

基于解释结构模型的复杂系统故障诊断

邱继伟^{1,2}, 罗海胜¹, 张亚¹, 肖定国², 赵冠捷¹, 马茂冬¹

(1. 中国兵器工业标准化研究所质量研究室, 北京 100089; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要:为实现复杂系统故障诊断,提出一种基于解释结构模型的复杂系统的故障诊断方法。首先,根据故障机理分析建立系统要素故障关联矩阵,应用解释结构模型,通过矩阵转换将复杂系统故障关联关系转化为直观的递阶层次结构模型,实现系统故障传播结构化和层次化;引入PageRank算法进行系统要素故障影响度与被影响度评估,根据同层组件影响度与被影响度大小及故障传递逻辑明确系统故障传递主因,为故障诊断提供依据。最后,以某设备为例进行具体应用,验证方法的有效性。

关键词:系统工程;应用解释结构模型;故障诊断;故障路径

中图分类号: TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3168-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221642

Fault diagnosis of complex system based on interpretive structural modeling

QIU Ji-wei^{1,2}, LUO Hai-sheng¹, ZHANG Ya¹, XIAO Ding-guo², ZHAO Guan-jie¹, MA Mao-dong¹

(1. Office of Quality Research, China Ordnance Industrial Standardization Research Institute, Beijing 100089, China; 2. College of Mechanical and Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the fault management system of complex system, a fault diagnosis strategy based on interpretive structural modeling (ISM) is proposed. According to the fault mechanism analysis, the fault correlation matrix of system elements is established, and the interpretive structural model is applied to transform the complex system fault correlation relationship into an intuitive hierarchical model through matrix transformation, so as to realize the structure and hierarchical system fault propagation; The PageRank algorithm is introduced to evaluate the impact and influence of system element failures; The main cause of fault transmission is clarified through the magnitude of the impact related to component failure and the fault transmission logic, so as to provide a basis for fault diagnosis. Finally, a device is used as an example to verify the effectiveness of the method.

Key words: systems engineering; interpretive structural modeling; fault diagnosis; fault path

收稿日期: 2022-12-29.

基金项目: 中央军委装备发展部技术基础项目(JZX7J202301ZL000300).

作者简介: 邱继伟(1986-),男,副研究员,博士.研究方向:装备通用质量特性. E-mail: qiujiwei235@126.com

通信作者: 罗海胜(1981-),男,研究员,硕士.研究方向:装备通用质量特性. E-mail: 43365843@qq.com

0 引言

系统的功能集成化提高了系统结构的复杂性,尤其是随着高新技术的应用,对环境高适应性的复杂系统逐渐成为加工制造系统的主流。系统结构的复杂性造成系统故障频次增加,故障相关性增强,诊断系统故障的难度也随之加大。

现阶段故障诊断策略主要从定性与定量两个角度分析:定性分析主要包括图论法、专家系统、定性仿真;定量分析主要包括解析模型法、数据驱动法^[1-3]。图论法因直观、易于理解而得到广泛应用,Bhattacharyya等^[4]将其用于网络故障管理,利用图论进行系统独立故障与相关故障的诊断和定位识别,但当系统复杂性较高时,基于图论的搜索逻辑也将变得非常复杂,且诊断正确率受到影响;盛博等^[5]应用图论法表征了故障传播关系,根据建立的多故障传播模型,在此基础上利用故障原因定位算法,确定故障原因优先级,但对故障传递主要路径并未作系统阐述。刘红梅等^[6]提出了一种基于无智能卡尔曼滤波器的故障诊断方法。该方法通过利用离散状态空间模型估计液压伺服系统的模型参数,此搜索过程非常复杂,特别是当该系统的复杂性增加时,该方法的低精度导致其提供无效结果。综上所述,图论法是基于系统定性分析得到的知识建立的,因缺乏定量知识,致诊断精度较低。另外,单一的图论法难以解决所有故障诊断问题,需要将其同其他故障诊断方法结合在一起^[7,8]。

解释结构模型(ISM)作为一种系统结构模型构建方法,其思想是将复杂系统分为若干组件要素,以要素为节点、以要素间关联关系为有向边绘制有向图;借助矩阵表示系统要素间的关联关系和依赖关系;通过矩阵分解得到层次结构模型^[9,10]。在故障诊断中,ISM法能直观表示不同层次的系统要素故障关联关系,但是无法比较同层次系统要素在故障关联关系中的作用大小。因此,ISM法通常与层次分析法(AHP)、DEMATEL、FMECA、高阶统计等方法结合应用^[11-15]。PageRank算法是一种利用节点之间逻辑关系计算各节点重要程度的算法,通过计算得到的权重,可以对各节点的重要性进行排序^[16,17]。

本文引入ISM法,在依据故障机理分析建立系统组件故障传递结构模型的基础上,基于PageRank法计算系统要素的故障影响度与被影响

度,以此判断同层组件要素在故障传递中的地位和作用;为决策者或分析人员在提供定性结论的同时,还给出量化的指标。明确组件故障相关影响大小及依存逻辑结构,实现系统故障传递结构化和层次化,为动态故障源和故障传递关键路径识别提供依据。

1 基于ISM-PageRank的系统故障诊断原理

复杂系统的故障事件一般是从系统中的某一系统要素的故障开始,继而引发系统要素的系列故障,这种关联故障的迅速传播最终导致系统的崩溃。为明确系统故障源,找到故障传递主因及传递线路,本文依据故障机理分析建立邻接矩阵,引入ISM法构建故障传递结构模型;通过PageRank法计算组件故障相关影响度,进而计算组件故障中心度与原因度,综合多级递阶结构模型,定位故障源,识别关键故障传递路径。具体如图1所示。

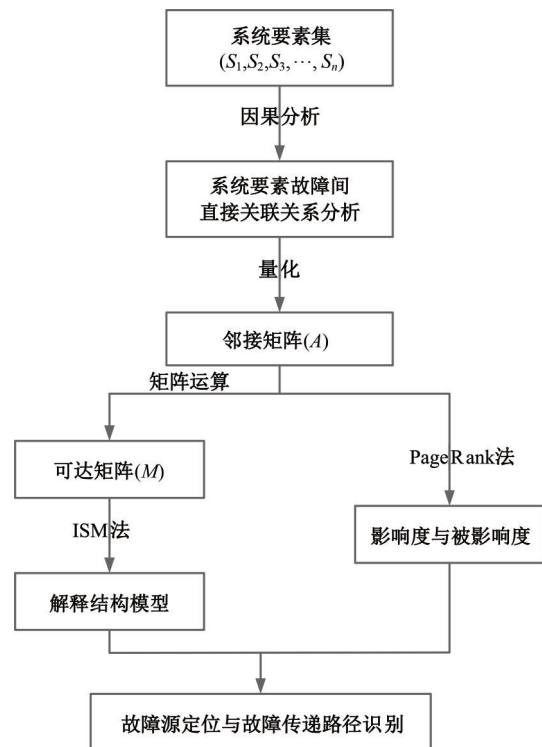


图1 ISM-PageRank的系统故障诊断原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system fault diagnosis for ISM-PageRank

1.1 系统要素故障关联分析及量化

首先,依据系统结构功能原理将复杂系统划分为 n 个组件要素,并对采集的系统故障数据进

行故障机理分析,确定系统要素间故障传递关系,据此建立各系统组件要素间的邻接矩阵。

由 n 个系统要素组成 n 阶邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$, 其组成元素 a_{ij} 按下面定义赋值:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{要素 } S_i \text{ 直接影响要素 } S_j \\ 0, & \text{要素 } S_i \text{ 不影响要素 } S_j \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$$

如一个由 6 个组件组成的系统,若组件 S_1 故障将导致 S_2, S_3, S_4, S_5 故障,则邻接矩阵 A 中的 $a_{12} = 1, a_{13} = 1, a_{14} = 1, a_{15} = 1$ 。

1.2 基于 ISM 法的故障传递模型构建

1.2.1 结构矩阵定义

定义一个 n 阶矩阵 $M = [m_{ij}]$, 其组成元素 m_{ij} 按下面定义赋值:

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{要素 } S_i \text{ 影响要素 } S_j \\ 0, & \text{要素 } S_i \text{ 不影响要素 } S_j \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$$

则矩阵 M 为可达矩阵, M 可由邻接矩阵 A 加上单位矩阵 I , 经过 r 步自乘运算为:

当 $(I + A)^{r-2} \neq (I + A)^{r-1} = (I + A)^r, r \leq n - 1$, 则 $M = (I + A)^r$ 。

若可达矩阵中 $m_{ij} = m_{ji} = 1$, 表明要素 S_i 与 S_j 是强链接关系。

将可达矩阵去掉强链接关系,按层级、每行要素为 1 的数目多少,由少到多排序,得到缩减可达矩阵 M' , 通过 $M' - (M' - I)^2$ 得到结构矩阵 M'' 。

1.2.2 基于 ISM 的故障传递模型建模

基于 ISM 的故障传递模型建模流程如图 2 所示。由可达矩阵开始,解释结构模型构建步骤如下:

(1) 可达集 $R(S_i)$ 和前因集 $A(S_i)$ 定义要素 S_i 能到达的系统要素的集合为可达集 $R(S_i)$, 即可达矩阵中第 i 行中值为 1 的元素对应的列要素的集合。

定义能到达要素 S_i 的所有要素的集合为前因集 $A(S_i)$, 即可达矩阵中第 i 列中值为 1 的元素对应的行要素的集合。

可达集、前因集反映了各要素间包括直接关系和间接关系的所有相互关系。

(2) 要素层次级别划分

当 $R(S_i) \cap A(S_i) = R(S_i)$ 时, 要素 S_i 处于系统的最高级 L_1 中; 去掉最高级要素, 重复上述步

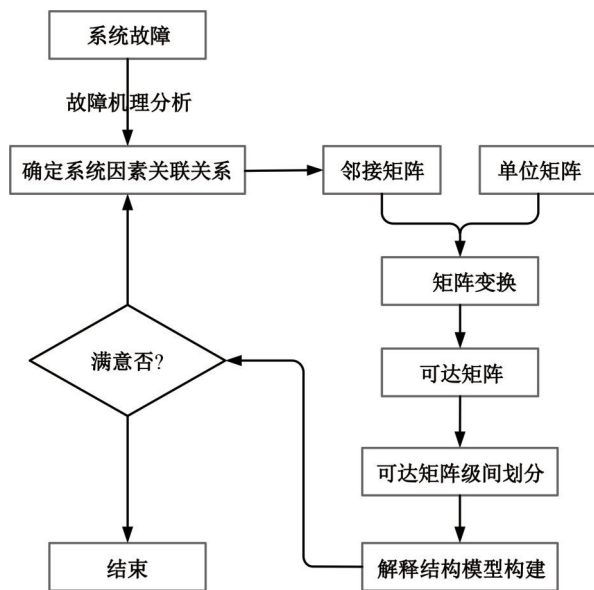


图 2 解释结构模型构建流程图

Fig. 2 Explanation of the construction process diagram of the structural model

骤,即可确定系统的第 2 级 L_2 、3 级 L_3 ... 直至最低级要素。

(3) 故障传递结构模型构建

将可达矩阵去掉强链接关系,得到缩减可达矩阵 M' , 通过 $M'' = M' - (M' - I)^2$, 运用 Matlab 软件可得出结构矩阵 M'' 。

按要素的等级顺序将要素分层,然后再根据结构矩阵将要素间连接关系用有向线相连,并补充强链接关系,即可构建出系统故障传递层级结构模型。

1.3 故障相关影响度评估

1.3.1 基于 PageRank 的节点重要度计算

PageRank 算法是 Google 公司创始人、斯坦福大学计算机博士 Lawrence Page 和 Sergey Brin 于 1998 年开发的,互联网上网页群间存在着复杂的相互链接关系,可依据相关性和重要性求解各页面的重要度指标 PageRank 值(以下简称 PK 值),并依据数值大小进行网页重要性排序^[18-20]。

设互联网系是一个由 n 个页面节点及有向边组成的有向图 $G = (V, E)$, 其中节点集合为 V , 有向边集合为 E 。若网页 V_1, V_2, \dots, V_k 是链入网页 A 的页面节点,那么网页 A 的重要度 PR 值 $PR(A)$ 为^[21]:

$$PR(A) = \frac{(1-d)}{n} + d \sum_{i=1}^k \frac{PR(V_i)}{C(V_i)} \quad (1)$$

式中: $C(V_i)$ 为页面节点 V_i 的出度, 节点 V_i 的出度是以它为起点的有向边的数量; d 为阻尼因子,

表示沿着链接方向访问页面的概率。

每个页面节点 V_i 对应的 PR 值都是 $d \frac{PR(V_i)}{C(V_i)}$,

考虑到存在孤立的节点,故定义每个页面节点的 PR 初始值为 $\frac{(1-d)}{n}$ 。

假设用户浏览的网页是一个与过去浏览历史无关的马尔可夫过程。邻接矩阵 A 中元素为 1 的个数为节点链接数,将 A 中每行元素除此行元素的总和(行元素全为 0 除外)得到矩阵 A' ,可看作马尔可夫转移概率矩阵, A' 转置得到转置矩阵 $(A')^T$ 。

定义 n 维向量 $P=(PR(1), PR(2), \dots, PR(n))^T$, P^{x+1} 表示第 $(x+1)$ 次迭代所得到的各节点的重要度 PR 所组成的 $(n \times 1)$ 阶矩阵,则 PR 值为:

$$P^{x+1} = \frac{1-d}{n} \times E + d \times (A')^T \cdot P^x \quad (2)$$

式中: d 为阻尼因子,取值在 0 和 1 之间,表示节点间传递概率; E 为 $(n \times 1)$ 阶矩阵,并且元素全为 1。

设 ϵ 为迭代收敛平稳阈值,本文取 10^{-8} ,各节点的初始 PR 值为 P^1 ,当满足 $|P^{x+1} - P^x| < \epsilon$ 时,迭代结束。

公式(2)展开可得:

$$P^{x+1} = \begin{bmatrix} (1-d)/n \\ (1-d)/n \\ \dots \\ (1-d)/n \end{bmatrix} + d \begin{bmatrix} l(p_1, p_1) & l(p_1, p_2) & \dots & l(p_1, p_n) \\ l(p_2, p_1) & \ddots & & \\ \dots & & l(p_i, p_j) & \\ l(p_n, p_1) & & & l(p_n, p_n) \end{bmatrix} \cdot P^x \quad (3)$$

若存在节点 i 到节点 j 的链接,那么, $\sum_{i=1}^n l(p_i, p_j) = 1$,

否则, $\sum_{i=1}^n l(p_i, p_j) = 0$ 。

1.3.2 故障相关影响度评估

根据 PageRank 原理,通过对转移矩阵的迭代最终可以得到各节点的转移概率,对邻接矩阵变换得到转移概率矩阵的转置矩阵 $(A')^T$,矩阵中同列元素 a_{ij} (即 $l(p_i, p_j)$, $i=1, 2, \dots, n$) 表示节点 i 对节点 j 的影响,由此得出各节点对节点 j 的影响

度,即节点 j 的被影响度 (CK)。将邻接矩阵转置变换得到概率矩阵 $(A')^T$,其元素 a_{ij}' 表示节点 i 对各节点的影响,即节点 i 的影响度 (CI),节点故障被影响度、影响度与节点的入度、出度正相关。

设系统由 n 个组件组成,定义一个 n 维向量 $CK=(CK(1), CK(2), \dots, CK(n))^T$, CK^{x+1} 表示第 $(x+1)$ 次迭代所得的各系统组件的 CK 值组成的 $(n \times 1)$ 阶矩阵。

根据式(1), CK 的计算公式为:

$$CK^{(x+1)} = \frac{1-d}{n} \times E + d \times (A')^T CK^{(x)} \quad (4)$$

同理, $CI=(CI(1), CI(2), CI(3), \dots, CI(n))^T$ 的计算公式为:

$$CI^{(x+1)} = \frac{1-d}{n} \times E + d \times (A^T)' CI^{(x)} \quad (5)$$

式中: $(A^T)'$ 为邻接矩阵 A 转置后,每行元素除此行元素的总和(行元素全为 0 除外)形成的转移概率矩阵; d 为阻尼因子,依据分析时间内相关故障与总故障数目之比计算得到本文取 10^{-8} 。

一般来说, PR 初值并不影响最终 PR 值的收敛性,也不改变最终 PR 值排序比例关系,所以一般取 $CK^{(1)}=(1, 1, \dots, 1)^T$, $CI^{(1)}=(1, 1, \dots, 1)^T$ 。

1.3.3 基于 ISM-PageRank 的故障诊断与验证 故障诊断假设:

- ① 复杂系统任一组件出现故障则系统故障;
- ② 对故障传递模型中可达的两个组件,如果都出现故障,那么故障源只是其中一个;
- ③ 根据经验分析的故障征兆只能反映部分故障信息。

根据系统故障传递网络模型,结合 PageRank 法得到的节点故障被影响度 CK 和影响度 CI ,进行故障诊断。

(1) 依据故障传递多级递阶结构模型,可明晰系统组件在故障传递中的位置。据此可将组件分为根故障、表象故障和中间故障三层。

(2) 依据被影响度 CK 确定某层次各系统要素受上一层次系统要素故障影响的大小;对于同层次间的系统要素,根据影响度 CI 值确定相邻层次间故障影响的大小。

(3) 故障是从根故障层经中间故障层传递到表象层的。故障诊断一般从表现层开始,经中间层逐级定位根故障要素。对表象层的某要素,可依据其被影响度大小确定其重要性;对故障源级组件依据其影响度大小确定其重要性;对同层中间层组件,分析其作为原因组件的重要性时,依据

(D)和数控系统(NC),但因其影响度相差不大,且易被电气系统(V)影响的系统要素是数控系统(NC),故数控系统(NC)是主要故障组件。

综上可知,加工中心关键组件依次是电气系统(V)、润滑系统(L)、主轴系统(S)与进给系统(J)。

故障传递的关键路径为:电气系统(V)-数控系统(NC)-主轴系统(S)-进给系统(J)。

由图 3 得到邻接矩阵 A , 标准化后由 DEMATEL 法, 得到系统组件要素间故障综合影响矩阵 T , 由此计算出机床每个组件的中心度, 如表 1 所示。

由中心度可知, 系统各层关键组件分别是: L_4 层中是电气系统, L_3 层中依次是数控系统、气动系统、液压系统和润滑系统, L_2 层中依次是主轴系统、冷却系统和排屑系统, L_1 层中依次是进给系统和刀库系统。由中心度并结合图 4 可知, 关键故障路径: 电气系统(V)→数控系统(NC)→主轴系统(S)→进给系统(J)。

由此可知, 本方法与 DEMATEL 方法中依据中心度分析方法一致, 且与文献[22]中结论一致, 故可证明本文方法的有效性。

表 1 中心度表

Table 1 The reason degree table

系统代码	中心度	系统代码	中心度
主轴系统 S	1.812 5	电气系统 V	1.343 75
刀库 M	1.015 625	气动系统 G	0.628 75
进给系统 J	1.956 875	润滑系统 L	0.562 5
数控系统 NC	0.875	冷却系统 W	0.5
液压系统 D	0.625	排屑系统 K	0.25

3 结束语

(1)解释结构模型借助图论知识和矩阵工具, 将系统组件故障间的复杂影响关系转化成可视化的结构模型, 从而明晰组件之间的故障关联关系和影响程度, 找出系统要素故障相互影响及相互依存的逻辑结构, 实现组件故障关系结构化和层级化。

(2)PageRank 算法对复杂系统内元素间的相依关系做出定量分析, 评估系统组件影响度和被影响度, 弥补 ISM 法无法评判同层次系统要素地位、作用的不足。

(3)根据系统实时故障相关关系建立邻接矩阵并计算故障相关影响度、构建故障传递模型, 并

据此进行实时故障诊断策略。本文通过案例应用, 并与 DEMATEL 方法对比, 验证了该方法的有效性, 从而为复杂系统实时故障诊断提供了新思路与方法。

参考文献:

- [1] 张海瑞, 洪东跑, 赵宇, 等. 基于变动统计的复杂系统可靠性综合评估[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1213-1218.
Zhang Hai-ru, Hong Dong-pao, Zhao Yu, et al. Synthetic reliability assessment for complex system based on dynamic population statistics[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(5): 1213-1218.
- [2] 李哈, 萧德云. 基于数据驱动的故障诊断方法综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(1): 1-9.
LI Han, Xiao De-yun. Survey on data driven fault diagnosis methods[J]. Control and Decision, 2011, 26(1): 1-9.
- [3] 周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述[J]. 自动化学报, 2014, 40(2): 161-171.
Zhou Dong-hua, Shi Jian-tao, He Xiao. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(2): 161-171.
- [4] Bhattacharyya S, Kumar R, Huang Z. A discrete event systems approach to network fault management: detection and diagnosis of faults[J]. Asian Journal of Control, 2011, 13(4): 471-479.
- [5] 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.
- [6] Liu H M, Liu D W, Lu C, et al. Fault diagnosis of hydraulic servo system using the unscented kalman filter[J]. Asian Journal of Control, 2014, 16(6): 1713-1725.
- [7] 韩光臣, 孙树栋, 司书宾. 基于图论的复杂系统建模技术研究[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(9): 1118-1121.
Han Guang-chen, Sun Shu-dong, Si Shu-bin. Research on complex system modeling technology based on graph theory[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(9): 1118-1121.
- [8] 刘鹏鹏, 左洪福, 苏艳, 等. 基于图论模型的故障诊

- 断方法研究进展综述[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 696-703.
- Liu Peng-peng, Zuo Hong-fu, Su Yan, et al. Review of research on fault diagnosis based on graph theory[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(5): 696-703.
- [9] Yokabed B, Mohammad J, Mahdi K, et al. The application of ISM model in evaluating agile suppliers selection criteria and ranking suppliers using fuzzy topsis-ahp methods[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(15/16): 6224-6236.
- [10] 王守相, 张一帆, 葛磊蛟. 新型城镇配电网影响因素解释结构模型[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 75-81.
- Wang Shou-xiang, Zhang Yi-fan, Ge Lei-jiao. Interpretative structural model of influencing factors for distribution network of new-type town[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 75-81.
- [11] Sun S G, Shen G X, Zhang Y Z, et al. Failure analysis of machining center based on ISM and FMECA [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(8): 47-52.
- [12] 杨科. 基于高阶统计的非线性故障诊断方法的研究[D]. 北京: 北京化工大学信息学院, 2014.
- Yang Ke. Nonlinear fault diagnosis method based on high-order statistics[D]. Beijing: Faculty of Information, Beijing University of Chemical Technology, 2014.
- [13] Ou L, Chen Y, Zhang J, et al. Dematel-ISM-based study of the impact of safety factors on urban rail tunnel construction projects[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: 1-12.
- [14] 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.
- Zhang Ying-zhi, Wu Mao-kun, Shen Gui-xiang, et al. An analysis of failure correlation of assemble machine tool based on DEMATEL/ISM[J]. Industrial Engineering Journal, 2014, 17(3): 92-96.
- [15] 刘金平, 王杰, 刘先锋, 等. 基于递归稀疏主成分分析的工业过程在线故障监测和诊断[J]. 控制与决策, 2020, 35(8): 2006-2012.
- Liu Jin-ping, Wang Jie, Liu Xian-feng, et al. Online fault monitoring and diagnosis using recursive sparse principal component analysis[J]. Control and Decision, 2020, 35(8): 2006-2012.
- [16] 朱大锐, 王睿, 程文姬, 等. 基于改进PageRank算法的输电网关键节点辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 86-93.
- Zhu Da-rui, Wang Rui, Cheng Wen-ji, et al. Critical transmission node identification method based on improved PageRank algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 86-93.
- [17] 范华. 多维网络中基于PageRank的节点中心性度量方法研究[D]. 沈阳: 辽宁大学信息科学与技术学院, 2020.
- Fan Hua. Research on node centrality measurement based on PageRank in multi-dimensional networks [D]. Shenyang: School of Information Science and Technology, Liaoning University, 2020.
- [18] 应毅, 黄慧, 刘定一. 基于PageRank的热点发现混合算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(9): 81-85.
- Ying Yi, Huang Hui, Liu Ding-yi. Research on hotspot detection hybrid algorithm based on PageRank [J]. Computer Technology And Development, 2019, 29(9): 81-85.
- [19] Gleich D F. PageRank beyond the web[J]. SIAM Review, 2015, 57(3): 321-363.
- [20] Sungchan P, Wonseok L, Byeongseo C, et al. A survey on personalized PageRank computation algorithms [J]. IEEE Access, 2019, 7: 163049-163062.
- [21] Kohlschütter C, Chirita P, Nejd W. Efficient parallel computation of PageRank[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2006, 3936(1): 241-252.
- [22] Zhang Y Z, Mu L M, Shen, G X, et al. Fault diagnosis strategy of CNC machine tools based on cascading failure[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(5): 2193-2202.