

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.11.007

一种基于 FMEA 的故障网络图 自动构建方法研究^{*}

吕晓娟

(中山职业技术学院 机电工程学院, 广东 中山 528400)

摘要:针对复杂机电系统故障网络图(FG)模型构建问题,对失效模式和效果分析(FMEA)的方法进行了研究,对FMEA故障模式关联影响和逻辑关系进行了分析,对故障关联矩阵和其形式化表达之间的关系进行了归纳,提出了一种基于FMEA的从故障关联矩阵到FG模型的自动构建方法。利用大型空压机进行了层次结构分解和故障模式影响的故障网络图的自动构建试验。研究结果表明:该方法能够有效提高FG构建的准确性和效率,可用于对复杂机电系统故障诊断建立准确的FG模型。

关键词:复杂系统;故障诊断;故障网络图;失效模式与影响分析

中图分类号:TH12

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)11-1264-06

Automatic fault graph developing method based on FMEA

LV Xiao-juan

(School of Electromechanical Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China)

Abstract: Aiming at the problem of building automatically fault graph(FG) model of complex electromechanical system, the method of failure mode and effects analysis was studied, the failure mode correlation effects and logical relationship based on FMEA were analyzed, the relationship between fault associate matrix and formalized expression was established. A method was presented to accomplish from fault associate matrix to building FG model automatically on the base of FMEA. The hierarchical decomposition and FMEA were evaluated on the large air compressor unit, building FG model automatically based on FMEA were tested. The results indicate that the proposed method can improve the accuracy and the efficiency of building FG model, and by which can achieve the accurate FG model for the complex electromechanical system.

Key words: complex electromechanical system; fault diagnosis; fault graph; failure mode and effects analysis(FMEA)

0 引言

复杂机电系统的故障诊断一直以来都是故障诊断领域的难题,工程应用中多采用故障树分析(fault tree analysis, FTA)方法,但是FTA方法采用树形结构表达故障传递关系,适用于小型结构和故障层次较少的场合,对于结构庞大、故障传动过程复杂、具有层次交叉传递模式的复杂机电系统,故障树体积庞大,底事件过多重复,层次间逻辑关系无法有效表达,其结构清晰、逻辑性强的特点无法体现。故障网络图(fault graph,

FG)基于图论方法,采用故障节点和逻辑与连接来表达故障之间的复杂关联关系,结构清晰,表达方式直观。FG通过可达性计算来对故障原因进行推理计算,效率高,过程简洁^[1]。因此,采用FG来表达复杂机电系统的故障关联关系并进行故障原因推理是一种有效的方法。但是对于复杂机电系统,FG模型故障节点数量庞大,人工构建的方式效率低、出错概率高,无法保证模型准确性。ALESSO H P^[2]最早对FG性质及其构建方法进行了探讨,但其仅针对最简单逻辑进行了描述,没有研究复杂系统FG构建方法;GROSS J L^[3]

收稿日期:2017-02-28

基金项目:广东省中山市科技计划资助项目(2015B2367)

作者简介:吕晓娟(1977-),女,陕西渭南人,硕士,讲师,主要从事先进设计制造技术、电梯系统设计与保障技术方面的研究。E-mail:15756894@qq.com

阐述了基于图论的复杂系统网络构建方法,但未针对 FG 存在的逻辑关系进行研究。总体来说,目前 FG 构建仍以人工构建为主,需要研究人员十分了解对象系统结构及故障逻辑关系,这对大多数研究人员和从业人员来说都是非常困难的。

本研究将针对该问题,提出基于失效模式和效果分析的 FG 自动构建方法^[4]。

1 FG 基本概念

1.1 FG 模型定义

FG 是对故障树模型的一种扩展,采用基于有向图的模型来表示故障模式间的影响关系。

FG 的结构 D_s 图形化表示如图 1 所示。

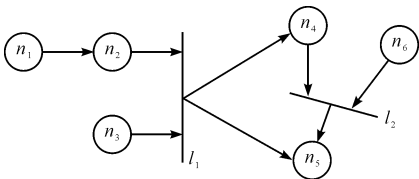


图 1 FG 的结构 D_s 图形化表示 $D = (V, A)$

FG 继承了故障树模型对故障模式影响关系的描述方法,但在结构上上升为图结构,因此可以表达故障节点之间复杂的交叉影响关系,不仅限于树状结构关系。

如图 1 所示,一个完整的 FG 模型通常由以下 6 部分组成:

- (1) 故障节点集 N 。表示故障模式,可以为故障底事件、中间事件或最终事件,用带 n_i 标志的圆圈节点表示;
- (2) 逻辑与连接集合 L 。表示两个或以上故障节点只有共同发生时才会导致后续故障发生,用带 l_j 标志的线段表示;
- (3) 输入函数 $I(l_j)$ 。从故障节点到逻辑与连接的输入映射,表示故障节点到逻辑与连接的输入传递关系,即 $I(l_j) = N \rightarrow L$;
- (4) 输入函数 $I(n_i)$ 。从故障节点到故障节点的输入映射,表示故障节点到故障节点的输入传递关系,即 $I(n_i) = N \rightarrow N$;
- (5) 输出函数 $O(l_j)$ 。从逻辑与连接到故障节点的输出映射,表示逻辑与连接到故障节点的输出传递关系,即 $O(l_j) = L \rightarrow N$;
- (6) 输出函数 $O(n_i)$ 。从故障节点到故障节点集合的输出映射,表示故障节点到故障节点的输出传递关系:即 $O(n_i) = N \rightarrow N$ 。

在 FG 的故障逻辑网络结构中,任何节点都不可能

同时是同一逻辑与连接的输出和输入节点,即 $I(l_j) \cap O(l_j) = \Phi$ 。此外,任何节点不能同时是它自己的输入和输出节点,即 $I(n_i) \cap O(n_i) = \Phi$ 。满足该约束条件的节点称之为无自环或非反节点^[5]。

故障逻辑网络结构 D_s 用图形化进行描述是一个有向多重图,将的其中节点用圆圈表示,逻辑与连接门用短横表示。有向弧由输入和输出函数确定,连接节点和逻辑与连接门后即构成故障逻辑网络图。

1.2 FG 故障原因可达集计算推理

FG 是有向图中的一种,即带有逻辑与连接关系的有向图。图的连通性可以用邻接矩阵来描述,对于有向图 $D = (V, E)$, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, $E = \{ \langle v_i, v_j \rangle | v_i, v_j \in V \}$, 其中: n —节点个数; m —边数;有序对 $\langle v_i, v_j \rangle$ —节点 v_i 到 v_j 有一条有向边,则 D 的邻接矩阵 $A = (a_{ij})$ 是 n 阶方阵^[6-7]。

包含逻辑与连接关系是 FG 模型的一个重要特征,逻辑与连接的 FG 表示、其代表的布尔方程以及等效的邻接矩阵如图 2 所示。

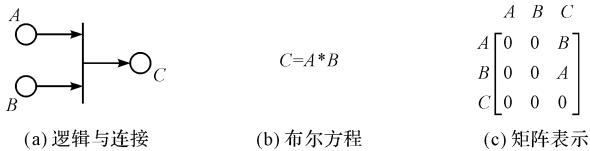


图 2 逻辑与连接关系

逻辑与连接关系的等效邻接矩阵表示形式如图 2(c) 所示。该矩阵的读法约定规则是:以矩阵左端第一列变量为起始节点,以矩阵顶端第一行变量为终止节点,依照从起始节点到终止节点的连接顺序,如从 A 及 B 到 C 。图 2(c) 表示的是节点 C 可以经由节点 A 和 B 或者经由节点 B 和 A 到达。

FG 多重故障原因组合可达集计算过程为:

- (1) 根据 FG 邻接矩阵计算 FG 可达矩阵 R , $R = A^s (s = n - 1)$;
 - (2) 将 R 中的大于 1 的数值元素和节点系数改为“1”,零元素不变;
 - (3) 利用 FG 邻接矩阵 A ,对 R 中的节点进行迭代,只到所有节点均为根节点。
- 完成上述计算后得到最后的 FG 可达矩阵 R ,其元素 r_{ij} 包含 4 种情况:
- (1) 数值“0”,表示不可达;
 - (2) 数值“1”,表示对应两顶点直接可达;
 - (3) 字母(或字母相乘),表示列对应顶点需要行对应顶点和字母(或字母相乘)表示顶点之间的逻辑“AND”关系后可达;

(4) 操作符“+”,表示该符号前后端字母或数字对应的顶点为“OR”逻辑关系,为分别可达。

2 基于 FMEA 的 FG 自动构建

2.1 设备结构特性及 FMEA 分析

从结构上看,复杂机电系统设备存在明晰的层次特性,但是设备元件的故障之间则不仅存在层次传递的特性,而且还存在错综复杂的关联关系。为了对设备的故障模式空间进行描述,可以对设备及其结构元素进行故障模式及影响分析(FMEA),以确定设备结构元素与故障模式之间以及各故障模式之间的复杂关联关系。

FMEA 分析的结果通常以表格形式进行表示。FMEA 分析结果的标准形式(不包括箭头)如图3所示。从该表格形式中可以看出,FMEA 分析不仅列举出了各层次结构元素的故障模式、故障原因等,而且分析了各结构元素故障模式该结构元素的影响以及对该结构元素其他故障模式的影响。

结构元素	...	故障模式	故障原因	局部影响	高层次影响	最终影响	严酷度	...
A	...	EEF3	...	...	EEF5	EEF5	1	...
...								
A_{a1}	...	EEF3	...	EEF3	EEF5	EEF5	1	...
A_{a2}	...	EEF3	...	EEF3	EEF5	EEF5	1	...
A_b	...	EEF4	...	EEF1	...	...	...	...
...								
A_{a1}	...	FM1	...	EEF1	EEF5	EEF5	1	...
A_{a1}	...	FM2	...	EEF2	EEF5	EEF5	1	...
A_{a2}	...	FM3	...	EEF1	EEF5	EEF5	1	...
...								

图3 FMEA 的分析表格

由于 FMEA 结果表格是逐条列出各结构元素故障模式及其原因分析,各故障模式与结构元素之间以及个故障模式之间的相互关系在表格中没有表现出来。但是,当将 FMEA 结果表格中重复出现的各故障模式采用箭头连接起来之后,设备结构元素及其故障模式之间的关联关系就被呈现出来。在上述设备结构层次分解以及对系统结构元素及其故障模式进行 FMEA 的基础上,可以得到设备系统结构元素和故障模式之间的映射关系,如图4所示。

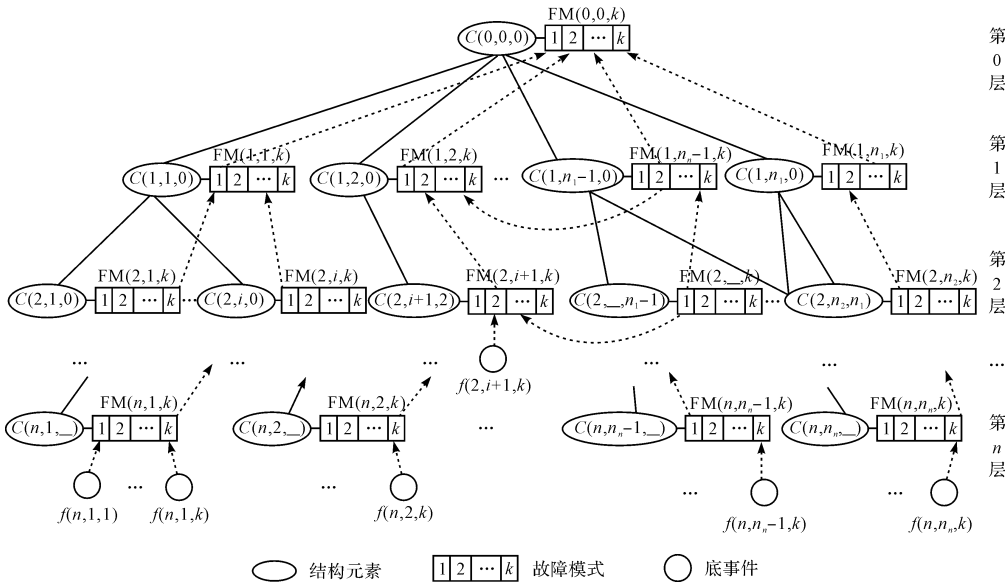


图4 设备结构元素和故障模式关联模型

椭圆—各层次设备结构元素;方框—结构元素的故障模式;圆圈—导致某个故障模式的根本故障原因;实线—设备结构元素之间的关联关系;虚线—各故障模式之间的影响关系; $C(i,j,l)$ —复杂装备系统的第*i*层、第*j*个结构元素节点,其父节点为第*i*-1层的第*l*个节点; $FM(i,j,k)$ —第*i*层、第*j*个结构元素的第*k*个故障模式节点; $f(i,j,k)$ —第*i*层、第*j*个结构元素的第*k*个故障底事件节点,这些故障底事件是复杂装备系统异常的根本原因。

在结构元素 - 故障模式关联模型中,每个结构元素可以有一个或多个故障模式,各个故障模式之间存在作用传递关系^[8]。

2.2 故障关联矩阵形式化表达

FMEA 分析结果通常以表格形式逐条记录,为简

化存储过程并方便 FG 的自动化生成,可以采用故障模式及影响关系关联矩阵对 FMEA 分析结果进行表示和存储。这里主要包括至少两个关联矩阵,其一是存储设备结构元素与对应故障模式之间的关联关系矩阵,其二是存储故障模式之间传递影响关系的故障模式关联关系矩阵^[9]。

(1) 结构元素与故障模式关联矩阵 $[A(k, i_k, j_{k-1}) \times F(A(k, i_k, j_{k-1}))]$:

$$\|c_{ij}\|_{A \times F(a)} = [A(k, i_k, j_{k-1}) \times F(A(k, i_k, j_{k-1}))] = F_1(A(k, j_{k-1})) \cdots F_j(A(k, j_{k-1})) \cdots F_{m(k, j_{k-1})}(A(k, j_{k-1}))$$

$$\begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1m(k, j_{k-1})} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{i1} & \cdots & c_{ij} & \cdots & c_{im(k, j_{k-1})} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n(k, j_{k-1})1} & \cdots & c_{n(k, j_{k-1})j} & \cdots & c_{n(k, j_{k-1})m(k, j_{k-1})} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(k, 1, j_{k-1}) \\ \vdots \\ A(k, i, j_{k-1}) \\ \vdots \\ A(k, n(k, j_{k-1}), j_{k-1}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $A(k, i, j_{k-1})$ —装置设备结构层次分解后第 $k-1$ 层第 j_{k-1} 个结构元素; $F_j(A(k, i, j_{k-1}))$ —该结构元素的第 j 个故障模式。

该矩阵中,如果结构元素 $A(k, i_k, j_{k-1})$ 具有故障模式属性 $F_j(A(k, j_{k-1}))$, 则 $c_{ij} = 1$, 否则 $c_{ij} = 0$ 。

(2) 故障模式传递影响关系矩阵 $[F(A(m, n_m, l_{m-1})) \times F(A(k, i_k, j_{k-1}))]$:

$$\|c_{ij}\|_{F(a) \times F(a)} = [F(A(m, n_m, l_{m-1})) \times F(A(k, i_k, j_{k-1}))] = F_1(A(k, i_{k-1}, j_{k-1})) \cdots F_j(A(k, i_{k-1}, j_{k-1})) \cdots F_{p(k)}(A(k, i_{k-1}, j_{k-1}))$$

$$\begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1p(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{i1} & \cdots & c_{ij} & \cdots & c_{ip(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{q(m)1} & \cdots & c_{q(m)j} & \cdots & c_{q(m)p(k)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(A(m, n_m, l_{m-1})) \\ \vdots \\ F_i(A(m, n_m, l_{m-1})) \\ \vdots \\ F_{q(m)}(A(m, n_m, l_{m-1})) \end{bmatrix} \quad (2)$$

故障模式的传递影响过程包含“OR”和“AND”两种逻辑关系,即各个故障之间相互独立,可独自导致被影响故障的发生的“OR”逻辑关系,和各故障必须共同存在才可以导致被影响故障发生的“AND”逻辑关系。对于“OR”逻辑关系,由于各故障之间相互独立,可分别在矩阵中进行表示,即如果故障模式 $F_j(A(m, n_m, l_{m-1}))$ 影响到故障模式 $F_j(A(k, i_{k-1}, j_{k-1}))$ 的存在,则 $c_{ij} = 1$, 否则 $c_{ij} = 0$ 。对于逻辑“AND”关系,由于故障的传递过程需要每个故障参与,其存储与逻辑“OR”关系不同,可采用如下方式表示:如果故障模式 $F_j(A(m, n_m, l_{m-1}))$ 影响到故障模式 $F_j(A(k, i_{k-1}, j_{k-1}))$ 的存在,且该传递影响过程需要 $F_k(A(m, n_m, l_{m-1}))$ 也同时发生,则 $c_{ij} = F_k(A(m, n_m, l_{m-1}))$ 。

2.3 FG 模型自动生成

在故障模式因果关系矩阵基础上构建 FG 模型时,首先给出矩阵中所有的故障模式,然后依次针对这些故障模式在因果关系矩阵中搜索与其相关联的故障模

式,如果模型中已有该节点,则直接将相关联的故障模式用有向边连接,如果没有,则先在模型中添加该节点,然后用有向边连接有关联影响的故障模式,不断重复该过程,直到搜索完最后一个故障模式为止,便得到一个完整的 FG 模型。

基于 FMEA 故障模式影响关系矩阵构建 FG 模型的详细步骤如下:

(1) 列出故障模式传递影响关系矩阵中的所有故障模式,记为 F_i , 其中 $i = 1, 2, \dots, n$, n 为所有故障模式的个数;

(2) 将 FG 模型中的节点集合记为 A , 设 $i = 1$;

(3) 判断 F_i 是否属于集合 A , 如果不属于, 则将节点 F_i 添加到 FG 模型中;

(4) 从 F_i 出发搜索故障模式因果关系矩阵, 找出与其相关联的故障模式, 记为 F_j , 其中 $j = 1, 2, \dots, m$, m 为与 F_i 相关联的故障模式的个数;

(5) 若 $m = 0$, 转步骤(8), 若 $m \neq 0$, 则判断 F_j 是否属于集合 A , 如果不属于集合 A , 则将 F_m 添加到 FG 中;

(6) 判断 $F_j(j = 1, 2, \dots, m)$ 各元素之间逻辑关系, 将具有 AND 关系节点采用 AND 关系符号(FG 中为短横)连接;

(7) 将所有 AND 关系符号和其他 F_j 节点(具有 OR 逻辑关系)一同和 F_i 相连;

(8) 令 $i = i + 1$, 若 $i > n$, 则结束, 否则返回(3);

(9) 完成以上迭代搜索便可构建出设备层 FG 模型。

构建 FG 模型的流程如图 5 所示。

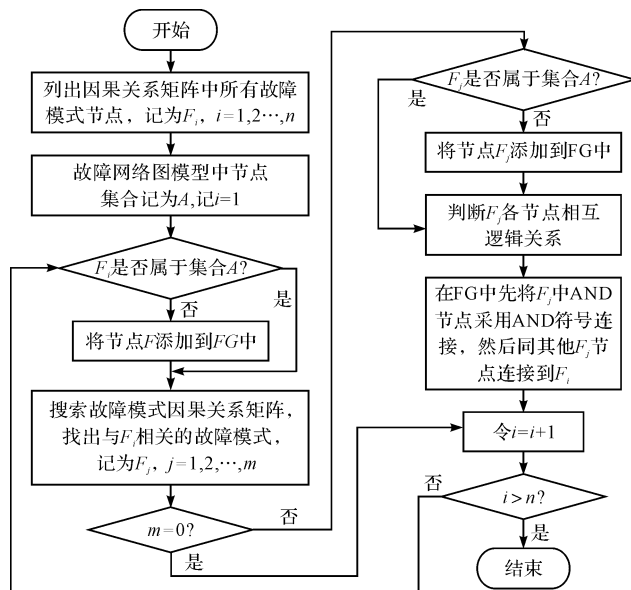


图 5 FG 模型的构建流程

下面以一个简单的例子说明 FG 模型的构建,FG 模型的构建示例如图 6 所示。

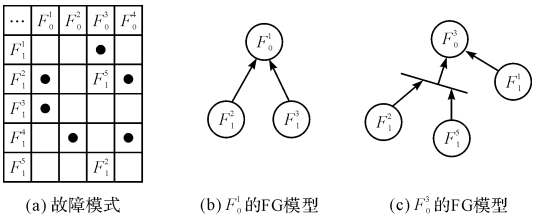


图 6 FG 模型的构建示例

假设结构元素 A_0 对应的故障模式 F_0 包括 $\{F_0^1, F_0^2, F_0^3, F_0^4\}$, 结构元素 A_1 对应的故障模式 F_1 包括 $\{F_1^1, F_1^2, F_1^3, F_1^4, F_1^5\}$, 如图 6(a) 所示的关系矩阵描述了各故障模式之间的影响关系。当选定故障模式 F_0^1 和 F_0^3 作为节点事件时,通过图 6(a) 表示的故障模式因果关系矩阵进行推理,可以得到各自相应的 FG 模型单元,分别如图 6(b)、6(c) 所示。

3 实例研究

3.1 压缩机组结构分解

压缩机组系统是典型复杂机电系统。本研究实例为某煤化工集团压缩机组系统,该压缩机组系统由 5EH-8BD 汽轮机,RIK100-4 径向等温紧凑型空压机, RBZ45-7 径向筒式增压机、TX36/1C 变速箱、润滑油系统以及其他辅助装置组成辅助装置和设备组成。其结构分解如图 7 所示。

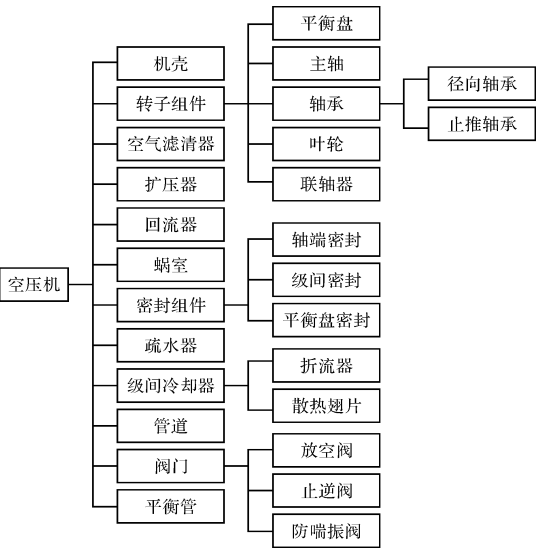


图 7 空压机分解结构

3.2 实验结果及分析

笔者对上述分解后的各零部件开展详细的 FMEA 分析,其故障模式如表 1 所示。

表 1 空压机故障模式表

ID	组件	故障模式	ID	组件	故障模式
F_{45}^1	空压机	排气量不足	F_{63}^1	轴端密封	轴端密封不严
F_{45}^2		段间进口温度太高	F_{64}^1	级间密封	级间密封不严
F_{45}^3		入口压力低	F_{65}^1	平衡盘密封	平衡盘密封不严
F_{45}^4		压缩机喘振	F_{67}^1	散热翅片	散热翅片脱落
F_{45}^5		入口汽量小	F_{68}^1	防喘振阀	防喘振控制失效
F_{45}^6		入口气体分子量小	F_{68}^2		防喘振损坏
F_{45}^7		进气密度低	F_{68}^3	止逆阀	防喘振控制器故障
F_{45}^8		通流面积减少	F_{70}^1		止逆阀泄漏
F_{45}^9		出口压力小于管网压力	F_{71}^1	径向轴承	温度过高
F_{47}^1		转子振动大	F_{71}^2		轴瓦浇铸质量不佳
F_{47}^2	转子	转子共振	F_{71}^3		轴瓦间隙太小
F_{47}^3		转子临界转速接近工作转速	F_{71}^5		轴承进油量不足
F_{47}^4		转子动静摩擦	F_{71}^6		进油孔堵塞
F_{47}^5		转子与定子同心度允差超标	F_{71}^7		轴承进油节流孔径小
F_{47}^6		转子不对中	F_{71}^8		轴承损伤
F_{47}^7		转子不平衡	F_{71}^9		轴套损伤
F_{47}^8		原始质量不平衡	F_{71}^{10}		轴瓦合金脱落
F_{47}^9		转子组件松动	F_{72}^1	止推轴承	进油节流圈孔径小
F_{47}^{10}		转子轴向位移过大	F_{72}^2		进油孔堵塞
F_{47}^{11}	空气滤清器	转子腐蚀	F_{72}^3		轴瓦摩擦
F_{48}^1		供气不足	F_{72}^4		轴瓦间隙小
F_{48}^2		入口滤网堵塞	F_{72}^5		止推轴承温度高
F_{48}^3		吸气阻力增大	F_{72}^6		结构设计不佳
F_{48}^4		吸管过长	F_{76}^1	变速箱齿轮	齿轮啮合不良
F_{48}^5		管径太小	F_{83}^1		进油温度太高
F_{49}^1	扩压器	扩压器结垢	F_{83}^2		润滑油压力低
F_{52}^1		密封效果不佳	F_{83}^3		润滑油温度低
F_{52}^2		密封腐蚀	F_{83}^4		润滑油泄漏
F_{52}^3		抗蚀性差	F_2	系统	结构设计不佳
F_{54}^1		排气管网阻力过大	F_3		制造工艺欠佳
F_{54}^2		管网系统憋压	F_4		安装不当
F_{55}^1		冷却效果不好	F_5		过载不足
F_{55}^2		冷却面积减少	F_6		材料不良
F_{55}^3		冷却器管束结垢	F_7		空气带有硬质颗粒
F_{55}^4		冷却器漏水	F_8		固体杂质沉积
F_{56}^1		平衡管堵塞	F_9		润滑油质量不好
F_{59}^1		轴弯曲	F_{10}		超过临界转速
F_{59}^2	主轴	轴向推力过大	F_{11}	故障底事件	级间冷却器循环水温过高
F_{60}^1		进油量不足	F_{12}		级间冷却器循环水量过小
F_{60}^2		油膜振荡	F_{13}		循环水硬度太大
F_{60}^3		轴承润滑效果差	F_{14}		空气带油
F_{60}^4		油膜不稳定	F_{31}		叶片腐蚀性差
F_{60}^5		轴承进油量少	F_{32}		转子腐蚀性差
F_{61}^1		叶片结垢	F_{33}		空气含有腐蚀性介质
F_{61}^2		叶片断裂	F_{34}		空气中含 SO2
F_{61}^3		叶片腐蚀	F_{35}		防腐措施不佳
F_{62}^1		连接不良	F_{36}		空气中含 CO2

在对空压机系统进行层次结构分解和故障模式影响分析的基础上,建立系统各结构元素与其故障模式之间以及系统各故障模式之间的逻辑关系矩阵,其中故障模式之间的逻辑影响关系矩阵如图 8 所示。

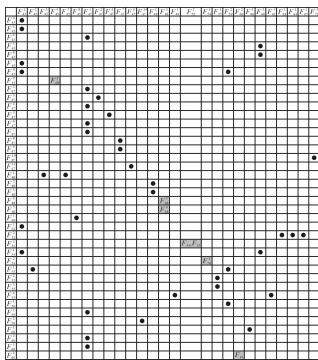


图 8 空压机故障模式关联关系矩阵

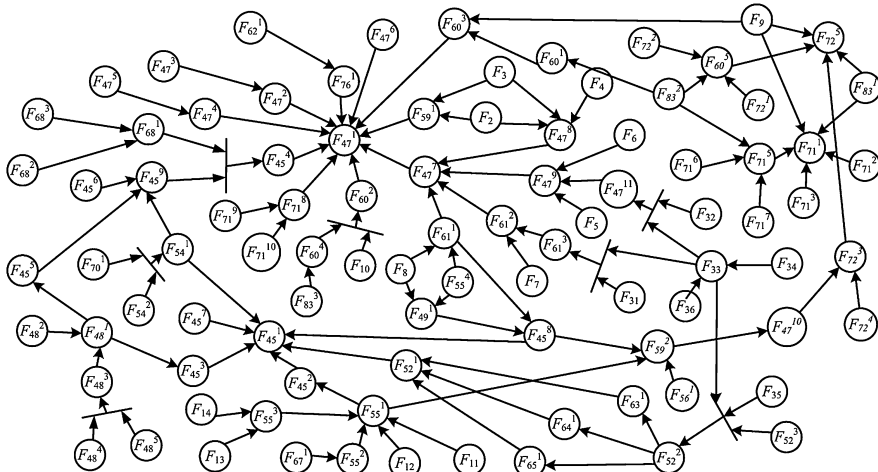


图 9 空压机系统 FG

4 结束语

复杂系统内部故障逻辑关系复杂,采用故障树进行分析时对层次交叉等复杂逻辑传递关系表示困难、结构庞大、底事件容易重复。本研究针对该问题提出了基于 FG 故障网络图模型的复杂系统故障溯源方法,对 FG 故障网络图进行了定义描述,针对其手动构建繁琐、准确性低的问题开展了基于 FMEA 分析的自动构建方法研究,通过 FMEA 建立故障模式关联影响和逻辑关系,通过故障关联矩阵实现其形式化表达,并通过 FG 生成算法完成从故障关联矩阵到 FG 模型的自动构建。

实例研究表明:该方法能够有效提高 FG 构建的准确性和效率,实现复杂机电系统故障诊断建立准确的 FG 模型。

参考文献 (References):

[1] HAWKINS PG, WOOLLONS D J. Failure modes and effects analysis of complex engineering systems using functional models [J]. **Artificial Intelligence in Engineering**,1998,12(4):

图 8 中,灰色方格部分为具有逻辑 AND 关系的故障模式组。以该矩阵为基础,运行前面所述算法,自动构建出空压机系统 FG 模型,如图 9 所示。

在本研究之前,FG 构建均通过手动方式完成,需要研究人员对系统总体有准确把握,并详细掌握各故障间逻辑关系,构建一个类似于本研究压缩机组系统完整的 FG 往往需要数天,而本文方法并不需要对系统有全面了解,仅根据专业人员常用的 FMEA 分析表即可完成,经试验证明仅需数小时即可完成,构建效率大幅提升,模型准确性也较传统方式更高。

375-397.
[2] ALESSO H P, PRASSINOS P, SMITH C F. Beyond fault trees to fault graphs[J]. **Reliability Engineering**,1985,12 (2):79-92.
[3] GROSS J L, Yellen J. Graph theory and its applications [M]. Boca Raton: Chapman and Hall,2006.
[4] VENKATESH M A, PAL D K, BASU S K. Critical analysis of failure modes using FMEA and digraph approach [J]. **Journal of the Institution of Engineers, Part PR: Production Engineering Division**,2002,82(3):51-55.
[5] 张建国,黄文敏.大型机械产品 FMEA 和 FTA 综合分析方法[J]. **机械设计与制造**,2000(1):1-3.
[6] 姜洪权,王金玉.面向复杂系统故障溯源的 SDG-FG 模型建模方法[J]. **计算机集成制造系统**,2015,21(3):749-757.
[7] 董良遇,王庆锋,张赞新,等.一种基于变相 AHP 的故障模式与影响半定量分析方法[J]. **液体机械**,2016,44 (5):51-55,82.
[8] GAO X Q, LI Z B, LI L. A process model for concurrent design in manufacturing enterprise information systems[J]. **Enterprise Information Systems**,2008,2(1):33-46.
[9] GROSS J L, YELLEN J. Graph theory and its applications [M]. Boca Raton: Chapman and Hall,2006.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

吕晓娟.一种基于 FMEA 的故障网络图自动构建方法研究[J]. **机电工程**,2017,34(11):1264-1269.

LV Xiao-juan. Automatic fault graph developing method based on FMEA[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017,34(11):1264-1269.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>