

基于模拟退火算法的区域物流中心选址

何心

重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆, 400041;

摘要: 新冠疫情等社会灾害频发, 供应链断链问题普遍发生, 企业需采取分散库存等措施提升供应链韧性。为系统地探究分散库存选址问题, 本文以 A 企业在四川区域建立物流中心的问题为载体, 构建了以年运输费用、固定费用、仓储费用最小的选址整数规划模型; 并设计了相应的模拟退火算法; 以统计年鉴中的真实数据作为仿真源, 对该模型进行了求解, 最终选定“南充”、“德阳”、“内江”为其四川区域物流中心。该算法对物流企业降低物流成本提供了参考依据。

关键词: 供应链韧性; 选址问题; 模拟退火算法

DOI: 10.69979/3029-2700.25.07.063

引言

近年来, 随着疫情、干旱、地震等灾害频发, 我国自然环境与城市安全形式越发复杂严峻。在此背景下, 许多企业深受渠道受损等问题带来的供应中断困扰, 面临着严重的经济问题甚至是倒闭风险。目前, 如何提高供应链韧性成为企业关注的热点。对于企业来说, 常见、有效的方法就是实现多源采购或者备用供应, 换言之, 以建立多个仓库或物流中心的方式来实现多源供应, 降低供应中断风险。

关于供应链韧性的研究中, 国内主要集中在政策引导, 李牧原等^[1]从集装箱行业视角切入, 认为我国供应链韧性的提高需要提高新兴产业的关键技术能力, 加强供应能力以及物流链服务能力; 甄珍^[2]等认为, 在逆境事件冲击背景下, 提升供应链韧性可以从产业横向合作入手; 国外的研究集中于网络优化以及结构调整上, Mahima 等针对印度的公共分销系统, 设计了多级储存和分配的弹性和高效的农业食品供应链网络, 缓解粮食损失和质量下降的问题; Hosseinifard 等^[3]针对血液供应链, 设计了集中库存的储备方式, 缓解了血液供应链的短缺问题; Rezapour 等^[4]针对库存对供应链的韧性影响进行了案例研究, 分析了每种风险策略对稳定供应链的利润、市场份额和零售价格的贡献, 结果表明如果供应商不可靠, 下游的“紧急库存”是最可取的风险缓解策略。由以上文献可以发现, 各种自然灾害带来的供应链断链风险无处不在。针对该风险, 无论是从宏观政策还是企业围观结构调整的视角切入, 提高供应链韧性涉及到库存的重新分配, 进一步的, 需要考虑仓库或者企业区域物

流中心的选址问题。

选址是一个经典的问题, 既有定性分析, 比如考虑政策、劳动力可获得性、交通便利性等进行选址的分析, 往往主观性较强, 主要的选址问题研究集中在定量分析, 例如利用数学模型抽象化具体问题, 并利用整数规划或者启发式算法相关知识进行求解。Moellmann, J 等运用运筹学相关理论, 针对可持续发展背景下的工业选址问题进行了分析, 结果表明定量的分析会给企业带来更高的利润率; 针对精确求解算法的性能缺陷, 胡利利^[5]等针对冷链物流中心的高时效性特点将需求量与辐射半径等数据加入到模型中, 并设计了一种自适应免疫算法; 李桂娥^[6]将定性分析与定量分析相结合, 对冷链多层配送中心的选址问题进行建模, 并通过仿真分析验证了算法的有效性。廖建国^[7]改进了布谷鸟算法的性能, 采用了两段式智能算法了, 融合了赌轮盘选择方法优化“布谷鸟”的飞行路径, 并验证了该算法的有效性; 刘婧^[8]将模拟退火算法与粒子群算法相结合, 实验表明该算法的收敛速度以及效果更佳。由以上文献可以看出, 大部分学者关注选址问题的定量分析, 针对传统整数规划求解方式的性能孱弱的问题, 开发了启发式的算法, 并且以融合各种算法之间的优势进行创新, 不断提升求解的速度以及有效性。

本文将以建设企业的区域物流中心为研究对象, 重点考虑提供货物储存以及配送的仓库选址, 如何科学合理地确定其设立位置, 使其能在满足各个区域需求的前提下, 做到固定成本以及可变成成本最小。为了使得研究更具实践性, 将以 A 企业在四川区域的物流中心选址

问题作为载体进行探究。

1 区域物流中心选址模型构建

1.1 问题描述

企业 A 是一家食用油生产企业，是所在供应链的核心成员，主要供应四川省各大城市。为了提高对下游供货的稳定性，借鉴文献的研究结论，拟在川建立物流区域中心，用于食用油储存以及供应保障。

川内 21 个城市对 A 企业产品具有已知的需求量，拟选择 3 个四川省的城市建立区域物流配送中心，以满足四川省所有城市需求，并使得总物流中心建设费用、运输费用、储存费用最少。

建立数学模型前作以下假设：

1. 运输费用只与需求量成正比，不考虑其他损耗费用支出
2. 考虑到交通便利性，仅在主要城市中建设区域物流中心
3. 单个区域物流中心容量足够大，不会发生缺货
4. 一个需求点由一个物流中心供应

1.2 模型构建

本模型中所涉及的符号规定如下：

表 1 符号含义

符号	含义
n	需求城市个数
l	物流中心备选城市数
m	拟建物流中心数
d_j	第 j 个需求城市的需求量
s_{ij}	第 i 个物流中心对第 j 个需求城市供货量
v_{ij}	第 i 个物流中心对第 j 个需求城市供货的单位运费
f_i	第 i 个物流中心的固定费用
h_i	第 i 个物流中心的单位货物储存费用
x_i	0-1 变量，当 $x_i = 1$ 表示在备选城市 i 建立物流中心，反之

以年总运输费用、固定费用、仓储费用最小为目标的四川区域物流中心选址模型可以表示为如下整数线性规划模型：

$$\min Z = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n v_{ij} s_{ij} + \sum_{i=1}^l f_i + \sum_{i=1}^l h_i \sum_{j=1}^n s_{ij} \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^l s_{ij} \geq d_j, j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^l x_i = m \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n s_{ij} \leq Mx_i, i=1,2,\dots,l \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n s_{ij} = \sum_{j=1}^n d_j \quad (5)$$

$$x_i \in \{0,1\}, s_{ij} \geq 0, i=1,2,\dots,l, j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

其中，约束(1)表示 A 公司的总物流费用最小，依次为物流运输费用、物流中心年固定费用与年储存费用；约束(2)表示每一个物流中心的容量能够满足其需求点；约束(3)表示物流中心的数量限制；约束(4)保证了某个城市成为物流中心时，会向外供应货物，反之则没有从该城市向外的货物流出，其中 M 是一个足够大的数；约束(5)保证物流中心的输出量等于各个城市的输入量，其中物流中心城市本身也具有输入量；约束(6)限制各个决策变量的取值范围。

2 模拟退火算法设计

2.1 模拟退火算法原理

借鉴文献^[7]的思想，设计模拟退火算法求解该整数模型。模拟退火算法核心思想与热力学的原理极为相似^[8]，它来源于固体退火原理，将固体加热至充分高，再慢速冷却。降温时，内部粒子由无序状趋于有序，这个过程表现出与一般组合优化问题的相似性。

模拟退火算法包含两个部分：退火过程和 Metropolis 算法，分别对应外循环和内循环。其中外循环就是退火过程，将固体达到较高的温度（初始温度 $T^{(0)}$ ），然后按照降温系数 α 使温度下降 ($T^{k+1} = \alpha T^k$)，为了保证足够的搜索次数， α 取值一般为 0.80-0.99，当达到终止温度 T^n 时，退火过程结束；内循环就是在每次温度下，迭代 L 次，寻找在该温度下能量的最小值（即最优解），并使用 Metropolis 算法跳出局部最优解。

2.2 模拟退火算法求解流程

2.2.1 生成随机解

从所有城市集合中选取三个城市作为备选物流中心集合，余下城市作为需求城市集合，在需求集合中添加两个“锚点”（*anchor*），以此将需求集合划分为三个供应城市集合，以此对应三个物流中心，最后构建一个数据集存储当前备选物流中心、需求城市集合以及供应城市集合。

2.2.2 生成邻域解

在解的迭代优化过程中，每个温度下都需要对解进行充分搜索，模拟退火算法的解决方法为：引入一个扰动因子 β ，将其与一个随机数 *rand_float* 相比较，如果 $\beta > \text{rand_float}$ ，则基于当前解创建邻域解作为新解，否则将重新搜索一个可行解作为新解。计算原解与新解的目标函数值，通过对比，以 Metropolis 算法确

定是否接纳新解。

本文设计了三种邻域解编码方式，分别为交换、交叉、反转，对应代码为 1-3，具体如下：

1. “交换编码”方式首先将原需求点集合 *collection* 赋给新需求点集合 *new_collection*，然后产生 2 个随机索引数 *index_int*，将两个集合对应的元素互换顺序。

2. “插入编码”方式首先将原需求点集合 *collection* 赋给新需求点集合 *new_collection*，然后产生 2 个随机索引数 *index_int*，将较小的索引值对应的节点插入到较大索引值对应的节点后。

3. “反转编码”方式首先将原需求点集合 *collection* 赋给新需求点集合 *new_collection*，然后产生 2 个随机索引数 *index_int*，将两个集合对应的元素进行互换。

Metropolis 算法跳出局部最优

在使用启发式算法进行求解时，往往会陷入局部最优的情况，如果在一开始就只接受使得目标函数下降的解，那么搜索过程可能停在局部最小点。模拟退火算法采用 Metropolis 算法来跳出局部最优解，其搜索过程为：如果当前解的目标函数值比上一代更差，则将当前的接受概率 $P^{(k)}$ 与一个介于 $[0,1]$ 的随机数

rand_float 与进行比较，如果 $P^{(k)} > rand_float$ ，则接受当前解，反之。其中概率 $P^{(k)}$ 可表示为式 (7)。

$$P^{(k)}(k \rightarrow k+1) = \begin{cases} 1 & Z(X^{(k+1)}) < Z(X^{(k)}) \\ e^{-\frac{Z(X^{(k+1)}) - Z(X^{(k)})}{T}} & Z(X^{(k+1)}) > Z(X^{(k)}) \end{cases} \quad (7)$$

3 数值实验

3.1 数据设计

为了使数值模拟更具有实践性，本节所有仿真数据均源自于四川省 2021 年统计年鉴^[13]，其中，“年需求量仿真数据”仿真于“各州社会消费品零售总额”；根据“建筑面积和造价”得出单位房价成本，并以此模拟城市的“单位储存成本”；设定物流中心面积后，得到了“物流中心造价”仿真数据；最后，基于高德地图坐标系，取各个城市的政府所在地模拟城市的经纬坐标。

部分城市的仿真数据如下表 2 所示，其中阿坝藏族羌族自治州无房价数据，因此不设其为备选物流中心，在设计数据时，将其单位储存成本以及造价用均赋值为足够大的数 M 以忽略该地。

表 2 四川省部分城市仿真数据

城市	年需求量 (吨)	经度	纬度	单位储存成本 (元/t)	物流中心造价 (元)
成都市	8120	104.0662841	30.57293834	1000	3141750
自贡市	580	104.7780004	29.33939936	820	2622750
阿坝藏族羌族自治州	100	102.2249996	31.89930092	M	M

为了方便运输费用的计算，只考虑用公路运输满足货物供应，其中公路运费 λ 元/(吨公里)，两地之间的距离利用如 (8) 所示的 Haversine 经纬度距离公式计算。

$$d_{ij} = H(\varphi_j - \varphi_i) + \cos(\varphi_i) \cos(\varphi_j) H(\Delta\lambda) \quad (8)$$

其中

$H(\theta) = \text{haversin}(\theta) = \sin^2(\theta/2) = (1 - \cos(\theta))/2$ ； R 为地球半径，取平均值为 6371km； φ_i, φ_j 表示两点的纬度； $\Delta\lambda$ 表示两点经度的差值。但该距离为直线距离，与两地间公路运输距离有一定差距，为此，引入一个距离转化系数 $\omega=1.2$ 修正运输距离，该系数是由实际运输距离与直线距离的差值平均而来。可得城市间的单位运费 v_{ij} 为：

$$v_{ij} = \lambda \times \omega \times d_{ij} \quad (9)$$

3.2 仿真实验

参数设置为：扰动因子 $\beta=0.5$ ，降温系数 $\alpha=0.99$ ，单位运输费用 $\lambda=1$ ，内层搜索次数为 350 次，外层迭代 1500 次。根据结果 A 公司在四川选择的区域物流中心的有三个，分别为内江市、德阳市以及南充市，总成本为 244499120.25 元，其供应区域和物流中心总费用如表 3 所示。可以发现，三个物流中心的运输及储存费用占比较高，尤其是德阳市的运输及仓储费用占比高达 84.07%，其供应区域包含了四川区域需求量最大的城市-成都市，最终其供应总数超过其余两个城市的总和。这启示 A 企业应当采取措施降低单位运输费用，例如数量折扣契约等方式来降低运输成本，这将会给企业带来大量物流费用节省。

表 3 区域物流中心以及对应供应城市

区域物流中心	供应城市	供应量（吨）	年总成本（元）	运输及储存费用占比
内江市	自贡市、资阳市、攀枝花市、乐山市、凉山彝族自治州、宜宾市、泸州市、眉山市	3190	50149197.95	59.86%
德阳市	绵阳市、成都市、阿坝藏族自治州、甘孜藏族自治州、雅安市	13410	14354156.56	84.07%
南充市	广元市、巴中市、达州市、广安市、遂宁市	4230	50808356.43	64.64%

4 结语

本文通过对既有文献的分析，确定一个提升供应链韧性的有效方法—分散库存，以 A 企业在四川区域拟构建区域物流中心的问题为载体，构建了以年总运输费用、固定费用、仓储费用最小为目标的区域物流中心选址问题的整数规划模型；系统介绍了模拟退火算法原理、编码方式以及求解流程；另外，以统计年鉴数作为原数据，对城市需求数据进行了仿真；最终对模型进行了数值计算，结果显示：“南充”、“德阳”、“内江”作为供应城市时，A 企业的总物流费用最少。本研究可以为决策部门在进行物流中心或仓库选址时提供科学的预算方案，但本模型并未考虑到货物在运输以及储存时的损耗，未来有待深入。

参考文献

[1] 李牧原. 从集装箱行业走势看我国供应链韧性和风险[J]. 集装箱化, 2022, 33(9): 1 - 4.

- [2] 甄珍, 王凤彬. 逆境事件冲击下全球价值链系统韧性的动态演化——基于嵌入性多案例的纵向研究[J]. 中国工业经济, 2022(10): 174 - 192.
- [3] 胡利利, 夏扬坤. 多冷链物流中心选址分配及其自适应免疫算法[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(16): 31 - 39.
- [4] 李桂娥. 冷链物流多层级配送中心连续选址模型构建[J]. 计算机仿真, 2022, 39(04): 423 - 427.
- [5] 廖建国. 基于布谷鸟算法的物流选址及路径优化研究[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(10): 322 - 328.
- [6] 刘婧. 基于改进模拟退火算法的船舶物流配送中心选址研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(16): 199 - 201.
- [7] 赵振亚, 贺国先. 基于模拟退火算法的应急物流仓库选址优化[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(03): 102 - 106.
- [8] 裴时域, 李元香. 改进的模拟退火算法在物流配送中心选址中的应用[J]. 统计与决策, 2021, 37(09): 172 - 176.