

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*

黄英艺, 金 淳

(大连理工大学 管理与经济学部, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 级联失效对物流网络的安全运作具有重要影响。基于节点邻域信息构建相应的级联失效模型, 分析研究物流网络的级联失效问题。数值仿真结果表明: 较低的安全负载能力配置可很大程度上抵御级联失效的破坏; 重要度越大的节点的失效对网络的平均破坏程度越大; 节点平均度越大的网络结构对级联失效的抵御能力越强。这可为物流网络应急规划及应急控制研究提供理论指导。

关键词: 物流网络; 级联失效; 邻域信息; 重要度; 突发事件

中图分类号: N945.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)09-2625-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.017

Model and analysis for cascading failure on logistics network based on local information of nodes

HUANG Ying-yi, JIN Chun

(Faculty of Management & Economics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: Cascading failure of the logistics network caused by emergency can have great effect on the security operation of the network. For this reason, this paper built a cascading failure model based on the local information of logistics nodes, for studying and analyzing the effect on the logistics network. The simulation results indicate that: it can resist largely damage caused by cascade failure with less load capacity setting. The more important the node is, the more destructive to logistics network if it failed. The greater the average degree of logistics network, the stronger ability to resist the cascading failure. Lastly, the research has academic guidance significance to enhance the efficient to emergency program and control efficiency in the logistics network.

Key words: logistics network; cascading failure; local information; importance; emergency

0 引言

随着各方面技术的发展, 物流系统网络化发展已渐成趋势^[1]。突发事件下的微小“扰动”均可通过其网络结构形成级联失效(cascading failure)传播^[2]。所谓级联失效是指当网络节点因故失效后, 其上负载依据节点间的耦合关系被重新分配给其邻接节点, 从而导致邻接节点超负荷而引发相继失效的连锁反应过程^[3]。级联失效不仅给各类复杂系统正常运行造成影响, 还可引发灾难性事故^[4]。近来, 该方面的相关研究已逐渐成为新热点。其中大部分研究主要集中于交通^[5]、基础设施^[6]、电力网络^[7,8]和 Internet^[9]方面。对于物流网络级联失效问题的研究相对较少^[10-12]。

现有研究大多是基于各自系统特征和结构下所构建出的级联失效模型, 并不适用于物流网络方面的级联失效相关问题的研究。另外, 网络结构、路由规则等级联失效重要影响因素^[13,14]在物流网络和交通、电力等其他网络中的表现并不相同。物流网络所具有的节点服务功能、地理位置、边的传输功能差异性以及整体网络结构等特征因素都将对其上的级联失效负载再分配机制及最终的评估结果产生重要影响。目前缺

乏考虑上述因素下的物流网络级联失效模型的研究。

针对上述问题, 本文通过对物流网络结构特征分析, 基于物流节点功能、地位、地理位置以及边权差异性等实体特征综合度量节点的网络重要度, 并在此基础上构建相应的物流网络级联失效模型及其失效负载再分配准则, 分别从节点安全负载能力、不同重要度下的节点失效以及网络结构的复杂程度三方面对物流网络级联失效的相关问题进行分析研究, 用于确定既定物流结构在未来安全应急负载能力规划的配置比例, 揭示重要性物流节点或“薄弱环节”并加以保护, 改善网络结构建设, 以减少或抵御突发事件级联失效的影响。

1 物流网络及节点重要度

业务量作为现实物流网络的动态演化因素^[15], 其在网络级联失效传播过程的载体表现为节点的重要性程度, 越重要的物流节点所承载的业务负载量也越大, 失效负载的再分配准则对其依赖度也越强。但物流节点在网络中的重要性程度将受到其功能、地理位置甚至局域内所有关联节点信息的影响。因此, 如何综合上述各因素, 全面合理地度量物流节点在网络中的重要度问题成为本文首要解决的难点。为此, 首先针对物流

收稿日期: 2013-01-08; **修回日期:** 2013-03-04 **基金项目:** 国家教育部博士点基金资助项目(20100041110024)

作者简介: 黄英艺(1982-), 男, 福建泉州人, 博士研究生, 主要研究方向为物流管理及系统优化(huangyingyi31@163.com); 金淳(1963-), 男, 辽宁大连人, 教授, 博导, 主要研究方向为物流与供应链管理、系统仿真。

网络的结构特征展开分析,提出基于节点邻域内信息的综合度量方法。

1.1 网络结构特征

物流网络中节点主要提供流通加工、装卸、包装、配送、物流信息处理等服务功能。根据物流功能服务类型以及节点物流网络中的地位,可将物流节点大致分为以下两种类型:

- 依托枢纽型物流基础设施而建立的物流园区、配送中心和物流中心等中心型物流节点;
- 依托中心型节点所建立的客户、货运站等基础型物流节点。

一般情况下,诸如物流园区、物流中心等中心型物流节点在系统网络中具有突出重要的地位,与其具有业务关联的邻接节点数量众多,且其上的业务负载量也较大。相对而言,基础型物流节点的关联邻接节点数量较少,业务负载量也相对较小。另外,在网络中起着传输功能的边因各种实体因素,在信息传递或交通运输等功能性质方面具有一定差异性。

为便于研究,本文将实际物流网络抽象成理论拓扑网络,如图1所示,采用一个无向加权图 $G^W = \{V, W\}$ 来表示。其中: $V = \{v_i\}$ 为物流节点集合, $i = 1, 2, \dots, N$; $W = \{w_{ij}\}$ 为边权集合, $w_{ij} = w_{ji}$, $1 \leq i, j \leq N, i \neq j$ 。结合实际物流运作特征,本文提出采用时间距离来度量边权差异性特征。所谓时间距离即为完成节点间指定物流业务的耗时。

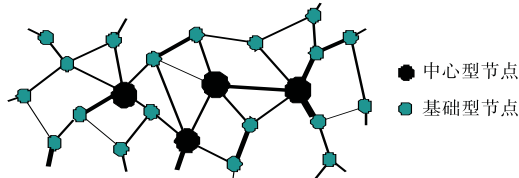


图1 物流网络拓扑结构

于是,物流网络可通过一个时间距离矩阵 $T = [t_{ij}]_{N \times N}$ 来表示,其中边权满足

$$w_{ij} = \begin{cases} 1/t_{ij} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (1)$$

其中: t_{ij} 即为任意节点 v_i 和 v_i 的时间距离。

根据相关研究表明,物流节点的失效远比边失效更易引发网络的级联失效现象^[11]。为此,本文将主要针对节点失效所引发的网络级联失效问题展开分析研究。由于作为级联失效动态演化因素的业务负载量的大小主要依赖于节点在网络中的功能、地理位置以及局域内其他关联节点信息包括边的功能差异性。

本文在此提出一种综合考虑节点邻域信息下的重要度量方法。

1.2 节点重要度

既有的相关研究大多采用度或介数的定义方式来表征节点在网络中的重要度^[7,11],其中节点的度即为邻接节点的数量,介数为网络中所有最短路径途径该节点的路径数目比例,其计算方式可参见文献^[10]。而根据物流网络的特征分析可知,度或介数相同的物流节点在网络中的重要度却不一定相同。这是因为相同度或介数的物流节点除了功能、地理位置差异外,还受到了节点间的物流业务关联程度的影响,而后者恰好归结为物流网络的边的功能差异性以及节点邻域内的其他关联节点信息影响的度量问题。因此,既有的方法在刻画物流

节点的网络重要性程度有失全面合理性。为此,本文首先在物流网络时间距离矩阵 T 的基础上构建一个节点间的边传输效率矩阵 H_E ,具体如式(2)所示。

$$H_E = \begin{bmatrix} 1 & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & 1 & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据 H_E 可获得任意物流节点 v_i 在网络中的综合业务传输效率 I_i ^[17],具体计算见式(3)。

$$I_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \quad (3)$$

于是,通过该效率 I_i 可反映出任意物流节点 v_i 对其邻接节点在业务传递中的平均难易程度,并间接综合考虑了诸如物流信息传递快慢或货物运输距离远近等物流网络的边的功能性质差异性。

其次,本文构建一个物流节点间的业务影响系数矩阵 H_R 来表征节点间的物流业务影响程度。通过该矩阵有效地综合度量了节点邻域内的其他关联节点信息影响。矩阵 H_R 具体如式(4)所示,其中 μ_{ij} 定义为节点间的业务关系,并规定当任意节点 v_i 和 v_j 间具有业务联系则 $\mu_{ij} = 1$; 否则, $\mu_{ij} = 0$ 。 D_i 为任意节点 v_i 的度, $\langle k \rangle$ 为网络节点平均度。

$$H_R = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu_{12}D_1}{[(D_1+D_2)\langle k \rangle]} & \cdots & \frac{\mu_{1n}D_1}{[(D_1+D_n)\langle k \rangle]} \\ \frac{\mu_{21}D_2}{[(D_2+D_1)\langle k \rangle]} & 1 & \cdots & \frac{\mu_{2n}D_2}{[(D_2+D_n)\langle k \rangle]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\mu_{n1}D_n}{[(D_n+D_1)\langle k \rangle]} & \frac{\mu_{n2}D_2}{[(D_n+D_2)\langle k \rangle]} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

该业务影响系数矩阵 H_R 是以节点在网络中的初始平均重要度 $D_i/\langle k \rangle$ 结合节点的平均业务分配系数 $1/D_i$ 以及彼此间的相互影响权重 $D_i/(D_i+D_j)$ 所获得的各物流节点间的业务影响系数,具体计算方式如式(5)所示。

$$\frac{D_i}{[(D_i+D_j)\langle k \rangle]} = \frac{D_i}{\langle k \rangle} \times \frac{1}{D_i} \times \frac{D_i}{D_i+D_j} \quad (5)$$

通过该方法,网络中不同地位或服务功能节点间的彼此业务影响因子得到了有效区分,克服了仅以度大小进行平均分配 $(1/D_i)$ 所带来的不合理问题。

结合上述物流节点间传输效率矩阵 H_E 及业务影响系数矩阵 H_R ,本文构建出物流网络节点间业务关联强度矩阵 H ,见式(6),其中的元素满足 $H_{ij} = I_i \cdot H_{Eij} \cdot H_{Rij}$ 。 H_{Eij} 和 H_{Rij} 分别表示物流节点 v_i 对邻接节点 v_j 的物流业务传输效率和业务影响系数。

$$H = \begin{bmatrix} I_{11} & \frac{\mu_{12}I_{12}D_1}{[(D_1+D_2)\langle k \rangle]} & \cdots & \frac{\mu_{1n}I_{1n}D_1}{[(D_1+D_n)\langle k \rangle]} \\ \frac{\mu_{21}I_{21}D_2}{[(D_2+D_1)\langle k \rangle]} & I_{22} & \cdots & \frac{\mu_{2n}I_{2n}D_2}{[(D_2+D_n)\langle k \rangle]} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\mu_{n1}I_{n1}D_n}{[(D_n+D_1)\langle k \rangle]} & \frac{\mu_{n2}I_{n2}D_n}{[(D_n+D_2)\langle k \rangle]} & \cdots & I_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

最后,基于该业务关联强度矩阵 H 计算可获得任意节点 v_i 的节点重要度 S_i ,如式(7)所示。

$$S_i = \sum_{v_j \in \Gamma_i} H_{ij} + \sum_{v_j \in \Gamma_i} H_{ji} \quad (7)$$

其中:邻域 Γ_i 为节点 v_i 的邻接节点集合, $\forall v_i, v_j \in V$ 。

通过上述定义方法对物流节点网络重要度的综合量化,有

效地融合了实际物流网络中的节点地位、功能、地理位置信息、边功能差异性以及节点邻域内的其他关联节点信息等多方面主客观影响因素,所得结果较为全面合理。

2 级联失效模型

在基于节点重要度合理度量的基础上,构建如下级联失效模型。

2.1 网络初始负载

首先给出物流网络相关初始负载的量化定义,假设任意物流节点 v_i 的节点初始负载 $L_i(0)$ 为

$$L_i(0) = \alpha S_i + (1 - \alpha) \cdot \sum_{v_j \in \Gamma_i} S_j \quad (8)$$

参数 α 和 $1 - \alpha$ 分别为节点自身及邻接关联节点重要度的影响权重, $\forall v_i, v_j \in V$ 。

其次,假设任意节点 v_i 的负载能力为 C_i 。而正常运作下的物流网络,节点的负载必然处于负载能力可承受范围之内,即满足 $L_i \leq C_i$ 。因此,节点的负载能力可通过其初始负载加以表征,具体如式(9)所示。

$$C_i = (1 + \beta) L_i(0) \quad (9)$$

其中: β 为负载能力控制参数, $\beta > 0$ 。

考虑到物流基础设施的建设周期长、成本耗费较大的情况,物流节点的负载能力是不轻易变动的。但随着物流应急管理的需要,对既有物流节点能力的额外安全配置已成为不可或缺的环节,实现这一环节的主要措施是通过分析节点级联失效传播后网络达最佳抗毁能力时所需增加的安全应急负载能力(简称安全负载能力,可通过参数 β 间接计算获得),这也正是本文所构建模型的应用之处。于是通过该模型的仿真分析,获得使物流网络达最佳抗毁能力时的参数阈值 β_θ ,即可相应地确定各安全负载能力。

2.2 分配准则

首先介绍失效负载的传递机制,如图2所示。假设任意节点 v_f 失效,其上的负载分配量(假设为 $\Delta L_{f \rightarrow bx}$)向邻接节点 v_{bx} ($x = 1, 2, 3$) 进行转移。当 v_{bx} 获得的额外负载量加上自身的实时负载(假设为 L_{bx}) 超出了可承受的负载能力时,节点 v_{bx} 随即也崩溃失效,造成二次失效负载的再分配传递的连锁反应过程。

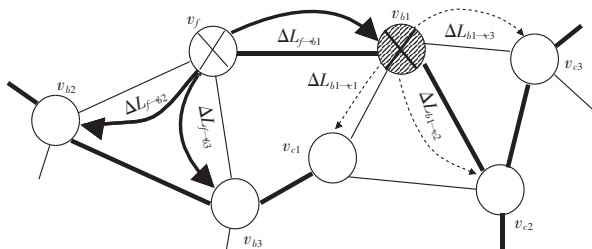


图2 失效负载的传递机制

节点失效后负载的如何分配成为失效传递的关键性影响因素之一。目前的研究大多根据邻接节点数量进行平均分配^[9,10,18]。然而易知物流节点在网络中的重要性程度及其负载能力是不一样的,平均分配并不能完全有效合理地反映实际情况,间接影响网络的抗毁性度量结果的准确性,继而影响到对整体物流网络安全负载能力掌握控制的准确性。

为此,本文提出基于物流节点重要度与节点负载能力相结

合的失效负载再分配准则。具体如式(10)所示,假设任意物流节点 v_i 突发失效,其上负载将以 P_j 比例的失效负载向邻接节点 v_j 进行转移。

$$P_j = \gamma \frac{S_j}{\sum_{v_\eta \in \Gamma_j} S_\eta} + (1 - \gamma) \frac{C_j}{\sum_{v_\eta \in \Gamma_j} C_\eta} \quad (10)$$

其中: Γ_j 为节点 v_j 的邻接节点集合; γ 与 $1 - \gamma$ 分别为物流节点的网络重要度和负载能力对分配准则的影响权重。当 $\gamma = 1$ 时,物流节点的网络重要性程度将完全决定失效负载的再分配;当 $\gamma = 0$ 时,则将是物流节点的负载能力作为决定性因素。可见,该准则具有良好的可调性及适用性。

于是,根据式(10)的分配准则,任意邻接物流节点 v_j 将获得额外的业务负载(记为 $\Delta L_{i \rightarrow j}$) 大小为

$$\Delta L_{i \rightarrow j} = L_i \cdot P_j \quad (11)$$

2.3 失效传播函数

当邻接节点 v_j 分担的额外失效负载分配量 $\Delta L_{i \rightarrow j}$ 加上节点自身的实时物流负载量 $L_j(t)$ 超出了自身的负载能力 C_j ,即满足 $L_j(t) + \Delta L_{i \rightarrow j} > C_j$ 时,邻接节点 v_j 随即崩溃失效。为有效描述该失效负载传递演化的动力学传播过程,定义 t 时刻任意节点 v_i 的失效传播函数 $F_i(t)$ 如式(12)所示。

$$F_i(t) = \begin{cases} 0 & L_i(t) \leq C_i \\ 1 & L_i(t) > C_i \end{cases} \quad (12)$$

其中:以“0”标记 t 时刻节点 v_i 的正常运作状态;以“1”标记 t 时刻 v_i 处于失效状态。

2.4 评估指标

传统图论研究大多采用网络连通系数和介数等指标^[19]。考虑到这些指标计算的时间复杂度,本文将以节点损失数目统计作为物流网络级联失效后的抗毁性能评估指标,其计算方法具体如下^[7]:

$$CF = \frac{\sum_{v_i \in V} CF_i}{N(N-1)} \quad (13)$$

其中: CF_i 为节点 v_i 崩溃失效后导致其他节点失效的个数, $0 \leq CF_i \leq N - 1$ 。该指标值越大,说明突发事件级联失效对网络的破坏性越大,网络的抗毁性能越差。

3 数值仿真及分析

本文采用一个节点规模为 $N = 200$ 的网络模型作为仿真对象。该节点规模已基本可覆盖一般的区域物流系统,其中节点平均度 $\langle K \rangle = 5$ 。本文将针对给定的物流网络模型分别从安全负载能力、不同类型节点和不同网络结构三方面对该网络的级联失效问题进行分析研究。为便于研究,以下均取 $\gamma = 0.5$ 。

1) 网络的安全负载能力规划分析

针对给定物流网络的安全负载能力进行分析,并通过控制参数 β 表现出。仿真结果如图3所示。

由图3可知:

a) 当安全负载能力比例 $\beta \leq 0.02$ 时,节点失效所产生的破坏可导致整体物流网络完全崩溃(CF 值 ≈ 1)。可见,物流节点失效所带来的破坏性不容忽视。

b) 随着 β 值的增大, CF 值迅速减小。这说明随着安全负载能力比例的增大,物流网络对于突发事件级联失效的抗毁能力也逐渐得到加强。可见,对物流网络进行安全负载能力配置

后,可有效化解突发事件级联失效所带来的破坏性。

c) 当 $0.08 \leq \beta \leq 0.09$ 时, CF 值被严格控制在 0.1 以下,即只要针对各物流节点进行 8%~9% 的安全负载能力提升配置后就可有效地大量缓解网络级联失效破坏程度。

d) 基于建设成本因素^[18]及网络破坏程度最小化的双重要求,可获得一个关键性阈值 $\beta_0 = 0.0825$,即以 8.25% 的网络安全能力建设成本的投入缓解了 90% 左右的级联失效破坏。这对于企业或者物流规划者来说,是经济合理可行的。

综上所述,针对既有物流网络结构的级联失效分析,不仅可有效地预见未来突发事件节点失效对整体物流网络所造成的破坏性程度,还可为应急规划设计与应急措施制定提供一定的理论支持。

2) 不同重要度节点的失效分析

根据对物流网络的结构特征分析可知,中心型和基础型两种物流节点的网络重要度有所差异,因而在失效后对整体网络造成的破坏程度应该也有所区别。为研究该问题,本文将针对不同重要度下的节点失效对整体物流网络的破坏影响展开分析研究。按照最大重要度和最小重要度两种策略顺序选取比例为 P 的节点分别进行级联失效仿真实验。仿真结果分别如图 4 和 5 所示,横坐标为节点选取比例 P ,纵坐标为 CF 值。

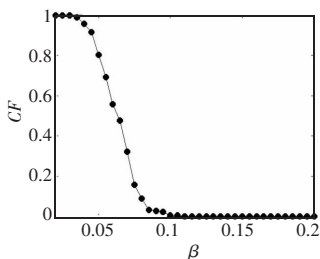


图3 物流网络的安全负载能力系数

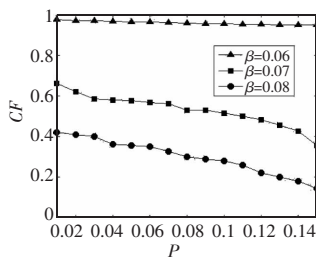


图4 最大重要度节点失效下的CF值

a) 根据图 4 可知,随着 P 值的增大(节点平均重要度变小), CF 值却减小。这说明随着节点重要度的减小,其失效后对网络的破坏程度也相应减小。另外,当 $\beta = 0.06$ 时, $CF \geq 0.95$,可见对于高重要度节点的安全负载能力设置低于既定能力 6% 时,网络仍然面临极高的损坏风险。

b) 根据图 5 可知,随着 P 值的增大(节点平均重要度增大),特别是 $\beta \leq 0.08$ 时, CF 值增大。这说明随着节点重要度的增大,其失效后对网络的破坏程度也相应加大。另外,当 $\beta = 0.08$ 时, $CF \approx 0$ 。可见对于低重要度节点的安全负载能力设置高于既定能力 8% 时,就可有效控制低重要度节点失效给网络造成的巨大破坏,甚至保障了网络强健的抗毁性能力。

c) 对比两图。当 $\beta \approx 0.08$,图 4 中 $CF \geq 0.26$,图 5 中 $CF \leq 0.07$ 。可见,不管安全负载能力的大小设置,重要度高的节点失效对于整体网络的破坏程度高于甚至是远高于重要度小的物流节点。

3) 网络结构复杂程度对级联失效的影响分析

考虑到现实环境下,不同企业或者不同区域的物流组织或业务密度,其网络结构也有所差别(可通过节点平均度 $\langle K \rangle$ 表现, $\langle K \rangle$ 值越大表明该网络结构越复杂),可能使得在面对突发事件级联失效的抗击能力有所差异。为此,本文针对该问题展开分析。在上述节点规模 $N=200$ 、节点平均度 $\langle K \rangle=5$ 的网络模型基础上,再分别选取节点平均度 $\langle K \rangle$ 为 5~12 不等的七个

相同节点规模的物流网络结构进行仿真实验,结果如图 6 所示。其中,纵坐标为网络破坏程度评估值 CF ,横坐标为相应的安全负载能力设置比例参数 β 。

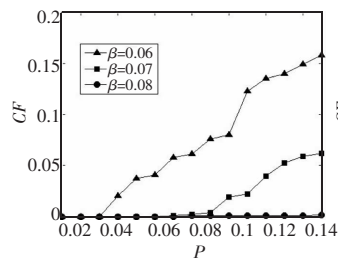


图5 最小重要度节点失效下的CF值

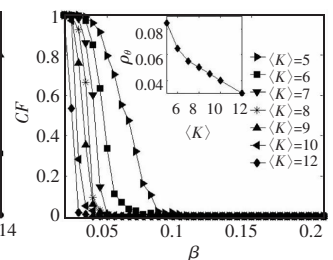


图6 不同网络结构复杂性下的β值

根据图 6 可知: $\langle K \rangle$ 值越大的网络,相同 CF 值下的 β 值却越来越小,特别是关键性阈值 β_0 (见图 6 中的子图)随着 $\langle K \rangle$ 值的增大而逐渐减小。这说明随着网络结构的复杂化,其抵御节点失效破坏程度的抗击能力也越来越强。因此,物流网络结构的复杂性程度对于突发事件级联失效破坏的抵御能力有着积极的作用。

4 结束语

本文基于物流网络的结构特征分析构建了相应的级联失效模型,针对物流节点安全负载能力规划以及节点重要度、网络结构复杂性对网络级联失效影响等视角分别展开研究。相关研究结论有:

- a) 以低于 10% 的较小的安全负载能力配置即可规避 90% 左右的网络级联失效破坏性风险。
- b) 重要度越高的节点,其失效给物流网络造成的破坏程度越高。
- c) 结构程度复杂的物流网络,其抵御突发事件级联失效的抗毁能力越强。特别是当节点平均度 $\langle K \rangle \geq 12$ 的网络结构具有很强的级联失效抵御破坏的能力。

通过该模型及其分析研究不仅可为既定物流网络的未来应急规划提供理论支持,而且可用于识别网络中的重要性节点,以便采取相应措施加以保护,有效维护物流网络系统运作的可靠性;另外,还可为加强物流网络结构复杂性建设以抵御突发事件级联失效破坏提供理论支持。最后,希望该研究可为其他相关领域的应急管理研究提供帮助。

参考文献:

- [1] 徐杰,鞠颂东. 物流网络的内涵分析[J]. 北京交通大学学报, 2005,4(2):22-26.
- [2] 秦绪伟,唐立新. 面向干扰事件的可靠物流系统设计研究进展[J]. 控制与决策,2010,25(2):161-165.
- [3] LORENZ J, BATTISTON S, SCHWEITZER F. Systemic risk in a unifying framework for cascading processes on networks[J]. European Physical Journal B, 2009,71(4):441-460.
- [4] SOLÉ R V, MARTÍ R C, BERNAT C M, et al. Robustness of the European power grids under intentional attack[J]. Physical Review E, 2008,77(2):(1-7).
- [5] WU J J, SUN H J, GAO Z Y. Cascading failures on weighted urban traffic equilibrium networks[J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007,386(1):407-413.
- [6] 韩传峰,张超,刘亮. 关键基础设施网络连锁反应模型[J]. 系统仿真技术,2010,6(2):121-125.

$$D = \begin{bmatrix} 1 & T & T & \sim 1 & T & 1 \\ 0 & 1 & 0 & \sim 1 & T & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & \sim 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在下一轮循环计算时没有找到新的循环可达关系,程序终止。

在获得三型循环可达关系后,从可达矩阵 D 中可以直观地获得状态与状态之间的可达关系。例如, $d_{14} = \sim 1$ 表示状态 s_1 循环可达状态 s_4 , 状态 s_1 到 s_4 有强循环规划解,即机器人在公平的条件下(能够跳出循环)能够从位置 l_1 移动到位置 l_4 ; $d_{15} = 1$ 表示状态 s_1 确定可达状态 s_5 , 状态 s_1 到 s_5 有强规划解,即机器人能够从位置 l_1 确定移动到位置 l_5 ; $d_{16} = T$ 表示状态 s_1 不确定可达状态 s_6 , 状态 s_1 到状态 s_6 有弱规划解,即机器人能够(但不保证)从位置 l_1 移动到位置 l_6 ; $d_{23} = 0$ 表示状态 s_2 不可达状态 s_3 , 即机器人不能够从位置 l_2 确定移动到位置 l_3 。

7 结束语

本文首次提出了状态循环可达关系,阐述了求状态循环可达关系的方法,并证明了方法的正确性,且运用该方法进行了实例的说明和分析,实例结果表明,该方法可以有效地获得状态循环可达关系。对于一个不确定状态转移系统,在获得状态可达关系后,求规划解时可以通过状态可达信息删除对构成规划解无用的状态动作序偶,使规划问题的求解变得快速和简单。在不确定多机器人规划领域,可以为机器人提供可达信息,减少冗余计算,提高计算效率。

在求状态可达关系问题上还有很多工作有待研究,如:

a) 设计基于可达关系的不确定多机器人规划算法。不确定多机器人规划难以检测和判断冲突。在拥有可达关系的情况下每个机器人可以根据自己所处的状态和目标状态在可达矩阵中快速搜索到规划解,再按时序与其他机器人作冲突检测,最终得到一个没有冲突的协同规划。

b) 设计可达关系在可扩展目标的规划问题和部分可观察的规划问题的应用算法,依据可达关系可以使系统快速地掌握可达路径信息,以便选择可扩展目标的规划解和避开不可观察

的状态。

参考文献:

- [1] HUANG W, WEN Zhong-hua, JIANG Yun-fei, *et al.* Comparison between two languages used to express planning goals: CTL and EAGLE [C]//Proc of PRICAI. London: Springer-Verlag, 2006: 180-189.
- [2] CIMATTI A, ROVERI M. Conformant planning via model checking and heuristic search [J]. *Artificial Intelligence*, 2004, 159 (1-2): 127-206.
- [3] RINTANEN J. Backward plan construction under partial observability [C]//Proc of the 6th International Conference on AAAI. [S. l.]: AAAI Press, 2002: 173-182.
- [4] BERTOLI P, CIMATTI A, ROVERI M, *et al.* Strong planning under partial observability [J]. *Artificial Intelligence*, 2006, 170 (1): 337-384.
- [5] CIMATTI A, ROVERI M, TRAVERSO P. Automatic OBDD-based generation of universal plans in non-deterministic domains [C]//Proc of AAAI. [S. l.]: AAAI Press, 1998: 875-881.
- [6] CIMATTI A, ROVERI M. Conformant planning via symbolic model checking [J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2000, 13 (1): 305-338.
- [7] CIMATTI A, PISTORE M, ROVERI M, *et al.* Weak, strong, and strong cyclic planning via symbolic model checking [J]. *Artificial Intelligence*, 2003, 147 (1-2): 35-84.
- [8] 文中华, 黄巍, 刘任任, 等. 模型检测规划中的状态分层方法 [J]. *软件学报*, 2009, 20 (4): 858-869.
- [9] HUANG Wei, WEN Zhong-hua, JIANG Yun-fei, *et al.* Structured plans and observation reduction for plans with contexts [C]//Proc of IJCAI. [S. l.]: AAAI Press, 2009: 1721-1727.
- [10] HUANG Wei, WEN Zhong-hua, JIANG Yun-fei, *et al.* Observation reduction for strong plans [C]//Proc of IJCAI. [S. l.]: AAAI Press, 2007: 1930-1935.
- [11] 陈建林, 文中华, 朱江, 等. 正向搜索方法求强规划解 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47 (6): 52-54.
- [12] 文中华, 黄巍, 刘任任, 等. 模型检测规划中的状态之间的可达关系研究 [J]. *计算机学报*, 2012, 35 (8): 1634-1643.
- [13] 胡雨隆, 文中华, 常青, 等. 不确定规划中非循环可达关系的求解方法 [J]. *计算机仿真*, 2012, 29 (5): 114-117.
- [14] PU Cun-lai, ZHOU Si-yuan, WANG Kai, *et al.* Efficient and robust routing on scale-free networks [J]. *Physical A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, 391 (3): 866-871.
- [15] 于海生, 赵林度, 来向红. 基于交易量的供应链网络演化模型研究 [J]. *管理学报*, 2009, 6 (2): 187-191.
- [16] CALLAWAY D S, NEWMAN M E J, STROGATZ S H, *et al.* Network robustness and fragility: percolation on random graphs [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85 (25): 5468-5471.
- [17] BOCCALETTI S, LATORA V, MPRENO Y, *et al.* Complex networks: Structure and dynamics [J]. *Physics Reports*, 2006, 424 (4-5): 175-308.
- [18] 王建伟, 荣莉莉, 王铎. 基于节点局域特征的复杂网络上相继故障模型 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13 (8): 42-50.
- [19] 杨孝平, 尹春华. 复杂网络可靠性评价指标 [J]. *北京信息科技大学学报*, 2010, 25 (3): 92-96.
- [7] WANG Jian-wei, RONG Li-li. Robustness of the western United States power grid under edge attack strategies due to cascading failures [J]. *Safety Science*, 2011, 49 (6): 807-812.
- [8] WEI Du-qu, LUO Xiao-shu, ZHANG Bo. Analysis of cascading failure in complex power networks under the load local preferential redistribution rule [J]. *Physical A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, 391 (8): 2771-2777.
- [9] WANG J, LIU Y H, JIAO Y, *et al.* Cascading dynamics in congested complex networks [J]. *European Physical Journal B*, 2009, 67 (1): 95-100.
- [10] 闫妍, 刘晓, 庄新田. 基于复杂网络理论的供应链级联失效检测方法 [J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44 (3): 322-325.
- [11] 李勇, 吴俊, 谭跃进. 容量均匀分布的物流保障网络级联失效抗毁性 [J]. *系统工程学报*, 2010, 25 (6): 853-860.
- [12] 姬利娟, 帅斌, 种鹏云. 级联失效特性下的危险品运输路径选择研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2012, 22 (7): 77-81.
- [13] MISHKOVSKI I, BIEY M, KOCAREV L. Vulnerability of complex networks [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16 (1): 341-349.

(上接第 2628 页)