

基于小波包分析的冷水机组故障诊断分析*

重庆大学 郑洁[☆] 孙海军 张霞

摘要 模拟了单螺杆式冷水机组的 9 个常见故障,选取压缩机吸气温度和压缩机排气温度作为故障诊断的特征参数,将特征参数进行小波包分解和重构,提取故障特征信号,建立了特征向量-系统状态的对应关系。

关键词 单螺杆冷水机组 小波包分析 故障诊断 特征参数 诊断准则

Fault diagnosis of water chillers based on wavelet-packet analysis

By Zheng Jie[★], Sun Haijun and Zhang Xia

Abstract Simulates nine common faults of single-screw chillers. Considers the suction temperature and exhaust temperature of the compressor as characteristic parameters, decomposes and reconstructs the characteristic parameters by wavelet-packet analysis method, extracts the signals of fault characters, and establishes the relationship between characteristic vector and system state.

Keywords single-screw chiller, wavelet-packet analysis, fault diagnosis, characteristic parameter, diagnostic principle

★ Chongqing University, Chongqing, China

①

0 引言

随着工业生产的现代化,生产设备正朝着高度自动化和高度集成化的方向发展,设备的成本和维修费用也在急剧增加。美、日两国企业生产的设备的年平均维修费用分别占企业固定资产的 4%~8.5%和 2.6%~12%,我国为 12%~25%。因此,在设备寿命期内及时对其运行状态进行检测,开展设备预知维修,不仅可以减少事故和降低维修费用两方面获得经济效益,对工业生产也有重大意义。目前有很多故障分析诊断的新方法^[1-2],小波包分析就是其中的一种。小波包分析能够更加精细地分析信号,将频带进行多层次划分,对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解,并能够根据被分析信号的特征自适应地选择相应频带,使之与信号频谱相匹配,从而提高了时-频分辨率,因此小波包分析在故障诊断方面具有广泛的应用价值。

1 实验方案

1.1 实验模型

本实验所采用的空调水系统的原理图见图 1。

实验对象选用的是额定制冷量为 232.6 kW 的 KCHUW-10700S 型单螺杆式冷水机组,选用 3Φ-380V-50 Hz 电源,输入功率 50 kW,额定电流 86 A。实验所用的空调系统有 2 台水泵,冷水系统、冷却水系统各 1 台,设设备用泵。2 台水泵的性能参数均为:扬程 32 m,额定流量 100 m³/h,电源 3Φ-380V-50 Hz,输入功率 15 kW。数据测量记录采用一套计算机测量系统,由传感器、调制放大器、A/D 变换器、计算机、CRT 显示器及打印机等组成,能同时接入温度、压力、流量等多种传感器,数据采集速度快、精度高,可满足实验的

* 重庆市建委资助项目(编号:城科学 2003 第(30)号),重庆大学骨干教师资助项目(编号:2003A45)

①☆ 郑洁,女,1960 年 5 月生,大学,副教授
400045 重庆沙坪坝区重庆大学城市建设与环境工程学院
(023) 65126270
E-mail: jiezheng999@yahoo. com. cn
收稿日期:2006-11-24
修回日期:2007-06-22

要求。

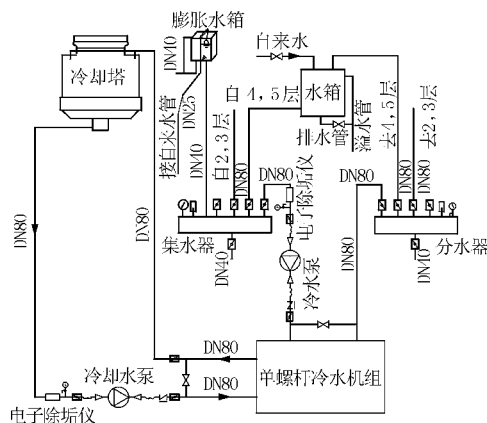


图1 实验用空调水系统原理图

1.2 实验测点的布置

根据理论分析,影响机组性能的内在参数主要是蒸发温度、冷凝温度、压缩机吸气温度、压缩机排气温度以及制冷剂过冷度。由于外在参数的变化往往是通过内在参数的变化对机组起作用的。因此,可以选择内在参数作为故障特征参数。实验测点的布置见图2^[3]。图中,q表示冷却水侧,d表示冷水侧,j表示制冷剂侧,P表示压力测点,T表示温度测点,G表示流量测点。

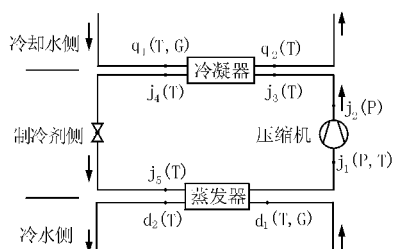


图2 实验测点的布置

1.3 实验内容

本实验模拟的故障有9个,分别为冷却水流量增大、冷却水流量减小、冷水流量增大、冷水流量减小、制冷剂流量减小、外界负荷变小、外界负荷变大、冷凝器进水温度过高和有不凝性气体。

由于制冷系统非常复杂,加之各个部件之间相互联系、相互影响,要找出某一种或几种故障发生时特征参数的变化情况,就必须保证其他各部件运行正常,实现故障的单一性条件^[4]。另外,还应尽量使故障发生的条件符合空调系统的实际运行情况。

1.4 特征参数的选取

当冷水机组的运行状况发生变化时,空调系统中有些参数要相应地发生变化,而有些参数则不会发生变化,存在敏感参数与不敏感参数。所以,要比较容易且准确地判断出故障原因,就要找出对各故障敏感的特征参数。

一般来说,在满足诊断要求的条件下,识别机械故障的特征参数越少越好。用模式识别方法进行状态识别时,特征参数的数量以2~3个为宜,如果太少,误判率大;而特征参数太多,又使得判别函数复杂,计算量大,实时性差,而且误判率不因特征参数数量的增多而相应地减小。由于制冷机内在参数对制冷机性能的影响更为直接,虽然机组的蒸发温度、冷凝温度以及制冷剂过冷度可以为诊断故障提供重要依据,可是直接测量很困难,压缩机吸气温度和排气温度不仅对故障信号敏感,而且方便测量采集。综合考虑现场测定各参数的难易程度与误差大小,本实验选择了便于实时采集的压缩机吸气温度和排气温度作为故障诊断的特征参数。

2 随机信号的范数-故障原理

定义1:设信号 s 的离散序列为 $x_1, x_2, \dots, x_n$,它构成 n 维向量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,定义 $\left(\sum_{k=1}^n |x_k|^2\right)^{\frac{1}{2}}$ 为离散信号的范数,记为 $\|s\|$ 。为避免信号的范数随采样点数的变化而变化,定义 $\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |x_k|^2\right)^{\frac{1}{2}}$ (N 为采样点数)为离散信号的单位范数。

定义2:对样本数为 n 的离散随机信号 s ,定义 $\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \|s_k\|$ 为随机信号 s 的特征范数,记作 $\overline{\|s\|}$ 。随机信号 s 的范数容差值定义为 $K \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\|s_j\| - \overline{\|s\|})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$,记作 $\Delta\|s\|$,其中 K 为随机信号 s 的非平稳性因子(或称重复性因子),即非平稳性越差, K 的取值越大。

通过大量样本提取出信号的特征范数和容差值后,便可对特定样本 s_i 进行可靠性检验,即

1) 当 $\|s_i\| \in (\overline{\|s\|} - \Delta\|s\|, \overline{\|s\|} + \Delta\|s\|)$ 时,则该样本的获取过程无故障;

2) 当 $\|s_i\| \notin (\overline{\|s\|} - \Delta\|s\|, \overline{\|s\|} + \Delta\|s\|)$ 时,则该样本的获取过程有故障;

3) 当 $\|s_i\| \in (\overline{\|s\|} - \Delta\|s\|, \overline{\|s\|} + \Delta\|s\|)$ 时,且

$\sum \|s_i\| - \|\bar{s}\|$ 越小,则该样本的获取过程越准确。

3 小波包理论

3.1 小波包分析原理^[5-6]

在故障诊断领域,小波包分析具有良好的时频局部化特性,因而适用于分析瞬态或时变信号。机组发生故障时,其参数的变化常常是不稳定的,会出现一些瞬变信号或脉冲信号,这些信号是重要的故障信息。小波包分析应用于故障先兆分析的原理在于:系统发生故障时,必将产生某些特殊的突变信号,这些突变信号不仅反映在时域上,也反映在频域上,小波包分析能够在系统出现异常,故障还没有充分形成之前,检测出系统异常的先兆,从而为故障预报提供依据。

3.2 特征向量的提取

1) 通过 A/D 采样将故障信号采集后,对故障特征参数进行 3 层小波包分解,分别提取第 3 层从低频到高频的 8 个频率成分的信号特征。小波包分解是将每一层所有子频带均一分为二,把信号分解为低频和高频,并传至下一层。每一层的子带都覆盖信号所占有的频率,只是各层的分辨率不同,其分解树结构如图 3 所示。图中, (i, j) 表示第 i 层的第 j 个节点, $i=0, 1, 2, 3, j=0, 1, \dots, 7$, 每一个节点都代表一定的信号特征,其中 $(0, 0)$ 节点代表原始信号,括号内的第一个数表示分解的尺度级次,第二个数是小波包参数,当它为 0 时,对应多分辨率分析的低频分量;当它为 1 时,对应多分辨率分析的高频分量;当它为大于 1 的正整数时,表示新增的小波包分析。

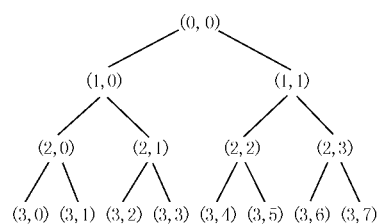


图 3 小波包 3 层分解树结构

2) 对不同的信号,可以选择相应的最佳滤波器组。但是,每一个小波包含有信号的点数比上一层小波包的点数少一半,因此,分解的层数越多,频域分辨率越高,而时域分辨率越低,这对分析时域信号是不利的。为提高时域分辨率,可以通过小波包的重构算法对每一个小波包分别进行重构。例如对第 3 层小波包分解系数进行重构时,提取各子频带范围的信号 $(s_{30}, s_{31}, \dots, s_{37})$, 则总信号 s 可以表示为

$$s = s_{30} + s_{31} + s_{32} + s_{33} + s_{34} + s_{35} + s_{36} + s_{37}。$$

3) 计算各个频带信号的范数。

4) 构造特征向量。由于系统出现故障时,会影响各频带内信号的范数,因此,可以以范数为元素构造一个特征向量。

4 故障诊断准则的确定

对正常和各种故障状态下的信号(排气温度和吸气温度)进行小波包分析,并构造出各自的特征向量,建立特征向量-系统状态的对应关系。例如,当减小冷却水流量时,同时保证冷水流量、负荷条件等其他条件不变。将采集的数据利用方差分析法整理后,列于表 1。

表 1 冷却水流量减小时的系统参数

设定流量/ (m³/h)	冷却水						制冷剂						机组性能系数	
	进水温度/℃	出水温度/℃	进、出水温差/℃	平均温度/℃	流量/(m³/h)	放热量/kW	冷凝温度/℃	蒸发温度/℃	冷凝器进口温度/℃	冷凝器出口温度/℃	压缩机吸气温度/℃	压缩机排气温度/℃		制冷剂过冷度/℃
50	34.4	39.5	5.1	37.0	50.0	296.8	42.0	4.2	79.3	36.7	9.1	78.6	5.3	5.2
48	34.3	40.0	5.7	37.2	47.9	317.8	42.3	4.2	79.3	37.0	9.1	79.2	5.3	5.1
43	34.2	40.6	6.4	37.4	42.9	314.6	43.0	4.2	80.6	37.3	9.1	80.1	5.7	5.0
38	34.4	41.5	7.1	37.9	40.1	314.8	43.9	4.2	85.1	37.8	9.0	81.0	6.1	5.0
33	34.4	42.5	8.1	38.5	33.0	311.1	45.0	4.7	83.8	38.3	8.8	83.0	6.7	4.7
28	34.3	43.7	9.4	39.0	28.0	306.3	46.2	4.9	87.1	39.0	8.8	85.7	7.2	4.5

由表 1 可看出,当冷却水流量减小时,蒸发温度及压缩机吸气温度均可近似认为不变,冷凝温度增加,压缩机排气温度升高,制冷剂过冷度增大;而且,冷却水流量减小导致冷水机组的性能下降。由于选用压缩机排气温度和压缩机吸气温度作为对故障敏感的特征参数,所以冷却水流量减小的故障

判断规则为:压缩机排气温度 $\|s_i\| \gg \|\bar{s}\| + \Delta\|s\|$, 压缩机吸气温度 $\|s_i\| \in (\|\bar{s}\| - \Delta\|s\|, \|\bar{s}\| + \Delta\|s\|)$ 。

同理可得其他模拟故障下的诊断准则,限于篇幅,此处从略。分析结果见表 2。

从表 2 中可以看出,充入不凝性气体和制冷剂流量减小,都会造成两个特征向量显著增加,但不

表 2 故障诊断准则

故障及状态	压缩机排气温度(特征向量)	压缩机吸气温度(特征向量)
正常状态	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$
冷却水流量减小	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$
冷却水流量增大	$\ s_i\ \ll \ s\ - \Delta\ s\ $	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$
充入不凝性气体	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $
制冷剂流量减小	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $
外界负荷变大	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $
外界负荷变小	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$	$\ s_i\ \ll \ s\ - \Delta\ s\ $
冷水流量增大	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $
冷水流量减小	$\ s_i\ \in (\ s\ - \Delta\ s\ , \ s\ + \Delta\ s\)$	$\ s_i\ \ll \ s\ - \Delta\ s\ $
冷凝器进水温度过高	$\ s_i\ \gg \ s\ + \Delta\ s\ $	$\ s_i\ < \ s\ - \Delta\ s\ $

能对这两种故障进行区分。这主要是由于实验条件的限制,在后续实验中可以增加对冷凝温度的实时采集、分析,从而对其加以区分。外界负荷变大和冷水流量增大,以及外界负荷变小和冷水流量减小也是如此。

5 结论

对小波包分析在冷水机组故障诊断准则方面的应用进行了初步探讨和研究,模拟了单螺杆式冷水机组的 9 个常见故障,并利用小波包变换的方法提出故障诊断准则,建立特征向量-系统状态的对应关系,为诊断冷却水流量增加、冷水流量减小和冷凝器进水温度过高等故障提供了依据。但由于实验条件、故障复杂性等诸多方面的原因,还存在很多需要改进和深入研究的地方,如不能准确区分充入不凝性气体和制冷剂流量减小等故障。在后续工作中,多选取一些对故障敏感的特征参数,如增加蒸发温度和冷凝温度作为特征参数,可以对充入不凝性气体和制冷剂流量减小等故障进行准确

的区分,从而进一步扩大小波包诊断的应用范围。

参考文献:

- [1] Li Xiaoming, Hossein V N, Visier J C. Development of a fault diagnosis method for heating system using neural networks[G]//ASHRAE Trans, 1996, 102(1): 607-614
- [2] Dexter A L, Benouarets M. A generic approach to identifying fault in HVAC plants[G]//ASHRAE Trans, 1996, 102(1): 550-556
- [3] 郑洁,杨朝杰,周玉礼. 螺杆式冷水机组的故障模拟及诊断软件的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(6): 19-23
- [4] Stylianou M, Nikanpour D. Performance monitoring, fault detection and diagnosis of reciprocating chillers[G]//ASHRAE Trans, 1996, 102(1): 615-627
- [5] 于志伟,苏宝库,曾鸣. 小波包分析技术在大型电机转子故障诊断系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 158-162
- [6] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB 7 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2005

(上接第 12 页)

铺开奠定基础。

除此以外,对大型公共建筑建立节能监管制度可以起到很好的政策导向作用;通过对其进行能源审计、能效公示,可以为各节能行为主体搭建起良好、畅通的信息服务平台,进而释放节能需求,促进节能服务体系的发展和节能服务市场的发育与完善。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2006 [M]. 北京:中国统计出版社, 2007
- [2] 武涌,刘长滨. 中国建筑节能经济激励政策研究[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007
- [3] 本书编委会. 公共建筑节能设计标准宣贯辅导教材

[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005

- [4] 康艳兵. 我国建筑节能面临的挑战与机遇[EB/OL]. [2006-07-26]. <http://www.eri.org.cn/manage/upload/uploadimages/eri2006726122103.pdf>
- [5] 屈宏乐. 建筑运行管理是建筑节能的重头戏[J]. 墙材革新与建筑节能, 2006(4)
- [6] 国务院办公厅. 国务院关于加强节能工作的决定[EB/OL]. [2006-08-23]. http://www.gov.cn/zwqk/2006-08/23/content_368136.htm
- [7] 詹姆斯·M·布坎南(美国). 自由、市场和国家[M]. 吴良健,桑全,曾获,译. 北京:北京经济学院出版社, 1998
- [8] 江亿,薛志峰. 北京市建筑用能现状与节能途径分析[J]. 暖通空调, 2004, 34(10)