

基于变分不等式的多商品物流网络优化设计

彭永涛*, 张 锦, 李延来

(西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

(*通信作者电子邮箱 xinyue493@163.com)

摘 要:为优化设计多级多商品流的物流网络,按网络状态把物流网络划分为静态网络和动态网络,分析了静态网络的基础设施建设和动态网络的物流活动问题,构建了可描述不同网络阶段的运营成本 and 建设成本函数,并且考虑了运营过程带来的环境污染问题,构建了治理费用函数。基于以上函数,建立以供给能力为约束条件,以总成本最小为目标的网络设计和重新设计模型,然后将模型转换为变分不等式问题,证明了所设计模型与变分不等式等价。最后通过算例,运用修正投影算法对模型进行数值演算和验证,得到了最优成本下的设施建设方案和物流组织方案。

关键词:多级物流网络;多商品;网络设计;变分不等式;修正投影算法

中图分类号: TP393.072 **文献标志码:** A

Optimization design of multi-commodity logistics network based on variational inequalities

PENG Yongtao*, ZHANG Jin, LI Yanlai

(School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: For designing the logistics network of the multi-level and multi-commodity flow, according to network status, the logistics network was divided into static network and dynamic network. This paper analyzed the infrastructure construction of static network and logistics activities of dynamic network. It constructed the operating cost function and construction cost function which can describe the different stages of network. Considering the problem of environmental pollution caused by the operating process, the management cost function was also constructed. Based on the above functions, general logistics network design and re-design optimization models were proposed, whose constraints were supply capacity and goal was minimizing the total cost. The two optimization models were converted to variational inequalities. By the method of modified projection, the paper calculated and verified the model, and obtained the facilities construction program and logistics organization program under the optimal costs.

Key words: multi-level logistics network; multi-commodity; network design; variational inequality; modified projection algorithm

0 引言

物流网络是物流过程中相互联系的组织和设施在空间坐标的集合。根据网络的状态,将物流网络分为静态网络和动态网络^[1]。静态网络指的是物流基础设施网络,由不能产生物流需求的基础设施和物流通道构成,为货物的流动提供仓储和流通加工条件;动态网络指的是物流组织网络,是以供需节点为起止点,物流企业根据物流需求,在基础设施网络上进行物流活动形成的物流组织关系。物流企业建设物流基础设施网络,目的是为了更好地为顾客提供服务和实现商品的价值,关注于组织网络的经营与运作,是为了提高企业的自身核心竞争力和减低物流成本。只有同时对两个网络进行深入研究,加强基础网络和组织网络的整体优化设计,才能更好地提高企业的物流效率,增加企业的整体收益。

根据物流活动性质,学者们先后研究了正向及逆向物流网络设计问题,研究内容主要涉及物流网络的结构,包括物流节点的选址^[2-4]、库存设计^[5-7]、产品的运输方式^[8-10]等,基本上都建立混合整数线性规划模型,目标函数大多是以运输

费用、储存费用和物流设施建设费用等总成本最小的离散函数,模型的求解主要采用现代优化算法,包括遗传算法^[10]、模拟退火算法^[7-8]等。现有的物流网络设计研究只是大体上设计了系统的规模和节点的位置,没有对网络中每条通道和每个节点上的具体容量进行设计,也很少对网络中物流组织进行优化。

本文将以系统优化理论作为研究视角,对多商品需求下的多级物流网络进行设计研究,并对已存在的网络进行了重新优化,具体分析了物流网络中通道和节点的容量,并对物流组织进行了合理安排。在网络设计中同时考虑了物流活动过程带来的环境污染问题,构造了包含不同阶段的运营成本连续函数、建设成本连续函数和环境治理费用连续函数,建立了以费用最小为目标的优化模型,并将模型转换为变分不等式,采用变分不等式的修正投影算法对模型进行求解。

1 物流网络优化设计模型

1.1 问题描述

系统优化理论起源于交通领域,之后 Nagurney^[11]借鉴交

收稿日期:2012-07-23;修回日期:2012-08-30。 基金项目:国家社会科学基金资助项目(11BJL054)。

作者简介:彭永涛(1986-),男,河北邯郸人,博士研究生,主要研究方向:物流网络优化;张锦(1963-),男,四川广元人,教授,博士生导师,主要研究方向:城市物流系统规划及优化;李延来(1971-),男,河北秦皇岛人,副教授,博士,主要研究方向:物流网络优化。

通的系统优化理论,站在供应链管理的角度,考虑了带有能力约束的网络优化问题,优化了连接制造商、销售商及客户之间的产品交易量,使得整个网络达到系统最优,之后Nagurney^[12]根据系统优化理论设计了单产品的供应链网络。

本文针对典型的物流活动,首先构建物流网络,一个多级的物流网络由商品供应地、流通加工中心、配送中心和商品需求地等物流节点以及连接节点之间的物流通道组成。网络结构如图1所示,用 $G = [N, L]$ 描述物流网络结构,其中: N 表示物流节点组成的矩阵, $N = \{O; P; P'; Q; Q'; R\}$, $O = \{O_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 表示商品的供应地节点, $P = \{P_i | i = 1, 2,$

$\dots, n\}$ 表示流通加工中心节点, $P' = \{P'_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 表示虚拟流通加工中心节点, $Q = \{Q_i | i = 1, 2, \dots, k\}$ 表示配送中心节点, $Q' = \{Q'_i | i = 1, 2, \dots, k\}$ 表示虚拟的配送中心节点, $R = \{R_i | i = 1, 2, \dots, g\}$ 表示商品需求地的节点; L 是所有物流通道的集合,连接相邻节点的通道用 a 表示, $a = 1, 2, \dots, A, \forall a \in L; \langle O_i, R_j \rangle$ 表示连接起点和终点的物流序对, w_j 表示连接第 j 个终点的物流序对个数, p 表示连接物流序对之间的物流路径; P_{w_j} 表示连接第 j 个终点的物流序对的路径集合,其中 $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, g, P$ 表示网络中所有路径的集合, $P; O \rightarrow P \rightarrow P' \rightarrow Q \rightarrow Q' \rightarrow R$ 。

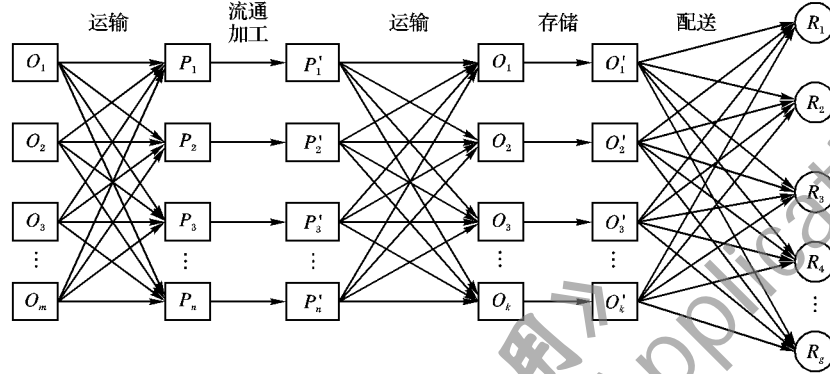


图1 多级物流网络拓扑结构

物流企业建立物流基础设施网络,需要确定网络中节点和通道的建设规模,为了方便描述与理解,本文将节点上的物流活动统一转移到通道上,因此只需考虑通道上的供给能力即可,构建基础设施网络带来了建设费用,其中包含购买车辆成本、建设仓库成本等。物流基础设施网络建立后,企业在网络上组织相应的物流活动,便形成物流组织网络,运作组织网络带来了运营费用,其中包含运输成本、流通加工成本和存储成本等。物流组织网络运营过程中,会带来一定的环境污染问题,企业需付出相应的治理费用。

为了降低物流成本和提高物流效率,在满足顾客需求下,对物流网络进行设计优化,使得网络的建设成本、运营成本和

环境治理成本达到最小目标,并得到合理的物流基础设施网络的建设方案和物流组织网络的运营方案。

1.2 模型建立

为了方便说明问题,现对多商品多级物流网络设计模型进行如下假设:1)需求点需求的商品是多商品并为固定需求;2)每个供应点都能供应不同的商品,并且商品供应数量大于需求点的需求数量,即供应点总能满足需求点的需求;3)物流活动的开展对环境造成了影响,需要付出相应的治理费用;4)网络中的物流节点不产生任何需求;5)假设模型中构造的函数为凸的,连续可导,二阶导数有界。

模型所用符号如表1所示。

表1 网络设计模型中的符号说明

符号	说明
$d_{R_1}^z, d_{R_2}^z, \dots, d_{R_g}^z; z = 1, 2, \dots, Z$	商品需求地对不同商品的需求数量
$x_p^z; x = \{x_p^z z = 1, 2, \dots, Z, p \in P\}$	物流路径上不同商品流量; x 表示所有路径上商品流量集合
$f_a^z; f = \{f_a^z z = 1, 2, \dots, Z, a \in L\}$	通道 a 上的不同商品流量; f 表示所有通道上的商品流量集合
$u_a; u = \{u_a \forall a \in L\}$	通道 a 上供给能力; u 表示所有通道上的供给能力集合
$c_a^z(f_a^1, \dots, f_a^Z); z = 1, 2, \dots, Z, \forall a \in L$	以商品流量为变量的网络运营成本函数,在网络运营的不同阶段表示为运输成本、流通加工成本和存储成本等
$\pi_a(u_a); \forall a \in L$	以供给能力为变量的网络建设投资成本函数,在网络建设的不同阶段表示为车辆购买成本、流通加工中心建设成本和仓库建设成本等
$e_a^z(f_a^1, \dots, f_a^Z); z = 1, 2, \dots, Z, \forall a \in L$	物流活动中对环境带来的污染,环境治理成本

多商品多级物流网络优化设计模型如下:

$$\min \sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} c_a^z(f_a^1, \dots, f_a^Z) + \sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} e_a^z(f_a^1, \dots, f_a^Z) + \sum_{a \in L} \pi_a(u_a) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{p \in P_{w_j}} x_p^z = d_{R_j}^z; j = 1, 2, \dots, g, z = 1, 2, \dots, Z \quad (2)$$

$$f_a^z = \sum_{p \in P} x_p^z \delta_{ap}; z = 1, 2, \dots, Z, \delta_{ap} = 0, 1, \forall a \in L \quad (3)$$

$$\sum_{z=1}^Z f_a^z \leq u_a; \forall a \in L \quad (4)$$

$$0 \leq x_p^z; z = 1, 2, \dots, Z, \forall p \in P \quad (5)$$

$$0 \leq f_a^z; z = 1, 2, \dots, Z, \forall a \in L \quad (6)$$

优化模型的目标函数(1)是最小系统的总成本,包含运营成本、建设成本和环境治理成本;约束式(2)表示连接商品需求点的所有物流路径上的流量等于此节点的商品需求量;式(3)表示通道上商品流量等于所有包含此通道的物流路径

上流量之和;式(4)表示通道上的商品流量小于等于通道上的供给能力;式(5)表示物流路径上的商品流量非负。式(6)表示自变量为非负约束。

2 物流网络重新设计模型

第1章对物流网络设计问题进行了研究,网络中通道上的能力和流量都是未知的,优化设计后便得到了通道的供给能力和合理的流量分配方案。本章将对已存在的物流网络进行重新设计,增加(减少)网络中通道的供给能力,目的是为了减少不必要的浪费,同时又能满足最优的物流组织方案,最终使得网络的总成本最低。设 \bar{u}_a 为弧上已有的供给能力, u_a 为新增(减少)的供给能力,可为正或负。

多级多商品的物流网络重新设计优化模型如下所示:

$$\min \sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} c_a^z(f_a^1, \dots, f_a^Z) + \sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} e_a^z(f_a^1, \dots, f_a^Z) + \sum_{a \in L} \pi_a(u_a) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{p \in P_{w_j}} x_p^z = d_{w_j}^z; j = 1, 2, \dots, g, z = 1, 2, \dots, Z \quad (8)$$

$$f_a^z = \sum_{p \in P} x_p^z \delta_{ap}; z = 1, 2, \dots, Z, \delta_{ap} = 0, 1, \forall a \in L \quad (9)$$

$$\sum_{z=1}^Z f_a^z \leq \bar{u}_a + u_a; \forall a \in L \quad (10)$$

$$-\bar{u}_a \leq u_a; \forall a \in L \quad (11)$$

$$0 \leq x_p^z; z = 1, 2, \dots, Z, \forall p \in P \quad (12)$$

$$0 \leq f_a^z, 0 \leq u_a; z = 1, 2, \dots, Z, \forall a \in L \quad (13)$$

优化模型的目标函数(7)是最小系统优化的总成本,包含运营成本、重建成本和环境治理成本;约束式(8)~(10)、(13)同上;式(10)表示通道上商品流量小于等于重新设计后的供给能力;式(11)表示物流网络中重新设计后的供给能力值不能为负。

网络设计模型针对新建物流网络进行设计,建立以建设成本、运营成本和治理成本最小为目标的数学模型。通过模型求解,得到网络中通道和节点上供给能力以及商品流量。而网络重新设计模型是针对存在的物流网络进行设计,建立以重建成本、运营成本和治理成本最小为目标的数学模型,网络中存在一定的供给能力,重新对通道和节点进行设计,在满足最优物流组织方案下,新增(减少)通道和节点的供给能力,使得整个网络达到系统最优,模型求解得到网络中通道和节点上的商品流量和新增(减少)的供给能力。

3 模型转换

本文研究的物流网络设计问题为凸优化问题,凸优化问题与变分不等式存在等价转换关系,又因为本文建设的网络为多级网络且含有抽象的节点和连线,具有一定复杂性,称为超网络。变分不等式被视为研究超网络问题的重要工具^[13],故此文本将上述凸优化模型转换为等价变分不等式,采用变分不等式的修正投影算法进行求解。

定义1 有限维的变分不等式的问题, $V(F, K)$, 是求解一个向量 $X^* \in K$, 满足 $\langle F(X^*), X - X^* \rangle \geq 0, \forall X \in K$, 其中, F 是给定的从 K 到 \mathbf{R}^n 的连续函数; K 是闭凸集; $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示在 \mathbf{R}^n 上的一个内积^[14]。

引理1 假设存在一点 $X^* \in K$, 满足 $\min f(X)$, 则 X^* 是 $X \in K; \langle \nabla F(X^*), X - X^* \rangle \geq 0, \forall X \in K$ 的解^[14], 其中 $\nabla F(X^*)$ 表示 F 对 X 各个分量的梯度:

$$\nabla F(X^*)^T = \left(\frac{\delta F(X^*)}{\delta X^1}, \frac{\delta F(X^*)}{\delta X^2}, \dots, \frac{\delta F(X^*)}{\delta X^N} \right)$$

引理2 假设 $F(X)$ 是凸的, 且 X^* 满足 $X^* \in K; \langle F(X^*), X - X^* \rangle \geq 0, \forall X \in K$, 则 $F(X^*) = \min_{X \in K} F(X)$ ^[15]。

引理3 如果变分不等式满足 $\langle (F(X^1) - F(X^2))^T, X^1 - X^2 \rangle \geq 0, \forall X^1, X^2 \in K$, 则变分不等式是单调的; 如果变分不等式满足 $\|F(X^1) - F(X^2)\| \leq \|X^1 - X^2\|, \forall X^1, X^2 \in K$, 则变分不等式是 Lipschitz 连续的^[15]。当变分不等式是单调和 Lipschitz 连续的, 则变分不等式存在唯一解。

定理1 优化目标(1)和约束条件(2)~(6)的解等价于变分不等式(14)的解, 解为 $(f^*, u^*, \lambda^*) \in K^1$, 其中 $K^1 = \{(f, u, \lambda) \mid \text{满足条件(2)~(6)}, \lambda \geq 0\}$, 如式(14)所示:

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} \left[\frac{\partial c_a^z(f_a^{1*}, \dots, f_a^{Z*})}{\partial f_a^z} + \frac{\partial e_a^z(f_a^{1*}, \dots, f_a^{Z*})}{\partial f_a^z} + \lambda_a^* \right] \times [f_a^z - f_a^{z*}] + \sum_{a \in L} \left[\frac{\partial \pi_a(u_a^*)}{\partial u_a} - \lambda_a^* \right] \times [u_a - u_a^*] + \sum_{a \in L} \left[u_a^* - \sum_{z=1}^Z \alpha_z f_a^{z*} \right] \times [\lambda_a - \lambda_a^*] \geq 0; \forall (f, u, \lambda) \in K^1 \quad (14)$$

证明 优化目标是凸规划问题, 根据引理1和引理2, 网络设计优化模型可转换为变分不等式(14), 并且网络设计模型的解与变分不等式(14)的解等价; 变分不等式中的函数是凸的, 连续可导, 经计算可得变分不等式(14)是单调的, 又因为变分不等式中的函数是二级导数有界, 根据微分中值定理, 可得变分不等式是 Lipschitz 连续的, 因此根据引理3, 变分不等式(14)存在唯一解。

定理2 优化目标(7)和约束条件(8)~(13)的解等价于变分不等式问题(15)的解, 解为 $(f, u, \beta) \in K^2$, 其中 $K^2 = \{(f, u, \beta) \mid \text{满足条件(8)~(13)}, \beta > 0\}$, 如式(15)所示:

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} \left[\frac{\partial c_a^z(f_a^{1*}, \dots, f_a^{Z*})}{\partial f_a^z} + \frac{\partial e_a^z(f_a^{1*}, \dots, f_a^{Z*})}{\partial f_a^z} + \beta_a^* \right] \times [f_a^z - f_a^{z*}] + \sum_{a \in L} \left[\frac{\partial \pi_a(u_a^*)}{\partial u_a} - \beta_a^* \right] \times [u_a - u_a^*] + \sum_{a \in L} \left[\bar{u}_a + u_a^* - \sum_{z=1}^Z f_a^{z*} \right] \times [\beta_a - \beta_a^*] \geq 0; \forall (f, u, \beta) \in K^2 \quad (15)$$

证明 证明同定理1, 故此得到网络重新设计优化模型的解与变分不等式(15)的解等价, 并且变分不等式(15)存在唯一解。

4 算法描述

求解变分不等式的典型算法有投影算法、修正投影算法、交替方向法、邻近点算法、牛顿法、内点法和神经网络等。当投影算子易于计算时, 投影算法因其每步迭代计算量小, 成为求解变分不等式最常用的方法之一, 投影算法数学公式可描述为 $X^t = P_k(X^{t-1} - \alpha G^{-1} F(X^{t-1}))$, 其中: t 为迭代次序, G 是一个对称正定 $N \times N$ 矩阵; $\alpha > 0$; $P_k X$ 为 X 在 K 上的垂直映射。

修正投影算法是在投影算法基础上改进的新算法, 此算法较投影算法逻辑更加严密, 计算更加精确, 算法描述为 $X^t = P_k(X^{t-1} - \alpha F(\bar{X}^{t-1}))$, 其中 $\bar{X}^{t-1} = P_k(X^{t-1} - \alpha F(X^{t-1}))$, α 是一个正数, 且 $\alpha \in (0, 1/L]$ ^[16]。针对本文建立的变分不等式模型, 设计相应的修正投影算法, 下文给出求解变分不等式(14)的算法步骤。

步骤1 初始化。

设 $(f^0, u^0, \lambda^0) \in K^1, 0 < \alpha \leq 1/L, L$ 是 Lipschitz 常数。

步骤2 计算。

设 $(f^t, u^t, \lambda^t) \in K^1$, 解变分不等式(16):

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} \left[f_a^{z,t} + \alpha \left(\sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} \frac{\partial c_a^z(f_a^{1,t-1}, \dots, f_a^{z,t-1})}{\partial f_a^z} + \frac{\partial e_a^z(f_a^{1,t-1}, \dots, f_a^{z,t-1})}{\partial f_a^z} + \lambda_a^{t-1} \right) - f_a^{z,t-1} \right] \times [f_a^z - f_a^{z,t}] +$$

$$\sum_{a \in L} \left[u_a^t + \alpha \left(\sum_{a \in L} \frac{\partial \pi_a(u_a^t)}{\partial u_a} - \lambda_a^{t-1} \right) - u_a^{t-1} \right] \times$$

$$[u_a - u_a^t] + \sum_{a \in L} \left[\lambda_a^t + \alpha \left(u_a^{t-1} - \sum_{z=1}^Z a_z f_a^{z,t-1} \right) - \lambda_a^{t-1} \right] \times$$

$$[\lambda_a - \lambda_a^t] \geq 0 \quad (16)$$

步骤3 修正。

设 $(f^t, u^t, \lambda^t) \in K^1$, 解变分不等式(17):

$$\sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} \left[f_a^{z,t} + \alpha \left(\sum_{z=1}^Z \sum_{a \in L} \frac{\partial c_a^z(f_a^{1,t}, \dots, f_a^{z,t})}{\partial f_a^z} + \frac{\partial e_a^z(f_a^{1,t}, \dots, f_a^{z,t})}{\partial f_a^z} + \lambda_a^t \right) - f_a^{z,t-1} \right] \times [f_a^z - f_a^{z,t}] +$$

$$\sum_{a \in L} \left[u_a^t + \alpha \left(\sum_{a \in L} \frac{\partial \pi_a(u_a^t)}{\partial u_a} - \lambda_a^t \right) - u_a^{t-1} \right] \times [u_a - u_a^t] +$$

$$\sum_{a \in L} \left[\lambda_a^t + \alpha \left(u_a^t - \sum_{z=1}^Z a_z f_a^{z,t} \right) - \lambda_a^{t-1} \right] \times [\lambda_a - \lambda_a^t] \geq 0 \quad (17)$$

步骤4 收敛验证。

如果 $|f_a^t - f_a^{t-1}| \leq \varepsilon, |u_a^t - u_a^{t-1}| \leq \varepsilon, |\lambda_a^t - \lambda_a^{t-1}| \leq \varepsilon, \forall a \in L, \varepsilon > 0$, 停止计算。此时计算的结果为最优成本下变量的值; 否则转入步骤2 继续计算, $t = t + 1$ 。

由于篇幅原因, 变分不等式(15)的修正投影算法步骤不再进行具体描述。

5 算例

设计一个多级多商品物流网络, 使其包含3个供应节点, 2个流通加工中心, 3个配送中心和3个商品需求节点, 网络结构如图2所示, 假设每个需求节点各需求两种不同商品, R_1 对两种商品需求数量分别为18, 27; R_2 对两种商品需求数量为36, 54; R_3 对两种商品需求数量为27, 18。假设运营成本函数和建设成本函数为非线性的, 如表2~3所示。企业在运营网络时产生一定的环境污染, 需要付出相应的治理费用, 假设治理环境费用函数为 $e_a^1(f_a^1, f_a^2) = 1.5f_a^1, e_a^2(f_a^1, f_a^2) = 2f_a^2, \forall a \in L$ 。

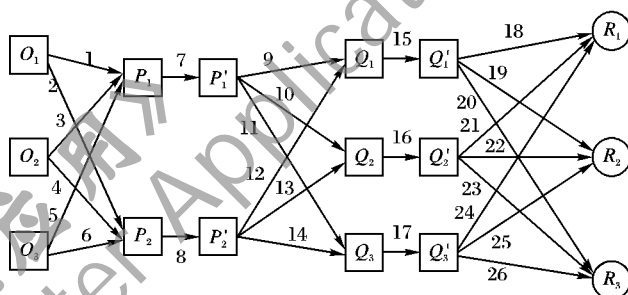


图2 多级物流网络结构例图

表2 物流网络运营成本函数

弧 a	$c_a^1(f_a^1, f_a^2)$	$c_a^2(f_a^1, f_a^2)$	弧 a	$c_a^1(f_a^1, f_a^2)$	$c_a^2(f_a^1, f_a^2)$
1	$1(f_1^1)^2 + 2f_2^2f_1^1 + 11f_1^1$	$2(f_1^1)^2 + 2f_1^1f_2^2 + 8f_1^1$	14	$4(f_{14}^1)^2 + 0.5f_{14}^2f_{14}^1 + 4f_{14}^1$	$4(f_{14}^2)^2 + 0.5f_{14}^1f_{14}^2 + 12f_{14}^2$
2	$2(f_2^1)^2 + 2f_3^2f_2^1 + 8f_2^1$	$1(f_2^2)^2 + 2f_2^2f_3^2 + 6f_2^2$	15	$4(f_{15}^1)^2 + 2f_{15}^2f_{15}^1 + 6f_{15}^1$	$4(f_{15}^2)^2 + 2f_{15}^1f_{15}^2 + 7f_{15}^2$
3	$3(f_3^1)^2 + 2.5f_3^2f_3^1 + 7f_3^1$	$4(f_3^2)^2 + 2.5f_3^1f_3^2 + 7f_3^2$	16	$4(f_{16}^1)^2 + 2f_{16}^2f_{16}^1 + 6f_{16}^1$	$3(f_{16}^2)^2 + 2f_{16}^1f_{16}^2 + 7f_{16}^2$
4	$4(f_4^1)^2 + 1.5f_4^2f_4^1 + 3f_4^1$	$3(f_4^2)^2 + 1.5f_4^1f_4^2 + 11f_4^2$	17	$1(f_{17}^1)^2 + 3.5f_{17}^2f_{17}^1 + 4f_{17}^1$	$4(f_{17}^2)^2 + 3.5f_{17}^1f_{17}^2 + 5f_{17}^2$
5	$1(f_5^1)^2 + f_5^2f_5^1 + 6f_5^1$	$4(f_5^2)^2 + f_5^1f_5^2 + 11f_5^2$	18	$4(f_{18}^1)^2 + 3f_{18}^2f_{18}^1 + 9f_{18}^1$	$4(f_{18}^2)^2 + 3f_{18}^1f_{18}^2 + 7f_{18}^2$
6	$3(f_6^1)^2 + 1.5f_6^2f_6^1 + 4f_6^1$	$4(f_6^2)^2 + 1.5f_6^1f_6^2 + 10f_6^2$	19	$4(f_{19}^1)^2 + 3.5f_{19}^2f_{19}^1 + 7f_{19}^1$	$1(f_{19}^2)^2 + 3.5f_{19}^1f_{19}^2 + 9f_{19}^2$
7	$4(f_7^1)^2 + 2f_7^2f_7^1 + 7f_7^1$	$2(f_7^2)^2 + 2f_7^1f_7^2 + 8f_7^2$	20	$2(f_{20}^1)^2 + 2.5f_{20}^2f_{20}^1 + 3f_{20}^1$	$3(f_{20}^2)^2 + 2.5f_{20}^1f_{20}^2 + 9f_{20}^2$
8	$4(f_8^1)^2 + 3f_8^2f_8^1 + 5f_8^1$	$4(f_8^2)^2 + 3f_8^1f_8^2 + 6f_8^2$	21	$4(f_{21}^1)^2 + 2.5f_{21}^2f_{21}^1 + 3f_{21}^1$	$3(f_{21}^2)^2 + 2.5f_{21}^1f_{21}^2 + 9f_{21}^2$
9	$1(f_9^1)^2 + 1.5f_9^2f_9^1 + 4f_9^1$	$4(f_9^2)^2 + 1.5f_9^1f_9^2 + 6f_9^2$	22	$3(f_{22}^1)^2 + 2f_{22}^2f_{22}^1 + 4f_{22}^1$	$4(f_{22}^2)^2 + 2f_{22}^1f_{22}^2 + 3f_{22}^2$
10	$2(f_{10}^1)^2 + 3f_{10}^2f_{10}^1 + 3.5f_{10}^1$	$3(f_{10}^2)^2 + 3f_{10}^1f_{10}^2 + 4f_{10}^2$	23	$2(f_{23}^1)^2 + 2f_{23}^2f_{23}^1 + 4f_{23}^1$	$4(f_{23}^2)^2 + 3f_{23}^1f_{23}^2 + 6f_{23}^2$
11	$(f_{11}^1)^2 + 2.5f_{11}^2f_{11}^1 + 4f_{11}^1$	$4(f_{11}^2)^2 + 2.5f_{11}^1f_{11}^2 + 5f_{11}^2$	24	$4(f_{24}^1)^2 + 2f_{24}^2f_{24}^1 + 8f_{24}^1$	$3(f_{24}^2)^2 + 4f_{24}^1f_{24}^2 + 8f_{24}^2$
12	$4(f_{12}^1)^2 + 3f_{12}^2f_{12}^1 + 6f_{12}^1$	$2(f_{12}^2)^2 + 3f_{12}^1f_{12}^2 + 5f_{12}^2$	25	$3(f_{25}^1)^2 + f_{25}^2f_{25}^1 + 8f_{25}^1$	$4(f_{25}^2)^2 + 1f_{25}^1f_{25}^2 + 3f_{25}^2$
13	$3(f_{13}^1)^2 + 3f_{13}^2f_{13}^1 + 7f_{13}^1$	$4(f_{13}^2)^2 + 3f_{13}^1f_{13}^2 + 10f_{13}^2$	26	$2(f_{26}^1)^2 + 3f_{26}^2f_{26}^1 + 5f_{26}^1$	$4(f_{26}^2)^2 + 1f_{26}^1f_{26}^2 + 5f_{26}^2$

表3 物流通道的建设成本函数

弧 a	$\pi_a(u_a)$	弧 a	$\pi_a(u_a)$	弧 a	$\pi_a(u_a)$
1	$u_1^2 + u_1$	10	$u_{10}^2 + 5u_{10}$	19	$0.5u_{19}^2 + u_{19}$
2	$u_2^2 + 3u_2$	11	$0.5u_{11}^2 + 3u_{11}$	20	$u_{20}^2 + 5u_{20}$
3	$u_3^2 + 2u_3$	12	$0.5u_{12}^2 + u_{12}$	21	$u_{21}^2 + u_{21}$
4	$u_4^2 + 2u_4$	13	$0.5u_{13}^2 + u_{13}$	22	$u_{22}^2 + u_{22}$
5	$1.5u_5^2 + 2u_5$	14	$1.5u_{14}^2 + 5u_{14}$	23	$0.5u_{23}^2 + 4u_{23}$
6	$0.5u_6^2 + 4u_6$	15	$2.5u_{15}^2 + u_{15}$	24	$0.5u_{24}^2 + 6u_{24}$
7	$2u_7^2 + u_7$	16	$2u_{16}^2 + u_{16}$	25	$u_{25}^2 + u_{25}$
8	$2u_8^2 + 6u_8$	17	$1.5u_{17}^2 + 8u_{17}$	26	$0.5u_{26}^2 + 9u_{26}$
9	$u_9^2 + 3u_9$	18	$u_{18}^2 + 4u_{18}$		

根据上述信息, 使用修正投影算法, 利用 Matlab 编程, 在 CPU 2.53 GHz, 内存 2 GB 的环境下进行计算, 经过多次调试, 得到修正投影算法中最佳参数值 $\alpha = 0.01, \varepsilon = 0.00001$, 求出最优成本下每条物流通道上商品流量和供给能力, 如表4所示。连接每个需求节点各有18条物流路径, 网络中共54条物流路径, 每条路径上商品流量如表5所示。

表4 结果显示了物流通道上的供给能力恰好等于流经此通道的2种商品流量之和, 通道上没有存在多余的供给能力, 按照表4中通道上供给能力建设基础设施网络, 为最优的建设方案。

表5 结果显示了每条路径上的物流分配量, 连接每个需

求点的物流路径各有18条,例如连接 R_1 的第1条路径包含的物流节点为 $(O_1, P_1, P'_1, Q_1, Q'_1, R_1)$,包含的物流通道为 $(1, 7, 9, 15, 18)$,以此类推得到其他路径包含的节点和通道。按照表5中路径上物流量组织物流活动,为最优的组织方案,并对该方案进行分析, R_1 对商品1的需求量29.95%由 Q_1 供

应,31.89%由 Q_2 供应,38.16%由 Q_3 供应,三个供应节点供应量最大相差仅为8.21%,相差不大,分析可得 R_1 对商品1的需求量由三个供应节点相对平均提供。对 R_2, R_3 进行同样分析,得到结果相似。据此得到组织最优物流方案时三个物流供应节点的商品数量较平均地提供了三个需求节点。

表4 每条通道上的商品流量和供给能力

弧 a	f_a^{1*}	f_a^{2*}	u_a	弧 a	f_a^{1*}	f_a^{2*}	u_a	弧 a	f_a^{1*}	f_a^{2*}	u_a
1	13.48	18.76	32.25	10	12.58	18.51	31.09	19	9.02	20.72	29.74
2	11.70	18.50	30.20	11	18.47	14.97	33.44	20	8.41	6.09	14.50
3	13.15	16.68	29.83	12	9.84	18.97	28.82	21	5.64	9.53	15.17
4	12.39	15.25	27.64	13	11.83	15.23	27.06	22	10.84	18.02	28.86
5	17.30	15.25	32.56	14	15.39	14.11	29.50	23	7.93	6.19	14.12
6	12.98	14.56	27.54	15	22.74	36.19	58.93	24	7.06	8.09	15.15
7	43.94	50.69	94.63	16	24.40	33.73	58.13	25	16.14	15.27	31.41
8	37.06	48.31	85.37	17	33.86	29.08	62.94	26	10.66	5.72	16.38
9	12.89	17.21	30.11	18	5.31	9.38	14.69				

表5 连接需求节点的物流路径上物流量

路径	R_1^1	R_1^2	R_1^3	R_2^1	R_2^2	R_2^3	路径	R_1^1	R_1^2	R_1^3	R_2^1	R_2^2	R_2^3
1	0.84	1.67	1.54	3.68	1.56	1.00	10	0.84	1.52	1.26	3.45	1.22	0.96
2	0.84	2.02	1.68	3.65	1.27	1.25	11	0.97	1.28	1.76	2.60	1.25	0.93
3	1.01	1.66	2.84	2.84	1.90	0.99	12	1.18	1.15	2.36	2.41	1.55	0.93
4	0.84	1.88	1.26	4.20	1.06	1.32	13	1.12	1.35	2.10	2.96	1.83	0.93
5	0.84	1.66	1.60	3.12	1.20	1.02	14	1.14	1.57	2.21	2.99	1.63	0.93
6	1.03	1.50	2.33	2.81	1.55	1.00	15	1.53	1.22	3.47	2.35	2.27	0.93
7	0.84	1.50	1.59	3.19	1.48	0.93	16	0.84	1.47	1.27	3.24	1.27	0.93
8	0.84	1.77	1.69	3.20	1.27	1.11	17	1.01	1.22	1.89	2.45	1.30	0.93
9	1.08	1.46	2.61	2.58	1.76	0.93	18	1.24	1.10	2.53	2.27	1.63	0.93

经过397次迭代收敛得到了以上的结果,物流网络最优设计下的建设成本为70326;运营成本包含了运营商品1和商品2的费用,分别为52302,68005;付出的治理成本分别为607.5,990,则网络的总费用约为192230。

对已存在的物流网络进行改造设计。假设已存在的物流结构和图2相同,物流需求点对商品的需求数量不变,已知物流网络通道上的供给能力如表6所示。根据所建模型重新设计网络,假设重建费用函数和新建费用函数相同,见表3。计算得出每条通道上的流量和新增(减少)的供给能力,如表7所示。

表6 物流通道上的供给能力

弧 a	\bar{u}_a	弧 a	\bar{u}_a	弧 a	\bar{u}_a	弧 a	\bar{u}_a
1	35	8	100	15	75	22	30
2	35	9	30	16	65	23	25
3	30	10	30	17	75	24	30
4	35	11	40	18	20	25	20
5	40	12	30	19	25	26	20
6	40	13	35	20	20		
7	100	14	35	21	25		

表7结果显示了重新设计后每条通道上的商品流量和新增(减少)的供给能力,结果表明对网络重新设计后,通道上的供给能力发生了变化,减少了不必要的资源浪费,同时也为满足最优运营方案增加了供给能力,例通道9,10,19,25相应地增加了供给能力(由于篇幅有限不再列举每条路径上的物流分配量)。

经过1657次迭代收敛得到了以上结果,此时两种商品的

运营费成本分别为52530,68219;环境治理成本为607.5,990;网络的重建成本为369.27,网络的重新设计总费用约为122720。

表7 每条通道上商品流量和新增(减少)物流供给能力

弧 a	f_a^{1*}	f_a^{2*}	u_a	弧 a	f_a^{1*}	f_a^{2*}	u_a
1	13.31	18.37	-0.50	14	14.71	13.75	-1.67
2	12.02	18.77	-1.50	15	23.43	36.54	-0.20
3	12.87	16.34	-0.79	16	25.34	34.08	-0.25
4	12.68	15.53	-1.00	17	32.23	28.38	-2.67
5	16.84	15.16	-0.67	18	5.28	9.35	-2.00
6	13.27	14.83	-2.00	19	9.48	21.02	5.50
7	43.03	49.87	-0.25	20	8.66	6.17	-2.50
8	37.97	49.13	-1.50	21	5.55	9.27	-0.50
9	13.00	17.16	0.16	22	11.75	18.73	0.48
10	12.51	18.07	0.58	23	8.04	6.08	-4.00
11	17.52	14.64	-3.00	24	7.16	8.38	-6.00
12	10.43	19.38	-0.19	25	14.77	14.26	9.02
13	12.83	16.01	-1.00	26	10.30	5.75	-3.95

对比分析两个模型的运营成本,不难发现,对已存在网络重新改造后的运营成本略高于首次设计的网络运营成本,表明首次设计的物流组织网络优于重新改造后的物流组织网络,原因在于后者网络中通道上已有的供给能力影响了最优组织分配方案,使其没有达到最优的运营效果。因此,企业物流网络规划者在开始对网络规划的初期,就要考虑静态和动态网络的优化设计,尽可能使基础设施建设网络和物流组织网络同时达到最优。

为了说明变分不等式的优越性和修正投影算法的有效性,

将修正投影算法与投影算法、ILOG CPLEX 软件包在计算结果和迭代次数上进行比较,如表8所示。其中投影算法公式为: $X^t = P_k(X^{t-1} - \alpha F(X^{t-1}))$,投影算法选择参数值与修正投影算法一样,为 $\alpha = 0.01, \varepsilon = 0.00001$ 。在计算结果方面,修正投影算法求的目标函数值要好于投影算法与 ILOG CPLEX 所求的目标函数值,在迭代次数上,修正投影算法的效率与投影算法非常接近,但是要优于 ILOG CPLEX 的软件包。

表8 修正投影算法与投影算法、ILOG CPLEX 的比较

模型	修正投影算法		投影算法		ILOG CPLEX	
	min F	T	min F	T	min F	T
模型1	192 230	397	192 240	385	192 340	426
模型2	122 720	1 657	122 720	1 652	123 950	1 785

注:模型1为物流网络优化设计模型,模型2为物流网络重新设计模型;min F 为目标函数值, T 为迭代次数。

6 结语

本文研究了多级多商品的物流网络设计和重新设计问题,其特点如下。

1)从网络状态分析,将物流网络划分为静态网络和动态网络进行研究。静态网络为物流基础设施网络,包含物流基础设施和物流通道;动态网络为物流组织网络,包括在基础设施网络上进行的一切物流活动。

2)为了更清晰更方便地描述物流组织网络,将物流节点上的物流活动分配到相应的物流通道上。

3)考虑了物流活动过程中带来的环境污染问题,企业相应付出治理费用。

4)本文通过系统优化理论和变分不等式理论,建立了多级多商品物流网络系统优化设计模型和重新设计模型,分别对新建和已建的物流网络进行了优化设计,设计了基础设施网络中的节点和通道建设能力,合理安排了物流组织网络的物流活动,使整个网络达到了系统最优,为物流企业的网络设计提供了理想的决策支持。需要指出的是,在物流活动过程中,客户的需求存在不确定性因素,主要表现为对商品需求的数量、质量和时间等方面的不确定性,今后将从需求不确定和多周期运营等方面考虑网络优化设计问题。

参考文献:

- [1] 单丽辉,张仲义,张喜福,等.基于系统理论的物流网络分析与资源整合[J].北京交通大学学报:社会科学版,2011,10(2):47-53.

(上接第284页)

的研究工作将在完善和提高模型性能和可靠性的同时,对疏散模型作进一步优化和改进。

参考文献:

- [1] HELBIG D, MOLNAR P. Social force model for pedestrian dynamics [J]. Physical Review E, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [2] 李伏京,方卫宁,胡海梅,等.地铁车辆安全疏散性能的仿真研究[J].系统仿真学报,2006,18(4):852-855.
- [3] 赵道亮,刘英学.人员疏散的二维元胞自动机随机模型研究[J].安全与环境学报,2009,9(5):179-182.
- [4] 孟俊仙,周淑秋,饶敏.大型建筑内人员疏散计算机仿真研究评述[J].计算机应用与软件,2008,25(3):159-161.
- [5] 喻言,刘栋栋,孔维伟.地铁出口和内部条件对人员疏散的影响分析及应用[J].北京建筑工程学院学报,2008,24(4):30-35.
- [6] 李伏京,方卫宁.磁悬浮车辆中人员紧急疏散的仿真研究[J].中

- [2] 牟伦英,黄丹.物流网络节点的动态选址研究[J].工业工程与管理,2005,10(2):102-106.
- [3] KLOSE A, DREXL A. Facility location models for distribution system design [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 162(1): 4-29.
- [4] ABOOLIA R, BERMAN O, KRASS D. Competitive facility location and design problem [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 182(1): 40-62.
- [5] SHEN Z M, COULLARD C, DASKIN M S. A joint location-inventory model [J]. Transportation Science, 2003, 37(1): 40-55.
- [6] SHEN Z M, QI L. Incorporating inventory and routing costs in strategic location models [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 179(2): 372-389.
- [7] 秦进,史峰,缪立新,等.考虑随机需求和库存决策的多商品物流网络设计的优化模型与算法[J].系统工程理论与实践,2009,29(4):176-182.
- [8] 秦进,倪玲霖,缪立新.多级多商品物流网络设计的优化模型与组合模拟退火算法[J].计算机应用研究,2010,27(9):3348-3351.
- [9] 王文生,曾志猛,王娟.多级煤炭物流网络优化选择模型的构建与应用[J].煤炭学报,2011,36(6):1600-1601.
- [10] 代颖,马祖军,刘飞.基于混合遗传算法的制造/再制造集成物流网络优化设计[J].计算机基础制造系统,2006,12(11):1853-1859.
- [11] NAGURNEY A. A system-optimization perspective for supply chain network integration: the horizontal merger case [J]. Transportation Research E, 2009, 45(1): 1-15.
- [12] NAGURNEY A. Optimal supply chain network design and redesign at minimal total cost and with demand satisfaction [J]. International Journal of Production Economics, 2010, 128(1): 200-208.
- [13] NAGURNEY A. Super-network: the science of complexity [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2011, 33(3): 205-228.
- [14] NAGURNEY A, DONG J. Super-networks: a decision making for the information age [M]. Cheltenham: England Elgar Publisher, 2002: 63-80.
- [15] 王志平,王众托.超网络理论与其应用[M].北京:科学出版社,2008:34-39.
- [16] NOOR M A. Some developments in general variational inequalities [J]. Applied Mathematics and Computation, 2004, 152(1): 199-277.

- 国安全科学学报,2005,15(8):17-20.
- [7] 朱艺,杨立中,李健.不同房间结构下人员疏散的 CA 模拟研究[J].火灾科学,2007,16(3):175-179.
- [8] 吕春杉,翁文国,杨锐,等.基于运动模式和元胞自动机的火灾环境下人员疏散模型[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(12):2163-2167.
- [9] 李炎锋,杜修力,李俊梅,等.地铁换乘站火灾中烟气控制及疏散研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(3):587-592.
- [10] 崔喜红,李强,陈晋,等.基于多智能体技术的公共场所人员疏散模型研究[J].系统仿真学报,2008,20(4):1006-1010.
- [11] 王延钊.基于改进元胞自动机地下空间人员疏散模拟研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [12] 赵金玲.基于通用设计的高速列车车厢内部设计研究[D].沈阳:沈阳航空工业学院,2010.