

旋转机械振动故障的模糊诊断

阮 跃 徐世昌
(哈尔滨工业大学)

[摘要] 在分析了旋转机械振动故障诊断存在的困难之后,建立了故障机理研究和故障诊断的数学模型。根据征兆对故障的肯定和否定程度,提出了故障诊断的模糊筛选矩阵,实现了对复杂故障的诊断。

关键词 振动故障 模糊诊断 数学模型 旋转机械

分类号 TH17 O159

0 引言

旋转机械振动故障的诊断方法发展得比较完善,目前使用较多的是模糊诊断方法和人工智能专家系统诊断方法,它们都需要对故障的因果关系进行正确分析。对于单一类型的振动故障,可以根据机理分析,找出该故障发生时的各种振动特征,这是从已知故障到征兆,由因求果的研究方法,是正问题。而在诊断故障时,人们根据所获得的各种振动特征,去反推可能是何种故障,这是从已知征兆到故障,由果求因的研究方法,是反问题。通常求解反问题比正问题更加困难,这是由于故障与征兆之间并不存在一一对应的关系,一个故障可能对应若干征兆,而一个征兆可能对应若干故障。同时,由于设备类型、制造、安装、运行等差别,同一故障呈现的征兆不完全相同,难以用某种确定的模式作为比较、鉴别的标准。此外,设备可能同时存在若干故障,从而使多故障与多征兆之间表现出复杂的现象。

1 正问题的数学模型

设故障的原因集合为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 征兆集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 建立由故障原因到故障征兆的模糊关系矩阵 R_1

$$R_1 = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{21} & \cdots & e_{n1} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ e_{1m} & e_{2m} & \cdots & e_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $e_{ij} (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m)$ 表示征兆 v_i 与故障原因 u_j 的相关系数,它是根据故障机理研究和统计分析确定的。

假设已知故障的原因集合的隶属度为 $A = [a_1 \ a_2 \ \cdots \ a_m]$, 利用模糊关系矩阵 R_1 和模糊向量 A 作模糊变换,得到模糊向量 C

$$C = A \cdot R_1 = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_n] \quad (2)$$

其中 $c_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示故障征兆 v_i 出现的隶属度。

2 反问题的数学模型

同样设故障的原因集合为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, 征兆集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 建立由故障征兆到故障原因的模糊关系矩阵 R_2

$$R_2 = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{m1} & f_{m2} & \dots & f_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 $f_{ij} (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$ 表示故障原因 u_i 与征兆 v_j 与的相关系数, 它是根据统计分析和专家经验确定的

在振动故障的模糊诊断中, 计算征兆的隶属度经常用升半哥西分布, 经过简化, 其一般形式为

$$\mu_x = \frac{Kx^2}{1 + Kx^2} \quad (4)$$

其中 x 为某征兆的大小, K 为常数。

假设由式 (4) 算得的待诊断故障的征兆集合的隶属度为 $B = [\mu_{v1} \ \mu_{v2} \ \dots \ \mu_{vn}]^T$, 利用模糊关系矩阵 R_2 和模糊向量 B 作模糊变换, 得到模糊向量 D

$$D = R_2 \cdot B = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_m]^T \quad (5)$$

其中 $d_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 表示故障原因 u_i 出现的隶属度

在目前的研究中, 正问题一般是从单一故障出发研究其对应的特征 (征兆), 因此适

用于设备只存在单一故障的情况; 反问题一般是从单一征兆出发研究其对应的故障, 因此适用于设备只表现单一征兆的情况 它们对设备同时存在多种故障和表现多个征兆的情况是不适用的, 而这种情况在旋转机械振动故障的诊断中是常见的 因此, 必须对设备所有可能出现的故障与所有表现的征兆之间的关系进行研究, 建立正确的故障诊断数学模型

3 模糊筛选矩阵

目前, 同时考虑所有故障与所有征兆之间的关系比较困难, 一般仅对特定待诊断对象的几种典型故障及其主要特征进行研究 在旋转机械复杂振动故障诊断中, 较多依据振动信号的频谱分析, 从频率上区分各种故障 例如, 对于国产 200 MW 汽轮发电机组, 不平衡振动以工频为主, 不对中时二倍频较大, 油膜振荡的频率接近发电机转子的一阶临界转速, 通常在 (17~ 21) Hz 范围内, 汽流激振的频率以 25 Hz 和 31 Hz (分别接近中、高压转子一阶临界转速) 左右的低频分量为主, 转子碰摩时则可能存在各种频率成分 表 1 是国产 200 MW 机组振动故障的模糊关系矩阵 R_2 , 它表示五种常见故障与七种特征频率的相关系数

表 1 国产 200 MW 机组振动故障的模糊关系矩阵 R_2

故障原因	0~ 15	15~ 22	22~ 35	35~ 49	49~ 51	98~ 102	> 102	(Hz)
不平衡					0.9	0.05	0.05	
不对中					0.3	0.7		
油膜振荡		0.9			0.1			
汽流激振			0.8		0.1		0.1	
转子碰摩	0.1	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	

在表 1 中, 模糊关系矩阵 R_2 是某故障对应的特征频率的大小, 是根据典型故障的统计分析和现场经验确定的, 从利用征兆诊断

故障的角度来说, 这是不够的, 因为从征兆出发去诊断故障, 要求明确的是某征兆存在与否对特定故障的肯定和否定程度 例如, 在其

它条件不变时,转子平衡状态恶化导致一倍频振动显著增大,二倍频振动略有增大,说明一倍频和二倍频成分增大对判断不平衡故障起肯定作用,前者较大,后者较小。在相同的平衡条件下,由于不对中,使一倍频和二倍频成分都有较大增长。因此,考虑不平衡和不对中两种故障与一倍频和二倍频两种征兆之间的关系,就会得出这样的结论:一倍频成分增大对判断不平衡故障有较强的肯定作用,对判断不对中故障有较弱的否定作用;二倍频成分增大对判断不对中故障有较强的肯定作用,对判断不平衡故障有较弱的否定作用,而不能简单地认为一倍频成分越大越不对中,二倍频成分越大越不平衡。因此,必须综合考虑各种征兆和各种故障之间的肯定与否定关系,建立反映征兆对故障的肯定或否定度量的模糊筛选矩阵 R

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中 r_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$) 表示征兆 v_j 对故障原因 u_i 的肯定或否定程度。表 2 为根据以上分析和经验得到的国产 200 MW 机组振动故障的模糊筛选矩阵 R ,其中正值表示征兆对故障的肯定程度,负值表示征兆对故障的否定程度,空格为零,表示征兆出现与否对诊断故障没有影响。由表 2 与表 1 的比较可知,即使故障与征兆不直接相关, r_{ij} 也不一定为零,说明征兆在诊断该故障时通过其它故障发生间接影响,例如,(0~ 15) Hz 低频分量的存在通过转子碰摩故障对诊断不平衡故障起一定程度的否定作用。

表 2 国产 200 MW 机组振动故障的模糊筛选矩阵 R

故障原因	0~ 15	15~ 22	22~ 35	35~ 49	49~ 51	98~ 102	> 102	(Hz)
不平衡	- 0.1	- 0.1	- 0.1		1.0	- 0.1		
不对中	- 0.1	- 0.1			- 0.2	1.0		
油膜振荡	- 0.1	1.0		- 0.2				
汽流激振	- 0.2		1.0	- 0.2				
转子碰摩	1.0	0.3	0.3	1.0			0.2	

模糊筛选矩阵 R 确定后,可以建立振动故障模糊诊断的数学模型

$$D = R \cdot B = [d_1 \quad d_2 \quad \cdots \quad d_m]^T \quad (7)$$

并有

$$d_i = \begin{cases} 0, & d_i < 0 \\ 1, & d_i > 1 \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

利用式 (7) 和式 (8),可以从振动频谱上实现对复杂振动故障的诊断。如果进一步考虑到设备运行工况和趋势分析等因素,则能使振动故障得到更准确的诊断。

需要指出,模糊筛选矩阵 R 的提出不仅为正确求解故障诊断问题提供了有效途径,而且对于理解故障诊断的实质具有重要意义。

义。但 R 的确定和使用条件,它与 R_1 和 R_2 的关系,模糊诊断方法与专家系统诊断方法的关系等有待进一步研究。

参考文献

- 1 邵成勋,黄文虎,须根法.模糊数学方法在汽轮机振动故障诊断中的应用,机械设备故障诊断技术国际学术会议(CSM DT' 86)论文集,沈阳:1986
- 2 李录平.汽轮发电机组振动故障诊断.热能动力工程,1993(4)
- 3 黄文虎,夏松波,刘瑞岩.设备故障诊断原理、技术及应用.科学出版社,1996

作者简介 阮跃,男,1965年生,1987年毕业于湖南大学,获学士学位,1994年毕业于哈尔滨工业大学,获硕士学位,现为哈尔滨工业大学一般力学专业博士研究生,从事旋转机械状态监测和故障诊断专家

系统的研究工作。 通讯处 150001 哈尔滨工业大学 137信箱

(辉 编)

发展动态 我国将限制小型火电站

据 1997年 9月 2日 ~ 27日“China Daily Business Weekly(中国日报业务周刊)”报道,我国正试图限制发展小型火电站。

我国小型火电站的单机容量通常低于 100000kW。在国家政策指引下,地方政府积极创办小型火电站,因为他们可以通过规定高电价得到收益。

截至 1996年,小型火电站装机容量达到 75.5×10^6 kW,占国家总装机容量的 32%。

电力工业部副部长查开明(音译)说:小型火电站在缓和国家电力供应危机中起了极为重要的作用。

但是,小型火电站正成为低效率的,并且现在增加了大型火电和跨省电网的建设。

小型火电站比大型火电站消耗更多的煤。它们生产 1000kW·h 电力要消耗 505kg 煤,比大型机组的多 142kg。小型火电站比大电站排放更多的 SO₂和污染物,大大加剧了中国的污染问题。

小火电站高的成本导致高的电价。

查开明说,鉴于它们阻碍电力工业的持续发展,电力工业部开始限制小型火电站。

国家计委交通和能源部门官员王军(音译)说:国家应该改革过时的电力价格制度,以便消除小型火电站的温床。

按照九五(1996~2000年)计划,新建火电站的单机容量必须超过 300000 kW。

(思娟 供稿)

新春快乐!

discusses the design philosophy of the modification scheme and proposes a new type of high-temperature boiler flue gas tube construction. **Key words** high-temperature boiler flue gas tube, failure analysis, structural design

模糊自组织神经网络在汽轮机转子故障诊断中的应用 = (Application of Fuzzy Self-organizing Neural Networks in a Steam Turbine Rotor Fault Diagnosis) [刊, 中] / Wang Jian, Jiang Dongxiang, Ni Weidou (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 43- 45

In the light of the problems involved in a steam turbine rotor fault diagnosis proposed in this paper is a new diagnostic method based on a fuzzy self-organizing neural network. The proposed method features a simple structural algorithm, supervision-free self-study and lateral thought association, etc. This highly effective method for turbine rotor failure classification has been verified in the course of its practical use. **Key words** steam turbine rotor, failure diagnosis, fuzzy mathematics, neural network

能源及化工过程中的事故仿真 = (Failure Simulation in Energy Sources and Chemical Engineering Processes) [刊, 中] / Xiao Lichuan, Xue Guoxin (Jiangsu Petrochemical Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1). - 46- 48

After a discussion of the universal method for failure setting in energy sources and chemical engineering processes the authors come up with a transitional general function for the interface of failure status and normal operating condition. A generally applicable form of failure occurrence and an exit from ascertainment criteria are also given. Furthermore, other details concerning the failure entering form and its succession have been taken into account. **Key words** failure, simulation, transitional general function, failure ascertainment, failure succession

炉内冷态流场数值模拟算法讨论及验证 = (A Discussion and Verification of the Numerical Simulation of a Cold-state Flow Field in a Boiler) [刊, 中] / Sun Ping, Fan Jianren, Cen Kefa (Zhejiang University), Xie Hailong (Northeast Electrical Power Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(1) - 49- 52

Studied in this paper are some convergence promotion methods for the simulation of flow fields in a boiler furnace by the use of a Simpler method and the specific features of Quicke scheme. Heating surfaces in the furnace are treated through the use of multi-hole rate in conjunction with resistance distribution. The calculated results agree well with experimental ones. **Key words** simulation of flow field, Quicke scheme, multi-hole rate

旋转机械振动故障的模糊诊断 = (Fuzzy Diagnosis of Rotating Machinery Vibration Faults) [刊, 中] / Ruan Yue, Xu Shichang (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. 01998, 13(1). - 53- 56

After making an analysis of the existing difficulties in the failure analysis of rotating machinery vibration failures this paper presents a mathematical model for conducting failure mechanism study and failure diagnosis. On the basis of symptoms asserting a positive and negative trend of the vibration failures proposed is a fuzzy recognition matrix of fault diagnosis with the realization of a complex failure diagnosis. **Key words** vibration failure, fuzzy diagnosis, mathematical model, rotating machinery

自然循环蒸发系统运行特性分析模型 = (A Model for Analysing the Operating Characteristics of a Natural Circulation Boiling System) [刊中] / Wang Guangjun, Li Hongyuan (Northeast Electrical Power Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power - 1998, 13(1). - 57- 60

Proceeding from a basic physical equation a distribution parameter model of natural circulation boiling system was established and a numerical calculation method based on a fluid microelement tracing philosophy also proposed. By using this model it is possible to not only conduct the static-state calculation of the boiling system