

考虑拥塞成本的 B2C 配送网络成长模型

辛琦¹, 周晓²

(1. 福建江夏学院经济贸易学院, 福建 福州 350108;

2. 福建江夏学院工商管理学院, 福建 福州 350108)

[摘要] 为了解决基于电子商务的大规模配送网络的构建问题, 以电商企业自营物流模式下的 B2C 配送网络为研究对象, 利用复杂网络理论, 构建了考虑拥塞成本的大规模配送网络成长模型. 在选择节点与新增节点建立连接时, 以节点度、运输成本和拥塞成本为依据. 仿真结果表明: 与不考虑拥塞相比, 该模型能够使无拥塞节点或者拥塞程度较轻的节点获得较大的优先连接概率, 从而有效地降低整个配送网络的总成本.

[关键词] 配送网络; 电子商务; 拥塞; 成长模型

[中图分类号] F 252.24; U 113

[文献标志码] A

A Growth Model of B2C Distribution Network Considering Congestion Costs

XIN Qi¹, ZHOU Xiao²

(1. School of Economics and Trade, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China

2. School of Business Administration, Fujian Jiangxia University, Fuzhou, 350108, China)

Abstract: How to build a large-scale distribution network that serves the e-commerce is a difficult problem. In this paper, with a B2C distribution network of an e-commerce enterprise with self-run logistics as the research object, using complex network theory, a growth model taking into account congestion costs for the large-scale distribution network was constructed. Network growth depends on the increase of new nodes and connections between the nodes generated to meet the logistics needs of new online shopping. Node degrees, transportation costs and congestion costs are the basis of selecting an original node to connect with a new node. The simulation results show that: compared with the situation of ignoring congestion, this model can make the nodes which have no congestion costs or lower congestion costs obtain a larger priority connection probability, thus the total costs of the entire distribution network can be effectively reduced.

Key words: distribution network; e-commerce; congestion; growth model

0 引言

随着新经济时代来临, 电子商务作为一种崭新的商务交易活动, 使贸易洽谈可以足不出户在网上解决, 给传统经济带来翻天覆地的变化. 电子商务交易的最终实现有赖于后台物流的支撑, 将商品及时地配送到用户手中, 完成商品的空间转移, 才标志着电子商务过程的结束. 近年来, 我国电子商务

市场规模不断扩大, 电商企业和第三方物流企业必须以更大的物流网络覆盖范围和更高的物流运作效率来满足快速增长的商品配送需求. 根据《2013 年中国电子商务与物流发展报告》, 我国每年电子商务新建的地区配送中心 40 多个, 城市配送中心 200 多个, 城市内配送网点数千个. 可见, 我国服务于电子商务的物流网络规模庞大, 并且还在不断增长之中. 研究电子商务环境下的大规模物流网络如何构建、如何成长, 对合理布局网络、提高配送效率、降低物流成本、更好地推动电子商务的发展具有重要意义.

国内外许多学者已经从设施选址^[1-2]、路径优化^[3-4]、流量分配^[5-6]等方面对物流网络的构建和优化问题进行了大量的研究. 这类研究通常以小规模物流网络为对象, 以成本、利润、距离、时间等为优化目标, 并通过启发式算法求得决策结果. 但是, 随着网络规模不断扩大, 上述思路和方法将不再适用.

复杂网络理论的发展为研究大规模物流网络提供了理论基础. 目前, 基于复杂网络理论的物流网络研究并不多, 主要是针对物流网络的复杂网络特性进行分析. 文献 [7] 利用复杂网络理论, 对快递网络的统计特征进行实证分析, 得出快递网络具有小世界特性和无标度特性的结论. 文献 [8] 根据企业的元素特征和互动关系, 分析了区域物流网络的复杂网络演化特征, 建立了区域物流网络模型, 并对网络的演化机制进行了研究. 文献 [9] 分析了物流配送网络的节点度分布特性, 并以此为基础建立了物流配送网络的配送节点和客户生成模型.

本文以 B2C 环境下电商企业自营物流为背景, 利用复杂网络理论, 从网络成长的角度构建了 B2C 配送网络模型.

1 B2C 配送网络成长模型

B2C 配送网络的成长依赖于各区域顾客网购需求的增长, 即 B2C 配送网络的成长依赖于配送节点的增加以及不同配送节点之间连接的增加. 配送节点的增加源于有新的网购需求市场的产生或网购需求规模的扩大, 而新的配送节点与网络中原有节点如何建立连接, 以既经济又高效的方式满足新的市场需求, 是 B2C 配送网络成长的决定性因素.

电商企业自营物流模式下的 B2C 配送网络具有以下特点: 第一, 因地理位置、货物处理量、辐射范围等条件的不同, 节点分为若干等级; 第二, 高等级节点具有库存能力; 第三, 不考虑少数退换货情况时, 货物在网络中总是从上级节点向下级节点流动, 即 B2C 配送网络为有向网络.

基于上述分析, 构建 B2C 配送网络成长模型:

1) 假设 B2C 配送网络 $G = (V, E)$ 是由 $|V| = N$ 个节点和 $|E| = M$ 条节点间的连接所组成的一个有向网络. 节点集 $V = \{V_1, V_2, V_3\}$, $V_l \in V$ 表示等级为 $l (l = 1, 2, 3)$ 的节点子集.

2) 根据新的网购需求市场的产生或网购需求规模的扩大, 相应增加新的节点到配送网络中, 每个新加入的节点都具有一定的度, 即每个新节点或者通过配送网络中的其他节点来满足其所在的新的市场需求 (入度), 或者用以满足其他节点不断扩大的市场需求 (出度).

3) 新节点按以下规则与网络中的原有节点建立连接:

①当新节点 $v_j \in V_3$ 时, 表示该节点为等级最低、最接近顾客的三级节点, 该节点须通过配送网络中的二级节点来满足其所在的新的市场需求, 并按式 (1) 所得概率建立该节点与二级节点的连接.

$$p_i = z_i / \sum_{v_n \in V_2} z_n. \quad (1)$$

其中, z_i 表示原有节点 $v_i (v_i \in V_2)$ 的重要性评价值, z_i 越大, p_i 越大, v_j 连接 v_i 的概率则越大.

②当新节点 $v_j \in V_2$ 时, 表示该节点为二级节点, 二级节点向上连接一级节点, 向下连接三级节点. 该节点与一级节点的连接同样按式 (1) 所得概率建立, 并按下述步骤与三级节点建立连接.

首先, 找到与 v_j 距离最近的二级节点 v_i .

其次, 进行距离比较. $v_i(3) = \{v_{i1}, \dots, v_{iR}\}$ 是与 v_i 相连的三级节点的集合, $\mathbf{a}_i(3) = (a_{i1}, \dots, a_{iR})$ 是 v_i 与其三级节点的距离向量, $\mathbf{a}_j(3) = (a_{j1}, \dots, a_{jR})$ 是节点 v_j 与 v_i 三级节点的距离向量. 计算 $\mathbf{a}_j(3) - \mathbf{a}_i(3) = (a_{j1} - a_{i1}, \dots, a_{jR} - a_{iR})$, 得到向量 $\Delta = (\Delta_1, \dots, \Delta_R)$.

最后, 调整节点连接. 取消三级节点 $v_{ir} (v_{ir} \in v_i(3), \Delta_r < 0)$ 与二级节点 v_i 的连接, 并建立其与新增节点 v_j 的连接.

③当新节点 $v_j \in V_1$ 时, 表示该节点为一级节点, 一级节点是 B2C 配送网络的上游节点, 通过二级节点将存放在该级节点中的库存货物向三级节点配送, 并且, 为防止缺货, 一级节点之间也应建立一定的连接. 新增一级节点与网络中原有一级节点的连接按式 (1) 所得概率建立; 与二级节点建立连接的方法与上述二级节点与三级节点建立连接的方法一致, 不再赘述.

2 考虑拥塞的配送节点重要性评价方法

复杂网络理论的经典 BA 模型^[10]以节点度作为优先连接的依据, 即 $z_i = k_i$ (k_i 为节点 v_i 的度). 节点度在一定程度上代表了配送节点的集疏运能力, 度越大, 集疏运能力越强, 表示节点在网络中越重要.

但是, 基于节点度的优先连接特性会使网络成长具有“马太效应”^[10]. 由于节点的处理能力 (取决于物流设施的规模和物流设备的数量) 在规划建成后的一定时期内无法改变, 那么, 必然会在度越来越大的节点产生拥塞, 同时存在度较小的节点利用率低的问题. 当新节点加入网络时, 应避免与拥塞节点相连接. 因此, 还应将拥塞作为节点连接时考虑的因素. 当拥塞产生时, 通常可以通过三种方式体现: 运输距离延长, 运输时间增加, 运输成本提高^[11]. 本文采用第三种方式, 所构造的节点成本函数如式 (2) 所示.

$$c_i = \alpha_{ij} a_{ij} + \beta_i (\max\{0, (g_i - G_i)\})^2. \quad (2)$$

其中, c_i 表示连接节点 v_i 的成本; $\alpha_{ij} a_{ij}$ 为节点 v_j 至节点 v_i 的运输成本, a_{ij} 为两节点间的距离, α_{ij} 为运输成本系数; $\beta_i (\max\{0, (g_i - G_i)\})^2$ 为节点 v_i 的拥塞成本, β_i 为 v_i 的拥塞成本系数, G_i 为 v_i 的拥塞阈值, 当 v_i 的货物处理量 g_i 大于拥塞阈值时, 产生拥塞成本, 并且随着 g_i 的增加, 边际拥塞成本上升, 呈现出规模不经济的特征.

基于上述分析, 给出综合节点度和成本的节点重要性评价公式:

$$z_i = \lambda_i r(k_i) / r(c_i). \quad (3)$$

其中, $r(k_i) = k_i / k^{\max}$ 和 $r(c_i) = c_i / c^{\max}$ 分别为无量纲化后的节点度和成本, λ_i 为评价系数. 由式 (3) 可知, 在对节点进行评价时, 不仅仅看节点度的大小 (节点度越大, 评价值越大), 而且还考虑了节点与新增节点间的距离, 以及节点的拥塞程度, 距离和拥塞所产生的成本越小, 评价值越大.

3 仿真实验及结果分析

仿真参数设置如下: 初始网络 $N = 2, v_1 \in V_1, v_2 \in V_2$, 两节点相连, 即 $k_1 = k_2 = 1$, 且 $a_{12} = 50$. 每时间步加入一个新节点, 参考实际配送网络中不同等级节点的数量比例, 将新增节点为一级、二级、三级节点的概率分别设为 5/1000、25/1000 和 970/1000. 由于网络规模较大, 涉及参数较多, 因此将节点间距离、节点拥塞阈值等参数设置为一定数值区间内的随机整数; 又由于配送网络中级别越高的节点所处的地理位置越重要、货物处理能力越强、辐射范围越广、节点数量越少, 因此节点级别越高, 节点间的距离越大, 节点的拥塞阈值 (即节点的设计处理能力) 也越高. 基于此, 将节点参数设置如表 1 所示. 表 1 中符号 $\sim U[a, b]$ 表示在区间 $[a, b]$ 内随机取整. 新增节点 v_j 的初始货物处理量按公式 $g_j = G_j / l_j$ 进行计算, 表示节点的初始货物处理量与拥塞阈值正相关, 与节点等级反相关; 当节点之间建立连接时, 低级节点的货物处理量累加到高级节点的货物处理量中. 所有节点间的

运输成本系数 $\alpha_{ij} = 1$ ，节点 v_i 的拥塞成本系数 $\beta_i = 0.01G_i$ ，表示不同的节点所产生的拥塞，等级高的节点造成的影响更大. 节点 v_i 的重要性评价系数 $\lambda_i = 1$.

表 1 节点参数
Tab. 1 Nodes parameters

节点等级 Nodes level	新增概率 Presence probability	节点间距离 Distances between nodes			拥塞阈值 Congestion threshold
		一级节点 First-level nodes	二级节点 Second-level nodes	三级节点 Third-level nodes	
一级节点	5/1000	~ U[100,300]	~ U[50,300]	—	~ U[500,1000]
二级节点	25/1000	~ U[50,300]	~ U[50,300]	~ U[1,300]	~ U[50,100]
三级节点	970/1000	—	~ U[1,300]	—	~ U[5,10]

1) 节点优先连接对比分析

对考虑拥塞、不考虑拥塞两种情况下的节点优先连接概率进行比较. 表 2 所列 为配送网络规模成长至 200 个节点，当第 201 个节点产生时（随机生成的新增节点为三级节点），网络中所有二级节点的节点度、考虑拥塞和不考虑拥塞的评价数据. 其中， c_t 为包含拥塞成本的总成本； c_a 仅为运输成本； z_t 、 z_a 分别为两种情况下的节点评价价值； p_t 、 p_a 分别为它们的节点优先连接概率.

表 2 配送节点评价数据
Tab. 2 Evaluation data of distribution nodes

节点序号 Nodes number	节点度 Nodes degree	考虑拥塞 Considering congestion			不考虑拥塞 Ignoring congestion		
		c_t	z_t	p_t	c_a	z_a	p_a
1	39	1565	1.576 98	0.058 97	30	9.500 00	0.197 86
8	38	2468	0.974 36	0.036 43	10	27.769 23	0.578 37
26	31	1321	1.485 08	0.055 53	36	6.292 74	0.131 06
39	36	2076	1.097 39	0.041 03	141	1.865 79	0.038 86
114	18	131	8.696 87	0.325 20	131	1.004 11	0.020 91
139	4	138	1.834 61	0.068 60	138	0.211 82	0.004 41
145	3	141	1.346 68	0.050 36	141	0.155 48	0.003 24
163	16	365	2.772 84	0.103 68	285	0.410 26	0.008 55
164	2	164	0.771 88	0.028 86	164	0.089 12	0.001 86
174	2	115	1.100 76	0.041 16	115	0.127 09	0.002 65
197	10	112	5.086 12	0.190 18	112	0.587 23	0.012 23

由表 2 数据可见，序号为 1、8、26、39 和 163 的节点 $c_t > c_a$ ，节点存在拥塞；序号为 114、139、145、164、174 和 197 的节点 $c_t = c_a$ ，节点无拥塞. 对于无拥塞节点，虽然由于 c_t^{\max} 与 c_a^{\max} 不同而得到不同的 z_t 与 z_a 、以及 p_t 与 p_a ，但是因为没有拥塞成本的影响，这些节点的优先连接概率的排序并没有发生改变，即 $p_{114} > p_{197} > p_{139} > p_{145} > p_{174} > p_{164}$.

对于拥塞节点，由于受到拥塞成本的影响，节点的优先连接概率及其排序均发生变化. 以下以表 2 中序号为 8 和 163 的节点为例进行分析. 如果不考虑拥塞，序号为 8 的节点因为具有最小的运输成本和较大的节点度，而得到最大的连接概率；但是在考虑拥塞之后，该节点因总成本最大而变成所有拥塞节点中获得连接概率最小的节点. 相反，序号为 163 的节点在不考虑拥塞时，因为具有最高的运输成本和最小的节点度，使其连接概率最小；但在考虑拥塞之后，该节点因总成本最小而变成所有拥塞节点中连接概率最大的节点. 由上述两个节点的数据可知，当节点产生拥塞时，考虑拥塞与否会对节点的优先连接概率产生影响，从而改变节点的连接选择，进而使配送网络的成长轨迹发生改变.

2) 配送网络总成本对比分析

笔者对不同规模（节点数在整数区间 [100, 1000] 内，以 100 为间隔进行取值）的配送网络，按照表 1 的参数设置，分别运行 200 次后取各次总成本平均值作为它们的总成本，如图 1 所示. 由

图1可见, 无论网络规模多大, 考虑拥塞时构建得到的配送网络总成本总是小于或等于不考虑拥塞时构建得到配送网络总成本, 并且随着网络规模的不断增大, 两者之间的差距也越来越大, 这表明构建配送网络, 尤其是构建大规模的配送网络时, 考虑拥塞影响而对节点连接重新调整, 能有效地降低整个配送网络的总成本.

4 结论

本文构建的 B2C 配送网络成长模型, 考虑了节点拥塞, 节点的重要性评价是节点的拥塞成本、运输成本、节点度三者综合的结果, 并以此作为网络成长的依据. 通过仿真实验证明: 1) 节点的优先连接概率会因是否考虑拥塞而不同, 当包含拥塞成本在内的总成本偏高时, 节点会获得较低的连接概率, 使新增节点避免与存在拥塞或者拥塞程度严重的节点建立连接, 使节点连接更具合理性; 2) 与不考虑节点拥塞相比, 根据该模型成长起来的配送网络的总成本较小, 而且网络规模越大, 成本优势越明显, 表明考虑拥塞成本的 B2C 配送网络成长模型能使网络构建更具科学性.

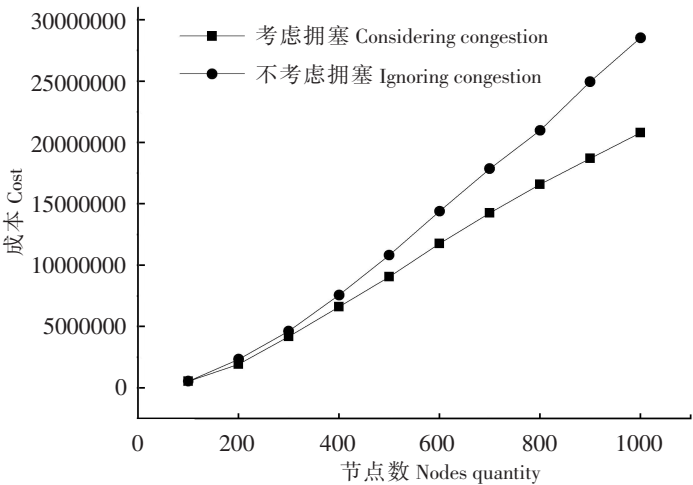


图 1 两种情况下的配送网络总成本

Fig.1 Total costs of distribution network in two conditions

[参考文献]

[1] WANG B H, HE S W. Robust optimization model and algorithm for logistics center location and allocation under uncertain environment [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(2): 69-74.

[2] 汤希峰, 毛海军, 李旭宏. 物流配送中心选址的多目标优化模型 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(2): 404-407.

[3] 蒋琦玮, 陈治亚. 物流配送最短径路的动态规划方法研究 [J]. 系统工程, 2007, 25(4): 27-29.

[4] 郑龙, 周经伦, 易凡, 等. 大规模随机运输网络的路径优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(10): 85-93.

[5] ISHFAQR, SOX C R. Hub location-allocation in intermodal logistic networks [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 210(2): 213-230.

[6] 周晓, 张锦, 张菲, 等. 基于变权的多目标物流网络货流分配方法 [J]. 西南交通大学学报: 自然科学版, 2012, 47(1): 151-157.

[7] 杨华, 聂玉超, 张洪斌, 等. 基于复杂网络的快递网络性质分析 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 101-103.

[8] ZU Q H, WANG H, GAO H Y, et al. Research on the complex regional logistics network and its evolution mechanism [C] //Web Society, 2009. SWS 09. 1st IEEE Symposium on, Piscataway: IEEE Press, 2009: 189-193.

[9] 张旭凤, 张永安. 物流配送网络的无标度网络特征研究 [J]. 物流技术, 2011, 30(7): 97-100.

[10] ALBERT R, BARABASI A L. Statistical mechanics of complex networks [J]. Reviews of modern physics, 2002, 74(1): 47-98.

[11] ASHTON D J, JARRETT T C, JOHNSON N F. Effect of congestion costs on shortest paths through complex networks [J]. Physical Review Letters, 2005, 94(5): 58701-1-58701-4.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)