

# 往复式压缩机故障信息模糊二元树诊断方法研究

别锋锋\*, 郭正刚, 张志新, 李宏坤, 王奉涛

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 结合图论理论和局域波理论, 提出了一种基于模糊图的往复式压缩机故障诊断方法. 首先将往复式压缩机故障信号进行局域波时频处理, 根据系统的故障状态-特征表, 找出最大故障信息量特征群. 基于图论理论建立最大故障信息量模糊图, 通过对模糊图的分析, 找出可以进行匹配的路径信息量最大的部件. 该方法应用于某往复式压缩机故障诊断中, 具有一定的工程实用性.

**关键词:** 局域波; 故障诊断; 模糊二元树; 路径强度

**中图分类号:** TE65 **文献标志码:** A

## 0 引言

故障诊断过程可以看做一个模式识别过程. 识别系统在学习或训练过程中利用输入变量中的信息, 来降低识别过程的不确定性. 往复式压缩机振动信号包含着大量的故障特征和干扰信息, 具有强烈的非平稳、非线性. 目前针对往复机械的故障诊断, 包括人工诊断和智能诊断, 往往都只是局限于针对仿真信号的研究, 又或是参考来自书面特征表, 由此实现的大部分诊断方法对于往复式压缩机的实时故障诊断来说, 具有较大的不准确性和不成熟性<sup>[1]</sup>. 首先对振动信号所包含故障信息的全面提取无法保证; 其次, 由于往复压缩机的故障源和故障特征繁多, 现有的诊断方法难以保证其精确度<sup>[2,3]</sup>.

针对当前往复机械故障诊断领域在这几方面的盲点, 本文在对往复式压缩机具体结构与故障机理进行深入了解的基础上, 提出一种新型的故障诊断方法. 首先是应用局域波理论对实时监测信号进行分析, 以此分析结果作为整个模糊图故障诊断流程的首要基础.

## 1 局域波理论

局域波法是基于经验模式分解(EMD)发展而来的一种对非线性、非平稳信号进行分析的新

方法<sup>[4]</sup>. 它源于瞬时频率的概念, 能把动态信号的局部特征正确地在时频域内予以描述. 瞬时频率在研究瞬态和非平稳现象时非常重要, 能够反映非平稳信号的时变性, 对非平稳信号的研究有着广泛的前景. 局域波法把信号分解成满足条件的局域波分量, 对这些分量进行 Hilbert 变换就可以得到信号的瞬时频率和时频特征, 这也就是局域波时频分析方法.

通过对信号进行 EMD 分解, 把原始数据分解成  $n$  个局域波分量, 及一个剩余分量  $r_n$ , 该剩余分量或者是一个平均趋势或者是一个常数.

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (1)$$

式中:  $c_i$  表示第  $i$  个局域波分量;  $r_n$  表示分解剩余分量. 对每一个分量进行 Hilbert 变换, 可以把数据表示成下面的形式:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i\omega_j(t)t} \quad (2)$$

式中:  $a_j(t)$  表示瞬时幅值;  $\omega_j(t)$  则是瞬时频率.

把信号幅度在三维空间表示成时间和瞬时频率的函数, 也可以表示成时间-频率平面的等高线, 这种在时间-频率平面上的幅度分布称为局域波时频谱<sup>[5]</sup>.

局域波法可以有效地剔除实测信号中所包含的干扰因子, 同时局域波分量中包含着大量的状

收稿日期: 2006-07-10; 修回日期: 2008-02-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475155).

作者简介: 别锋锋\*(1979-), 男, 博士, E-mail: fengf721@sina.com.

态信息.通过分析局域波时频谱,从大量的实测信号中筛选出的故障特征信号所包含的故障信息可以被有效而又较为全面地提取出来,这有利于故障模糊图的建立.

## 2 故障模糊图

### 2.1 模糊图

模糊图实际上就是一个模糊关系,其相关理论可用于设备故障诊断<sup>[6]</sup>.当机组设备出现故障或故障趋势时,故障源要向各处传递故障信息,因而在监测点  $J$  就要接收到故障源的故障信息.假定设备由  $n$  个部件组成,在监测点  $J$  可接收的通过路径  $L_1, L_2, \dots, L_s$  传递来的各部件运行状态信息,其中必然包含故障源的信息.现假设  $C_i$  为故障源,  $J$  接收通过  $L_i$  传来的信息后,状态有所改变,即信息量最大,因此  $L_i$  为最强路径,由此可判定  $C_i$  为故障源.

一个模糊图  $G$  是一个有序三元组  $(G, \sigma, \mu)$ , 其中  $G = (V, E, \phi)$  是一个普通(无向、有限)图,  $\sigma$  是节点  $V$  到  $(0, 1)$  内的映射,并适合条件

$$\mu(e) \leq \sigma(x) \cap \sigma(y) \quad (3)$$

其中  $e \in E$  是边,  $x$  和  $y$  是边的端点,  $\phi$  为关联函数.

在模糊图  $G$  中,如由某终节点  $J(C_i)$  至源点  $J_0$  的路径强度最大,即

$$S(J_i, J_0) = \max\{S(L_i)\}, i = 1, 2, \dots, \infty$$

则该节点所代表的元部件是最可能导致系统故障的.式中  $S$  表示路径强度.

倘若出现几条路径强度相等时,可采用层次判断法,即去掉相等的一段路径后,再判断剩余相关强度大小,直到分出大小为止,其实现过程与前一步类同.

模糊图应用于设备故障诊断,其关键在于最大模糊故障信息量的特征群  $R$  的找寻.传统的状态-特征表的基础往往是单一的装备运行资料,抑或是其他统计方法,容易造成与实际工况不符.这里充分考虑机组过往病例,分析监测部位连续振动信号,从故障机理和表现综合进行研究,在工程应用上具有先天的优越性.

### 2.2 模糊信息熵

为了更好地建立模糊图(这里也称模糊故障二元树),需要引入模糊信息熵<sup>[7,8]</sup>,以更形象的方式来描述故障信息量.如下式

$$J_y(x_j) = -\frac{1}{\log_2 n} \sum_{j=1}^n h_A(x_j) \log_2 [h_A(x_j)] \quad (4)$$

式中  $A$  为特征  $x_j$  的模糊集,而

$$h_A(x_j) = \mu_A(x_j) / \sum_{j=1}^n \mu_A(x_j) \quad (5)$$

式中:  $n$  为系统状态个数;  $\mu_A(x_j)$  表示  $A$  对特征  $x_j$  的隶属度.

寻找最大模糊故障信息量的特征群  $R$  的过程,可以定性为寻找  $J_y(x_j) |_{\max}$  的过程.根据  $R$  作出模糊图,图中任意相邻两节点间的线段均表示模糊信息增量  $J_y(x_j(1))/\log_2 n$  或  $J_y(x_j(0))/\log_2 n$ .由此可以求出各路径强度及连通强度,继而确定机组故障源.

## 3 诊断分析

往复式压缩机组往往结构庞大而复杂,其中部件繁多,而每个部件都可能成为故障源,为系统提供故障信息.某部件对系统故障信息量贡献大,表明其状态不确定性大,因而故障可能性就大.通过信息量模糊图得出的路径信息量正是基于这点,有效地适应了往复式压缩机故障诊断过程中故障源多的特点.全部诊断流程如图1所示.

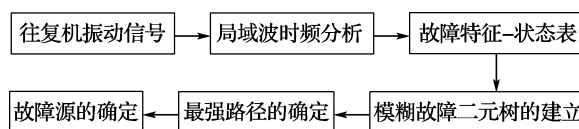


图1 诊断流程图

Fig. 1 Diagnosis process

具体实现步骤如下:

#### (1) 振动信号的局域波时频分析

以某化工厂大型重整加氢压缩机为例,连续监测高压端缸头振动,取其中较为典型的信号加以分析.图2为缸头振动原始信号;图3为信号局域波时频谱.

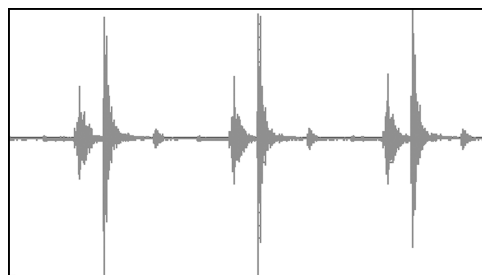


图2 原始振动信号

Fig. 2 Original vibration signal

从实测信号的局域波时频图中可以完整地得出被监测机组的实际工作状态. 各部件发生异常所产生的干扰在时频图中有充分的显示, 图中给出的信息涵盖了几近所有的参扰信息.

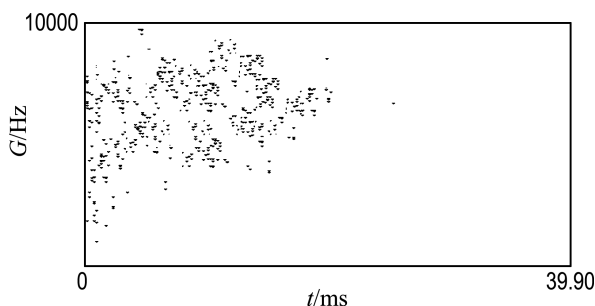


图3 实测信号局域波时频谱

Fig. 3 Local wave time-frequency spectrum of the signal

对比正常信号的差别作为输入量  $y_i$ , 而系统故障征兆  $x_i$  可以由故障史资料统计与分析得出, 由此得出系统故障状态-特征表.

## (2) 机组故障状态-特征表的实现

当系统处于故障状态  $y_i$  时, 具有特征  $x_i$  以“1”表示, 反之以“0”表示, 而  $y_i$  是否具有特征  $x_i$ , 是由与其相联系的部件  $C_i$  的输出信号确定的. 如果系统处于故障状态  $y_i$  时,  $C_i$  无正常输出信号, 则  $y_i$  具有特征  $x_i$ , 以“1”表示; 如果系统不处于故障状态  $y_i$  时,  $C_i$  有正常输出信号, 则  $y_i$  不具有特征  $x_i$ , 以“0”表示. 振动信号局域波时频谱中所显示的能量-频率关系在这里可以完整地加以应用. 考虑经验资料、统计资料和专家分析鉴定, 部件  $C_i$  在系统处于故障状态  $y_i$  时, 是否具有特征  $x_i$ , 在局域波时频谱中有明显的差别. 由此得出系

统故障状态-特征表见表1.

## (3) 作模糊图

根据诊断程序计算出最大故障特征群  $R = \{J_i\}, i = 0, 1, 2, \dots, n$ , 作出模糊故障信息二元树如图4. 相邻两节点即为模糊信息增量, 这里利用模糊信息熵计算值表示. 限于篇幅, 计算过程从略.

图4中,  $C_i (i = 1, 2, \dots, 19)$  为机组元部件编号. 通过模糊故障信息二元树计算程序可以计算出连通强度最大值:

$$S(J_i, J_0) = \max \{S(L_i)\} = 0.42$$

得出最强路径为  $J(C_3) \rightarrow J_{11} \rightarrow J_5 \rightarrow J_2 \rightarrow J_0$ , 由此可见元部件  $C_3$  是最可能的故障点. 该点在机组中具体为高压端一排气阀阀座, 这个结果和随后的往复式压缩机检修结果是一致的.

表1 故障状态-特征表

Tab. 1 State-character of the fault

| 特征       | 故障    |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |          |          |          |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | $y_1$ | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ | $y_7$ | $y_8$ | $y_9$ | $y_{10}$ | $y_{11}$ | $y_{12}$ | $y_{13}$ | $y_{14}$ |
| $x_1$    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_2$    | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_3$    | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_4$    | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | 1        | 1        | 0        | 1        | 0        |
| $x_5$    | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1        | 0        | 0        | 1        | 1        |
| $x_6$    | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 0        | 0        | 1        | 1        | 0        |
| $x_7$    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_8$    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_9$    | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 1     | 1     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_{10}$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1        | 0        | 1        | 1        | 1        |
| $x_{11}$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_{12}$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| $x_{13}$ | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1        | 1        | 0        | 1        | 1        |
| $x_{14}$ | 1     | 1     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |

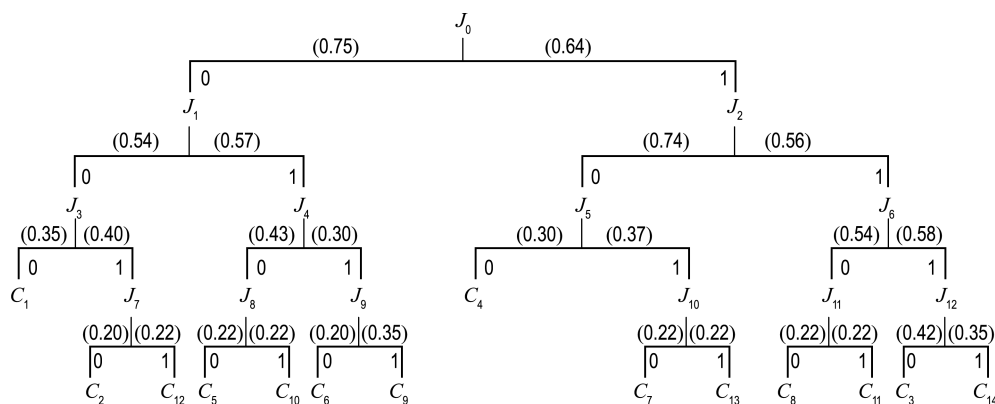


图4 模糊故障信息二元树详解

Fig. 4 Depiction of the fuzzy duality tree

## 4 结 语

较之旋转机械,往复机械振动信号包含着太多的非平稳性和非线性,因而针对往复机械的精确诊断的实现要困难得多.本文提出的基于局域波时频图与故障模糊二元树的诊断方法,首先对往复压缩机振动信号进行局域波时频处理,得到包含故障状态值的局域波时频谱,根据系统的故障状态-特征表,找出最大故障信息量的特征群,建成故障信息量的模糊图.这是一个递归的过程,然后由故障信息量模糊二元树分析故障,找出使路径信息量最大的部件,即为故障可能性最大的部件.即由模糊图来实现故障点的凸显过程.该方法能有效地应用于目前往复式压缩机的运行监测中.但尚存在着需改进和完善的几点:(1)根据信号实测点的不同,往复机组监测点可以选择单点或多点诊断,相应的模糊图可以以此为基点加以展开分析.这对于结构庞大而又复杂的往复式压缩机组来说显得尤为重要.(2)模糊图的完善.(3)具体部件故障类别与等级的进一步确定.

## 参考文献:

- [1] 虞和济,韩庆大,李 沈,等. 设备故障诊断工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2001
- [2] HANLON P C. 压缩机手册[M]. 郝 点,魏统胜,胡丹梅,等译. 北京:中国石化出版社,2003
- [3] 丁 康. 平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J]. 振动工程学报,2003, 16(1):1-10
- [4] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of Royal Society of London A*, 1998, **A454**: 903-995
- [5] 邹岩崑. 局域波分析的理论方法研究及应用[D]. 大连:大连理工大学,2005
- [6] 徐章遂,房立青,王希武,等. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2000
- [7] ROBERT B, HENK V. Neuro-fuzzy methods for nonlinear system identification[J]. *Annual Reviews in Control*, 2003, **27**: 73-85
- [8] 权太范. 信息融合:神经网络-模糊推理理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002

## Research on fault information in fuzzy duality tree method for reciprocating compressor diagnosis

BIE Feng-feng\*, GUO Zheng-gang, ZHANG Zhi-xin, LI Hong-kun, WANG Feng-tao

( Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Combined with local wave method and graph theory, a new fault diagnosis method for reciprocating compressor is proposed based on fuzzy duality tree. Firstly using local wave method, the vibration signal from reciprocating compressor is disposed to local wave time-frequency spectra, in which the fault property of the running system is confirmed, then the vector of maximal fault information is located here. Analyzing the fuzzy duality tree, certain piece of the compressor suited to the path with maximal fault information is found out. Application of the method to the fault diagnosis for a certain reciprocating compressor illustrates its project practicability.

**Key words:** local wave; fault diagnosis; fuzzy duality tree; path intensity