

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201707143

数控车床故障传播机理分析

张英芝, 刘津彤, 申桂香

(吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘 要: 为探讨数控车床故障传播机理,即识别系统关键节点与关键故障传播路径,基于数控车床故障数据,应用有向图理论、集成决策实验室分析(DEMATEL)和解释结构模型(ISM)方法构建数控车床分层故障传播有向图模型;基于故障传播概率、边介数两指标定义故障传播强度表征故障传播行为;提出结合系统分层故障传播有向图模型和故障传播强度的数控车床故障传播机理分析方法. 分析结果表明:系统分层故障传播有向图模型实现了系统层级分解,简化了故障传播分析过程,为关键路径识别奠定了基础;将故障传播强度作为关键路径识别的依据,避免了传统分析方法基于单一指标描述数控车床故障传播行为而产生的偏差,实现了准确定位故障源,准确识别系统关键路径. 所提方法有助于系统故障诊断与维护.

关键词: 数控车床; 分层故障传播有向图; 故障传播概率; 故障传播强度; 故障传播机理分析

中图分类号: TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2018)07-0131-06

Failure propagation mechanism analysis of CNC lathe

ZHANG Yingzhi, LIU Jintong, SHEN Guixiang

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To study the failure propagation mechanism of CNC lathe, i.e., to identify the critical nodes and critical failure propagation path of system, by applying the digraph theory, integrating DEMATEL with ISM method, the hierarchy failure propagation digraph model of CNC lathe is constructed based on failure data. A failure propagation strength is defined based on failure propagation probability and edge betweenness to characterize failure propagation behavior, and then a failure propagation mechanism analysis method for CNC lathe according to the hierarchy failure propagation digraph model and the failure propagation strength is proposed. The analysis result shows that the system hierarchy failure propagation digraph model achieves the system hierarchy decomposition, and simplifies the failure propagation analysis process, which lays a foundation for the critical path identification. Regarding the failure propagation strength as criterion of critical path identification avoids the deviation arose from the traditional analysis method based on single index to describe the failure propagation behavior of CNC lathe, and realizes precise failure source and system critical path identification. This helps to the system failure diagnosis and maintenance.

Keywords: CNC lathe; hierarchy failure propagation digraph; failure propagation probability; failure propagation strength; failure propagation mechanism analysis

当前国产数控车床运行故障多发,车床运行可靠性下降“发于内而形于外”,是系统组件独立故障和传播故障共同作用的结果. 系统局部组件故障能够沿着多条路径逐步向其他组件扩散,少数具有高危害传播状态的路径甚至会引起整机瘫痪. 进行数控车床故障传播机理分析,探寻数控车床运行可靠性下降的内因,是数控车床产业可靠性研究的重点和关键.

数控车床是集机、电、液、控于一体的复杂设备集成系统,组件单元间高耦合连接,影响作用形式多

样. 系统故障的层次性、传播性、并发性及不确定性等特征,使得系统故障传播机理分析愈加困难. 得到正确的数控车床故障传播机理分析结论与事先建立完备的系统故障传播模型、评估综合表征故障传播行为的指标等工作密切相关. 描述故障传播的模型很多,如 Petri 网、元胞自动机、拓扑网络模型、贝叶斯网等^[1-4],这些方法多基于图论展开,但都不完全适用于本文研究对象. 制约故障传播行为的影响指标众多,近年来研究发现,故障传播范围不局限于近邻,还可能呈现一定的远程联动关系^[5],即处于故障传播模型结构中关键位置的组件,不仅仅能够将故障传至与之直接相连的组件,也可能影响到一些远程组件. 传统基于故障概率、风险值或故障传播概率等单一指标研究数控车床故障传播行为^[6-7],忽略模型结构特征影响,会导致一定误差产

收稿日期: 2017-07-23

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(20170101212JC);吉林省自然科学基金项目(20150101025JC);高档数控机床与基础制造装备科技重大专项项目(2015ZX04003002)

作者简介: 张英芝(1970—),女,副教授,博士生导师;
申桂香(1957—),女,教授,博士生导师

通信作者: 刘津彤, 1094267138@qq.com

生,甚至得出错误结论.基于多指标的综合故障传播分析方法只见于电力、交通等网络^[8-9].

本文结合数控车床组件运行故障信息,针对数控车床故障传播特点,基于图论中故障传播有向图模型^[10],考虑系统结构特性,结合层次性分解技术,构建故障传播结构化、层次化模型,以描述数控车床组件故障的分步传播和扩散行为,且该模型不依赖于精确的数学模型,可实现快速建模及故障定位;考虑组件间故障传播概率、故障传播模型结构对故障传播行为的双重影响,评估综合表征故障传播行为的指标,识别系统关键节点及关键故障传播路径,从整体上研究故障发生的根本原因和内在传播机理,这对于提高故障诊断可信性、系统使用可靠性,保障大型复杂系统安全运行具有一定的指导意义.

1 分层故障传播有向图模型构建

首先以数控车床各个组件为节点集合 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 将组件间直接故障传播关系抽象为节点间互连的有向边集合 $E = \{e_{i \rightarrow j}\} (1 \leq i, j \leq n)$, 构建系统故障传播有向图 $D = (V, E)$. 进而集成 DEMATEL/ISM 方法分解模型 D 中各节点层级, 层级分解流程如图 1 所示.

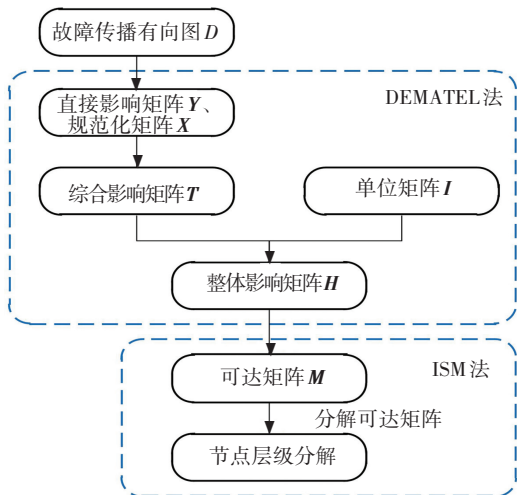


图 1 集成 DEMATEL/ISM 的层级分解流程图

Fig.1 Hierarchy decomposition flow chart based on DEMATEL/ISM

依据层级分解结果,提取骨架矩阵 M' , 构建数控车床分层故障传播有向图模型 D_1 , 该模型可实现系统结构化和层次化,定位故障根源层组件,划分故障表层组件(故障多发层组件),同时明确组件间多层故障传播路径,为关键路径识别奠定基础.

2 故障传播概率评估

2.1 组件间故障影响度

PageRank 算法^[11]是基于网络链接结构计算网

页间相关性和重要性排名的一类算法,故引入 PageRank 算法度量某组件对其出链组件的故障影响度,定量分析组件间故障影响能力^[12].

在相关假设条件下^[13],故障传播有向图 $D = (V, E)$ 中组件节点 A 的故障影响度(简称 R 值)的计算公式为

$$R(A) = \frac{(1-d)}{n} + d \sum_{v \in O(A)} \frac{R(v)}{I_v}. \quad (1)$$

式中: n 为组件节点总数; d 为阻尼因子,表示系统出现故障传播现象的概率,本文取传播故障数与总故障数的比值; $O(A)$ 为节点 A 的出链节点集合(即所有由节点 A 指出的节点集合); I_v 为节点 v 的入链节点数量(即所有指向节点 v 的节点数量).

假设故障传播符合马尔科夫过程,因此定义一个 n 维向量,它的分量是各个组件的故障影响度值(记为 $R(v_i)$),即 $R = [R(v_1), R(v_2), \dots, R(v_n)]^T$. 依据式(1), R 值的矩阵化迭代计算方式为

$$R^{x+1} = \frac{1-d}{n} e + d (Q')^T R^x. \quad (2)$$

式中: R^{x+1} 、 R^x 分别表示第 $(x+1)$ 次、第 x 次迭代所得各组件节点的故障影响度向量, $e = (1, 1, \dots, 1)^T$, Q' 为修正的状态转移概率矩阵(转置直接影响矩阵 Y^T 按行归一化得到矩阵 Q , 为了便于故障影响度计算,用向量 $(1/n, 1/n, \dots, 1/n)$ 替换矩阵 Q 中元素全为 0 的行,得到修正的状态转移概率矩阵 Q').

ε 为迭代收敛平稳阈值,赋予每个组件节点一个 R 初始值,当计算满足 $|R^{x+1} - R^x| < \varepsilon$ 时,迭代结束,得到各个组件节点故障影响度 R 值.

若节点 v_i 故障且能够将故障传至节点 v_j , 则节点 v_i 将获得部分 R 值,该值依赖于 $R(v_j)$ 和 I_{v_j} 值大小;若 $R(v_j)$ 值较高,则 $R(v_i)$ 值也可能高,意味着连接两节点“输送故障”的有向边的故障影响度也可能高.依据该计算思想,结合数控车床分层故障传播有向图模型 D_1 , 定义组件间故障影响度为

$$R(e_{i \rightarrow j}) = \sqrt{R(v_i) R(v_j)}. \quad (3)$$

2.2 组件间故障传播概率

依据采集的故障数据评估各组件节点故障概率,进而融合组件间故障影响度表征组件间故障传播概率,组件 v_i 故障对其出链组件 v_j 的故障传播概率表示为

$$P(e_{i \rightarrow j}) = F_i(t) R(e_{i \rightarrow j}). \quad (4)$$

3 故障传播强度评估

实际中,虽然某些支路的故障传播概率不大,但因其处于故障传播模型结构中较关键的位置,也可

能引发高危害的故障传播状态. 度量位置重要度的边介数指标一方面反映故障流经频率, 一方面体现与模型中其他支路联络关系的密切程度^[14], 边介数应视为影响故障传播行为的重要模型结构指标.

本文定义组件间故障传播强度 $I(e_{i \rightarrow j})$ 为故障通过有向边 $e_{i \rightarrow j}$ 进行传播的强值, 该值越大表示故障通过该有向边的传播代价越小且后果越严重, 即该边方向为更有利于故障传播的方向. 其综合了组件间故障传播概率和边介数两指标量化某有向边对故障传播的贡献作用, 作为关键路径识别的依据.

$$I(e_{i \rightarrow j}) = \frac{P(e_{i \rightarrow j})}{\sum P(e_{i \rightarrow j})} + \frac{L(e_{i \rightarrow j})}{\sum L(e_{i \rightarrow j})}, \quad (5)$$

式中 $L(e_{i \rightarrow j})$ 为有向边 $e_{i \rightarrow j}$ 的介数值.

4 故障传播机理分析

4.1 故障传播范围界定

理论上, 模型 D_1 中根源层节点故障可以沿着任意路径一直传至表层节点. 实际上, 系统安全性要求规定, 某条路径的故障传播概率高于阈值 10^{-8} 时才能进行传播^[15]. 节点 v_m 故障沿着路径 k 传播至节点 v_l 的概率表示为

$$P_k(v_m \rightarrow v_l) = \prod P(e_{i \rightarrow j}), \quad (6)$$

式中 k 为路径序号, $P_k(v_m \rightarrow v_l)$ 表示组成路径 k (节点 v_m 至节点 v_l) 相邻节点间故障传播概率乘积值.

因此, 应首先基于式(6)界定故障于模型 D_1 的传播范围, 再进行关键路径识别.

4.2 关键故障传播路径识别

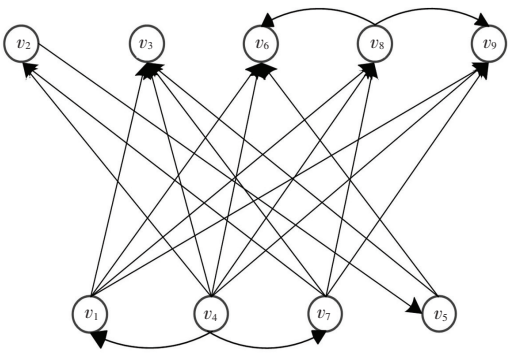
为便于关键故障传播路径识别, 可增设虚节点 (虚节点即为相关节点的像, 在实际系统中并不存在) 调整模型结构 D_1 , 即去除模型中中层及跨层直接故障传播关系, 使得组件间故障传播路径更加直观, 便于复杂系统的故障传播过程分析. 增设虚节点后的模型为 D_2 .

故障起始于根源层节点, 进而分步向上层节点扩散. 在界定的故障传播范围内, 基于关键路径识别依据 $I(e_{i \rightarrow j})$, 识别模型 D_2 各层级关键节点, 这些节点组成的路径则视为系统关键故障传播路径.

5 实例

5.1 数控车床分层故障传播有向图模型构建

依据国产某型数控车床故障数据, 对逐条故障信息进行故障机理分析, 据此构造数控车床故障传播有向图 $D = (V, E)$, 如图 2 所示.



1—数控系统; 2—进给系统; 3—刀架; 4—电气系统; 5—伺服系统; 6—主动传动系统; 7—液压系统; 8—辅助系统; 9—基础部件

图 2 数控车床故障传播有向图 (D)

Fig. 2 Failure propagation digraph of CNC Lathe
其矩阵化表达形式, 直接影响矩阵 $Y = [y_{ij}]_{n \times n}$ 为

$$Y = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 & v_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 4 & 0 & 0 & 3 & 1 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

式中

$$y_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j; \\ \text{组件 } v_i \text{ 故障引起组件 } v_j \text{ 发生故障的次数}, & \\ (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) & i \neq j. \end{cases}$$

依据直接影响矩阵 Y , 具体参照文献[16], 分解模型 D 中各组件节点层级, 如表 1 所示.

表 1 组件节点层级分解表

Tab. 1 Component node hierarchy decomposition table		
层级	节点代码	隶属组件名称
L_1	$v_3、v_6、v_9$	刀架、主动传动系统、基础部件
L_2	$v_5、v_8$	伺服系统、辅助系统
L_3	$v_1、v_2$	数控系统、进给系统
L_4	v_7	液压系统
L_5	v_4	电气系统

依据表 1, 提取骨架矩阵 M' 为

$$M' = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_3 & v_6 & v_9 & v_5 & v_8 & v_1 & v_2 & v_7 & v_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_3 \\ v_6 \\ v_9 \\ v_5 \\ v_8 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_7 \\ v_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

依据表 1 从上到下逐级排列组件节点,依据骨架矩阵 $\mathbf{M}'$ 确定各层级组件节点间连接关系并用有向边表示,据此构建数控车床分层故障传播有向图模型 D_1 ,如图 3 所示.

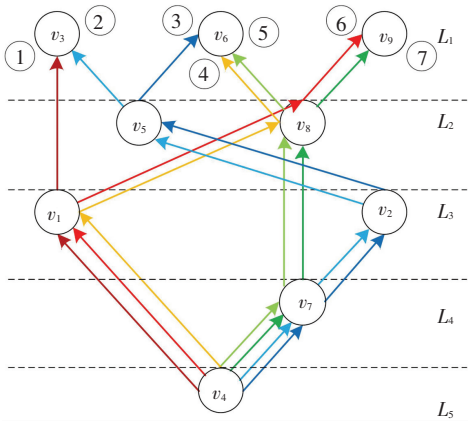


图 3 数控车床分层故障传播有向图(D_1)

Fig. 3 CNC Lathe hierarchy failure propagation digraph

5.2 故障传播概率评估

数控车床组件节点数 n 为 9,组件间传播故障数为 41,系统总故障数为 129,因此定义一个维度为 9 的故障影响度向量 $\mathbf{R} = [R(v_1), R(v_2), \cdots, R(v_9)]^T$, 阻尼因子 $d = 41/129 \approx 0.3178$,赋予 $\mathbf{R}^1 = (1, 1, \cdots, 1)^T$, 设迭代收敛平稳阈值 $\varepsilon = 0.0001$.

根据直接影响矩阵 $\mathbf{Y}$, 构造修正的状态转移概率矩阵 $\mathbf{Q}'$ 为

$$\mathbf{Q}' = \begin{matrix} & \begin{matrix} v_1 & v_2 & v_3 & v_4 & v_5 & v_6 & v_7 & v_8 & v_9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ \frac{3}{11} & 0 & 0 & \frac{4}{11} & \frac{2}{11} & 0 & \frac{2}{11} & 0 & 0 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2}{11} & 0 & 0 & \frac{3}{11} & \frac{5}{11} & 0 & 0 & \frac{1}{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{9} & 0 & 0 & \frac{3}{9} & 0 & 0 & \frac{5}{9} & 0 & 0 \\ \frac{1}{5} & 0 & 0 & \frac{1}{5} & 0 & 0 & \frac{2}{5} & \frac{1}{5} & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

依据式 (2), 编程计算各组件故障影响度 $R(v_i)$, 如表 2 所示.

表 2 组件节点故障影响度

Tab. 2 Component node failure influence degree			
组件代码	$R(v_i)$	组件代码	$R(v_i)$
v_1	0.103 6	v_6	0.083 2
v_2	0.114 9	v_7	0.132 8
v_3	0.083 2	v_8	0.090 8
v_4	0.208 3	v_9	0.083 2
v_5	0.100 0		

进而根据模型 D_1 和式 (3), 计算组件间故障影响度 $R(e_{i \rightarrow j})$, 如表 3 所示.

表 3 组件间故障影响度

Tab. 3 Failure influence degree between component nodes			
有向边	$R(e_{i \rightarrow j})$	有向边	$R(e_{i \rightarrow j})$
$e_{4 \rightarrow 1}$	0.146 9	$e_{5 \rightarrow 6}$	0.091 2
$e_{1 \rightarrow 3}$	0.092 8	$e_{1 \rightarrow 8}$	0.097 0
$e_{4 \rightarrow 7}$	0.166 3	$e_{8 \rightarrow 6}$	0.086 9
$e_{7 \rightarrow 2}$	0.123 5	$e_{7 \rightarrow 8}$	0.109 8
$e_{2 \rightarrow 5}$	0.107 2	$e_{8 \rightarrow 9}$	0.086 9
$e_{5 \rightarrow 3}$	0.091 2		

依据各组件故障数据,构建组件故障概率函数 $F_i(t)$, 并计算系统运行时间为 800 h 时,各组件的故障概率,整理如表 4 所示.

表 4 组件节点故障概率

Tab. 4 Component node failure probability	
$F_i(t)$	$F_i(800)$
$F_1(t) = 1 - \exp[-(t/873.651\ 1)^{1.103\ 1}]$	0.596 4
$F_2(t) = 1 - \exp[-(t/900.613\ 1)^{0.988\ 0}]$	0.589 2
$F_3(t) = 1 - \exp[-(t/880.162\ 0)^{0.860\ 0}]$	0.601 9
$F_4(t) = 1 - \exp[-(t/1070.838\ 7)^{1.209\ 4}]$	0.504 8
$F_5(t) = 1 - \exp[-(t/933.244\ 5)^{1.081\ 1}]$	0.571 1
$F_6(t) = 1 - \exp[-(t/613.822\ 3)^{0.831\ 9}]$	0.712 5
$F_7(t) = 1 - \exp[-(t/904.153\ 2)^{1.164\ 5}]$	0.579 9
$F_8(t) = 1 - \exp[-(t/760.009\ 9)^{0.863\ 8}]$	0.648 4
$F_9(t) = 1 - \exp[-(t/888.942\ 5)^{0.898\ 9}]$	0.597 3

依据式 (4), 结合表 3、表 4, 计算组件间故障传播概率 $P(e_{i \rightarrow j})$, 如表 5 所示.

表 5 800 h 组件间故障传播概率

Tab. 5 Failure propagation probability between component nodes /800 h			
有向边	$P(e_{i \rightarrow j})$	有向边	$P(e_{i \rightarrow j})$
$e_{4 \rightarrow 1}$	0.074 16	$e_{5 \rightarrow 6}$	0.052 09
$e_{1 \rightarrow 3}$	0.055 35	$e_{1 \rightarrow 8}$	0.057 85
$e_{4 \rightarrow 7}$	0.083 95	$e_{8 \rightarrow 6}$	0.056 35
$e_{7 \rightarrow 2}$	0.071 61	$e_{7 \rightarrow 8}$	0.063 67
$e_{2 \rightarrow 5}$	0.063 16	$e_{8 \rightarrow 9}$	0.056 35
$e_{5 \rightarrow 3}$	0.052 09		

5.3 故障传播强度评估

计算模型 D_1 各边介数 $L(e_{i \rightarrow j})$, 如表 6 所示.

表 6 边介数
Tab. 6 Edge betweenness

有向边	$L(e_{i \rightarrow j})$	有向边	$L(e_{i \rightarrow j})$
$e_{4 \rightarrow 1}$	1.5	$e_{5 \rightarrow 6}$	2
$e_{1 \rightarrow 3}$	0.5	$e_{1 \rightarrow 8}$	3
$e_{4 \rightarrow 7}$	4.5	$e_{8 \rightarrow 6}$	2
$e_{7 \rightarrow 2}$	5.5	$e_{7 \rightarrow 8}$	3
$e_{2 \rightarrow 5}$	6.5	$e_{8 \rightarrow 9}$	3
$e_{5 \rightarrow 3}$	2.5		

依据式(5),结合表 5、表 6,计算组件间故障传播强度 $I(e_{i \rightarrow j})$,如表 7 所示。

表 7 800 h 组件间故障传播强度

Tab. 7 Failure propagation strength between component nodes /800 h

有向边	$I(e_{i \rightarrow j})$	有向边	$I(e_{i \rightarrow j})$
$e_{4 \rightarrow 1}$	0.152 1	$e_{5 \rightarrow 6}$	0.134 7
$e_{1 \rightarrow 3}$	0.095 3	$e_{1 \rightarrow 8}$	0.172 5
$e_{4 \rightarrow 7}$	0.254 6	$e_{8 \rightarrow 6}$	0.140 9
$e_{7 \rightarrow 2}$	0.266 1	$e_{7 \rightarrow 8}$	0.181 0
$e_{2 \rightarrow 5}$	0.283 2	$e_{8 \rightarrow 9}$	0.170 3
$e_{5 \rightarrow 3}$	0.149 4		

5.4 数控车床故障传播机理分析

依据式(6)界定模型 D_1 的故障传播范围,以根源层节点 v_4 故障沿着路径 1 传播至表层节点 v_3 为例, $P_1(v_4 \rightarrow v_3) = P(e_{4 \rightarrow 1})P(e_{1 \rightarrow 3}) = 4.104\ 6\text{E} - 03$ 。同理

$$\begin{aligned} P_2(v_4 \rightarrow v_3) &= 1.977\ 7\text{E} - 05, \\ P_3(v_4 \rightarrow v_6) &= 1.977\ 7\text{E} - 05, \\ P_4(v_4 \rightarrow v_6) &= 2.417\ 5\text{E} - 04, \\ P_5(v_4 \rightarrow v_6) &= 3.011\ 8\text{E} - 04, \\ P_6(v_4 \rightarrow v_9) &= 2.417\ 5\text{E} - 04, \\ P_7(v_4 \rightarrow v_9) &= 3.011\ 8\text{E} - 04, \end{aligned}$$

皆高于阈值 10^{-8} 。计算结果表明:距离最远的故障表层节点都在根源层节点故障可达到的传播范围内。因此,界定故障能够沿着模型 D_1 中任意路径到达任何节点。

模型 D_1 中存在三处跨层直接故障传播关系,分别为 $e_{4 \rightarrow 1}$ 、 $e_{1 \rightarrow 3}$ 、 $e_{7 \rightarrow 8}$,不便于故障传播过程分析。引入虚节点 v_1' 、 v_3' 、 v_8' 从而阻断节点 v_4 和 v_1 、 v_1 和 v_3 、 v_7 和 v_8 的直接联系,得到模型 D_2 ,如图 4 所示。

故障由根源层 L_5 分步向上传播,由图 4 可知,一步传播 $L_5 \rightarrow L_4$ 有两条支路,根据表 7 可知, $I(e_{4 \rightarrow 7}) = 0.254\ 6 > I(e_{4 \rightarrow 1}) = 0.152\ 1$,因此,故障优先选择路径 $v_4 \rightarrow v_7$ 进行传播,定位 v_7 为 L_4 层关键节点。重复此步骤,逐级确定关键节点 v_2 、 v_5 、 v_3 ,这些

节点组成的路径②则视为运行时间为 800 h 时系统的关键故障传播路径,对应系统组件为电气→液压→进给→伺服→刀架。关键路径排序为②、③、⑦、⑤、⑥、④、①。在关键路径②和次关键路径③上,故障根源层组件为电气系统,属于动力机构是系统故障源;故障表层组件为刀架和主传动系统,属于执行机构是系统故障多发组件,与数控车床故障数据中二者故障数目较多相符。

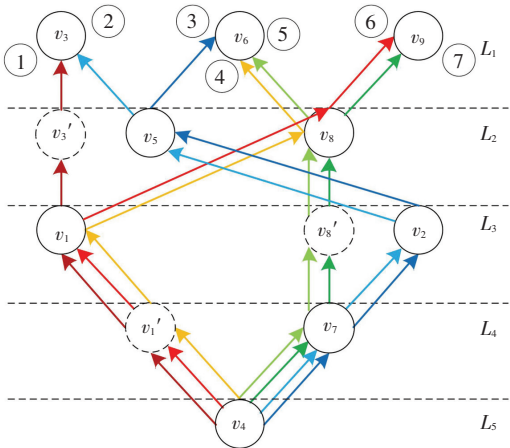


图 4 增设虚节点的数控车床分层故障传播有向图(D_2)
Fig. 4 CNC Lathe hierarchy failure propagation digraph with virtual nodes

要提高系统整体可靠性、安全性,应重点防护关键路径,有针对性地对关键节点进行监测并诊断,及时排除故障隐患,防止故障蔓延。

6 结 论

1) 基于数控车床组件运行故障信息,应用有向图理论、集成 DEMATEL/ISM 方法构建了数控车床分层故障传播有向图模型,实现了系统层级分解,即描述了故障的分步扩散结构,同时直观清晰地展示出组件间多层故障传播路径,简化了故障传播分析过程,为关键路径识别奠定基础。

2) 引入 PageRank 算法评估组件间故障影响度,结合组件节点故障概率,度量组件间故障传播概率;基于组件间故障传播概率和模型结构指标边介数定义故障传播强度表征故障传播行为,值越大表示故障通过某支路的传播代价越小且后果越严重,作为关键路径识别的依据。

3) 在界定的故障传播范围内,基于故障传播强度,结合增设虚节点的系统分层故障传播有向图,模拟故障分步扩散过程,定位系统故障源:电气系统。识别系统关键故障传播路径:电气系统→液压系统→进给系统→伺服系统→刀架,从而实现了数控车床故障传播机理分析,研究结论为故障诊断奠定基础。

参考文献

- [1] WANG Yifeng, CHANG C T. A hierarchical approach to construct Petri nets for modeling the fault propagation mechanisms in sequential operations[J]. Computers & Chemical Engineering, 2003, 27(2): 259–280. DOI: 10.1016/S0098-1354(02)00193-X.
- [2] PENG Sancheng, WANG Guojun, YU S. Modeling the dynamics of worm propagation using two-dimensional cellular automata in smart-phones[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2013, 79(5): 586–595. DOI: 10.1016/j.jcss.2012.11.007.
- [3] WANG Xiaofan, XU Jian. Cascading failures in coupled map lattices[J]. Physical Review E, 2004, 70(5): 056113. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.056113.
- [4] BOBBIO A, CODETTA-RAITERI D, MONTANI S, et al. Modeling cascading failure propagation through dynamic bayesian networks[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2009, 42(5): 209–214. DOI: 10.3182/20090610-3-IT-4004.00041.
- [5] LI Daqing, JIANG Yinan, KANG Rui, et al. Spatial correlation analysis of cascading failures: Congestions and Blackouts[J]. Scientific Reports, 2014, 4(4): 5381. DOI: 10.1038/srep05381.
- [6] 王广勇, 郭正才, 朱艳飞. 数控机床主轴系统 FMECA 分析及改进措施[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015, (11): 111–113.
- WANG Guangyong, GUO Zhengcai, ZHU Yanfei. FMECA and improve measurement of spindle system of CNC[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015, (11): 111–113. DOI: 10.13462/j.cnki.mmtamt.2015.11.031.
- [7] 盛博, 邓超, 熊尧, 等. 基于图论的数控机床故障诊断方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(6): 1559–1570.
- SHENG Bo, DENG Chao, XIONG Yao, et al. Fault diagnosis for CNC machine tool based on graph theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(6): 1559–1570. DOI: 10.13196/j.cims.2015.06.019.
- [8] 舒征宇, 邓长虹, 黄文涛, 等. 小世界电力网络故障传播过程与抑制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 862–867.
- SHU Zhengyu, DENG Changhong, HUANG Wentao, et al. Analysis on propagation of cascading failure in small-world power network and its suppressing strategy[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 862–867. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2013.03.016.
- [9] 史浩. 基于网络模型的设备集成系统安全控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- SHI Hao. Research on safety and control method for equipment integrated system based on network model[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [10] KOKAWA M, MIYAZAKI S, SHINGAI S. Fault location using digraph and inverse direction search with application[J]. Automatica, 1983, 19(6): 729–735. DOI: 10.1016/0005-1098(83)90039-0.
- [11] BRIN S, PAGE L. The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine[J]. Computer Networks and ISDN Systems, 1998, 30(1): 107–117. DOI: 10.1016/S0169-7552(98)00110-X.
- [12] 刘津彤. 基于有向图的数控车床故障传播机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- LIU Jintong. Research on failure propagation mechanism of CNC Lathe based on digraph[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [13] ZHANG Yingzhi, LIU Jintong, SHEN Guixiang, et al. Reliability evaluation of machine center components based on cascading failure analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 933–942. DOI: 10.1007/s10033-017-0144-y.
- [14] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 32–34.
- SUN Xijing, SI Shoukui. Complex network algorithm and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 32–34.
- [15] 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. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2005.08.013.
- [16] 张英芝, 吴茂坤, 申桂香, 等. 基于 DEMATEL/ISM 的组合机床故障相关性分析[J]. 工业工程, 2014, 17(3): 92–96, 127.
- ZHANG Yingzhi, WU Maokun, SHEN Guixiang, et al. An analysis of failure correlation of assemble machine tool based on DEMATEL/ISM[J]. Industrial Engineering Journal, 2014, 17(3): 92–96, 127. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7375.2014.03.017.

(编辑 王小唯)