

文章编号:1000-582X(2002)05-0101-03

汽轮发电机组故障诊断的节约覆盖集概率模型*

张彼德, 孙才新, 欧健, 胡雪松

(重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要:汽轮发电机组的振动故障具有多样性的特点,经常出现多种故障同时发生的情况。文中介绍了一种在节约覆盖集理论框架上集成概率推理的诊断模型,并在此基础上建立了汽轮发电机组振动多故障诊断的实用模型。以某汽轮发电机组的2类振动多故障为例验证了该方法的有效性。该模型能有效地识别出汽轮发电机组的多故障,弥补了专家系统和神经网络等诊断方法不能正确诊断多故障的不足,具有较高的诊断可靠性和实用性。

关键词:节约覆盖集理论;概率推理;汽轮发电机组;振动故障

中图分类号:TM311

文献标识码:A

汽轮发电机组的故障诊断是对各种征兆的原因作出解释的过程。对于诊断问题的求解已由过去仅能对单故障作诊断,发展到今天有可能对多故障的同时存在作诊断。但是,对于多故障的诊断问题,目前还未能很好的解决。原因是多方面的,第一,系统复杂,对于多故障的研究还不够深入;第二,在工程实际中,多机组同时运行,互相影响,多故障发生的机会增多,诊断分析更加困难;第三,诊断方法不够成熟。由于规则和知识库的限制,专家系统等人工智能方法对多故障的处理也显得力不从心,在神经网络诊断技术中,如果将各种多故障的组合作为训练样本,将使得网络规模非常庞大,网络的归纳、联想能力将大幅度下降,甚至完全失败^[1-3]。一般来说,对于诊断问题的求解,需要用到2类知识:一类是表示系统故障是如何引起各种征兆的因果知识,另一类是反映该因果知识成立的程度和可能性方面的知识。文中提出的基于节约覆盖集理论和概率推理的诊断模型,综合运用了这2类知识,从而使得该模型的可靠性和实用性得到了较大提高。

1 节约覆盖集理论

节约覆盖集理论是以因果知识为基础的。在节约覆盖集理论中,诊断问题的最简单形式可定义为一个四元组 $P = (D, M, C, M^+)$, 其中

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 故障的有限非空集;

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 征兆的有限非空集;

$C \subseteq D \times M$ 定义在 $D \times M$ 上的有序关系子集;

$M^+ \subseteq M$ 已知的征兆集合

符合 C 代表故障和征兆之间的直接因果联系, $(d_i, m_j) \in C$ 表示 d_i 能够引起 m_j ; 对于 D, M 和 C , 可定义函数 $Causes$ 和 $Effects$ 。对于所有的 $m_j \in M$, $Causes(m_j) = \{d_i \mid (d_i, m_j) \in C\}$ 表示特征 m_j 可能引起的所有故障; 对于所有 $d_i \in D$, $Effects(d_i) = \{m_j \mid (d_i, m_j) \in C\}$ 表示可能引起 d_i 的所有特征。因此, 对于 $D_i \subseteq D$ 和 $M_j \subseteq M$, 如果 $M_j \subseteq Effects(D_i)$, 则故障集合 D_i 就是特征集合 M_j 的一个覆盖。在节约覆盖集理论中, 同时覆盖 M^+ 和满足节约原则的 D_i 称之为 M^+ 的一个解释。一个诊断问题的解是所有 M^+ 的解释的集合。最常用的节约原则包括最小模原则(M^+ 的解释包含了必须覆盖 M^+ 的最小故障数目)、非冗余原则(没有 D_i 的任何子集能够单独覆盖 M^+) 和相关性原则(M^+ 的解释 D_i 仅仅包括可能引起 M^+ 的故障)。在汽轮发电机组的振动故障诊断中, 一般选用非冗余原则^[4,5]。

3 节约覆盖集的概率模型

节约覆盖集理论提供了用因果关系解决诊断问题的基础。但是, 由于节约覆盖集理论仅仅用符号知识和节约原则来进行诊断推理, 而对每个解释没有明确的可能性表示, 这就可能导致对于同一个问题的解有大量不同的解释。把概率论与节约覆盖集理论相结合将

* 收稿日期: 2002-01-10

作者简介: 张彼德(1975-), 男, 河南唐河人, 重庆大学博士研究生, 主要从事电气设备在线监测及故障诊断研究。

克服这个问题并可能得到诊断问题的最佳解释。

3.1 定义和假设

令 $P = (D, M, C, M^+, M^-)$ 是一简单的诊断问题, $d_i \in D$ 为原因事件, $m_j \in M$ 为结果事件, 则定义:

a. 所有在诊断假设 D_i 中的故障均存在, 而其他故障均不存在。

b. 所有在已知存在的征兆 M^+ 中的征兆均存在, 而其它征兆均不存在。

c. 在已知 d_i 存在的情况下, d_i 能够引起 m_j ($m_j: d_i$ 发生) 的概率为 $P(m_j: d_i | d_i)$ 。

并同时假设:

a. 对所有的原因事件(故障) $d_i \in D$, 它们的先验概率 $0 < P(d_i) < 1$ 已知。对所有因果事件 $m_j: d_i$, 它们的因果强度 $0 < P(m_j: d_i | d_i) < 1$ 已知, 且当 $(d_i: m_j) \in C$ 时, $P(m_j: d_i | d_i) > 0$, 否则 $P(m_j: d_i | d_i) = 0$ 。我们用 p_i 来表示 $P(d_i)$, 用 c_{ij} 表示 $P(m_j: d_i | d_i)$ 。

b. 一个原因事件(故障) $d_i \in D$ 独立于其他原因事件(故障) 而发生; 如果 $d_i \in D$ 发生, 总是引起 m_j 相同的因果强度 c_{ij} , 与任何其他因果事件和原因事件无关; 任何结果事件(征兆) 的发生都是由某些故障通过因果事件引起的。

3.2 概率计算

概率计算的目标是在给出已知征兆 M^+ 的情况下, 一个诊断假设 D_i 的似然值的计算问题。

由上述的定义和假设, 可得

$$P(m_j | D_i) = 1 - \prod_{d_k \in D_i} (1 - c_{kj}) \quad (1)$$

$$P(\overline{m_j} | D_i) = \prod_{d_k \in D_i} (1 - c_{kj}) \quad (2)$$

由(1)、(2)及因果独立性假设, 可得

$$P(M^+ | D_i) = \prod_{m_j \in M^+} P(m_j | D_i) \prod_{m_j \in M - M^+} P(\overline{m_j} | D_i) \quad (3)$$

根据故障独立性假设, 可得

$$P(D_i) = \prod_{d_i \in D_i} p_i \prod_{d_k \in D - D_i} (1 - p_k) = \prod_{d_i \in D_i} \frac{p_i}{1 - p_i} \prod_{d_k \in D} (1 - p_k) \quad (4)$$

根据 Bayes 公式

$$P(D_i | M^+) = \frac{P(M^+ | D_i) P(D_i)}{P(M^+)} \quad (5)$$

将(1)、(2)代入(3), 再将(3)、(4)代入(5), 可得

$$P(D_i | M^+) = \prod_{m_j \in M^+} [1 - \prod_{d_i \in D_i} (1 - c_{ij})] \prod_{d_i \in D_i} \prod_{m_j \in M - M^+} (1 - c_{ij}) \cdot \prod_{d_i \in D_i} \frac{p_i}{1 - p_i} \prod_{d_k \in D} (1 - p_k) \frac{1}{P(M^+)} \quad (6)$$

对于给定的 M^+ , $\prod_{d_i \in D_i} (1 - p_k) \frac{1}{P(M^+)}$ 为一常数, 从(6)

式中去掉该常数项, 可得到以下的 D_i 的相对似然函数

$$L(D_i) = L_1(D_i) \cdot L_2(D_i) \cdot L_3(D_i) \quad (7)$$

式中

$$L_1(D_i) = \prod_{m_j \in M^+} [1 - \prod_{d_i \in D_i} (1 - c_{ij})] \quad (8)$$

$$L_2(D_i) = \prod_{d_i \in D_i} \prod_{m_j \in M - M^+} (1 - c_{ij}) \quad (9)$$

$$L_3(D_i) = \prod_{d_i \in D_i} \frac{p_i}{1 - p_i} \quad (10)$$

$L_1(D_i)$ 反映了在给定 M^+ 的情况下, D_i 引起其存在的可能性。 $L_2(D_i)$ 反映了 D_i 多大可能引起 $M - M^+$ 中的征兆的不存在。 $L_3(D_i)$ 代表了由 D_i 的先验概率组成的加权。

3.3 最佳诊断解的求解步骤

最佳诊断解的求解步骤如下:

1) 利用已知存在的征兆集合 M^+ 以及征兆与故障的相互关系 C , 按照节约覆盖集理论得出所有可能的诊断解并形成诊断解的最佳搜索空间 D_p 。

2) 对于已知征兆集合 M^+ 、故障的先验概率 p_i 和征兆与故障间的因果强度 C , 利用式(7) 得出所有 $D_i \in D_p$ 的似然函数值, 并采用最大似然值原则求出最佳解。所谓最大似然原则就是: 对所有 $D_i \in D_p$, 若 $L(D_k) = \max_{D_i \in D_p} L(D_i)$, 则认为 D_k 为最佳诊断解。

3.4 汽轮发电机组故障诊断的统计模型

汽轮发电机组故障与征兆的相互关系如图 1 所示, 其中 d_1 到 d_6 表示的故障形式如表 1 所示。征兆集合 M 、故障集合 D , 先验概率 p_i , 故障与特征之间的因果强度 c_{ij} , 如表 1 所示。其中, 征兆集 m_1 到 m_8 是频谱中的 8 种特征频率, 分别代表 $(0.01 \sim 0.39)f$ (f 为汽轮发电机组旋转频率), $(0.40 \sim 0.49)f$, $0.50f$, $(0.51 \sim 0.99)f$, $1.0f$, $2.0f$, $(3.0 \sim 5.0)f$, $> 5.0f$ 。

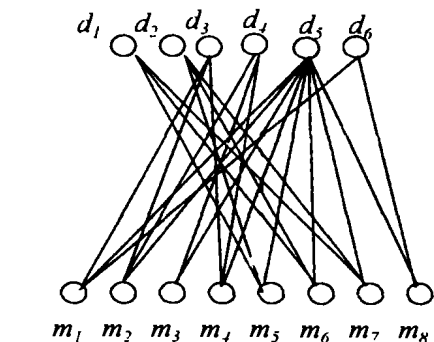


图 1 汽轮发电机组振动故障与征兆关系图

表 1 征兆集 M 、故障集 D 和因果关系 C 列表^[6]

故障集 D	先验概率 P_i	征兆集 M							
		m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8
不平衡 d_1	0.30					0.90	0.05	0.05	
不对中 d_2	0.50					0.40	0.50	0.10	
油膜振荡 d_3	0.02	0.10	0.80		0.10				
汽流激振 d_4	0.02		0.30	0.10	0.60				
转子碰摩 d_5	0.04	0.10	0.05	0.05	0.10	0.30	0.10	0.10	0.20
轴承座松动 d_6	0.10	0.90							0.10
其它	0.02								

4 诊断实例

为检验上述模型的正确性,下面进行实例分析。

例 1 在对某电厂的汽轮发电机组进行分析时,发现其在 $(0.40 \sim 0.49)f, 1.0f, 2.0f, (3.0 \sim 5.0)f$ 处的幅值均偏大,即可认为征兆 m_2, m_5, m_6, m_7 均已出现。根据上一节的诊断模型,可知 $M^* = (m_2, m_5, m_6, m_7)$ 。在用节约覆盖集理论求诊断解时采用非冗余覆盖原则,求最佳解时采用最大似然值原则。 M^* 的非冗余覆盖集有 $\{d_1, d_3\}, \{d_2, d_3\}, \{d_1, d_4\}, \{d_2, d_4\}, \{d_5\}$,其相对似然值计算如下:

$$L_1(\{d_1, d_3\}) = [1 - (1 - C_{32})] \times [1 - (1 - C_{15})] \times [1 - (1 - C_{16})] \times [1 - (1 - C_{17})] = 0.0018$$

$$L_2(\{d_1, d_3\}) = (1 - C_{31})(1 - C_{34}) = 0.8100$$

$$L_3(\{d_1, d_3\}) = \frac{P_1}{1 - P_1} \cdot \frac{P_3}{1 - P_3} = 0.01785714$$

$$L(\{d_1, d_3\}) = 0.000012752$$

同理可得

$$L(\{d_2, d_3\}) = 0.000264489$$

$$L(\{d_1, d_4\}) = 0.000002125$$

$$L(\{d_2, d_4\}) = 0.00004408$$

$$L(\{d_5\}) = 0.000003847$$

很显然, $L(\{d_2, d_3\})$ 最大,按最大似然原则,诊断问题的最佳解为 $\{d_2, d_3\}$,即不对中故障和油膜振荡故障。实际验证诊断结果正确。

例 2 另一次分析中,发现 m_2, m_4, m_8 高于正常值,故设 $M^* = (m_2, m_4, m_8)$,根据节约覆盖集理论, M^* 的非冗余覆盖集有 $\{d_3, d_6\}, \{d_4, d_6\}$ 和 $\{d_5\}$ 。其似然值计算如下:

$$L(\{d_3, d_6\}) = 0.00000163$$

$$L(\{d_4, d_6\}) = 0.00000367$$

$$L(\{d_5\}) = 0.0000202$$

很显然, $L(\{d_5\})$ 最大,按最大似然原则,诊断问题的最佳解为 $\{d_5\}$,即汽轮发电机组出现了转子碰摩

故障。实际验证诊断结果正确。

从以上 2 个例子的分析可以看出:文中提出的汽轮发电机组的振动多故障诊断模型是合理、有效的,有一定的实用性。

5 小结

文中提出了用在节约覆盖集理论框架上集成概率推理的方法来解决汽轮发电机组的振动多故障诊断问题,并在此基础上建立了汽轮发电机组振动多故障诊断模型。该方法实现了符号推理和概率推理的结合,具有较高的诊断可靠性和实用性。在实际应用中,应注意以下几点:

- 1) 一定要把握好征兆出现的标准,即征兆值达到什么限度才认为其出现,这是诊断成败与否的关键因素之一;
- 2) 鉴于汽轮发电机组振动故障诊断的复杂性,在应用节约覆盖集理论时,究竟选择哪一种节约原则效果最好,尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 张玉祥,张炜,战任军,等. 汽轮发电机组并发故障的诊断[J]. 汽轮机技术,1997,39(1):17-22.
- [2] 王志鹏,孙惠国,时斌. 故障诊断的多层神经网络研究[J]. 郑州工业大学学报,1998,19(2):20-23.
- [3] 李化,孙才新,胡雪松,等. 汽轮发电机组振动故障诊断的模糊输入法[J]. 重庆大学学报(自然科学版),1999,22(6):36-40.
- [4] YUAN PENG, JAMES A R. A probabilistic causal model for diagnostic problem solving part I: integrating symbolic causal inference with numeric probabilistic inference[J]. SMC,1987,17(2):146.
- [5] YUAN PENG, JAMES A R. A probabilistic causal model for diagnostic problem solving part II: diagnostic strategy[J]. SMC, 1987, 17(3):395.
- [6] 陈长征,刘强. 概率因果网络在汽轮机故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报,2001,21(3):78-81.

图 5 分别为油罐罐体实体造型、装配体模型和受力分析情况。

采用集成 CAD/CAE/CAM 软件对装备进行集成研究,可以从三维实体造型、预装配及强度等方面进行全面的分析,实现并行设计。在设计阶段发现并解决问题,提高设计效率和一次成功率,实现产品的最优化。

4 结 论

并行工程作为一种新的设计理念和设计方法应用于产品开发,能产生明显的效益。它借助于先进的建模与仿真技术,来预测所设计产品的未来,乃至它的整个生命周期。根据大量统计调查,应用并行设计方法,产品设计周期可减少 1/2 ~ 1/3,将并行设计方法引入新型油料装备的开发中会极大地加快油料装备的更

新换代速度,提高其保障水平。

参考文献:

- [1] WINNER R I. The Role of Concurrent Engineering in Weapon System Acquisition[R]. IDA Report R - 388, 1988.
- [2] 刘振志. 军用油料装备[M]. 北京: 解放军出版社. 2001.
- [3] 熊光楞, 范文慧, 张和明, 等. 案例分析: 铁路货车产品开发并行工程[N]. 计算机世界报, 2001 - 04 - 12.
- [4] 窦万峰, 詹永照, 谢立. 面向并行工程的协同设计系统研究[J]. 机械设计, 2000, (1): 1 - 5.
- [5] 李伟青, 王春洁. 基于并行工程的汽车部件 CAD 系统[J]. 新技术新工艺, 2000, (10): 9 - 10.
- [6] 陈永光, 瞿德刚, 张毅, 等. 车载式运油罐计算机辅助集成设计分析研究. 计算机应用研究, 2001, (增刊): 334.

Concurrent Design of the Petroleum Equipment CAD System

CHEN Xu¹, CHEN Yong-guang², LI Xiao-hong¹, LIU Jia-min¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. Logistical Engineering University, Chongqing 400016)

Abstract: Military petroleum equipment is one of main logistical equipment. The characteristics and organization of the petroleum equipment are analyzed and the design flow chart and concurrent design frame of the petroleum equipment CAD system is built up. The CAD system includes three subsystems, which are engineering subsystem, management subsystem and supporting environmental system. A solid model, assembly structure and strength of oil tank in vehicle are analyzed by integrated CAD/CAE/CAM software I - DEAS. Through concurrent design environment, design efficiency and quality of petroleum equipment are greatly improved.

Key words: petroleum equipment; concurrent engineering; computer aided design

(责任编辑 张小强)

(上接第 103 页)

Parsimonious Covering Probability Model for Turbogenerator Vibration Faulty Diagnosis

ZHANG Bi-de, SUN Cai-xin, OU Jian, HU Xue-song

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, 400044)

Abstract: The turbogenerator vibration faults have the character of variety. Many faults often occur synchronously. This paper introduces a diagnosing model based on parsimonious covering theory and probability. A model for turtogenerator's fault diagnosis is proposed. The availability of this method is proved by two fault diagnosis examples of turbogenerator. The results show that the model proposed can be used for multi-fault diagnosis together. It may make up shortage for some of expert systems and neural networks in some aspect. From the practice, this model has higher reliability and practicability.

Key words: parsimonious covering theory; probability inference; turbogenerator; vibration fault

(责任编辑 陈移峰)