

具有小世界特性的复杂液压系统故障源搜索方法

华成¹, 张庆^{1,2}, 徐光华^{1,2}, 阎对丰¹, 谢俊¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 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: 针对复杂液压系统故障多样、成因复杂、隐蔽性强,故障源辨识困难,提出了一种基于小世界特性的先网络社团结构划分、后社团内的复杂液压系统故障源搜索的层次分析方法. 构建了复杂液压系统的网络拓扑结构,以同时具有大的介数和度数的节点作为网络中故障传播社团的中心,来改进 Wu-Huberman 算法,从而实现了社团结构的划分. 根据各社团连接边对应管路的液压参数变化,确定包含故障源的社团,进一步计算该社团故障传播的可达矩阵,定位了故障源节点. 经过对轧钢加热炉液压系统起升故障的分析和故障源查找,证实了该方法可以根据系统网络的结构特征和间接故障表现,实现复杂液压系统故障源的识别.

关键词: 小世界特性;复杂液压系统;故障源搜索

中图分类号: TH137;TP277 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0079-06

Fault Source Identification of Complex Hydraulic System with Small World Property

HUA Cheng¹, ZHANG Qing^{1,2}, XU Guanghua^{1,2}, YAN Duifeng¹, XIE Jun¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory
for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The fault source of the complex hydraulic system is difficult to identify due to the multiplicity, complex creating and strong concealment. A hierarchical analysis method of identifying the fault source based on the small world network is presented, where the system network is divided into multiple-community construction and then the fault source is searched in a specified community. A network topological structure of complex hydraulic system is constructed and its community center nodes are obtained by selecting the network nodes with larger betweenness and degree. And the Wu-Huberman algorithm is improved to partition the system topological structure into multiple-community construction. According to the change of hydraulic parameters in the hydraulic tubes represented by the connection edges between communities, the community containing the fault source node is determined. The community is further extracted from the system network and its reachable matrix is also evaluated. The fault source is finally identified by means of the reachable matrix. The analysis on lifting fault of hydraulic system of steel rolling furnace and the location of the fault source verifies the method is available for identifying the fault source of the complex hydraulic system.

Keywords: small world property; complex hydraulic system; fault source identification

复杂液压系统是由大量的动力元件、控制元件 和执行元件通过各种介质(流体、电信号)有机组合

而成. 由于控制元件在一个工作循环中通过不同的动作完成特定的任务, 因此系统内部各元件之间耦合性强, 出现的故障具有多样性、成因复杂性等特点. 液压系统通过介质传输动力, 其传输过程是封闭的, 因此故障的隐蔽性强, 从而导致了复杂液压系统的故障源辨识困难. 传统液压系统的故障诊断方法包括信号处理方法、基于解析模型方法和人工智能方法^[1], 这些方法对单台设备或简单系统有效, 但受到建模难度大、知识表达困难的限制, 难以用于复杂液压系统. 目前, 常用的复杂系统故障诊断方法为故障树^[2]、贝叶斯推理^[3]、基于图论的方法^[4]和复杂网络的方法等^[5-6], 这些方法均以系统模型中个体关系为研究对象, 提取或简化潜在的关系规则, 推理故障发生的原因.

小世界网络是复杂网络中的一种, 该网络模型已被用于复杂系统的研究. 大量的研究表明, 现实中大部分网络都具有小世界性^[7], 表现为网络具有较强的社团结构, 社团内部的节点联系紧密, 而社团之间的联系则稀疏. 为此, 本文利用小世界网络理论研究了复杂液压系统故障源的查找, 构建了复杂液压系统的网络拓扑结构, 把液压元件抽象为网络节点, 以同时具有大的介数和度数的节点作为网络中故障传播社团的中心, 通过改进 Wu-Huberman 算法实现了复杂液压系统网络拓扑结构的社团划分.

1 复杂网路理论

1.1 复杂网络的统计特性

(1) 网络的平均路径长度描述了网络中节点的分离程度, 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 表示 2 个相通节点 i, j 间的距离, 即 2 个节点之间最短路径边的数目.

(2) 集群系数是衡量邻近节点联系紧密程度的特征参数, 其表达式为

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

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

(3) 节点介数 B 是网络中所有最短路径之中经过节点 u 的个数, 可以反映节点的信息流量. 记 (i, j) 之间最短路径的集合为 S_{ij} , 则将经过 u 归一化后的介数定义为

$$B = \sum_{i,j} \frac{\sum_{l \in S_{ij}} \delta_l}{|S_{ij}|} \quad (3)$$

式中: δ_l 表示经过 u 的最短路径.

1.2 小世界网络模型

小世界网络是复杂网络模型中的一种, 该模型由 Watts 和 Strogatz^[8]于 1998 年提出. 小世界网络介于规则网络和随机网络之间, 是以一定的概率通过随机重新连线过程实现规则网络向小世界网络的过渡. 按照复杂网络的统计特性, 规则网路具有高聚类特性, 但平均路径长, 而随机网路虽然平均路径短, 但聚类特性低. 小世界网络介于两者之间, 具有大的集群系数和短的平均距离, 把这 2 个统计特性合称为小世界效应或小世界特性^[6]. 根据复杂网络的统计特性, 可判断一个复杂网络是否属于小世界网络.

2 故障传播模型的小世界特性分析

从电网相继故障和疾病的传播研究中发现^[5], 不仅网络的结构对故障或疾病的传播起着重要的作用, 而且不同的研究对象其传播规律也不同. 液压系统作为机电液有机组合的装置, 既有网络传播的共性特征, 又有自身独特的规律, 其动力的传递是通过液压油经过管道和控制阀从液压泵传输到执行元件上, 如液压马达、液压缸, 而单个零部件故障的作用随介质而扩散并最终表现为执行元件的故障. 液压系统的故障传播与电网相继故障传播的不同在于, 当某个节点出现故障时不会导致负荷的重新分配, 即不出现相继故障, 系统中的其他节点可以传递故障, 但不会由此发生故障, 因此液压系统出现故障时一般只有一个故障源.

对于复杂液压系统, 虽然故障源单一, 但故障表现复杂、多样, 尤其是具有小世界特性的复杂液压系统, 其故障传播的深度和广度要高于其他网络结构. 文献^[6]提出了具有小世界复杂系统的故障分布扩散模型, 当系统中某节点出现故障时, 会导致同一社团内的相邻节点表现出故障, 然后通过社团之间稀疏的连接边逐步扩散到相邻的社团. 为此, 本文从系统网络结构模型中研究液压系统故障溯源问题, 按以下原则构建液压系统的网络拓扑结构模型: ①忽略各个元件的实际物理意义, 将其抽象为构成网络的节点, 而对于组合元件需拆分为多个节点; ②若 2 个元件之间存在故障传播关系, 则在这 2 个元件对应的节点之间赋予一条边连接. 用集合概念表示网

络结构图 $G=(V, E)$, V 为节点集合, E 为边的集合. 为了对该网络模型的性质进行研究, 用邻接矩阵 A 对网络模型进行表示, 将 A 中的元素 a_{ij} 规定为

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{从 } i \text{ 到 } j \text{ 没有故障传播关系} \\ 1 & \text{从 } i \text{ 到 } j \text{ 有故障传播关系} \end{cases} \quad (4)$$

通过 A 可以对网络模型的拓扑结构进行统计分析, 并以此判定该网络模型是否具有小世界特性. 经验公式如 $C \gg C_r$, $L \gg L_r$, 其中 C_r 、 L_r 为与小世界网络具有相同节点数的随机网络的集群系数和平均路径长度, $C_r \propto K/n$, $L_r \propto K/\ln n$, K 为网络所有节点平均邻接节点的个数.

从小世界网络结构的特点中可以发现, 网络对随机故障具有高度的鲁棒性, 而对于蓄意的攻击具有高度的脆弱性, 这主要源于网络节点度分布的非均匀性. 因此, 识别网络结构中的脆弱点, 对于辨识故障源起着重要的作用. 脆弱点是指在网络中容易受到其他节点攻击的点, 在网络社团结构中表现为社团的“中心”. 在复杂液压系统中, 一个元件对应节点的度数越大, 说明该元件的邻接元件越多, 对应的故障传播路径就越多, 受到其他元件故障输出的影响几率就越大, 同时自身发生故障后可以影响的范围也越广, 而该节点介数越大, 说明故障在传播时优先经过该元件. 由于介数高的点往往是个别、少量、远程连接上的点, 而不是同一社区内的 2 个节点在故障传播时必须通过的节点, 因此可以用度数和介数来综合确定社团的中心节点.

3 复杂液压系统故障源搜索方法

本文结合复杂网络和图论的知识, 提出了一种基于小世界网络模型的故障定位算法. 如图 1 所示, 该方法首先利用小世界网络聚类特性进行整体结构社团划分, 其次通过测量远边对应油路液压系统参数的变化来确定故障社团, 再利用该社团内节点间故障传递的关系进行局部故障定位.

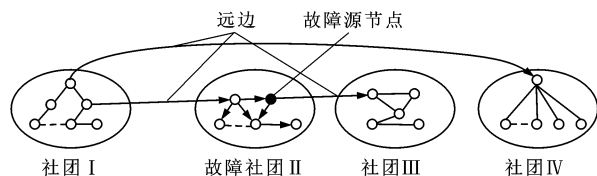


图1 小世界网络模型的故障定位示意图

3.1 具有小世界特性的社团结构划分方法

社团中心可以通过度数和介数指标来综合确定, 其方法是计算系统网络节点介数, 并从大到小依次选取 R 个组成一个序列, 选取的原则是 R 个节点

介数之和要大于总介数的 80%, 选取度数从大到小排列的相同数量节点组成一个序列, 同时出现在 2 个序列中的节点即为所求的社团中心. 利用社团结构的划分方法确定的社团中心和社团数把网络拓扑图 G 分成 l 个社团, 社团中心为 $v_1, v_2, \dots, v_l$. 根据识别的社团中心, 寻找各个社团结构的“成员”, 从而实现多个社团的划分.

基于小世界特性的社团结构划分方法通过改进 Wu-Huberman 算法^[9] 来实现. Wu-Huberman 算法可以实现在已知社团数情况下的网络多社团结构的分解, 而对于社团数和社团中心节点都已知的情况下, 原算法中社团的划分和基于阈值的社团结构“成员”的查找则存在着局限性, 因此提出改进算法, 步骤为: ①随机抽取网络中距离不小于 2 的节点 m 对; ②当第 k 次随机抽取得到的 2 个节点分别被赋电压值 $U_1=1, U_2=0$, 并设网络中其他各节点的初始电压值 $U_3=U_4, U_5, \dots, U_n=0$, U_1 为源节点, U_2 为终点; ③从 U_3 开始, 依据下式为每个节点赋值

$$U_i = \frac{1}{K} \sum_{(i,j) \in E} U_j = \frac{1}{k_i} \sum_{j \in G} U_j a_{ij} \quad (5)$$

若 i, j 相连则 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$; ④多次重复步骤 ③, 可提高赋值的精度, 将各节点电压值按顺序排列, 并以谱线表示, 则得到整个网络的电压谱线 (见图 2); ⑤当 $k \leftarrow k+1$, 重复步骤 ②~④, 可以得到 m 个电压谱线图; ⑥根据已知的社团数和社团中心节点, 任取 1 个中心点 v_i 作为参考节点, 并从 m 个电压谱线图中选取 1 个, 设 v_i 在该电压谱线图上的位置为 Y_i , 并引入冗余量 50%, 分别在 Y_i 的左右两侧 $\{n/((2l)(1-50\%)), n/((2l)(1+50\%))\}$ 的范围内各找出电压差值最大的一对相邻节点作为边界将电压谱分成 3 个区域, 包含 v_i 的中间区域内的节点作为一个群; ⑦重复步骤 ⑥, m 个电压谱就可以得到 m 个包含 v_i 的群; ⑧计算整个网络中各个节点在 m 个包含 v_i 的群中出现的频率近似为与 v_i 相关的概率 $p_{ij}, \forall j \in n$, 并表示为向量 $P_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}]$; ⑨依次按照步骤 ②~⑦ 求得其他中心节点的相关概率向量, 组成相关概率矩阵 $P = [P_1, P_2, \dots, P_m]^T$, 矩阵列向量中最大的元素对应的节点为同一个社团的节点.

3.2 社团内故障源的定位

通过社团结构的划分, 整个网络结构被划分成多个社团, 经过测量各社团间相连边包含的故障信息, 判定故障源所属的社团. 针对社团的结构, 进一步利用图论算法来定位故障源: ①提取故障源所在

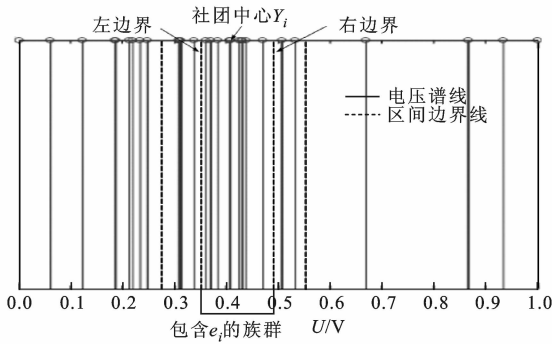


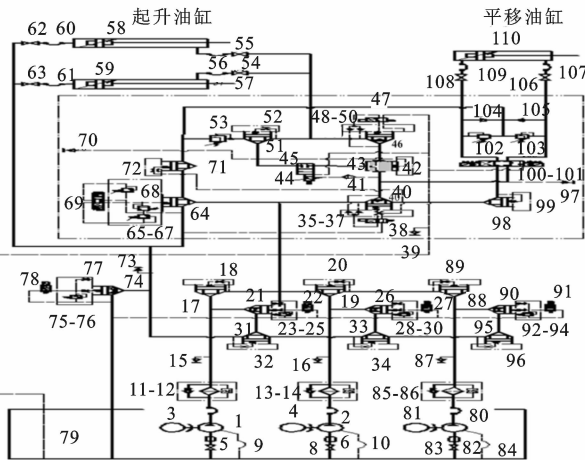
图 2 网络节点电压谱线图

的社团结构,构造故障传递有向图 $G_i=(V_i,E_i)$, V_i 为团内节点集合, E_i 为团内边的集合;②对于图 G_i , 用 A_i 表示,通过 Warshall 算法求 A_i 的可达矩阵 $\hat{P}$; ③利用对角矩阵 $P^*=\hat{P}\otimes\hat{P}^T$,可以求得对于 G_i 相对较大的强连通图;④将各强连通图抽象为一个节点,则系统有向图可简化为有向树 T ;⑤对于有向树,根据故障的传递关系,依次排除故障节点中的可达节点,即可找出故障源节点。

4 案例分析

液压系统是为了完成特定功能而设计的.如图 3 所示,利用液压系统,酒泉钢铁公司高线厂加热炉的步进梁装置实现了步进梁的上升、前进、下降、后退的循环动作,完成了钢坯入炉和加热全过程.其中,上升和下降由起升液压缸完成,前进和后退由平移液压缸完成。

2006 年 5 月步进梁装置在上升工况时,接连不断地出现了起升速度变慢、明显低于正常工作速度的状况,从而严重地影响了装料.因此,本文通过采集实测的流量数据,运用以上提出的方法来确定故



1~110: 液压元件抽象为网络的节点

图 3 步进梁液压系统图

障源. 由于故障表现在上升工况中,因此抽取该工况涉及的节点 1~79 构建了网络拓扑结构,如图 4 所示。

4.1 小世界特性验证与社团中心的确定

通过计算,该液压系统网络模型的 $L=4.757\ 6$, $C=0.108\ 7$, $L_r=4.559\ 0$, $C_r=0.033\ 0$. 由于 $L>L_r$, $C>>C_r$,因此该网络模型具有小世界特性。

图 5 分别描述了网络节点的度分布和介数分布. 选取占总介数 95% 的节点个数 9 作为初始中心节点数,按节点介数的大小排序,提取的前 9 个节点序号为 64、74、17、19、40、43、71、21、26;按节点度数的大小排序,提取的前 9 个节点序号为 74、17、19、40、1、2、43、51、64,通过比较发现序号为 17、19、40、43、51、64、74 的节点同时出现在以上 2 个序列中,这些节点为系统网络结构的各个社团的中心,因此将该网络划分为 7 个社团结构。

4.2 划分社团结构

根据社团中心节点采用 3.1 节的方法将系统网络结构划分为 7 个社团,各社团之间通过远边连接. 由于系统故障表现为上升油缸的上升速度异常,而油缸起升速度与液压油流量密切相关,为此采用电子流量计测试各社团之间的部分连接边(选择表示为主进油路的边)流量的变化,通过对比流进和流出社团的流量来确定故障源所属的社团. 在该系统中,社团之间的连接边 $e(17,40)$ 、 $e(19,40)$ 、 $e(21,31)$ 、 $e(26,33)$ 、 $e(40,43)$ 、 $e(45,51)$ 、 $e(45,71)$ 对应的流量分别为 0、217、217、0、217、217、0 L/min,而正常工作时的流量分别为 217、217、0、0、434、434、0 L/min. 通过对比发现,社团 I、Ⅲ、V、Ⅵ、Ⅶ 含有故障信息,而根据液压油传递的层次关系判断社团 I 为故障源所在社团。

4.3 由可达矩阵确定的故障源

抽取社团 I 所属的有向图,计算 $\hat{P}$ 和 P^* , $P^*=[0]$,该社团结构无有向圈,因此该社团的有向图即为有向树图. 通过测试该有向图主油路节点的入边和出边的流量,并与正常工作时的对比发现,节点 17、21、31 在正常工作时的流量为 217、0、0 L/min,而故障状态下的流量分别为 0、217、217 L/min,因此故障节点为节点 17、21、31,而节点 17、31 为节点 21 的可达节点,因此故障发生在节点 21 上. 通过检查节点 21 所表示的组合插装阀发现,由于控制该阀开启的控制阀阀芯受到磨损,换向时没有回到截止位,导致液压油直接打开节点 21 上的阀回流到油

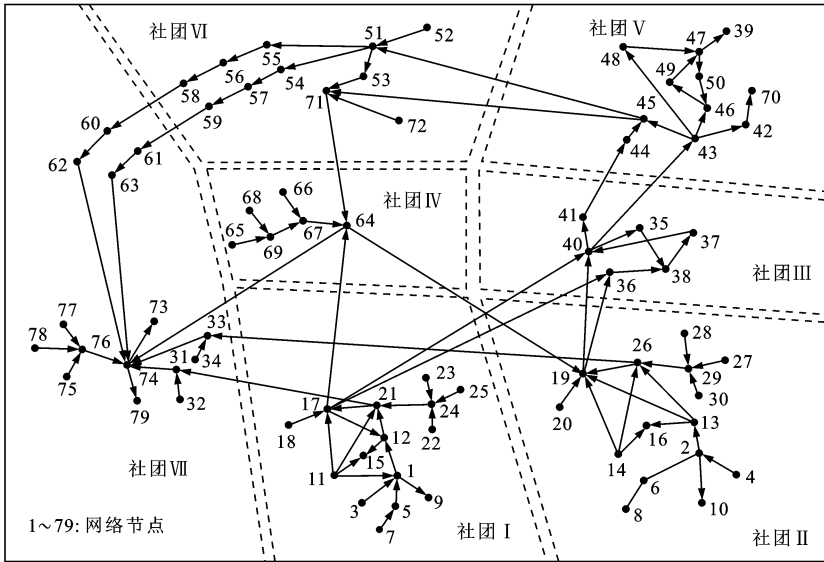
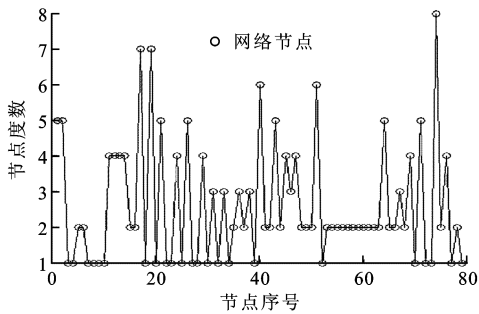
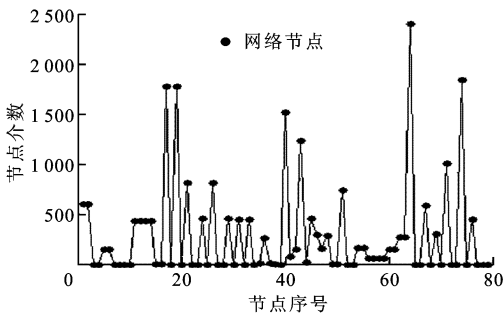


图 4 加热炉上升工况时液压系统的网络模型图



(a)网络节点度数分布图



(b)网络节点介数分布图

图 5 液压系统网络模型的度数和介数分布箱,因此影响了液压缸的上升速度。

5 结 论

本文提出的具有小世界特性的复杂液压系统故障源搜索算法,在系统网络节点多、故障隐蔽性较强的情况下,可以实现故障源的查找。本文构建了复杂液压系统的网络拓扑结构,并通过改进 Wu-Huber-man 算法实现了该网络社团结构的划分。利用各社团连接边对应的管路液压参数的变化,来确定包含故障源的社团,然后采用社团内故障源的定位方法

查找故障节点。通过对轧钢加热炉液压系统上升故障源的查找,证明该方法可以根据系统网络的结构特征和间接故障表现,实现对系统故障源节点的确定,从而减少了故障搜索的范围,解决了信息不完全带来的故障推理困难。

参考文献:

[1] 周汝胜,焦宗夏,王少萍. 液压系统故障诊断技术的研究现状与发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2006,42(9):6-13.
ZHOU Rusheng, JIAO Zongxia, WANG Shaoping. Current research and development trend on fault diagnosis of hydraulic systems [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(9):6-13.
[2] 彭强. 复杂系统远程智能故障诊断技术研究 [D]. 南京:南京理工大学计算机系, 2004.
[3] 王华伟,周经伦,何祖玉. 基于贝叶斯网络的复杂系统故障诊断 [J]. 计算机集成制造系统, 2004,10(2):132-136.
WANG Huawei, ZHOU Jinglun, HE Zuyu. Fault diagnosis of complex system based on Bayesian networks [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004,10(2):132-136.
[4] 钟嘉鸣,祝庚,魏臻. 控制系统故障定位的图论算法设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2003,11(10):763-766.
ZHONG Jiaming, ZHU Geng, WEI Zhen. Design and study on an algorithm detecting control systems faults with graph theory [J]. Computer Measurement & Control, 2003,11(10):763-766.
[5] CRUCITTIP, LATORA V, MARCHIORI M. Model

- for cascading failures in complex networks [J]. Physical Review E, 2004, 69(4): 1-4.
- [6] 李果, 高建民, 高智勇, 等. 基于小世界网络的复杂系统故障传播模型 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 334-338.
- LI Guo, GAO Jianmin, GAO Zhiyong, et al. Failure propagation model of complex system based on small world net [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 334-338.
- [7] 丁明, 韩平平. 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.
- [8] WATTS D J, STRONGATZ S H. Collective dynamics of "small-world" networks [J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442.
- [9] WU F, HUBERMAN B A. Finding communities in linear time: a physics approach [J]. European Physical Journal B, 2004(38): 331-338.
- (编辑 管咏梅)