

基于多色集合的贝叶斯诊断网络构造方法研究

李果, 高建民, 陈富民, 高智勇

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对贝叶斯诊断网络知识表达不一致的问题, 提出了一种基于结构分解的层级式多重故障结构模型, 并引入多色集合理论, 对这种结构模型的底层框架进行形式化描述, 使得模型便于计算机表达和操作. 利用多色集合的推理矩阵来实现贝叶斯诊断网络(BDN)的自动生成, 给出了具体的推理步骤. 以汽轮机设备为例, 对提出的方法进行了有效性验证, 结果表明, 该方法有助于BDN知识表达的规范化和构造过程自动化程度的提高.

关键词: 贝叶斯诊断网络; 多色集合理论; 多重故障; 推理矩阵

中图分类号: TH17; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)11-1262-05

Construction of Bayesian Diagnostic Network Based on Polychromatic Sets

Li Guo, Gao Jianmin, Chen Fumin, Gao Zhiyong

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

Abstract: To solve the consistency problem of knowledge representation of the Bayesian diagnostic network, the mapping framework between the failure modes and the physical components are established, and a kind of hierarchical structural model of the multiple failures is proposed combined with the structural decomposition of the complex system. Following the polychromatic sets theory, the rock-bottom frame of this model is described formally, which facilitates constructing the computational expression and leading to a more convenient operation. Bayesian diagnostic network (BDN) is generated automatically via the iterative search process on the reasoning matrices of the polychromatic sets, and the specific procedure of the reasoning is presented. A case study for a steam turbine is reported to illustrate the validity of the proposed method, which is helpful to the standardization of the DBN knowledge representation and promotes the automation of the BDN construction process.

Keywords: Bayesian diagnostic network; polychromatic sets theory; multiple failures; reasoning matrix

贝叶斯网络又称为信度网, 是不确定性知识表达和推理领域最为有效的理论模型之一, 非常适合于表达故障诊断决策问题^[1]. 到目前为止, 已经有大量成熟的贝叶斯网络学习算法和推理算法. 然而, 针对贝叶斯诊断网络(BDN)构造方法的研究仍然是一个薄弱环节, 这一问题对于大型复杂系统尤其突出.

通过学习来建造BDN是一种最为理想的方法,

但由于需要大量的故障样本数据, 因此限制了它的应用范围. 为此, 很多学者试图通过其他途径来解决该问题, Xiang^[2]等引入模块化建造思想, 对复杂问题的贝叶斯网络进行建造, Koller^[3]等采用面向对象的方法对贝叶斯网络进行表示和构造, Przytuła^[4]提供了一种基于故障树模型建造贝叶斯网络的方法, 这些方法在实际应用中均取得了一定成效, 但在知识表达和推理上仍缺乏系统性的指导原则. 本

文在前人工作的基础上,对 BDN 的建模策略以及实现方法进行了研究.通过深入分析故障发生的内在机理以及故障传播的因果关系,提出了一种新的基于多色集合理论的 BDN 构造方法,该方法不仅可以统一的形式描述了故障空间中的多方面信息,而且将故障因果关系转化为布尔矢量之间的逻辑运算,方便了计算机表达和操作.

1 复杂系统故障因果知识的数学表达

1.1 多色集合理论简介

由俄罗斯教授 Pavlov V. V. 提出的多色集合是一种新的系统理论和信息处理工具,其核心思想是使用标准的数学模型来仿真不同的对象^[5].在多色集合 $A=(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)$ 中,其组成元素和集合整体本身都能够被同时涂上不同的颜色,用来表示研究对象和组成元素的性质.对应于多色集合整体性质的着色称为统一着色,即 $F(A)=(F_1(A), \dots, F_j(A), \dots, F_p(A))$,对应于元素个体性质的着色称为个人着色,即 $F(a_i)=(F_1(a_i), \dots, F_j(a_i), \dots, F_m(a_i))$.由此可见,多色集合实际上是对现实世界中事物特性的一种抽象,在实际应用中,多色集合

$$S_{PS} = (A, F(a), F(A), (A \times F(a)), (A \times F(A)), (A \times A(F))) \quad (1)$$

多色集合中的着色还可用布尔矢量表示,对应的逻辑运算包括逻辑和($\vee$)和逻辑积($\wedge$).关于多色集合更详细的阐述请见参考文献^[5-6].

1.2 层级式多重故障结构模型

复杂系统的故障一般具有层次性和相关性^[7],任何故障都与系统的某一层级相联系,高层次的故障可由低层次的故障所引起,而低层次的故障必定造成高层次的故障.此外,同一层级级别中的故障之间会发生相互影响,从而造成多个故障的并存^[8].为了对复杂系统的故障模式空间进行表示,将系统的结构(或功能)逐层分解,同时把系统及构成系统的

各种结构元素定义为结构单元,将单元所有可能发生的故障模式定义为单元固有的属性,建立故障模式和结构单元之间的映射关系(见图 1).

图 1 中将系统不同层次的结构单元及其失效对应的故障模式进行曲折映射分解后,得到结构单元和相应故障模式之间的完整映射过程,将该映射过程转换为树图的形式,即得到层级式多重故障结构模型.故障建模的目的是为故障推理分析建立形式化和结构化的基础,为分析者提供因果逻辑关系的思维方法,从而改善故障推理的过程.

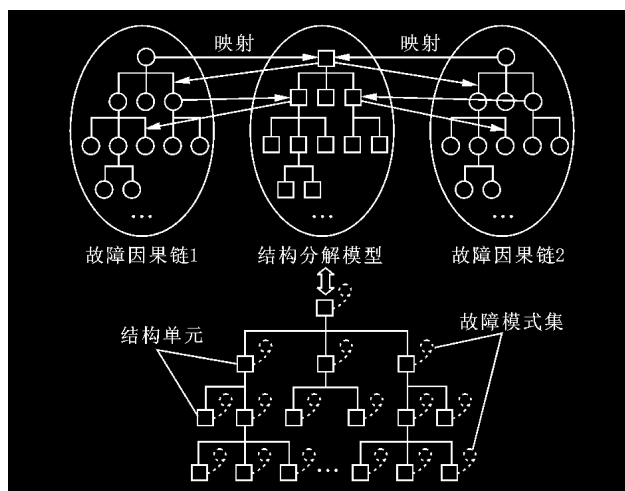


图 1 层级式多重故障结构模型

1.3 基于多色集合理论的形式化描述

知识表达是决定模型建造难易程度的重要因素,在目前的很多基于贝叶斯网络的故障诊断系统中,尚缺乏有效的知识表达方法.多色集合实际上是刻画系统层次结构中构成性关系和相干性关系的数学模型.本文分别采用多色集合及其组成元素来描述系统及其构成单元,同时将系统故障的层次性关系抽象为集合整体性质(统一颜色)与组成元素性(个人颜色)之间的关系,将系统故障相关性关系抽象为组成元素各个性质之间的关系,采用多色集合对层级式多重故障结构模型进行形式化描述(见图 2),

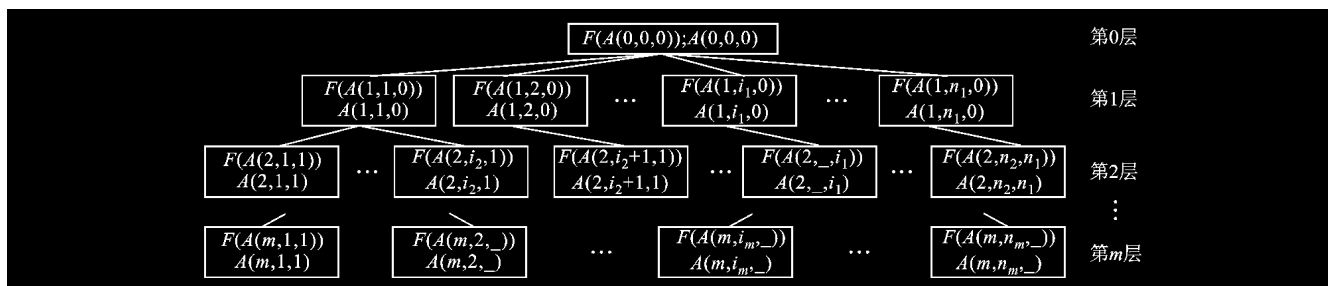


图 2 层级式多重故障形式化表示模型

可以较好地解决知识表达一致性的问题。

在图2中,采用有序对 $\langle A(k, i_k, j_{k-1}); F(A(k, i_k, j_{k-1})) \rangle$ 的形式来表示结构单元及其故障属性。其中: $A(k, i_k, j_{k-1})$ 表示第 k 层的第 i_k 个结构单元节点,其父节点为第 $k-1$ 层的第 j_{k-1} 个节点;

与该单元节点对应的故障模式集合为 $F(A(k, i_k, j_{k-1})) = \{F_1(A(k, i_k, j_{k-1})), F_2(A(k, i_k, j_{k-1})), \dots, F_p(A(k, i_k, j_{k-1}))\}$ 。可以用多色集合的个人着色布尔矩阵表示 $F(A(k, i_k, j_{k-1}))$ 和 $A(k, i_k, j_{k-1})$ 之间的关系,即

$$\begin{aligned} \|c\|_{A \times F(A)} &= [A(k, j_{k-1}) \times F(A(k, j_{k-1}))] = \\ &F_1(A(k, j_{k-1})) \cdots F_j(A(k, j_{k-1})) \cdots F_p(A(k, j_{k-1})) \\ &\begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{i1} & \cdots & c_{ij} & \cdots & c_{ip} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_n(k, j_{k-1})1 & \cdots & c_n(k, j_{k-1})j & \cdots & c_n(k, j_{k-1})p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(k, 1, j_{k-1}) \\ \vdots \\ A(k, i, j_{k-1}) \\ \vdots \\ A(k, n(k, j_{k-1}), j_{k-1}) \end{bmatrix} \quad (2) \\ A(k, j_{k-1}) &= \bigcup_{i_k=1}^{n(k, j_{k-1})} A(k, i_k, j_{k-1}); F(A(k, j_{k-1})) = \bigcup_{i_k=1}^{n(k, j_{k-1})} F(A(k, i_k, j_{k-1})) \end{aligned}$$

式中: $n(k, j_{k-1})$ 表示第 $k-1$ 层第 j_{k-1} 个结点的子结点数。如果结构单元 $A(k, i_k, j_{k-1})$ 具有故障模式 $F_j(A(k, j_{k-1}))$, $c_{ij}=1$, 否则 $c_{ij}=0$ 。 $F_i(A(k, i_k, j_{k-1}))$ 和 $F_j(A(k+1, i_{k+1}, i_k))$ 之间的关系,即相邻层故障模式之间的因果关系,可以采用多色集合中统一颜色和个人颜色的关系矩阵来描述

$$\begin{aligned} \|c\|_{F(A) \times F(A)} &= \\ &[F(A(k+1, i_{k+1}, i_k)) \times F(A(k, i_k, j_{k-1}))] \quad (3) \end{aligned}$$

如果故障模式 $F_i(A(k+1, i_{k+1}, i_k))$ 影响到上层故障模式 $F_j(A(k, i_k, j_{k-1}))$ 的存在, $c_{ij}=1$, 否则 $c_{ij}=0$ 。同理,相同层次故障模式之间的因果关系可以采用多色集合个人颜色的自相关矩阵描述

$$\begin{aligned} \|c\|_{F(A) \times F(A)} &= \\ &[F(A(k, i_k, j_{k-1})) \times F(A(k, i_k, j_{k-1}))] \quad (4) \end{aligned}$$

2 贝叶斯诊断网络模型的构造

贝叶斯网络要在故障诊断领域获得广泛应用,首先要解决其构造问题。对于复杂系统的BDN模型,往往采用分级构造的方式,即在构造出低级别的BDN模型后,按照串连或分级集成的方式转化为一个完整结构的BDN模型。因此,分级建造方法正好符合多色集合建模的思想,很容易采用文中提到的建模方法进行描述和推理。由于故障具有层次性和相关性,因此需要对图2中包含的因果推理关系进行数学形式的描述。对于顶层节点和次层节点之间的关系,可描述为

$$\begin{aligned} &\langle A(0, 0, 0); F(A(0, 0, 0)) \rangle = \\ &\bigcup_{i_1=1}^{n(1, 0)} \langle A(1, i_1, 0); F(A(1, i_1, 0)) \rangle \quad (5) \end{aligned}$$

对于其他不同层次节点之间的推理关系,可表示为

$$\begin{aligned} &\forall k(1 \leq k \leq n), \forall i_k(1 \leq i_k \leq n(k, j_{k-1})), \\ &\langle A(k, i_k, j_{k-1}); F(A(k, i_k, j_{k-1})) \rangle = \\ &\bigcup_{i_{k+1}=1}^{n(k+1, i_k)} \langle A(k+1, i_{k+1}, i_k); F(A(k+1, i_{k+1}, i_k)) \rangle \quad (6) \end{aligned}$$

同层次节点之间的推理关系为

$$\begin{aligned} &\forall k(1 \leq k \leq n), \forall i_k(1 \leq i_k \leq n(k, j_{k-1})), \\ &\langle A(k, i_k, j_{k-1}); F(A(k, i_k, j_{k-1})) \rangle = \\ &\bigcup_{i'_k=1}^{n(k, j_{k-1})} \langle A(k, i'_k, j_{k-1}); F(A(k, i'_k, j_{k-1})) \rangle \quad (7) \end{aligned}$$

为了说明BDN的生成过程,假设结构单元 a_1, a_2, a_3, a_4 对应的故障模式分别为 $F(a_1) = \{F_1(a_1), F_2(a_1), F_3(a_1), F_4(a_1), F_5(a_1)\}$, $F(a_2) = \{F_1(a_2), F_2(a_2), F_3(a_2)\}$, $F(a_3) = \{F_1(a_3), F_2(a_3)\}$, $F(a_4) = \{F_1(a_4)\}$,各故障模式之间的因果关系如图3所示。当分别选定单元 a_1 的故障模式 $F_2(a_1)$ 和 $F_5(a_1)$ 作为初始故障征兆时,通过推理可以得到各自相应的单元BDN模型。

在实际诊断过程中,往往存在多个故障同时发生的情况,本文所提出的建模和推理方法适合于对多重故障进行分析。当选定不同的故障模式作为初始故障征兆时,可以通过逐层搜索不同和相同的层次故障模式之间的因果推理矩阵来构造特定的BDN,该过程是一个Top-Down的分析过程,推理步骤如下。

(1)定义初始故障模式,得到第1层的个人颜色 $F_1^0, F_2^0, F_3^0, \dots, F_{n(0,0)}^0$ 的值,并用布尔矢量表示。

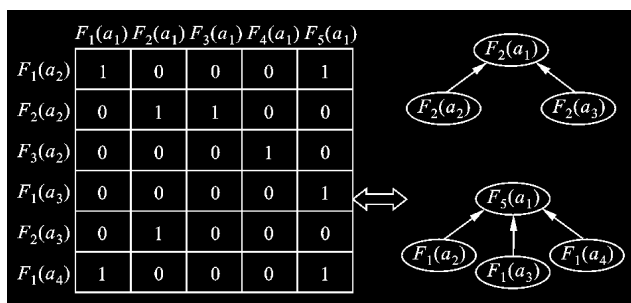


图 3 简单 BDN 生成过程

(2) 首先进行层次性搜索,即搜索个人颜色与统一颜色之间的推理矩阵,得到上层的候选原因集,并对应于下层的故障模式集,用个人颜色 $F_1^1, F_2^1, F_3^1, \dots, F_{n(1,0)}^1$ 的形式来描述。

(3) 针对上一步得到的候选故障模式集,进行同层节点的相关性搜索,即搜索同层节点间个人颜色之间的自相关推理矩阵。如果存在相关性故障模式,则将这些相关故障模式一同列入该层的候选故障模式集。

(4) 判断所有故障模式是否都是故障底事件,如果不是,结构分解后转(2)。否则,得到最终的故障底事件集合。

(5) 通过以上迭代搜索,能够得到各个层次相应的故障模式,根据这些故障模式之间的因果关联关系,可以生成 BDN 模型。

3 应用实例

本文以图 4 中的汽轮机本体为对象来说明基于

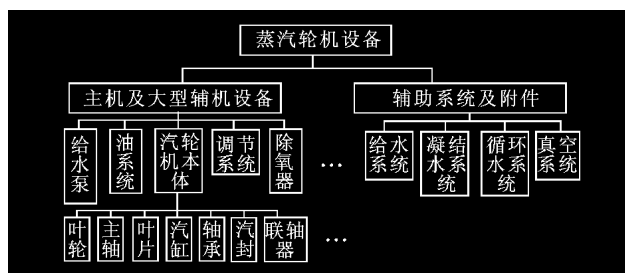


图 4 汽轮机设备层级式结构分解

多色集合理论的 BDN 模型构造的方法和步骤。根据汽轮机本体故障模式及影响分析的结果^[9],可以建立层级式多重故障结构模型,并对其进行形式化描述(见图 5)。图 5 将汽轮机本体分解为 2 层,第 1 层为汽轮机本体 $A(0,0,0)$,对应的故障模式集合可表示为 $F(A(0,0,0)) = \{F_1^0, F_2^0, \dots, F_7^0\}$,第 2 层结构单元 $A(1, i, 0)$ 所对应的故障模式集合可表示为 $F(A(1, i, 0)) = \{F_i^1\}$ 。通常,可以把系统最底层结构单元失效对应的直接原因定义为故障底事件,它们是系统故障发生的根源,用 f_i 表示。实际中汽轮机本体的结构还可以进一步细分,比如汽缸可以分解为喷嘴、喷嘴室、调节汽阀和外壳等,限于篇幅,本文只分解到第 2 层,并且只对汽轮机本体的部分结构单元及故障模式进行分析。各个层次的结构单元及相应故障模式的物理含义如表 1 所示。按照式(3)、式(4)建立的系统各个层次级别结构单元故障模式之间的因果推理矩阵见图 6。

假定图 5 第 1 层的故障征兆为输出功率过低和排气参数不合格 $\{F_2^0 \wedge F_6^0\}$ 。为了构造相应的 BDN

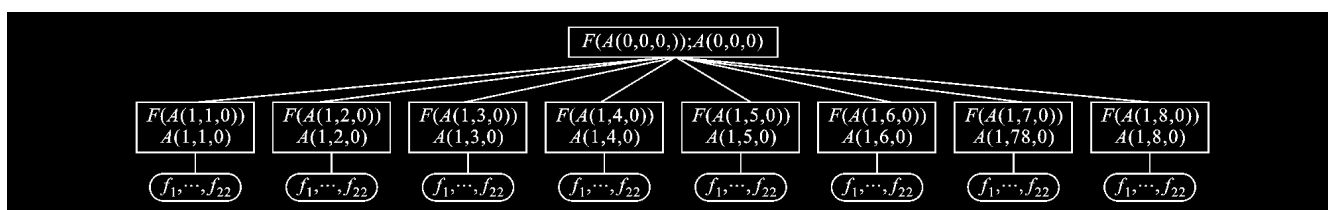


图 5 汽轮机本体多重故障形式化表示模型

	F_1^0	F_2^0	F_3^0	F_4^0	F_5^0	F_6^0	F_7^0	F_1^1	F_2^1	F_3^1	F_4^1	F_5^1	F_6^1	F_7^1	F_8^1	F_9^1	F_{10}^1	F_{11}^1	F_{12}^1	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}	f_{17}	f_{18}	f_{19}	f_{20}
F_1^0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_2^0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_3^0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_4^0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_5^0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_6^0	1	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	0	0	0
F_7^0	0	0	1	1	0	1	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
F_8^0	0	0	1	1	0	1	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	0	0	0	0	0	0	0	0
F_9^0	0	0	0	0	0	0	1	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
F_{10}^1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F_{11}^1	0	1	1	1	0	1	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	1	0	0	0
F_{12}^1	0	0	0	1	0	1	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	0	0	0	1	1	1

①~⑤:矩阵因果关系的编号

图 6 推理关系矩阵

模型,首先进行层次性搜索,即搜索推理关系矩阵①,得到第2层的初始候选故障模式集为 $\{F_7^1, F_8^1, F_{10}^1, F_{11}^1, F_{12}^1\}$,然后进行同层相关性搜索,即搜索推理关系矩阵②,得到第2层的候选故障模式集为 $\{F_6^1, F_7^1, F_8^1, F_9^1, F_{10}^1, F_{11}^1, F_{12}^1\}$.最后,搜索推理关系矩阵③,得到最终的故障底事件集合为 $\{f_9 \sim f_{20}\}$.根据各个层次故障模式之间的因果关系构造的BDN模型如图7所示.

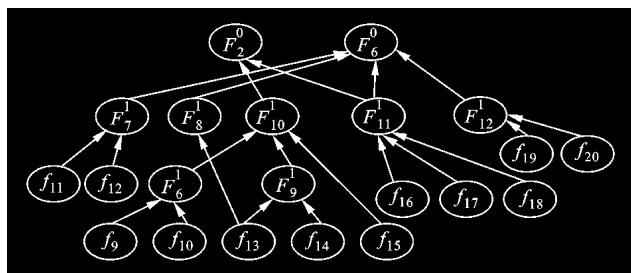


图7 汽轮机本体的BDN模型

表1 故障模式/结构单元对应的物理含义

故障模式	物理含义	故障模式	结构单元	物理含义
F_1^0	无输出功率	f_5		介质腐蚀性较大
F_2^0	输出功率过低	f_6		偏心引起振动
F_3^0	机组高压部分密封不严	f_7		主轴瓦损坏
F_4^0	抽汽参数不合格	f_8		动静间隙调整不当
F_5^0	异常振动及噪声	f_9		转子平衡不良
F_6^0	排汽参数不合格	f_{10}		油膜振荡
F_7^0	热膨胀引起变形	f_{11}		螺栓紧力不足
F_8^1	主轴弯曲	f_{12}		法兰变形严重
F_9^1	叶片断裂	f_{13}		负荷经常剧烈变动
F_{10}^1	叶片水击损伤	f_{14}		滑销系统卡涩
F_{11}^1	叶轮变形/开裂	f_{15}		汽缸保温不良
F_{12}^1	动静部分摩擦	f_{16}		汽源压力低
F_6^1	轴承振动	f_{17}		轴封供汽带水
F_7^1	汽缸结合面泄漏	f_{18}		轴封压力调节器失灵
F_8^1	汽缸开裂	f_{19}		汽封材料淬硬
F_9^1	汽缸热变形	f_{20}		汽封齿间磨损
F_{10}^1	轴封损伤		A(1,1,0)	主轴
F_{11}^1	汽封供汽中断		A(1,2,0)	叶片
F_{12}^1	汽封损伤		A(1,3,0)	叶轮
f_1	转子材料存在过大内应力		A(1,4,0)	动静部分
f_2	叶片上沉积盐垢		A(1,5,0)	轴承
f_3	叶片振动特性不良		A(1,6,0)	汽缸
f_4	锅炉蒸发量过大		A(1,7,0)	轴封
			A(1,8,0)	汽封
			$\vdots$	$\vdots$

4 结 论

随着贝叶斯网络在故障诊断领域越来越广泛的应用,其模型的建造已经成为一个急需解决的难题.本文提出了一种新的基于图论仿真和集合理论的BDN构造方法.首先对系统进行层级式结构分解,构建多重故障结构模型;然后引入多色集合理论,对该模型的底层框架进行形式化描述,使之便于计算机表达和操作;最后对模型的因果关系矩阵进行迭代搜索,提取相关信息,实现BDN的自动生成.与以往方法相比较,本文提出的方法有助于BDN知识表达的规范化和构造过程自动化程度的提高,可为后续的BDN参数估计和学习提供基础.

参考文献:

- [1] Hu Zhaoyong. Bayesian diagnostic network: a powerful model for representation and reasoning of engineering diagnostic knowledge [J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2005, 10(1): 28-35.
- [2] Xiang Y, Olesen K G, Jensen F V. Practical issues in modeling large diagnostic systems with multiply sectioned Bayesian networks [J]. IJPRAI, 2000, 14(1): 59-72.
- [3] Koller D, Pfeffer A. Object-oriented Bayesian networks [C]// Proceedings of the 13th Annual Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1997: 302-313.
- [4] Przytula K W. An efficient framework for the conversion of fault trees to diagnostic Bayesian network models [C]// Proceedings of 2006 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, USA: IEEE Press, 2006: 1-14.
- [5] Li Zongbing, Xu Lida. Polychromatic sets and its application in simulating complex objects and systems [J]. Computers and Operations Research, 2003, 30(6): 851-860.
- [6] Xu Lida, Li Zongbing. A polychromatic sets approach to conceptual design of machine tools [J]. International Journal of Production Research, 2005, 43(12): 2397-2421.
- [7] Zhao Tingdi, Su Tiejun. Intelligent FMEA based on model FIORN [C]// Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. New York: IEEE Press, 2004: 386-390.
- [8] Sun Yong, Ma Lin. An analytical model for interactive failures [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91(5): 495-504.
- [9] 李萨扬. 汽轮机及其辅助设备基于维修的FMEA [D]. 北京: 华北电力大学热能工程学院, 2002.

(编辑 管咏梅)