



交通运输系统工程与信息

Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology

ISSN 1009-6744, CN 11-4520/U

《交通运输系统工程与信息》网络首发论文

题目：基于两阶段鲁棒优化的可靠性物流网络设计
作者：石褚巍，马昌喜，麻存瑞
收稿日期：2023-02-12
网络首发日期：2023-03-30
引用格式：石褚巍，马昌喜，麻存瑞. 基于两阶段鲁棒优化的可靠性物流网络设计[J/OL]. 交通运输系统工程与信息.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4520.U.20230330.1452.014.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于两阶段鲁棒优化的可靠性物流网络设计

石褚巍¹, 马昌喜^{1*}, 麻存瑞²

(1.兰州交通大学交通运输学院, 兰州 730070; 2.重庆邮电大学现代邮政学院, 重庆 400000)

摘要: 针对网络中存在节点及线路损坏不确定性的可靠性物流网络设计问题, 提出一种基于两阶段鲁棒优化的可靠性物流网络设计方法; 以供应、中转节点选址, 节点连通关系确定, 流量分配作为决策变量, 构建两阶段可靠性物流网络设计模型, 追求网络总成本和总运行时间两个独立目标的最小化, 其中网络总成本目标函数包含两个阶段的成本, 第一阶段计算网络建设成本及网络正常状态下的运行成本, 第二阶段计算网络损坏情景不确定集下的网络运行成本, 网络总运行时间目标函数用于计算网络正常状态下的运行时间; 设计了具有双层编码结构染色体的混合进化算法, 以 NPGA 作为主算法框架, 设计大邻域搜索机制优化个体连通关系基因层, 同时嵌套基于聚类的交叉、变异策略提升算法对解空间的搜索能力; 以多组不同规模的可靠性物流网络设计问题进行案例分析, 验证了模型及算法的合理性和有效性。研究结果表明: 两阶段可靠性物流网络设计模型能够通过少量增加前期网络建设成本的投入, 显著降低网络在受损情况下的运行成本, 有效提升网络可靠性。在 5 个供应节点、10 个中转节点、15 个需求节点的案例对比中, 该模型求得的成本偏好及时间偏好的两组 Pareto 解, 相比于传统多目标物流网络模型的两组对应偏好解, 在同一网络损坏情景集中最多能够分别节省 20.6% 和 28.2% 的网络运行成本; 设计的混合进化算法在迭代初期就收敛到较优的目标值, 表现出较强的搜索和寻优性能, 能够实现对两阶段可靠性物流网络设计模型的有效求解。

关键词: 物流工程; 网络设计; 鲁棒优化; 可靠性; NPGA; 大邻域搜索; 聚类

中图分类号: F502

文献标志码: A

Reliability Logistics Network Design Based on Two Stage Robust Optimization

SHI Chuwei¹, MA Changxi^{1*}, MA Cunrui²

(1.School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2.Modern Post School, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400000, China)

Abstract: Aiming at the reliability logistics network design problem with uncertainty of nodes and road damage in the network, a reliability logistics network design method based on two stage robust optimization is proposed; taking the location of supply and transit nodes, determination of node connectivity, and distribution of cargo flow as decision variables, a two stage reliability logistics network design model was constructed, which pursued the minimization of two independent objectives: the total network cost objective function includes two stages of cost, the first stage calculates the network construction cost and the network operation cost under normal state, the second stage calculates the network operation cost under network disruptive scenario set, and the total network operation time objective function is used to calculate the network operation time under normal state; a hybrid evolutionary algorithm with double-layer encoding structure chromosomes is

收稿日期: 2023-02-12

修回日期: 2023-03-23

录用日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China (71861023, 52062027); 甘肃省基础研究计划-软科学专项/Soft Science Special Project of Gansu Basic Research Plan(22JR4ZA035)。

作者简介: 石褚巍 (1992-), 男, 甘肃合作人, 博士生。*通信作者: machangxi@mail.lzjtu.cn

designed. NPGA is used as the main algorithm framework, and large neighborhood search mechanism is designed to optimize the connectivity relationship genes of individuals. At the same time, cluster-based crossover and mutation strategies are nested to improve the search ability of the algorithm in the solution space; the rationality and effectiveness of the model and algorithm are verified by case study of several groups of reliability logistics network design problems of different scales. The results show: the two stage reliability logistics network design model can significantly reduce the operation cost of the network in case of damage and effectively improve the network reliability through a small increase in the initial network construction cost. In the case comparison of 5 supply nodes, 10 transit nodes and 15 demand nodes, the two sets of Pareto solutions for cost preference and time preference obtained by the model can save up to 20.6% and 28.2% of network operation cost in the same network damage scenario set, respectively, compared with the two sets of corresponding preference solutions of the traditional multi-objective logistics network model; the hybrid evolutionary algorithm converges to a better target value at the initial stage of iteration, showing better search and optimization performance, which can effectively solve the two stage reliability logistics network design model.

Key words: logistics engineering; network design; robust optimization; reliability; NPGA; large neighborhood search; clustering

0 引言

物流网络设计规划是为了保障高效有序的物资供应活动, 由物流运输运营管理者事先明确物流设施数量及位置, 供需关系分配及供应流量分配等一系列决策问题的规划活动。该规划活动一直以来都是交通运输部门、供应链行业在开展物资流通前的重要环节, 它决定了网络的建设成本、运作效率、客户满意度等, 并直接影响物流管理的经济性和效率^[1], 而且网络一旦完成建设并开始运营, 网络中的选址设施、规划的运输线路都会因为高昂的前期建设成本而不允许发生较大的变动。作为网络的建设者, 设计网络时都会假定网络中的选址设施和规划的运输线路是可靠的, 对网络运行过程中可能发生的损坏情况不作考虑。然而当所建成的网络存在部分节点损坏或线路中断时, 网络很有可能无法满足对需求的足量供应, 最终导致高昂的外部供应费用甚至是客户的丢失。近年来, 各类物流网络因自然灾害、疫情、人为事故等而导致网络发生损坏的事件时有发生, 严重影响到网络正常功能的发挥, 并造成了巨大的经济损失。因此, 在考虑节点及线路可能发生损坏的前提下进行物流网络的设计, 可以有效降低因网络损坏而带来的经济损失, 是提升物流网络可靠性的关键举措。

物流网络的设计需要对未来影响网络运行的各种状态做出预计, 并在预计结果的基础上进行一系列的决策。在这一决策过程中, 涉及空间、时间、价值等诸多因素^[2], 不确定特性也十分凸显, 例如选址设施建设成本^[3]、网络运输成本^[4]、网络供需^[5]及网络受损^[6]等均存在不确定性。在网络的设计过程中, 考虑到这些不确定性往往能够使所规划的网络在运行阶段具备更好的适应性, 是不确定性物流网络设计研究的重要价值所在。

考虑网络损坏不确定性的可靠性物流网络设计作为不确定性物流网络设计的重要分支, 目前已有不少学者做出深入研究, 研究的切入点、所采用的方法也各有不同。其中包括对一般物流网络的可靠性设计研究。Snyder 等通过给定网络可能存在的不同损坏情景的概率, 提出 p-鲁棒准则, 限定了网络在遭到可能的破坏时, 其网络运行成本不能高于某一给定的水平, 并构建了含有 p-鲁棒准则的物流网络随机规划模型, 有效提高了物流网络的可靠性^[7]。Peng 等在传统的物流网络设计问题中, 加入包含 p-鲁棒准则的约束条件, 构建了情景鲁棒的物流网络设计模型, 并采用混合启发式算法对模型进行求解^[6]。该方法既保证了网络在未遭到破坏时的性能, 同时也在网络遭到可能的损坏时, 确保网络有足够的可靠性, 但在该网络设计中未对节点间的连

通关系做出决策, 仅以连通密度作为已知参数加入网络设计中。Cheng 等针对可靠性物流网络设计问题, 将物流网络前期建设和遭到可能的破坏后的网络运行划分为两个阶段, 以网络建设成本、网络被破坏后的运行成本分别作为两个阶段的目标, 通过 budgeted-不确定集描述网络中可能的破坏情景, 建立了两阶段鲁棒优化模型^[8]。由于文中所采用的精确优化算法—C&CG 对优化模型结构的要求较高, 因此该网络设计问题同样未进行节点间连通关系决策, 也未对网络正常状态下的性能做出评估。Hatefi 等在前向+后向一体化物流网络设计问题中, 同时考虑了网络中需求的不确定性和网络中节点可能发生的损坏, 构建了能够实现较好可靠性的前向+后向一体化物流网络设计模型^[9]。

还有部分研究从网络拓扑结构入手, 对物流网络进行了可靠性分析设计, 其中对轴辐式物流网络的可靠性研究较多。林锦辉等综合考虑网络的拓扑结构及运行指标, 构建了城市地下物流网络可靠性评价模型, 通过引入设施随机攻击、物流需求激增, 评价了多种拓扑结构的城市地下物流系统网络原型的可靠性^[10]。Mohammadi 等针对轴辐式结构的物流网络设计问题, 同时考虑了轴点可能的完全破坏和部分损坏的情景, 并将 p-鲁棒准则引入模型, 提高了轴辐式物流网络的鲁棒性^[11]。此外, 还有学者针对特定类型的物流网络进行可靠性设计研究, 例如第三方物流网络、城市地下物流、农产品及冷链物流网络的可靠性研究等, 其中应急物流网络可靠性设计研究较多。李锐等考虑到第三方物流网络中存在多等级的蓄意攻击, 以第三方物流网络建设运营方最小化网络总物流成本、最大化网络受攻击后的服务能力, 以蓄意攻击方最小化网络服务水平, 建立多层优化模型进行第三方物流可靠性网络设计^[12]。谢婷等考虑农产品物流网络的时效性, 在农产品轴辐式物流网络设计问题中加入了用户规定的时间可靠度限制, 有效提高了农产品物流的时间可靠度^[13]。尹小庆等针对冷链配送的时效可靠性问题, 基于复杂网络理论提出一种城市冷链末端配送站选址规划方法^[14]。陈坚等引入关键度来衡量网络中节点及连边可靠性, 并将网络的最大关键度最小作为模型的一个子目标, 建立了区域灾害应急物流网络设计的双层规划模型^[15]。Ke 等针对应急物流网络设计问题构建了两阶段的鲁棒优化模型, 其中, 第一阶段进行应急设施的选址, 第二阶段为不确定破坏情景下的应急资源分配^[16]。

综上所述, 可以发现目前针对存在不确定性的物流网络设计问题多采用随机优化或鲁棒优化, 并主要以单阶段决策为主, 缺少对网络正常状态和受损状态下的网络性能做出独立评估。在实际中, 如果仅考虑网络受损状态下的性能来设计物流网络, 网络设计方案将倾向于设置更多的物流设施及节点连边, 网络建设费用会产生较大增长, 而且一个在受损状态下具有较好性能的网络并不一定能在正常状态下同时表现出优异的性能, 因此对于考虑可靠性的物流网络设计问题, 网络结构对正常状态下网络性能的影响同样不可忽视。此外, 少数涉及多阶段的物流网络可靠性设计研究^[8,16], 也仅是将网络设计建设和受损网络的性能评估划分为两个阶段, 缺少对正常状态下的网络性能做出评价, 同时也未将网络设计中节点间的连通关系纳入决策范畴。总之, 在设计物流网络时, 同时考虑网络在正常状态及受损状态下的性能, 所得到的设计方案对于网络建设者而言能够兼具更多方面的实用价值。鉴于此, 本文以供应、中转节点选址, 节点连通关系决策, 网络流量分配作为决策变量, 同时将网络正常状态和网络受损状态划分为两个阶段, 分别建立两阶段总成本最小化和单阶段总运行时间最小化的目标函数。针对构建的模型, 设计了包含多种提升策略的混合进化算法, 以获得在正常状态和受损状态下均具有良好性能的物流网络设计方案。

1 数学模型

1.1 问题描述

在一个待设计的物流网络中包含三类节点: 供应节点、中转节点、需求节点, 不同类型的节点发挥的作用不同。供应节点完成对需求节点的物资供应, 中转节点在必要的时候完成对物资的中转, 需求节点接受其所需要的物资。物流网络的设计就是在完成供应、中转节点选址的基础上(需求节点通常已知), 确定各节点之间的连通关系。对于一个给定的网络设计方案, 其

完整运行过程可以描述为：供应节点将需求节点所需要的物资向网络的需求节点供应，供应节点会在给定的连通关系中选择与需求节点距离最短或运费最省的路线进行运输，这一过程可能为直接运至需求节点，也可能经过若干中转节点的中转。中转节点的中转会产生一定的中转成本和中转时间。传统的物流网络设计问题就是在满足对需求节点需求的前提下，从若干备选供应、中转节点中选出一部分投入建设，并进一步确定已选址节点及需求节点间的连接关系，最终实现网络的建设成本和运行成本最小。此外，对于网络的建设者而言，网络的运输时效性也是网络设计中考虑的关键问题，直接决定着物流网络是否具备较强的竞争力。因此，本文在传统物流网络设计的基础上，将节点与连通关系发生损坏的不确定性纳入决策问题，决策网络中供应、中转节点的选址及各节点间的连通关系，同步实现网络建设成本最小，网络正常状态下的性能（运行成本和运行时间）最优，网络受到可能的损坏后的运行成本最小。

上述问题可归纳为一个多目标两阶段鲁棒优化的可靠性物流网络设计问题，网络总成本和网络总运行时间分别作为两个独立的优化目标。其中，网络总成本被进一步划分为两个阶段，第一阶段的成本包括网络建设成本和网络在正常状态下的运行成本，运行成本涉及运输及中转成本，第二阶段的成本为网络发生可能的节点及线路损坏导致网络结构发生部分变化后的运行成本，其中除包括运输及中转成本外，还包括因需求无法足量供应所产生的惩罚成本。它是在网络节点选址和连通决策之后进行的，以第一阶段作为基础。此外，由于第二阶段的成本计算中涉及的网络节点或线路损坏事件，无论是位置还是程度都是不确定的，且这种不确定性很难知晓其概率分布，因此采用鲁棒优化的方法，设定网络损坏情景不确定集，结合情景集计算第二阶段的网络运行成本。网络总运行时间最小化目标函数包括总运输时间和总中转时间两部分。

此外，该问题中的两个独立优化目标间存在冲突性，这种冲突性体现在：当追求网络总运行时间最小化时，网络设计会尽可能避免物资运输产生迂回绕行，倾向于开启运抵每一需求节点耗时最少的运输路径上的所有供应及中转节点，此时网络建设成本必然会上升。另一方面，上述运输模式下的网络倾向于直链单线式结构，一旦网络发生损坏，运输中断的可能性将会更大，且这种单链网络结构难以实现网络内其他节点的功能接替，直接造成损坏后的运行成本（惩罚成本）上升，上述两方面成本增长的叠加最终导致了网络总成本目标值的增加，反之亦然。因此，该优化问题需要寻找网络总成本及网络总运行时间之间相互权衡的建设方案。

1.2 决策变量设置

在该网络设计问题中包括供应、中转节点选址，节点间连通关系确定，网络流量分配三方面的决策，故设置 3 类决策变量。

设 $y_i^{(O)}$ 和 $y_i^{(T)}$ 表示节点 i 是否被建设为供应节点或中转节点，均为二元变量。

$$y_i^{(O)} = \begin{cases} 1, i \text{ 节点建设为供应节点} \\ 0, \text{反之} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_i^{(T)} = \begin{cases} 1, i \text{ 节点建设为中转节点} \\ 0, \text{反之} \end{cases} \quad (2)$$

设 x_{ij} 表示节点 i 是否连通到节点 j ，其中 i 是供应点与中转点的集合， j 是中转点与需求点的集合。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{节点 } i \text{ 连通到节点 } j \\ 0, \text{反之} \end{cases} \quad (3)$$

此外，在网络结构既定的情况下还需要进行流量分配决策，设 f_{ij}, f_{ij}^s 分别表示网络处于正

常状态下的弧 (i, j) 间的流量以及网络损坏情景 s 下弧 (i, j) 间的流量。

1.3 网络损坏情景不确定集构建

网络损坏情景不确定集采用 budget-不确定集^[17]进行构建, 假设 n 节点的网络中至多有 m 个节点被不同程度的损坏, 则网络损坏情景 s 可由如下公式组表达:

$$s = \{z_1\delta_1, z_2\delta_2, \dots, z_n\delta_n\}, \forall z_i \in \{0, 1\}, \delta_i = [0, 1] \quad (4)$$

$$\sum_i z_i \leq m \quad (5)$$

$$z_i \geq \delta_i \quad (6)$$

其中, z_i 用于表示节点 i 是否发生损坏, $z_i = 1$ 表示存在损坏, $z_i = 0$ 表示无损坏; 节点的损坏程度用 δ_i 表示, 取值区间为 $[0, 1]$ 。当 $\delta_i = 0$ 时, 表明节点 i 没有发生损坏, z_i 同步为 0; 当 $\delta_i = 1$ 时, 表明节点 i 被完全损坏。当只有确定节点存在损坏后, 损坏程度 δ_i 的取值才有效。为便于后续问题的探讨, 假定当节点被完全损坏时, 与该节点直接相连的边均无法使用; 当节点只被部分损坏时, 该节点的部分功能 (供应/中转) 依旧能发挥作用, 与该节点相连的边还可继续使用。此外由于网络中发生损坏往往只会涉及极少数的节点, 很少有多个节点, 尤其是地理位置相距较远的节点, 同时发生损坏^[6]。因此, 本文将损坏节点的数量设置为 1, 即仅研究只有一个节点发生损坏时的物流网络设计问题。针对一定规模的网络, 随机产生若干组符合上述公式组的 z_i 和 δ_i , 即可构成网络损坏情景不确定集 S 。

1.4 模型参数及集合

模型中涉及的参数及集合表示, 见表 1、表 2 所示。

表 1 模型参数说明

Table 1 Model parameters description

参数	含义
$k_i^{(o)}$	节点 i 建设为供应节点的建设成本
$k_i^{(T)}$	节点 i 建设为中转节点的建设成本
d_{ij}	节点 i, j 间的距离
ω	单位距离单位货物的运费
β	单位货物的中转成本
Q	单车最大载重量
s	第 s 种网络损坏情景
D_j	需求节点 j 的需求量
C_i	供应节点 i 的供应量
T_j	中转节点 j 的单次最大中转量
η_j	需求节点 j 的需求未满足时的单位惩罚成本
v	货车运输速度
r_j	中转节点 j 的单位货物中转时间

表 2 集合说明

Table 2 Sets description

集合	含义
V_o	供应节点集
V_T	中转节点集
V_D	需求节点集
V	$V_o \cup V_T \cup V_D$
E	由点集 V 构成的全连接有向网络图的边集（每对节点间存在两条指向相对的弧）
S	网络损坏情景不确定集（ $s \in S$ ）
V^s	在第 s 种网络损坏情景下还能够发挥节点（部分）功能的供应及中转节点集合
E^s	在第 s 种网络损坏情景下，由点集 V^s 和 V_D 构成的全连接有向网络图的边集

1.5 两阶段可靠性物流网络设计模型

本文建立的多目标两阶段可靠性物流网络设计模型如下：

$$\begin{aligned} \min_{y_i^{(O)}, y_i^{(T)}, x_{ij}, f_{ij}} \quad & \sum_{i \in V_o} k_i^{(O)} y_i^{(O)} + \sum_{i \in V_T} k_i^{(T)} y_i^{(T)} + \sum_{(i,j) \in E} \omega d_{ij} f_{ij} + \sum_{j \in V_T} \sum_{i \in V_o \cup V_T} \beta f_{ij} \\ & + \max_{s \in S} \min_{f_{ij}^s \in \varphi(y_i^{(O)}, y_i^{(T)}, x_{ij}, s)} \left(\sum_{(i,j) \in E^s} \omega d_{ij} f_{ij}^s + \sum_{j \in V^s \cap V_T} \sum_{i \in V^s \cap (V_o \cup V_T)} \beta f_{ij}^s + \sum_{j \in V_D} \eta_j (D_j - \sum_{i \in V^s} f_{ij}^s) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\min \sum_{(i,j) \in E} \frac{d_{ij}}{v} \left\lceil \frac{f_{ij}}{Q} \right\rceil + \sum_{j \in V_T} \sum_{i \in V_o \cup V_T} f_{ij} r_j \quad (8)$$

s.t.

$$\sum_{i \in V_o} C_i y_i^{(O)} \geq \sum_{j \in V_D} D_j \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq y_i^{(O)}, \forall i \in V_o, j \in V_T \cup V_D \quad (10)$$

$$x_{ij} = 0, \forall i \in V_T, j \in V_o \quad (11)$$

$$x_{ij} \leq y_i^{(T)}, \forall i \in V_T, j \in V_T \cup V_D \quad (12)$$

$$x_{ij} = 0, \forall i \in V_D, j \in V_o \cup V_T \quad (13)$$

$$\sum_{i \in V} (x_{ij} + x_{ji}) \geq 1, \forall j \in V \quad (14)$$

$$\sum_{j \in V_T \cup V_D} f_{ij} \leq O_i, \forall i \in V_o \quad (15)$$

$$\sum_{j \in V_T \cup V_D} f_{ij} - \sum_{k \in V_o \cup V_T} f_{ki} = 0, \forall i \in V_T \quad (16)$$

$$\sum_{k \in V_o \cup V_T} f_{ki} \leq D_i, \forall i \in V_D \quad (17)$$

$$f_{ij} \leq T_j, \forall i \in V_o \cup V_T, j \in V_T \quad (18)$$

$$\sum_{j \in V_T \cup V_D} f_{ij} \leq M y_i^{(O)}, \forall i \in V_O \quad (19)$$

$$\sum_{j \in V_T \cup V_D} f_{ij} \leq M y_i^{(T)}, \forall i \in V_T \quad (20)$$

$$f_{ij} \leq M x_{ij}, \forall i, j \in V \quad (21)$$

$$y_i^{(O)}, y_i^{(T)} = \{0, 1\}, \forall i \in V_O, V_T \quad (22)$$

$$x_{ij} = \{0, 1\}, \forall i \in V_O \cup V_T, j \in V_T \cup V_D \quad (23)$$

其中, $\varphi(y_i^{(O)}, y_i^{(T)}, x_{ij}, s) = \{$

$$\sum_{j \in V^s \cap (V_T \cup V_D)} f_{ij}^s \leq (1 - \delta_i z_i) O_i y_i^{(O)}, \forall i \in V_O \cap V^s \quad (24)$$

$$\sum_{j \in V^s \cap (V_T \cup V_D)} f_{ij}^s \leq (1 - \delta_j z_j) T_j y_j^{(T)}, \forall j \in V_T \cap V^s \quad (25)$$

$$\sum_{j \in V^s \cap (V_T \cup V_D)} f_{ij}^s \leq O_i, \forall i \in V_O \cap V^s \quad (26)$$

$$\sum_{j \in V^s \cap (V_T \cup V_D)} f_{ij}^s - \sum_{k \in V^s \cap (V_O \cup V_T)} f_{ki}^s = 0, \forall i \in V_T \cap V^s \quad (27)$$

$$\sum_{k \in V^s \cap (V_O \cup V_T)} f_{ki}^s \leq D_i, \forall i \in V_D \cap V^s \quad (28)$$

$$f_{ij}^s \leq T_j, \forall i \in V_O \cup V_T, j \in V_T \cap V^s \quad (29)$$

$$\sum_{j \in V_T \cup V_D} f_{ij}^s \leq M y_i^{(O)}, \forall i \in V_O \cap V^s \quad (30)$$

$$\sum_{j \in V_T \cup V_D} f_{ij}^s \leq M y_i^{(T)}, \forall i \in V_T \cap V^s \quad (31)$$

$$f_{ij}^s \leq M x_{ij}, \forall i \in V^s, j \in V \quad (32)$$

式(7)为网络总成本目标函数,其中第一阶段的成本为供应及中转节点的建设成本、正常状态下(网络未发生损坏)的总运输成本和中转成本;第二阶段的成本是在给定 $y_i^{(O)}, y_i^{(T)}, x_{ij}, s$ 后网络运行所产生的运输成本、中转成本及需求未满足的惩罚成本。式中, $\sum_{i \in V_O} k_i^{(O)} y_i^{(O)}, \sum_{i \in V_T} k_i^{(T)} y_i^{(T)}$ 为供应节点和中介节点的建设成本;在供应节点和中介节点选址的基础上,进一步决策节点间的连通关系 x_{ij} ,即可得到相应的网络图,在网络图上完成流量分配决策后便可计算出总运输成本和中转成本。 $D_j - \sum_{i \in V^s} f_{ij}^s$ 为需求节点 j 在网络损坏情景 s 下未满足的需求。式(8)为网络总运行时间目标函数,评估网络正常状态下的运行效率,网络总运行时间计算包括正常状态下的货物运输时间及总中转时间,其中 $\left\lceil \frac{f_{ij}}{Q} \right\rceil$ 为流经弧 (i, j) 间的流量所需要的最少车辆数。考虑到网

络损坏的发生是一个小概率事件，除非是特定类型的物流网络，例如应急物流网络，多数情况下网络建设者不会过于追求网络受损后的运行时间最小化，且对于网络建设者而言，网络中一旦发生损坏，需求节点的需求是否被满足往往比需求节点的需求是否被高效满足更重要，因此，本文重在优化网络在正常状态下的时效性。

式（9）约束了网络中供应节点的开启总数要能够满足网络的总需求；式（10）为供应节点连通限制约束，即只有开启的供应节点才可以和其他中转及需求节点连通；式（11）限制了中转节点不逆向连通至供应节点；式（12）为中转节点连通限制约束，即只有开启的中转节点才可以和其他中转和需求节点连通；式（13）限制了需求节点不逆向连通至供应及中转节点；式（14）约束了设计的网络中不可存在孤立点， $\sum_{i \in V} (x_{ij} + x_{ji})$ 即为连通至节点 i 的边数；式（15）、

（16）、（17）为网络中节点的流平衡约束，其中式（15）约束了供应节点发出的流量不能超过其供应能力，式（16）约束了中转节点发出的流量应等于其接收到的流量，式（17）约束了需求节点接收到的流量不能超过其节点的需求量；式（18）为中转点容量约束，即任意流经中转点的单次流量不得超过该中转点的最大中转能力；式（19）、（20）分别约束了只有开启的供应节点和中转节点才可以完成货物的发出及中转（ M 为任意大的正数）；式（21）约束了只有已规划连通的节点间才可以进行流量决策；式（22）、（23）分别为选址决策变量和节点连通决策变量的 0-1 取值约束；式（24）—（31）为网络损坏情景下的约束条件，表达在给定的 $y_i^{(0)}, y_i^{(T)}, x_{ij}, s$

下受损网络流量 f_{ij}^s 的决策限制。式（24）、（25）分别约束受损的供货及中转节点只能发挥部分功能，其所保留的供货及中转能力受节点损坏程度 δ 影响；式（26）、（27）、（28）为损坏情景下网络中节点的流平衡约束，其中式（26）约束了损坏情景下供应节点发出的流量不能超过其供应能力，式（27）约束了损坏情景下中转节点发出的流量应等于其接收到的流量，式（28）约束了损坏情景下需求节点接收到的流量不能超过其节点的需求量；式（29）为损坏情景下中转节点的单次中转流量限制；式（30）、（31）约束了在损坏情景下保留有部分或全部能力且开启的供应节点和中转节点才可以完成货物的发出及中转；式（32）约束了受损网络中仍能发挥部分或全部功能的节点间的连通关系上才可以进行流量 f_{ij}^s 的决策。

2 算法设计

本文建立的多目标鲁棒优化两阶段可靠性物流网络设计模型，需要在求解过程中确定供应、中转节点的选址，节点间的连通关系及网络正常状态和受损状态下的流量分配，且该模型需处理情景鲁棒集的搜索和多目标问题的优化，因此该问题属于一个多目标鲁棒两阶段优化问题。该问题可行方案众多，存在多目标、多阶段及情景鲁棒不确定集的多重嵌套，很难用常规方法求解。本文尝试以多目标进化算法—NPGA (Niche Pareto Genetic Algorithm) 作为算法主框架，结合模型及决策变量的特征进行染色体编码和算法改进，以期达到更好的模型求解效果。

2.1 编码

模型涉及的决策变量包括供应节点、中转节点的选址，节点间的连通关系及流量分配三类，其中网络流量分配是在选址和连通关系确定之后进行决策的，是一个网络最小费用流问题，可嵌套最小费用流算法进行求解，该算法通过寻找网络中从供应节点至需求节点费用最小的增广链来逐步增大网络流量，直至网络中所有需求节点的需求均被满足^[18]。因此本文模型的染色体仅对供应、中转节点选址及节点间连通关系进行编码。本文设计了选址基因层+连通关系基因层的双层染色体编码结构，其中第一层基因表达节点选址信息，采用 0-1 编码，分段表达供应及中转节点的选址情况；第二层基因以第一层选址基因层为基础，通过邻接矩阵的形式表达节点间的连通关系。选址基因层的基因长度为备选供应节点及中转节点的总数，而节点连通关系

基因层是一个由已选址的供应、中转节点及需求节点所构成的邻接矩阵，主对角线取值为 0，不同节点间连通则取值为 1，不连通则取值为 ∞ 。

以 3 个供应节点，3 个中转节点和 3 个需求节点的物流网络设计问题作编码举例，染色体分为两层，第一层基因长度为 6，表达供应节点和中转节点的选址情况；第二层基因因为一个邻接矩阵，基于第一层基因产生，示例如图 1 所示。

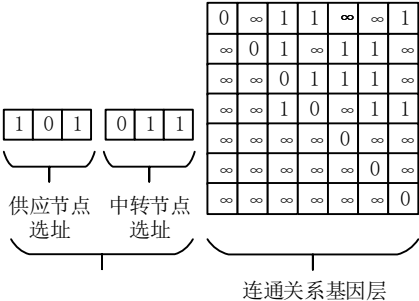


图 1 染色体编码示例

Fig. 1 Example of chromosome encoding

从该染色体的选址基因层可知：第 1、3 号供应节点被选址为开启的供应节点，第 2、3 号中转节点被选址为开启的中转节点；连通关系基因层通过一个有向网络的邻接矩阵表达节点间是否连通。一个染色体对应一个物流网络设计方案，网络流量在合法染色体的基础上完成分配。

2.2 基于大邻域搜索的初始种群生成

在生成初始种群时，首先结合约束条件（9），随机生成满足约束的选址基因层。根据选址基因层中供应节点和中转节点的选址情况，结合约束（10）-（14）可随机确定已选址的供应、中转节点及需求节点间的连通关系，由此便可生成连通关系基因层。然而满足约束（10）-（14）的可行连通方案众多，如果仅通过随机生成的方式产生初始种群，则很难产生出较高质量的初始种群，且算法优化过程会在一定程度上因连通关系基因层的随机性过高，而导致算法优化结果的不稳定。

因此，本文针对连通关系基因层设计大邻域搜索机制，对初始种群每个个体的连通关系基因层进行优化，以提高种群的质量。大邻域搜索机制中的破坏算子和修复算子操作设计如下：

在破坏算子操作中，先随机产生待破坏的节点编号，该编号从已选址的供应节点和中转节点中产生，对已选择的破坏节点编号，从连通关系基因层对应编号节点的索引行出发，随机中断部分当前的连通关系，形成破坏后的连通关系基因层；修复算子操作是对破坏后的连通关系基因层进行修复，从破坏节点编号的索引行出发，搜索能够与该节点连通但当前未连通的节点，随机将破坏节点和未连通节点进行连通，可产生若干修复后的连通关系基因层。进一步从约束条件出发将修复后的连通关系基因层作合法性检查，最终产生邻域解集。以图 1 中的连通关系基因层为例，以一位基因的破坏和修复操作为示例，具体操作示意图 2、3 所示。

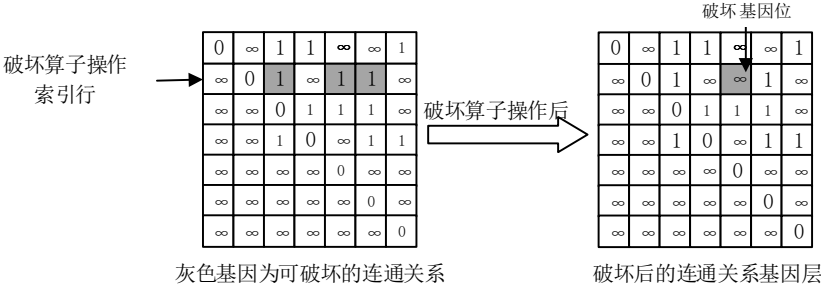


图 2 破坏算子操作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of destruction operator operation

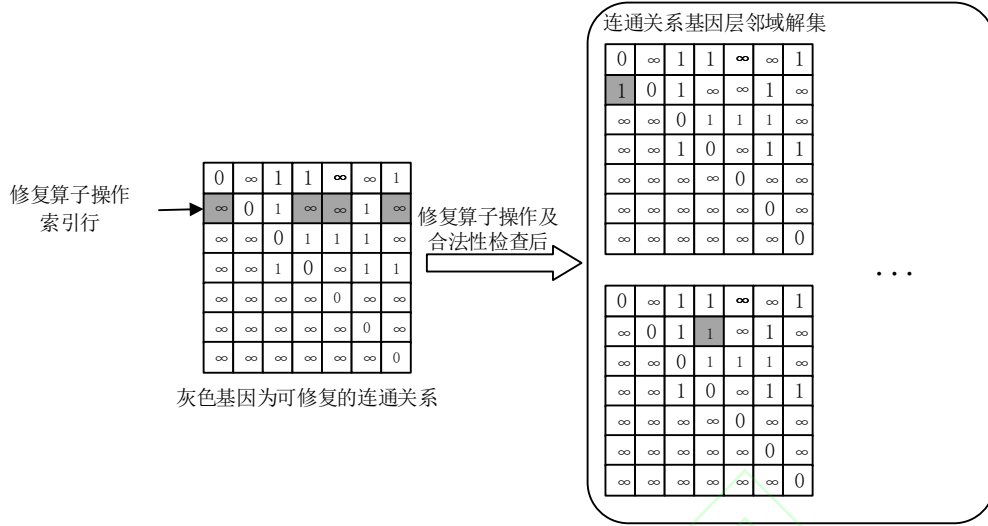


图 3 修复算子操作示意图

Fig. 3 Schematic diagram of repair operator operation

在上述破坏和修复算子的设计中，破坏及修复操作的基因位数可根据问题规模的大小进行调整，当破坏及修复操作的基因位数较多时，会产生更多的邻域解，寻优能力更强，但同时计算耗时将也更长，具体设置可根据问题规模做动态调整。对于产生的邻域解，根据式（7）、（8）分别计算成本及运行时间目标值，选择被支配数目最少的邻域解与初始解进行比较，如果该邻域解能够支配初始解，则用该邻域解替换该初始解，继续对替换后的解执行破坏及修复操作；如果该邻域解不能支配初始解，则迭代次数加 1，对该初始解产生新的邻域解集，直到算法达到终止条件。大邻域搜索机制的操作流程图如图 4 所示。

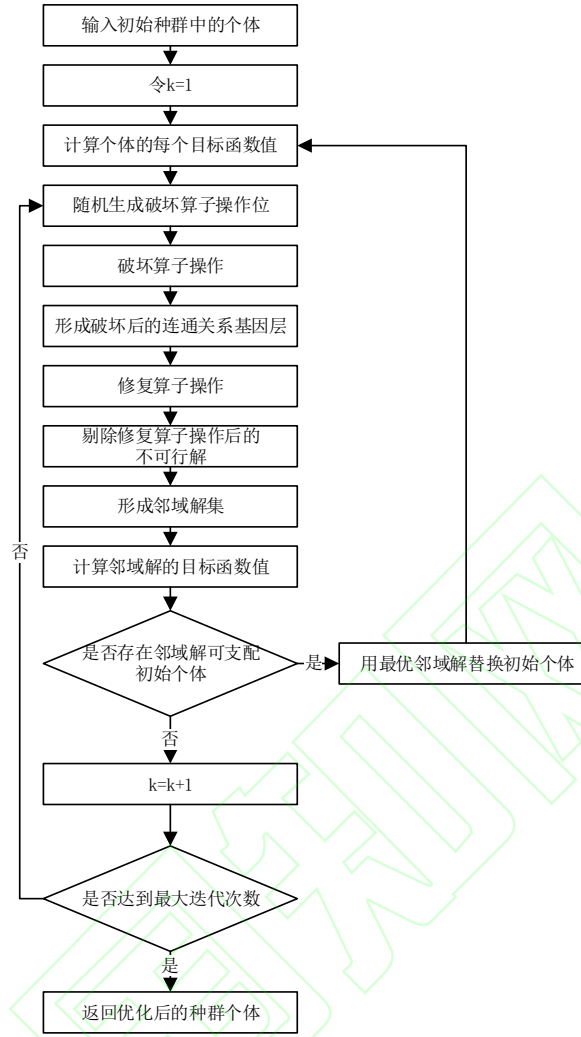


图 4 大邻域搜索机制操作流程

Fig. 4 Operation flow chart of large neighborhood search mechanism

2.3 基于小生境的选择算子

采用竞标赛的方法选择子代个体，先在种群中随机选择 10% 的个体作为子种群，并在种群中随机选择两个个体，分别计算两个个体的拥挤度和两个个体在子种群中被支配的数量，记参与竞标赛的个体为 x_1, x_2 ，其在子种群中的被支配数为 D_1, D_2 ，各自的拥挤距离为 S_1, S_2 ，如果 $D_1 = 0, D_1 > 0$ 或 $D_1 > 0, D_1 > 0, S_1 < S_2$ 或 $D_1 = 0, D_1 = 0, S_1 < S_2$ ，则选择个体 x_1 ，否则选择 x_2 。重复上述操作，直到形成预定规模的子代^[19]。

2.4 基于聚类的交叉、变异算子

由于本文求解的模型可行方案众多，解空间较大，假设问题包含 m 个供应节点， n 个中转节点， o 个需求节点，则对应的基因位点数量有 $m+n+(m+n+o)^2$ 个，最多可形成 $2^m \times 2^n \times 2^{(m+n+o)^2 - (m+n+o) - mn - om - on}$ 种方案，且伴随着问题规模的增大，问题的解空间将呈指数级增大。算法的勘探性能将直接决定是否能够得到较优的方案，为此本文设计了基于聚类的交叉、变异算子，以提高算法的勘探能力。

具体操作划分为基于聚类的交叉操作和基于聚类的变异操作。其中基于聚类的交叉操作流程如下：以个体的总成本及总运行时间目标值作为输入特征，将选择算子形成的子代种群进行聚类，将聚类后的每个类作为一个子种群，分配较大的概率对不同子种群中的个体进行交叉，同时分配较小概率对同一子种群内的个体进行交叉。交叉操作采用双点交叉法，且只交叉染色体的选址基因层（由于选址基因层和连通关系基因层间存在强关联性，若将连通关系层纳入交叉操作很难产生出合法染色体）。当交叉后的选址基因层不满足约束条件（9）时，重新选择交叉点位进行交叉，直到产生合法的选址基因层。对交叉后的选址基因层，根据约束条件先随机产生合法的连通关系基因层，并进一步引入大邻域搜索机制，进行连通关系基因层的优化，最终返回交叉后的个体。基于聚类的交叉算子操作示意图如图 5 所示。

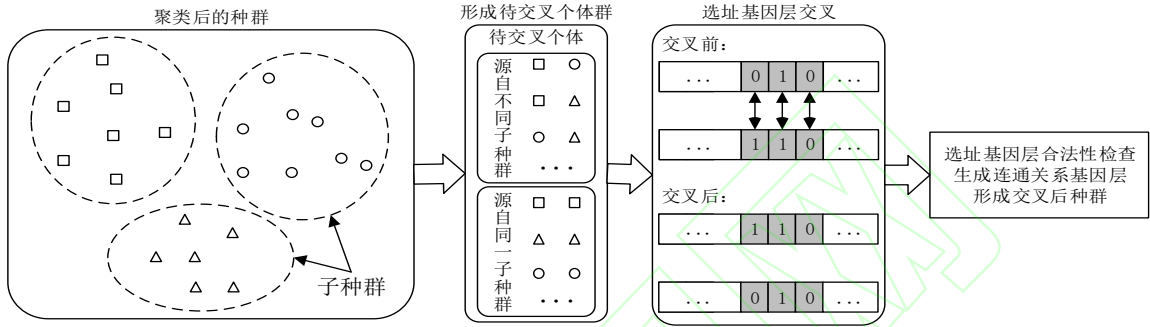


图 5 基于聚类的交叉算子操作示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cluster-based crossover operator operation

基于聚类的变异操作流程如下：继续对交叉后的个体按目标函数值进行聚类，将聚类后的每类作为一个子种群，判断每个子种群的质心是否被其他子种群的质心支配，计算得到每个子种群的质心被支配数，根据子种群的质心被支配数将子种群划分为高、中、低质量的子种群。对不同质量的子种群采取不同的变异策略，以提高变异过程中的搜索效率。变异操作同样只对染色体的选址基因层进行变异。变异时先设置基准变异率，对高质量子种群以尽可能保持种群个体的优秀基因为目的，降低基准变异率实施变异；对中质量子种群采用基准变异率实施变异；对低质量子种群，鉴于其种群个体质量较低，故提高基准变异率，以扩大对解空间的进一步搜索。在对个体的选址基因层进行变异时，先随机产生变异位，对变异位的基因进行 0-1 翻转操作，当变异后的选址基因层不合法时，重新生成变异位进行变异，直到产生合法的选址基因层。对变异后的选址基因层同样引入大邻域搜索机制进行个体连通关系基因层的优化。基于聚类的变异算子操作如图 6 所示。

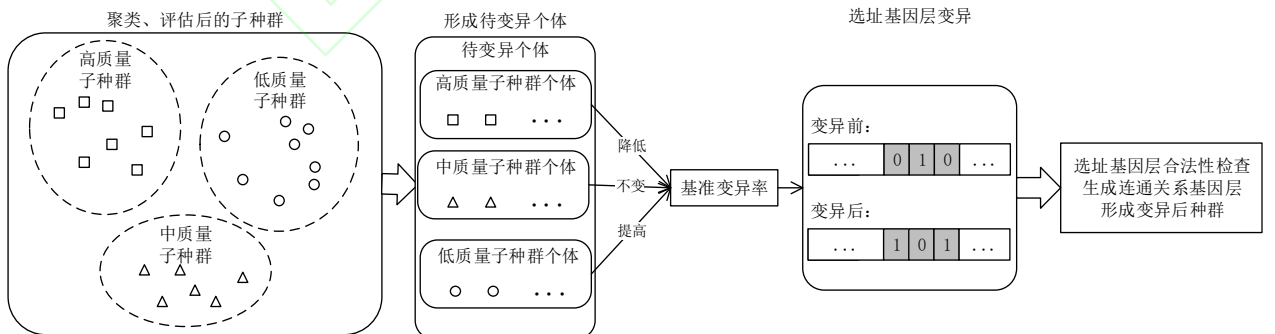


图 6 基于聚类的变异算子操作示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cluster-based mutation operator operation

此外，本文对所设计的基于聚类的交叉变异操作设定了操作区间，即在设定的操作区间内执行基于聚类的交叉变异操作，操作区间外执行常规交叉变异操作。设置规则如下：记算法总迭代次数为 G ，设置算法迭代次数的前 a 次执行基于聚类的交叉变异操作，算法的后 $G - a$ 次

执行常规交叉变异操作。设定该规则的原因是：由于算法在迭代初期种群个体分布较分散，参与聚类的个体差异性较大，勘探策略会对解空间有更好的搜索效果，而当算法迭代至中后期，种群个体经过进化，会逐渐向 Pareto 前沿聚集，聚类后的子种群间更倾向于呈现互相非支配的关系，此时基于聚类的交叉操作与常规交叉操作无显著差异，且基于聚类的变异操作会因子种群无法评估出高、中、低质量而失效。完整交叉变异操作的流程图如图 7 所示。

2.5 算法流程图

本文求解多目标两阶段可靠性物流网络设计模型的主算法框架为 NPGA，在初始种群生成，交叉、变异操作中嵌套了大邻域搜索机制对个体连通关系基因层进行优化，同时引入了基于聚类的交叉变异操作，以提升算法初期对解空间搜索的能力。主算法流程图如图 8 所示。

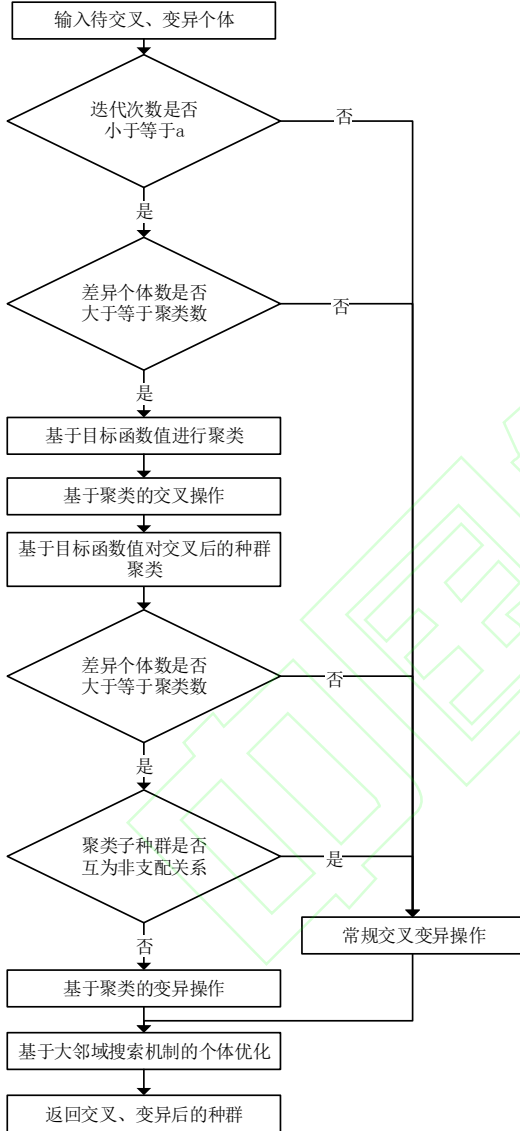


图 7 交叉变异算子操作流程流程图

Fig. 7 Operation flow chart of crossover mutation operator

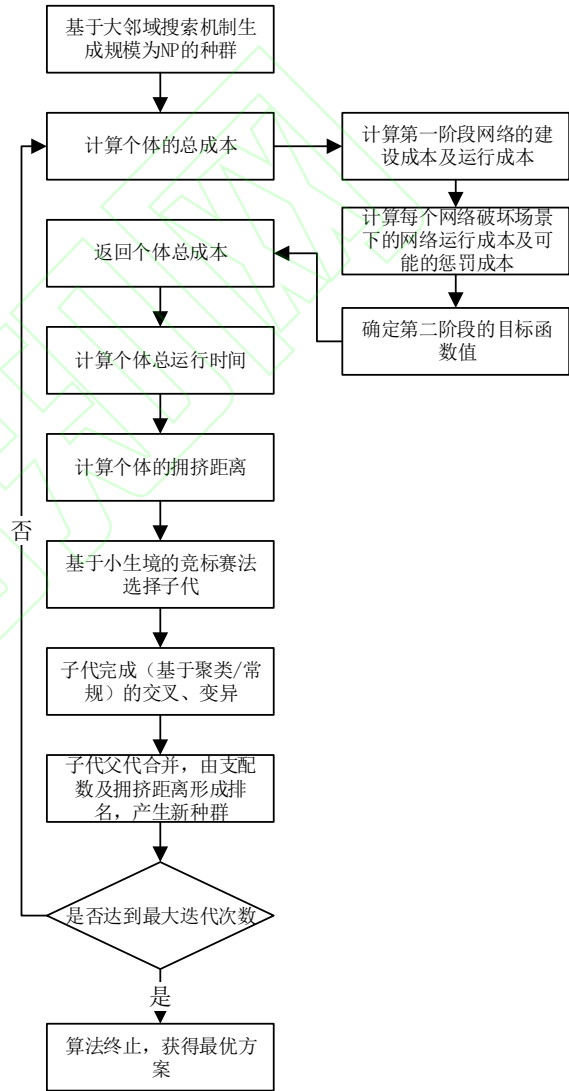


图 8 混合进化算法流程图

Fig. 8 Flow chart of hybrid evolutionary algorithm

3 案例分析

3.1 案例设计

本文借鉴文献[8]的数据集生成方法。通过标签 $|V_o| - |V_r| - |V_d|$ 的形式区分数数据集。例如某数据集标签为 10-10-20，即代表该数据集的规模为 10 个供应节点，10 个中转节点，20 个需求节

点。其中，每个需求节点未满足需求的单位惩罚系数为 1500，每个需求节点的需求量 D_j 在

$[50,110]$ 内随机产生。记 $\sum_{j \in V_D} D_j$ 为所有需求节点的总需求量，则供应节点平均供应量 $\bar{O} = \frac{\sum_{j \in V_D} D_j}{|V_O|}$ ，

中转节点平均中转能力 $\bar{T} = \frac{\sum_{j \in V_D} D_j}{|V_T|}$ 。供应节点和中转节点的建设成本分别设置为 10000 和 8000，

每个备选供应节点的供应能力在区间 $[1.5\bar{O}, 2.5\bar{O}]$ 内随机生成，每个备选中转节点的中转能力在

区间 $[1.5\bar{T}, 2.5\bar{T}]$ 内随机生成。单车运输速度为 80，单车最大载重量为 30，单位中转成本为 5，

中转时间为 2。为便于对实验结果的分析，本文给定成本以万元计量，供应、需求及汽车载货量以吨计量，时间以小时计量，速度以千米/小时计量。此外在损坏情景的构建中，损坏节点个数设置为 1，损坏程度 δ_i 包括 30%，50%和 100%。损坏情景同样采用随机生成的方式，先随机产生待损坏的节点，再随机产生损坏程度，当某次产生的损坏情景与损坏情景集中的某个情景一致时重新生成，直到生成预定规模的损坏情景集。本文设定的损坏情景集规模随网络中备选供应及中转节点个数的增多而增大，在给定数据集规模 $|V_O|+|V_T|+|V_D|$ 的情况下，设定损坏情景共有 $3^{|V_O|+|V_T|}$ 个。

3.2 算法有效性分析及案例结果

本文先随机生成一个 3-3-5 的数据集，基于相同的网络损坏情景不确定集，分别采用本文设计的混合进化算法、枚举法、NSGA II 求出最优解进行对比，以验证算法的有效性。其中枚举法是将所有可能的网络建设方案逐一列举，并剔除不可行解，计算网络总成本和总运行时间，将筛选出的非支配解作为最终的 Pareto 最优解；NSGA II 采用与本文相同的编码方式进行求解。三种算法最终获得相同个数的 Pareto 最优解，混合进化算法与枚举法的最优目标函数值、最优选址方案及最优连通关系均相同，NSGA II 获得了该问题的近似最优解，表明本文设计的混合进化算法能够有效求解两阶段可靠性物流网络设计模型，计算结果见表 3 所示。

表 3 混合进化算法与枚举法及 NSGA II 的 Pareto 最优解比较

Table 3 Comparison of hybrid evolutionary algorithm with enumeration method and NSGA II for Pareto optimal solution

算法及最优解	网络总成本目标值（万元）	网络总运行时间目标值（小时）	最优选址方案	最优连通关系
混合进化算法	Pareto 解 1	1475000	101 010	O1- T2, D1, D2, D3, D4, D5
				O3- T2, D1, D3, D4, D5
				T2- D1, D2, D3, D4, D5
	Pareto 解 2	1763000	101 010	O1- T2, D1, D2, D4, D5
				O3- D2, D3, D4, D5
				T2- D1, D2
枚举法	Pareto 解 1	1475000	101 010	O1- T2, D1, D2, D3, D4, D5
				O3- T2, D1, D3, D4, D5
				T2- D1, D2, D3, D4, D5
	Pareto 解 2	1763000	101 010	O1- T2, D1, D2, D4, D5

				O3- D2, D3, D4, D5
				T2- D1, D2
NSGA II	Pareto 解 1	1511000	206.5	O1- T2, D1, D3, D4, D5
				O3- T2, D3, D4
	Pareto 解 2	1793000	21.7	T2- D1, D2,D3
				O1- T2, D1, D3, D4, D5
				O3- T2, D2, D3, D4, D5
				T2- D1, D3

注：表中的节点采用“O(供应节点)/T(中转节点)/D(需求节点)+节点编号”的形式表达，节点间连通采用“-”，例 O1- T2 即表达 1 号供应节点连通 2 号中转节点，多组同一起点的连通关系用逗号分割。

进一步生成 5 组不同规模的数据集，采用本文设计的算法进行求解，得到 Pareto 最优解见表 4 所示。

表 4 不同规模的可靠性物流网络设计问题的 Pareto 最优解

Table 4 Pareto optimal solutions of reliability logistics network design problem with different scales

不同规模数据集的最优解		网络总成本目标值（万元）	网络总运行时间目标值（小时）
3-3-5	Pareto 解 1	1475000	206.5
	Pareto 解 2	1763000	21.7
3-5-8	Pareto 解 1	2337000	927
	Pareto 解 2	3062000	30.6
5-5-10	Pareto 解 1	2802000	202.9
	Pareto 解 2	3192000	31.9
5-10-15	Pareto 解 1	3510000	645.1
	Pareto 解 2	4433000	43.8
10-10-20	Pareto 解 1	2687000	232.5
	Pareto 解 2	2737000	27.1

从表 4 中的各组 Pareto 最优解可以看出，当网络总成本目标值较大时，网络总运行时间较低；而当网络总成本目标值较小时，网络总运行时间会有较大幅度的延长。不同规模数据集下的网络设计问题经求解分别得到了成本偏好型（网络总成本较低，网络总运行时间较长）和时间偏好型（网络总成本较高，网络总运行时间较短）两组设计方案，网络建设者可根据运输商品是否具有较高时效性要求以及网络建设预期投资等决策偏好，选择不同的网络建设方案。

3.3 模型及算法对比

3.3.1 模型对比

分别引入单目标两阶段可靠性物流网络设计模型和传统多目标物流网络设计模型，与本文构建的模型进行对比。其中，单目标两阶段可靠性物流网络设计模型仅考虑网络总成本目标的最小化，目标函数中包括网络建设成本、网络正常状态和损坏情景下的运行成本，计算公式同式（7），求解算法采用传统单目标遗传算法；传统多目标物流网络设计模型仅以网络总成本（建设成本、正常状态下的网络运行成本）和网络总运行时间最小化为优化目标，求解算法采用本文设计的混合进化算法。

如表 5 所示，为本文构建模型与单目标两阶段可靠性物流网络模型的最优解对比，对比案例选取同一个 5-10-15 的数据集，网络损坏情景不确定集设置相同，其中单目标两阶段可靠性物流网络设计模型的网络总运行时间是将其最优网络建设方案采用式（8）计算得出。

表 5 与单目标两阶段可靠性物流网络设计模型的优化结果对比

Table 5 Comparison of optimization results with single objective two stage reliability logistics network design model

模型及最优解		网络总成本目标值 (万元)	网络总运行时间目标值 (小时)
本文构建模型	Pareto 解 1	3510000	645.1
	Pareto 解 2	4433000	43.8
单目标两阶段可靠性物流网络设计模型		3123870	622.1

可以看出，本文构建的多目标两阶段可靠性物流网络设计模型求得两组 Pareto 解，两组解分别具有成本偏好（Pareto 解 1）和时间偏好（Pareto 解 2），具有成本偏好的 Pareto 解 1 与单目标两阶段可靠性物流网络设计模型的最优解取值接近，而且本文构建的模型提供了网络运行时间较低的时间偏好型网络建设方案。当客户对于运输时效性较敏感时，本文构建的网络设计模型可提供多组权衡的网络建设方案。

如表 6 所示，为本文构建模型与传统多目标物流网络设计模型的最优解对比，对比案例同样选取 5-10-15 的数据集。由于传统多目标物流网络设计模型的成本优化目标仅考虑网络正常状态下的网络总运行成本（网络总运行时间计算方式相同），为确保对比的一致性，引入同一个网络损坏情景不确定集，计算出传统多目标物流网络设计模型最优建设方案在损坏情景集中的总运行成本。

表 6 与传统多目标物流网络设计模型的优化结果对比

Table 6 Comparison of optimization results with traditional multi-objective logistics network design model

模型及最优解		网络总成本目标值（万元）			两阶段成本 总计 （万元）	网络总运行 时间目标值 （小时）
		第一阶段网络总成本（万元）		第二阶段网络 总运行成本（万 元）		
		第一阶段成本 总计（万元）	其中：网络建设 成本（万元）			
本文模型	Pareto 解 1	1403000	98000	2107000	3510000	645.1
	Pareto 解 2	1889000	90000	2545000	4433000	43.8
传统多目标物流	Pareto 解 1	1128000	72000	2653000	3781000	600.3
网络设计模型	Pareto 解 2	1610000	72000	3542000	5152000	40.3

注：第一阶段网络总成本包括供应、中转节点建设成本和网络正常情况下的总运行成本；第二阶段的网络总运行成本为损坏情景集中的网络总运行成本。

从表 6 可以看出，本文构建模型与传统多目标物流网络设计模型均求得两组 Pareto 解，两组 Pareto 解分别为成本偏好型 Pareto 解和时间偏好型 Pareto 解。进一步对两种偏好的 Pareto 解进行分别对比，在两组成本偏好型 Pareto 解（Pareto 解 1）的对比中，本文构建模型的网络建设方案在网络建设成本上比传统多目标物流网络设计模型的网络建设方案多出 26000 万元，但在损坏情景集中，相比于传统多目标物流网络设计模型的网络建设方案，最多能够减少 20.6% 的网络运行成本支出（546000 万元）；在两组时间偏好型 Pareto 解（Pareto 解 2）的对比中，本文构建模型的网络建设方案在网络建设成本上比传统多目标物流网络设计模型的网络建设方案多出 18000 万元，但在损坏情景集中，相比于传统多目标物流网络设计模型的网络建设方案，最多能够减少 28.2% 的网络运行成本支出（997000 万元）。综合来看，本文构建的两阶段可靠性物流网络设计模型能够通过少量增加前期网络建设成本的投入，显著降低网络在受损情况下

的总运行成本，有效提升网络可靠性。

3.3.2 算法对比

选取计算复杂度较大的数据集 10-10-20，采用相同的网络损坏情景不确定集，对本文设计的混合进化算法和传统多目标进化算法（NPGA 及 NSGAII）进行优化结果对比。其中，NPGA 和 NSGAII 采用与混合进化算法相同的编码结构，节点间的连通关系基因层结合选址基因层在符合约束条件的前提下随机产生，交叉、变异操作采用常规交叉、变异操作。算法对比统一设定种群规模为 20，迭代次数为 50 次。优化结果见表 7 所示。

表 7 算法优化结果对比

算法及最优解		网络总成本目标值（万元）	网络总运行时间目标值（小时）
混合进化算法	Pareto 解 1	2687000	232.5
	Pareto 解 2	2737000	27.1
NPGA	Pareto 解 1	4144000	258.1
	Pareto 解 2	4651000	48.7
NSGA II	Pareto 解 1	5954000	379
	Pareto 解 2	6174000	239.8
	Pareto 解 3	7019000	78.9

从表 7 可以看出，本文设计的混合进化算法与 NPGA 均获得了成本偏好和时间偏好的两组 Pareto 解，分别对应各自的 Pareto 解 1 和解 2，从两种算法获得的最优目标函数值可以看出，混合进化算法的成本偏好型和时间偏好型 Pareto 解能够分别支配 NPGA 的对应解；与 NSGA II 进行对比，其中 NSGA II 最终获得 3 组 Pareto 解，其中 Pareto 解 1 和解 3 分别具有成本偏好和时间偏好，Pareto 解 2 为 Pareto 解 1 和解 3 的折中解，分析最优目标函数值可以看出，混合进化算法的成本偏好型 Pareto 解能够支配 NSGA II 的 Pareto 解 1 和解 2，混合进化算法的时间偏好型 Pareto 解能够支配 NSGA II 的 3 组 Pareto 解。可见，无论决策者具有成本偏好还是时间偏好，混合进化算法相比于 NPGA 和 NSGA II 均能给出使目标函数值更优的网络建设方案。进一步绘制三种算法对两个目标的优化收敛情况，如图 9 所示。

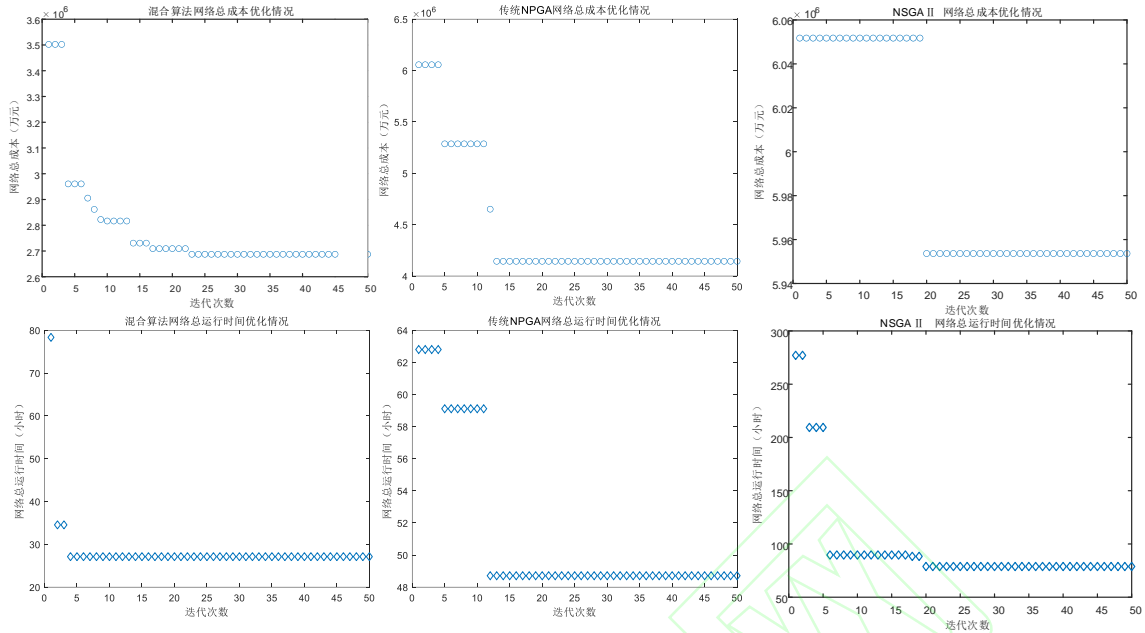


图 9 三种算法对两目标的优化收敛情况

Fig. 9 Convergence of the optimization of three algorithms for two objectives

可以看出，混合进化算法分别在第 23 代和第 4 代收敛到最优值，此处混合进化算法设定的基于聚类的交叉变异策略的操作区间是迭代的前 15 次，即算法在前 15 次迭代中采用基于聚类的交叉变异策略。结合两目标的优化情况可以看出，无论是网络总成本还是网络总运行时间基本都已在第 15 次迭代中有较好收敛，表现出混合进化算法较强的解空间搜索能力。与 NPGA 和 NSGA II 对两目标的最终优化结果对比，NPGA 和 NSGA II 虽都能在迭代前中期完成收敛，但收敛所得到的最优目标函数值相比于混合进化算法较差，表明混合进化算法的寻优能力也更强，可以得到更优的可靠性物流网络建设方案。

4 结论

(1) 以具有两阶段特性的网络总成本最小和网络总运行时间最短为两个独立优化目标，结合情景鲁棒的优化方法，构建了多目标两阶段可靠性物流网络设计模型，能够使网络获得较低运行成本和运行时间，同时具备较高可靠性；设计了具有双层染色体编码结构的混合进化算法，以 NPGA 作为算法主框架，在初始种群生成、交叉、变异操作中设计大邻域搜索机制优化个体基因，同时在算法迭代初期设计基于聚类的交叉变异勘探机制，提升对解空间的搜索能力。

(2) 通过对可靠性物流网络设计的案例分析发现，该设计模型能够通过少量增加前期网络建设成本的投入，显著降低网络发生损坏后的运行成本，有效提升网络的可靠性水平，同时兼顾网络在正常运行状态下的性能。模型对比结果显示，本文构建的模型在案例数据集中求得的成本偏好型和时间偏好型两种网络设计方案，相比于传统多目标物流网络模型求得的两种偏好方案，在相同网络损坏情景中最多能够分别节省 20.6% 和 28.2% 的网络运行成本；设计的双层染色体编码结构的混合进化算法，表现出较好的寻优性能，能够有效求解两阶段可靠性物流网络设计模型，得到可靠性物流网络设计的 Pareto 最优解集，决策者可根据决策偏好在 Pareto 最优解集中选择自己最满意的设计方案。

(3) 本文构建的模型和设计的算法可应用于包括一般物资运输网络、应急物流网络在内的各类物流网络设计中。考虑大规模和多等级的可靠性物流网络设计，构建可视化且运算效率更高的可靠性物流网络设计及调度平台，是下一阶段需要深入研究的内容。

参考文献

- [1] 石琴,陈朝阳,覃运梅.多目标物流网络优化模型的研究[J].中国管理科学,2005(4):40-43. [SHI Q, CHEN C Y, QIN Y M. A Multi-Objective Optimal Model on Logistics Network Programming[J]. Chinese Journal of Management Science,2005(4):40-43.]
- [2] 张桓奇,张毅.基于图论和模糊规划的物流网络优化[J].交通运输系统工程与信息,2005(6):91-95. [ZHANG H Q, ZHANG Y. Optimization of Logistics Network Based on Graph Theory and Fuzzy Planning[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2005(6):91-95.]
- [3] Alumur S A, Nickel S, Saldanha-da-Gama F. Hub location under uncertainty[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(4): 529-543.
- [4] Mišković S, Stanimirović Z, Grujičić I. Solving the robust two-stage capacitated facility location problem with uncertain transportation costs[J]. Optimization Letters, 2017, 11: 1169-1184.
- [5] 彭永涛,张锦,王坤.具有随机供需特征的物流超网络优化模型研究[J].交通运输系统工程与信息,2014,14(2):184-191. [PENG Y T, ZHANG J, WANG K. Logistics Supernetwork Optimization Model with Stochastic Supply and Demand Characteristics[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014,14(2):184-191.]
- [6] Peng P, Snyder L V, Lim A, et al. Reliable logistics networks design with facility disruptions[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2011, 45(8): 1190-1211.
- [7] Snyder L V, Daskin M S. Stochastic p-robust location problems[J]. Iie Transactions, 2006, 38(11): 971-985.
- [8] Cheng C, Qi M, Zhang Y, et al. A two-stage robust approach for the reliable logistics network design problem[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 111: 185-202.
- [9] 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(9-10): 2630-2647.
- [10] 林锦辉,胡万杰,董建军,等.基于动态可靠性评价的城市地下物流网络设计[J].地下空间与工程学报,2022,18(4):1062-1074. [LIN J H, HU W J, DONG J J, et al.Design on Urban Underground Logistics Network Based on Dynamic Reliability Evaluation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2022,18(4):1062-1074.]
- [11] Mohammadi M, Tavakkoli-Moghaddam R, Siadat A, et al. Design of a reliable logistics network with hub disruption under uncertainty[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(9-10): 5621-5642.
- [12] 李锐,黄敏.多等级蓄意攻击下的第三方物流可靠性网络设计[J].控制与决策,2017,32(8):1368-1376. [LI R, HUANG M.Reliable network design of third-party logistics under multi-grade proactive attacks [J]. Control and Decision,2017,32(8):1368-1376.]
- [13] 谢婷,周骞,史鸽飞.基于时间可靠性分析的农产品轴辐式物流网络节点选址[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2015,12(2):15-20. [XIE T, ZHOU Q, SHI G F. Nodes location of the shaft radial logistics network of agricultural products based on the analysis of time reliability[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science) ,2015,12(2):15-20.]
- [14] 尹小庆,莫宇迪,董陈晨,等.考虑行程时间可靠性的城市冷链末端配送站选址研究[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(6):176-183+198. [YIN X Q, MO Y D, DONG C C, et al.Location of Terminal Distribution Station of Urban Cold Chain Logistics Considering Travel Time Reliability[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2019,19(6):176-183+198.]
- [15] 陈坚,晏启鹏,霍娅敏,等.基于可靠性分析的区域灾害应急物流网络设计[J].西南交通大学学

- 报,2011,46(6):1025-1031. [CHEN J, YAN Q P, HUO Y M, et al. Regional Emergency Logistics Network Design Based on Reliability Analysis[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2011,46(6):1025-1031.]
- [16] Ke G Y. Managing reliable emergency logistics for hazardous materials: A two-stage robust optimization approach[J]. Computers & Operations Research, 2022, 138: 105557.
- [17] Bertsimas D, Sim M. Robust discrete optimization and network flows[J]. Mathematical programming, 2003, 98(1-3): 49-71.
- [18] 钱颂迪. 运筹学.第4版[M]. 清华大学出版社, 2012: 318-321.
- [19] Simon D. Evolutionary optimization algorithms[M]. John Wiley & Sons, 2013:739-740.

