

# 一种基于 FMEA 的故障诊断贝叶斯网络快速构建方法

薛海红<sup>1</sup>, 严拴航<sup>1</sup>, 王瑶<sup>2</sup>, 王锦妮<sup>1</sup>, 郭鹏<sup>1</sup>

(1. 中国航空工业集团 第一飞机设计研究院, 西安 710089)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

**摘要:** 贝叶斯网络(BN)建模问题一直是其在故障诊断应用领域的瓶颈,实际的工程系统中,贝叶斯网模型构建存在许多困难,提出一种基于故障模式影响分析(FMEA)的BN建模技术。首先,在分析现有FMEA所包含的故障信息基础上,提出基于单条FMEA记录的贝叶斯网络片段构建方法;然后,利用故障模式与故障原因因果传递关系将贝叶斯网络片段集成为系统贝叶斯网络模型;最后,以某型飞机前轮转弯系统为例进行BN模型构建和分析。结果表明:本文基于FMEA建立的BN模型不仅避免了传统建模过程中对大量工程经验的需求,并且突破了FMEA定性分析能力,能够有效融合多源信息对工程系统进行定量分析和故障诊断。

**关键词:** 贝叶斯网络;FMEA;故障诊断;前轮转弯系统

**中图分类号:** TB114.3;V37

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.03.008

## A Modeling Method of Fault Diagnosis Bayesian Network Based on FMEA

Xue Haihong<sup>1</sup>, Yan Shuanhang<sup>1</sup>, Wang Yao<sup>2</sup>, Wang Jinni<sup>1</sup>, Guo Peng<sup>1</sup>

(1. The First Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Bayesian network(BN) modeling problem has always been the bottleneck of its application in the field of fault diagnosis. There are many difficulties on the building of BN model in the practical engineering systems. A methodology of BN modeling based on failure mode and effect analysis(FMEA) is introduced in this paper. First of all, a method of building a BN segment based on a single unit of information of FMEA is proposed after studying the failure information that FMEA includes. Then, the BN segments are integrated into BN modeling utilizing the causal relationship of failure modes and failure causes. Finally, the BN modeling is built with the example of the front wheels turning system. The model exemplifies that the BN model based on FMEA presented in the paper can not only avoid the need for a large amount of engineering experience in the traditional modeling process, but also can break the FMEA qualitative analysis ability, which could fuse multi-source information effectively to perform quantitative analysis and fault diagnosis on a system.

**Key words:** Bayesian network; FMEA; fault diagnosis; front wheels turning system

## 0 引言

随着航空飞行器技术的进步,装备结构日益复杂,其故障诊断问题越来越受到各国重视。对于大

型复杂机电设备,其构件之间的关系错综复杂,故障症状与故障原因之间的映射表现为随机性和不确定性<sup>[1-2]</sup>。建立一种可快速表达系统中不确定性因果关联的诊断网络是实现低代价、快速的故障诊断的关键<sup>[3]</sup>。

贝叶斯网络(BN)是一种在复杂工程系统中建模、推理与机器学习的重要工具。它将数学中的概率理论与图论相结合,能够很好地量化复杂系统中

普遍存在的不确定性因素<sup>[4-5]</sup>。目前,已将 BN 成功地应用到故障诊断领域,包括通用电气公司的 Auxiliary Turbine Diagnosis、美国航空航天局和 Rockwell 公司联合研制的 Diagnosis of Space Shuttle Propulsion Systems、惠普公司的打印机故障诊断系统等<sup>[8]</sup>。

BN 要在故障诊断领域得到广泛应用,首先需解决其构建问题<sup>[6-8]</sup>。BN 的构建是知识工程问题,需领域专家和知识工程师共同参与,其建模问题是故障诊断应用领域存在的瓶颈<sup>[9]</sup>。实际的工程系统中,贝叶斯网模型构建主要存在以下困难<sup>[10]</sup>:

①节点变量及其关系的确定困难 设备中与故障有关的因素众多,尤其是复杂设备中这些因素的关系错综复杂,故障模式模糊,难以完全确定各种因素之间的相互关系。

②条件概率估计困难 很多设备故障样本获取困难,甚至无法获得完整的故障样本,导致条件概率估计困难。

K. W. Przytula 等<sup>[11]</sup>、李俭川等<sup>[13]</sup>等提出了基于故障 BN 的诊断方法,但在模型实际应用之前,需对原模型修改使之符合实际情况,修改过程需反复迭代且需大量的工程经验;赵进晓等<sup>[12]</sup>提出了一种适用于数字电路的 BN 诊断模型构建方法,但不适于其他系统;费胜巍等<sup>[18]</sup>提出了一种基于故障模式影响分析(FMEA)的 BN 拓扑结构的构造方法,但未讨论节点条件概率参数获取的方法。

为了快速、准确地构建适于飞机各系统故障诊断的 BN 模型,本文提出基于 FMEA 的 BN 构建方法。在该方法中,借助 FMEA 中的产品结构层次关系,将产品各层零部件的故障模式加以关联,形成 BN 结构,以解决节点变量及其关系确定难的问题;并以 FMEA 中的故障概率信息为依据,确定 BN 中节点的先验概率和条件概率,以解决故障诊断领域存在的条件概率估计困难的问题。

## 1 BN 与 FMEA 基础

### 1.1 贝叶斯网络

一个 BN 是一个有向无圈图(DAG),由代表变量的节点及连接节点的有向边构成,有向边由父节点指向子节点,用单线箭头表示。网络中每个节

点  $X_i$  都对应一张概率表(CPT)  $P[X_i | \pi(X_i)]$ ,其中  $\pi(X_i)$  为节点  $X_i$  的父节点集合(如图 1 所示)。

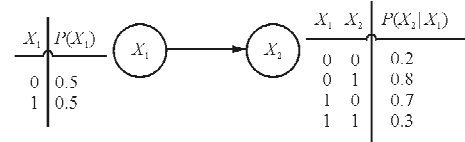


图 1 一简单贝叶斯网络

Fig. 1 A simple Bayesian network

在 BN 中可进行因果推理和诊断推理。因果推理为已知祖先节点状态,求解子孙节点的概率分布。诊断推理为已知子孙节点状态,求解祖先节点的概率分布。

### 1.2 FMEA

对于复杂产品,整个系统通常会被划分成不同层次,各个层次之间,存在以下因果迭代关系:每条 FMEA 记录中的故障原因是下层记录的故障模式<sup>[14]</sup>,如图 2 所示。这种因果迭代关系可以将所有故障模式有机联系起来,成为 FMEA 构建 BN 的基础。以故障模式为中心的每行信息为一条 FMEA 记录。

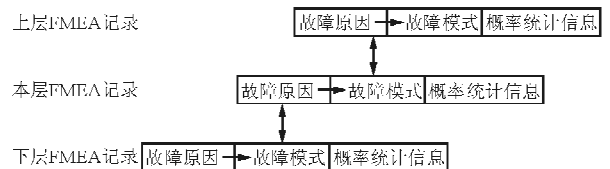


图 2 不同层次 FMEA 记录的迭代关系

Fig. 2 The iteration of different-level FMEAs

基于 FMEA 记录构建 BN 的基本思想:首先,对于 FMEA 表中的任一行记录,只保留故障模式、故障原因以及概率统计信息(包括故障率/故障发生概率,故障影响率);然后,将每条 FMEA 记录映射为一个 BN 片段;最后,按照上述因果迭代关系将所有 BN 片段进行连接,完成系统整体 BN 的构建。

## 2 基于 FMEA 的 BN 建模

### 2.1 FMEA 记录到 BN 片段的映射

#### 2.1.1 结构映射

节点变量是 BN 模型的基础,表示各部件/系

统的故障状态,与 FMEA 记录中的故障原因、故障模式字段对应。BN 中有向边是故障因果关系的表达,而 FMEA 记录中的字段关联是产品因果关系的体现。

FMEA 中每条记录对应一个 BN 片段。以 FMEA 中的第  $i$  条记录为例,构建 BN 片段的做法如下:

①对于 FMEA 中第  $i$  个记录的故障模式字段,构建二值变量  $Mo_i$  与之对应。当  $Mo_i=1$  时,表示该故障模式发生;当  $Mo_i=0$  时,表示该故障模式不发生。

②对于 FMEA 中第  $i$  个记录的每个原因字段(假设有  $n$  个原因),依次构建二值变量  $Re_{i,j}$  ( $1 \leq j \leq n$ ) 与之对应。当  $Re_{i,j}=1$  时,表示该故障原因发生;当  $Re_{i,j}=0$  时,表示该故障模式不发生。

③以上建立了 BN 片段中节点,然后从节点  $Re_{i,j}$  ( $1 \leq j \leq n$ ) 向故障模式  $Mo_i$  引入有向边,连接有向边。

BN 片段的拓扑结构构造如图 3 所示。

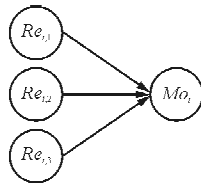


图 3 BN 片段拓扑结构示意图

Fig. 3 Diagram for BN fragment's topological structure

### 2.1.2 BN 片段的条件概率表的生成

每条 FMEA 记录包含的统计信息包括故障率  $\lambda_i$ /故障概率  $P(Mo_i=1)$  和故障影响概率  $\beta_i$ , 能够为 BN 条件概率表提供详细的数据支持。

对于 FMEA 记录的故障模式,对应 BN 故障模式节点的先验概率以及故障原因节点的先验概率的计算方法分别如式(1)、式(2)所示。

$$\begin{cases} P(Mo_i=0) = e^{-\lambda_i t} \\ P(Mo_i=1) = 1 - e^{-\lambda_i t} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P(Re_{i,j}=0) = e^{-\lambda_j t} \\ P(Re_{i,j}=1) = 1 - e^{-\lambda_j t} \end{cases} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (2)$$

式中,  $\lambda_j$  为故障模式  $Mo_i$  的第  $j$  个故障原因的故障率,由图 2 可知,该故障率需从故障模式  $Mo_i$  的下层 FMEA 记录中读取;对于原因节点,式(2)计算结果为其 CPT。

故障影响概率  $\beta_i$  表示故障模式已经发生,导致故障影响发生的条件概率。因此,对于故障模式节点,可以计算其基于某个故障原因失效的条件概率分布,如式(3)所示。

$$\begin{cases} P(Mo_i=0 | Re_{i,j}=1) = 1 - \beta_i \\ P(Mo_i=1 | Re_{i,j}=1) = \beta_i \end{cases} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (3)$$

在 BN 中,故障模式节点的条件概率分布  $P(Mo_i=1 | Re_{i,1}, Re_{i,2}, \dots, Re_{i,n})$  是基于所有故障原因的,而式(3)给出了基于某个故障原因的条件概率分布。当  $\beta_i=1.0$  时,表示底层故障到高层故障的传播是一个确定性逻辑,根据式(3)可得  $P(Mo_i=1 | Re_{i,1}, Re_{i,2}, \dots, Re_{i,n})$  概率值为 1.0 或 0;当  $\beta_i \neq 1.0$  时,底层故障到高层故障的传播不是确定性逻辑,需要结合 Noisy-and 以及 Noisy-or 标准模型给出  $P(Mo_i=1 | Re_{i,1}, Re_{i,2}, \dots, Re_{i,n})$  各个组合状态对应的概率值<sup>[15-16]</sup>。

## 2.2 BN 的建模步骤

当所有的 FMEA 记录分别建立相应的 BN 片段模型后,即可按照图 2 所示的 FMEA 记录迭代关系对 BN 片段进行集成。基于 FMEA 建立 BN 的步骤如下:

①确定关心的故障模式,以该故障模式所在 FMEA 记录为顶层 FMEA 记录;在 FMEA 中从高层向低层搜索所有相关的 FMEA 记录;

②以顶层 FMEA 记录中的故障原因为关键字段,搜索其故障模式为上述故障原因的 FMEA 记录,作为顶层 FMEA 的下层 FMEA 记录;

③以上述下层 FMEA 记录为顶层记录,按照步骤②继续搜索该层 FMEA 的下层 FMEA 记录;

④按照上述搜索方法,依次向下搜索,直到再无 FMEA 记录中的故障原因为其他 FMEA 记录中的故障模式,将该故障原因所在的 FMEA 记录作为底层 FMEA 记录;或者搜索到的 FMEA 记录没有明确标出故障原因,将该记录也作为底层 FMEA 记录;

⑤将所有搜索到的 FMEA 记录中的故障原因、故障模式转化为对应的 BN 片段中的节点,并按照因果关系连接每个 BN 片段中的节点;

⑥将所有 BN 片段中的重复节点合并为一个节点。在多个 BN 片段中多次出现的节点为重复

节点,在连接多个 BN 片段时,将重复节点仅保留一个。对于已构造出的 BN,其根节点 CPT 由式(2)确定,非根节点 CPT 由式(3)确定。

前四步完成与顶层故障模式相关的所有 FMEA 记录的搜索;第⑤步完成各 BN 片段的构建;第⑥步完成所有 BN 片段的连接,构成一个完整的 BN。从上述建模步骤可知,BN 模型对 FMEA 中的故障原因、故障模式用等价节点进行了映射,对变量间因果关系用有向边进行了定性表达,同时用 CPT 实现了因果关系的定量化。因此,基于 FMEA 记录的 BN 模型能够完整表达 FMEA 的基本故障信息。

### 3 实例分析

针对飞机起落架系统的前轮转弯系统,利用 FMEA 建立其对应的 BN,并对该 BN 在故障诊断

中的应用进行深入分析。

#### 3.1 前轮转弯系统的贝叶斯网络

某飞机前轮转弯系统为电传操纵、电液伺服作动、齿轮齿条传动、带位置反馈的闭环随动系统,用于飞机低速滑行时大角度转弯和高速滑行时小角度修正航向,也可用于飞机的地面牵引<sup>[17]</sup>。

本文以“前轮失去转弯能力”为顶层故障模式,其所有相关的 FMEA 记录如表 1 所示<sup>[17]</sup>。依据 2.2 节的建模步骤,找出所有相关的 FMEA 记录后,需将各 FMEA 记录映射为 BN 片段。最后将所有 BN 片段中的重复节点合并并完成整个 BN 拓扑结构的构造。以 BN 片段 L34、L35 以及 L36 为例给出重复节点的合并过程示意图(如图 4 所示),其余重复节点的合并过程类似;合并完所有重复节点后的 BN 拓扑结构如图 5 所示。

表 1 网络节点变量含义(截取于 FMEA 表格)

Table 1 Meaning for variables of network nodes(interception in the FMEA table)

节点变量	变量对应的故障模式	故障原因	故障模式的发生概率	$\beta$
L1	前轮转弯解除开关 S1 按下	无	0.000 000 398	1.0
L2	前轮转弯解除开关 S2 按下	无	0.000 000 398	1.0
L3	地面转弯解除开关 S3 按下	无	0.000 000 119	1.0
L4	转弯手轮脱开或损坏	无	0.000 002 260	1.0
L5	手轮转弯线路失效	无	0.000 001 254	1.0
L6	主动转弯控制线路失效	无	0.000 000 111	1.0
L7	转弯控制逻辑失效	无	0.000 001 278	1.0
L8	控制信息线路失效	无	0.000 001 992	1.0
L9	转弯控制线路失效	无	0.000 031 375	1.0
L10	转弯控制构件损坏	无	0.000 001 321	1.0
L11	选择阀泄漏严重	无	0.000 000 071	1.0
L12	伺服阀 LVDT 失效	无	0.000 000 950	1.0
L13	伺服阀线圈故障	无	0.000 000 150	1.0
L14	电磁阀线圈故障	无	0.000 000 150	1.0
L15	旁通阀复位弹簧损坏	无	0.000 000 150	1.0
L16	补偿器卡滞在关闭位置,回油路封闭	无	0.000 000 006	1.0
L17	阀体壳体破裂	无	0.000 000 001	1.0
L18	阀体内密封失效	无	0.000 000 004	1.0
L19	单向阀损坏或阻塞	无	0.000 000 090	1.0
L20	油滤阻塞	无	0.000 000 010	1.0

续表 1

节点变量	变量对应的故障模式	故障原因	故障模式的发生概率	$\beta$
L21	转弯系统供压导管 1 损坏或泄漏	无	0.000 000 920	1.0
L22	转弯系统供压导管 2 损坏或泄漏	无	0.000 000 920	1.0
L23	转弯反馈传感器 1 失效	无	0.000 002 569	1.0
L24	转弯反馈传感器 2 失效	无	0.000 002 569	1.0
L25	防气穴阀泄漏严重	无	0.000 000 001	1.0
L26	转弯动作筒损坏或脱开	无	0.000 000 001	1.0
L27	前轮叉形件断裂或变形	无	0.000 000 010	1.0
L28	前轮转弯软管 1 破裂	无	0.000 000 031	1.0
F1	主驾驶脚蹬组件损坏	无	0.000 008 720	1.0
F2	副驾驶脚蹬组件损坏	无	0.000 008 720	1.0
F3	方向舵拉杆 1 损坏或脱开	无	0.000 000 011	1.0
F4	方向舵拉杆 2 损坏或脱开	无	0.000 000 011	1.0
F5	方向舵拉杆 3 损坏或脱开	无	0.000 000 011	1.0
F6	方向舵拉杆 4 损坏或脱开	无	0.000 000 011	1.0
F7	主载荷通道失效	无	0.000 000 010	1.0
F8	副载荷通道失效	无	0.000 000 070	1.0
F9	方向舵 LVDT7 失效	无	0.000 000 300	1.0
F10	方向舵 LVDT8 失效	无	0.000 000 300	1.0
F11	脚蹬转弯控制线路失效	无	0.000 000 223	1.0
H1	2# 液压系统失去压力	无	0.000 009 200	1.0
L33	手轮转弯通道失效	L1~L4 之一	—	1.0
L34	主驾驶脚蹬输入失效	F1, F3, F4 之一	—	1.0
L35	副驾驶脚蹬输入失效	L2, L5, L6 之一	—	1.0
L36	脚蹬输入皆失效	L34, L35 共同作用	—	1.0
L37	载荷通道齿轮系皆失效	F7, F8 共同作用	—	1.0
L38	脚蹬差动刹车输入皆失效	L36, F9, F10, L37, F11 之一	—	1.0
L39	前轮转弯输入失效	L33, L47, L38 共同作用	—	1.0
L40	转弯供压导管全部失效	L21, L22 共同作用	—	1.0
L41	转弯软管全部失效	L28, L29 共同作用	—	1.0
L42	转弯回油导管全部失效	L30, L31 共同作用	—	1.0
L43	转弯控制阀失效	L12~L18 之一	—	1.0
L44	前轮失去转弯能力	H1, L23~L27, L39~L43, L45, L11, L19, L20 之一	—	1.0
L45	SCU 失效	L7, L8, L10 之一	—	1.0
L47	转弯线路失效	L5, L6, L9 之一	—	1.0
L29	前轮转弯软管 2 破裂	无	0.000 000 031	1.0
L30	转弯回油导管 1 破裂	无	0.000 000 920	1.0
L31	转弯回油导管 2 破裂	无	0.000 000 920	1.0

注:变量首字母 H 表示来自液压系统, L 表示来自起落架系统, F 表示来自飞控系统; L1~L31 为底层 FMEA 记录, L33~L45 为中间层 FMEA 记录, L44 为顶层 FMEA 记录。

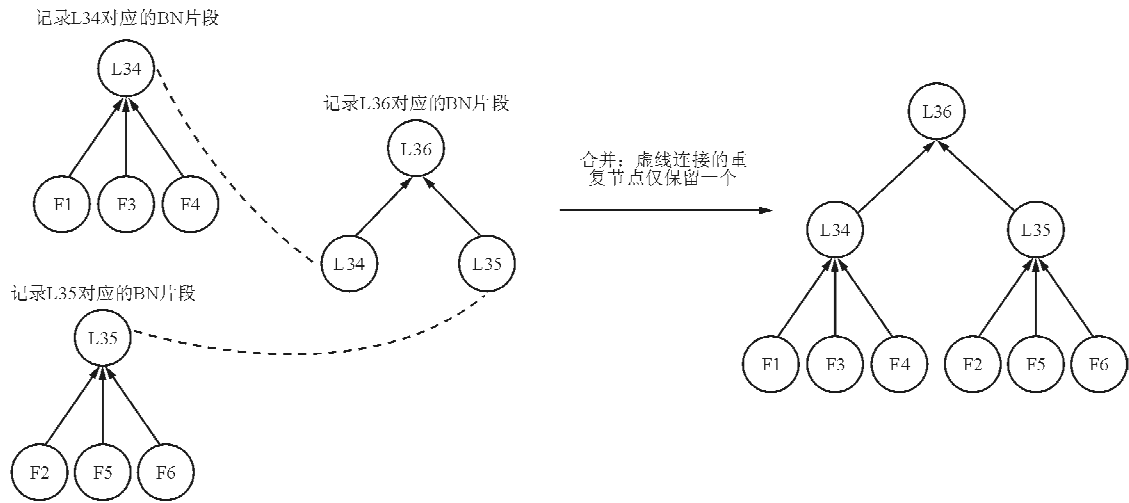


图 4 重复节点合并示意图

Fig. 4 Diagram for the combination of repeated nodes

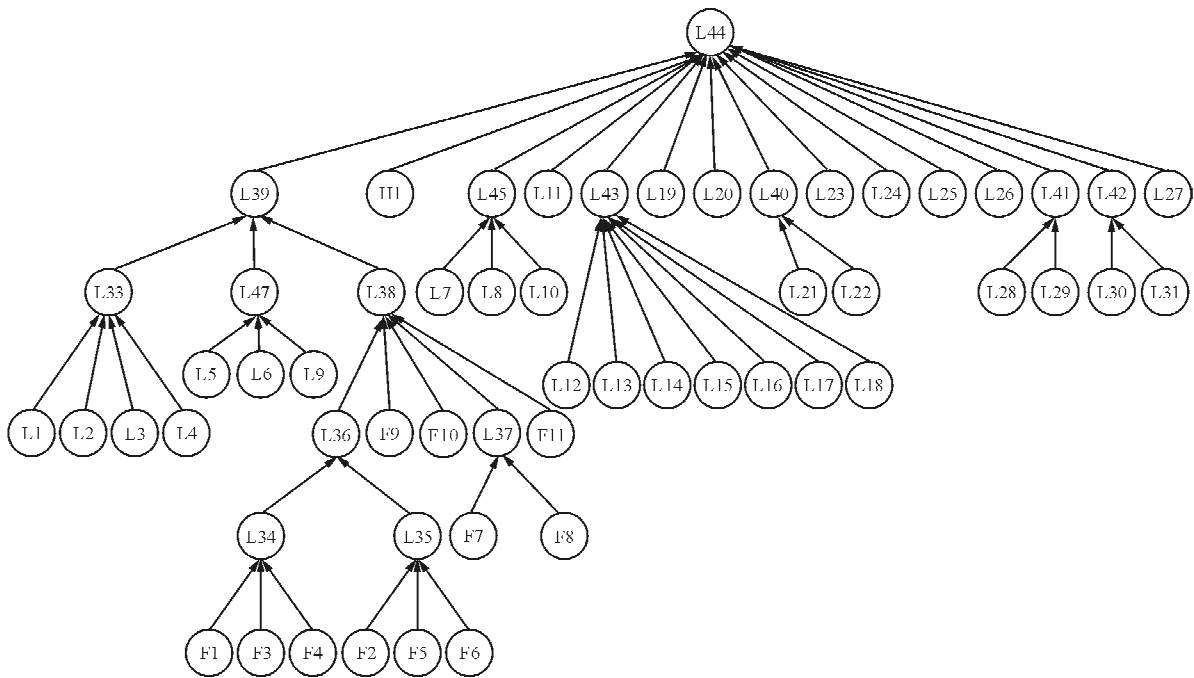


图 5 前轮转弯系统的贝叶斯网络

Fig. 5 The front wheels curve system's Bayesian network

在构建 BN 拓扑的过程中,步骤⑥确定各节点 CPT,具体确定过程如下:

依据式(2),从“故障模式的发生概率”项可直接得到根节点的 CPT。例如,节点 L1 的 CPT 为  $P(L1 = 0) = 1 - 0.000\ 000\ 398$ ,  $P(L1 = 1) = 0.000\ 000\ 398$ 。而依据式(3),可得到各非根节点 CPT。依据式(3),给出非根节点 L44、L40 的 CPT 取值(如表 2 所示)。其中,节点 L33、L47、L34、

L35、L45、L43、L38 的 CPT 与 L44 类似:当父节点状态组合全为 0 时,节点状态为 0 的概率是 1.0;父节点为其他状态组合时,节点状态为 0 的概率是 0。节点 L36、L37、L39、L41、L42 的 CPT 与 L40 类似:当父节点状态组合全为 0 时,节点状态为 0 的概率是 0;父节点为其他状态组合时,节点状态为 0 的概率是 1.0。

表 2 节点 L44、L40 的条件概率参数(节点变量状态为 0 时)

Table 2 Conditional probability parameters for Node L44, L40(status of the node variables)

变 量	父节点状态组合	概率值
L44	L39=0 H1=0 L45=0 L11=0 L43=0 L19=0 L20=0 L40=0	1.0
	L23=0 L24=0 L25=0 L26=0 L41=0 L42=0 L27=0	
	其他状态组合	0
L40	L21=1 L22=1	0
	其他状态组合	1.0

### 3.2 模型分析

#### 3.2.1 因果推理

采用 FMEA 表进行故障预测,通常是假设某单一故障模式发生时,在庞杂的 FMEA 表中检索其对应的各级影响。而在 BN 中,除了能够完成以上分析外,还可计算当某些故障模式发生时,其他任意故障模式发生的概率,即多源信息故障预测。例如,当已知 F1、F2 故障模式发生时,L44 故障模式发生的概率: $P(L44 = 1 | F1 = 1, F2 = 1) = 0.000\ 021$ 。

推理计算过程:

(1) 由贝叶斯定理可得

$$P(L44=1 | F1=1, F2=1) = \frac{P(L44=1, F1=1, F2=1)}{P(F1=1, F2=1)} \quad (4)$$

(2) 由链式法则可得

$$P(F1, F2) = \sum_{L1 \sim L31, L33 \sim L45, F3 \sim F11, H1, L47} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq 32 \\ i \neq 46}}^{i=47} P[L_i | \pi(L_i)] \times \prod_{j=1}^{j=11} P[F_j | \pi(F_j)] P[H1 | \pi(H1)] \quad (5)$$

①  $\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq 32 \\ i \neq 46}}^{i=47} P[L_i | \pi(L_i)]$  表示节点 L1~L31, L33~L45, L47 共 45 个节点的条件概率表的连乘;

②  $\prod_{j=1}^{j=11} P[F_j | \pi(F_j)]$  表示节点 F1~F11 共 11 个节点的条件概率表的连乘;

③  $P[H1 | \pi(H1)]$  表示节点 H1 的条件概率表;

④ 上述①②③的连乘结果为联合概率分布,即  $P(L1 \sim L31, L33 \sim L45, L47, F1 \sim F11, H1)$ ;

⑤ 对  $P(L1 \sim L31, L33 \sim L45, L47, F1 \sim F11, H1)$

进行边缘化操纵 ( $\sum_{L1 \sim L31, L33 \sim L45, F3 \sim F11, H1, L47}$ ), 消去变量 L1~L31, L33~L34, L47, F3~F11, H1, 可得 P, 即联合概率分布为  $(F1, F2)$ ;

⑥ 若令步骤①~⑤中所有  $F1 = 1, F2 = 1$ , 则最终步骤⑤所得的概率分布  $P(F1 = 1, F2 = 2)$ 。

(3) 与步骤(2)做法完全类似, 具体分析如下: 利用链式法则可得

$$P(L44, F1, F2) = \sum_{L1 \sim L31, L33 \sim L33, L45, F3 \sim F11, H1, L47} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq 32 \\ i \neq 46}}^{i=47} P[L_i | \pi(L_i)] \times \prod_{j=1}^{j=11} P[F_j | \pi(F_j)] P[H1 | \pi(H1)] \quad (6)$$

其中, 该等式右边的三类因子式与步骤(2)中的①②③完全相同;

将①②③类因子相乘后可得联合概率分布  $P(L1 \sim L31, L33 \sim L45, L47, F1 \sim F11, H1)$ , 与步骤(2)完全相同;

然后, 对所得联合概率分布进行边缘化操作 ( $\sum_{L1 \sim L31, L33 \sim L43, L45, F3 \sim F11, H1, L47}$ ), 可得概率分布, 即  $P(L44, F1, F2)$ 。与步骤(2)相比, 此次并未消去变量 L44;

类似步骤(2)的做法, 令上述乘法和边缘化操作中的变量  $L44 = 1, F1 = 1, F2 = 1$ , 则最终可得概率分布  $P(L44 = 1, F1 = 1, F2 = 1)$ ;

(4) 将步骤(2)和步骤(3)计算结果代入步骤(1)中的分母和分子, 可得最终计算结果  $P(L44 = 1 | F1 = 1, F2 = 1)$ 。

以上是因果推理的计算方法步骤; 后续的推理计算步骤(例如计算概率  $(P(H1 | L44 = 1))$ ,  $P(L12 = 1 | L43 = 1, L44 = 1)$ )与上述因果推理步骤相同(后续不再对诊断推理计算步骤进行描述)。

而其他模型或方法,通常只能进行因果推理,不能进行诊断推理。表明贝叶斯网络推理算法在因果推理和诊断推理上的一致性与全面性。

### 3.2.2 诊断推理

采用FMEA表格进行故障诊断时,需从表格中由上层往下层依次找出所有可能导致该故障模式的原因,过程繁琐复杂,甚至难以完成。而在BN中,只需进行计算 $P(X=1|L44=1)$ , $X \neq L44$ 。计算结果如表3所示,该表只给出结果大于0.1的节点,由大到小排列,其中状态1表示异常,0表示正常。

表3 前轮转弯系统故障诊断结果排列  
Table 3 Fault diagnosis result for the front wheel curve system

节点 X	$P(X=1 L44=1)$
I11	0.448 321
L45	0.223 721
L24	0.125 208
L23	0.125 208

对照模型节点编号及物理因素得出结论:导致前轮失去转弯能力最可能的原因是2#液压系统失去压力,其次可能是转弯控制组件(SCU)失效。诊断结果与工程实践相符,验证了模型的有效性。

在BN中,除了上述的诊断方法外,还可进行多源信息诊断:已知多种故障模式发生,求解最有可能的原因。这通过FMEA难以完成。例如,已知L44与L43故障模式发生,求解导致该故障模式发生最可能的原因,即计算 $P(X=1|L44=1, L43=1)$ , $X \neq L44, X \neq L43$ 。计算结果如表4所示,该表仅给出结果大于0.1的节点。

表4 多源信息诊断结果  
Table 4 Diagnoses for multi-source information

节点 X	$P(X=1 L44=1, L43=1)$
L12	0.673 214
L13	0.106 359
L14	0.106 359
L15	0.106 359

对照模型节点编号及物理因素得出结论:伺服阀LVDT失效最有可能导致故障模式L44与L43发生,其次可能是伺服阀线圈故障、电磁阀线圈故障、旁通阀复位弹簧损坏导致上述两故障模式同时

发生,诊断结果与工程实践相符,为系统故障分析和诊断提供参考。

通过上述实例可知,基于FMEA建立的BN侧重于不确定信息的表达以及多源信息推理,突破了FMEA在故障传播描述方面的局限性,可成为支持装备故障诊断的有效手段。其优势主要体现在:

(1) FMEA表格包含大量的冗余信息,且故障因果关系表达结构性差;BN将FMEA中的故障信息集成到一个统一的网络结构中,突破了FMEA在装备故障传播方式描述方面的局限,能够更加直观地描述系统内部故障传播关系,便于工程分析人员理解。

(2) FMEA只考虑单一故障模式在系统中的影响,而未考虑多因素共同作用的影响;而用BN法进行复杂系统故障诊断,能够融合多来源信息,在不确定性条件下进行推理,提高了系统分析能力。

(3) FMEA主要用于定性分析;而在其基础上构建的BN可进行双向推理,向前推理可计算多种故障模式发生后系统发生故障的概率,向后推理可以融合多源已知信息对系统进行诊断。

## 4 结论

基于FMEA构建的BN模型将所有故障信息集成到了一个统一网络中,不仅用因果有向边准确地描述系统内部间故障传播关系,并且对传播关系以CPT的形式进行了定量扩展。同时,相比传统的用于故障诊断的BN模型,本文提出的基于FMEA的BN模型避免了建模过程中对大量工程经验的需求,可快速完成BN模型的建立。

某型飞机的起落架转弯系统实例表明,基于FMEA的BN模型能够融合多源信息进行故障预测和诊断,分析结果与工程经验的一致性说明本文提出的基于FMEA的BN模型可作为复杂设备故障分析和诊断的有效手段。

### 参考文献

- [1] 姜万录,刘思远.多特征信息融合的贝叶斯网络故障诊断方法研究[J].中国机械工程,2010(8):940-945.  
Jiang Wanlu, Liu Siyuan. Fault diagnosis approach study of



- Bayesian networks based on multi-characteristic information fusion[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010(8): 940-945. (in Chinese)
- [2] Nandi S, Toliyat H A, Li X. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—a review [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(4): 719-729.
- [3] 李俭川, 胡葛庆, 秦国军, 等. 基于故障树的贝叶斯网络建造方法与故障诊断应用[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(24): 225-228.  
Li Jianchuan, Hu Niaoqing, Qin Guojun, et al. Application and construction of Bayesian networks based on fault trees [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(24): 225-228. (in Chinese)
- [4] Stephenson T A. An introduction to Bayesian network theory and usage[P]. IDIAP-RR 00-03, 2000.
- [5] Niedermayer D. Innovations in Bayesian networks[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 117-130.
- [6] Romessis C, Mathioudakis K. Bayesian network approach for gas path fault diagnosis[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128(1): 64-72.
- [7] Yongli Z, Limin H, Jinling L. Bayesian networks-based approach for power systems fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(2): 634-639.
- [8] Srinivas S, Russell S, Agogino A M. Automated construction of sparse Bayesian networks from unstructured probabilistic models and domain information[EB/OL]. [2016-04-26]http://www.arxiv.org.
- [9] Henrion M. Practical issues in constructing a Bayes' belief network[EB/OL]. [2016-04-26]http://www.arxiv.org.
- [10] Darwiche A. Bayesian networks[J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(12): 80-90.
- [11] Przytula K W, Milford R. An efficient framework for the conversion of fault trees to diagnostic Bayesian network models[C]//Aerospace Conference, Big Sky; MT, 2006.
- [12] 赵进晓, 肖飞. 一种基于贝叶斯网络的模型诊断方法[J]. *计算机科学*, 2009, 36(1): 291-292.  
Zhao Jinxiao, Xiao Fei. Method of model-based diagnosis founded on Bayesian network[J]. *Computer Science*, 2009, 36(1): 291-292. (in Chinese)
- [13] 费胜巍, 孙宇, 师会超. 基于故障分析模型的贝叶斯网络构建及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(9): 1768-1773.  
Fei Shengwei, Sun Yu, Shi Huichao. Construction and application of Bayesian networks based on fault analysis model [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(9): 1768-1773. (in Chinese)
- [14] Stamatis D II. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution[M]. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.
- [15] Diez F J. Parameter adjustment in Bayes networks. The generalized noisy OR-gate[C]//Proceedings of the Ninth international conference on Uncertainty in artificial intelligence. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993: 99-105.
- [16] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Computer safety, reliability and security[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1999: 310-322.
- [17] 王瑶, 孙秦. 一种解决组合爆炸问题的三态故障贝叶斯网络[J]. *西北工业大学学报*, 2014, 32(6): 857-864.  
Wang Yao, Sun Qin. A three-state faulty Bayesian network for solving combination explosion problem[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2014, 32(6): 857-864. (in Chinese)

### 作者简介:

薛海红(1976—),男,高级工程师。主要研究方向:军民用飞机可靠性设计与分析。

严控航(1979—),男,高级工程师。主要研究方向:军民用飞机可靠性设计与分析。

王瑶(1989—),女,博士研究生。主要研究方向:可靠性分析、故障诊断、人工智能等。

王锦妮(1982—),女,工程师。主要研究方向:军民用飞机可靠性、耐久性设计与分析。

郭鹏(1989—),男,工程师。主要研究方向:军民用飞机可靠性设计与分析。

(编辑:赵毓梅)