

# 多等级蓄意攻击下的第三方物流可靠性网络设计

李锐<sup>1†</sup>, 黄敏<sup>2</sup>

(1. 辽宁工业大学 电子与信息工程学院, 辽宁 锦州 121001;

2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 在考虑多等级蓄意攻击的情况下, 研究第三方物流(3PL)可靠性网络设计问题. 建立问题的多层优化模型: 3PL网络设计模型在可靠性约束下通过开设不同安全等级的物流设施来最小化总物流成本; 蓄意攻击模型选择不同等级的攻击策略使网络的服务水平最低; 网络流决策模型可最大化网络受攻击后的服务能力. 根据问题模型的特点, 设计改进两层人工蜂群(ABC)算法, 上层ABC算法求解3PL网络设计问题, 下层ABC算法求解蓄意攻击优化问题. 网络流决策问题则通过网络流算法进行求解. 最后, 通过仿真实验来验证所提出模型的合理性及算法的有效性.

**关键词:** 第三方物流; 网络设计; 可靠性; 多等级蓄意攻击; 人工蜂群

中图分类号: TP29

文献标志码: A

## Reliable network design of third-party logistics under multi-grade proactive attacks

LI Rui<sup>1†</sup>, HUANG Min<sup>2</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China;

2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** With the consideration of the multi-grade proactive attacks, the problem of reliable network design of third-party logistics(3PL) is studied. A multi-level optimization model of the problem is established, for which, the model of 3PL network design minimizes the total logistics costs subjective to the reliability constraint by opening logistics facilities of different secure grades, the model of proactive attacks minimizes the service level of the network by selecting the attack strategies of different grades, and the model of the network-flows decision maximizes the service level of the network after attacks. According to the characteristic of the model, an improved two-level artificial bee colony(ABC) algorithm is developed. The top-level ABC is used to solve the problem of 3PL network design, and the down-level ABC is used to solve the problem of proactive attacks optimization. The problem of the network-flows decision is solved by using the network-flows algorithm. Finally, numerical experiments are presented and the results show the reasonability of the model as well as the effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** third party logistics; network design; reliability; multi-grade proactive attacks; artificial bee colony

## 0 引言

在市场竞争日益激烈的压力下, 很多企业为了集中优势发展自己的核心业务, 提高市场竞争力, 正逐渐将物流业务外包给专业的第三方物流(3PL)公司. 3PL是指在物流业务外包的基础上, 由专业的物流服务企业以契约或合同的方式对有物流需求的企业提供物流服务的一种运作方式<sup>[1]</sup>.

物流网络是物流系统运作的基础, 如何设计一

个高效的物流服务网络是3PL管理者必须考虑的问题. 目前, 国内外学者已经对3PL网络设计问题进行了一定的研究. Basligil等<sup>[2]</sup>研究了3PL配送网络优化问题; Ko等<sup>[3]</sup>研究了3PL配送网络设计的混合优化仿真方法; Suyabatmaz等<sup>[4]</sup>在其研究中介绍了一种3PL逆向网络设计的混合仿真分析建模方法; Mahmoudzadeh等<sup>[5]</sup>对伊朗报废车辆的3PL逆向网络设计问题进行了研究; 何波等<sup>[6]</sup>研究了基于3PL的回

收稿日期: 2016-06-13; 修回日期: 2016-10-09.

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(71325002, 61225012); 国家自然科学基金重点国际合作研究项目(71620107003); 流程工业综合自动化国家重点实验室基础科研业务费项目(2013ZCX11); 辽宁省教育厅一般项目(L2015232).

作者简介: 李锐(1985—), 男, 讲师, 博士, 从事物流优化、智能算法的研究; 黄敏(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、风险管理和软计算等研究.

†通讯作者. E-mail: rui850109@163.com

收物流网络设计问题;Min等<sup>[7]</sup>研究了基于3PL的多周期逆向物流网络设计问题;高阳等<sup>[8]</sup>基于多目标的优化方法对多周期的3PL回收物流网络设计问题进行了研究;Ko等<sup>[9]</sup>研究了基于3PL的多周期正逆向集成网络设计问题.值得注意的是,以上关于3PL网络设计问题的研究并没有考虑网络的安全性.

在实际的运作过程中,3PL服务网络还面临各种中断风险,中断的发生可能导致网络服务能力下降甚至瘫痪.最近,如何设计安全可靠的物流网络成为研究的热点问题.Peng等<sup>[10]</sup>研究了考虑设施中断的可靠性物流网络设计问题;Meepetchdee等<sup>[11]</sup>在物流网络设计中考虑了鲁棒性和复杂性;Vahdani等<sup>[12]</sup>研究考虑设施故障的正逆向集成物流网络设计问题,并建立了双目标的数学规划模型;Hatefi等<sup>[13]</sup>对考虑不确定需求和设施中断的正逆向集成物流网络设计问题进行了研究.以上研究都只是考虑随机中断的情况,而蓄意攻击中断会对3PL网络造成更大的破坏,并且不同等级的蓄意攻击对物流设施造成的破坏程度不同,不同安全等级的物流设施对攻击的抵抗能力也不相同.因此,在3PL网络设计过程中考虑多等级蓄意攻击中断和安全保护更具有现实意义.目前,蓄意攻击下的物流网络设计相关问题也已经得到一定关注.Scaparra等<sup>[14]</sup>对物流设施保护问题进行研究,并建立了考虑蓄意攻击的两层优化模型;Liberatore等<sup>[15]</sup>研究了蓄意攻击程度不确定情况下的设施保护问题;Cappanera等<sup>[16]</sup>基于博弈论方法对最短路网络的保护问题进行研究,并建立了适用于蓄意攻击的最坏情况模型;Snyder等<sup>[17]</sup>针对无能力约束设施选址问题,建立了适用于蓄意攻击的最坏情况模型;O'Hanley等<sup>[18]</sup>研究鲁棒性网络覆盖问题,并建立了适用于蓄意攻击的最坏情况模型.然而,考虑蓄意攻击的物流网络设计相关问题的研究并没有考虑多等级攻击的情况.

综上所述,本文研究考虑多等级蓄意攻击的3PL可靠性网络设计问题.与现有3PL网络设计问题模型不同,本文在考虑多等级蓄意攻击的情况下,建立3PL网络设计的多层优化模型,并根据模型特点设计改进的两层人工蜂群算法和网络流算法进行求解.最后,通过仿真实验对模型的合理性和算法的有效性进行验证.

### 1 问题描述及模型建立

考虑3PL承担某一区域内的物流配送任务,网络结构如图1所示.3PL网络包括供应点、3PL物流中心、3PL仓库、需求点和运输线路.由于采用柔性运

输方式<sup>[19]</sup>,供应点与3PL仓库之间,3PL物流中心与需求点之间都可以进行运输.多等级蓄意攻击是指攻击者通过对3PL物流中心或3PL仓库进行不同等级的攻击来破坏网络结构使其服务能力降低,攻击等级越高,对物流设施的破坏越大.为了抵御不同等级的攻击,开设不同安全等级的3PL物流中心和3PL仓库,安全等级越高,抵御攻击的能力越强.考虑多等级蓄意攻击的3PL可靠性网络设计是指通过开设不同安全等级的3PL物流中心或3PL仓库来构建服务网络,在最小化物流总成本的同时,使其在不同等级的蓄意攻击下仍能保持一定的服务水平.

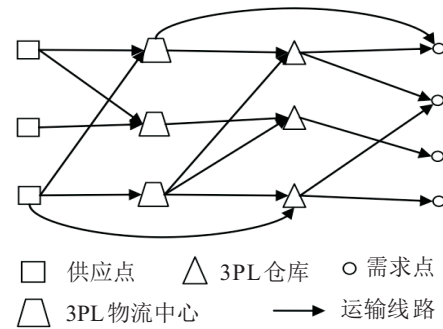


图1 3PL网络结构

对问题模型作如下假设:

- 1) 供应点的数量和最大供应量已知,用  $I$  表示供应点集合,  $S_i$  表示供应点  $i \in I$  的最大供应量;
- 2) 需求点的数量和需求量已知,用  $L$  表示需求点集合,  $D_l$  表示需求点  $l \in L$  的需求量;
- 3) 3PL物流中心的单位处理成本、处理能力、开设成本、攻击成本已知,分别表示为  $C_j^H$ 、 $Q_j^H$ 、 $G_{jr}^H$  和  $F_{jr}^H$ ,  $j \in J, r \in R$ ,  $J$  表示3PL物流中心集合,  $R$  表示安全等级(或攻击等级)集合;
- 4) 3PL仓库的单位处理成本、处理能力、开设成本、攻击成本已知,分别表示为  $C_k^W$ 、 $Q_k^W$ 、 $G_{kr}^W$  和  $F_{kr}^W$ ,  $k \in K, r \in R$ ,  $K$  表示3PL仓库集合;
- 5) 供应点  $i$  与3PL物流中心  $j$  之间、3PL物流中心  $j$  与3PL仓库  $k$  之间、3PL仓库  $k$  与需求点  $l$  之间、供应点  $i$  与3PL仓库  $k$  之间、3PL物流中心  $j$  与需求点  $l$  之间的单位运输成本分别表示为  $P_{ij}^A$ 、 $P_{jk}^B$ 、 $P_{kl}^C$ 、 $P_{ik}^D$  和  $P_{jl}^E$ ,  $i \in I, j \in J, k \in K, l \in L$ ;
- 6) 如果3PL物流中心或3PL仓库被攻击的等级大于等于开设的安全等级,则发生中断;否则,正常运作.

基于以上模型假设,建立问题的多层优化模型,3PL网络优化模型在一定的可靠性水平下优化网络结构使物流总成本最小,蓄意攻击模型在有限的攻击成本约束下优化攻击策略使网络服务能力最小,网

络决策流模型则计算攻击后网络对需求的最大满足量.

### 1.1 3PL网络优化模型

决策变量定义如下:  $x_{jr} \in \{0, 1\}$ , 如果3PL物流中心  $j$  开设的安全等级为  $r$ , 则取值为1, 否则取0;  $y_{kr} \in \{0, 1\}$ , 如果3PL仓库  $k$  开设的安全等级为  $r$ , 则取值为1, 否则为0;  $z_{ij}^A \geq 0, z_{jk}^B \geq 0, z_{kl}^C \geq 0, z_{ik}^D \geq 0, z_{jl}^E \geq 0$  分别表示供应点  $i$  与3PL物流中心  $j$  之间、3PL物流中心  $j$  与3PL仓库  $k$  之间、3PL仓库  $k$  与需求点  $l$  之间、供应点  $i$  与3PL仓库  $k$  之间、3PL物流中心  $j$  与需求点  $l$  之间的运输量. 令  $X = \{x_{jr} | \forall j \in J, \forall r \in R\}, Y = \{y_{kr} | \forall k \in K, \forall r \in R\}$ .

建立3PL网络优化模型为

$$\begin{aligned} \min C(X, Y) = & \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} G_{jr}^H x_{jr} + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} G_{kr}^W y_{kr} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} C_j^H z_{ij}^A + \\ & \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} C_k^W z_{kl}^C + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} P_{ij}^A z_{ij}^A + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} P_{jk}^B z_{jk}^B + \\ & \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} P_{kl}^C z_{kl}^C + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} P_{ik}^D z_{ik}^D + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} P_{jl}^E z_{jl}^E. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } G(X, Y) / \sum_{l \in L} D_l > \beta; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} z_{ij}^A = \sum_{k \in K} z_{jk}^B + \sum_{l \in L} z_{jl}^E, \forall j \in J; \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} z_{jk}^B + \sum_{i \in I} z_{ik}^D = \sum_{l \in L} z_{kl}^C, \forall k \in K; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} z_{ij}^A \leq Q_j^H \sum_{r \in R} x_{jr}, \forall j \in J; \quad (5)$$

$$\sum_{l \in L} z_{kl}^C \leq Q_k^W \sum_{r \in R} y_{kr}, \forall k \in K; \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij}^A + \sum_{k \in K} z_{ik}^D \leq S_i, \forall i \in I; \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} z_{kl}^C + \sum_{j \in J} z_{jl}^E = D_l, \forall l \in L; \quad (8)$$

$$0 \leq \sum_{r \in R} x_{jr} \leq 1, \forall j \in J; \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_{r \in R} y_{kr} \leq 1, \forall k \in K; \quad (10)$$

$$z_{ij}^A \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J; \quad (11)$$

$$z_{jk}^B \geq 0, \forall j \in J, \forall k \in K; \quad (12)$$

$$z_{kl}^C \geq 0, \forall k \in K, \forall l \in L; \quad (13)$$

$$z_{ik}^D \geq 0, \forall i \in I, \forall k \in K; \quad (14)$$

$$z_{jl}^E \geq 0, \forall j \in J, \forall l \in L; \quad (15)$$

$$x_{jr} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \forall r \in R; \quad (16)$$

$$y_{kr} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall r \in R. \quad (17)$$

其中: 目标函数(1)最小化物流总成本, 包括不同安全等级3PL物流中心和3PL仓库的开设成本, 商品的运输及处理成本; 约束(2)要求网络在蓄意攻击下的服务水平大于  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ), 其中  $G(X, Y)$  为网络在蓄意攻击下对需求满足量的最小值, 由蓄意攻击优化模型(18)~(23)确定; 约束(3)和(4)确保3PL物流中心和3PL仓库两端的流量平衡; 式(5)和(6)分别为3PL物流中心和3PL仓库的处理能力约束; 式(7)为供应点的最大供应能力约束; 约束(8)要求在没有攻击的情况下网络需求点的需求量必须被满足; 约束(9)和(10)确保每个开设的3PL物流中心和3PL仓库只能选择一个安全等级; 式(11)~(15)为流量的非负约束; 式(16)和(17)表示二值的决策变量.

### 1.2 蓄意攻击优化模型

决策变量:  $a_{jr} \in \{0, 1\}$ , 如果3PL物流中心  $j$  被攻击的等级为  $r$ , 则取值为1, 否则为0;  $b_{kr} \in \{0, 1\}$ , 如果3PL仓库  $k$  被攻击的等级为  $r$ , 则取值为1, 否则为0. 令  $A = \{a_{jr} | \forall j \in J, \forall r \in R\}, B = \{b_{kr} | \forall k \in K, \forall r \in R\}$ .

建立蓄意攻击优化模型为

$$G(X, Y) = \min \Phi(X, Y, A, B). \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \sum_{r \in R} a_{jr} \leq \sum_{r \in R} x_{jr}, \forall j \in J; \quad (19)$$

$$\sum_{r \in R} b_{kr} \leq \sum_{r \in R} y_{kr}, \forall k \in K; \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} F_{jr}^H a_{jr} + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} F_{kr}^W b_{kr} \leq \varepsilon; \quad (21)$$

$$a_{jr} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \forall r \in R; \quad (22)$$

$$b_{kr} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall r \in R. \quad (23)$$

其中: 目标函数(18)最小化网络  $(X, Y)$  在攻击策略  $(A, B)$  下对所有需求点的最大满足量(即去除中断的3PL物流中心和3PL仓库后剩余网络的最大流),  $\Phi(X, Y, A, B)$  通过网络流决策模型(24)~(35)来确定; 约束(19)和(20)保证每个被攻击的3PL物流中心和3PL仓库必须是已开设的, 并且只能选择一个攻击等级; 约束(21)要求总攻击成本不大于  $\varepsilon$ ; 式(22)和(23)表示二值的攻击决策变量.

### 1.3 网络流决策模型

决策变量:  $f_{ij}^A \geq 0, f_{jk}^B \geq 0, f_{kl}^C \geq 0, f_{ik}^D \geq 0, f_{jl}^E \geq 0$  分别表示蓄意攻击下供应点  $i$  与3PL物流中

心  $j$  之间、3PL 物流中心  $j$  与 3PL 仓库  $k$  之间、3PL 仓库  $k$  与需求点  $l$  之间、供应点  $i$  与 3PL 仓库  $k$  之间、3PL 物流中心  $j$  与需求点  $l$  之间的运输量.

建立网络流决策模型为

$$\Phi(X, Y, A, B) = \max \sum_{l \in L} \left( \sum_{k \in K} f_{kl}^C + \sum_{j \in J} f_{jl}^E \right). \quad (24)$$

s.t.

$$\sum_{i \in I} f_{ij}^A = \sum_{k \in K} f_{jk}^B + \sum_{l \in L} f_{jl}^E, \forall j \in J; \quad (25)$$

$$\sum_{j \in J} f_{jk}^B + \sum_{i \in I} f_{ik}^D = \sum_{l \in L} f_{kl}^C, \forall k \in K; \quad (26)$$

$$\sum_{i \in I} f_{ij}^A \leq$$

$$Q_j^H \cdot \min \left( \sum_{r_1 \in R} x_{jr_1} r_1 - \sum_{r_2 \in R} a_{jr_2} r_2, 1 \right), \forall j \in J; \quad (27)$$

$$\sum_{l \in L} f_{kl}^C \leq$$

$$Q_k^W \cdot \min \left( \sum_{r_1 \in R} y_{kr_1} r_1 - \sum_{r_2 \in R} b_{kr_2} r_2, 1 \right), \forall k \in K; \quad (28)$$

$$\sum_{j \in J} f_{ij}^A + \sum_{k \in K} f_{ik}^D \leq S_i, \forall i \in I; \quad (29)$$

$$\sum_{k \in K} f_{kl}^C + \sum_{j \in J} f_{jl}^E \leq D_l, \forall l \in L; \quad (30)$$

$$f_{ij}^A \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J; \quad (31)$$

$$f_{jk}^B \geq 0, \forall j \in J, \forall k \in K; \quad (32)$$

$$f_{kl}^C \geq 0, \forall k \in K, \forall l \in L; \quad (33)$$

$$f_{ik}^D \geq 0, \forall i \in I, \forall k \in K; \quad (34)$$

$$f_{jl}^E \geq 0, \forall j \in J, \forall l \in L. \quad (35)$$

其中: 目标函数(24)最大化网络  $(X, Y)$  在蓄意攻击  $(A, B)$  下对所有需求点的满足量; 式(25)和(26)分别为3PL 物流中心和3PL 仓库两端的流量平衡约束; 式(27)为3PL 物流中心的能力约束, 如果3PL 物流中心被攻击的等级大于或等于开设的安全等级, 则  $\min \left( \sum_{r_1 \in R} x_{jr_1} r_1 - \sum_{r_2 \in R} a_{jr_2} r_2, 1 \right)$  的值小于0, 表示3PL 物流中心发生中断, 否则, 取值为1, 表示3PL 物流中心正常运作; 式(28)为3PL 仓库的能力约束; 式(29)为供应点的供应能力约束; 式(30)表示对需求点的满足量不能大于需求量; 式(31)~(35)为流量的非负约束.

## 2 算法设计

多等级蓄意攻击的3PL 可靠性网络设计问题的模型复杂, 求解困难. 3PL 网络优化问题是传统固定

费用网络设计问题的扩展, 属于NP-hard 问题; 蓄意攻击优化问题是背包问题的扩展, 也是NP-hard 问题; 网络流决策问题则可以转化为网络的最大流问题. 因此, 采用智能优化方法和网络流算法更适合对该问题进行求解.

人工蜂群(ABC)算法<sup>[20]</sup>是一种新的群体智能优化算法, 模拟自然界中蜜蜂的采蜜过程. ABC 算法的种群包括3种蜂: 雇佣蜂、观察蜂和侦察蜂. 算法在运行的过程中依次执行3种蜂群的搜索操作以实现求解空间的搜索. 目前, ABC 算法已得到了一定的研究, 并在一些领域得到了应用<sup>[21-24]</sup>, 使得ABC 算法的性能也得到了验证.

为了进一步改善标准ABC 算法的性能, 本文设计了改进的两层ABC 算法. 其中: 上层改进的ABC 算法用于求解3PL 网络设计问题; 下层标准ABC 算法用于求解蓄意攻击优化问题. 网络流决策问题则可转化为网络的最大流问题, 并通过基于Ford-Fulkerson 方法的网络最大流算法<sup>[25]</sup>进行求解.

### 2.1 上层ABC 算法

为了改进上层ABC 算法的搜索性能, 在雇佣蜂阶段采用粒子群优化(PSO)<sup>[26]</sup> 算法中更新速度和位置的方式来更新当前蜜源, 并通过观察蜂选择较好的蜜源进行邻域搜索以进一步更新全局最优值和历史最优值.

#### 2.1.1 上层ABC 算法的总体步骤

**Step 1** 按照2.1.2节的编码方式随机生成规模为  $N$  的蜜源, 并计算蜜源收益度(详见2.1.3节), 每个蜜源  $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$  对应问题的一个解  $(X, Y)$ , 初始化全局最优值  $x^{g\text{best}}$  和每个蜜源的历史最优值  $x_i^{p\text{best}}$ .

**Step 2** 雇佣蜂按照式(36)和(37)更新当前蜜源  $x_i$  和对应速度  $v_i$ , 计算蜜源收益度, 并更新全局最优值  $x^{g\text{best}}$  和历史最优值  $x_i^{p\text{best}}$ .

蜜源  $i$  在第  $j$  维的对应速度  $v_{ij}$  按下式计算:

$$v_{ij} = w \cdot v_{ij} + c_1 \cdot \text{rand}(0, 1) \cdot (x_j^{g\text{best}} - x_{ij}) + c_2 \cdot \text{rand}(0, 1) \cdot (x_{ij}^{p\text{best}} - x_{ij}). \quad (36)$$

其中:  $w$  是惯性权重,  $c_1$  和  $c_2$  为加速度常数,  $\text{rand}(0, 1)$  表示  $[0, 1]$  之间的随机数. 这里将速度范围限制在区间  $[-R, R]$  内,  $R$  表示3PL 物流节点开设的安全等级, 如果  $v_{ij} < -R$ , 则设置  $v_{ij} = -R$ ; 如果  $v_{ij} > R$ , 则设置  $v_{ij} = R$ .

根据速度, 可以得出每个蜜源  $i$  在第  $j$  维的值  $x_{ij}$ , 即

$$x_{ij} = x_{ij} + v_{ij}. \quad (37)$$

这里将蜜源每一维值的范围限制在区间  $[0, R]$  内, 即: 如果  $x_{ij} < 0$ , 则设置  $x_{ij} = 0$ ; 如果  $x_{ij} > R$ , 则设置  $v_{ij} = R$ .

**Step 3** 雇佣蜂将蜜源信息(收益度)返回给观察蜂, 观察蜂则根据下式计算每个蜜源的备选概率  $p_i^U$ :

$$p_i^U = 1 - \text{Fit}(x_i) / \sum_{i=1}^N \text{Fit}(x_i), \quad (38)$$

并以轮盘赌的方式选择较好的蜜源按下式进行邻域搜索:

$$x_{ij} = \text{rand}(0, 1) \cdot R, \quad (39)$$

计算蜜源的收益度, 更新全局最优值  $x^{g\text{best}}$  和蜜源的历史最优值  $x_i^{p\text{best}}$ . 其中:  $\text{Fit}(x_i)$  表示蜜源  $x_i$  的收益度,  $j$  为任意选择的一个维度.

**Step 4** 如果算法达到最大迭代次数, 则终止; 否则, 执行 Step 2.

### 2.1.2 蜜源的编码

上层 ABC 算法采用实数编码方式对蜜源进行编码. 如表 1 所示, 每个蜜源对应一个实数向量. 向量的维数为所有潜在的 3PL 物流中心和 3PL 仓库数量之和. 向量的每一位对应于某个 3PL 物流中心或者 3PL 仓库, 其取值范围为  $[0, R]$  内的实数,  $R$  为安全等级, “0” 表示未开设, “非 0” 表示开设且安全等级为实数四舍五入取整所对应的整数值. 例如, 蜜源对应的实数向量某一位取值为 “3.5”, 对应的整数值为 “4”, 表示对应的 3PL 物流中心被选择开设且安全等级为 4. 按照这种编码方式得到的解  $(X, Y)$  将自动满足约束 (9)、(10)、(16) 和 (17).

表 1 上层蜜源编码

蜜源	潜在的 3PL 物流中心				潜在的 3PL 仓库			
实数	0.8	0.3	3.5	...	2.2	2.8	0.4	...
对应整数	1	0	4	...	2	3	0	...

### 2.1.3 评价蜜源

对蜜源  $x_i$  解码得到解  $(X, Y)$ , 按照下式计算蜜源的收益度:

$$\begin{aligned} \text{Fit}(X, Y) = & C(X, Y) + \eta_1 \left( \beta - G(X, Y) / \sum_{l \in L} D_l D_l \right)^+ + \\ & \eta_2 \sum_{l \in L} \left( D_l - \sum_{k \in K} z_{kl}^C - \sum_{j \in J} z_{jl}^E \right)^+. \end{aligned} \quad (40)$$

其中一个解可能不满足可靠性约束 (2) 和需求满足约束 (8), 故将其作为惩罚项加入到蜜源收益度函数中.

式 (40) 中:  $C(X, Y)$  为目标函数 (1), 给定网络  $(X, Y)$  可以通过增加虚拟节点和弧的方法将网络的运输和处理费用问题转化为网络的最小费用流问题, 并采用基于 Bellman-Ford 的 Ford-Fulkerson 方法求解<sup>[25]</sup>, 约束 (3) ~ (7) 及 (11) ~ (15) 则可自动满足;  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为可靠性约束 (2) 和需求满足约束 (8) 的惩罚系数;  $G(X, Y)$  由蓄意攻击优化模型 (18) ~ (23) 确定, 并通过调用下层 ABC 算法求解 (详见 2.2 节);  $(\cdot)^+$  表示如果括号内值为正, 则取该值.

## 2.2 下层 ABC 算法

### 2.2.1 下层 ABC 算法的总体步骤

**Step 1:** 按照 2.2.2 节的编码方式随机生成规模为  $M$  的蜜源, 每个蜜源  $y_i (i = 1, 2, \dots, M)$  对应问题的一个解  $(A, B)$ , 并计算蜜源收益度 (详见 2.2.3 节).

**Step 2:** 雇佣蜂在当前蜜源  $y_i$  的邻域内按照下式搜索新的蜜源, 计算新蜜源收益度, 并保留更优的蜜源:

$$v_{ij}^D = y_{ij} + r(y_{ij} - y_{kj}). \quad (41)$$

其中:  $v_i^D$  为新蜜源;  $y_i$  为当前蜜源;  $y_k$  为随意选择的一个附近的蜜源,  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$  且  $k \neq i$ ;  $j$  为任意选择的一个维度;  $r$  表示  $[-1, 1]$  之间的随机数.

**Step 3:** 雇佣蜂将蜜源信息(收益度)返回给观察蜂, 观察蜂则根据下式计算每个蜜源的备选概率  $p_i^D$ :

$$p_i^D = 1 - \text{Fit}(y_i) / \sum_{i=1}^M \text{Fit}(y_i), \quad (42)$$

其中  $\text{Fit}(y_i)$  表示蜜源  $y_i$  的收益度, 并以轮盘赌的方式选择较好的蜜源按式 (41) 进行邻域探索, 计算新蜜源收益度, 并保留更优的蜜源.

**Step 4:** 如果一个蜜源连续  $\text{lim}$  次没有得到改进, 则派出侦察蜂按照下式在搜索空间随机生成一个蜜源替换当前蜜源:

$$y_{ij} = \text{rand}(0, 1) \cdot R. \quad (43)$$

其中:  $\text{rand}(0, 1)$  表示  $[0, 1]$  之间的随机数,  $R$  表示攻击等级.

**Step 5:** 如果算法达到最大迭代次数, 则终止; 否则, 执行 Step 2.

### 2.2.2 蜜源编码

与上层 ABC 类似, 下层 ABC 算法也采用实数编码方式对蜜源进行编码. 如表 2 所示, 每个个体对应一个实数向量. 向量的维数为所有被选择开设的 3PL 物流中心和 3PL 仓库数量之和. 向量的每一位对应

一个开设的3PL物流中心或者3PL仓库,其取值范围为 $[0, R]$ 内的实数, $R$ 为攻击等级,“0”表示没有被攻击,“非0”表示被攻击且攻击等级为实数四舍五入取整所对应的整数值.例如,向量某一位的值为“2.9”,对应的整数值为“3”,表示对应的3PL物流中心被攻击且等级为3.按照这种编码方式得到的解 $(A, B)$ 可自动满足约束(19)、(20)、(22)和(23).

表2 下层蜜源编码

蜜源	被选择的3PL物流中心				被选择的3PL仓库			
实数	1.3	2.9	0.2	...	0.3	3.1	2.3	...
对应整数	1	3	0	...	0	3	2	...

2.2.3 蜜源评价

对蜜源 $y_i$ 进行解码得到解 $(A, B)$ ,然而一个解有可能不满足攻击成本约束(21),将其作为惩罚项加入到蜜源收益度函数中,则下层ABC蜜源的收益度为

$$Fit(X, Y, A, B) = \Phi(X, Y, A, B) + \lambda \left( \left( \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} F_{jr}^H a_{jr} + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} F_{kr}^W b_{kr} \right) - \varepsilon \right)^+ \quad (44)$$

其中: $\Phi(X, Y, A, B)$ 由网络流决策模型(24)~(35)确定,给定网络 $(X, Y)$ 及攻击策略 $(A, B)$ ,可以转化为网络最大流问题,并通过基于Ford-Fulkerson方法的网络最大流算法<sup>[25]</sup>进行求解; $\lambda$ 为惩罚系数.

3 实验与分析

为了测试改进的两层ABC算法的有效性,设计不同规模的算例进行测试.算法都采用Matlab语言编程,实验环境为Intel Core 2 CPU 1.83 GHz,内存2.00 GB.

表3 算例的规模

算例	供应点数量	3PL物流中心数量	3PL仓库数量	需求点数量
P1	2	3	4	8
P2	3	4	5	12
P3	3	7	8	12
P4	4	8	9	16
P5	5	9	10	20

表3给出了算例P1~P5的规模,包括供应点数量、3PL物流中心数量、3PL仓库数量和需求点数量.算例的参数都按照下面均匀分布随机产生:供应点的最大供应量 $S_i \sim U[240, 260]$ ;需求点的需求量 $D_l \sim U[40, 70]$ ;3PL物流中心的单位处理成本 $C_j^H \sim U[10, 50]$ ,处理能力 $Q_j^H \sim U[100, 200]$ ,开设成本 $G_{j1}^H \sim U[300, 500]$ ,攻击成本 $F_{j1}^H \sim U[150, 200]$ ;3PL

仓库的单位处理成本 $C_k^W \sim U[10, 50]$ ,处理能力 $Q_k^W \sim U[100, 200]$ ,开设成本 $G_{k1}^W \sim U[300, 450]$ ,攻击成本 $F_{k1}^W \sim U[100, 150]$ ;各物流节点之间的单位运输成本 $P_{ij}^A$ 、 $P_{jk}^B$ 、 $P_{kl}^C$ 、 $P_{ik}^D$ 和 $P_{jl}^E$ 都按分布 $U[10, 50]$ 产生(3PL物流中心和3PL仓库的安全等级增加一级,则开设成本多100;攻击等级增加一级,则攻击成本多50).

为了测试改进的两层ABC算法的性能,对算例P1~P5进行求解,并将结果分别与两层ABC算法、两层PSO/ABC算法、两层DE/ABC算法进行对比.其中:可靠性水平 $\beta$ 取值为0.5,最大攻击成本 $\varepsilon$ 分别在800~2500之间取值.为了公平比较,几种两层算法的下层算法都采用标准ABC算法,上层算法都采用相同的编码方式,并且评估相同数量的解.其中:下层ABC算法的种群规模为10,最大迭代次数为50,蜜源最大改进次数为10.改进的两层ABC算法的上层改进ABC算法的种群规模为20,最大迭代次数为50,惯性系数为1,学习因子为1.4.两层ABC算法的上层ABC算法的种群规模为20,最大迭代次数为50,蜜源最大改进次数为20.两层PSO/ABC算法的上层PSO算法的种群规模为20,循环代数为100,惯性系数为1,学习因子为1.4.两层DE/ABC算法的上层DE算法的种群规模为20,循环代数为100,交叉概率为0.3,缩放因子为0.5.

对于每个算例每种算法分别运行20次,表4给出了几种算法的最好值、最差值、平均值和平均偏差率(((平均值-最好值)/最好值)×100%).

由表4可见,改进的两层ABC算法的最好值、最差值、平均值和平均偏差率都优于其他几种算法.其中,平均偏差率在0.1%~0.9%内变化,明显优于其他算法.可见,对于不同规模的算例,改进的两层ABC算法能够保持稳定的性能.

表5给出了不同规模算例的详细结果,包括目标值、开设成本、运输和处理成本、实际服务水平、攻击后总需求满足量、实际攻击成本.可见,根据本文模型和算法得到的网络在攻击成本不超过给定的最大攻击成本情况下,其服务水平都满足要求.其中,实际攻击成本与最大攻击成本之差不得超过220,而实际服务水平则保持在0.5~0.54之间.

为了分析可靠性水平 $\beta$ 对网络设计结果的影响,以算例P1为例进行实验.表6给出了不同可靠性水平下得到的详细结果(其中最大攻击成本 $\varepsilon$ 为800).由表6可见,随着 $\beta$ 的增加,目标值、开设成本、攻击后总需求满足量、实际服务水平都有所增加,运输和

处理成本保持稳定,实际攻击成本与最大攻击成本之差不超过160.因为在最大攻击成本 $\varepsilon$ 一定的情况下,随着 $\beta$ 的增大,网络要满足可靠性水平可能要开设数量更多的或安全等级更高的3PL物流中心和3PL仓

库,结果导致开设成本的增加,而用于正常运输部分的网络可能保持不变,所以运输和处理成本可能保持不变.同时,随着 $\beta$ 的增大,要满足可靠性水平条件,攻击后总需求满足量和实际服务水平必然会增大.

表4 不同规模算例下几种算法的性能对比

算例	$\beta$	$\varepsilon$	算法	最好值	最差值	平均值	平均偏差率/%
P1	0.5	800	改进的两层ABC	<b>27 383</b>	<b>27 531</b>	<b>27 430</b>	<b>0.171 6</b>
			两层ABC	27 389	27 583	27 452	0.252 0
			两层PSO/ABC	27 417	27 606	27 489	0.387 1
			两层DE/ABC	27 457	27 657	27 548	0.602 6
P2	0.5	1 100	改进的两层ABC	<b>41 148</b>	<b>41 295</b>	<b>41 201</b>	<b>0.128 8</b>
			两层ABC	41 148	41 457	41 333	0.449 6
			两层PSO/ABC	41 395	41 923	41 614	1.132 5
			两层DE/ABC	41 783	41 830	41 806	1.599 1
P3	0.5	1 500	改进的两层ABC	<b>36 233</b>	<b>36 722</b>	<b>36 548</b>	<b>0.869 4</b>
			两层ABC	36 457	36 905	36 651	1.153 6
			两层PSO/ABC	37 250	38 030	37 590	3.745 2
			两层DE/ABC	36 898	37 152	37 007	2.136 2
P4	0.5	2 000	改进的两层ABC	<b>49 312</b>	<b>49 665</b>	<b>49 436</b>	<b>0.251 5</b>
			两层ABC	49 314	49 674	49 489	0.358 9
			两层PSO/ABC	49 858	50 292	50 096	1.589 9
			两层DE/ABC	49 849	50 390	50 091	1.579 7
P5	0.5	2 500	改进的两层ABC	<b>55 823</b>	<b>56 043</b>	<b>55 988</b>	<b>0.295 6</b>
			两层ABC	55 931	56 473	56 136	0.560 7
			两层PSO/ABC	56 322	56 964	56 568	1.334 6
			两层DE/ABC	56 692	57 137	56 923	1.970 5

表5 不同规模算例的详细结果

算例	$\beta$	$\varepsilon$	目标值	开设成本	运输和处理成本	实际服务水平	攻击后总需求满足量	实际攻击成本
P1	0.5	800	27 383	2 256	25 127	0.512 4	227	689
P2	0.5	1 100	41 148	2 557	38 591	0.507 2	316	888
P3	0.5	1 500	36 233	3 261	32 972	0.505 3	336	1 313
P4	0.5	2 000	49 312	4 989	44 323	0.539 6	491	1 868
P5	0.5	2 500	55 823	5 638	50 185	0.512 2	546	2 456

表6 不同可靠性 $\beta$ 下算例P1的详细结果

$\beta$	目标值	开设成本	运输和处理成本	攻击后总需求满足量	实际服务水平	实际攻击成本
0.3	27 157	2 030	25 127	145	0.3273	640
0.4	27 289	2 162	25 127	197	0.444 7	764
0.5	27 383	2 256	25 127	227	0.512 4	689
0.6	27 557	2 430	25 127	305	0.688 5	792
0.7	27 815	2 688	25 127	317	0.715 6	785
0.8	27 857	2 730	25 127	372	0.839 7	682
0.9	27 863	2 736	25 127	399	0.900 7	787



为了分析最大攻击成本  $\varepsilon$  对网络设计结果的影响, 同样以 P1 为例进行实验. 表 7 给出了算例 P1 在不同攻击成本下的详细结果 (其中可靠性水平  $\beta$  为 0.5). 由表 7 可见, 随着  $\varepsilon$  的增加, 目标值、开设成本、实际攻击成本都增加, 运输和处理成本、攻击后总需求满足量、实际服务水平则基本保持稳定. 因为在可靠性水平  $\beta$  一定的情况下, 随着  $\varepsilon$  的增大, 网络要保持

一定的可靠性水平, 同样可能需要开设数量更多或安全等级更高的 3PL 物流中心和 3PL 仓库, 结果使开设成本增加, 而用于正常运输部分的网络也可能保持不变, 所以运输和处理成本可能保持不变. 此外, 由于网络具有冗余或安全等级较高的 3PL 物流节点, 在受攻击之后对需求的满足量可以保持稳定, 从而攻击后总需求满足量、实际服务水平也可能基本保持稳定.

表 7 不同攻击成本  $\varepsilon$  下算例 P1 的详细结果

$\varepsilon$	目标值	开设成本	运输和处理成本	攻击后总需求满足量	实际服务水平	实际攻击成本
400	26 657	1 530	25 127	227	0.512 4	349
600	27 089	1 962	25 127	227	0.512 4	582
800	27 383	2 256	25 127	227	0.512 4	689
1 000	27 763	2 636	25 127	227	0.512 4	970
1 200	28 189	3 062	25 127	227	0.512 4	1 160
1 400	28 589	3 462	25 127	280	0.632 1	1 296
1 600	29 189	4 062	25 127	227	0.512 4	1 360
1 800	29 489	4 362	25 127	253	0.571 1	1 746

#### 4 结 论

本文研究了考虑多等级蓄意攻击的第三方物流可靠性网络设计问题, 建立了多层优化模型, 设计了改进的两层 ABC 算法和网络流算法并进行求解. 最后, 通过仿真实验验证了算法的有效性. 实验结果表明, 多层优化模型能够对问题进行合理描述, 并且改进的两层 ABC 算法能够对问题进行有效求解. 另外, 还分析了模型中的两个重要参数可靠性水平和最大攻击成本对网络设计结果的影响, 结果表明, 无论增加可靠性水平还是增加最大攻击成本, 要想得到可靠的网络都可能需要增加开设成本以开设更多的或安全等级更高的 3PL 物流中心或 3PL 仓库.

#### 参考文献(References)

[1] Marasco A. Third-party logistics: A literature review[J]. Int J of Production Economics, 2008, 113(1): 127-147.

[2] Basligil H, Kara S S, Alcan P, et al. A distribution network optimization problem for third party logistics service providers[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10): 12730-12738.

[3] Ko H J, Ko C S, Kim T. A hybrid optimization/simulation approach for a distribution network design of 3PLs[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 50(4): 440-449.

[4] Suyabatmaz A C, Altekin F T, Sahin G. Hybrid simulation-analytical modeling approaches for the reverse logistics network design of a third-party logistics provider[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014,

70(2): 74-89.

[5] Mahmoudzadeh M, Mansour S, Karimi B. To develop a third-party reverse logistics network for end-of-life vehicles in Iran[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 78(3): 1-14.

[6] 何波, 杨超, 任鸣鸣. 基于第三方物流的产品回收物流网络优化模型及算法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(1): 39-44.  
(He B, Yang C, Ren M M. Model & algorithm of optimal design of logistics network for product return based on third party logistics[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(1): 39-44.)

[7] Min H, Ko H J. The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers[J]. Int J of Production Economics, 2008, 113(1): 176-192.

[8] 高阳, 詹沙磊. 基于第三方物流的多周期多目标产品回收网络设计[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1164-1168.  
(Gao Y, Zhan S L. Design for multi-period multi-objective product recovery networks based on third party logistics[J]. Control and Decision, 2010, 25(8): 1164-1168.)

[9] Ko H J, Evans G W. A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs[J]. Computers and Operations Research, 2007, 34(2): 346-366.

[10] Peng P, Snyder L V, Lim A, et al. Reliable logistics networks design with facility disruptions[J].



- Transportation Research Part B, 2011, 45(8): 1190-1211.
- [11] Meepetchdee Y, Shah N. Logistical network design with robustness and complexity considerations[J]. *Int J of Physical Distribution & Logistics Management*, 2007, 37(3): 201-222.
- [12] Vahdani B, Tavakkoli-Moghaddam R, Modarres M, et al. Reliable design of a forward/reverse logistics network under uncertainty: A robust-M/M/c queuing model[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(6): 1152-1168.
- [13] 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.
- [14] Scaparra M P, Church R L. A bilevel mixed-integer program for critical infrastructure protection planning[J]. *Computers & Operations Research*, 2008, 35(6): 1905-1923.
- [15] Liberatore F, Scaparra M P, Daskin M S. Analysis of facility protection strategies against an uncertain number of attacks: The stochastic R-interdiction median problem with fortification[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(1): 357-366.
- [16] Capanera P, Scaparra M P. Optimal allocation of protective resources in shortest-path networks[J]. *Transportation Science*, 2011, 45(1): 64-80.
- [17] Snyder L V, Daskin M S. Models for reliable supply chain network design[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2007: 257-289.
- [18] O'Hanley J R, Church R L. Designing robust coverage networks to hedge against worst-case facility losses[J]. *European J of Operational Research*, 2011, 209(1): 23-36.
- [19] Lin L, Gen M, Wang X. A hybrid genetic algorithm for logistics network design with flexible multistage model[J]. *Int J of Information Systems for Logistics and Management*, 2007, 3(1): 1-12.
- [20] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Kayseri: Erciyes University, 2005: 1-10.
- [21] 刘三阳, 张平, 朱明敏. 基于局部搜索的人工蜂群算法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(1): 123-128.  
(Liu S Y, Zhang P, Zhu M M. Artificial bee colony algorithm based on local search[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(1): 123-128.)
- [22] 马文强, 唐秋华, 张超勇, 等. 基于离散人工蜂群算法的炼钢连铸调度优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(3): 586-594.  
(Ma W Q, Tang Q H, Zhang C Y, et al. Steel-making continuous-casting scheduling method based on DABC algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(3): 586-594.)
- [23] 靳金涛, 聂兰顺, 战德臣, 等. 基于人工蜂群的空间资源受限项目调度算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(5): 1088-1098.  
(Jin J T, Nie L S, Zhan D C, et al. Spatial resource constrained project scheduling algorithm based on artificial bee colony[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(5): 1088-1098.)
- [24] 张培文, 潘全科, 李俊青, 等. 有限缓冲区流水车间调度的混合人工蜂群算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(10): 2510-2520.  
(Zhang P W, Pan Q K, Li J Q, et al. Hybrid artificial bee colony algorithms for flowshop scheduling problem with limited buffers[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(10): 2510-2520.)
- [25] 胡运权, 郭耀煌. 运筹学教程[M]. 第4版. 北京: 清华大学出版社, 2012: 236-249.  
(Hu Y Q, Guo Y H. Operations research tutorials[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 236-249.)
- [26] Shi Y, Eberhart R C. A modified particle swarm optimizer[C]. *Proc of Conf on Evolutionary Computation*. Piscataway: IEEE Press, 1998: 69-73.

(责任编辑: 李君玲)