

## 考虑蓄意攻击的第三方物流多周期可靠性网络设计

李锐<sup>1</sup>, 黄敏<sup>2</sup>, 孙福明<sup>1</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:** 研究多周期环境下的第三方物流(3PL)可靠性网络设计问题, 并考虑蓄意攻击中断. 建立多层的3PL可靠性网络设计模型. 网络优化模型在满足可靠性约束条件下优化各周期的网络结构, 包括物流设施的开设和运输量的确定, 使网络总成本最小. 蓄意攻击模型优化各周期的攻击策略使网络服务水平最低. 根据问题模型的特点, 设计改进的两层分布估计算法, 上层分布估计算法求解多周期3PL网络设计模型, 下层分布估计算法求解多周期攻击模型. 最后, 通过仿真实验表明了模型的合理性和算法的有效性.

**关键词:** 第三方物流; 网络设计; 多周期; 可靠性; 分布估计算法

**中图分类号:** TP29

**文献标志码:** A

## Multi-period reliable network design of third-party logistics with proactive attack considered

LI Rui<sup>1</sup>, HUANG Min<sup>2</sup>, SUN Fu-ming<sup>1</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. Correspondent: LI Rui, E-mail: rui850109@163.com)

**Abstract:** The problem of multi-period reliable network design for third-party logistics(3PL) is studied with deliberate attack disruption considered. A multi-level model of 3PL reliable network design is established. The network optimization model optimizes the structure of network in every period, including the opening of the logistics facility and the determination of transportation quantity, to minimize the total costs subjective to reliability constraint. The proactive attack model optimizes the attack strategy in each period to minimize the service level of the network. According to the characteristic of the model, an improved two-level estimation of the distribution algorithm(EDA) is designed. The top-level EDA is used to solve the model of 3PL multi-period network design, while the down-level EDA is used to solve the model of multi-period attack. Finally, several simulation experiments are presented to illustrate the rationality of the model and the effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** third-party logistics; network design; multi-period; reliability; estimation of distribution algorithm

## 0 引言

物流产业作为国民经济中的动脉系统, 已成为支撑国民经济发展的基础. 很多企业已经意识到物流管理是控制成本的重要手段, 但是由于管理技术和专业能力的限制, 企业不能构建和发展自己的物流系统. 因此, 为了集中优势来发展自己的核心业务, 提高市场竞争力, 企业正逐渐将物流业务外包给专业的物流公司. 在这种趋势下, 第三方物流(3PL)得到了广泛的关注和迅猛的发展. 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, 对于降低物流成本和提高物流效率至关重要. 因此, 设计一个合理的物流服务网络是3PL管理者必须面对的问题. 实际中, 3PL物流设施和运输线路的有关成本、能力等在不同时期内往往不同, 所以考虑多周期的3PL网络设计问题更具现实意义. 目前, 多周期的3PL物流网络设计问题已经得到一定的关注. Ko等<sup>[2]</sup>研

**收稿日期:** 2015-11-18; **修回日期:** 2016-03-25.

**基金项目:** 国家杰出青年科学基金项目(71325002, 61225012); 国家自然科学基金项目(71071028); 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, 副教授, 博士, 从事物流优化、智能算法等研究; 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、软计算等研究.

究了基于 3PL 的多周期正逆向集成网络设计问题. Min 等<sup>[3]</sup>以 3PL 为视角, 研究了逆向物流网络多周期设计问题. 高阳等<sup>[4]</sup>研究了基于 3PL 的多周期多目标产品回收物流网络设计问题. 然而, 现有多周期的 3PL 网络设计问题的研究并没有考虑网络的安全性.

现实中, 3PL 网络还会面临各种中断风险, 包括由自然因素造成的不确定性中断和由人为因素造成的蓄意攻击中断, 其中蓄意攻击中断对网络系统的破坏更为严重. 最近, 有关安全性物流网络设计问题已经得到一定的研究. Peng 等<sup>[5]</sup>研究了带有设施中断的可靠性物流网络设计问题. Meepetchdee 等<sup>[6]</sup>对考虑鲁棒性和复杂性的物流网络设计问题进行了研究. Vahdani 等<sup>[7]</sup>建立了考虑物流设施中断的双目标模型, 并通过一种混合排队论、模糊可能性规划和模糊多目标规划的方法进行求解. Hatefi 等<sup>[8-9]</sup>分别基于可信性约束规划方法和鲁棒性优化方法对正逆向集成物流可靠性网络设计问题进行了研究. 然而, 这些研究仅考虑了物流设施的随机中断. 与此同时, 蓄意攻击下的物流网络设计相关问题也得到了关注. Scaparra 等<sup>[10]</sup>针对考虑蓄意攻击的设施保护问题, 建立了两层规划模型. Liberatore 等<sup>[11]</sup>研究了蓄意攻击程度不确定的设施保护问题. Cappanera 等<sup>[12]</sup>基于博弈论的方法研究了最短路网络的保护问题, 并建立了适用于蓄意攻击的最坏情况模型. Snyder 等<sup>[13]</sup>以无能力约束设施选址问题为基础, 建立了适用于蓄意攻击的最坏情况模型. O'Hanley 等<sup>[14]</sup>针对鲁棒性的网络覆盖问题建立了适用于蓄意攻击的最坏情况模型. 值得注意的是, 蓄意攻击下的物流网络设计相关问题的研究都只考虑单周期运营环境.

本文研究考虑蓄意攻击的 3PL 多周期可靠性网络设计问题. 与现有 3PL 多周期网络设计问题的模型不同, 本文建立了考虑蓄意攻击中断的多层优化模型. 根据问题模型特点, 设计改进的两层分布估计算法进行求解. 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 承担某一地区内多个周期的物流配送任务, 网络结构如图 1 所示.

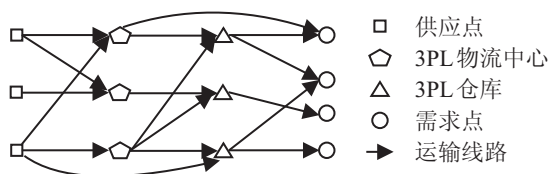


图 1 3PL 网络结构

3PL 服务网络是由供应点、需求点、3PL 物流中心、3PL 仓库和运输线路组成的多级网络. 此外, 在

传统的多级物流网络中, 只考虑相邻两级物流设施之间的运输. 为了使运输更加灵活, Lin 等<sup>[15]</sup>针对多级物流网络提出了柔性运输方式, 即不相邻的两级物流设施之间的运输. 由于采用柔性的运输方式, 供应点与 3PL 仓库之间、3PL 物流中心与需求点之间都可以直接进行运输.

3PL 多周期可靠性网络设计是指, 在各周期内通过选择开设 3PL 物流中心和仓库以及确定各物流节点之间的运输量来最小化网络总成本, 同时使其在蓄意攻击下满足一定的服务水平. 蓄意攻击是指人为主动地攻击 3PL 物流中心或仓库, 使网络破坏效果最大.

模型作如下假设:

1) 供应点  $i$  在周期  $t$  的最大供应量为  $S_{it}$ ,  $i \in I$ ,  $t \in T$ ,  $I$  为供应点集合,  $T$  为周期集合;

2) 需求点  $l$  在周期  $t$  的需求量为  $D_{lt}$ ,  $l \in L$ ,  $t \in T$ ,  $L$  为需求点集合;

3) 3PL 物流中心  $j$  在周期  $t$  的单位处理成本、处理能力、开设成本、运作成本和攻击成本分别为  $C_{jt}^H$ 、 $Q_{jt}^H$ 、 $G_{jt}^H$ 、 $R_{jt}^H$  和  $F_{jt}^H$ ,  $j \in J$ ,  $t \in T$ ,  $J$  为 3PL 物流中心集合;

4) 3PL 仓库  $k$  在周期  $t$  的单位处理成本、处理能力、开设成本、运作成本和攻击成本分别为  $C_{kt}^W$ 、 $Q_{kt}^W$ 、 $G_{kt}^W$ 、 $R_{kt}^W$  和  $F_{kt}^W$ ,  $k \in K$ ,  $t \in T$ ,  $K$  为 3PL 仓库集合;

5) 各个物流节点之间(包括供应点与 3PL 物流中心、3PL 物流中心与 3PL 仓库、3PL 仓库与需求点、供应点与 3PL 仓库、3PL 物流中心与需求点)在各个周期的单位运输成本分别为  $P_{ijt}^A$ 、 $P_{jkt}^B$ 、 $P_{klt}^C$ 、 $P_{ikt}^D$  和  $P_{jlt}^E$ ,  $i \in I$ ,  $j \in J$ ,  $k \in K$ ,  $l \in L$ ,  $t \in T$ ;

6) 初始开设或关闭后重新开设的 3PL 物流中心和仓库产生开设成本;

7) 被攻击的 3PL 物流中心或仓库只在当前周期内不能正常运作.

基于以上假设, 建立考虑蓄意攻击的 3PL 多周期可靠性网络设计问题的多层优化模型. 3PL 网络优化模型最小化网络总成本, 同时使网络在蓄意攻击下满足一定的服务水平; 蓄意攻击优化模型通过优化各周期攻击策略使攻击破坏效果最大, 即最大程度地降低网络的服务能力.

### 1.1 3PL 网络优化模型

决策变量定义如下:  $x_{jt} \in \{0, 1\}$ , 如果 3PL 物流中心  $j$  在周期  $t$  被选择开设, 则取值为 1, 否则取 0;  $y_{kt} \in \{0, 1\}$ , 如果 3PL 仓库  $k$  在周期  $t$  被选择开设, 则取值为 1, 否则为 0;  $z_{ijt}^A \geq 0$ 、 $z_{jkt}^B \geq 0$ 、 $z_{klt}^C \geq 0$ 、 $z_{ikt}^D \geq 0$  和  $z_{jlt}^E \geq 0$  分别表示在周期  $t$  内供应点  $i$  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  $X = \{x_{jt} | \forall j \in J, \forall t \in T\}$ ,  $Y = \{y_{kt} | \forall k \in K, \forall t \in T\}$ . 建立 3PL 网络优化模型为

$$\begin{aligned} \min C(X, Y) = & \sum_{t \in T} \left[ \sum_{j \in J} G_{jt}^H x_{jt} (1 - x_{j(t-1)}) + \right. \\ & \sum_{k \in K} G_{kt}^W y_{kt} (1 - y_{k(t-1)}) + \sum_{j \in J} R_{jt}^H x_{jt} + \\ & \sum_{k \in K} R_{kt}^W y_{kt} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} C_{ijt}^H z_{ijt}^A + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} C_{klt}^W z_{klt}^C + \\ & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} P_{ijt}^A z_{ijt}^A + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} P_{jkt}^B z_{jkt}^B + \\ & \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} P_{klt}^C z_{klt}^C + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} P_{ikt}^D z_{ikt}^D + \\ & \left. \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} P_{jlt}^E z_{jlt}^E \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} z_{ijt}^A = \sum_{k \in K} z_{jkt}^B + \sum_{l \in L} z_{jlt}^E, \\ \forall j \in J, \forall t \in T; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sum_{l \in L} z_{klt}^C = \sum_{j \in J} z_{jkt}^B + \sum_{i \in I} z_{ikt}^D, \\ \forall k \in K, \forall t \in T; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} z_{ijt}^A \leq Q_{jt}^H x_{jt}, \forall j \in J, \forall t \in T; \quad (5)$$

$$\sum_{l \in L} z_{klt}^C \leq Q_{kt}^W y_{kt}, \forall k \in K, \forall t \in T; \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ijt}^A + \sum_{k \in K} z_{ikt}^D \leq S_{it}, \forall i \in I, \forall t \in T; \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} z_{klt}^C + \sum_{j \in J} z_{jlt}^E = D_{lt}, \forall l \in L, \forall t \in T; \quad (8)$$

$$z_{ijt}^A \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T; \quad (9)$$

$$z_{jkt}^B \geq 0, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in T; \quad (10)$$

$$z_{klt}^C \geq 0, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T; \quad (11)$$

$$z_{ikt}^D \geq 0, \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T; \quad (12)$$

$$z_{jlt}^E \geq 0, \forall j \in J, \forall l \in L, \forall t \in T; \quad (13)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \forall t \in T; \quad (14)$$

$$y_{kt} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall t \in T. \quad (15)$$

目标函数(1)最小化网络总成本,包括3PL物流中心和仓库的开设成本和运作成本,产品的处理和运输成本;可靠性约束(2)要求网络在蓄意攻击下满足一定的服务水平 $\beta$ ,其中 $G(X, Y)$ 为各周期的网络在攻击下对所有需求最大满足量之和的最小值(由

蓄意攻击优化模型(16)~(21)确定);约束(3)和(4)分别表示3PL物流中心和3PL仓库两端的流量平衡;约束(5)和(6)分别表示3PL物流中心和3PL仓库的处理能力约束;约束(7)为供应点的最大供应能力约束;约束(8)要求需求点的需求量必须被满足;约束(9)~(13)是各个物流节点之间运输量的非负约束;约束(14)和(15)表示二值的决策变量。

### 1.2 蓄意攻击优化模型

引入如下决策变量:  $a_{jt} \in \{0, 1\}$ , 如果3PL物流中心  $j$  在周期  $t$  被攻击, 则取值为1, 否则为0;  $b_{kt} \in \{0, 1\}$ , 如果3PL仓库  $k$  在周期  $t$  被攻击, 则取值为1, 否则为0. 令  $A_t = \{a_{jt} | \forall j \in J\}$ ,  $B_t = \{b_{kt} | \forall k \in K\}$ ,  $X_t = \{x_{jt} | \forall j \in J\}$ ,  $Y_t = \{y_{kt} | \forall k \in K\}$ .

建立蓄意攻击优化模型为

$$G(X, Y) = \min \sum_{t \in T} \Phi(X_t, Y_t, A_t, B_t). \quad (16)$$

$$\text{s.t. } a_{jt} \leq x_{jt}, \forall j \in J, \forall t \in T; \quad (17)$$

$$b_{kt} \leq y_{kt}, \forall k \in K, \forall t \in T; \quad (18)$$

$$\sum_{t \in T} \left( \sum_{j \in J} F_{jt}^H a_{jt} + \sum_{k \in K} F_{kt}^W b_{kt} \right) \leq \varepsilon; \quad (19)$$

$$a_{jt} \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \forall t \in T; \quad (20)$$

$$b_{kt} \in \{0, 1\}, \forall k \in K, \forall t \in T. \quad (21)$$

目标函数(16)最小化网络在蓄意攻击下对需求的满足量,  $\Phi(X_t, Y_t, A_t, B_t)$ 表示周期  $t$  的网络  $(X_t, Y_t)$  在攻击  $(A_t, B_t)$  下对所有需求点的最大满足量(即去除被攻击3PL服务节点后剩余网络的最大流), 由网络流决策模型(22)~(33)确定(见下文);约束(17)和(18)表示被攻击的3PL物流中心和仓库必须是已选择开设的;约束(19)要求总的攻击成本不超过 $\varepsilon$ ;约束(20)和(21)表示二值的攻击决策变量。

网络流决策模型为

$$\Phi(X_t, Y_t, A_t, B_t) = \max \sum_{l \in L} \left( \sum_{k \in K} f_{klt}^C + \sum_{j \in J} f_{jlt}^E \right). \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } \sum_{i \in I} f_{ijt}^A = \sum_{k \in K} f_{jkt}^B + \sum_{l \in L} f_{jlt}^E, \\ \forall j \in J, \forall t \in T; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sum_{l \in L} f_{klt}^C = \sum_{j \in J} f_{jkt}^B + \sum_{i \in I} f_{ikt}^D, \\ \forall k \in K, \forall t \in T; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} f_{ijt}^A \leq Q_{jt}^H x_{jt} (1 - a_{jt}), \\ \forall j \in J, \forall t \in T; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{l \in L} f_{klt}^C \leq Q_{kt}^W y_{kt} (1 - b_{kt}), \\ \forall k \in K, \forall t \in T; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\sum_{j \in J} f_{ijt}^A + \sum_{k \in K} f_{ikt}^D \leq S_{it}, \forall i \in I, \forall t \in T; \quad (27)$$

$$\sum_{k \in K} f_{klt}^C + \sum_{j \in J} f_{jlt}^E \leq D_{lt}, \forall l \in L, \forall t \in T; \quad (28)$$

$$f_{ijt}^A \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T; \quad (29)$$

$$f_{jkt}^B \geq 0, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall t \in T; \quad (30)$$

$$f_{klt}^C \geq 0, \forall k \in K, \forall l \in L, \forall t \in T; \quad (31)$$

$$f_{ikt}^D \geq 0, \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T; \quad (32)$$

$$f_{jlt}^E \geq 0, \forall j \in J, \forall l \in L, \forall t \in T. \quad (33)$$

其中  $f_{ijt}^A$ 、 $f_{jkt}^B$ 、 $f_{klt}^C$ 、 $f_{ikt}^D$  和  $f_{jlt}^E$  分别为蓄意攻击下各个物流节点之间的运输量。

目标函数(22)最大化网络在蓄意攻击下对所有需求点的满足量;约束(23)和(24)分别表示3PL物流中心和3PL仓库两端的流量平衡;约束(25)和(26)分别表示3PL物流中心和3PL仓库的处理能力约束;约束(27)为供应点的最大供应能力约束;约束(28)表示对需求点的满足量不能超过需求量;约束(29)~(33)为各个物流节点之间运输量的非负约束。

## 2 改进的两层分布估计算法

蓄意攻击下3PL多周期可靠性网络设计问题的模型复杂,求解困难。多周期3PL可靠性网络设计问题是经典物流网络设计问题的扩展,是NP-hard问题,网络蓄意攻击问题可归结为经典的背包问题,也是NP-hard问题,因此,智能优化方法更适合对该问题进行求解。

近年来,分布估计算法<sup>[16]</sup>(EDA)作为一种新的进化计算方法正得到人们的关注。EDA在进化过程中,首先构建描述解空间的概率模型,然后根据概率模型进行采样产生新的种群,其中PBIL<sup>[17]</sup>、UMDA<sup>[18]</sup>和cGA<sup>[19]</sup>是几种经典的分布估计算法。

本文根据问题的特点,设计改进的两层EDA算法。上层EDA算法求解多周期3PL可靠性网络设计问题,下层EDA算法求解网络蓄意攻击优化问题。改进EDA算法的上层EDA在概率模型更新过程中通过对优势个体的数量和学习速率进行动态调节来进一步改善算法的性能。

### 2.1 上层EDA算法

#### 2.1.1 上层EDA算法步骤

Step 1: 根据初始概率  $P_1^U(X) = [0.5, \dots, 0.5]$  随机生成  $M_1$  个个体作为初始种群(编码方式详见2.1.2节),对初始种群进行评估(见第2.1.3节),并设置迭代次数  $l = 1$ 。

Step 2: 选择  $N_1$  个优势个体构成优势种群进而构建概率模型  $P_{l+1}^U(X)$ ,  $N_1 < M_1$  (见第2.1.4节)。

Step 3: 由概率模型  $P_{l+1}^U(X)$  采样得到  $M_1$  个个体构成新的种群。

Step 4: 对种群进行评估(见第2.1.3节),计算每个个体的适应度。

Step 5: 若算法达到最大迭代次数,则选择目标值最小的解输出,否则转至Step 2,并设置  $l = l + 1$ 。

#### 2.1.2 个体编码

上层EDA个体采用二值向量表示。向量的维数为所有周期的潜在3PL物流中心和仓库的数量之和。每一位二进制数的值表示某个周期内3PL物流中心或3PL仓库的选择开设情况,1表示选择开设(即对应的  $x_{jt}$  或  $y_{kt}$  取值为1),0表示未被选择开设(即对应的  $x_{jt}$  或  $y_{kt}$  取值为0)。

#### 2.1.3 个体适应度评价

对上层EDA个体进行解码得到解  $(X, Y)$ , 按照式(34)计算个体的适应值

$$\begin{aligned} \text{Fit}(X, Y) = & C(X, Y) + \eta_1 \left( \beta - G(X, Y) \right) / \left( \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} D_{lt} \right)^+ + \\ & \eta_2 \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \left( D_{lt} - \sum_{k \in K} z_{klt}^C - \sum_{j \in J} z_{jlt}^E \right)^+. \end{aligned} \quad (34)$$

其中:  $C(X, Y)$  表示目标函数(1),给定各个周期的网络结构  $(X_t, Y_t)$ , 可通过增加辅助节点和弧的方法转换为最小费用流问题进行求解,约束(3)~(7)可自动满足;然而,一个解可能不满足可靠性约束(2)和需求满足约束(8),将其作为惩罚项加入评价函数中,  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别为这两个约束的惩罚系数,  $G(X, Y)$  通过下层EDA进行求解(见第2.2节);  $(\cdot)^+$  表示如果括号内的值为正,则取该值,否则取零。

#### 2.1.4 概率模型更新

为了改善算法性能,在标准PBIL算法<sup>[17]</sup>的概率模型更新的基础上,对优势个体的数量  $N_1$  和  $\alpha$  进行动态调节,概率更新模型为

$$P_{l+1}^U(X) = (1 - \alpha)P_l^U(X) + \alpha \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} x_l^k. \quad (35)$$

其中:  $P_l^U(X)$  为第  $l$  代的概率向量,  $x_l^k$  为选择的  $N_1$  个优势个体(解向量),  $\alpha$  为学习速率,  $N_1 = N_{\min} + (N_{\max} - N_{\min})(l/NI)$ ,  $N_{\max}$  和  $N_{\min}$  分别为  $N_1$  的最大值和最小值,  $NI$  为算法的最大迭代次数,  $\alpha = \alpha_{\min} + (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})(l/NI)$ ,  $\alpha_{\max}$  和  $\alpha_{\min}$  分别为  $\alpha$  的最大值和最小值。

### 2.2 下层EDA算法

#### 2.2.1 下层EDA算法步骤

Step 1: 根据初始概率  $P_1^D(Y) = [0.5, \dots, 0.5]$  随机生成  $M_2$  个个体作为初始种群(编码方式见第2.2.2

节), 对初始种群进行评估(见第 2.2.3 节), 并设置迭代次数  $l = 1$ .

Step 2: 选择  $N_2$  个优势个体构成优势种群构建概率模型  $P_{l+1}^D(Y)$ ,  $N_2 < M_2$  (见第 2.2.4 节).

Step 3: 由概率模型  $P_{l+1}^D(Y)$  采样得到  $M_2$  个个体构成新的种群.

Step 4: 对种群进行评估(见第 2.2.3 节), 计算每个个体的适应值.

Step 5: 若算法达到最大迭代次数, 则选择目标值最小的解输出, 否则执行 Step 2, 并设置  $l = l + 1$ .

### 2.2.2 个体编码

下层 EDA 个体采用二值向量表示, 向量的维数为所有周期被选择开设的 3PL 物流中心和仓库的数量之和. 每一位二进制数的值表示某一周期内被选择的 3PL 物流中心或 3PL 仓库是否被攻击, 1 表示被攻击(即对应的  $a_{jt}$  或  $b_{kt}$  取值为 1), 0 表示未被攻击(即对应的  $a_{jt}$  或  $b_{kt}$  取值为 0). 按照这种编码方式, 约束 (17)、(18)、(20) 和 (21) 可自动满足.

### 2.2.3 个体评价

下层 EDA 个体的适应度为

$$\text{Fit}(X, Y, A, B) = \sum_{t \in T} \Phi(X_t, Y_t, A_t, B_t) + \lambda \left( \sum_{t \in T} \left( \sum_{j \in J} F_{jt}^H a_{jt} + \sum_{k \in K} F_{kt}^W b_{kt} \right) - \varepsilon \right)^+ \quad (36)$$

其中:  $\Phi(X_t, Y_t, A_t, B_t)$  由网络流决策模型 (22)~(33) 确定; 给定周期  $t$  被攻击之后的网络结构  $(X_t, Y_t, A_t, B_t)$  可通过网络最大流算法求得; 第 2 项为约束 (19) 的惩罚项;  $\lambda$  为惩罚系数.

### 2.2.4 概率模型更新

下层 EDA 采用 UMDA 方法<sup>[18]</sup>更新概率模型, 有

$$P_{l+1}^D(Y) = \frac{1}{N_2} \sum_{k=1}^{N_2} y_l^k \quad (37)$$

其中:  $P_l^D(Y)$  为第  $l$  代的概率向量,  $y_l^k$  为选择的  $N_2$  个优势个体(解向量).

## 3 仿真分析

为了测试改进的两层 EDA 算法的性能, 对数据随机生成问题进行测试. 所有算法均采用 Matlab 语言编程, 实验环境为 Intel Core 2 CPU 1.83 GHz, 内存 2.00 GB.

问题规模、攻击成本和可靠性如表 1 所示. 问题数据均按照如下均匀分布随机产生: 供应点的最大供应量  $S_{it} \sim U[240, 260]$ ; 需求点的需求量  $D_{lt} \sim U[40, 70]$ ; 3PL 物流中心的单位处理成本  $C_{jt}^H \sim U[10, 50]$ 、

处理能力  $Q_{jt}^H \sim U[100, 200]$ 、开设成本  $G_{jt}^H \sim U[300, 500]$ 、运作成本  $R_{jt}^H \sim U[100, 200]$ 、攻击成本  $F_{jt}^H \sim U[150, 200]$ ; 3PL 仓库的单位处理成本  $C_{kt}^W \sim U[10, 50]$ 、处理能力  $Q_{kt}^W \sim U[100, 200]$ 、开设成本  $G_{kt}^W \sim U[300, 450]$ 、运作成本  $R_{kt}^W \sim U[100, 150]$ 、攻击成本  $F_{kt}^W \sim U[100, 150]$ ; 各物流节点之间的单位运输成本  $P_{ijt}^A$ 、 $P_{jkt}^B$ 、 $P_{klt}^C$ 、 $P_{ikt}^D$  和  $P_{jlt}^E$  均按分布  $U[10, 50]$  产生.

表 1 不同规模的问题

问题	运营周期	供应点数量	3PL 物流中心数量	3PL 仓库数量	需求点数量	攻击成本	可靠性
$P_1$	2	3	4	6	7	800	0.5
$P_2$	3	2	3	5	6	1200	0.5
$P_3$	3	3	4	6	7	1500	0.5
$P_4$	4	2	4	6	6	2000	0.5
$P_5$	4	3	4	6	7	2300	0.5

首先, 对不同规模的问题进行求解, 将改进的两层 EDA 与两层 PBIL、两层 UMDA 和两层 cGA 进行比较. 为了公平比较, 几种两层算法的下层算法均采用 UMDA, 且下层 UMDA 的种群规模均设置为 30, 每代选择的优势个体数量为 15, 最大迭代次数为 50. 几种两层算法的上层算法参数设置如下: 两层 UMDA 的上层 UMDA 种群的规模为 30, 每代选择的优势个体数量为 15, 最大迭代次数为 100; 两层 PBIL 的上层 PBIL 种群规模为 30, 每代选择的优势个体数量为 15, 最大迭代次数为 100, 学习速率为 0.4; 两层 cGA 的上层 cGA 的最大迭代次数为 1500, 正整数  $K$  的取值为 25; 改进的两层 EDA 的上层算法种群规模为 30, 最大迭代次数为 100, 学习速率  $\alpha$  上的最大值  $\alpha_{\max}$  和最小值  $\alpha_{\min}$  分别设置为 0.9 和 0.1, 优势个体数量  $N_1$  的最大值  $N_{\max}$  和最小值  $N_{\min}$  分别设置为 15 和 2.

对于每个问题每种算法分别运行 20 次, 表 2 给出了几种算法运行结果的对比. 由表 2 可见, 对于不同规模的问题, 改进的两层 EDA 算法的最好值、最差值、平均值和平均偏差率都优于其他算法, 其中平均偏差率定义为  $((\text{平均值} - \text{最优值}) / \text{最优值}) \times 100\%$ . 此外, 随着问题规模的增大, 改进的两层 EDA 算法的平均偏差率都能够保持在 0.1~0.4 范围内变化, 明显优于其他算法. 可见, 随着问题规模的增大, 改进的两层 EDA 算法能够保持稳定的性能. 表 3 给出了问题的详细结果. 由表 3 可见, 对不同问题进行求解所得到的网络在实际攻击成本与最大攻击成本  $\varepsilon$  之间差值不超过 200 的情况下, 其实际可靠性都能够满足要求. 为了分析可靠性  $\beta$  和攻击成本  $\varepsilon$  对 3PL 网络优化模型中目标值、开设成本、运作成本和运输处理成本的影响, 以  $P_2$  为例进行实验. 其中:  $\beta$  取值 0.3~0.9,  $\varepsilon$  分别取 1000, 1500, 2000 和 2500.

表 2 改进的两层 EDA 与两层 PBIL、两层 UMDA 和两层 cGA 的性能对比

问题	算法	最好值	最差值	平均值	平均偏差率/%
$P_1$	改进的两层 EDA	<b>47 002</b>	<b>47 250</b>	<b>47 052</b>	<b>0.106 4</b>
	两层 PBIL	47 002	47 439	47 262	0.553 2
	两层 UMDA	47 307	47 777	47 521	1.104 2
	两层 cGA	47 307	47 915	47 564	1.195 7
$P_2$	改进的两层 EDA	<b>58 282</b>	<b>58 714</b>	<b>58 489</b>	<b>0.355 2</b>
	两层 PBIL	58 800	59 907	59 146	1.482 4
	两层 UMDA	59 268	59 854	59 441	1.988 6
	两层 cGA	58 767	59 559	59 060	1.334 9
$P_3$	改进的两层 EDA	<b>73 635</b>	<b>74 066</b>	<b>73 823</b>	<b>0.255 3</b>
	两层 PBIL	73 792	75 568	74 557	1.252 1
	两层 UMDA	74 046	75 191	74 508	1.185 6
	两层 cGA	73 900	74 902	74 503	1.178 8
$P_4$	改进的两层 EDA	<b>87 188</b>	<b>87 668</b>	<b>87 353</b>	<b>0.189 2</b>
	两层 PBIL	87 699	87 887	87 768	0.665 2
	两层 UMDA	88 092	88 502	88 353	1.336 2
	两层 cGA	87 795	91 023	89 125	2.221 6
$P_5$	改进的两层 EDA	<b>94 659</b>	<b>95 132</b>	<b>94 883</b>	<b>0.236 6</b>
	两层 PBIL	94 928	95 284	95 082	0.446 9
	两层 UMDA	95 981	96 135	96 063	1.483 2
	两层 cGA	95 092	95 628	95 428	0.812 4

表 3 不同规模问题的详细结果

问题	目标值	开设成本	运作成本	运输和处理成本	总需求满足量	实际可靠性	实际攻击成本
$P_1$	47 002	1 949	1 212	43 841	388	0.505 2	673
$P_2$	58 282	1 837	1 630	54 815	516	0.522 3	1 038
$P_3$	73 635	2 831	2 161	68 643	623	0.528 0	1 380
$P_4$	87 188	3 214	2 828	81 146	706	0.525 3	1 967
$P_5$	94 659	3 314	3 133	88 212	793	0.500 3	2 181

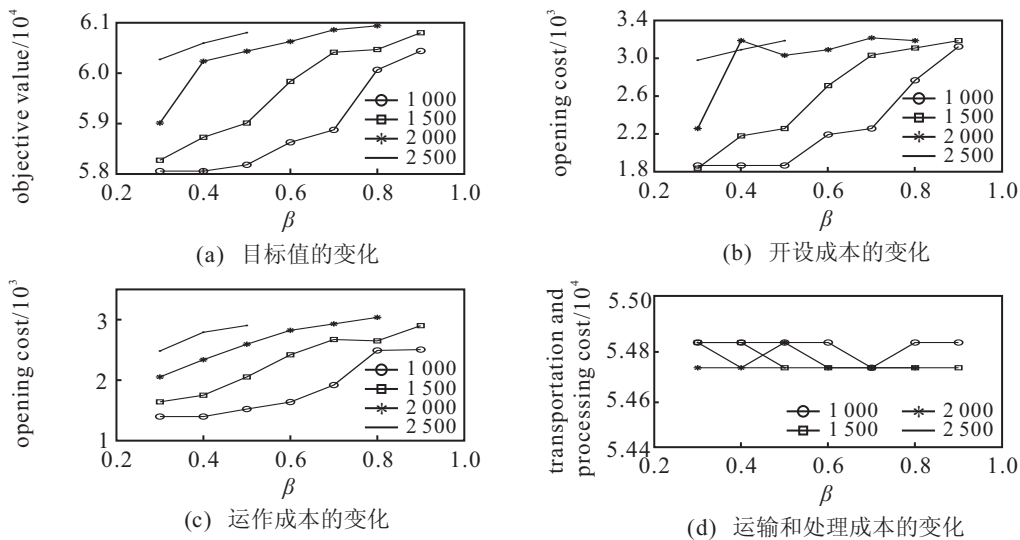


图 2 可靠性和攻击成本对目标值和各种成本的影响

图 2 给出了  $\beta$  和  $\epsilon$  对目标值和各种成本的影响。由图 2(a)~图 2(c) 可见, 在攻击成本不变的情况下, 随着可靠性的增加, 目标值、开设成本和运作成本总体都呈上升趋势。与上述情况类似, 在可靠性不变的情况下, 随着攻击成本的增加, 目标值、开设成本和运作成本也同样都呈上升趋势。由图 2(d) 可见, 随着可靠性和攻击成本的变化, 运输和处理成本波动不大, 基本趋于稳定。因为在增加可靠性或者增加攻击成本的

情况下, 要使网络达到一定的可靠性水平, 需要开设更多的 3PL 服务物流中心或者 3PL 仓库, 结果导致开设成本和运作成本增加, 而对于运输和处理成本的影响不大。另外, 当攻击成本为 1 000, 可靠性为 0.3~0.5 时, 目标值、开设成本和运作成本也基本保持不变。因为当攻击成本和可靠性都足够小时, 结构相似的网络便能够满足可靠性水平要求, 而各种成本也很接近。当攻击成本为 2 000, 可靠性为 0.9 或攻击成本为

2500, 可靠性为 0.6~0.9 时, 得不到所需网络. 因为当攻击成本和可靠性足够大时, 潜在的 3PL 服务节点的数量有限, 即使开设所有 3PL 服务节点也无法达到要求的可靠性水平.

#### 4 结 论

本文研究了 3PL 多周期可靠性网络设计问题. 与现有 3PL 多周期网络设计问题不同, 考虑了蓄意攻击中断, 建立了多层优化模型, 利用 3PL 网络优化模型优化网络结构, 利用蓄意攻击模型优化攻击策略. 根据模型的特点设计改进的两层 EDA 算法, 并在上层 EDA 中采用参数可变的概率模型更新方法改进算法的性能. 最后, 通过仿真实验验证了模型的合理性和算法的有效性, 并与两层 PBIL、两层 UMDA 和两层 cGA 进行了对比, 结果表明, 改进的两层 EDA 的性能优于其他算法. 另外, 分析了可靠性水平和攻击成本对 3PL 网络各种成本的影响.

#### 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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.)
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Vahdani B, Tavakkoli-Moghaddam R, Jolai F. Reliable design of a logistics network under uncertainty: A fuzzy possibilistic-queueing model[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(5): 3254-3268.
- [8] Hatefi S M, Jolai F, Torabi S A, et al. A credibility-constrained programming for reliable forward-reverse logistics network design under uncertainty and facility disruptions[J]. *Int J of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, 28(6): 664-678.
- [9] Hatefi S M, Jolai F. Reliable forward-reverse logistics network design under partial and complete facility disruptions[J]. *Int J of Logistics Systems and Management*, 2015, 20(3): 370-394.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Cappanera P, Scaparra M P. Optimal allocation of protective resources in shortest-path networks[J]. *Transportation Science*, 2011, 45(1): 64-80.
- [13] Snyder L V, Daskin M S. Models for reliable supply chain network design[M]. Berlin: Springer-Heidelberg, 2007: 257-289.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Larranaga P, Lozano J A. Estimation of distribution algorithms: A new tool for evolutionary computation[M]. Boston: Kluwer Press, 2002: 57-193.
- [17] Baluja S. Population-based incremental learning: A method for integrating genetic search based function optimization and competitive learning[R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1994.
- [18] Muhlenbein H. The equation for response to selection and its use for prediction[J]. *Evolutionary Computation*, 1997, 5(3): 303-346.
- [19] Harik G R, Lobo F G, Goldberg D E. The compact genetic algorithm[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1999, 3(4): 287-297.