

基于小世界拓扑模型的复杂系统安全分析*

李 果 高建民 高智勇

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 从复杂网络的角度对工业系统安全性问题进行研究。将复杂机电系统看成一个整体,引入小世界网络理论分析方法,探讨系统固有的网络拓扑结构特性及统计特征对故障传播的影响,并提出一种网络节点安全敏感性的评判准则。建立基于小世界聚类特性的故障分步扩散模型,同时确定网络节点之间的故障传播强度,并采用蚁群算法求得高风险的故障传播路径及相应的脆弱环节。最后通过均四甲苯生产系统来验证该方法的可行性,结果表明,该方法可以有效地找到系统中存在的脆弱点,为风险评估和维修决策提供重要依据。

关键词: 安全分析 小世界网络 故障扩散 传播强度 蚁群算法

中图分类号: TH17 TP391

Safety Analysis of Complex System Based on Small World Topological Model

LI Guo GAO Jianmin GAO Zhiyong

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

Abstract: The safety analysis of complex industrial system is studied from the complex network viewpoint. Considering the complex electromechanical system as an integrated unit, the effect of the system's topological characteristics on the prevalence of failure is analyzed by using the small world net theory, and the rules, which are capable of describing the safe sensitivity of the network nodes, are proposed. Subsequently, the failure grade diffusion model based on the small world clustering is established and the failure propagation intensity between the nodes is determined. The failure propagation paths with high risk and corresponding crisp nodes are found with the ant colony algorithm. Finally a durenene production system is provided to illustrate the feasibility of the proposed method. The result shows that the proposed method can find the system crisp nodes efficiently, and can be used as a support next in risk assessment and maintenance decision.

Key words: Safety analysis Small world net Failure diffusion Propagation intensity Ant colony algorithm

0 前言

复杂机电系统通过各种介质(流体、电力、信号)传递,将离散的设备装置连接成一个相互关联、高度耦合的复杂机电系统网络。在这种复杂网络环境下,大多数单点故障都具有多重传播路径,任何一个局部细小的差错会通过网络进行传播、扩散、积累和放大,从而酿成重大安全事故。传统的安全分析方法如安全检查表法、危险与可操作分析、故障模式与影响分析、故障树分析等更多地从环境因素、设备故障、操作失误、维修不当等方面分析事故发

生的原因,偏重于系统故障过程中的各种暂态问题,很少从系统自身固有的网络拓扑结构出发来分析其安全特性。

自小世界网络模型提出以来,越来越多的科学家开始投入到复杂网络理论的研究中,并通过大量的实例证明真实网络几乎都具有小世界效应^[1]。本文强调复杂机电系统自身固有的网络拓扑结构特性对故障传播的影响,从整体上研究故障发生、传播和放大的根本原因和内在机理。结合小世界网络的形成过程,对复杂机电系统网络节点的安全敏感性进行评判。此外,以故障传播强度作为启发信息,对故障分步扩散进行分析,求得高风险的故障传播路径及相应的脆弱环节。加强这些脆弱环节的安全措施,可有效地阻止故障传播范围的扩大和级联故

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2006AA04Z441)资助项目。
20070524 收到初稿, 20071212 收到修改稿

障的发生。该模型不需对系统故障的具体表现形式进行区分，为工业系统安全分析提供了新的途径。

1 小世界网络理论

小世界现象揭示了客观世界许多复杂网络运动中最为有效的信息传递方式。1998年 WATTS 等^[2-3]提出的小世界网络模型是从规则网络向随机网络过渡的中间网络形态，其构造方法如图 1 所示，即在一个有 n 个节点的环状规则网络中，通过调节随机重新连线过程的概率 p ，来实现规则网络向小世界网络和随机网络的转变。由于这种网络具有大的聚类系数和小的平均距离，学者把这两个统计特征合在一起称为小世界效应，具有这种效应的网络称为小世界网络^[4]。

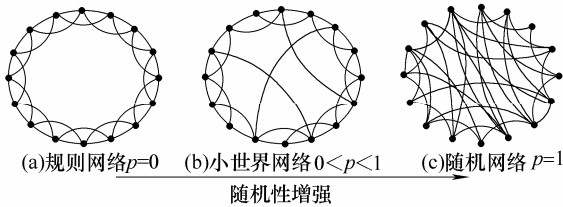


图 1 小世界网络模型的构造

下面讨论小世界网络模型中的几个重要特征参数。

(1) 网络平均度数 K 。在网络中，节点度数是指连接这个节点的边数。对所有节点的度数求平均值，即得到网络的平均度数 K ， $K = 2E/n$ 。式中， E 表示网络的总边数， n 表示总节点数。

(2) 特征路径长度 L 。在网络中，任选两个节点，连接这两个节点的最短路径上的边数，定义为这两节点间的距离。对所有节点对之间的距离取平均值，即得到网络的特征路径长度

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

式中， $D(i, j)$ 表示任意 2 个相通节点间的距离。

(3) 聚类系数 C 。假设某个节点有 k 个近邻节点，这 k 个近邻节点之间实际存在的连接边数与其最多可能存在的连接边数 $(k(k-1)/2)$ 的比值定义为该节点的聚类系数。对所有节点的聚类系数取平均值即得到整个网络的聚类系数，它是衡量近邻节点联系紧密度的特征参数 $C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2t_i}{k_i(k_i-1)}$ 。式中， k_i

表示节点 i 的近邻节点数目； t_i 表示节点 i 的邻近节点之间实际存在的连接边数。

(4) 节点介数 S 。节点介数是指网络中经过该节

点的最短路径的数目。在很多相关研究中，节点介数可以看作节点的负荷^[5]。

小世界网络模型是近年来科学研究的一个新成果，已经在生物学、社会关系学、互联网以及电力网络等很多领域得到应用。从小世界网络的构造过程可以看到，只需改变很少的几个连接，就可以很明显地改变网络的性能。这在故障(疾病)传播中不是一个好现象，但这样的性质也可以应用到好的方面，例如蜂窝电话网，改动很少几条线路(低成本、低工作量)的连接，就可以显著提高性能。关于小世界网络的详细介绍参见文献[3-4]。

2 复杂机电系统的网络特性

2.1 小世界特性对故障传播的影响

复杂机电系统中的各个基本单元(包括设备、分系统等)之间存在错综复杂的相互作用关系，构成复杂的网络结构。通过对电力系统网络以及疾病传播网络的研究发现，网络的拓扑结构决定了网络的一些很重要的性质。如果一个网络具有较小的特征路径长度和较高的聚类系数，那么对故障(疾病)的传播扩散有着很大的促进作用，这对于那些具有小世界特性的机电系统网络也是如此。一般地，聚类系数 C 对应着故障传播的广度，特征路径长度 L 代表着故障传播的深度。由于小世界网络兼具有大的深度和宽的广度，其故障扩散速度和影响范围大大高于相应的规则网络或随机网络。

需要说明的是，并不是所有的机电系统网络都一定具有小世界特性，需要根据其网络拓扑结构的统计特征进行判断。考虑到很多时候人们无法了解和掌握故障之间准确的因果逻辑关系，在构建复杂机电系统网络模型时，作如下假设：如果两个基本单元间存在介质传递关系，则这两个单元间存在故障传播关系，且故障影响是相互的。用集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 表示系统 S 中的基本单元(称之为元素)，用 R 表示基本单元之间的故障传播关系，则系统的网络结构模型可记作 $\{S, R\}$ 。为了便于计算机处理，本文用邻接矩阵对结构模型 $\{S, R\}$ 进行表示，邻接矩阵 A 中的元素 a_{ij} 规定为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{元素 } i \text{ 和 } j \text{ 存在直接故障传播关系} \\ 0 & \text{元素 } i \text{ 和 } j \text{ 不存在直接故障传播关系} \end{cases}$$

通过邻接矩阵可以对网络的拓扑结构特性进行统计分析，如果网络既具有较短的平均路径长度又具有较高的聚类系数，则可认为该网络具有小世界特性。具有小世界特性的网络一般满足下面的几何

性质 $C \gg C_r, L \geq L_r$ 。式中, $C_r \propto K/n, L_r \propto \ln n / \ln K$, C_r 和 L_r 分别是与小世界网络具有相同节点数和平均度数的随机网络的聚类系数和平均路径长度。

2.2 网络节点安全敏感性评判

网络环境为故障传播和扩散提供了便利, 其中脆弱和敏感环节加剧了这种现象。在具有小世界特性的复杂机电系统网络中, 网络节点的度数对故障扩散起着重要的作用, 某个节点的度数越大, 它对应的传播路径就越多, 扩散范围就越大。同时考虑到小世界网络之所以具有独特的几何性质, 是因为边的重连过程为网络引入了极少量长程连接(远边)的缘故(图 2)。在复杂网络中, 当某个节点具有长程连接时, 其他节点对之间的最短路径通常会优先经过这类节点^[1]。换句话说, 节点介数越高, 其具有长程连接的可能性就越大, 故障也越容易通过这些节点得到快速传播。因此, 识别这些高介节点, 对改善和提高网络的安全稳定性具有重要意义。

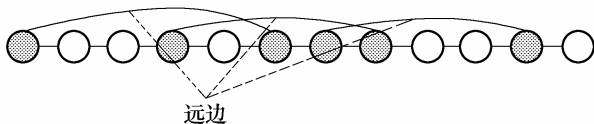


图 2 网络节点之间的长程连接

根据以上分析, 网络节点的度数、介数越大, 其安全敏感性越高, 也就是说这类节点既容易受到其他相关节点故障的影响, 也容易导致和促进其他相关节点故障的发生。为此引入节点度数累计分布函数 $P(k)$ 和介数累计分布函数 $P(s)$ 来对系统安全特性进行分析, 表达式分别如下

$$P(k) = \sum_{k' \geq k} p(k') \quad P(s) = \sum_{s' \geq s} p(s')$$

式中 $p(k')$ 表示度数为 k' 的节点个数占节点总数的百分比, $p(s')$ 表示介数为 s' 的节点个数占节点总数的百分比。

由于那些具有较高度数和介数的节点对于维持网络的结构和功能起着重要作用, 当攻击这些安全敏感节点时, 容易导致故障的快速传播和扩散。因此在资源有限的情况下, 优先保护(如增加预防维修或更换次数)度数比较大的节点比随机选择节点进行保护效果要好得多, 而优先保护那些“远边”的节点, 还可以获得更好的效果。

3 复杂机电系统故障扩散分析

3.1 故障分步扩散模型的构建

实际中的复杂机电系统, 特别是流程工业分布式复杂机电系统, 考虑到经济效益, 很多情况下会

处于“带病运行”的状态, 如何针对系统中的薄弱环节制定合理的预防性维修计划是防止系统级故障发生的根本保障。当然, 完全消除系统中存在的危险是不现实的, 但是如果系统只存在低风险的危险状态, 则此系统的危险是“可接受”的。为消除高风险危险状态, 这里力图找到能导致高风险危险状态的故障传播路径, 并采取一定的预防措施, 进而避免系统从初始故障状态到达高风险状态的可能。

当机电系统网络中的某节点性能出现劣化趋势时(如性能达不到指定要求), 会导致与其关联的近邻节点的性能逐步恶化或直接失效^[6], 这种失效通过网络进行扩散, 逐步波及其他非近邻节点, 引起系统连锁反应。为描述该扩散过程, 本文引入小世界聚类特性来分析和构建故障分步扩散模型(图 3)。

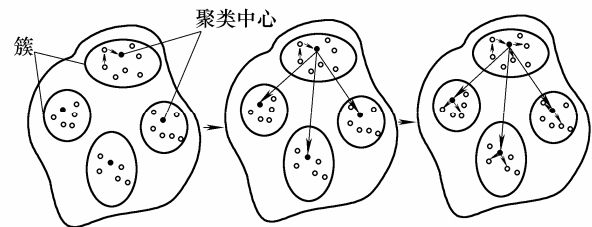


图 3 故障分步扩散模型

图 3 中用簇的形式对系统网络模型进行描述, 节点代表被忽略了实际物理意义的设备装置。通过计算网络节点的聚类系数, 可将相互之间联系较紧密的节点归为同一个簇, 并将簇内聚类系数最高的节点定义为聚类中心。不同簇之间通过远边进行连接, 这些远边对应的节点通常具有较高的介数。根据邻接矩阵可确定出不同节点之间是否存在连接关系, 从而进一步计算节点的聚类系数、度数和介数。

3.2 故障传播强度的确定

传统的安全分析方法认为故障优先选择传播概率较大的边进行扩散。节点之间的故障传播概率随着传播路径长度的增大成数量级减小, 当传播概率低于 10^{-8} 时, 则认为该节点处于安全状态^[7]。对于具有小世界特性的复杂机电系统网络, 除了考虑节点之间的故障传播概率以外, 还需要考虑网络自身固有的拓扑结构特性对故障传播的影响, 因为在实际生产中那些低频大规模故障的风险足以与高频小规模故障的风险总和相提并论。

文献[8]将经过某个节点 v 的最短路径数目(介数)定义为该节点的负荷 $l(v)$, 并建立负荷—容量模型对复杂网络的级联故障进行分析。同理, 本文将通过某一连边 e 的最短路径数目定义为该连边的负荷 $l(e)$, 连边的负荷越大, 节点对之间最短路径通过该边的几率就越大, 故障越容易通过该边快速扩

散。设网络节点数为 n ，故障由节点 v_i 直接传播到节点 v_j 的概率为 $p(e_{ij})$ ，若两个节点之间没有连接边，则 $p(e_{ij})$ 等于 0。用 $l(e_{ij})$ 表示节点 v_i 与节点 v_j 之间连边的负荷。为了综合考虑故障传播概率和负荷这两方面的因素，定义节点之间的故障传播强度

$$I_{ij} = w_p p(e_{ij}) + w_s l(e_{ij}) / \sum_{i \neq j} l(e_{ij}) \quad 1 \leq i, j \leq n \quad (1)$$

式中， w_p 、 w_s 分别为故障传播概率和负荷所对应的权重。对故障传播强度 I_{ij} 进行归一化处理，并以该强度作为连边的权值 $I'_{ij} = I_{ij} / \sum_{i \neq j} I_{ij}$ 。

3.3 最高风险故障传播路径求解

本文采用蚁群算法来求解最高风险的故障传播路径。蚁群算法是由意大利学者 DORIGO 等^[9]提出的一种新型的模拟进化算法，该方法具有较强的鲁棒性，是一种并行算法，适合于那些能够表达为在图表上寻找最佳路径的问题。

由故障分步扩散过程可知最高风险的故障传播路径求取问题的数学模型如下

$$\begin{cases} \max & \sum_{k \geq 0} w_k l(v_k) \\ \text{s.t.} & \prod_k p(e_{ij})^k \leq 10^{-8} \quad i \in F_{k-1} \quad j \in F_k \end{cases} \quad (2)$$

式中， w_k 表示第 k 步扩散的相对重要度； F_k 表示第 k 步故障扩散将波及到的节点集合。每经过一次循环，各条路径上的信息素按式(3)进行更新

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij} \quad \Delta\tau_{ij} = \sum_{l=1}^{Na} \Delta\tau_{ij}^l \quad (3)$$

式中， ρ ($0 < \rho < 1$) 表示信息素的挥发程度， Na 表示蚂蚁数， $\Delta\tau_{ij}^l$ 是第 l 只蚂蚁留在路径 (i, j) 上的信息素增量，由式(4)确定

$$\Delta\tau_{ij}^l = \begin{cases} QD_l & \text{蚂蚁经过}(i, j)\text{时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中， Q 为常数， D_l 是第 l 只蚂蚁找到的故障传播路径的目标函数值。

因为故障优先选择传播强度大的边进行传播，所以启发式信息值定义为 $\eta_{ij}(t) = I_{ij}^k$ 。

定义 t 时刻第 l 只蚂蚁在节点 i 选择前往节点 j 的概率为

$$P_{ij}^l(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in N_i^l} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & j \in N_i^l \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中 α, β ——控制信息素和启发信息对概率影响大小的参数

N_i^l ——蚂蚁 l 位于节点 i 时的可行邻域节点

集合

4 应用实例

现以均四甲苯生产系统为例，说明该方法的运用。均四甲苯生产系统是一个复杂的化工过程系统，具有生产工艺复杂、流程长、单元操作多等特点。该生产系统主要由反应系统、精馏系统、结晶系统、加热炉和冷却系统等组成^[10]，同时包括各种仪器仪表和传感器，其工业流程图见图 4。

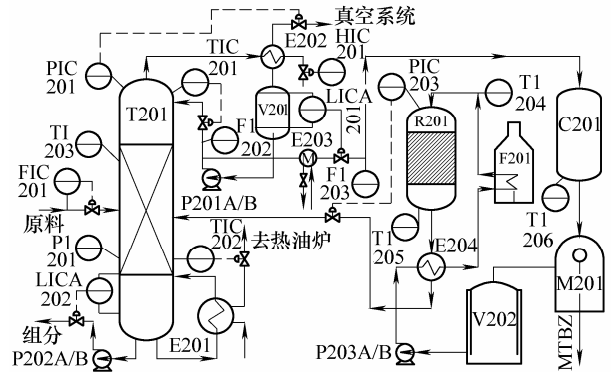


图 4 均四甲苯生产系统简图

忽略系统中各设备装置的物理意义，将其抽象成网络的一个节点，这些节点可大到子系统(如精馏系统)、设备(如计量泵)，也可小到控制阀、传感器等。再用节点之间的连边代表它们之间的故障传播关系，这样就可将系统转化成网络的形式(图 5)。

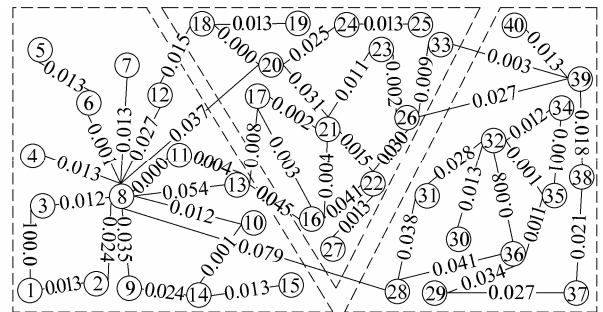


图 5 网络拓扑结构图

图 5 中各节点对应的部件名称如表 1 所示。

根据第 1 节 L, C 的计算公式对所构造网络整体的拓扑结构特性进行统计分析，结果见表 2。由表 2 可见，该网络相对于同等节点规模的随机网络而言，具有较小的平均路径长度和大的聚类系数，满足式(4)，故可认为其具有小世界特性。

对网络节点负荷分布情况进行分析(图 6)，节点负荷处于一种不均匀的分布状态，有的节点负荷高达 540，如节点 8，有的节点负荷低到 40，如节点 5，这与节点度数分布的不均匀有着一定的关系，如节点 8 的度数高达 12，而节点 5 的度数仅为 1。

表 1 各节点对应的部件名称

节点	名称	节点	名称
1	流量控制阀 1	21	塔回流罐
2	重组分输出泵	22	冷却器
3	液位显示控制器	23	回流罐液位显示控制器
4	压力显示器	24	流量控制阀 6
5	塔进料流量控制器	25	冷凝水流量遥控器
6	流量控制阀 2	26	流量控制阀 7
7	塔进料口温度显示器	27	流量控制阀 8
8	精馏塔	28	流量控制阀 9
9	塔再沸器	29	计量泵
10	塔釜温度显示控制器	30	反应器出口温度显示器
11	塔顶温度显示控制器	31	反应器压力显示控制器
12	塔顶压力显示控制器	32	反应器
13	流量控制阀 3	33	富集液流显示器
14	流量控制阀 4	34	加热炉出口温度显示器
15	热油炉	35	反应器加热炉
16	塔回流泵	36	反应液换热器
17	塔回流量显示器	37	母液储罐
18	流量控制阀 5	38	分离器
19	真空系统	39	结晶器
20	塔冷凝器	40	结晶器温度显示器

表 2 均四甲苯生产系统网络统计特性

节点总数	平均度数	平均路径长度	随机网络平均路径长度	聚类系数	随机网络聚类系数
n	K	L	L_r	C	C_r
40	2.65	3.922	3.785	0.381	0.066

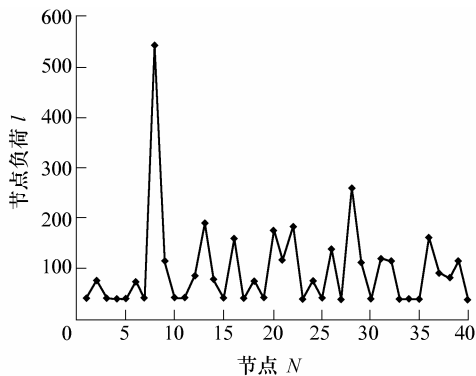


图 6 节点负荷分布

此外,由节点负荷累积分布的双对数曲线图(图 7)可知,近 80%的节点负荷处于 1~100 之间,高负荷节点只占很少一部分。尽管高负荷节点数目不多,但这类节点往往是系统中最敏感和薄弱的环节,当蓄意攻击这些高负荷节点时,会大大增加级联故障发生的可能性。

本文着重讨论网络拓扑结构特性对故障传播的影响,故将网络各节点之间故障传播概率均取为 0.1,实际应用中可通过历史数据统计或专家经验给出故障传播的概率值。同时为方便故障扩散分析,将模型中的权重系数 w_p 、 w_s 和 w_k 均取为 1。根据式 (7)、(8)可以计算各连边的故障传播强度(图 5)。为

了解高风险的故障传播路径,对蚁群算法中的相关参数进行设置,如表 3 所示。

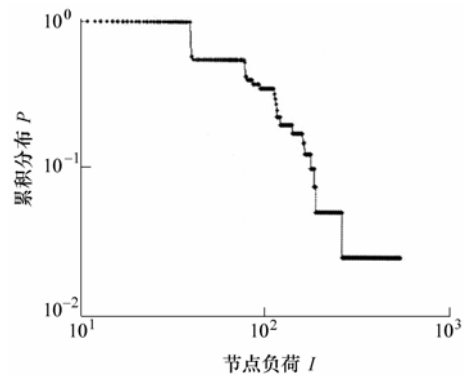


图 7 节点负荷累积分布的双对数曲线图

表 3 蚁群算法参数的设置

信息素重要性参数	启发式信息重要性参数	信息素蒸发系数	常数	蚂蚁总数	迭代次数
α	β	ρ	Q	N_a	N_c
2	1	0.8	0.000 1	6	200

选择初始故障源可看作是对网络的攻击或破坏,常采用的方式有随机攻击和最大负荷攻击等。本文选择不同的节点作为故障源,通过计算求得最高风险故障传播路径为: 20—21—16—13—8—28—36—32,节点总负荷(目标函数值)为 1 748。图 8 反映了最高风险故障传播路径求解过程中目标函数最优值随迭代次数的变化情况。由图 6 可知该路径上的各节点均具有较高的负荷,故可认为是系统的薄弱环节。这些节点不但自身发生故障的几率较大,而且发生故障后容易造成其他相关节点故障的发生。如塔冷凝器(节点 20)的常见故障有冷凝水流量偏低以及循环水流量偏小,其中冷凝水流量偏低会造成精馏塔(节点 8)塔顶温度升高,而精馏塔塔顶温度的突然升高又会导致回流罐(节点 21)的液位偏低。

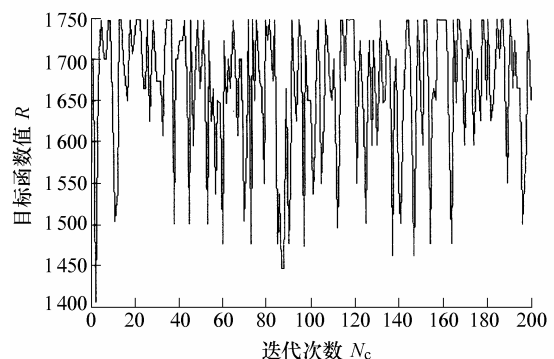


图 8 蚁群算法优化过程

另外,安全敏感性高的节点并不一定是指系统中的关键重要设备或装置,如节点 13、28 也具有较高的负荷,安全敏感性也较高。据实际调查,国内某煤化工集团每年发生的生产系统全线性跳车事故

10多起, 事后分析显示, 导致事故的根源多数情况下仅是诸如控制阀、继电器失效等一系列微小问题。

本文对均四甲苯生产系统做了一定程度上的简化, 实际系统中的节点数远不止40个, 需要进行更为详细的分析, 同时对概率信息也要进行补充。

5 结论

(1) 通过对复杂机电系统固有的网络拓扑结构特性及统计特征进行分析, 给出了网络节点安全敏感性的评判准则, 该准则能够从本质上辨识出系统中潜在的安全敏感节点。

(2) 提出了一种故障分步扩散模型, 给出了模型中网络节点之间的故障传播强度的计算方式。该模型充分考虑了网络拓扑结构特性对故障传播过程的影响, 实现了对故障传播过程的有效模拟分析。

(3) 构造了高风险故障传播路径求取问题的数学模型, 通过蚁群算法求得了系统中具有最高风险的故障传播路径及相应的脆弱环节, 从而为风险评估和维修决策提供一定的依据。

当然, 本文对现实机电系统网络进行了很大程度上的抽象, 剔除了故障传播过程中的其他很多因素, 如故障传播方向、维修率和检测率等。在今后的研究工作中, 可逐步结合其他相关因素进行完善, 使其能够更加精确地反映真实系统, 比如可以引入节点出度和入度的概念对故障传播的方向性进行更为准确的刻画和分析。

参 考 文 献

- [1] 丁明, 韩平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(25): 118-122.
DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment to large-scale power grid[J]. Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(25): 118-122.
- [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 of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [3] WATTS D J, STRONGATZ S H. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442.
- [4] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WANG Xiaofan, LI Xiang, CHEN Guanrong. Complex network theory and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [5] BERNARDO M D, GAROFALO F, MANFREDI S, et al. Load distribution in small world network[C]// Phys. Con., 2005, Petersburg, Russia, 2005, 9: 100-105.
- [6] SUN Y, LIN M, JOSEPH M, et al. An analytical model for interactive failures[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(5): 495-504.
- [7] 祝庚, 陈毅华, 侯家利. K步故障扩散算法的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(8): 784-787.
ZHU Geng, CHEN Yihua, HOU Jiali. Design and realization of K-steps fault pervasion algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(8): 784-787.
- [8] ADILSON E, MOTTER, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J]. Physic Review, 2002, E 66: 065102.
- [9] COLONI A, DORIGO M, MANJEZZO V. Ant system: optimization by a colony of cooperating agent[J]. IEEE Trans. on Systems, Man. and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.
- [10] 池红卫. 复杂过程工业系统故障诊断与预测方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
CHI Hongwei. Research on fault diagnosis and forecasting methods of complex process industry system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.

作者简介: 李果, 男, 1979年出生, 博士研究生。主要研究方向为复杂系统安全性建模和风险控制相关理论、方法及计算机辅助支撑技术。

E-mail: liguo@xjtu.edu.cn

高建民, 男, 1958年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为现代集成制造、敏捷制造、企业资源管理、质量管理。

E-mail: gjm@xjtu.edu.cn

高智勇, 男, 1973年出生, 讲师。主要研究方向为 ERP、CRM 及信息质量。

E-mail: zhygao@xjtu.edu.cn