (36)$$

$$\begin{aligned} C_t^{[s]} = & C_{t-1}^{[s]} + CFP_t^{[s]} ARE_t^{[s]} + (1 - UD_t^{[s]}) NSW_t^{[s]} + \\ & RA_t^{-[s]} (1 - fd), \forall t, s. \end{aligned} \quad (37)$$

约束(36)表明,流动资产由现金、应收账款和库存3

部分组成. 现金等于上一期末的现金、本期一定比例的留存收益、为经营资本投资而新发行股票与通过保理方式收回的应收账款之和. 现金的获得主要有两种渠道: 一是从银行或财务机构借款, 二是通过在资本市场发行债券或股票进行筹资. 当选择后者时, 将涉及到各种费用支出, 如承销费用、法律和会计咨询费用等, 这些费用通常表示为筹资额的百分比, 反映了承销商购买价格与发行价格之间的差额. 此外, 企业还可通过保理的方式获得现金, 将部分应收账款交给保理商(如银行机构), 保理商根据应收账款逾期的时间采取相应手段协助企业安全回收账款. 作为回报, 企业会给保理商一定折扣, 称为保理折扣率.

$$RA_t^{[s]} = RA_{t-1}^{[s]} + (1 - CFP_t^{[s]})ARE_t^{[s]} - RA_t^{-[s]}, \quad \forall t, s; \quad (38)$$

$$RA_t^{[s]} \geq RA_t^{-[s]}, \quad \forall t, s. \quad (39)$$

约束(38)表明, 应收账款等于上期应收账款与当期留存收益增加值的百分比之和再减去当期的保理部分, 其中保理部分不能超过本期应收账款额, 如式(39)所示.

$$INR_t^{[s]} = \sum_{i,j,m,k} \min\{C_{ij}^P\}(I_{ij}^{[s]} + I_{imt}^{[s]} + I_{ikt}^{[s]}), \quad \forall t, s. \quad (40)$$

式(40)给出了库存价值计算方法, 根据历史成本会计和一般公认会计准则, 库存价值等于最小生产成本乘以在工厂、仓库和分销中心的库存量总和. 式(30)~(40)反映了资产负债表左侧与总资产有关的财务关系, 下面进一步给出与总负债和所有者权益相关的约束条件.

$$IC_t^{[s]} = E_t^{[s]} + STL_t^{[s]} + LTL_t^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (41)$$

$$E_t^{[s]} = CCP_t^{[s]} + RE_t^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (42)$$

$$CCP_t^{[s]} = CCP_{t-1}^{[s]} + NIS_t^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (43)$$

$$NIS_t^{[s]} = NSF_t^{[s]}, \quad \forall t = 1, s; \quad (44)$$

$$NIS_t^{[s]} = NSW_t^{[s]}, \quad \forall t > 1, s; \quad (45)$$

$$NSW_t^{[s]} \leq CCP_{t-1}^{[s]}, \quad \forall t > 1, s; \quad (46)$$

$$RE_t^{[s]} = RE_{t-1}^{[s]} + ARE_{t-1}^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (47)$$

$$TL_t^{[s]} = STL_t^{[s]} + LTL_t^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (48)$$

$$STL_t^{[s]} = STL_{t-1}^{[s]} + NSTL_t^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (49)$$

$$LTL_t^{[s]} = LTL_{t-1}^{[s]} + NLTL_t^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (50)$$

$$\sum_m C_m^W BW_m + \sum_k C_k^D BD_k = (1 - UD_t^{[s]})NSF_t^{[s]} + NLTL_t^{[s]}, \quad \forall t = 1, s. \quad (51)$$

在约束(41)中, 股东权益、短期负债及长期负债3部

分构成了总投入资本. 其中, 股东权益由已投股本与留存收益两部分组成, 如约束(42)所示. 式(43)表明, 当期已投股本等于上一期的股本加上在资本市场新发行股票获得的资本. 由约束(44)和(45)可以看出, 企业发行股票融资主要用于期初 $t = 1$ 时刻的固定资产投资和后续周期 $t > 1$ 时的营运资本所需. 此外, 根据法律规定, 用于营运资本投资新发行的股票所得不能超过上一期的已投股本, 如式(46)所示. 式(47)表明, 本期留存收益等于上一期的留存收益加上当期留存收益增加值. 式(48)~(50)反映了总负债的构成, 总负债包括短期负债和长期负债, 其中短期负债等于上一期的短期负债加上当期新增短期负债, 而长期负债等于上一期的长期负债加上当期新增长期负债. 式(51)进一步定义了在设计周期期初, 新建设施的总成本等于为固定资产投资而新发行股票筹资所得加上新增长期负债.

就债务偿还风险而言, 一个企业的营运资本越多, 说明短期债务偿还能力越高. 为了衡量企业债务偿付能力, 给出了狭义营运资本计算方法, 即营运资本等于流动资产减去流动负债, 如式(52)所示. 式(53)表明, 企业投入资本主要靠在资本市场发行股票所得, 等于股票账面价值乘以已发行股票的数量; 而股权市场价值等于已发行股票的数量乘以股票的市场价值, 如式(54)所示.

$$WC_t^{[s]} = CA_t^{[s]} - STL_t^{[s]}, \quad \forall t, s; \quad (52)$$

$$NOS_t^{[s]} = \frac{CCP_t^{[s]}}{NVS}, \quad \forall t, s; \quad (53)$$

$$MVE_t^{[s]} = NOS_t^{[s]} \times MVS, \quad \forall t, s. \quad (54)$$

## 2.4 基于EVA的鲁棒供应链网络设计模型

根据Mulvey等鲁棒优化框架<sup>[8]</sup>, 考虑解鲁棒和模型鲁棒的优化目标(3)可描述为

$$\max \frac{1}{NT} \sum_t \left\{ EVA_t - \lambda \sum_s \psi_t^{[s]} (EVA_t^{[s]} - EVA_t)^2 \right\} - \omega \rho(\delta).$$

其中:  $EVA_t = \sum_s \psi_t^{[s]} EVA_t^{[s]}$  为 $t$ 周期所有情景下的期望EVA; 上述目标函数第1部分度量了解鲁棒性, 而第2部分中的函数 $\rho(\delta)$ 则度量了模型鲁棒性, 与衡量控制约束不可行性变量 $\delta$ 有关; 参数 $\omega$ 表示风险规避程度, 用于权衡解鲁棒性和模型鲁棒性, 当 $\omega$ 取值较小(例如 $\omega = 0$ )时, 模型虽然具有较好的解鲁棒性, 但可能导致不可行解, 而当 $\omega$ 取值较大时, 在提高模型鲁棒性的同时会导致较低的系统绩效. 由于上述

目标中含有二次项表达式,在求解大规模问题时通常需要大量的计算时间,文献[18]对此进行了改进,并将其转化为等价的线性描述,在此基础上,经济不确定下基于EVA的鲁棒供应链网络设计问题可以描述如下:

$$\begin{aligned} \max & \frac{1}{NT} \sum_t \left\{ EVA_t - \lambda \sum_s \psi_t^{[s]} [(EVA_t - EVA_t^{[s]}) + 2\theta_t^{[s]}] \right\} - \omega \sum_t \sum_s \psi_t^{[s]} \sum_i \sum_l \delta_{ilt}^{[s]} \\ \text{s.t.} & \theta_t^{[s]} + EVA_t - EVA_t^{[s]} \geq 0, \forall t, s; \\ & \delta_{ilt}^{[s]} = DM_{ilt}^{[s]} - \sum_k Q_{iklt}^{[s]}, \forall i, l, t, s; \\ & \theta_t^{[s]} \geq 0, \forall t, s; \\ & \delta_{ilt}^{[s]} \geq 0, \forall i, l, t, s; \end{aligned}$$

约束(4) ~ (15), (17) ~ (54). (55)

其中:若  $EVA_t \geq EVA_t^{[s]}$ ,则上述问题(55)中第1个约束要求辅助变量  $\theta_t^{[s]} = 0$ ;若  $EVA_t < EVA_t^{[s]}$ ,则要求  $\theta_t^{[s]} = EVA_t^{[s]} - EVA_t$ ,从而确保  $[(EVA_t - EVA_t^{[s]}) + 2\theta_t^{[s]}]$  等同于  $|(EVA_t - EVA_t^{[s]}) + 2\theta_t^{[s]}|$ ,而后者等价于原目标中二次项表达式  $(EVA_t - EVA_t^{[s]})^2$ . 问题(55)中第2个约束是一个控制约束,在式(16)基础上引入变量  $\delta_{ilt}^{[s]}$ ,表示  $t$  周期情景  $s$  下供应链未满足客户  $l$  的产品  $i$  的数量. 如果  $\delta_{ilt}^{[s]} = 0$ ,则说明所有客户的需求都得到了满足;如果  $\delta_{ilt}^{[s]} > 0$ ,则表明存在未满足需求的情况. 目标函数中度量模型鲁棒性的表达式,即惩罚项  $\omega \sum_t \sum_s \psi_t^{[s]} \sum_i \sum_l \delta_{ilt}^{[s]}$  的引入将确保尽可能少地出现未满足需求的情况. 可以看出,问题(55)是一个同时度量解鲁棒和模型鲁棒性的线性规划,因此可以高效求解.

### 3 数值算例与分析

为了验证所建鲁棒供应链网络的有效性并对相关价值绩效进行分析,采用中小规模案例进行数值实验. 考虑整个计划分为3个周期,即  $NT = 3$ ,每个周期跨度为一年. 有  $N_J = 2$  个工厂生产  $N_I = 8$  种类型的日用品满足  $N_L = 8$  个客户的需求. 其中:待选仓库个数  $N_M = 3$ ,建设成本分别为32 500、27 000和25 000,最大仓库容量分别为17 000、16 000和20 000,最小仓库容量分别为1 900、2 200和2 500;待选分销中心个数为  $N_K = 4$ ,建设成本分别为30 000、32 500、35 000和27 000,4个分销中心的最大容量为22 000、20 000、27 000和27 000,且最小容量为1 500、1 900、1 100和1 300. 该模型中的其他参数值分别如表1~

表3所示.

表1描述了不同产品的单位生产、运输、处理和存储等成本系数. 表2给出了期初资产负债表,其中资产折旧采用了直线方法.

表1 产品生产、运输、处理、存储成本

参数	产品类别							
	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$i_6$	$i_7$	$i_8$
$C_{ij}^P$	2.88	3.00	3.03	2.68	2.65	2.85	2.68	2.55
$C_{ijm}^{TR}$	0.62	0.55	0.53	0.55	0.58	0.53	0.58	0.58
$C_{imk}^{TR}$	0.62	0.56	0.56	0.56	0.58	0.56	0.59	0.58
$C_{ikt}^{TR}$	0.66	0.63	0.64	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64
$C_{ik}^{WH}$	0.52	0.53	0.53	0.48	0.37	0.46	0.83	0.77
$C_{ik}^{DH}$	0.59	0.61	0.56	0.66	0.70	0.63	0.60	0.79
$C_{ij}^L$	0.39	0.26	0.25	0.29	0.29	0.48	0.25	0.20
$C_{im}^L$	0.39	0.42	0.33	0.47	0.40	0.45	0.38	0.47
$C_{ik}^L$	0.44	0.38	0.41	0.45	0.38	0.37	0.44	0.44

表2 计划周期初始阶段的资产负债

固定资产	170 000	股东权益	130 000
有形资产	170 000	普通股	80 000
无形资产	0	留存收益	50 000
流动资产	70 000	负债	110 000
库存值	12 032	短期负债	45 000
应收账款	28 000	长期负债	65 000
现金	29 968		
总资产	240 000	总负债 & 权益	240 000

表3 各客户中心的产品售价

客户中心	产品类别							
	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$i_6$	$i_7$	$i_8$
$l_1$	9.14	8.29	10.07	8.12	10.84	10.95	10.44	11.26
$l_2$	9.39	8.08	9.22	10.68	11.26	11.90	9.56	11.42
$l_3$	7.95	8.63	9.07	9.75	11.43	9.65	10.52	10.96
$l_4$	8.71	8.71	9.22	9.75	11.71	10.94	11.26	11.60
$l_5$	9.14	8.37	8.12	9.93	10.67	10.20	12.37	11.79
$l_6$	9.56	8.80	10.68	10.66	10.17	10.16	10.52	11.80
$l_7$	9.65	8.50	10.77	10.49	11.60	9.16	9.59	11.88
$l_8$	8.90	8.88	9.22	10.83	10.86	10.94	10.41	10.86

已有固定资产的年折旧率为5%,历史成本为210 000,新建固定资产的年折旧率为2.5%. 发行股票的账面价值为每股7个货币单位,市场价值为每股7.75个货币单位.

工厂对8种产品的最大生产能力分别为3 325、2 825、3 250、2 520、2 850、2 960、2 625和3 190;库存量为最大生产能力的10%,而在仓库和分销中心的库存量为0. 最小运输能力为

$$Q_{jm}^{\min} = Q_{mk}^{\min} = Q_{kl}^{\min} = 100,$$

最大运输量为

$$Q_{ijm}^{\max} = 2 000, Q_{imk}^{\max} = 1 800, Q_{ikl}^{\max} = 1 000.$$

每种情景的发生概率分别为  $\psi_1 = \psi_3 = \psi_7 =$

$\psi_9 = 0.0625, \psi_5 = 0.250$  和  $\psi_2 = \psi_4 = \psi_6 = \psi_8 = 0.1250$ . 本文用于描述经济不确定性的参数数值如表4所示.

表4 各经济情景下需求及财务参数

参数	情景								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$DM_{i t=1}^{[s]}$	605	605	605	605	605	605	605	605	605
$DM_{i t=2}^{[s]}$	646	646	646	605	605	605	564	564	564
$DM_{i t=3}^{[s]}$	666	646	626	624	605	587	581	564	547
$STR_{t=1}^{[s]}/\%$	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
$STR_{t=2}^{[s]}/\%$	5.60	5.60	5.60	7.00	7.00	7.00	8.40	8.40	8.40
$STR_{t=3}^{[s]}/\%$	5.30	5.60	5.90	6.70	7.00	7.40	8.00	8.40	8.80
$LTR_{t=1}^{[s]}/\%$	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
$LTR_{t=2}^{[s]}/\%$	3.00	3.00	3.00	4.00	4.00	4.00	5.00	5.00	5.00
$LTR_{t=3}^{[s]}/\%$	2.70	3.00	3.30	3.60	4.00	4.40	4.50	5.00	5.50
$r_{t=1}^{[s]}/\%$	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
$r_{t=2}^{[s]}/\%$	2.00	2.00	2.00	2.50	2.50	2.50	3.00	3.00	3.00
$r_{t=3}^{[s]}/\%$	1.90	2.00	2.10	2.40	2.50	2.60	2.90	3.00	3.20
$r_{m_{t=1}}^{[s]}/\%$	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
$r_{m_{t=2}}^{[s]}/\%$	6.00	6.00	6.00	5.00	5.00	5.00	4.00	4.00	4.00
$r_{m_{t=3}}^{[s]}/\%$	6.30	6.00	5.70	5.30	5.00	4.80	4.20	4.00	3.80
$UNDC_{t=1}^{[s]}/\%$	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25	3.25
$UNDC_{t=2}^{[s]}/\%$	2.40	2.40	2.40	3.25	3.25	3.25	5.40	5.40	5.40
$UNDC_{t=3}^{[s]}/\%$	2.30	2.40	3.00	3.10	3.25	4.10	5.10	5.40	6.80
$CFP_{t=1}^{[s]}/\%$	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
$CFP_{t=2}^{[s]}/\%$	75.00	75.00	75.00	60.00	60.00	60.00	45.00	45.00	45.00
$CFP_{t=3}^{[s]}/\%$	82.50	75.00	67.50	66.00	60.00	54.00	49.50	45.00	40.50

针对问题(55),通过Lingo11.0进行编程,并且在Intel Core(TM)2 Duo T5670 2.2GHz处理器,2GB内存的计算机上运行,在用时不超过1000min时获得全局最优.

下面进行仿真及结果分析.

1) 参数 $\lambda$ 和 $\omega$ 对解鲁棒和模型鲁棒性的影响.

为了探讨该模型(55)在不同 $\lambda$ 和 $\omega$ 下的解鲁棒性和模型鲁棒性,令 $\omega = 100, \lambda$ 在 $[0, 10]$ 内取值,结果如图3所示.

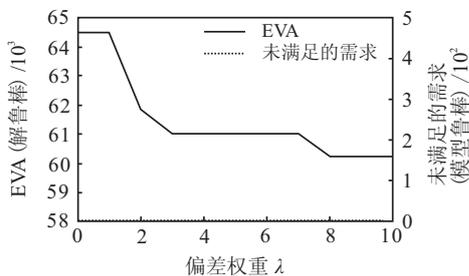


图3  $\lambda$ 变化时对解鲁棒和模型鲁棒的影响

由图3可知,随着 $\lambda$ 的增大,EVA呈下降趋势,而未满足需求量始终为0,表明该模型具有良好的模型鲁棒性.对于解鲁棒性,当 $\lambda$ 从0增至3时,最优EVA变动幅度较大.进一步考察问题(55)目标函数中的方差项发现,当 $\lambda \geq 8$ 时,方差为零,说明此时的最优EVA波动较小.

为考察 $\omega$ 对所建模型解鲁棒与模型鲁棒之间的权衡,令 $\lambda = 8, \omega$ 在 $[0, 100]$ 内取值,结果如图4所示.

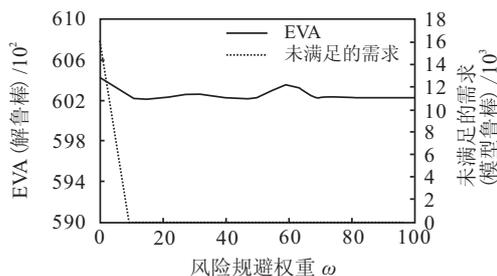


图4  $\omega$ 对解鲁棒与模型鲁棒之间的权衡

由图4可以看出,除了 $\omega = 0$ 时存在未满足需求(未满足的需求为16065)外, $\omega$ 取其他值时所有市场需求均完全得到满足.此外,随着 $\omega$ 的增加,最优EVA变化较为平稳,说明所建模型具有良好的解鲁棒和模型鲁棒性.

2) 不同参数 $\lambda$ 下的供应链税后净营业利润和资本成本分析.

资本成本是企业因筹集和使用资本所付出的代价,企业的税后净营业利润与资本成本直接相关.在税后净营业利润一定的情况下,资本成本越高,EVA越低.由于所建模型对参数 $\omega$ 并不敏感,这里只给出了不同 $\lambda$ 下各周期的资本成本和税后净营业利润,如图5和图6所示.

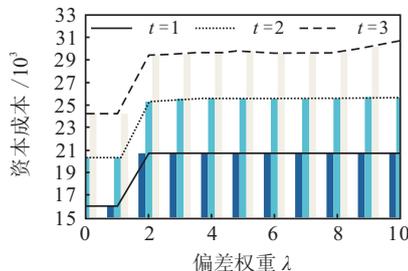


图5 各周期不同 $\lambda$ 下的资本成本

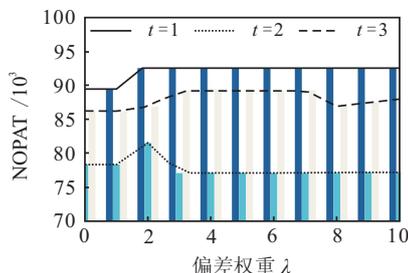


图6 各周期不同 $\lambda$ 下的NOPAT

当 $\lambda$ 从1增加至2时,每个周期的资本成本增幅远大于税后净营业利润增幅,故出现了图3中 $\lambda$ 从1变化至2时,最优EVA降幅较大的情况;当 $\lambda \geq 3$ 时,在 $t = 1$ 和 $t = 2$ 时段,资本成本和税后净营业利润无变动,而在 $t = 3$ 周期,当 $\lambda = 8$ 时,税后净营业利润出现显著降低,从而导致图3中对应的EVA降低.

3)不同参数λ下的供应链应收账款、保理及债务偿付能力分析。

将应收账款中的一部分作为保理,可以增加企业的流动资金和活力.然而,保理业务的开展需要付出一定的成本.因此,选择合适的保理量至关重要。

对比图7与图8发现,  $t = 1$ 时,保理对λ变化不敏感,而应收账款和保理只在  $\lambda = 1, 2$ 时有轻微变动.由数值结果可以看出,此时保理占应收账款的70%左右,主要原因在于期初企业需要大量资金,而获得资金的途径主要包括发行股票、借债和保理.由于保理折扣率为4%,短期利率最少为5.6%,在这种情况下通过保理获得更多的现金对企业更为有利.在后续周期,即  $t = 2$ 和 $t = 3$ 时,保理占应收账款比例相对较低。

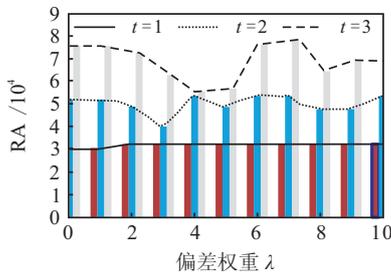


图7 不同λ下的应收账款RA的变化情况

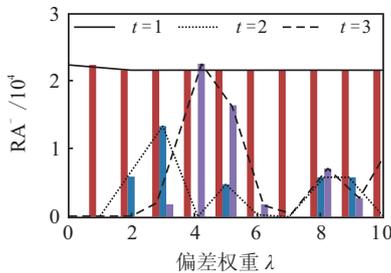


图8 不同λ下的保理RA-的变化情况

为了进一步考察供应链变现能力,通过计算各周期不同λ下的总资产和营运资本得到反映供应链变现能力的指标,即营运资本与总资产的比值情况,如表5所示。

表5 不同λ和t所对应的营运资本与总资产的比值%

t	λ										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	11.0	11.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9
2	27.7	27.7	29.8	28.8	30.6	31.6	31.4	31.4	31.4	30.0	32.1
3	39.0	39.0	41.0	39.7	40.8	42.4	41.9	41.5	41.7	41.2	44.6

由表5可以看出,随着λ的增加,每个周期的营运资本与总资产的比值呈非减趋势,说明公司资产的变现能力随着λ的增加而增强。

如前文所述,供应链网络设施建设和维持运营会

导致长短期负债情况出现,良好的债务偿付能力将直接决定企业是否可以获得所需贷款.作为衡量企业偿付能力的指标,Z-score模型从企业的资产规模、变现能力、获利能力、财务结构、偿债能力和资产利用效率等方面综合反映企业财务状况,能够起到财务预警作用。

Z-score计算公式如下:

Z-score =

$$\frac{1}{NT} \sum_t \sum_s \psi^{[s]} \left\{ 1.2 \times \frac{WC_t^{[s]}}{TA_t^{[s]}} + 1.4 \times \frac{RE_t^{[s]}}{TA_t^{[s]}} + 3.3 \times \frac{EBIT_t^{[s]}}{TA_t^{[s]}} + 0.6 \times \frac{MVE_t^{[s]}}{TA_t^{[s]}} + 1.0 \times \frac{NTS_t^{[s]}}{TA_t^{[s]}} \right\}$$

根据本文算例,当  $\lambda = 8, \omega = 100$ 时,通过优化求解问题(55)可得供应链最优EVA = 60 229.51,未满足需求量为0, Z-score = 3.6507. 当Z-score < 1.81时,企业具有高违约概率;当Z-score > 2.99时,财务状况良好;当  $1.88 < Z\text{-score} < 2.99$ 时,存在不确定信贷风险,应引起企业关注<sup>[17]</sup>. 根据这一准则可以判断所建供应链网络具有良好的财务状况. 进一步给出供应链网络结构如图9所示,其中每条线路上的运输量为所有8种产品在各种情境下的期望总运输量。

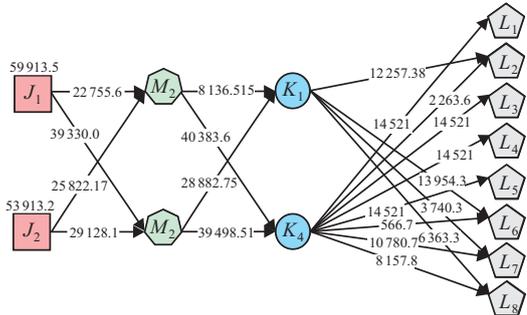


图9 鲁棒供应链网络结构 (EVA = 60 229.51, Z-score = 3.6507)

为了比较根据文中鲁棒优化方法所建供应链网络与采用传统期望EVA为目标的随机规划方法设计的供应链网络在相关绩效上的表现,以式(3)为优化目标,式(4)~(54)为约束条件,在同样的参数下,通过优化求解得到最优EVA值为64 614.42,未满足的期望总需求量为544, Z-score值为2.9608. 对比鲁棒优化方法的结果发现,供应链网络虽然损失部分EVA绩效,但具有更好的鲁棒性和更为健康的财务状况。

### 4 结论

本文在供应链网络结构、物流运作和财务运作约束基础上,给出了同时考虑解鲁棒和模型鲁棒性的以EVA绩效为考核目标的鲁棒供应链网络设计模型.算例结果表明,基于本文模型所建的供应链网络

在应对经济不确定性方面具有良好的鲁棒性. 特别地, 与传统随机规划方法相比, 基于鲁棒优化的供应链网络虽然会损失部分绩效, 但却具有更好的财务状况. 进一步可考虑经济不确定性带来的风险问题, 采用风险测度衡量供应链运作绩效, 或者同时考虑反映企业信贷偿付能力的 Z-score、投资回收率等财务绩效目标, 研究基于多目标规划的鲁棒供应链网络设计问题.

#### 参考文献(References)

- [1] 吴义生, 白少布. 面向网购的低碳供应链设计模型及其应用分析[J]. 控制与决策, 2015, 30(4): 655-662.  
(Wu Y S, Bai S B. Low-carbon supply chain design model and its application analysis based on online shopping[J]. Control and Decision, 2015, 30(4): 655-662.)
- [2] 张松涛, 张春杨, 侯嫣婷. 含多提前期的不确定供应链网络的鲁棒控制[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(1): 266-279.  
(Zhang S T, Zhang C Y, Hou Y T. Robust control of uncertain supply chain network with lead times[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(1): 266-279.)
- [3] Hult G T M, Craighead C W, Ketchen D J. Risk uncertainty and supply chain decision: A real options perspective[J]. Decision Science, 2010, 41(3): 435-458.
- [4] Gabrel V, Murat C, Thiele A. Recent advances in robust optimization: An overview[J]. European J of Operational Research, 2014, 235(3): 471-483.
- [5] Zokaee S, Jabbarzadeh A, Fahimnia B, et al. Robust supply chain network design: An optimization model with real world application[J]. Annals of Operations Research, 2014, 222(1): 1-30.
- [6] Hatefi S M, Jolai F. Robust and reliable forward-reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions[J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(9): 2630-2647.
- [7] 田俊峰, 杨梅, 岳劲峰. 具有遗憾值约束的鲁棒供应链网络设计模型研究[J]. 管理工程学报, 2012, 26(1): 48-55.  
(Tian J F, Yang M, Yue J F. Research on supply chain network design model with regret value [J]. J of Industrial Engineering and Engineering Management, 2012, 26(1): 48-55.)
- [8] Mulvey J M, Vanderbei R J, Zenios S A. Robust optimization of large-scale systems[J]. Operations Research, 1995, 43(2): 264-281.
- [9] Shukla A, Lalit V A, Venkatasubramanian V. Optimizing efficiency-robustness trade-offs in supply chain design under uncertainty due to disruptions[J]. Int J of Physical Distribution & Logistics Management, 2011, 41(5/6): 623-646.
- [10] Baghalian A, Rezapour S, Farahani R Z. Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case[J]. European J of Operational Research, 2013, 227(1): 199-215.
- [11] Jabbarzadeh A, Fahimnia B, Seuring S. Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: A robust model with real world application[J]. Transportation Research Part E, 2014, 70(1): 225-244.
- [12] Ali A, Behrooz K. A new robust optimization approach for integrated multi-echelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(21): 283-293.
- [13] Sadghiani N S, Torabi S A, Sahebjamnia N. Retail supply chain network design under operational and disruption risks[J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2015, 75(1): 95-114.
- [14] Klibi W, Martel A, Guitouni A. The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review[J]. European J of Operational Research, 2010, 203(2): 283-293.
- [15] Lin Y J. Minimax distribution free procedure with backorder price discount[J]. Int J of Production Economics, 2008, 111(1): 118-128.
- [16] Longinidis P, Georgiadis M C. Integration of financial statement analysis in the optimal design of supply chain networks under demand uncertainty[J]. Int J of Production Economics, 2011, 129(2): 262-276.
- [17] Longinidis P, Georgiadis M C. Managing the trade-offs between financial Performance and credit solvency in the optimal design of supply chain networks under demand uncertainty[J]. Computers and Chemical Engineering, 2013, 48(2): 264-279.
- [18] 陈琳. 基于EVA的企业绩效评价研究[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2013: 2.  
(Chen L. Study on enterprise's performance evaluation based on economic value added[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2013: 2.)
- [19] Sharma A K, Kumar S. Economic value added-literature review and relevant issues[J]. Int J of Economics and Finance, 2010, 2(2): 200-220.
- [20] Yu C S, Li H L. A robust optimization model for stochastic logistic problems[J]. Int J of Production Economics, 2000, 64(3): 385-397.