

案例推理在汽轮发电机组故障诊断中的应用

(华北电力科学研究院 英华达公司, 北京 100045) 阮 跃

摘要: 根据故障诊断的特点, 提出了规范化的案例组织和表示方法。将案例征兆分为确定性必要征兆和其它征兆, 提出了基于确定性和模糊加权相结合的案例检索策略, 并对相似度的计算进行了修正, 提高了案例推理的可靠性。

关键词: 案例推理; 故障诊断; 汽轮发电机组

中图分类号: TP277 文献标识码: A

1 引言

汽轮发电机组故障虽然具有多样性和复杂性, 但同时也具有一定的规律。在进行故障诊断时, 现场专家往往根据几个重要特征参数就能作出较准确的判断。这是因为专家是利用处理遇到过的类似事故的成功经验和失败教训来解决问题的。案例推理就是使用以前解决类似问题的经验进行推理, 是人工智能中一种新的推理技术。目前常用的基于规则和人工神经网络的智能诊断方法存在某些不足, 如知识获取非常困难, 系统对求解超出范围的问题无能为力, 诊断推理过程比较抽象, 不容易理解等。而基于案例的诊断推理需要检索的是现场发生的故障案例, 大大减少了从专家那里获取知识的必要, 比较容易建立; 在待诊断对象的故障与案例之间不完全匹配时也能给出相似的解; 诊断结果是具体的案例, 比较生动丰富, 能够反映故障的总体概貌, 容易理解接受等。因此, 案例推理应用于故障诊断, 为故障诊断提供了一条新途径, 对缺乏诊断经验的人员特别有参考价值。

2 案例的表示

案例的表示就是对故障的具体情况尽可能进行详细的描述, 以便获得故障完整的资料, 包括故障名称、故障经过、原因、特征和处理措施等, 如表 1 所示。

3 案例的组织

表 1 汽轮发电机组汽流激振故障案例之一

故障简述	某电厂 6 号机(200 MW) 1989 年 8 月初至 9 月底, 当机组负荷在 180 MW 以上时, 3 瓦出现阵发性振动 30 多次, 每次持续时间为数分钟到 2 小时不等, 垂直振动最大达 $70 \mu\text{m}$ 。经频谱分析, 2、3 瓦分别存在 23.5 和 24.8 Hz 的低频, 同时各轴承均有 2 倍频分量, 随着真空下降, 3 瓦振动增大, 在冷态盘车时有金属摩擦声。
故障原因	1 机组对中状况恶化, 使得各瓦负荷改变; 2 动静发生碰摩。
故障特征	1 低频分量接近高中压转子一阶临界转速; 2 机组存在 2 倍频分量; 3 振动与负荷有一定关系; 4 振动与真空有一定关系; 5 盘车时能听到金属摩擦声。
处理措施	1 抬高轴承标高, 调整动静间隙; 2 对轴系进行动平衡。

表 2 表 1 所示案例的组织形式

确定性必要征兆	设备型号 故障部位 机组状态	200 MW 机组 高中压转子 带负荷运行
其它征兆	振动频谱 趋势分析 振动与负荷的关系 振动与真空的关系 现场能听到的声音	低频和高倍频较大 振动不稳定 有关 有关 金属摩擦声

案例的组织是在案例表示的基础上, 根据案例的特征和检索的需要, 对案例进行整理和归类。利用故障诊断反问题研究结果, 根据故障存在的充分条件与必要条件, 将案例的征兆分为确定性必要征兆和其它征兆。所谓确定性必要征兆是指与该案例相似故障必不可少的且能用肯定或否定逻辑关系表示的征兆。其它征兆可进一步分为确定性不必要征兆和不确定性征兆。确定性不必要征兆是指能用肯定或否定逻辑关系表示的征兆, 但其出现只对相似度起增强作用, 并不是必须的; 不确定性征兆是指不能用简单的肯定或否定逻辑关系表示的征兆, 需要用模糊关系或其它表示方法。表 2 为表 1 所示案例的组织形式。

4 案例的检索

案例推理是通过访问案例库中过去同类问题的求解从而获得当前问题解决的一种推理模式,显然,如何高速、有效地完成案例的检索是十分重要的,对案例推理的效率有很大的影响。目前,案例的检索策略通常有最近相邻策略、归纳推理策略和知识引导策略等,每种检索策略都有自己的优缺点,实际系统中一般使用组合检索策略。在我们研制的汽轮发电机组故障诊断系统中,根据案例的组织形式采用了如下的案例检索策略。

(1) 获取待诊断故障的征兆,计算或给定征兆的可信度。对于确定性必要征兆采用归纳方法,用简单的肯定或否定方式进行判别,如果有一条不符合,则表示待诊断故障与案例不相似,这样能够很快地排除某些案例。

(2) 对于其它征兆采用模糊方法,计算征兆的相似度。

$$D_s(Ei', Ei) = 1 - |CF(Ei') - CF(Ei)| \quad (1)$$

($i = 1, 2, \dots, N$)

式中 $CF(Ei')$, $CF(Ei)$ —待诊断故障 c' 与相匹配的案例 c 中第 i 个征兆的可信度

N —案例 c 中其它征兆的数目

$D_s(Ei', Ei)$ —待诊断故障 c' 与相匹配的案例 c 中第 i 个征兆的相似度

(3) 然后根据不同征兆的权值计算故障与案例的相似度。

$$D_s(c', c) = \sum_{i=1}^N W_i D_s(Ei', Ei) \quad (2)$$

式中 $D_s(c', c)$ 为待诊断故障 c' 与相匹配的案例 c 的相似度

W_i —案例 c 中第 i 个其它征兆的权重因子,且

$$\sum_{i=1}^N W_i = 1.0$$

将式(1)代入式(2),可得

$$D_s(c', c) = 1 - \sum_{i=1}^N W_i |CF(Ei') - CF(Ei)| \quad (3)$$

($i = 1, 2, \dots, N$)

当 $D_s(c', c) = 1$ 时,表示待诊断故障 c' 与案例 c 完全相似,当 $D_s(c', c) = 0$ 时,表示待诊断故障 c' 与案例 c 完全不相似。

4. 案例库检索完毕后,按相似度的大小或某个阈值(如大于 0.3)列出几个最相似的案例作为输出结果。

5 相似度分析和算法探讨

由于不知道待诊断故障 c' 与案例 c 中具有相

似性的其它征兆的数目,不妨设待诊断故障 c' 中其它征兆的数目为 M , 案例 c 中其它征兆的数目为 N , 待诊断故障 c' 与案例 c 中具有相似性的其它征兆的数目为 K , 总有:

$$K \leq \min(M, N)$$

当 $K = M, K \leq N$ 时,表示待诊断故障 c' 中其它征兆都能在案例 c 中找到相似的其它征兆,这可能是案例 c 包含了待诊断故障 c' 。当 $K = N, K \leq M$ 时,表示案例 c 中其它征兆都与待诊断故障 c' 中其它征兆相似,这可能是案例 c 包含在待诊断故障 c' 中。同样,对于确定性必要征兆也有类似的关系,只是在待诊断故障 c' 中确定性必要征兆比案例 c 中相似的确定性必要征兆少时,匹配失败。因此,当征兆数目相差较大、相似征兆较少时,应对相似度进行具体分析,防止发生表面不相似而实际上相似或者表面相似而实际上不同的现象。

根据以上分析,式(1)和式(2)可以改写为:

$$D_s(Ei', Ei) = 1 - |CF(Ei') - CF(Ei)| \quad (4)$$

($i = 1, 2, \dots, K$)

$$D_s(c', c) = \sum_{i=1}^K W_i D_s(Ei', Ei) \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),可得

$$D_s(c', c) = \sum_{i=1}^K W_i - \sum_{i=1}^K W_i |CF(Ei') - CF(Ei)| \quad (6)$$

($i = 1, 2, \dots, K$)

由式(4)和式(5)或式(6)可以看出,当待诊断故障 c' 与案例 c 中相同征兆的可信度均为 0 时,征兆和案例的相似度均为 1,这显然是错误的。这是因为当征兆可信度为 0 或很小时,其征兆本身是不可靠的,必然导致一个错误的结论。因此,在案例匹配过程中,应对相似度的计算进行必要的修正,这可以通过加入修正因子 β_i 实现。为简化计算,根据经验可设

$$\beta_i = \begin{cases} 1.667 \times \min(CF(Ei'), CF(Ei)) \\ \min(CF(Ei'), CF(Ei)) < 0.6 \\ 1 & 0.6 \leq \min(CF(Ei'), CF(Ei)) \\ \leq 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

这时式(4)应为

$$D_s(Ei', Ei) = \beta_i (1 - |CF(Ei') - CF(Ei)|) \quad (8)$$

($i = 1, 2, \dots, K$)

将式(8)代入式(5),可得

$$D_s(c', c) = \sum_{i=1}^K W_i \beta_i - \sum_{i=1}^K W_i \beta_i |CF(Ei') - CF(Ei)| \quad (9)$$

($i = 1, 2, \dots, K$)

利用式(7)和式(8)可以计算出征兆的相似度,利用

式(5)或式(9)可以计算出故障与案例的相似度。

6 案例的学习

初始案例库中的案例是有限的,需要在诊断过程中不断地形成新的案例加入案例库中,以便积累诊断经验。由于故障的发生具有一定的规律,待诊断故障可能与案例库中的案例完全相同或基本相似,如果都加到案例库中,必然会使案例库越来越庞大,因此必须对加到案例库中的案例进行学习。通常案例学习的策略有:若案例库中没有该案例,则加入该案例;若该案例与案例库中所有案例的相似度均小于某个给定的值(如 0.8),则加入该案例;对案例库中已存在的案例,若为频繁使用的案例则不替换,否则以新的案例替换旧的案例等。

综上所述,一个完整的基于案例推理的故障诊断过程如图 1 所示。



图 1 基于案例推理的故障诊断框图

通过对故障进行详细描述形成案例库,通过检索器将待诊断故障与案例库中的案例进行匹配,得到与待诊断故障相同或相近的案例,供现场人员决策参考。通过对当前待诊断故障的学习,决定是否将其加入到案例库中。

7 诊断示例

某电厂 20 万机组 1984 年 12 月 21 日锅炉临检后启动并网,在负荷为 195 MW 时,2 号轴承出现强烈振动。将负荷减至 180 MW 时,通频振动为 80 ~ 100 μm ,负荷减至 128 MW 时,振动降为 20 μm ,重新加负荷至 150 MW 时,2 瓦振动又剧增为 70 ~ 80 μm ,振动波形呈 25 ~ 30 Hz,且 1、3、4 瓦振动均为 48 ~ 68 μm ,当负荷降到 110 MW 时,振荡现象消失,打闸停机。其后采取若干措施多次启动,运行中 2 瓦出现较大的 3 倍频,4 瓦振动不稳定,停机过程中,当

负荷滑至 172 ~ 162 MW 时,2 瓦又一次出现振荡现象,半小时后消失,当负荷降至 143 MW 时,振荡现象又出现,约十分钟后消失。经过整理分析,该待诊断故障的组织形式如表 3 所示。

表 3 待诊断故障的组织形式

确定性 必要征兆	设备型号 故障部位 机组状态	200 MW 机组 高中压转子 带负荷运行
其 它 征 兆	振动频谱 趋势分析 振动与负荷的关系 振动随负荷变化	低频和高倍频较大 振动不稳定 有关 具有再现性

比较表 3 与表 2 可知,待诊断故障 c' 与给定案例 c 中确定性必要征兆都满足逻辑条件,且 $M = 4$, $N = 5$, $K = 3$,即在其它征兆中有三个相似,设 $CF(E1') = 0.75$, $CF(E1) = 0.85$, $CF(E2') = 0.85$, $CF(E2) = 0.90$, $CF(E3') = 0.65$, $CF(E3) = 0.45$, $w_1 = 0.30$, $w_2 = 0.20$, $w_3 = 0.30$, $w_4 = 0.10$, $w_5 = 0.10$,则由式(7)和式(8)得到征兆的相似度

$$\beta_1 = 1$$

$$D_s(E1', E1) = 1 - |0.75 - 0.85| = 0.90$$

$$\beta_2 = 1$$

$$D_s(E2', E2) = 1 - |0.85 - 0.90| = 0.95$$

$$\beta_3 = 1.667 \times \text{MIN}(0.65, 0.45) = 0.75$$

$$D_s(E3', E3) = 0.75 \times (1 - |0.65 - 0.45|) = 0.60$$

由式(5)得到故障与案例的相似度

$$D_s(c', c) = 0.30 \times 0.90 + 0.20 \times 0.95 + 0.30 \times 0.60 = 0.64$$

假设在已有的案例库中上述计算得到的相似度为最大,与其它案例的相似度均小于此值,因此可诊断为汽流激振故障,并且由于它小于给定的阈值(0.64 < 0.8),所以应将此故障加入案例库中。

参考文献

[1] 阮跃. 振动故障诊断的反问题研究. 华北电力技术, 1998 (7): 9 ~ 14.
 [2] 耿卫东, 潘云鹤, 何志均. 基于事例的设计推理研究. 计算机科学 1993, 20(4): 36 ~ 39.

(何静芳 编辑)

(上接 286 页)

硫煤的锅炉,使一次风在炉膛中心处充分燃烧、二次风气流在靠近炉膛水冷壁的区域形成较强的氧化性气氛以达到降低水冷壁附近还原性气氛和避免烟气直接冲刷水冷壁两个目的,从而在根本上解决双炉膛直流锅炉烟气侧水冷壁高温腐蚀问题。

参考文献

[1] 陈永保, 金代立. 1 000 t/h 直流锅炉水冷壁事故分析. 华东电力, 1989, (3).
 [2] 周力行. 湍流气固两相流动和燃烧的理论及数值模拟. 北京: 科学出版社, 1994.

(渠 源 编辑)

汽轮机调节系统故障诊断系统 = **Failure Diagnosis System for a Steam Turbine Regulating System** [刊, 汉] / Bao Wen, Yu Daren, Li Wenzhu, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 298 ~ 300

With the help of the failure diagnosis system of a steam turbine regulating system it is possible to record the variation trend of the key parameters of the said system. The realization of such functions as the on-line calculation of steam turbine static characteristics, the detection of pilot valve stuck status and the regulating system oscillation failure diagnosis can result in a significant enhancement of the operating safety of the regulating system. Moreover, the above also plays a positive role in the preventive maintenance and repair of the regulating system. **Key words:** steam turbine, regulating system, failure diagnosis

案例推理在汽轮发电机组故障诊断中的应用 = **The Application of Case-based Reasoning in the Failure Diagnosis of Turbogenerator Units** [刊, 汉] / Ruan Yue (Envada Co. of Northern China Electric Power Research Institute, Beijing, China, Post Code 100045) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 301 ~ 303

On the basis of the specific features of a failure diagnosis the author has standardized the method of organization and representation of cases. The symptoms of a case are divided into essential symptoms of certainty and other symptoms. Based on the certainty and fuzzy weight a retrieval strategy of cases is proposed. Moreover, a correction was performed regarding the calculation of similarity degree, thereby enhancing the reliability of case-based reasoning. **Key words:** case-based reasoning, failure diagnosis, turbogenerator unit

惯性浓淡旋流燃烧器的原理及其在 50 t/h 锅炉上的应用 = **The Theory of an Inertial Bias Swirl Burner and Its Application on a 50 t/h Boiler** [刊, 汉] / Li Zhengqi, Sun Rui, Wang Lei, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 304 ~ 305, 308

On the basis of pulverized-coal swirl burners of a radial bias combustion mode this paper proposes a new type of burner, the so-called inertial bias combustion (IBC) swirl burner. In such a burner a pulverized-coal concentrator located near the burner nozzle has been incorporated in a primary air passage. After the primary air has been admitted through the pulverized-coal concentrator there will emerge from the burner center outward a distribution trend of pulverized-coal concentration ranging from a high to a low value. Thanks to the inertia of the pulverized-coal particles such a distribution trend can be maintained right up to the burner outlet. A layout of the burners pertaining to a pulverized bituminous coal-fired boiler of 59 t/h is presented with a brief account being given concerning the pre-modification operating conditions. **Key words:** boiler, swirl burner, pulverized-coal bias combustion

新型旋流燃烧技术应用与漳泽电厂 210 MW 机组锅炉低负荷改造 = **Novel Swirl Burners and Their Application at Zhuangze Power Station for the Low-load Stable Combustion of Boilers of a 210 MW Unit** [刊, 汉] / Tan Houzhang, An Enke, Hui Shien, *et al* (Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi, China, Post Code 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 306 ~ 308

Novel axial-blade swirl burners were put into use at Zhuangze Power Station in connection with the technical modification of boilers No. 3-6 (4 units) of a 210 MW unit. As a result, problems specific to original burners, such as combustion instability and loss of flame, etc have been solved. Moreover, attained are a flexible regulation of secondary air swirl intensity and the alleviation of wear in the primary air pipes. The switch to the new swirl burners has made it possible to realize a stable combustion of the 100 MW boilers at low loads (46% of full load) with no need for the use of fuel oil. **Key words:** swirl burner, boiler modification, low load

无旁通烟道燃气—蒸汽联合循环机组的运行维护和停运 = **The Operation, Maintenance and Shutdown of a Gas and Steam Turbine Combined Cycle Power Plant not Fitted with a Bypass Stack** [刊, 汉] / Yao Tingsheng,