

第四方物流多到多弹复性网络设计

李 锐, 孙福明, 佟玉军

(辽宁工业大学 电子与信息工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘 要: 为了使第四方物流(4PL)能够提供安全、有效的物流服务, 提出多个供需点对之间物流配送任务下的 4PL 弹复性网络设计模型。建立以总物流成本最小化为目标的优化模型, 考虑物流服务节点和运输线路的中断, 通过构建备用路径实现弹复性, 以主路径和备用路径共用的服务节点和运输线路的数量作为弹复性指标, 设计人工蜂群算法对模型进行求解, 并对问题模型中的重要参数进行分析。仿真结果表明, 人工蜂群算法能够对问题进行有效求解。

关键词: 物流网络; 多到多网络设计; 网络系统; 决策变量; 人工蜂群算法

中文引用格式: 李 锐, 孙福明, 佟玉军. 第四方物流多到多弹复性网络设计[J]. 计算机工程, 2017, 43(4): 228-233.

英文引用格式: Li Rui, Sun Fuming, Tong Yujun. Many-to-Many Resilient Network Design for Fourth Party Logistics[J]. Computer Engineering, 2017, 43(4): 228-233.

Many-to-Many Resilient Network Design for Fourth Party Logistics

LI Rui, SUN Fuming, TONG Yujun

(College of Electronic and Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, Liaoning 121001, China)

[Abstract] In order to make fourth party logistics(4PL) offer secure and efficient logistics service, the model of 4PL resilient network design for the logistics distribution task of many supply-demand pairs is presented. An optimization model which minimizes the total logistics costs is established. It considers disruption of service nodes and transportation routes, makes the network resilient by constructing backup paths, and takes the number of shared service nodes and transportation routes of main and backup paths as the resilience index. An artificial bee colony algorithm is designed to solve the model. Also, the important parameters of the model of the problem are analyzed. Simulation results show that the presented artificial bee colony algorithm can solve the problem effectively.

[Key words] logistics network; many-to-many network design; network system; decision variable; Artificial Bee Colony (ABC) algorithm

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.04.039

0 概述

为了提高效率和降低成本, 专注核心业务, 进而提高市场竞争力, 很多企业将其物流业务外包给专业的物流公司。与第三方物流(3PL)相比, 由于在资源、信息和整合能力等方面的优势, 第四方物流(4PL)能够利用企业内部及外部的资源和信息提供更好的物流服务^[1]。

物流网络是物流系统运作的基础, 对提高物流效率起到至关重要的作用。因此, 设计一个高效的物流网络是 4PL 管理者必须考虑的问题。在实际中, 4PL 往往需要承担多个供需点对之间的物流任

务, 即多到多的物流任务。因此, 研究 4PL 多到多网络设计问题具有现实意义。最近, 关于 4PL 网络设计问题已经得到一定的研究^[2-4]。然而, 这些研究都是考虑 4PL 承担某种商品的配送或回收任务, 而对于考虑 4PL 承担多个供需点对的物流任务的网络设计问题的研究则还没有给予关注。

在现实环境中, 由于人为或自然灾害等因素影响, 3PL 服务设施和运输线路可能发生中断, 使商品不能按时运送或者根本无法运达, 从而影响物流服务质量, 因此设计安全可靠的物流网络也是 4PL 管理者必须面临的问题。弹性提供一种研究系统安全性的新方法^[5]。目前, 一些学者已经对不同网络

基金项目: 国家自然科学基金(61572244); 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2015232)。

作者简介: 李 锐(1985—), 男, 讲师、博士, 主研方向为智能算法、物流优化; 孙福明, 教授、博士; 佟玉军, 副教授、硕士。

收稿日期: 2016-01-29 **修回日期:** 2016-04-14 **E-mail:** rui850109@163.com

系统的弹性问题进行了研究。文献[6]将网络对故障的容忍作为弹性的测度。文献[7]将运输效率作为弹性指标,并将其定义为网络能够满足运输总量百分比的期望值。文献[8]则通过构建供需点之间的备用路径来实现弹性。文献[9]分别定义网络弹性和点到点的弹性,其中弹性定义为故障之前与故障之后总信息流的比值。这些都为研究4PL多到多网络弹性奠定了基础。

综上所述,本文研究4PL多到多弹性网络设计问题。其中,网络结构由无向多重图来表示,网络的弹性通过构建备用路径来实现,并通过主路径与备用路径之间共用的3PL服务节点和运输供应商的数量来描述弹性。建立了问题的优化模型,并设计人工蜂群算法进行求解。

1 问题描述及建模

考虑4PL承担某一区域内多个供需节点对之间的物流任务。4PL多到多网络可以由无向多重图来表示,如图1所示,图中的节点分别表示供应点、需求点和3PL服务节点(港口、仓库、配送中心等),图中的边表示3PL运输供应商。由于节点之间可能存在多个3PL运输供应商,因此在两节点之间可能有多条边。考虑3PL服务节点和3PL运输供应商可能发生中断而导致供需点对之间的物流路径中断。为了使网络具有弹性,在每个供需点对之间同时构建主路径和备用路径。很显然,主路径与备用路径相交的点和边越少,弹性越大。

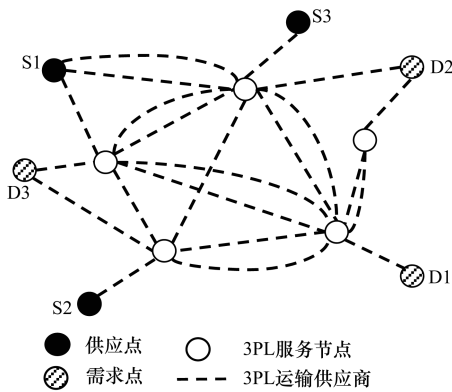


图1 4PL多到多网络

4PL多到多弹性网络设计是通过选择3PL服务节点和3PL运输供应商来构建网络,在满足弹性约束的条件下,最小化网络的总成本。

问题假设条件如下:

1) $V = L \cup S \cup U$ 为节点集合,其中, L 为需求点集合; S 为供应点集合; U 为3PL服务节点集合。

2) 一段时期内供需节点对之间商品的流通量已知,并表示为 $d^p, \forall p \in P, P$ 为供需点对集合。

3) 3PL服务节点的处理成本、处理能力和开设成本分别表示为 C_i, Q_i 和 $H_i, i \in U$ 。

4) 3PL运输供应商的运输成本、运输能力和开设成本分别表示为 c_{ijk}, q_{ijk} 和 $h_{ijk}, i \in V, j \in V, k \in K_{ij}, K_{ij}$ 表示节点 i 和 j 之间3PL运输供应商集合。

决策变量定义如下: $x_{ijk} \in \{0, 1\}$, 如果节点 i 和 j 之间的3PL运输供应商 k 被选择,那么 $x_{ijk} = 1$, 否则 $x_{ijk} = 0$; $y_i \in \{0, 1\}$, 如果3PL服务节点 i 被选择开设,那么 $y_i = 1$, 否则 $y_i = 0$; $a_{ijk}^p \in \{0, 1\}$, 如果节点 i 和 j 之间的3PL运输供应商 k 被选择服务于供需点对 p 的主路径,那么 $a_{ijk}^p = 1$, 否则 $a_{ijk}^p = 0$; $b_i^p \in \{0, 1\}$, 如果3PL服务节点 i 被选择服务于供需点对 p 的主路径,那么 $b_i^p = 1$, 否则 $b_i^p = 0$; $\varepsilon_{ijk}^p \in \{0, 1\}$, 如果节点 i 和 j 之间的3PL运输供应商 k 被选择服务于供需点对 p 的备用路径,那么 $\varepsilon_{ijk}^p = 1$, 否则 $\varepsilon_{ijk}^p = 0$; $\tau_i^p \in \{0, 1\}$, 如果3PL服务节点 i 被选择服务于供需点对 p 的备用路径,那么 $\tau_i^p = 1$, 否则 $\tau_i^p = 0$; 令 $Y = \{y_i | \forall i \in U\}, X = \{x_{ijk} | \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K_{ij}\}$ 。

基于以上问题假设和变量定义,建立如下模型:

$$\begin{aligned} \min C(X, Y) = & \sum_{i \in U} H_i y_i + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K_{ij}} h_{ijk} x_{ijk} \\ & + w \sum_{p \in P} (d^p (\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K_{ij}} c_{ijk} a_{ijk}^p + \sum_{i \in U} C_i b_i^p)) \\ & + (1 - w) \sum_{p \in P} (d^p (\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K_{ij}} c_{ijk} \varepsilon_{ijk}^p \\ & + \sum_{i \in U} C_i \tau_i^p)) \end{aligned} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K_{ij}} a_{ijk}^p \varepsilon_{ijk}^p + \sum_{i \in U} b_i^p \tau_i^p \leq n^p, \forall p \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in U \cup L} \sum_{k \in K_{ij}} a_{ijk}^p = b_i^p, \forall i \in U, \forall p \in P \quad (3)$$

$$\sum_{j \in S \cup U} \sum_{k \in K_{ji}} a_{jik}^p = b_j^p, \forall j \in U, \forall p \in P \quad (4)$$

$$\sum_{j \in U} \sum_{k \in K_{ij}} a_{ijk}^p = 1, \forall i \in S, \forall p \in P \quad (5)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{k \in K_{ij}} a_{ijk}^p = 1, \forall j \in L, \forall p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{j \in U \cup L} \sum_{k \in K_{ij}} \varepsilon_{ijk}^p = \tau_i^p, \forall i \in U, \forall p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{j \in S \cup U} \sum_{k \in K_{ji}} \varepsilon_{jik}^p = \tau_j^p, \forall j \in U, \forall p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{j \in U} \sum_{k \in K_{ij}} \varepsilon_{ijk}^p = 1, \forall i \in S, \forall p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{i \in U} \sum_{k \in K_{ij}} \varepsilon_{ijk}^p = 1, \forall j \in L, \forall p \in P \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} (b_i^p \vee \tau_i^p) d^p \leq Q_i, \forall i \in U \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} (a_{ijk}^p \vee \varepsilon_{ijk}^p) d^p \leq q_{ijk}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K_{ij} \quad (12)$$

$$a_{ijk}^p \leq x_{ijk}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K_{ij}, \forall p \in P \quad (13)$$

$$b_i^p \leq y_i, \forall i \in U, \forall p \in P \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ijk}^p \leq x_{ijk}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K_{ij}, \forall p \in P \quad (15)$$

$$\tau_i^p \leq y_i, \forall i \in U, \forall p \in P \quad (16)$$

$$a_{ijk}^p \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K_{ij}, \forall p \in P \quad (17)$$

$$b_i^p \in \{0, 1\}, \forall i \in U, \forall p \in P \quad (18)$$

$$\varepsilon_{ijk}^p \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K_{ij}, \forall p \in P \quad (19)$$

$$\tau_i^p \in \{0, 1\}, \forall i \in U, \forall p \in P \quad (20)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, \forall j \in V, \forall k \in K_{ij} \quad (21)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \forall i \in U \quad (22)$$

目标函数式(1)最小化总物流成本,包括 3PL 服务节点和运输供应商的开设成本、主路径和备用路径上商品的运输处理成本, w 表示权重系数;约束式(2)表示主路径和备用路径共用的 3PL 服务节点和 3PL 运输供应商的数量不大于 n^p ;约束式(2)~式(6)保证主路径的连通性;约束式(7)~式(10)保证备用路径的连通性;式(11)和式(12)表示 3PL 服务节点和运输供应商的能力约束($\vee$ 表示并运算);约束式(13)~式(16)表示服务于主路径或备用路径的 3PL 供应商和 3PL 服务节点必须是已开设的;约束式(17)~式(22)表示二值的决策变量。

2 算法设计

4PL 多到多弹性网络设计问题是传统设施选址问题的扩展,因此,是 NP-hard 问题。采用智能优化算法更适合对问题进行有效求解。

人工蜂群^[10] (Artificial Bee Colony, ABC) 算法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,即雇佣蜂、观察蜂和侦察蜂。算法在执行的过程中依次执行 3 种蜂群的搜索操作来实现对解空间的搜索。目前,ABC 算法已经成功地用于求解各种应用问题,如无线传感网路由问题^[11]、流水线调度问题^[12]、最优无功潮流问题^[13]、两级定位-路径问题^[14]、车间作业调度问题^[15]等,并且其性能也在应用中得到了验证。

因为 ABC 算法通过 3 种蜂群的局部搜索操作来产生新解,所以相比于其他群智能优化方法,更适合对模型中路径的连通性约束进行处理。此外,与其他基于局部搜索策略的优化方法相比,ABC 算法又具有多种群协同寻优的特点,可以在种群规模较小和时间成本较少的情况下得到很好的结果。因此,本文根据问题特点设计 ABC 算法进行求解。

2.1 算法步骤

本文算法步骤如下:

步骤 1 按照本文编码方式随机生成规模为 N 的蜜源,并计算蜜源收益度,每个蜜源 $x_i (i=1, 2, \dots,$

$N)$ 对应问题的一个解。

步骤 2 雇佣蜂在每个蜜源 $x_i (i=1, 2, \dots, N)$ 的邻域内搜索新的蜜源 v_i , 计算新蜜源 v_i 的收益度,贪婪选择更优的蜜源。

步骤 3 雇佣蜂将蜜源信息(收益度)返回给观察蜂,观察蜂则根据式(23)计算每个蜜源 x_i 的备选概率 p_i :

$$p_i = 1 - \text{Fit}(x_i) / \sum_{i=1}^N \text{Fit}(x_i) \quad (23)$$

其中, $\text{Fit}(x_i)$ 表示蜜源 x_i 的收益度。

步骤 4 观察蜂根据概率 p_i 以轮盘赌的方式选择较好的蜜源 x_i 进行邻域搜索,得到新蜜源 v_i , 计算 v_i 的收益度,贪婪选择更优的蜜源。

步骤 5 如果一个蜜源连续 m 次没有得到改进,那么派出侦查蜂按照初始蜜源生成方法随机生成新蜜源 x_i 来替换当前蜜源。

步骤 6 如果达到最大迭代次数,那么算法终止,输出最好解;否则执行步骤 2。

2.2 蜜源的编码与解码

如图 2 所示,蜜源(问题的解)可由一组向量来表示。每个向量表示供需对点之间的一条主路径或备用路径。向量的数量为供需节点对的数量 2 倍。向量由“节点部分”和“3PL 运输供应商部分”组成。节点部分包含了对应路径可能经过的所有节点(需求点除外),“0”表示对应的节点没有在路径上,“非 0”表示对应的节点在路径上,下一个节点为其取值对应的节点。3PL 运输供应商部分表示对应路径可能经过的 2 个节点之间运输供应商的选择情况,“0”表示没有供应商被选择,“非 0”表示其值对应的供应商被选择。值得注意的是,因为不同的供应点或需求点与 3PL 服务节点之间的连接情况不同,所以不同供需点对之间的主路径或备用路径对应的向量维数可能不同。

主路径 p (或备用路径 p)					
节点部分			3PL 运输供应商部分		
节点 v_i 的下一个节点	...	节点 v_j 的下一个节点	...	节点 v_i 和 v_j 之间供应商的选择情况	...
v_i	...	v_j	...	2	...

图 2 蜜源的表示

根据上述编码规则,按照向量的取值可以唯一确定对应的主路径或备用路径。根据向量中节点部分的取值可以确定变量 b_i^p 或 τ_i^p 的值,根据 3PL 运输供应商部分的取值可以确定变量 a_{ijk}^p 或 ε_{ijk}^p 的值,再由约束式(13)~式(16)即可确定解 (X, Y) 。

2.3 初始蜜源生成

按照 2.2 节的编码方式,随机生成初始蜜源。为了满足主路径的连通性约束式(3)~式(6)和备用路径的连通性约束式(7)~式(10),蜜源的向量按照下列步骤产生:

1)生成向量的节点部分:从供应点 v_s 对应位开始,根据路径经过的节点依次随机确定节点对应位的数值。如果某节点的下一个节点包含需求点,那么其对应位的取值为需求点。如果某节点的下一个节点都已经是路径上的节点,那么返回到供应点,并重新选择节点部分,直到到达需求点。

2)根据路径经过的节点次序,随机地选择路径所经过的 3PL 运输供应商,并确定向量中对应位的值。

2.4 邻域搜索

对当前蜜源 x_i 执行邻域搜索产生新蜜源 v_i 。随机选择如下邻域策略:

1)随机选择蜜源 x_i 的某个向量 X_i^p (向量 X_i^p 对应供需点对 p 之间的路径, $p \in P$),按照 2.3 节 1)中的方法来重新确定向量的节点部分的值。然后,根据路径经过的节点次序,确定 3PL 运输供应商的选择情况,如果向量 X_i^p 中对应位的值为“非 0”,那么取该值;否则,随机选择一个 3PL 运输供应商。

2)随机选择蜜源 x_i 的某个向量 X_i^p ,并随机改变向量中 3PL 运输供应商部分的某一“非 0”位的值。

按照上述邻域搜索策略得到的解都将满足路径连通性约束式(3)~式(6)和式(7)~式(10)。

2.5 蜜源的评价

按照上述方法得到的解还可能不满足弹性约束式(2)及能力约束式(11)和式(12),将其作为惩罚项加入评价函数中,得到蜜源 x_i 的评价函数:

$$\begin{aligned} Fit(x_i) = & C(X, Y) \\ & + \eta_1 \sum_{p \in P} \left(\sum_{i \in V_j \in V_k \in K_{ij}} a_{ijk}^p \varepsilon_{ijk}^p + \sum_{i \in U} b_i^p \tau_i^p - n^p \right)^+ \\ & + \eta_2 \sum_{i \in U} \left(\sum_{p \in P} (b_i^p \vee \tau_i^p) d^p - Q_i \right)^+ \\ & + \eta_3 \sum_{i \in V_j \in V_k \in K_{ij}} \sum_{p \in P} \left(\sum_{p \in P} (a_{ijk}^p \vee \varepsilon_{ijk}^p) d^p - q_{ijk} \right)^+ \end{aligned} \quad (24)$$

其中,第 1 项 $C(X, Y)$ 是目标值函数公式式(1);第 2 项为约束式(2)的惩罚项;第 3 项和第 4 项分别为约束式(11)和式(12)的惩罚项; η_1, η_2 和 η_3 为惩罚系数; $(\cdot)^+$ 表示如果括号内的值为正,那么取该值,否则取 0。

3 仿真实验及结果

为了测试模型和算法的有效性,设计 6 个不同规模的仿真算例进行验证。算法采用 Matlab 语言编码,仿真实验环境为 Intel Core 2 CPU 1.83 GHz,内存 2 GB。

假设某 4PL 服务公司承担了 6 个不同的多到多物流任务。表 1 给出每个多到多物流任务的供需点对数量、潜在 3PL 服务节点数量和潜在 3PL 运输供应商数量。算例的参数按照下面均匀分布随机产生:供需节点对之间货物的流通量 $d^p \sim U[80, 150]$; 3PL 服务节点的开设成本 $H_i \sim U[500, 1\ 000]$,处理成本 $C_i \sim U[10, 50]$,处理能力 $Q_i \sim U[800, 1\ 000]$; 3PL 运输供应商的开设成本 $h_{ijk} \sim U[300, 700]$,运输成本 $c_{ijk} \sim U[10, 50]$,运输能力 $q_{ijk} \sim U[800, 1\ 000]$ 。

表 1 算例的规模

算例	供需点对数量	潜在 3PL 服务节点数量	潜在 3PL 运输供应商数量
P1	4	12	80
P2	4	15	104
P3	6	18	175
P4	6	22	272
P5	9	24	317
P6	9	28	347

为了测试 ABC 算法的性能,对不同规模的算例进行求解。模型参数设置如下:对于 P1, P2, P5, P6, n^p 取值为 3,对于 P3 和 P4, n^p 取值为 2;对所有算例,权重系数 w 取值为 0.8。ABC 算法的参数设置如下:种群规模为 20,最大循环次数为 150,最大未改进次数 m 为 15。

对于每个算例每种算法分别运行 20 次。表 2 给出算法的运行结果,包括最好值、最差值、平均值、平均偏差率和 CPU 运行时间。其中,平均偏差率定义为:(平均值-最好值)/最好值 $\times 100\%$ 。可见,对于不同规模的算例,算法的平均偏差率在 1%~5% 范围内变化,能够保持稳定的性能。表 3 给出算例 P1~P6 网络设计的详细结果,包括总成本、开设成本、主路径运输和处理成本、备用路径运输和处理成本及主路径与备用路径共用的 3PL 服务节点和运输供应商数。表 4 给出网络供需点对之间的主路径与备用路径,其中,“s-(k1)-i-(k2)-d”表示供需点对 s 和 d 之间的一条路径,该路径经过 3PL 服务节点 i,节点 s 和 i 之间的 3PL 运输供应商 k1,节点 i 和 d 之间的 3PL 运输供应商 k2。

表 2 对于不同规模算例 ABC 算法的性能

算例	最好值	最差值	平均值	平均偏差率/%	CPU 运行时间/s
P1	80 267	82 495	81 465	1.492 5	31.990 3
P2	83 741	89 760	86 114	2.833 7	41.708 5
P3	101 646	110 333	106 337	4.615 0	72.871 6
P4	94 230	97 853	96 111	1.996 2	102.506 2
P5	138 056	142 152	140 776	1.970 2	216.124 0
P6	197 935	209 160	202 535	2.324 0	232.494 4

表 3 网络设计的详细结果 ($w = 0.8$)

算例	弹性指标 n^p	总成本	开设成本	主路径运输和 处理成本	备用路径运输和 处理成本	主路径与备用路径共用的 3PL 服务节点和运输供应商数
P1	3	80 267	10 543	67 732	77 695	3,3,2,3
P2	3	83 741	10 147	69 184	91 235	3,3,3,3
P3	2	101 646	12 692	86 690	98 013	2,2,2,0,2,0
P4	2	94 230	13 349	78 021	92 318	2,2,2,2,2,2
P5	3	138 056	14 969	119 943	135 664	2,2,2,3,0,2,2,2
P6	3	197 935	20 488	174 555	189 014	3,3,3,3,2,3,3,2,2

表 4 网络供需点对之间的主路径和备用路径 ($w = 0.8$)

算例	弹性指标 n^p	主路径	备用路径
P1	3	1-(1)-4-(1)-14-(1)-15	1-(1)-4-(2)-14-(2)-15
		1-(1)-4-(3)-5-(1)-13-(1)-16	1-(1)-4-(1)-14-(2)-13-(2)-16
		2-(2)-4-(1)-14-(1)-15	2-(1)-3-(1)-14-(1)-15
		2-(1)-3-(3)-13-(2)-16	2-(1)-3-(2)-13-(1)-16
P2	3	1-(1)-4-(1)-16-(2)-18	1-(1)-4-(2)-7-(1)-16-(1)-18
		1-(1)-4-(1)-16-(2)-19	1-(2)-4-(1)-16-(1)-19
		2-(1)-3-(1)-7-(1)-16-(2)-18	2-(1)-3-(2)-6-(1)-16-(1)-18
		2-(1)-3-(2)-6-(1)-16-(2)-19	2-(1)-3-(1)-7-(1)-16-(1)-19
P3	2	1-(1)-4-(1)-19-(2)-21	1-(1)-4-(1)-17-(1)-18-(1)-21
		1-(1)-4-(1)-17-(1)-18-(3)-22	1-(1)-4-(2)-3-(2)-20-(2)-22
		1-(1)-4-(1)-17-(1)-18-(3)-23	1-(1)-4-(1)-19-(1)-23
		2-(1)-3-(3)-13-(1)-18-(1)-21	2-(1)-4-(1)-19-(2)-21
		2-(1)-3-(2)-20-(2)-22	2-(1)-3-(3)-13-(1)-18-(3)-22
		2-(1)-3-(2)-17-(1)-18-(3)-23	2-(1)-4-(1)-19-(1)-23
P4	2	1-(1)-4-(2)-24-(1)-25	1-(2)-4-(1)-24-(3)-25
		1-(2)-4-(2)-17-(1)-22-(2)-26	1-(2)-4-(2)-23-(1)-26
		1-(1)-4-(2)-24-(1)-27	1-(2)-4-(1)-24-(2)-27
		2-(3)-3-(1)-24-(1)-25	2-(3)-3-(1)-23-(1)-25
		2-(3)-3-(1)-22-(2)-26	2-(3)-3-(1)-23-(1)-26
		2-(3)-3-(1)-22-(1)-27	2-(3)-3-(1)-24-(2)-27
P5	3	1-(1)-6-(1)-27-(2)-28	1-(1)-6-(3)-5-(1)-26-(1)-28
		1-(1)-6-(1)-27-(1)-29	1-(1)-6-(1)-25-(1)-29
		1-(1)-6-(3)-5-(1)-26-(2)-30	1-(1)-6-(1)-27-(2)-30
		2-(1)-5-(1)-26-(1)-28	2-(1)-5-(1)-25-(3)-26-(2)-28
		2-(1)-5-(1)-25-(1)-29	2-(2)-4-(1)-27-(1)-29
		2-(2)-4-(1)-21-(3)-26-(2)-30	2-(1)-5-(1)-26-(2)-30
		3-(3)-6-(1)-27-(2)-28	3-(1)-4-(1)-27-(2)-28
		3-(3)-6-(1)-25-(1)-29	3-(3)-6-(1)-27-(1)-29
		3-(1)-4-(1)-21-(3)-26-(2)-30	3-(1)-4-(1)-27-(2)-30
P6	3	1-(2)-5-(3)-28-(3)-30	1-(3)-5-(1)-28-(3)-30
		1-(2)-5-(2)-9-(1)-29-(2)-31	1-(3)-5-(1)-25-(1)-29-(2)-31
		1-(3)-5-(1)-14-(1)-27-(1)-32	1-(2)-5-(3)-28-(1)-27-(1)-32
		2-(3)-5-(3)-28-(3)-30	2-(2)-5-(1)-28-(3)-30
		2-(1)-6-(1)-29-(2)-31	2-(3)-5-(2)-9-(1)-29-(2)-31
		2-(2)-6-(1)-14-(1)-27-(1)-32	2-(1)-6-(2)-21-(1)-27-(1)-32
		3-(2)-5-(3)-28-(3)-30	3-(2)-5-(1)-28-(2)-30
		3-(1)-4-(2)-29-(2)-31	3-(1)-6-(1)-29-(2)-31
		3-(2)-5-(1)-28-(1)-27-(1)-32	3-(1)-6-(1)-14-(1)-27-(1)-32

为了分析权重系数 w 对网络设计结果的影响, w 取值为 0.5 ~ 0.9。表 5 给出在不同权重系数下以算例 P1 为例进行实验。其中参数 n^p 取值为 3, P1 网络设计的详细结果。可见,随着 w 的增大,主

路径的运输和处理成本有减少的趋势,而备用路径的运输和处理成本则有增加的趋势。当 w 取值为 0.7 时,备用路径运输和处理成本开始大于主路径运输和处理成本。为了分析弹性指标 n^p 对网络设计结果的影响,以算例 P3 为例进行实验。其中

参数 w 取值为 0.8, n^p 取值为 2~6。表 6 给出在不同弹性指标下 P3 网络设计的详细结果。可见,随着 n^p 的增大,总成本减少,而开设成本、主路径和备用路径的运输和处理成本则没有明显的单调变化。

表 5 不同权重下 P1 网络设计的详细结果 ($n^p = 3$)

权重 w	总成本	开设成本	主路径运输和处理成本	备用路径运输和处理成本	主路径与备用路径共用的 3PL 服务节点和运输供应商数
0.9	79 922	10 543	68 546	76 881	3,3,2,3
0.8	80 267	10 543	67 732	77 695	3,3,2,3
0.7	81 382	10 862	68 080	76 213	3,3,2,3
0.6	83 132	12 020	72 633	68 831	3,3,2,3
0.5	82 752	12 020	74 071	67 393	3,3,2,3

表 6 不同弹性指标下 P3 网络设计的详细结果 ($w = 0.8$)

弹性指标 n^p	总成本	开设成本	主路径运输和处理成本	备用路径运输和处理成本	主路径与备用路径共用的 3PL 服务节点和运输供应商数
2	101 646	12 692	86 690	98 013	2,2,2,0,2,0
3	100 221	12 160	84 107	103 880	3,2,3,0,3,0
4	99 888	7 555	90 923	97 976	4,2,4,4,4,4
5	99 461	6 876	93 212	90 081	5,2,5,5,5,5
6	97 399	9 824	86 166	93 212	5,5,5,0,5,0

4 结束语

在 4PL 承担多点到多点物流任务的情况下,为了使 4PL 服务网络能够安全有效运作,本文研究 4PL 多到多弹性网络设计问题。考虑 3PL 服务节点和运输线路的中断,并通过构建供需点之间的备用路径来实现网络的弹性。建立了问题的优化模型,并设计人工蜂群算法对问题进行求解。最后,通过对不同规模的算例进行实验验证模型及算法的有效性。随着 4PL 的发展,下一步研究可以考虑配送时间等因素对 4PL 多到多弹性网络设计决策的影响。

参考文献

- [1] Gattorna J. Strategic Supply Chain Alignment: Best Practice in Supply Chain Management[M]. Hampshire, UK: Gower Publishing Company, 1998.
- [2] 王道平,杜海蕾,杨 岑. 基于 CVaR 的两阶段第四方逆向物流网络设计模型[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(1): 22-27.
- [3] 李 锐,黄 敏,张瑞友,等. 基于弹性的第四方物流多周期网络设计[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(8): 2019-2028.
- [4] 李 锐,黄 敏,王兴伟. 多周期的第四方物流弹性正逆向集成网络设计模型与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(4): 892-903.
- [5] Hollnagel E, Woods D D, Leveson N. Resilience Engineering: Concepts and Precepts[M]. Aldershot, UK: Ashgate Publishing Company, 2006.
- [6] Najjar W, Gaudiot J L. Network Resilience: A Measure of Network Fault Tolerance[J]. IEEE Transactions on Computers, 1990, 39(2): 174-181.
- [7] Konak A, Bartolacci M R. Designing Survivable

Resilient Networks: A Stochastic Hybrid Genetic Algorithm Approach[J]. OMEGA-International Journal of Management Science, 2007, 35(6): 645-658.

- [8] Grosan C, Abraham A, Hassainen A E. Designing Resilient Networks Using Multicriteria Metaheuristics[J]. Telecommunication Systems, 2009, 40(1/2): 75-88.
- [9] Omer M, Nilchiani R, Mostashari A. Measuring the Resilience of the Global Internet Infrastructure System[C]//Proceedings of the 3rd Annual IEEE Systems Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2009: 156-162.
- [10] Karaboga D, Basturk B. A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459-471.
- [11] Karaboga D, Okdem S, Ozturk C. Cluster Based Wireless Sensor Network Routing Using Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Wireless Networks, 2012, 18(7): 847-860.
- [12] 王 凌,周 刚,许 烨,等. 求解不相关并行机混合流水线调度问题的人工蜂群算法[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1151-1157.
- [13] Ayan K, Kılıç U. Artificial Bee Colony Algorithm Solution for Optimal Reactive Power Flow[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(5): 1477-1482.
- [14] 陈久梅. 两级定位-路径问题的人工蜂群算法[J]. 计算机工程, 2014, 40(1): 172-176.
- [15] Wang Ling, Zhou Gang, Xu Ye, et al. An Effective Artificial Bee Colony Algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(1-4): 303-315.

编辑 刘 冰