

考虑网络韧性的三级轴辐式物流网络模型及算法研究*

窦锦¹, 张军玲²

(1. 兰州财经大学 财政与税务学院; 2. 兰州财经大学 信息工程与人工智能学院, 兰州 730020)

摘要: 为了实现城市物流运作的集约化,并尽可能降低因突发事件导致的物流供需中断,以物流节点定位和通道布局为落脚点,研究了三级轴辐式物流网络的多目标规划。考虑轴辐式网络的结构约束、多级节点间的连通关系限制,以多级轴辐点选址、轴辐点间的连通关系及强度为决策变量,以网络建设成本最小和网络韧性度最大为目标函数,构建三级轴辐式物流网络模型。结合模型的特点设计了具有双层结构的遗传算法,其中外层为三段编码结构的小生境 Pareto 遗传算法,用于求解多目标规划,内层为 0-1 编码的遗传算法,用于求解网络韧性度。以某区域 14 个节点城市作为案例,验证模型及算法的有效性,并将优化结果与两类传统的单目标物流网络进行了比较。研究表明:双层遗传算法能够有效求解三级轴辐式物流网络规划模型;选取案例计算得到的 Pareto 最优解参与比较分析,优化结果与传统三级轴辐式物流网络相比,网络韧性度提高了 6 倍,但网络建设成本也随之增加;与单纯以韧性度最大化为优化目标的物流网络相比,网络建设成本降低了 7 倍,网络韧性度也随之降低。可见提出的双目标三级轴辐式物流网络模型实现了网络建设成本和网络韧性度间的均衡,对于追求具有一定抗毁性能的轴辐式物流网络规划人员,具有参考和应用价值。

关键词: 轴辐式物流网络;网络韧性度;网络建设成本;双层遗传算法

中图分类号: O221.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2023)05-0019-11

随着商贸流通领域的快速发展和交通运输体系的同步提升,中国物流行业正处于一个内生发展动力充分和发展环境适宜的黄金阶段,但现有的物流发展模式、运作结构已无法满足商贸流通的供需要求,交通运输、仓储配送等物流基础设施的提升也急需更高效的物流体系与之适配。因此,一个满足供需、集约经济、成体系化的物流网络,是物流业快速、高质量发展进而有力支撑经济环境的重要基石。

在物流网络的设计规划中,建设成本、运行效率往往是规划主要的落脚点。但当自然灾害、公共卫生安全或战争等事件突发时,将导致网络中某些节点或者道路无法承担供应、中转、运输等任务,此时,物流运作将面临严峻考验,这就要求在物流网络构建中有必要考虑网络韧性。

轴辐式物流网络是一种以枢纽节点的城市为轴心,通过干线及支线的通道布局,明确城市间的连接关系,均衡规划网络流量,通过规模效应起到降低区域物流运行总成本,同时带动辐点城市物流发展的网络布局。该网络结构由 O'Kelly 在 1987 年首次提出,他构建了 p -hub 中值问题(p -hub median problem, p -HMP),即给定枢纽的个数为 p ,以网络中枢纽间的物资集散产生规模效应带来运输费用的折扣为网络基本特征,构建轴辐式网络模型,进行枢纽选址和辐点分配,同时他指出该问题属于 NP-难问题^[1]。之后,Skorin-Kapov 等人^[2]又在枢纽单分配的基础上讨论了无约束的多分配 p -HMP。此后,越来越多的学者从不限制枢纽个数、考虑枢纽建设的固定成本、枢纽容量限制、辐点的分配方式等方面深化了轴辐式物流网络问题的研究^[3-7]。此外,由于轴辐式物流网络的求解属于 NP-难问题,因此学者们在求解算法领域也有诸多贡献。O'Kelly^[1]设计了基于枚举的启发式算法;Klincewicz^[7]设计了禁忌搜索和贪婪随机搜索适应方法;诸如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等智能优化算法在轴辐式网络的模型求解方面也是学者们研究较多的领域^[8-11]。当问题较复杂、数据规模较大时,智能优化算法具有明显的计算优势。

国内学者主要从政府宏观层面和企业微观层面对轴辐式物流网络进行研究。宏观层面依托省、市统计面板

* 收稿日期:2022-04-28 修回日期:2022-11-19 网络出版时间:2023-07-04T15:52

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 71861023);兰州财经大学校级科研项目(No. Lzufe2020D-003);甘肃省科技计划项目(No. 21CX6ZA091)

第一作者简介:窦锦,女,讲师,研究方向为区域物流决策优化,E-mail:1048890289@qq.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20230704.1356.008

数据,从轴辐式网络的定义出发,借助引力模型、主成分分析模型、聚类模型等统计、经济分析模型进行轴点及辐点属性分类和分配研究^[12-14];微观层面以物流企业(物流中心、配送中心)为研究对象,以建立数学规划模型的方式布局轴辐式配送、集散网络^[15-16]。

值得关注的是,由于轴辐式物流网络以建设经济性和运行规模化为主要特征,网络中轴点的地位和作用至关重要。如果一旦出现突发事件,网络轴点就会失效或道路中断,出现大面积瘫痪,从而导致运行效率大幅下降。因此,如何提高轴辐网络的可靠性是当前研究的一个热点。王帮俊等人^[17]建立了考虑失效和拥堵情形的单分配轴辐式物流网络枢纽点选址及路径分配模型,并采用改进的粒子群算法对模型进行了求解。吴艳芳^[18]构建了考虑枢纽点拥堵情形的修正选址模型,引入备选枢纽点进行拥堵流量的路径再分配转运,从而使 H-S 网络的综合运输成本最小。胡晶晶等人^[19]以初始枢纽失效时保持轴辐式网络正常运转为目标,提出了一种轴辐式网络枢纽备份优化方法,为每一个枢纽点进行备份,使轴辐式网络初始成本和备份成本总和最优。已有的研究成果,以考虑网络中的特定节点或通道存在失效的可能来进行网络规划或对既有网络进行可靠性的二次规划的居多,缺乏在构建轴辐网络之初就将网络的可靠性作为一个建设依据进行规划的研究。因此,本文在传统轴辐式物流网络规划的基础上,加入以网络连通性、可达性来表征网络结构可靠性的考量,旨在设计具有更高可靠性的轴辐式物流网络。

本文以轴辐式网络理论、图论为基础,以网络建设成本最小且网络韧性度最大为目标,以轴辐式网络中的轴、辐点选址,轴、辐点间的连通关系及连通强度为决策变量,构建具有三级轴辐式结构的物流网络模型,并设计了双层遗传算法,对模型进行求解。最后以某区域 14 个节点城市为案例研究对象,构建了基于网络建设成本最小且网络韧性度最大的双目标轴辐式物流网络模型,通过双层遗传算法求解,最终确定了较理想的 Pareto 前沿,决策者可根据决策偏好在该 Pareto 前沿面上选择不同网络建设成本和网络韧性度组合目标值对应的轴辐式网络结构。选取网络建设成本和网络韧性度两目标最均衡的解,与仅考虑其中一个目标的网络分别从构建成本和网络韧性水平进行比较,发现本文构建的模型求得的解在建设成本、网络韧性方面具有较均衡的优势。

1 双目标三级轴辐式物流网络模型建立

1.1 问题描述

假设某区域有 N 个相互关联的物流节点,每个节点都具有物资供需和中转集散的属性,根据节点的地理位置及周边节点的分布情况,可划分为不同等级的轴点,轴点等级越高则需具备越好的物流中转集散能力,相应的建设成本也越高。任意 2 个节点之间根据物流供需、中转强度可采用不同等级的通道连接,等级越高的通道具有越好的物流运输容量,建设成本同样也越高。图 1 为三级轴辐式物流网络示意图。

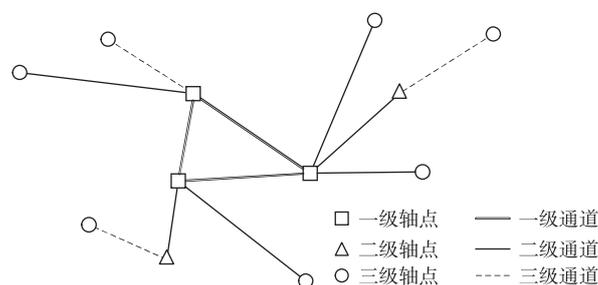


图 1 三级轴辐式物流网络

Fig. 1 Three level hub and spoke logistics network

图 1 中的一级轴点为保证具有较好的物资集散中转效率,采用全连接方式,且采用具有较好物流运输容量的一级通道连接;二级轴点可根据具体节点分布情况和网络结构要求选择与一级轴点或其他二级轴点连通,且为保证足够的物资运载容量要求连接的通道等级在二级以上(含);辐点(三级轴点)同样可以被分配到一级或二级轴点上,连接通道等级根据实际建设成本、网络结构要求、货流强度等因素进行 3 种等级通道的选择。多级轴辐式物流网络问题可以描述为:在轴辐式网络的特定结构要求下,决策节点的等级属性以及不同等级节点间的连通关系和连通强度,使得网络的建设成本为最小。

在轴辐式物流网络模型中,选择不同的节点等级分配及连通关系和连通强度,网络的建设成本会不同,网络结构也将不同,而不同的网络结构具有不同的网络韧性。韧性是近些年来备受关注的研究领域,关于韧性测度方法的研究也呈现多样化,韧性曲线、德尔菲法等均是学者们常用的韧性测度的方法^[20-21],本文采用由Cozzens^[22]最早提出的方法测度网络韧性,记网络图为 G ,由点集 $V(G)$ 和边集 $E(G)$ 构成,网络韧性度 $T(G)$ 可通过下式计算:

$$T(G) = \min \left\{ \frac{|S| + \tau(G-S)}{W(G-S)} \right\}, \quad (1)$$

其中: S 为点割集或边割集,若 S 为点割集,则 $S \subset V(G)$;若 S 为边割集,则 $S \subset E(G)$ 。 $|S|$ 为割集中元素的数量,当 $|S|$ 值越小,代表攻击网络代价越小。 $\tau(G-S)$ 为图 G 中去掉割集 S 中的元素后的最大连通分支的阶数(若 S 为点割集,则在去掉对应节点的同时要去掉该节点的关联边),值越小,代表被割集破坏后的网络重构难度越大。 $W(G-S)$ 为对图 G 进行割集元素删除处理后的连通分支数,值越大,代表网络被割集破坏后的分散程度越大。在一个既定的网络图 G 中,找到一个割集 S ,使得 $\frac{|S| + \tau(G-S)}{W(G-S)}$ 的值最小,就代表了对该图破坏代价最小、破坏程度最高的情况,也即网络中最薄弱的环节,用这个最小值来表征网络图 G 的韧性度。割集分别为点割集或边割集时,计算可得相应的图 G 的点韧性度或边韧性度。

通常具有较高韧性的网络,节点的连通性更强,并具有更好的抗毁性能。轴辐网络往往需要由轴点来连通辐点,通过运输物资在轴点上的集散产生规模效应,但增加网络的连通性势必会产生更多的建设成本,同时削弱网络的规模经济效应。因此,本文将通过建设多目标规划模型,以轴辐网络的建设成本最小化和网络韧性度最大化为目标,决策节点的等级属性及各级节点间的连通关系和连通强度。

1.2 模型假设及变量设定

模型假设:

- 1) 假定决策空间中共有 n 个节点;
- 2) 节点间的连通强度采用通道等级进行标定;
- 3) 网络中的节点和通道等级均分为3个等级,一级为最高,节点等级为1、2时对应一级、二级轴点,节点等级为3时为辐点;
- 4) 不同等级的节点和通道建设成本不同,等级越高,相应的建设成本就越高;
- 5) 不同等级的节点或通道抗毁性能不同,等级越高的节点或通道,抗毁性能越好,损毁所需代价越大;
- 6) 为确保轴辐网络能够产生较好的规模经济效应且具备足够的物资中转效率,一级轴点间采用一级通道全连通,一级、二级轴点之间及二级轴点间至少采用2级通道连通;
- 7) 3级轴点可结合网络建设成本和网络韧性目标进行3种等级通道的选择;
- 8) 一级轴点和二级轴点至少要有1个二级轴点或辐点与之连接,辐点有且仅有1次能够被分配到一级或二级轴点上。

变量设定:设 x_{ij}^k 为节点 j 通过 k 等级的通道连接到节点 i 的情况; y_i^k 为节点 i 建设为 k 等级轴点的情况。 $k=1,2,3$ 分别对应通道或轴点的3个等级。 x_{ij}^k 和 y_i^k 分别如式(2)、(3)所示:

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{节点 } j \text{ 通过 } k \text{ 等级通道连接到节点 } i; \\ 0, & \text{否则。} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_i^k = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 建设为 } k \text{ 级轴点;} \\ 0, & \text{否则。} \end{cases} \quad (3)$$

设 α_k 为建设 k 等级通道时的单位距离建设成本系数,通道等级越高, α_k 越大; β_k 为建设 k 等级轴点的建设成本系数,节点等级越高, β_k 越大; d_{ij} 为节点 i, j 之间的距离;

设 $T(G)$ 为所构建物流网络图 G 的综合韧性度,用图 G 的点韧性度和边韧性度的加权和度量来进行计算:

$$T(G) = \frac{\min \left\{ \frac{\lambda_1(S_1) + \tau(G-S_1)}{W(G-S_1)} \right\} + \min \left\{ \frac{\lambda_2(S_2) + \tau(G-S_2)}{W(G-S_2)} \right\}}{2}. \quad (4)$$

式中: S_1 、 S_2 分别为图 G 的点割集和边割集, $\lambda_1(S_1)$ 、 $\lambda_2(S_2)$ 分别为割集元素的等级加权函数。考虑到等级越高的节点或通道被破坏的难度越高, 故区别于式(1)仅记录割集中元素数量 $|S|$ 的方式, 在式(4)中针对不同等级的点(边)割集元素, 在统计割集元素数量的基础上依次乘以对应元素等级的破坏难度系数, 形成割集元素的等级加权函数。

假设一点割集为 $\{s_1, s_4, s_5, s_7\}$, 其中 s_1 为一级轴点, s_4, s_7 为二级轴点, s_5 为辐点, 3 个等级节点的破坏难度系数分别为 1.5、1.2 和 1, 则割集元素的等级加权函数取值为: $1.5 \times 1 + 1.2 \times 1 + 1 \times 1 + 1.2 \times 1 = 4.9$, 而采用式(1)时, 该部分的计算结果为 $|S| = 4$ 。显然在计算网络韧性时, 随着等级不同破坏难度应存在差异, 这种计量结果更合理。边割集的割集元素等级加权函数计算方式同理。

1.3 模型建立

记 S_1, S_2 为一级轴点和二级轴点的集合, $S_1 \cup S_2 = S$, H 为辐点集合, $S \cup H$ 为整个决策空间中的点。各集合中的元素基于决策变量 y_i^k 产生。

以轴辐式物流网络建设成本最小化和网络综合韧性度最大化为模型的 2 个目标, 以模型假设和轴辐式网络结构要求为约束条件, 建立如下模型:

$$\min \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_k x_{ij}^k d_{ij} + \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^n \beta_k y_i^k, \quad (5)$$

$$\max T(G), \quad (6)$$

$$\text{s. t. } d(i) \geq 1, \forall i \in n, \quad (7)$$

$$y_i^1 + y_i^2 + y_i^3 = 1, \forall i \in n, \quad (8)$$

$$x_{ij}^1 + x_{ij}^2 + x_{ij}^3 = 1, \forall i \in S, j \in n, \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \geq (y_i^1 + y_i^2), \forall i \in S, \quad (10)$$

$$y_i^1 + y_i^2 \geq \sum_{k=1}^3 x_{ij}^k, \forall i \in S, j \in n, \quad (11)$$

$$y_i^1 * x_{ij}^1 = y_j^1, \forall i, j \in S_1, \quad (12)$$

$$(1 - y_i^3) * (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) = y_j^2, \forall i \in S, j \in S_2, \quad (13)$$

$$x_{ij}^2 + x_{ij}^3 \geq y_j^3, \forall i \in S, j \in H, \quad (14)$$

$$x_{ij}^k, y_i^k = 0 \text{ 或 } 1, \forall i, j \in n, k = 1, 2, 3. \quad (15)$$

在上述模型中, 式(5)和式(6)为 2 个目标, 分别表示网络建设成本最小化和网络韧性度最大化; 式(6)中 $T(G)$ 采用式(4)计算; 式(7)中 $d(i)$ 为节点 i 的度, 该约束保证了网络要连通, 不可有孤立点; 式(8)限制每个节点的等级属性只可能是 1 种; 式(9)要求任意连通到节点 i 的通道等级只能是 1 种; 式(10)约束所有一、二级轴点要保证至少有 1 个辐点或轴点连过来; 式(11)约束一、二级轴点才被允许有轴点或辐点连过来; 式(12)约束若节点 j 是一级轴点, 则只能采用 1 级通道连通到其他一级轴点上; 式(13)约束若节点 j 是二级轴点, 则采用 1 级或 2 级通道连接到其他一级或二级轴点上; 式(14)约束被分配的节点 j 是辐点, 则采用二级或三级通道连接到其他节点上; 式(15)为决策变量的 0, 1 约束。

2 双层遗传算法设计

双目标轴辐式网络模型中节点等级属性、连通关系及连通强度的确定, 网络韧性度的计算都属于 NP 问题, 故设计双层遗传算法对该模型实现求解。其中, 外层为确定轴辐式网络节点等级属性, 连通关系及连通强度的多目标规划, 采用三段编码结构的小生境 Pareto 遗传算法求解, 内层设计一般遗传算法用于计算网络韧性度。

2.1 三段编码结构小生境 Pareto 遗传算法设计

2.1.1 编码

由于外层问题是一个多目标规划问题, 需要优化网络建设成本和网络韧性度 2 个目标, 文中选择小生境 Pareto 遗传算法对问题进行求解。由于该模型需要决策节点的等级、节点间的连接关系及连接等级, 故分别将节点等级、节点间的连接关系和连接等级作为基因片段编组染色体, 每一基因段长度均等于决策空间中的节点

数目。具体来说,选址基因段的每位基因表达每个节点的建设等级,编码取值为 1、2、3,分别对应一级轴点、二级轴点及辐点。连通关系基因段的每位基因表达该位节点连通至其他节点的情况,编码值为所要连通节点的位置索引(索引值取自选址基因段)。连通等级基因段每位基因表达该位节点与连通节点间的通道等级,编码取值为 1、2、3,分别对应一、二、三级通道。

由于一级轴点需要全连通,倘若网络中有 3 个一级轴点,则每个一级轴点与其他一级轴点的全连通关系至少需要 2 位基因才可表达。为保证节点间连接关系的基因片段的长度也为节点数目,特别规定当该节点为一级轴点时,在连通关系基因段中该节点位置的编码值为该节点在选址基因段中的位置索引,连通等级基因段中该节点位置的编码值为 1。此外,连通关系基因段中节点间的连通关系,依据所有可连通节点中距离最近的节点索引完成编码,连通等级基因段中连通通道等级编码由式(12)~(14)随机产生。

以 6 个节点的三级轴辐式网络编码染色体举例,染色体长度为 18,分 3 个基因段,每段长度为 6,编码见图 2。

选址基因段						连通关系基因段						连通等级基因段					
3	2	1	3	2	1	2	3	3	5	6	6	2	1	1	3	2	1

图 2 6 个节点的三级轴辐式网络编码

Fig. 2 Three level hub and spoke logistics network encoding with six nodes

该染色体中选址基因段的第 1 个节点为辐点,第 2 个节点为二级轴点,第 3 个节点为一级轴点,以此类推。连通关系基因段中第 1 基因位的编码为 2,代表第 1 个辐点连通第 2 位的二级轴点,而通道等级可从连通等级基因段得知,连通等级基因段中的第 1 基因位编码值为 2,即第 1 位的辐点和第 2 位的二级轴点采用二级通道连通。此外,由于第 3、6 号节点为一级轴点,故在连通关系基因段中的第 3、6 位基因编码值分别为 3、6 号节点的位置索引值,即为 3 和 6,且连通等级基因段中第 3、6 位基因的编码值为 1。

2.1.2 选择、交叉、变异操作

选择算子参照小生境 Pareto 遗传算法^[23],基于竞标赛的方法产生待交叉、变异的子代。

交叉操作在既定的交叉概率下进行。只交叉染色体选址基因段,再基于距离完成连通关系及连通强度的编码,从而形成完整染色体。交叉操作采用双点交叉法,在若干对随机从子代中选出个体的选址基因段产生 2 个不同位置的交叉点,对交叉点间的基因进行互换。

当染色体选址基因段中等级节点种类少于 3 种时均为不合法染色体,交叉操作可能会导致不合法染色体的产生。当染色体因交叉而不合法时就随机生成一条新的染色体,当新染色体可以支配交叉前的该染色体时,就用新染色体替换不合法的染色体,否则该染色体就保持交叉前的状态。

变异操作也在既定的变异概率下进行。同样只变异染色体选址基因段,并对变异后的选址基因段按距离规则编码形成完整染色体。变异操作先随机选择子代中的若干个个体,然后在这些染色体的选址基因段随机生成变异基因位数和变异位,用随机生成的节点等级替换对应变异基因位的基因。变异后染色体的合法性检验标准和不合法染色体的处理策略与交叉的合法性检查及处理策略相同。

2.2 网络韧性度遗传算法设计

2.2.1 编码

针对每个确定的染色体,需要采用式(4)计算对应轴辐网络的综合韧性度。采用 0-1 编码方式,染色体长度为图中点集、边集中元素的个数,每个基因位上的编码值为 0 或 1,表示该位元素是否在割集中。

以计算点韧性度时的编码为例,一个由 5 个节点所组成的网络,染色体编码见图 3。

1	0	0	1	0
---	---	---	---	---

图 3 5 个节点组成网络的染色体编码

Fig. 3 Chromosome encoding in a network composed of five nodes

该染色体的含义为在当前网络中第 1 个节点和第 4 个节点为点割集中的元素。边韧性度的编码同理,同样采用 0-1 编码,区别在于边韧性度的染色体编码长度会随当前网络中包含边数的不同而不同。

2.2.2 选择、交叉、变异操作

对计算网络韧性的种群中的个体采用竞标赛的方式选择子代,在种群中随机选择 2 个个体,以 $\frac{\lambda(S)+\tau(G-S)}{W(G-S)}$ 作为适应度函数,取值较小者入选为子代。对选出的子代进行交叉、变异操作。其中交叉操作采用双点交叉法,对随机选择的 2 个染色体交叉点间的基因进行交换;变异操作则是对待变异的染色体中随机选择若干基因位,对这些基因位上的值进行 0-1 翻转。对交叉、变异后的染色体同样需要进行合法性检查,当交叉或变异后的染色体为全 0 或全 1 时为无效染色体,此时用随机生成的染色体替换该不合法染色体。

2.3 算法流程图

根据上述双层多段遗传算法的设计,绘制算法流程图,如图 4 所示。

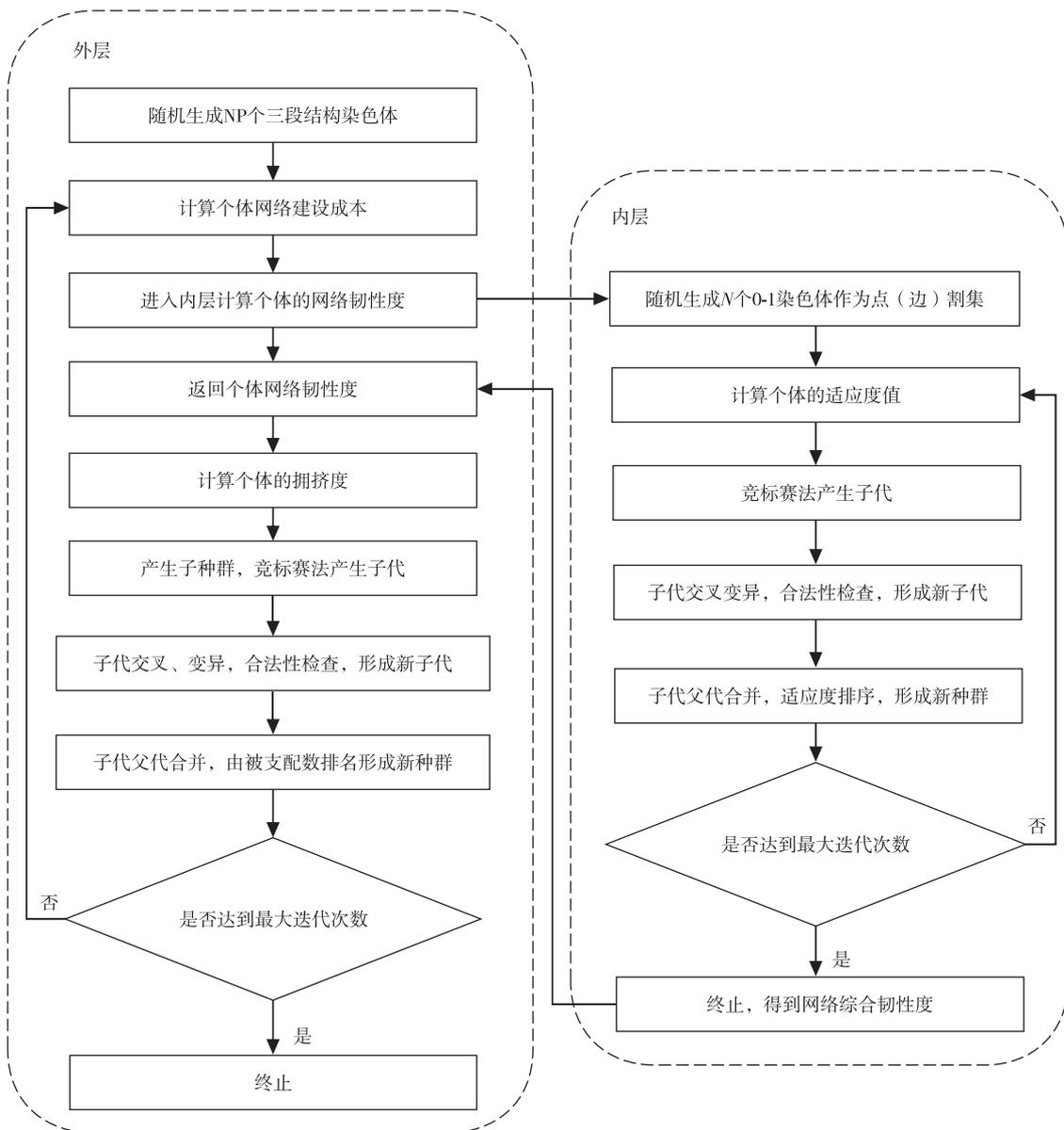


图 4 算法流程

Fig. 4 The algorithm flow

3 案例分析

以某地区 14 个城市作为物流节点,构建网络建设成本最小化和网络韧性度最大化的双目标三级轴辐式物流网络模型,已知节点城市间的距离见表 1。

表 1 城市间距离

Tab. 1 Distance between cities

km

城市编号	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
<i>a</i>	735.7	369.5	80.4	307	274.4	507.5	317.5	711.6	478.5	106.4	548.8	140.1	230.1
<i>b</i>		442.6	761.2	1 028.2	464.2	225.9	1 039	21.6	1 200.2	827.5	1 369.9	856.3	947.2
<i>c</i>			400.9	667.9	97.5	219.1	678.3	423.1	848.1	467.2	903.6	496	586.8
<i>d</i>				378.3	304.9	538.4	388.5	742.1	574.4	177.8	613.8	213.6	304.4
<i>e</i>					572.1	805.3	241.3	1 009.3	400.1	204.3	249.3	342	432.8
<i>f</i>						240.5	591.1	444.6	754.2	371.4	807.8	400.2	491.1
<i>g</i>							815.5	207.2	985	604.4	1 046.7	633.2	724
<i>h</i>								1 019.5	163.3	228.9	468.5	441.7	532.5
<i>i</i>									1 189.4	808.7	1 251.1	837.6	928.4
<i>j</i>										389.9	615.2	602.5	693.3
<i>k</i>											445.2	230.8	321.6
<i>l</i>												566	354
<i>m</i>													103.8

文章采用 Matlab 2019B 进行双层遗传算法的编程求解。其中,外层小生境 Pareto 遗传算法的三段式染色体总长度为 42,每个子段染色体的长度均为 14,分别表示节点城市的节点等级、节点间的连接关系、节点间的连通强度。外层遗传算法的种群规模为 600,循环遍数为 30 遍,交叉率为 0.8,变异率为 0.2,子代规模为 0.8,子种群占比 0.2。通过查阅等级通道及轴点建设成本,设置如下系数:等级通道的单位距离建设成本系数设置为 $\alpha_1=3, \alpha_2=2.4, \alpha_3=2$,单位:亿元 $\cdot \text{km}^{-1}$;等级轴点的单个建设成本系数 $\beta_1=4.5, \beta_2=3.6, \beta_3=3$,单位:个 $\cdot (10 \text{ 亿元})^{-1}$ 。内层网络韧性度遗传算法中,计算点韧性度的染色体编码长度为 14,边韧性度的染色体编码长度根据具体网络中的边数确定,在确保点韧性度和边韧性度的计算能够兼顾收敛性和计算效率的情况下,设置点韧性度的种群规模为 80,循环遍数为 30,交叉率为 0.8,变异率为 0.3,子代规模为 0.7;边韧性度的种群规模为 80,循环遍数为 80,交叉率为 0.8,变异率为 0.4,子代规模为 0.7。等级节点及通道的破坏难度系数均为 1.5、1.2 和 1。图 5 为初始种群分布图。图 6 为双层遗传算法计算模型所得 Pareto 最优解的分布图。

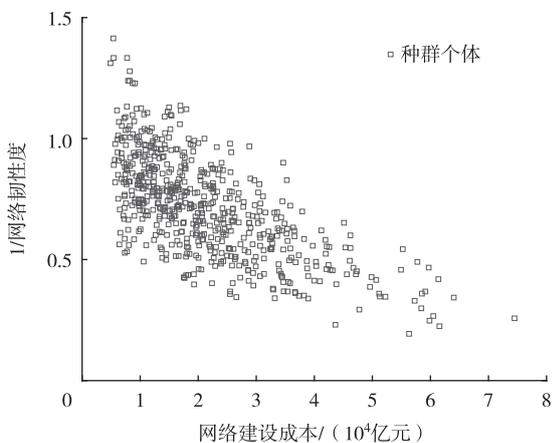


图 5 初始种群分布

Fig. 5 Initial population distribution

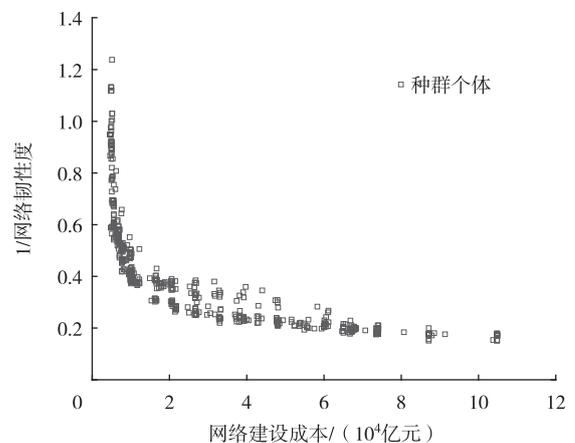


图 6 Pareto 最优解分布

Fig. 6 Pareto optimal solution distribution

从图 5 可以看出,初始种群中的个体在 2 个目标方向上的取值较分散,其中包括很多被支配的个体,经过文中设计的双层遗传算法迭代求解后,已向图 6 所示的 Pareto 前沿曲线形式逼近原点。在图 6 中随机选取 3 个个体,将它们在网络建设成本目标和网络韧性度目标上的取值列于表 2。

表 2 Pareto 最优解解集中个体对应的目标函数值

Tab. 2 Objective function values corresponding to individuals in the Pareto optimal solution set

目标函数值种群个体	网络建设成本/亿元	网络韧性度
个体 1	20 898	3. 692 9
个体 2	86 967	5. 625 0
个体 3	6 930	1. 898 2

从表 2 可知,当个体的网络建设成本较低时,对应的网络韧性度水平也较差;当个体具有 1 个较高的网络韧性度水平时,网络建设成本也会自然升高。因此,Pareto 最优解集中的解越向弧线的 2 个末端逼近,即 2 个目标其中的一个达成效果越好,则另一个目标达成效果越差。针对文章所研究的问题,仅考虑某一个目标的达成而牺牲另一个目标,势必会出现设计的网络建设成本过大或者韧性度水平过低的问题,这在网络设计中缺乏现实意义。故综合考虑两方面的目标,从 Pareto 最优解集中选择 2 个目标达成最均衡的居中方案。并将该方案转换为轴辐式物流网络图,如图 7 所示。

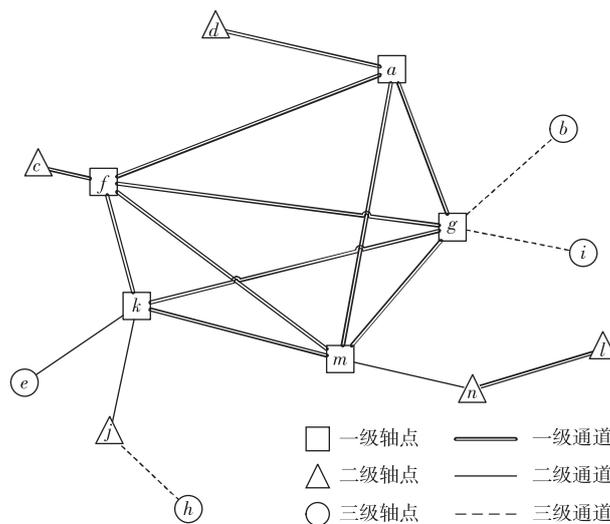


图 7 Pareto 最优解集中最均衡的解对应的轴辐式物流网络

Fig. 7 Hub and spoke logistics network corresponding to the most balanced solution in the Pareto optimal solution set

由图 7 可知,节点 a、f、g、k、m 为一级轴点,其间采用一级通道全连接;节点 c、d、j、l、n 为二级轴点,其中节点 c 与一级轴点 f、节点 d 与一级轴点 f 均采用一级通道连通,节点 j 和一级轴点 k、节点 n 与一级轴点 m 均采用二级通道连通,节点 n 与节点 l 采用一级通道连通;节点 b、e、h、i 为辐点,其中节点 b、i 与一级轴点 g 采用三级通道连通,节点 e 与一级轴点 k 采用二级通道连通,节点 h 与二级轴点 j 采用三级通道连通。该轴辐网络建设成本为 15 520 亿元,网络韧性度为 3. 29。

为充分论证模型求解结果的有效性和均衡性,分别建立仅考虑网络建设成本最小化的传统三级轴辐式物流网络模型和仅考虑网络韧性度最大化的物流网络模型参与结果比较。其中,仅考虑网络建设成本最小化的传统三级轴辐式物流网络模型为本文模型去掉网络韧性度最大化目标后的单目标模型;仅考虑网络韧性度最大化的物流网络模型则是在确保网络中所有节点都能够连通的条件下,以网络韧性度最大化为目标,决策网络中各节点的建设等级和节点间的连通关系及连通强度。对比模型均采用遗传算法进行求解,将算法计算得到的收敛结果分别和本文模型的求解结果进行目标值的对比。表 3 为本文模型和传统三级轴辐式物流网络的目标对比

情况。

表 3 本文模型和对比模型的结果比较

Tab.3 Comparison of results between the model in this article and the comparative model

目标	本文模型	传统三级轴辐式	对比结果	韧性度最大化	对比结果
网络建设成本/亿元	15 520	3 471	本文模型增加了 3.5 倍	108 230	本文模型减少了 85.7%
网络韧性度	3.29	0.55	本文模型提高了 5 倍	22.95	本文模型减少了 85.7%

从表 3 可知,相较传统的三级轴辐式物流网络,本文模型在网络建设成本上增加了 4.5 倍,而网络韧性度则提高了 6 倍,表明在整个网络的构建中,如果要提高网络的韧性度,使网络具有一个较高的抗毁性能,必然要从强化节点的等级、节点间的通道等级、提升节点间的连通性这几方面入手,而这必然会产生一部分建设成本。但与韧性水平较差的传统三级轴辐式物流网络相比,突发事件会造成网络中节点失效或通道中断,韧性度较差的传统三级轴辐式物流网络将更容易瘫痪,物流供应中断所造成的经济损失将远远超过网络建设成本的差额。因此,考虑物流网络建设成本的同时应该将提高网络的韧性水平纳入物流网络的模型中。

另一方面,与韧性度最大化为目标设计的物流网络相比,虽然本文模型在网络韧性度上减少了 85.7%,但是网络建设成本同样也节约了 85.7%,表明如果仅仅以考虑网络韧性度最大化来构建物流网络,追求过高的网络韧性度将带来巨额的网络建设成本,此外网络中会增加诸多为提高韧性度而产生的节点连通道路,这也会同时削弱物流网络运作过程中本应充分利用到的规模效应。

综合来看,本文提出的双目标三级轴辐式物流网络既保留了网络轴辐式的集约经济属性,使得网络的运行达到了集约化和规模化的效果,又能利用一二级轴点带动辐点城市物流的发展;同时网络的韧性度有所提高,使得网络具备较好的抗毁性能,能够避免因一些突发事件影响网络运行而带来巨大的经济损失。可见,兼顾网络建设成本和网络韧性度的轴辐式物流网络规划更具现实意义。

4 结束语

本文以网络建设成本最小且网络韧性度最大为 2 个目标,构建具有三级结构的轴辐式物流网络模型;与单目标多级物流网络相比,该模型能够在兼顾网络建设成本的同时具备更好的应对突发事件的韧性。本文还设计了具有双层结构的遗传算法,对双目标三级轴辐式网络模型进行求解,得到了兼顾网络建设成本和网络韧性度的轴辐式物流网络规划方案。通过案例分析发现,该双层结构的遗传算法能够收敛得到较理想的 Pareto 前沿。通过对比单目标下的网络发现,双目标三级轴辐式网络模型求得的解在网络建设成本和网络韧性度方面能够取得较好的平衡,具有更好的现实意义。

本文构建的模型和设计的算法可应用于任何具有物流关系的城市群中进行物流网络规划,而考虑在现有模型优化结果下的网络应急调度将是下一阶段极具研究价值的内容。

参考文献:

- [1] O'KELLY M E. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities[J]. European Journal of Operational research, 1987, 32(3): 393-404.
- [2] SKORIN-KAPOV D, SKORIN-KAPOV J, O'KELLY M. Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 94(3): 582-593.
- [3] WANG M, CHENG Q, HUANG J, et al. Research on optimal hub location of agricultural product transportation network based on hierarchical hub-and-spoke network model[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2021, 566: 125412.
- [4] ARBABI H, NASIRI M M, BOZORGI-AMIRI A. A hub-and-spoke architecture for a parcel delivery system using the cross-docking distribution strategy[J]. Engineering Optimization, 2021, 53(9): 1593-1612.
- [5] KLINCEWICZ J G. A dual algorithm for the uncapacitated hub location problem[J]. Location Science, 1996, 4(3): 173-184.
- [6] DEMIR İ, KIRAZ B, ERGIN F C. Experimental evaluation of meta-heuristics for multi-objective capacitated multiple allocation hub location problem[J]. Engineering Science and Technology, 2022, 29: 101032.

- [7] KLINCEWICZ J G. Avoiding local optima in the p -hub location problem using tabu search and GRASP[J]. *Annals of Operations Research*, 1992, 40(1): 283-302.
- [8] RABBANI M, KAZEMI S M. Solving uncapacitated multiple allocation p -hub center problem by Dijkstra's algorithm-based genetic algorithm and simulated annealing[J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2015, 6(3): 405-418.
- [9] ZHAO L, ZHOU J, LI H, et al. Optimizing the design of an intra-city metro logistics system based on a hub-and-spoke network model[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 116: 104086.
- [10] 傅少川, 胡梦飞, 唐方成, 禁忌搜索算法在单分配多枢纽轴辐式物流网络中的应用[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(3): 145-151.
FU S C, HU M F, TANG F C. The optimization of hub and spoke logistics network design based on tabu search algorithm[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2012, 20(3): 145-151.
- [11] 李文莉, 李昆鹏, 阮文意. 轴辐式同城快递网络模式研究[J]. *运筹与管理*, 2020, 29(4): 36-42.
LI W L, LI K P, RUAN W Y. Research on the mode of hub and spoke network used in city express[J]. *Operations Research and Management Science*, 2020, 29(4): 36-42.
- [12] 刘荷, 王健. 基于轴辐理论的区域物流网络构建及实证研究[J]. *经济地理*, 2014, 34(2): 108-113.
LIU H, WANG J. The construction of regional logistics networks and its empirical research based on hub and spoke theory[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(2): 108-113.
- [13] 梁晨, 刘小娟, 龚艳侠, 等. 京津冀多枢纽混合轴辐式物流网络的构建[J]. *中国流通经济*, 2019, 33(6): 118-126.
LIANG C, LIU X J, GONG Y X, et al. Construction of multi-hub hybrid spoke logistics network in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Business and Market*, 2019, 33(6): 118-126.
- [14] 张诚, 刘守臣. 多枢纽混合轴辐式铁路冷链物流网络布局优化研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(7): 1-9.
ZHANG C, LIU S C. Research on layout optimization of multi-hub hybrid hub and spoke railway cold chain logistics network[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2021, 43(7): 1-9.
- [15] 付江月, 陈刚. 轴辐式城市物流网络演化模型与算法[J]. *计算机应用研究*, 2015, 32(12): 3605-3608.
FU J Y, CHEN G. Hub and spoke urban logistics network evolution model and algorithm[J]. *Application Research of Computers*, 2015, 32(12): 3605-3608.
- [16] 何茵楠, 吴传良. 带时间窗的煤炭企业轴辐式网络转运中心选址[J]. *物流科技*, 2020, 43(3): 15-20.
HE Y N, WU C L. Search on hub-and-spoke location of coal enterprise transfer center with time window[J]. *Logistics Sci-Tech*, 2020, 43(3): 15-20.
- [17] 王帮俊, 吴艳芳. 考虑枢纽点失效和拥堵情形的轴辐式物流网络设计研究[J]. *工业工程与管理*, 2019, 24(2): 15-22.
WANG B J, WU Y F. The hub-and spoke network design addressing hub reliable and congestion[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2019, 24(2): 15-22.
- [18] 吴艳芳, 王帮俊, 朱伟, 等. 考虑 Hub 点拥堵情形下的 H-S 网络路径再分配[J]. *系统工程*, 2019, 37(3): 105-114.
WU Y F, WANG B J, ZHU W, et al. H-S network route redistribution considering hub congestion[J]. *Systems Engineering*, 2019, 37(3): 105-114.
- [19] 胡晶晶, 黄有方. 应对枢纽失效的轴辐式网络枢纽备份[J]. *计算机应用*, 2018, 38(6): 1814-1819.
HU J J, HUANG Y F. Hub backup to deal with hub failure in hub and spoke network[J]. *Journal of Computer Applications*, 2018, 38(6): 1814-1819.
- [20] 李瑞奇, 黄弘, 周睿. 基于韧性曲线的城市安全韧性建模[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2020, 60(1): 1-8.
LI R Q, HUANG H, ZHOU R. Resilience curve modelling of urban safety resilience[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2020, 60(1): 1-8.
- [21] 陈奕玮, 丁关良. 中国地级市城市经济韧性的测度[J]. *统计与决策*, 2020, 36(21): 102-106.
CHEN Y W, DING G L. Measurement of urban economic toughness of prefecture level cities in China[J]. *Statistics and Decision*, 2020, 36(21): 102-106.
- [22] COZZENS M, MOAZZAMI D, STUECKLE S. The tenacity of a graph[C]//ALAVI Y, SCHWENK A. *Graph Theory, Combinatorics, and Algorithms: Proceedings of the Seventh Quadrennial International Conference on the Theory and Applications of Graphs*, New York: Wiley, 1995: 1111-1122.
- [23] SIMON D. *Evolutionary optimization algorithms*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2013: 739-740.

Operations Research and Cybernetics**Research on Three Level Hub and Spoke Logistics Network Model and Algorithm Considering Network Tenacity**DOU Jin¹, ZHANG Junling²

(1. School of Finance and Taxation, Lanzhou University of Finance and Economics; 2. School of Information Engineering and Artificial Intelligence, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

Abstract: In order to realize the intensification of urban logistics operation, at the same time, the interruption of logistics supply and demand caused by emergencies shall be reduced as much as possible. Take logistics node positioning and channel layout as the foothold, the multi-objective programming of three-level hub and spoke logistics network is studied. Considering the structural constraints of hub and spoke network and the connectivity constraints between multi-level nodes, taking the location of multi-level hub and spoke points, the connectivity and strength between hub and spoke points as decision variables, and taking the minimum network construction cost and the maximum network tenacity as objective functions, a three-level hub and spoke logistics network model is constructed. Combined with the characteristics of the model, a genetic algorithm with double-layer structure is designed, in which the outer layer is a niche Pareto genetic algorithm with three-stage coding structure for solving multi-objective programming, and the inner layer is a genetic algorithm with 0-1 coding for solving network tenacity. Taking 14 node cities in a region as an example, the effectiveness of the model and algorithm is verified, and the optimization results are compared with two kinds of traditional single objective logistics networks. The results show that bilevel genetic algorithm can effectively solve the three-level hub and spoke logistics network planning model. Select the Pareto optimal solution obtained by case calculation to participate in the comparative analysis. Compared with the traditional three-stage hub and spoke logistics network, the optimization results have improved the network toughness by 6 times, but will bring a certain increase in network construction costs. Compared with the logistics network whose optimization goal is to maximize the flexibility, the network construction cost is reduced by 7 times, and the network flexibility is also reduced. It can be seen that the proposed dual objective three-stage hub and spoke logistics network model achieves the balance between network construction cost and network toughness, which has reference and application value for planners pursuing hub and spoke logistics network with certain invulnerability.

Keywords: hub and spoke logistics network; network tenacity; network construction cost; bilevel genetic algorithm

(责任编辑 黄 颖)