

# 基于产品结构树和 FMEA 的故障诊断方法研究

费胜巍, 孙宇, 张晓阳, 王胜红

(南京理工大学机械工程学院制造工程及自动化系, 南京 210094)

**摘要:** 提出了以产品结构树为诊断知识的组织框架和利用 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) 信息建立父节点与子节点间的诊断规则的故障诊断方法。研究了基于产品结构树模型的框架知识组织方法, 并探讨了由 FMEA 信息建立诊断推理规则及推理策略, 最后以某列车自动门系统为例进行诊断分析。

**关键词:** 产品结构树; FMEA; 列车自动门; 故障诊断

**中图分类号:** TP306+.3; TP182 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2006)7-238-4

## The Research of the Method Based on Product Structure Tree and FMEA

FEI Shengwei, SUN Yu, ZHANG Xiaoyang, WANG Shenghong

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The fault diagnostic method that applies product structure tree to organize diagnostic knowledge and utilizes FMEA information to establish diagnostic rule between father node and children nodes was presented. The methods that organize knowledge with frames based on product structure tree model, establish diagnostic rule with FMEA information and reasoning strategy were discussed. A certain train automatic door was analyzed by the method.

**Keywords:** Product structure tree; FMEA; The train automatic door; Fault diagnosis

## 0 引言

诊断知识的匮乏向来是智能诊断系统“头疼”的问题, 知识匮乏使得诊断结果的准确度低、不确定性高。为此, 本文从产品设计阶段获取诊断知识, 立足于问题的本原, 以解决诊断知识匮乏的问题, 提高诊断精度、降低诊断的不确定性。由于任何系统的任何故障一般都是由该系统的某个或某些组成部分所导致的, 而且, 一个产品及其每一个组成部分通常表现出多种故障形式, 但其组成结构通常只有一种, 因此, 本文考虑以产品结构树组织诊断知识, 并利用在产品设计阶段生成的 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis, 故障模式与影响分析) 信息建立节点间诊断规则的诊断方法。

## 1 原理

图 1 为 MS800CW5 列车自动门的产品结构树。我们将自动门系统按从上至下分解为系统、子系统、部件、零件 4 个层次, 其目的在于建立一个能反映诊断对象结构、功能和行为关系的定性因果模型, 从而体现故障传播的层次性和子、父节点间关系的因果性<sup>[1]</sup>。虽然, 由于结构树上某一个子节点与其父节点存在着确定性的因果关系, 即父节点的故障一般由其子节点的故障所导致的, 使得由产品结构树组织诊断知识可以缩小诊断范围, 然而, 我们不知道父节点的故障是由哪一个子节点发生的哪种故障所导致的, 而这必须借助外来的诊断信息, 以获得具体的故障原因。

本文结合列车自动门, 提出以产品结构树组织诊断知识, 利用 FMEA 信息建立父节点与子节点间的

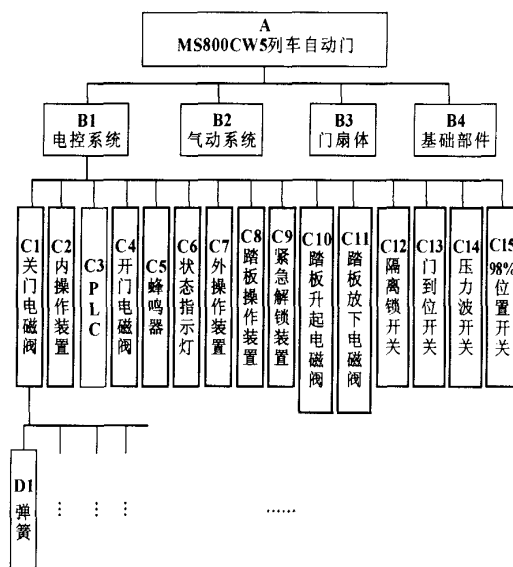


图 1 MS800CW5 列车自动门的产品结构树

诊断规则 (故障影响规则和故障原因规则), 如此, 若检测到系统中某部件发生故障及其发生的故障模式, 一方面, 通过故障影响规则, 可以知道它对上层节点和整个系统 (产品) 的影响, 另一方面, 通过故障原因规则, 可以知道导致它故障的原因。

## 2 基于产品结构树的知识组织方式

如图 2 所示, 本文采用基于产品结构树模型的框架知识组织方法, 将系统级 (列车自动门)、子系统级、部件级、零件级中的各节点的诊断知识及其相关知识封装在相应的框架中, 各级节点包含了 3 个槽。槽 1, 是健康评估信息子框架, 子框架包含了节点损坏程度评估、故障模式判断、决策信息、维修信息 4

个槽, 节点损坏程度评估是通过 B IT (机内测试) 信息或是健康评估人员进行一段时间的观测后得出的该节点损坏程度的评估知识; 故障模式判断是利用 B IT 信息, 或状态评估人员通过现象观测, 得出当前所发生的故障模式。由于零件作为系统中最底层的节点, 很难直接评估零件的健康状况和可能的故障模式, 必须通过利用与上层节点中故障模式的关系来推出本层的哪些节点可能发生哪些故障, 所以健康评估信息子框架中节点损坏程度评估和故障模式判断两个槽中的信息可能为空。决策信息, 是根据节点损伤程度以采取相应的措施; 维修信息, 是根据节点损伤程度以采取相应维修方法。槽 2, 是故障维, 包含了该节点所

有可能发生的故障模式, 例如, 门系统框架中包含了门不能关、门不能关到位、门到位但锁不上等等故障模式, 故障维槽中每一个侧面对应着一个故障模式, 每一个故障模式都有一个框架, 框架中包含了由 FMEA 信息建立的故障影响规则库 (除系统级节点) 和故障原因规则库 (除零件级节点)。故障影响规则库中包含了系统中各零部件节点的某个故障的发生对其父节点中某故障模式的影响及影响概率; 故障原因规则库中包含了在系统的各零部件节点中导致其父节点某个故障事件发生的所有故障原因, 它们都是利用系统中父子节点的故障模式之间的关系建立起来的规则库。槽 3, 是功能维, 包含了该节点的所有功能。

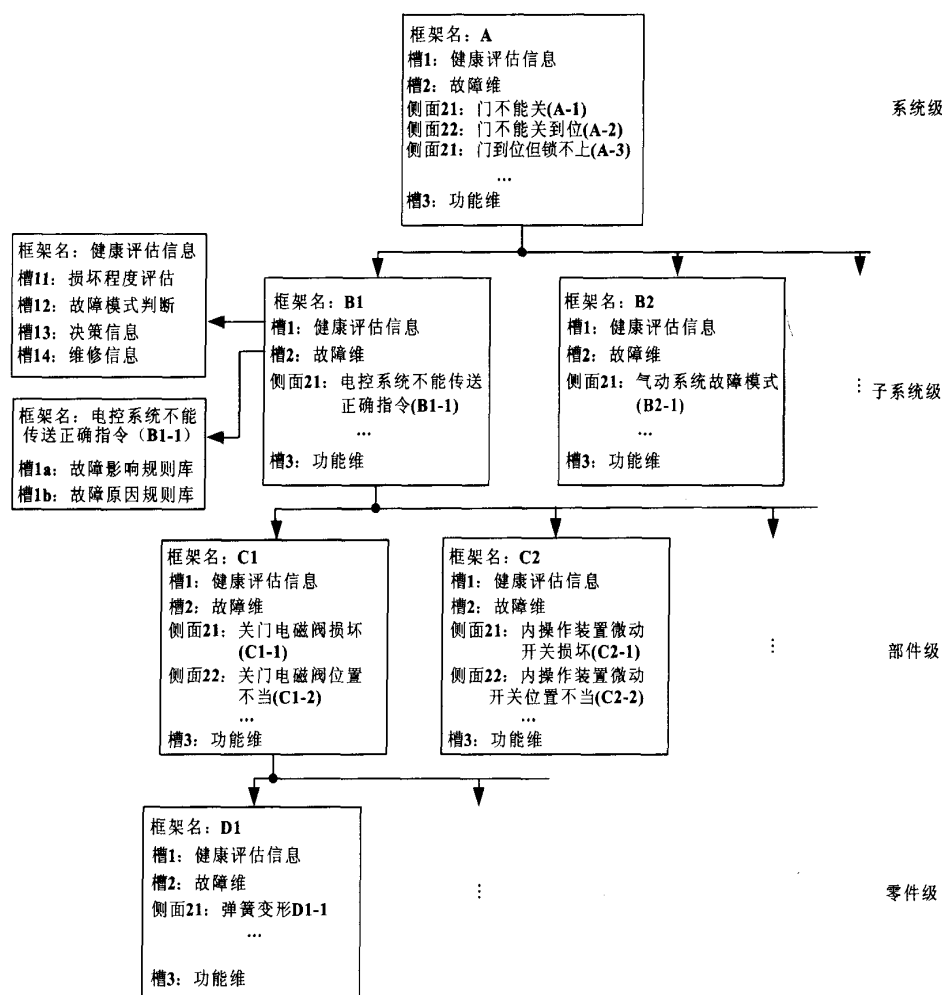


图 2 MS800CW5 列车自动门的知识组织和表示

### 3 由 FMEA 信息建立诊断推理规则

结构树中每一层节点的故障信息从哪儿获得? 获得了节点的故障信息, 但我们无法获知这些故障信息之间的隐含的关系, 怎样才能使这些故障信息之间的关系显现出来呢?

故障模式及影响分析 (FMEA), 将帮我们回答

上述问题, 它能分析产品的每一个组成部分可能存在的故障模式及其可能的故障影响和原因<sup>[2]</sup>。所以, 我们不仅从 FMEA 中获得产品结构树中的每一层的节点可能的故障模式, 还定性定量的获知了上下层节点各故障模式间的关系。

#### 3.1 FMEA 分析表

表 1 MS800CW5列车自动门的部分 FMEA 分析表

| 代码  | 产品或<br>功能<br>标志 | 功能       | 故障<br>模式                  | 故障<br>原因  | 故障影响                     |                    |                   | 故障检<br>测方法 | 补偿<br>措施 | 故障<br>频率<br>等级 O | 危害<br>程度<br>等级 S | 可检<br>测性<br>等级 D | RPN |
|-----|-----------------|----------|---------------------------|-----------|--------------------------|--------------------|-------------------|------------|----------|------------------|------------------|------------------|-----|
|     |                 |          |                           |           | 局部<br>影响                 | 上一层<br>的影响         | 最终<br>影响          |            |          |                  |                  |                  |     |
| ... | ...             | ...      | ...                       | ...       | ...                      | ...                | ...               | ...        | ...      | ...              | ...              | ...              | ... |
| ... | 关门电<br>磁阀       | 关门<br>控制 | 电磁阀<br>损坏                 | 弹簧<br>变形等 | 电磁阀<br>不动作               | 电控系统<br>不能正<br>确指令 | 车门不<br>能关         | ...        | ...      | 3                | 4                | 4                | 48  |
| ... |                 |          | 电磁阀位<br>置不当               | ...       | 电磁阀<br>不动作               | 电控系统<br>不能正<br>确指令 | 车门不<br>能关         | ...        | ...      | 2                | 4                | 2                | 16  |
| ... | 内操作<br>装置       | 门控制      | 内操作<br>装置微动<br>开关损坏       | ...       | 内操作<br>装置微<br>动开关<br>不响应 | 电控系统<br>不能正<br>确指令 | 车门不<br>能关或<br>不能开 | ...        | ...      | 2                | 4                | 4                | 32  |
| ... |                 |          | 内操作<br>装置微动<br>开关位置<br>不当 | ...       | 内操作<br>装置微<br>动开关<br>不响应 | 电控系统<br>不能正<br>确指令 | 车门不<br>能关或<br>不能开 | ...        | ...      | 2                | 4                | 3                | 24  |
| ... | PLC             | 门控制      | PLC输入、<br>输出端口<br>接线不良    | ...       | ...                      | 电控系统<br>不能正<br>确指令 | 车门不<br>能关或<br>不能开 | ...        | ...      | 1                | 4                | 2                | 8   |
| ... | ...             | ...      | ...                       | ...       | ...                      | ...                | ...               | ...        | ...      | ...              | ...              | ...              | ... |

表 1 为 MS800CW5 列车自动门的部分零部件的 FMEA 分析表。表中故障模式是指整个系统或系统的各组成部分丧失应有的功能而表现出来的现象，它是故障的表现形式。故障原因是引起故障模式的机理。故障影响是指故障模式对自身级、上一层系统以及最高层系统（产品）的技术性能、可靠性、维修性等方面的影响。风险优先数 RPN（Risk Priority Number）用于评估零部件的故障对其上一层系统故障的影响程度大小，其计算公式：

$$RPN_{ij} = O_i \times S_i \times D_i$$

式中： $RPN_{ij}$  为子节点的第  $i$  个故障模式对其父节点的第  $j$  个故障模式的影响度；

$O_i$  为第  $i$  个故障模式的发生频率等级；

$S_i$  为第  $i$  个故障模式的危害度等级；

$D_i$  为第  $i$  个故障模式的可检测性等级，即故障可检测的难易程度。

其中，发生频率等级、危害度等级、可检测性等级的取值可以参见表 2。

表 2 发生频率等级、危害度等级、可检测性等级取值表

| 等级   | 1     | 2    | 3      | 4    | 5     |
|------|-------|------|--------|------|-------|
| 项目   |       |      |        |      |       |
| 故障频率 | 微小    | 偶尔发生 | 有时发生   | 经常发生 | 很容易发生 |
| 危害程度 | 很低    | 比较低  | 一般     | 比较高  | 特别高   |
| 可检测性 | 很容易发觉 | 容易发觉 | 需要一定注意 | 较难发觉 | 很难发觉  |

### 3.2 故障影响规则的建立

从 FMEA 表中，我们可以直接获知产品结构树中每一层节点的故障对其父节点中某故障的影响，其影响概率  $\beta_{ij}$  的取值，可以参考表 3，它是分析人员根据经验判断得到的。

表 3 故障影响概率  $\beta_{ij}$  选择范围<sup>[3]</sup>

| 故障影响         | 实际丧失               | 很可能丧失                    | 有可能丧失                          | 几乎不丧失                     | 无影响              |
|--------------|--------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------|
| $\beta_{ij}$ | $\beta_{ij} = 1.0$ | $0.5 < \beta_{ij} < 1.0$ | $0.1 \leq \beta_{ij} \leq 0.5$ | $0 < \beta_{ij} \leq 0.1$ | $\beta_{ij} = 0$ |

根据子节点的某故障对其父节点故障的影响建立影响规则，规则的通用形式可以写成：

规则 E If (a) Then (m)  $\beta_{am}$  (And) (n)  $\beta_{an}$  I 表示规则号；a 表示子节点所发生的某个故障事件；m 和 n 表示受 a 影响，导致其父节点所发生的故障事件； $\beta_{am}$  和  $\beta_{an}$  表示 m 和 n 受 a 的影响概率。

从表 1 获得信息建立电控系统中电控系统不能正确指令这个故障的影响规则，If 电控系统不能正确指令 Then 车门不能关  $\beta_{11}$  And 车门不能开  $\beta_{12}$ 。

### 3.3 故障原因规则的建立

从 FMEA 表中获得产品结构树中某节点的故障原因。

(1) 计算子节点中导致其父节点某种故障的故障原因的影响百分数（C）<sup>[4]</sup>

$$C_{ij} = RPN_{ij} / \sum_{i=1}^n RPN_{ij}, \quad \sum_{i=1}^n C_{ij} = 100\%$$

式中:  $C_{ij}$  为子节点中故障  $i$  的发生对其父节点的故障  $j$  发生的影响百分数。

从表 1 中获知, 导致电控系统不能正确指令这个故障的原因是电磁阀损坏、电磁阀位置不当、内操作装置微动开关损坏、内操作装置微动开关位置不当、PLC 输入输出端口的接线不良, 它们导致其发生的影响百分数分别为 37.5%、12.5%、25%、18.75%、6.25%。

## (2) 故障原因规则的建立

根据子节点中导致其父节点某个故障事件发生的所有故障原因建立规则, 规则的通用形式可以写成:

规则 J: If (k)  $C_{kb}$  (or) (l)  $C_{lb}$  Then (b), 也可以写成: If (k) Then (b)  $C_{kb}$  (or) If (l) Then (b)  $C_{lb}$

J 表示规则号; b 表示父节点发生的某个故障事件; k 和 l 表示子节点中导致其父节点发生故障事件 b 的两个故障原因;  $C_{kb}$  和  $C_{lb}$  表示这两个故障原因的影响百分数。

从表 1 中, 建立电控系统不能正确指令这个故障的故障原因规则: If 电磁阀损坏 Then 电控系统不能正确指令 37.5%, (Or) If 电磁阀位置不当 Then 电控系统不能正确指令 12.5%, (Or) If 内操作装置微动开关损坏 Then 电控系统不能正确指令 25%, (Or) If 内操作装置微动开关位置不当 Then 电控系统不能正确指令 18.75%, (Or) If PLC 输入输出端口的接线不良 Then 电控系统不能正确指令 6.25%。

## 4 推理策略及实例分析

(1) 通过子系统级、部件级框架中的健康评估信息将故障定位在产品的子系统或部件中某个节点, 并确定当前所发生的故障模式。

(2) 根据故障节点中当前所发生的故障模式中的故障原因规则, 将故障定位在下一层的某个 (些) 节点的某个 (些) 故障模式。

(3) 若导致当前所发生的故障模式的故障原因可能有多, 则将故障原因的影响百分数  $C_{ij}$  按由大到小的顺序排序。

(4) 将故障原因的影响百分数  $C_{ij}$  最高的所对应的下层节点中某个故障模式作为故障原因进行检修, 若是, 则以此故障原因为起点进行下一层故障原因的诊断; 若不是, 则排除该原因, 再按  $C_{ij}$  由大到小的顺序依次进行, 直到找到正确的故障原因。

(5) 依次类推, 直到找到最底层的故障节点 (故障零件) 及其所发生的故障事件, 诊断结束。

利用上述推理策略对 MS800CW5 列车自动门的“车门不能关”这个故障模式进行诊断。

经状态评估人员检测获知电控系统不能正确指令是导致其的故障原因。根据 FMEA 表中信息, 可以确

定故障节点是关门电磁阀、内操作装置、PLC, 同时获知的故障原因可能是关门电磁阀损坏、关门电磁阀位置不当、内操作装置微动开关损坏、内操作装置微动开关位置不当、PLC 输入输出端口的接线不良等。利用 FMEA 表中, 电控系统的子节点中各种故障对其电控系统不能正确指令故障事件的影响度 RPN, 算得故障原因的影响百分数  $C_{ij}$ , 建立故障原因规则, 如 3.3 节中所述。

将  $C_{ij}$  由大到小的顺序进行排序, 对  $C_{ij}$  最高所对应故障模式, 即关门电磁阀损坏故障事件, 作为故障原因进行检修, 若是, 则以关门电磁阀损坏为起点进行下一层故障原因的诊断; 若不是, 则以  $C_{ij}$  次高的内操作装置微动开关损坏作为故障原因进行检修, 依次进行, 直到找到正确的故障原因。若查得故障原因是关门电磁阀损坏, 再根据故障原因规则: If 弹簧变形 Then 电磁阀损坏, 从中获知弹簧变形是导致其故障的子事件, 也是导致“车门不能关”这个故障的底事件。

## 5 结论

本文提出了以产品结构树为诊断知识的组织框架, 利用 FMEA 信息建立父节点与子节点间的诊断规则的故障诊断方法。此方法利用产品设计阶段获取的诊断知识, 立足于问题的本原, 以解决诊断知识匮乏的问题, 提高诊断精度、降低诊断的不确定性。另外, 此诊断方法所需的大部分信息, 如产品结构树、FMEA 信息<sup>[5]</sup>、产品功能信息、产品维修信息等都可以从产品数据管理系统 (PDM) 中获得, 使得基于 PDM 的故障诊断系统的实现成为可能, 为故障诊断系统融入企业信息化奠定基础。

## 参考文献

- [1] 彭强, 孙宇. 结构树和粗糙集相结合的车辆故障诊断系统 [J]. 汽车工程, 2004, 26 (4): 181 - 184.
- [2] Yiannis Papadopoulos & David Parker. Automating the Failure Modes and Effects Analysis of Safety Critical Systems [C]. Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering, 2004.
- [3] 陈锴. 故障模式与影响分析 (FMEA) [J]. 家用电器科技, 2002 (6): 84 - 86.
- [4] 徐治国, 汤洪涛, 唐任仲. 过程诊断层次分析法及其应用 [J]. 机床与液压, 2004 (4): 183 - 185.
- [5] 杨飞, 李明, 曾翰通. 关于 FMEA 与 PDM 集成框架的研究 [J]. 制造业自动化, 2002, 24 (8): 31 - 34.

作者简介: 费胜巍 (1982—), 男, 上海崇明人, 南京理工大学机械工程学院博士研究生, 主要从事装备故障诊断与维护、知识工程、企业信息化等研究。电话: 025 - 84315612, E-mail: feishengwei@sohu.com。

收稿日期: 2005 - 05 - 23