

基于复杂网络理论的流程工业系统安全性分析

姜洪权, 高建民, 陈富民, 高智勇, 李果

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 以复杂网络理论为基础, 通过对流程工业系统的结构脆弱性分析, 提出了一种新的系统安全性评估方法. 通过构建流程工业系统网络模型、分析其拓扑结构特性和固有特征, 建立了基于复杂网络特性的连锁故障模型, 用该模型对网络中故障点所引起的级联效应进行了分析, 并对连锁故障的严重程度进行了仿真. 以田纳西-伊斯曼化工过程为例, 对所提出的方法进行了分析验证, 结果表明, 该方法可以从复杂网络角度分析和理解系统连锁故障的本质, 识别系统中的关键点和脆弱点, 为安全控制和故障预防系统的合理设计提供了依据.

关键词: 流程工业系统; 复杂网络; 安全性分析; 连锁故障

中图分类号: TH11; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0806-05

Safety Analysis to Process Industry System Based on Complex Networks Theory

Jiang Hongquan, Gao Jianmin, Chen Fumin, Gao Zhiyong, Li Guo

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Analyzing the structural vulnerability of the process industry system, a new method for system safety based on the complex networks theory is proposed. The network model of the process industry system is constructed and the inherent topological structure characteristics are investigated. Subsequently, to study the cascade effect caused by the fault of a node in the network, a cascading failure model based on the basic characteristic parameters of the network is proposed, and then the damage of cascading failure triggered by a single node in the system is simulated. A case study of Tennessee-Eastman process is provided to illustrate the feasibility of the proposed method. The simulation results show that the mechanism of cascading failures can be analysed and understood from a complex network perspective, and the method enables to find the critical node and the crisp node of the process industry system for design the system of the safety control and failure prevention.

Keywords: process industry system; complex network; safety analysis; cascading failure

随着流程工业生产规模的不断扩大, 组成其生产过程的机电设备装置及工作环境日趋复杂, 生产系统的安全运行问题也日益突出^[1], 特别是化工等流程工业的频繁事故引起了人们极大关注. 传统的对系统进行安全性分析的方法, 如故障模式及效果分析(FMEA)方法、马尔可夫故障模型(Markov)方法等, 研究对象多放在被认为是关键的单台设备上,

或者关键环节上, 主要从故障的因果关系、先验概率等角度入手进行定性或定量的分析. 然而, 现实中系统故障的表现形式复杂多样, 掌握所有故障模式的因果机理是比较困难的, 从而限制了以上方法应用的有效性. 因此, 从系统固有结构的角度研究系统的运行安全性和稳定性问题, 不仅可以避免恶性事故的发生, 而且具有重要的现实意义和应用价值.

近几年来,人们从网络的角度研究现实世界的一些现象,使复杂网络理论得到了长足发展.复杂网络理论通过研究现实世界的网络拓扑性质、静态特性和动态特性来探索复杂系统中一些现象的本质,如电网的大面积停电事故、疾病在人群中的传播等.化工等流程工业生产系统,其实质是一个由流体、能源动力、电力、信号和控制机构等多介质耦合而成的一个复杂机电系统网络,系统任何一个局部的细小故障都可能通过网络进行传播、积累和放大,最终酿成重大事故.本文以复杂网络理论为基础,通过构造流程工业复杂网络,来研究工业网络的拓扑结构特性,通过建立连锁故障模型,研究故障点对系统的影响,探索系统故障发生传播的机理,分析系统的关键点和脆弱点,探讨系统本身所具有的结构脆弱性,从系统的角度预防事故的发生,从而提高系统安全控制的有效性.

1 复杂网络模型及统计特性

1.1 复杂系统网络模型

现实世界中存在着大量的复杂系统,如果忽略系统中真实个体的具体物理意义,将其抽象成一个节点,用点之间的连线代表个体之间的联系,复杂系统就可以用网络模型来描述,例如规则网络和随机网络.在20世纪50年代后至21世纪初,随机网络一直被认为是描述真实系统最适宜的网络.但是,最近几年学者们发现,大量真实网络的拓扑结构性质有别于以往研究的网络,且节点众多,这类网络被称为复杂网络.

复杂网络的一个重要模型是小世界网络,1998年Watts和Strogatz通过以某个很小的概率 p 切断规则网络中原始的边,并随机选择新的端点重新连接,构造出了一种介于规则网络和随机网络之间的网络^[2](见图1),随后,Newman和Watts也构造出了NW网络.这2种网络都具有大的集群系数和小的平均距离,而具有这2个统计特征的网络被称为小世界网络.

另外,复杂网络模型除了小世界网络模型外,还包括无标度网络、局部演化网络等,关于复杂网络更

为详细的描述参见文献[3-4].

1.2 复杂网络统计特性

一般通过以下几个网络的基本量来描述复杂网络的特性.

(1) 平均路长.网络的平均路长(特征路径长度)描述了网络中节点间的分离程度,即网络有多小,其表达式为

$$L = \frac{1}{n(n-1)/2} \sum_{1 \leq i, j \leq n} D(i, j) \quad (1)$$

式中: n 为节点数目; $D(i, j)$ 表示两相通节点 i, j 间的距离,即2个节点之间最短路径边的数目.

(2) 集群系数.集群系数是衡量近邻节点联系紧密程度的特征参数(聚类系数),即

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2t_i}{k_i(k_i-1)} \quad (2)$$

式中: k_i 表示节点 i 的度数(连接边数); t_i 表示节点 i 的近邻节点之间存在的连接边数.

对于以上特性,现实中的网络往往表现出平均路长短,集群系数大,即节点高度集团化等性质,与随机网络性质有很大的不同.另外,随着对网络研究的不断深入,一些重要的统计性质也不断被发现,如节点度分布、网络介数和网络弹性等^[4-5].

2 流程工业系统的网络特性

2.1 现实网络中的小世界特性及其影响

小世界网络同时具有大的集群系数和较小的平均距离,其几何性质可表示为

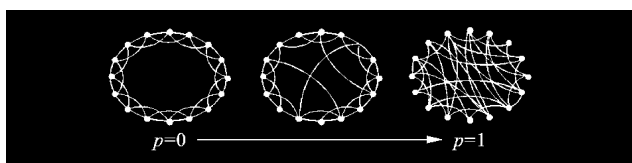
$$\left. \begin{aligned} C &\gg C_r \\ L &\geq L_r \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$C_r \approx k/n, \quad L_r \approx \ln(n)/\ln(k)$$

式中: C_r 和 L_r 分别表示随机网络的集群系数和平均路长; k 为平均节点度数. Albert等人^[4]通过研究并总结了多位学者的研究成果后发现,现实中常见的网络大多具有小世界特性(见表1).

表1 实际网络的小世界现象^[4]

网络	节点数	平均 度数	L	L_r	C	C_r
www. site web	153 127	35.21	3.10	3.35	0.11	0.000 23
Power grid	4 941	2.67	18.70	12.40	0.08	0.005 00
C Elegans	282	14.00	2.65	2.25	0.28	0.050 00
Silwood Park food web	154	4.75	3.40	3.23	0.15	0.030 00
Ythan estuary food web	134	8.70	2.43	2.26	0.22	0.060 00



(a)规则网络 (b)小世界网络 (c)随机网络

图1 3种网络之间的关系

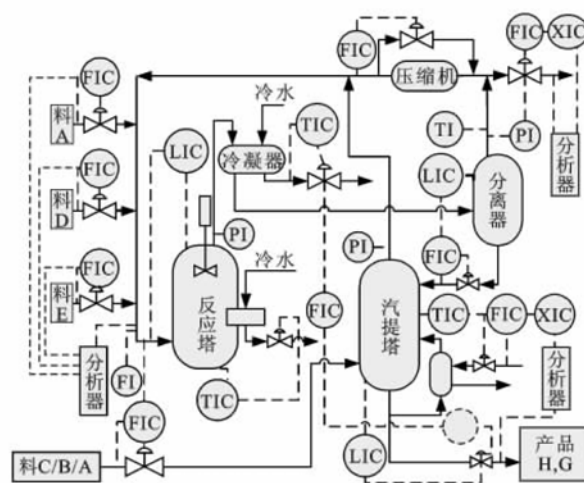
系统科学的一个基本观点认为系统结构决定了系统功能,网络的拓扑结构特性决定了网络的一些重要性质. Moore 等人^[6]研究了网络中的疾病传播行为,发现疾病在小世界网络中的传播阈值明显比在规则网络中小,在相同的传染强度和传染时间下,疾病在小世界网络中的传染范围明显大于其在规则网络中的传染范围,可见小世界网络特性对疾病的传播有很大促进作用. 国内学者林国基等人也利用小世界特性对 SARS 疾病传播进行了研究^[7],并得出了类似的结论. 一般地,集群系数对应着疾病传播的广度,平均路长代表着疾病传播的深度. 由式(3)可知,小世界网络兼具大的深度和宽的广度,如果工业系统网络具有小世界特性,那么将对故障的传播扩散起着很大的促进作用,其故障传播的速度和影响范围将高于相应的规则网络和随机网络.

2.2 流程工业系统复杂网络的构造及网络特性

现代流程工业的生产系统组成越来越复杂和庞大,根据系统论的观点,可以将生产系统看作是由各种基本单元(如各种设备、装置、子系统等)通过各种管路和线路连接而成,这些基本单元之间存在着错综复杂的相互作用关系,构成复杂的网络结构,以实现物质、能量、信号的交换与传递. 对流程工业系统的复杂网络构建如下:①忽略系统中各设备装置的现实意义,将其抽象成网络的一个节点,如大到生产子系统(反应塔等)、设备(冷凝器、控制器等),小到控制阀、传感器、电磁阀等,都可以在网络中以一个节点来表示;②用节点之间的连边代表它们之间的联系,这种联系可以是物质、能量交流(如某一成分流量),也可以是电气、控制信号(如一个阀体的控制信号);③如果没有联系则不予连接,这样就可以将系统转化成网络的形式.

本文对田纳西-伊斯曼化工过程工艺系统(TE 过程)进行复杂网络构造,工艺流程简图见图 2. TE 过程是美国 Eastman 化学公司依据一个真实的化工生产过程开发的开放式的化工模型仿真平台,主要工作流程是将 A、C、D、E 料(含少量惰性成分 B)在反应塔中生成产品 G、H 和副产品 F, G、H 经分离器和汽提塔提纯后送入下游工序. 有关该平台的详细描述见参考文献[8-9].

建造后的网络节点数有 67 个,包括 12 个控制阀、41 个传感器、8 个设备及 6 个物流原料供应设备. 由于该流程较为复杂,节点众多,限于篇幅,在此只能给出部分网络结构模型,如图 3 所示,各节点对应的部件名称如表 2 所示.

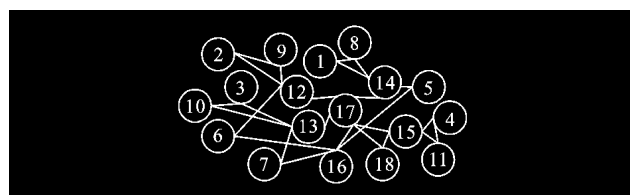


FIC、TIC、LIC、XIC、PI: 分别表示流量、温度、液位、成分和压力传感器; FI、TI: 非控制流量和温度传感器

图 2 TE 过程工艺流程简图

表 2 各节点对应的设备装置

节点	名称	节点	名称
1	A 的流量传感器	10	E 的给料设备
2	D 的流量传感器	11	C 的给料设备
3	E 的流量传感器	12	流量阀 1
4	C 的流量传感器	13	流量阀 2
5	A 的成分传感器	14	流量阀 3
6	D 的成分传感器	15	流量阀 4
7	E 的成分传感器	16	成分解析器
8	A 的给料设备	17	反应塔
9	D 的给料设备	18	液位传感器



1~18: 节点

图 3 TE 过程网络模型(部分)

为了便于计算机处理,用近邻矩阵 A 对构造的网络模型进行表示, A 中的元素 a_{ij} 规定为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{元素 } i \text{ 和 } j \text{ 相邻} \\ 0 & \text{元素 } i \text{ 和 } j \text{ 不相邻} \end{cases} \quad (4)$$

在得到网络的近邻矩阵后,利用式(1)、式(2)计算所构造的网络统计特性,结果见表 3. 根据式(3)可以看出,在同等节点规模下,该网络与随机网络相

比,具有较小的平均路长和大的集群系数,因此认为TE工业网络是具有小世界特性的。

表3 TE过程网络统计特性

网络	n	k	L	L_r	C	C_r
TE	67	2.59	4.413	4.407	0.626	0.038

3 网络特性的系统安全性评估

在已构建的TE工业网络拓扑特性的基础上,研究系统中故障点所引起的级联效应,对其造成的连锁故障的严重程度进行模拟,识别其运行时系统自身的危险环节和结构脆弱点,并以此对TE过程系统进行安全性分析。

利用本文第2.2节所构建的网络模型,对安全性模拟所用的一些度量进行如下定义。

定义1 在构建网络模型时,节点代表被忽略了实际物理意义的设备装置,连边代表设备装置之间物流、能流等交换的关系。假设某一时刻,这种交换通过任意节点对之间的最短距离来进行,则将所有经过某一节点的最短距离的总数目定义为该节点的负荷,即节点 i 的负荷 L_i 为网络中所有节点对之间最短路径经过节点 i 的条数。

定义2 节点负荷容量

$$C_i = (1 + \alpha)L_i \quad (5)$$

式中: L_i 为初始节点负荷; α 为安全裕度系数, $\alpha \geq 0$ 。

在负荷定义的基础上,节点负荷容量定义为该节点能处理所经过最短距离的最大数目,它是节点能否工作正常的一个限制参数,当某一节点的负荷超过节点自身的限度时就有可能发生故障。本文假设,如果节点负荷超过容量时就可以认为节点已发生故障。

定义3 故障严重判据

$$G_c = N'/N \quad (6)$$

式中: N 为某一节点故障前网络的总节点数; N' 为该节点故障后网络最大块的节点数。因此, G_c 值表明了节点故障对整个系统造成的严重程度, G_c 值越小,则说明故障影响越严重,反之故障影响就较轻。

连锁故障仿真的基本思路是选择网络中的任意一个节点发生故障,并将该节点及相应的连边从网络中删除,则必然导致网络中其他点的负荷发生变化,如果造成其他节点负荷超过自身的负荷容量,即发生节点故障,需继续删除节点和相应的连边,直到没有节点故障为止。最后,按照定义3来考察网络故

障的严重程度。

仿真算法步骤如下:①依据式(4)确定网络的近邻矩阵;②依据定义1和式(5)计算 L_i 、 C_i ;③选择一点作为初始故障节点,从网络中消去相应的边和节点;④重新计算近邻矩阵,重新计算 L_i ;⑤比较 L_i 与 C_i 的大小,若 $L_i > C_i$,则把节点 i 和相应的边从网络中消去,并转步骤④,否则转步骤⑥;⑥计算故障严重判据,结束。

选择初始故障点的方式有随机点选择、最大负荷点选择和最大度节点选择等。本文采用给定安全 α ,依次对网络的每个节点进行连锁故障模拟,计算并画出每个节点造成的 G_c 值, G_c 值相对较小的节点说明发生故障时对系统的影响较大,可以看作是系统的关键点或脆弱点(见图4)。

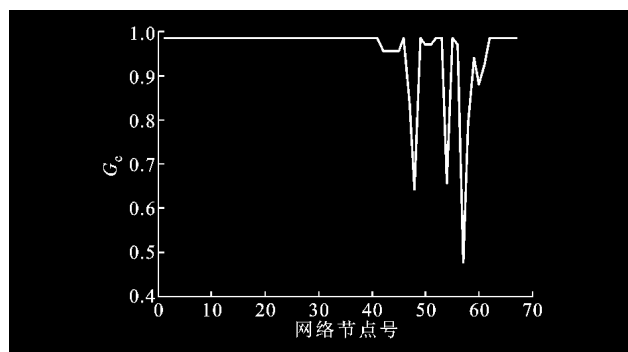


图4 各节点故障严重程度的对比图($\alpha=0.1$)

由图4可见,大多数节点的 G_c 值都较大,说明大多数节点故障对系统的影响微小。在生产系统的实际运行中,并不是所有的故障都会导致系统连锁反应,甚至造成全线跳车,只有在第42节点到第61节点段中的某些点才会对系统造成巨大的影响(G_c 值较小)。例如,图4中的点54、57、58分别是系统中反应塔、分离器、汽提塔的抽象点, G_c 值分别为0.6567、0.4776、0.791,一旦发生故障将会严重影响系统运行,这也是与实际系统的运行状况相符合的。

值得注意的是,图4中的47、48等节点是一些控制阀的抽象点,发生故障后也将对网络造成严重的影响。在图4中,可以看到它们的 G_c 值分别为0.8358和0.6418,说明系统在运行时如果这些控制装置发生了故障,将会严重影响系统的安全运行,因此这也是系统的脆弱点。由网络拓扑特性分析可知,当系统中的一个点发生故障时,由于网络的平均路长较短,集群系数大,使得故障不仅影响其相邻的节点,而且能够导致其他非近邻节点故障,引起连锁反应,使得故障在网络中扩散,最终导致整个系统发生大规模连锁故障。

根据对国内某煤化工集团的调查发现,生产系统每年都要发生全线性的跳车事故 10 多起,事后分析显示,导致事故的根源并不都是那些关键的重要设备或者装置,大多数情况下仅仅是诸如控制阀、继电器失效等一系列微小的容易被人们忽略的问题,而事故的这一特点也在本文模拟仿真中得到了验证.因此,要保证系统的安全平稳运行,不仅要对待传统认识中的关键设备等进行监测,还必须对这些新的关键节点进行保护和防范,尤其对于复杂的流程工业系统十分必要.

4 结 论

本文以流程工业生产系统为背景,从复杂网络理论这一新的角度出发对复杂工业系统的安全性评估进行了研究.利用复杂网络理论分析了工业系统的网络拓扑特性,提出了一种依据网络拓扑特性对系统安全性进行评估的方法,并给出了具体的模拟算法步骤.对于 TE 过程的网络特性分析和安全性模拟仿真的结果表明,本文方法可以从复杂网络的角度来分析和理解系统连锁故障的物理本质,识别系统脆弱点.为了从根本上认清系统连锁故障的机理,本文设计了实用防控策略,从而为流程工业生产提供了新的途径.由于复杂网络理论研究尚处于初步阶段,因此还需要在工业系统特点的基础上对系统网络的抽象、网络特性的定义和描述上做进一步的研究,使其能够更加精确地反应真实的工业系统.

参考文献:

- [1] Hu W, Starr A G, Leung A Y T. Operational fault diagnosis of manufacturing systems [J]. Materials Processing Technology, 2003, 133(1):108-177.
- [2] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15):21-24.
Meng Zhongwei, Lu Zongxiang, Song Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15):21-24.
- [3] Newman M E J. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256.
- [4] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Review of Modern Physics, 2002, 74(1):47-97.
- [5] 刘涛, 陈忠, 陈晓荣. 复杂网络理论及其应用研究概述[J]. 系统工程, 2005, 23(6):1-7.
Liu Tao, Chen Zhong, Chen Xiaorong. A brief review of complex networks and its application [J]. System Engineering, 2005, 23(6):1-7.
- [6] Moore C, Newman M E J. Epidemics and percolation in small-world networks [J]. Phys Rev, 2000, 61(5): 5678-5682.
- [7] 林国基, 贾珣, 欧阳颀. 用小世界网络模型研究 SARS 病毒的传播[J]. 北京大学学报(医学版), 2003, 35(增刊):66-69.
Lin Guoji, Jia Xuan, Ouyang Qi. Predict SARS infection with the small world network model [J]. Journal of Peking University (Health Sciences), 2003, 35 (Suppl):66-69.
- [8] Lyman P, Georgakis R C. Plant-wide control of the Tennessee eastman problem [J]. Computers chem, 1995, 19(3):321-331.
- [9] 蒋浩天. 工业系统的故障检测与诊断[M]. 北京:机械工业出版社, 2003:9.

(编辑 管咏梅)