

考虑相继故障的物流耦合网络节点重要度评估*

何祥, 袁永博, 张明媛

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为有效识别和保护物流系统中的关键设施, 将物流系统抽象为由任务网络和交通网络构成的关联网络, 并提出考虑关联网络级联失效的节点重要度评价方法。该方法基于物流活动的效率要求设计了网络流的双层均衡规划模型, 根据网络的过载程度设计了调节其容量与成本的级联失效模型, 以节点移除后的网络效率和负载损失作为重要度的评价标准并给出评价的算法流程, 针对具体算例识别出失效后引发严重网络故障的节点。对比基于不同方法的评价结果验证了该方法的有效性, 也验证了失效后引发网络大规模崩溃的节点所具有的高连接度和高负载等共性, 可以为关键物流设施的识别与保护提供更加可靠的依据。

关键词: 物流网络; 耦合网络; 相继故障; 节点重要度

中图分类号: TP399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)07-2006-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.07.019

Node importance evaluation under cascading failure of logistics infrastructure coupled network

He Xiang, Yuan Yongbo, Zhang Mingyuan

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: To identify the critical logistics facility and avoid large-scale infrastructure collapse resulted from cascading failure, this paper abstracted the logistics infrastructure system into a coupled network consists of task assignment and traffic layers, and proposed a node importance evaluation method on consideration of its cascading failure. It designed the bi-level equilibrium programming model and cascaded failure dynamic model based on logistics efficiency requirement and relationship between overload and capacity or cost respectively. It also set the network efficiency and task load loss to be the node importance criteria after its removal and proposed algorithm for the evaluation. The experiment and evaluation results based on different methods not only prove the validity of the proposed method, but also verify the high-degree and high-load features of the critical nodes whose malfunctioning can cause large-scale cascading failure, thus it can provide more reliable guidance for infrastructure protection.

Key words: logistics network; coupled network; cascading failure; node importance

0 引言

作为基础设施系统的重要组成部分, 物流系统对社会经济活动的正常运行至关重要。随着电力、交通等基础设施网络的无标度、小世界特性被证实, 基础设施网络在随机或选择攻击下的脆弱性成为了研究的热点^[1-3], 识别物流基础设施网络中的关键节点并加强其保护对于提高整个系统的可靠性具有重要意义^[4]。文献[5]综述了复杂网络领域节点重要度排序研究的进展, 从节点的重要性等价于其显著性的角度具体介绍了依据网络的局部拓扑结构信息(如度、聚集系数)、全局拓扑结构信息(如介数、紧密度)和网络位置属性评估节点重要度的方法。从节点的重要性等价于破坏性的角度, 文献[6]综合考虑节点的连接度和经过节点的最短路径数目, 设计了评估节点重要度的节点收缩法; 文献[7~9]进一步考虑了边的重要度并将节点收缩法拓展至复杂加权网络。

节点收缩法假定节点失效相互独立且忽略了网络上的负载分配等动力学行为, 仍属于基于网络的拓扑结构以相对静态的方式评估节点重要度的范畴。基础设施网络为负载网络, 局部网络拓扑结构的变化(如节点的移除和新节点的加入)容易改变网络流的传递路径而造成负载的重新分配。一旦节点上的负载超过其容量就容易引发节点的失效, 失效节点上的负载通过节点间的耦合关系被进一步分配至其他节点并可能引

发新的过载失效, 该失效传播过程可能持续进行并导致网络的大规模故障。这种由局部故障引起的网络大面积崩溃的现象被称为相继故障(cascading failure)。吴俊等人^[10]提出了考虑相继故障的节点重要度评估方法, 从而实现了失效后触发大面积相继故障的潜在“关键节点”的识别。文献[11~13]研究了复杂物流网络级联失效的有关问题并提出改善物流系统抗毁性的建议; 文献[14]从供应链网络级联失效的角度提出供应链节点的重要度评价方法。

物流网络是由结构和功能密切相关的任务网络和交通网络耦合形成的复杂关联网络, 任务网络决定了交通负载的分布, 交通负载则通过改变物流设施间的出行效率对物流负载的分布造成影响。关联网络中的失效不仅会在单层网络内部传播, 还会通过网络间的依赖关系在不同层网络间交互传播从而导致更加严重的后果^[15]。关联基础设施网络相继故障的研究多数集中于电力、通信和供水系统^[16,17], 物流领域仍缺乏立足于关联网络的故障交互传播机制的研究, 而基于关联网络级联失效的节点重要度评价结果与仅考虑单层网络相继故障的情况可能存在很大不同^[18]。

本文首先在构建任务和交通关联网络模型的基础上根据用户均衡理论设计了“任务—交通”关联网络的双层均衡规划模型, 并描述关联网络间故障交互传播过程的级联失效动力学模型; 其次设计了考虑关联网络相继故障的节点重要度评估算

收稿日期: 2017-03-23; **修回日期:** 2017-05-19 **基金项目:** 辽宁省自然科学基金资助项目(2015020611); 辽宁省教育厅一般项目(L2014034)

作者简介: 何祥(1991-), 男, 山东济宁人, 硕士, 主要研究方向为复杂网络与网络可靠性(HX21406131@mail.dlut.edu.cn); 袁永博(1957-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博导, 主要研究方向为基础设施网络可靠性; 张明媛(1981-), 女, 辽宁大连人, 副教授, 硕导, 主要研究方向为基础设施网络可靠性。

法;最后通过仿真实验验证了该方法从相继故障的角度识别关键物流节点的有效性。

1 物流关联基础设施网络模型

任务网络是描述各物流设施之间包括收发、仓储、中转等一系列业务逻辑关系的网络,交通网络则是实际承载货物流的物理网络。考虑到物流运输任务具有方向性,以有向加权网络 $G_L = (V_L, E_L, \varphi_L, W_L)$ 描述物流系统。为方便描述,本文将物流收发地、中转站、仓库等基础设施简化为规模 N_L 的节点集 $V_L = \{v_{Li} | i = 1, 2, \dots, N_L\}$;将物流业务关系简化为边集 $E_L = \{e_{Lij} | i, j = 1, 2, \dots, N_L\}$;建立物流业务方向关系的映射集 $\varphi_L = \{\varphi_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, N_L\}$,其中, φ_{ij} 取 1 或 0 分别表示节点 v_{Li} 至 v_{Lj} 存在或不存在业务联系;将物流节点间的出行成本简化为边权集 $W_L = \{w_{Lij} | i, j = 1, 2, \dots, N_L\}$ 。为方便讨论,本文将公路或城市道路网络作为交通网络,以无向加权网络 $G_T = (V_T, E_T, W_T, CT)$ 描述交通系统;分别将交叉口等枢纽设施和路段简化为节点集 $V_T = \{v_{Ti} | i = 1, 2, \dots, N_T\}$ 和边集 $E_T = \{e_{Tij} | i, j = 1, 2, \dots, N_T\}$;路段阻抗和容量简化为边权集 $W_T = \{w_{Tij} | i, j = 1, 2, \dots, N_T\}$ 和 $CT = \{C_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, N_T\}$;采用邻接矩阵 $Z = [z_{ij}]_{N_T \times N_T}$ 描述物流节点和交通节点间的关联关系,其中 z_{ij} 取 1 或 0 分别表示物流节点 v_{Li} 建立或未建立在交通节点 v_{Tj} 上。关联网络模型如图 1 所示。

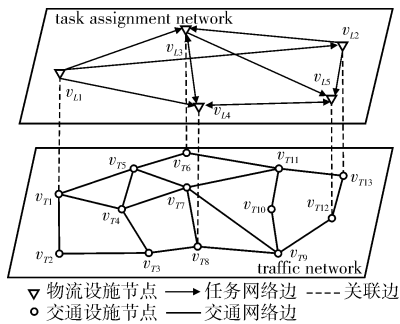


图1 “任务-交通”关联基础设施网络模型

2 物流关联网络动力学及其数学描述

2.1 任务网络与交通网络间的关联机制与失效模式

不同于根据节点或边的拓扑属性定义其结构负载的方式,本文根据物流和交通活动的实际特征,认为从源节点出发的任务流和交通流按照一定的路径抵达终节点,分别将任务网络和交通网络中的路径定义为任务路径和交通路径,负载则为经过节点或边的任务或交通流的流量总和。基于物流任务的效率要求假定任务流和交通流均选择各自网络中成本最小的路径传递。以交通网络边的阻抗(时间或费用等)作为相邻交通节点间的出行成本,物流节点间的出行成本则取决于与关联交通节点间的最小路径成本。例如,物流节点 v_{L1} 和 v_{L2} 分别建立在交通节点 v_{T1} 和 v_{T13} 上,则 v_{L1} 和 v_{L2} 间的出行成本为 v_{T1} 和 v_{T13} 间所有路径中最短路径所对应的成本;假定从源节点 v_{L1} 到终节点 v_{L5} 的物流任务需要经过 v_{L2} 、 v_{L3} 和 v_{L4} 中某个节点的中转,则任务流将从路径 $v_{L1} \rightarrow v_{L2} \rightarrow v_{L5}$ 、 $v_{L1} \rightarrow v_{L3} \rightarrow v_{L5}$ 和 $v_{L1} \rightarrow v_{L4} \rightarrow v_{L5}$ 间选择成本最小的路径进行运输。考虑到交通网络中的拥挤效应,交通网络中边上的交通流过大将造成物流节点间出行成本增加,并促使任务选择成本更小的路径,之前成本较小的路径的出行成本随流量的增大而增加,而成本更高的路径的出行成本随流量的下降而降低,路径选择和路径成本的变化过程将持续进行,直到各源、终节点间的所有被使用路径的出行成本相等且不大于未被使用路径成本的均衡状态^[19]。

为便于分析关联网络中节点失效所造成的网络流分布的变化情况,假定一个网络中的网络流分布发生变化时另一个网络中的网络流分布保持不变。以某物流节点的失效为例,描述故障在关联网络中的相继传播过程:某物流节点的失效促使部

分物流任务选择新的任务路径,任务流的分布发生变化,此为过程1;任务网络负载的变化将造成交通节点间交通流的变化,部分交通路径的成本可能因物流或交通节点的过载而增加,此为过程2;交通路径成本的变化将促使部分任务作出新的路径选择行为并使任务网络中的流量分布发生新的变化,此为过程3;过程3将重新引发过程2,两个过程反复进行直至网络流达到新的平衡状态。上述过程容易打破负载与容量间原有的平衡状态并使一定数量的网络单元因过载发生故障。因此,部分潜在关键节点的失效可能引发波及全网的流量重分布过程并造成网络在较大范围内的严重拥堵,严重降低物流系统的运输效率。

2.2 关联网络的双层均衡规划与级联失效动力学模型

以 Q_{od} 表示物流节点 v_{Lo} 和 v_{Ld} 间的物流任务量;以 w_{Lrs} 和 w_{Tij} 分别表示任务网络边 e_{Lrs} 和交通网络边 e_{Tij} 上的成本;以 P_{rs}^{od} 和 P_{rs}^{uv} 分别表示物流节点 v_{Lo} 和 v_{Ld} 、交通节点 v_{Tu} 和 v_{Tv} 之间路径的集合;以 $f_{L,K}^{od}$ 和 $f_{T,k}^{uv}$ 分别表示物流节点 v_{Lo} 和 v_{Ld} 间路径 K 上的任务量和交通节点 v_{Tu} 和 v_{Tv} 间路径 k 上的交通量;以 q_{rs} 和 x_{ij} 分别表示任务网络边 e_{Lrs} 上的物流量和交通网络边 e_{Tij} 上的交通量;以 v_{Tu} 、 v_{Tv} 分别作为与物流节点 v_{Lr} 、 v_{Ls} 关联的交通节点。关联网络流量分布的双层规划模型如式(1)~(8)所示。

$$\min \sum \int_0^{q_{rs}} w_{Lrs}(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_K f_{L,K}^{od} = Q_{od} \quad \forall o, d, K \quad (2)$$

$$f_{L,K}^{od} \geq 0 \quad \forall o, d, K \quad (3)$$

$$q_{rs} = \sum_o \sum_d \sum_K f_{L,K}^{od} \mu_{rs,K}^{od} \quad \forall o, d, r, s, K; \varphi_{rs} = 1 \quad (4)$$

$$\min \sum \int_0^{x_{ij}} w_{Tij}(\sigma) d\sigma \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_k f_{T,k}^{uv} = q_{rs} \quad \forall u, v, r, s, k; z_{ru} = 1, z_{sv} = 1 \quad (6)$$

$$f_{T,k}^{uv} \geq 0 \quad \forall u, v, k \quad (7)$$

$$x_{ij} = \sum_u \sum_v \sum_k f_{T,k}^{uv} \delta_{ij,k}^{uv} \quad \forall u, v, i, j, k \quad (8)$$

式(4)和(8)中, $\mu_{rs,K}^{od}$ 和 $\delta_{ij,k}^{uv}$ 分别为任务网络和交通网络中路径与边的关联系数,若物流节点 v_{Lo} 和 v_{Ld} 间的路径 K 包含任务网络边 e_{Lrs} ,则 $\mu_{rs,K}^{od}$ 取 1,否则为 0;若交通节点 v_{Tu} 和 v_{Tv} 间的路径 k 包含交通网络边 e_{Tij} ,则 $\delta_{ij,k}^{uv}$ 取 1,否则取 0。物流成本 w_{Lrs} 根据交通网络边的阻抗 w_{Tij} 按式(9)计算。

$$w_{Lrs} = \min_{i,j} \sum_u \sum_v w_{Tij} \delta_{ij,k}^{uv} \quad \forall i, j, u, v, r, s, k; z_{ru} = 1, z_{sv} = 1 \quad (9)$$

式(9)表示物流节点 v_{Lr} 和 v_{Ls} 间的出行成本为关联交通节点 v_{Tu} 和 v_{Tv} 间的最小路径成本。 $w_{Tij}(\tau)$ 采用式(10)所示的BPR函数计算, $w_{Tij}(0)$ 为边 e_{Tij} 的自由流阻抗, $C_{ij}(\tau)$ 为边 e_{Tij} 在 τ 时刻的容量, α 和 β 分别取 0.15 和 4。

$$w_{Tij}(\tau) = w_{Tij}(0) \left(1 + \alpha \left(\frac{x_{ij}(\tau)}{C_{ij}(\tau)} \right)^\beta \right) \quad (10)$$

不考虑任务网络边上的容量及拥挤效应,将各 od 节点间的物流任务量均匀分布在相应的所有最短任务路径上,分别以 γ_{od} 和 γ_{od}^n 表示物流节点 v_{Lo} 和 v_{Ld} 间最短路径的数目及其中经过物流网络边 e_{Lrs} 的路径数目,按式(11)定义 m 时刻物流节点 v_{Lr} 和 v_{Ls} 间的物流量 $q_{rs}(m)$ 。

$$q_{rs}(m) = \sum_{\substack{o \neq d \\ r \neq s}} \gamma_{od}^n Q_{od} \quad \forall o, d, r, s \quad (11)$$

一般认为网络单元的容量与其负载具有明显的正相关性,本文假定网络单元的初始容量恰好满足其初始负载,在交通网络不发生拥堵的情况下以各单元的初始流量定义其容量。在交通网络各边阻抗的相对大小保持不变的情况下按式(11)定义初始时刻 e_{Lrs} 上的物流任务量 $q_{rs}(0)$,由于均衡条件下所有网络流都选择出行成本最小的路径,交通网络中各 od 节点间的流量将均匀分布在相应的所有最短路径上。分别以 σ_w 和 σ_w^j 表示交通节点 v_{Tu} 和 v_{Tv} 之间最短路径的数量及其中经过边 e_{Tij} 的路径数量,按式(12)定义边 e_{Tij} 的初始容量 $C_{ij}(0)$ 。

$$C_{ij}(0) = \sum_{\substack{o \neq d \\ r \neq s}} \frac{\sigma_w^j}{\sigma_w} q_{rs} \quad \forall u, v, r, s; z_{ru} = 1, z_{sv} = 1 \quad (12)$$

负载的重新分布可能造成部分网络单元的过载,区别于 Motter 等人^[20]提出的级联失效模型中一旦节点过载便将其移除的做法,Crucitti 等人^[21]认为多数过载节点处于正常和失效之间的拥塞状态,节点随流量的降低能够逐渐恢复正常,提出根据节点的过载程度调节连边效率的 CLM 模型。Zheng 等人^[22]基于该模型进一步提出基于节点或边的过载程度调节边容量的交通网络级联失效动力学模型。由于边在过载拥堵的情况下不宜使用 BPR 自由流参数计算出行成本,边未过载而其下游节点过载的情况下也会促使网络流避开该边而选择其他路径。假定交通网络中节点的容量和流量分别为其进口边容量或流量之和,根据文献[22]中提供的方法分别按式(13)(14)定义交通节点 v_i 的容量 f_i 及其在 τ 时刻的交通负载 $L_i(\tau)$,按式(15)调节其上游各邻接边的容量。

$$f_i = \sum_j C_{ji}(0) \quad (13)$$

$$L_i(\tau) = \sum_j x_{ji}(\tau) \quad (14)$$

$$C_{ji}(\tau+1) = \begin{cases} C_{ji}(0) \times \frac{C_{ji}(\tau)}{x_{ji}(\tau)} & \text{if } x_{ji} > C_{ji}(\tau) \\ C_{ji}(0) \times \frac{f_i}{L_i(\tau)} & \text{if } x_{ji} \leq C_{ji}(\tau) \text{ and } L_i(\tau) > f_i \\ C_{ji} & \text{if } x_{ji} \leq C_{ji}(\tau) \text{ and } L_i(\tau) \leq f_i \end{cases} \quad (15)$$

与交通节点的拥堵效应相似,在物流节点或与之关联的交通节点过载的情况下,物流节点间的成本将增加并促使物流任务选择新的路径。假定任务网络中节点的容量和流量分别为其进口边容量或流量之和,分别按式(16)(17)定义物流节点 v_r 的容量 f_r 及其在 m 时刻的物流负载 $L_r(m)$,按式(18)调节物流节点间的成本。

$$f_r = \sum_s q_{sr}(0) \quad (16)$$

$$L_r(m) = \sum_s q_{sr}(m) \quad (17)$$

$$w_{ls}(m+1) = \begin{cases} w_{ls}(m) \times \frac{f_s}{L_s(m)} \times \frac{f_s}{L_s(m)} & L_s(m) > f_s \text{ and } L_s(m) > f_s \\ w_{ls}(m) \frac{f_s}{L_s(m)} & L_s(m) > f_s \text{ and } L_s(m) \leq f_s \\ w_{ls}(m) \frac{f_s}{L_s(m)} & L_s(m) \leq f_s \text{ and } L_s(m) > f_s \\ w_{ls}(m) & L_s(m) \leq f_s \text{ and } L_s(m) \leq f_s \end{cases} \quad (18)$$

基于节点的重要性等价于其破坏性的思想,采用节点删除法评价节点的重要性。由于任务负载的变化将引发交通流的重新分布并可能造成部分交通节点和边的拥堵,物流节点间的出行成本将在不同程度上有所增加,运输效率也将随之降低;而移除节点可能使部分物流任务中断,造成功能上的损失。不妨将任务网络效率和任务量的损失程度作为节点重要度的评价标准,失效后网络效率和物流任务数量的损失越大则节点的重要度就越高。分别按式(19)(20)定义级联失效结束后的相对效率 RE 和相对负载率 RL ,按式(21)定义节点 v_{id} 的重要度。

$$RE = \frac{\sum_{o,d \neq o} \rho_{od} \times Q_{od} / T_{Lod}^m}{\sum_{o,d \neq o} \rho_{od} \times Q_{od} / T_{Lod}^0} \quad \forall o, d \quad (19)$$

$$RL = \frac{\sum_{o,d \neq o} Q_{od}^m}{\sum_{o,d \neq o} Q_{od}^0} \quad \forall o, d \quad (20)$$

$$I_i = 1 - \sqrt{RE_i \times RL_i} \quad \forall i \quad (21)$$

式(19)中以 ρ_{od} 表示物流节点 v_{od} 和 v_{ld} 之间任务的相对重要度,以 Q_{od}^0 和 Q_{od}^m 分别表示初始时刻和 m 时刻物流源、终点节点间的任务量,以 T_{Lod}^0 与 T_{Lod}^m 分别表示初始时刻和 m 时刻物流源、终点节点间的出行成本。以 w_{ls}^r 描述 m 时刻任务边 e_{ls} 的成本,按式(22)定义 T_{Lod}^m 。

$$T_{Lod}^m = \min \sum_{o,d \neq o} \sum_{s,K} w_{ls}^m \mu_{rs,K}^{od} \quad \forall o, d, r, s, K; \varphi_{rs} = 1 \quad (22)$$

3 节点重要度评估算法

本文基于连续平均法和 Frank-wolf 算法设计的考虑物流

关联网络相继故障的节点重要度评估算法流程如下:

a) 给定任务网络 G_L 和交通网络 G_T ,根据式(11)(12)为任务网络和交通网络分配最初的网络流,定义交通网络各边的初始容量,根据式(13)和(16)定义任务和交通网络各节点的容量;以 i 表示待研究的节点并记 $i=1$ 。

b) 保持其他节点不变,移除物流节点 v_{id} 和与之相连的各边从而形成新的任务网络 G_L^1 。

c) 针对任务网络 G_L^1 ,按式(9)更新各物流节点间的出行成本,按式(11)重新分配任务流得 $q_{rs}(m)$,以 m 作为连续平均法的迭代次数并记 $m=1$ 。

d) 在用户均衡条件下使用 Frank-wolf 算法根据任务量分配交通流,在该过程中根据式(10)更新各边的阻抗并获取交通网络各边的流量。

e) 交通流均衡判断,以 $\bar{x}_{ij}(n)$ 表示 e_{Tij} 在最后 m_i 次迭代中流量的平均值, $\bar{x}_{ij}(n)$ 和交通量收敛条件分别按式(23)和(24)定义;若流量均衡则转向步骤 g),否则转向步骤 f)。

$$\bar{x}_{ij}(n) = \frac{1}{m_i} \sum_{l=0}^{m_i-1} x_{ij}(n-l) \quad (23)$$

$$\max \left[\frac{\sqrt{(\bar{x}_{ij}(n+1) - \bar{x}_{ij}(n))^2}}{\bar{x}_{ij}(n)} \right] \leq \varepsilon_i \quad (24)$$

f) 按式(14)更新各交通节点的负载,按式(15)更新交通网络各边的容量,按式(10)更新各边阻抗并返回步骤 d)。

g) 按式(10)更新交通网络各边的阻抗,分别按式(14)和(17)更新各交通和物流节点的负载,根据式(9)和(18)更新相邻物流节点间的出行成本。

h) 根据相邻物流节点间的出行成本对物流量进行“全有全无”分配,得到各边上的物流量 q_{rs}^1 并记 $m=m+1$ 。

i) 按式(25)计算任务网络中各边的当前物流量 $q_{rs}(m)$,式中 θ 取 $1/m$ 。

$$q_{rs}(m) = (1-\theta) \times q_{rs}(m-1) + \theta q_{rs}^1 \quad (25)$$

j) 物流均衡判断,以 $\bar{q}_{rs}(n)$ 表示边 rs 在最后 m_i 次迭代中流量的平均值, $\bar{q}_{rs}(n)$ 和物流量收敛条件分别按式(26)和(27)定义;若流量均衡则返回步骤 d),否则转向步骤 k)。

$$\bar{q}_{rs}(n) = \frac{1}{m_i} \sum_{l=0}^{m_i-1} q_{rs}(n-l) \quad (26)$$

$$\max \left[\frac{\sqrt{(\bar{q}_{rs}(n+1) - \bar{q}_{rs}(n))^2}}{\bar{q}_{rs}(n)} \right] \leq \varepsilon_i \quad (27)$$

k) 分别按式(19)(20)计算物流节点 v_{id} 失效后的网络效率损失和任务负载损失,按式(21)计算节点的重要度。

l) 令 $i=i+1$,判断是否已经遍历所有节点,若完成遍历则结束算法,否则返回步骤 b)进行下一个节点的计算。

4 仿真实验分析

4.1 基本情况

构建如图 2 所示的任务网络和如图 3 所示的交通网络,两个网络各有 25 个节点且地理位置相同的节点标号相同。假定任务网络中任意连通的两节点间具有 1 个单位的任务量,所有物流任务的重要度相等;设交通网络中各边的自由流阻抗均为 1,按第 3 章介绍的节点重要度评估算法评价各节点的重要程度。为比较不同方法在评估结果上的差异,采用仅考虑任务网络级联失效的节点重要度评价方法^[14]和节点收缩法对物流节点的重要度进行评估。

图 2 任务网络

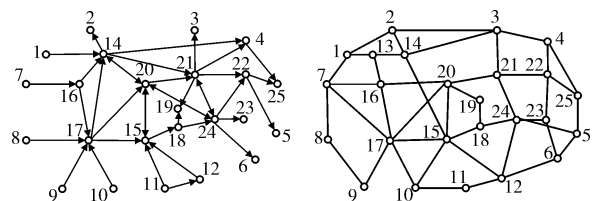


图 3 交通网络

4.2 节点重要度评估结果

根据本文提供的方法对各物流节点的重要度进行评价,各物流节点的负载以及节点失效后网络的相对效率和相对负载率如表1所示。

表1 考虑关联网络级联失效的物流节点重要度评估结果

节点	任务负载	交通负载	相对效率	相对负载	重要度	排序
1	16	16	0.972 1	0.926 3	0.099 5	18
2	15	31	0.970 8	0.930 8	0.096 4	20
3	15	112	0.972 0	0.930 9	0.095 2	21
4	22	22	0.980 7	0.926 3	0.091 6	22
5	16	26	0.973 6	0.926 3	0.098 2	19
6	15	15	0.981 9	0.930 9	0.085 9	24
7	17	33	0.958 1	0.921 7	0.116 9	10
8	16	16	0.971 0	0.926 3	0.100 6	16
9	16	32	0.966 7	0.926 3	0.104 5	11
10	16	24	0.971 3	0.926 3	0.100 3	17
11	17	17	0.972 9	0.921 7	0.103 3	13
12	33	51	0.972 8	0.921 7	0.103 4	12
13	0	78	0.967 8	1	0.032 2	25
14	105	105	0.780 9	0.705 1	0.449 4	2
15	136	136	0.856 1	0.677 4	0.420 1	5
16	49	97	0.980 3	0.847 9	0.168 8	9
17	169	169	0.864 3	0.659 0	0.430 4	4
18	78	78	0.911 0	0.866 4	0.210 7	8
19	15	15	0.977 8	0.930 9	0.089 8	23
20	187	196	0.522 8	0.866 4	0.547 0	1
21	207	251	0.702 2	0.801 8	0.437 0	3
22	71	82	0.911 7	0.852 5	0.222 8	7
23	15	28	0.966 0	0.930 9	0.100 8	15
24	113	113	0.846 3	0.686 6	0.418 9	6
25	17	49	0.973 7	0.921 7	0.102 5	14

由表1可知,多数节点的失效并不会造成网络效率的大幅下降且网络的拥堵程度也基本控制在1.2以内,但节点20的失效将使网络效率削减50%;节点21和14失效后引发的连锁故障使网络效率降至80%以下,节点24、15和17的失效也会在一定程度上降低网络的运行效率。研究结果表明的确存在失效后引发网络大规模级联崩溃的节点。根据第2章对任务和交通网络初始负载的定义,各物流节点的任务和交通负载恰好等于其介数。结果表明失效后容易引发严重故障的节点其任务和交通负载(介数)均较大,负载更大的节点在失效后容易将更多负载分配至其他网络单元,更容易造成网络的严重拥堵并大幅削弱网络效率。然而根据节点介数评估节点重要度的方法与本文相比仍存在一定的差异,如节点20的负载低于节点21,但其失效所削减的网络效率比后者多出20%;重要度排第二位的节点14与节点15、17、24失效的对比结果同理。复杂网络特别是关联网络的级联失效动力学过程相对复杂且负载的重分布过程与节点位置、备用路径的成本和网络容量等众多因素有关。相比于介数法,本文提出的算法能够更加详细地刻画负载分布的规律和动力学过程,可以更加有效地识别失效后引发网络级联崩溃的潜在关键节点。

忽略交通网络,在仅考虑任务网络级联失效的情况下对各物流节点的重要度进行评估,评估结果如表2所示。由于该方法基于Mottet-Lai模型^[20]移除失效传播过程中过载的节点,节点失效引发的相继故障很容易造成网络的不连通从而使部分路径的成本趋于无穷,所以该方法计算得到的网络效率整体低于本文提供的方法。该模型由于没有构建对应于上层任务网络的底层物理网络(交通网络),所以也无法考虑物理网络的负载分布动力学过程对任务负载分布造成的影响;该方法以无权网络的拓扑距离作为节点间的出行成本,因此各节点的任务负载(介数)与基于本文方法得到的结果存在差异。节点8、9、10的重要度相同因而无法进一步区分;节点14成为重要度最高的节点且该节点失效后对网络效率的削减程度远高于其他节点;节点14、15、17、20、21和24仍为失效后造成网络大规模级联崩溃的关键节点,与本文方法相比仅在重要度相对大小和排序方面存在差异。评价结果也同样表现出节点负载越大则失效后网络效率损失越严重的倾向,说明无论单层或关联网

络,高负载节点总是引发网络大规模级联崩溃的潜在风险节点,因此需要格外重视。与单层物流网络的级联失效模型相比,物流关联网络级联失效模型刻画了底层物理网络流的分布情况及其分布变化对上层任务网络出行成本的影响,因此更加符合物流系统的实际运行状况。结合本文提供的算法可以为脆弱节点的辨识提供更加合理可靠的结果。

表2 考虑任务网络级联失效的物流节点重要度评价结果

节点	物流负载	相对效率	相对负载	重要度	排序
1	0	0.941 8	0.926 3	0.066 0	14
2	15	0.944 1	0.930 8	0.062 6	20
3	15	0.949 3	0.930 9	0.059 9	22
4	25.20	0.773 2	0.926 3	0.153 7	8
5	16	0.953 5	0.926 3	0.060 2	21
6	15	0.951 2	0.930 9	0.059 0	23
7	0	0.948 4	0.921 7	0.065 0	15
8	7	0.947 5	0.926 3	0.063 2	19
9	5	0.947 5	0.926 3	0.063 2	17
10	6	0.947 5	0.926 3	0.063 2	18
11	16	0.942 0	0.921 7	0.068 2	12
12	7	0.942 0	0.921 7	0.068 2	13
13	0	1	1	0	25
14	88.68	0.129 8	0.705 1	0.697 5	1
15	56.33	0.750 5	0.677 4	0.287 0	6
16	17	0.885 3	0.847 9	0.133 6	9
17	68.67	0.721 3	0.659 0	0.310 6	4
18	25.43	0.882 9	0.866 4	0.125 4	10
19	15	0.940 3	0.930 9	0.064 4	16
20	71.9	0.262 7	0.866 4	0.522 9	2
21	66.7	0.423 4	0.801 8	0.417 3	3
22	34.8	0.773 2	0.852 5	0.188 1	7
23	15	0.951 2	0.930 9	0.059 0	24
24	63.28	0.736 2	0.686 6	0.289 0	5
25	17	0.939 0	0.921 7	0.069 7	11

按照节点收缩法评价各物流节点的重要度,各节点的度、介数、节点收缩后的网络效率和重要度评价结果如表3所示。

表3 基于节点收缩法的物流节点重要度评价结果

节点	连接度	介数	收缩后效率	重要度	排序
1	1	0	0.038 3	0.016 0	20
2	1	15	0.037 9	0.006 2	25
3	1	15	0.039 2	0.014 3	21
4	3	25.20	0.042 8	0.120 3	8
5	1	16	0.038 4	0.011 8	23
6	1	15	0.037 4	0.019 2	19
7	1	0	0.038 1	0.010 1	24
8	1	7	0.039 0	0.039 2	14
9	1	5	0.039 0	0.039 2	15
10	1	6	0.039 0	0.039 2	16
11	2	16	0.039 1	0.012 3	22
12	2	7	0.038 7	0.026 7	18
13	0	0	0.039 1	0.036 6	17
14	7	88.68	0.061 4	0.386 1	4
15	5	56.33	0.059 2	0.363 7	5
16	3	17	0.040 1	0.060 0	11
17	7	68.67	0.041 8	0.009 3	10
18	3	25.43	0.042 8	0.119 3	9
19	2	15	0.045 2	0.167 3	6
20	5	71.9	0.075 6	0.501 8	1
21	7	66.7	0.067 2	0.439 6	2
22	4	34.8	0.044 2	0.147 3	7
23	1	15	0.039 4	0.0441	13
24	6	63.28	0.061 4	0.386 1	3
25	2	17	0.039 6	0.049 1	12

由于节点收缩法不考虑网络负载以及网络拓扑结构变化所引起的负载重分配效果,基于该方法得到的节点重要度评价结果与之前方法存在一定的差异。节点14和24,节点8、9和10的重要度分别相同无法进一步区分,节点19和22取代节点17成为重要度更高的节点;节点20、21、24、14、15仍是重要度较高的节点,且收缩其他多数节点对网络运行效率的影响不大。节点收缩法综合考虑了节点的连接度和节点在网络中的位置,收缩度更大的节点可以大幅减少节点数量,而收缩具有更多最短路径经过的位于网络核心位置的节点将大幅减少节

点间最短路径的长度,因此可以显著提高网络凝聚程度。评价结果中重要度最高的节点恰好符合上述特征。

综合三种算法得到的评估结果可知,失效后对网络造成级联崩溃效果的节点在某些性质上具有高度的一致性。该类节点一般具有更高的连接度和介数,对网络流具有较强的控制能力;节点失效后待重新分配的负载更大,在网络容量有限的情况下更容易造成其他节点或边的过载,从而大幅削弱网络的运行效率。评估结果的对比验证了本文方法的科学性,同时也修正了未考虑网络负载对节点重要度评估带来的偏差。然而本文算法在实现网络流平衡的过程中需要反复调用时间复杂度为 $O(n^3)$ 的Dijkstra或Floyd最短路径算法,调用次数取决于待重新分配的网络流量。实践表明节点失效后需要重新分配的流量越大,根据式(15)和(18)调节网络容量的次数就越多,网络流重新达到平衡所需的迭代次数也就越多,算法的运行时间将大幅增加。该算法更专注于刻画实际物流耦合网络流的动力学行为,然而从计算开销的角度还难以应用于大规模复杂网络。

5 结束语

为解决物流耦合网络中节点重要度的评估问题,结合物流活动的实际特征和负载网络的负载重分配过程,构建了更为详细的物流关联网络级联失效模型,并提出了基于关联网络相继故障的节点重要度评价方法。基于多种方法的节点重要度评价结果的对比验证了该方法的准确性以及良好的节点重要度区分能力;本文进一步根据网络的静态(拓扑结构)和动态属性(负载的重分布)验证了失效后对网络造成级联崩溃效果的关键节点所具有的共同特征。由于构建的物流关联基础设施网络模型更加符合物流系统的实际运行特征,根据该方法评价节点的重要程度对于识别和保护关键基础设施具有更高的指导价值。下一步的工作重点是从级联失效的角度探索适用于大规模物流关联网络节点重要度评价的高效算法,使算法更具实用性。

参考文献:

- [1] Zhang Jianhua, Xu Xiaoming, Liu Hong, *et al.* Networked analysis of the Shanghai subway network in China[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2011, 390(23): 4562-4570.
- [2] Solé R V, Rosas-Casals M, Corominas-Murtra B, *et al.* Robustness of the European power grids under intentional attack[J]. *Physical Review E: Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics*, 2008, 77(2 Pt 2): 026102.
- [3] Wu Jianjun, Gao Ziyou, Sun Huijun. Effects of the cascading failures on scale-free traffic networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2007, 378(2): 505-511.
- [4] Helbing D, Armbruster D, Mikhailov A S, *et al.* Information and material flows in complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 363(1): 11-16.
- [5] 刘建国,任卓明,郭强,等. 复杂网络中节点重要性排序的研究进展[J]. *物理学报*, 2013, 62(17): 178901.
- [6] 谭跃进,吴俊,邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(11): 79-83.
- [7] 朱涛,张水平,郭戎满,等. 改进的加权复杂网络节点重要度评估的收缩方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(8): 1902-1905.
- [8] 王班,马润年,王刚,等. 加权网络节点重要性评估的改进节点收缩法[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(7): 2122-2124.
- [9] 王甲生,吴晓平,廖巍,等. 改进的加权复杂网络节点重要度评估方法[J]. *计算机工程*, 2012, 38(10): 74-76.
- [10] 吴俊,谭跃进,邓宏钟,等. 考虑级联失效的复杂负载网络节点重要度评估[J]. *小型微型计算机系统*, 2007, 28(4): 627-630.
- [11] 黄英艺,金淳. 综合节点邻域信息下的物流网络级联失效模型构建及分析[J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(9): 2625-2628.
- [12] 黄英艺,金淳. 物流基础设施网络级联失效下的抗毁性分析[J]. *控制与决策*, 2014, 29(9): 1711-1714.
- [13] 黄英艺,金淳,荣莉莉. 考虑运输有向性的物流网络级联失效模型[J]. *系统管理学报*, 2015, 24(5): 756-761.
- [14] 闫妍,刘晓,庄新田. 基于复杂网络理论的供应链级联效应检测方法[J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(3): 322-325.
- [15] Ouyang Min. Review on modeling and simulation of interdependent critical infrastructure systems[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2014, 121(1): 43-60.
- [16] Dueñas-Osorio L, Vemuru S M. Cascading failures in complex infrastructure systems[J]. *Structural Safety*, 2009, 31(2): 157-167.
- [17] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, *et al.* Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 1025-1028.
- [18] 吴润泽,张保健,唐良瑞. 双网耦合模型中基于级联失效的节点重要度评估[J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 1053-1058.
- [19] Wu Jianjun, Sun Huijun, Gao Ziyou. Cascading failures on weighted urban traffic equilibrium networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2007, 386(1): 407-413.
- [20] Motter A E, Lai Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. *Physical Review E: Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics*, 2002, 66(6 Pt 2): 065102.
- [21] Crucitti P, Latora V, Marchiori M. Model for cascading failures in complex networks[J]. *Physical Review E: Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics*, 2004, 69(4 Pt 2): 045104.
- [22] Zheng Jianfeng, Gao Ziyou, Zhao Xiaomei. Modeling cascading failures in congested complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2007, 385(2): 700-706.

下期要目

- ◆空间众包中的位置隐私保护技术综述
- ◆立方攻击研究综述
- ◆恶意PDF文档检测技术研究发展
- ◆基于容错改进的邻域粗糙集属性约简算法
- ◆结合用户聚类和评分偏好的推荐算法
- ◆基于并行图计算的社区划分方法
- ◆基于邻近相点聚类分析的多变量局部多步预测
- ◆基于最大偏差相似性准则的交通流聚类算法
- ◆基于主题分组与随机游走的App推荐算法
- ◆一种基于语义标注特征的金融文本分类方法
- ◆一种改进的基于《知网》的词语语义相似度算法
- ◆基于用户分类的隐含因子模型研究
- ◆大数据中基于熵加权的稀疏分数特征选择聚类算法
- ◆基于MapReduce框架下K-means的改进算法
- ◆一种规则与统计相结合的应用题句子语义角色识别方法
- ◆基于时序逆影响的随机游走推荐算法
- ◆基于手机信令和导航数据的出行方式识别方法
- ◆面向离散优化问题的量子协同演化算法
- ◆基于变异策略的自适应七星瓢虫优化算法
- ◆在线更新的信息强度引导启发式Q学习
- ◆基于加速度传感器的在途危险品行为姿态检测方法
- ◆打车软件混合随机均衡模型时间可靠性研究
- ◆不确定条件下航路点布局优化研究
- ◆全局EDZL实时调度算法的可调度性判定