

基于小世界网络的复杂系统故障传播模型

李果, 高建民, 高智勇, 姜洪权

(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: 为了从复杂机电系统自身固有的网络拓扑结构出发来研究故障的传播机制, 采用小世界网络理论分析方法, 对系统网络拓扑结构统计特性进行分析, 建立了基于小世界聚类特性的故障传播模型. 结合故障的扩散强度, 按照分步扩散的原则对故障传播的过程进行了描述, 同时用蚁群算法求得扩散能力最强的故障传播路径及相应的关键节点. 用该模型对喷射发动机的故障传播过程进行分析, 结果表明, 该方法可以有效地找到系统中存在的脆弱点, 从而为设计改进和故障预防提供了重要依据.

关键词: 故障传播; 小世界网络; 蚁群算法; 扩散强度; 分步扩散

中图分类号: TH17; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)03-0334-05

Failure Propagation Model of Complex System Based on Small World Net

Li Guo, Gao Jianmin, Gao Zhiyong, Jiang Hongquan

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

Abstract: To find the failure propagation mechanism from the inherent topological structure of the complex electromechanical system, the topological structure statistical properties of the system were analyzed with small world net theory, and a failure propagation model based on the small world clustering was proposed. Subsequently, the grade diffusing process was described combining with the failure pervasion intensity, and the failure propagation paths and relevant key nodes with high pervasion ability were found with the ant colony algorithm. An applied case of injection engine was provided to illustrate the feasibility of the proposed model in failure propagation analysis, and to verify the efficiency to find the system crisp nodes which become the proofs for the design improvement and failure prevention.

Keywords: failure propagation; small world net; ant colony algorithm; pervasion intensity; grade pervasion

机电系统的各个组成部分通过管路、线路连接成一个紧密交错的复杂网络, 相互之间高度关联、紧密耦合, 为故障的传播和扩散提供了条件. 任何一个局部细小的故障都可能通过网络进行传播、扩散、积累和放大, 最终酿成重大安全事故. 传统的故障分析方法大多是在对故障的因果逻辑关系比较明确的基础之上, 结合先验概率, 对不同形式的因果图进行定性或定量的分析, 然而在实际过程中, 很多时候人们无法了解故障之间的因果逻辑关系, 这就限制

了以上方法应用的有效性. 本文强调了复杂机电系统网络自身的拓扑结构特性对故障传播的影响, 从整体上研究了故障发生、传播和放大的根本原因和内在机理.

1 小世界特性对系统故障传播的影响

1.1 小世界网络模型简介

小世界网络模型是 Watts 和 Strogatz 在 1998 年提出的基于人类社会关系的网络模型, 是从规则

网络向随机网络过渡的中间网络形态^[1].图1以一维环状点阵为例来说明小世界网络的构造方法,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^[2].

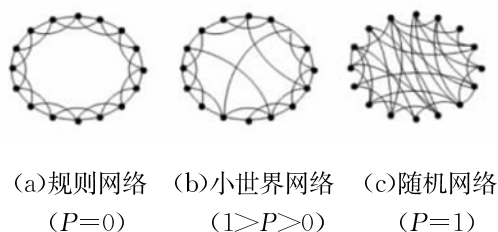


图1 小世界网络的构造

小世界网络模型有2个重要的特征参数,即特征路径长度 L 和聚类系数 C .特征路径长度是网络中所有节点到其他节点最短路径长度均值的中位值,它是一个从全局角度出发,描述任意2个节点之间距离的特征参数,即

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

式中: $D(i, j)$ 表示任意2个相通节点间的最短路径所包含边的数目.衡量近邻节点联系紧密程度的聚类系数为

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

式中: k_i 表示节点 i 的度数(连接边数); t_i 表示节点 i 的邻近节点之间存在的连接边数.小世界网络介于规则和随机网络之间,同时具有大的聚类系数和小的平均距离,其几何性质可表示为

$$\begin{cases} C \gg C_r \\ L \geq L_r \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_r 和 L_r 分别表示与小世界网络具有相同节点数、平均度数的随机网络的聚类系数和平均距离.

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中可以看到,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.关于小世界网络的详细介绍可参考文献[1-3].

1.2 小世界特性对机电系统故障传播的影响

从系统工程的观点来看,机电系统是由大量基本单元(可以是设备、子系统,也可以是零部件等)所构成的复杂网络,同一个系统内的基本单元之间连接比较紧密,不同系统之间连接相对比较稀疏.将机电系统中的基本单元看成网络的节点,把它们之间

的连接关系表示为节点间的连接边,将系统模型转化为线图的形式,对其拓扑结构的统计特征进行分析.如果系统网络的聚类系数和特征路径长度满足式(3),则认为该系统具有小世界特性.

通过对疾病传播网络以及电力系统网络的研究发现,如果一个网络具有较小的路径长度和较高的聚类系数,那么对疾病(故障)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,聚类系数对应着故障传播的广度,特征路径长度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,所以在传播强度相同的情况下,其传播速度和影响范围大大高于相应的规则网络(随机网络),如图2所示.

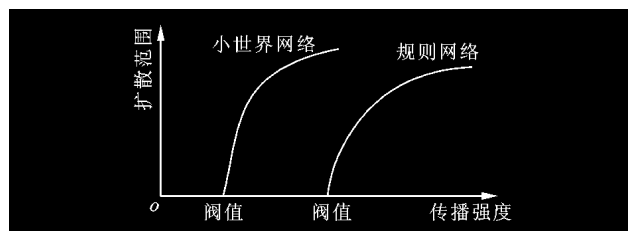


图2 平均扩散范围与传播强度的关系

在具有小世界特性的机电系统网络中,网络节点的度数对故障的扩散起重要的作用,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的缘故.因此,在资源有限的情况下,优先保护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.

2 复杂系统故障传播过程分析

2.1 故障传播模型的构造

为了建立故障传播模型,首先对复杂机电系统进行结构分解,将系统分离成多个相互之间有一定关联的子系统.同理,对子系统还可以进一步细分,用集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 表示不同级别系统 S 中的基本单元(称之为元素),并定义 R 为元素间的相互关系,则系统的结构模型可记作 $\{S, R\}$.为了便于计算机处理,采用邻接矩阵对 $\{S, R\}$ 进行表示,邻接矩阵 A 中的元素规定为

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

得到系统结构模型的邻接矩阵以后,引入小世

界聚类特性来构建故障传播模型(见图3)。图3中用簇的形式来对不同级别的系统结构模型进行描述,节点表示 S 中的元素,节点间的连接边表示元素之间的关系 R ,可以根据邻接矩阵确定出不同基本单元间的连接关系,从而确定节点之间是否存在连接边。同一个簇内的节点之间联系紧密,聚类系数较高,不同簇之间通过边界节点的远距离边(长程连接)进行连接,构成模型的骨干。同时,根据邻接矩阵可以计算网络节点的度数,从而确定不同簇的聚类中心。为了对故障传播过程进行分析,作如下假设:如果2个基本单元间存在着结构连接关系,则这2个单元间就存在着故障传播关系。

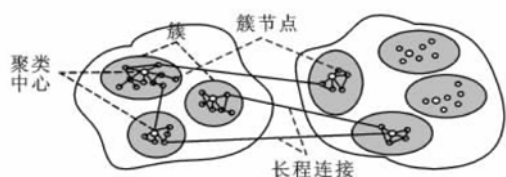


图3 小世界聚类特性的故障传播模型

2.2 故障扩散过程分析

当机电系统网络中的某个节点发生故障时,会逐步向其他相关节点扩散。在扩散过程中,故障优先选择传播概率较大的边进行扩散(传播概率可以从故障历史数据中提取,也可以根据系统参数进行估计)。节点之间的故障传播概率随着传播路径长度 L_k 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^[4]。对于具有小世界特性的机电系统网络,除了考虑节点之间的故障传播概率以外,还需要考虑节点的度数以及节点之间是否存在长程连接,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。因此,在对故障传播过程进行分析时,引入故障扩散强度 I_{ij}^k 来综合这两方面的因素,并以该强度作为连接边的权值,扩散强度越大,则表示故障通过此边越容易进行扩散,波及的范围也就越大。

设网络总节点数为 N ,在第 k 步扩散过程中,故障由节点 V_i 直接传播到节点 V_j 的概率为 P_{ij}^k ,若2个节点之间没有连接边,则 P_{ij}^k 等于0。故障扩散强度

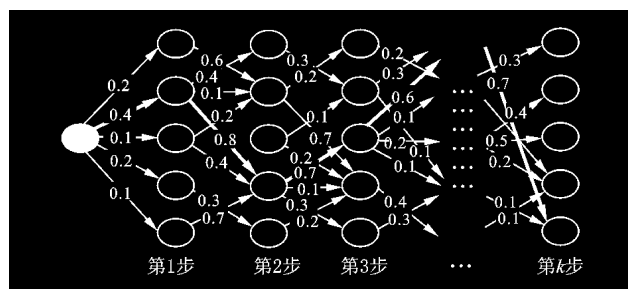
$$I_{ij}^k = \omega_s (\omega_p P_{ij}^k + \omega_d d_j^k / \sum_{j \in F_k} d_j^k); i \in F_{k-1} \quad (4)$$

式中: ω_p 、 ω_d 分别为传播概率和节点度数对应的权重; F_k 表示第 k 步扩散将波及到的故障节点集合; d_j^k 表示 F_k 中第 j 个节点的度数; ω_s (大于等于1)为

跨簇传播系数,用于强化故障跨系统传播时的扩散强度,并根据具体情况(比如系统重要度)确定。对 I_{ij}^k 进行归一化处理后,得到故障扩散强度的表达式为

$$I_{ij}^{k'} = I_{ij}^k / \sum_{j \in F_k} I_{ij}^k; i \in F_{k-1} \quad (5)$$

故障传播经过的节点和边构成一个复杂网络,由于需要找到对故障扩散起重要促进作用的传播路径及关键节点,因此要对它采取预防和改进措施(见图4)。



●:故障源;○:基本单元;→:扩散能力最强的故障传播路径

图4 故障分步扩散过程

2.3 最佳故障传播路径的求解

本文采用蚁群算法来求解扩散能力最强的故障传播通路。蚁群算法是由意大利学者Coloni、Dorigo等^[5-6]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^[7]。

由故障分步扩散过程,可知扩散能力最强的传播路径求取问题的数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \max \sum_k d_k \quad k = 1, 2, \dots, n \\ \text{s. t } \prod_k P_{ij}^k \leq 10^{-8} \quad i \in F_{k-1}; j \in F_k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

每经过一次循环,各条路径上的信息素按下面的公式进行更新

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij} \quad (7)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{l=1}^{N_a} \Delta \tau_{ij}^l \quad (8)$$

式中: ρ ($0 < \rho < 1$)表示信息素的挥发程度; N_a 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,由以下公式确定

$$\Delta \tau_{ij}^l = \begin{cases} Q D_l & \text{当蚂蚁经过边}(i, j) \text{时} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Q 为一个常数; D_l 是第 l 只蚂蚁找到故障传播路径的目标函数值。

因为故障优先选择扩散强度大的边进行传播,

所以定义启发式信息值为

$$\eta_{ij} = I_{ij}^k$$

(10)

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

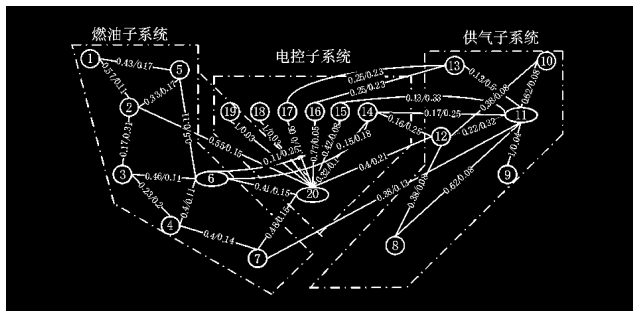
$$P_{ij}^l = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{j \in N_i^l} [\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} & j \in N_i^l \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

(11)

式中: α 和 β 是控制信息素和启发信息对概率的影响参数; N_i^l 是蚂蚁 l 位于节点 i 时的可行邻域节点集合.

3 实例分析

本文以喷射发动机为例进行说明. 喷射发动机包括气缸总成、活塞连杆机构、电子喷射系统、供给系统、润滑系统、冷却系统等, 考虑到小世界网络要求研究对象的节点数至少在 1 000 以上, 本文在对发动机系统进行分解之后, 依照系统原有特征进行了一定的扩充, 扩充后的节点数为 2 200, 平均度数为 2.83. 通过计算, 系统网络的特征路径长度和聚类系数分别为 11.56 和 0.072, 而相同节点数随机网络的特征路径长度和聚类系数分别为 7.66 和 0.001 24, 根据式(3)可以认为该系统具有小世界特性. 下面, 对喷射发动机中电子喷射系统的故障传播模型进行分析. 电子喷射系统主要包括电控、供油和供气子系统, 每个子系统又由多个部件组成, 其故障传播模型如图 5 所示.



①~⑮:模型中的节点
图5 电喷系统的故障传播模型

模型中各节点对应的部件名称如表 1 所示, 对于模型中的节点还可以进一步细分. 在得到电喷系统的故障传播模型以后, 为方便计算, 假设各节点之间的故障传播概率相等, 模型中的 w_p 、 w_d 均取为 1. 根据式(4)、式(5)来计算各节点之间的故障扩散强度(见图 5).

对蚁群算法中的相关参数进行设置(见表 2),

对扩散能力最强的传播路径进行求解, 通过计算得到的最佳传播路径为 2—3—6—20—12—11, 目标函数值为 36. 该传播路径上有些节点的故障发生概率可能比较低, 但由于其具有较高的度数, 发生故障后影响的范围比较大, 因此也应看成系统的薄弱环节. 例如, 电子控制器虽然可靠性较高, 一般不易出现问题, 但是一旦发生故障就会造成电子喷射系统的功能失效或控制系统工作不良, 出现诸如发动机难启动、无高速、耗油量大等现象. 图 6 反映了在对上述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.

表1 各节点对应的部件名称

节点	名称	节点	名称
1	油箱	11	进气门
2	电动油泵	12	节气门开关
3	燃油滤清器	13	辅助空气阀
4	喷油阀	14	吸入空气传感器
5	油压调节器	15	压力传感器
6	冷车喷嘴	16	水温传感器 1
7	喷油嘴	17	水温传感器 2
8	气流调节器	18	起动机
9	气缸	19	分电器
10	节气门调整螺钉	20	电子控制器

表2 蚁群算法参数的设置

α	β	P	Q	N_a /个	迭代次数/次
2	1	0.8	0.000 1	5	200

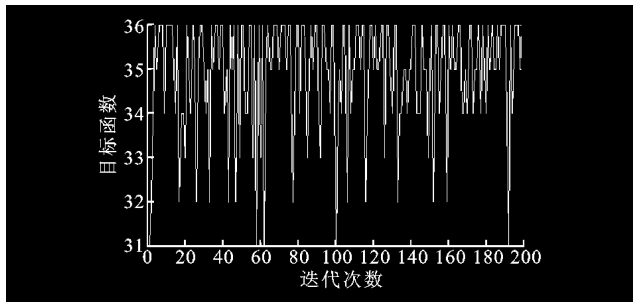


图6 蚁群算法的优化过程

本文只是对电喷系统做了一定程度上的简化, 在实际应用中还需要进行更为详细的分析, 同时对概率信息也要进行补充.

4 结 论

目前, 用小世界网络模型对复杂网络动态特性进行分析是一个新的研究热点. 本文从机电系统网

络自身固有的拓扑结构特性出发,对故障的传播和扩散过程进行了分析,在构建具有小世界聚类特性的故障传播模型的基础上,对故障分步扩散的过程进行了分析,并用蚁群算法求得了扩散能力最强的故障传播通路以及相应的关键节点.要提高整个系统的安全可靠性水平,必须加强对这些关键节点的保护和防范,避免由于这些节点而造成故障的连锁反应,进而减少大规模故障的发生概率,将损失降到最低水平.本文模型对现实机电系统网络进行了很大程度上的抽象,剔除了影响故障传播的其他很多因素,例如维修率、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,以实现与现实网络的精确反映.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Ding Ming, Han Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment to large-scale power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(25):118-122.
- [4] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of "small-world" networks [J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442.
- [5] 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 -step fault pervasion algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13(8):784-787.
- [6] Coloni A, Dorigo M, Maniezzo V, et al. Ant system for job-shop scheduling [J]. Belgian J of Operations Research Statistics and Computer Science, 1994, 34(1): 39-53.
- [7] 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.
- [8] Walter J G. A graph-based ant system and its convergence [J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8):837-888.

(编辑 管咏梅)