

# 基于声信号小波包分析的故障诊断<sup>1)</sup>

吕琛<sup>1</sup> 王桂增<sup>1</sup> 邱庆刚<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(清华大学自动化系 北京 100084)

<sup>2</sup>(大连理工大学动力工程系 大连 116023)

(E-mail: luchen@mail. tsinghua. edu. cn)

**摘要** 为了避免传统的基于振动信号的内燃机主轴承磨损故障诊断中安装传感器以及提取故障特征频率的麻烦,提出了一种基于内燃机工作声信号小波包图像处理的方法.通过该方法,可以得到含有内燃机主轴承间隙磨损状态的时频信息,定义出各个标准故障状态的时-频分布图,建立了基于图像匹配技术的内燃机主轴承磨损故障诊断模型.通过比较待诊断时频分布图与所有故障模式时频分布图的欧氏距离,可以判断出轴承的间隙磨损状态.结果表明此方法简单有效、状态信息利用充分.

**关键词** 故障诊断,小波包,时-频分布,图像处理,声信号

**中图分类号** TK418

## Fault Diagnosis Based on Wavelet Packet of Sound Signal

LU Chen<sup>1</sup> WANG Gui-Zeng<sup>1</sup> QIU Qing-Gang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084)

<sup>2</sup>(Department of Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

(E-mail: luchen@mail. tsinghua. edu. cn)

**Abstract** In order to avoid the difficulty of installing vibration sensors and extracting characteristic frequency vectors for the traditional vibration-based abrasion fault diagnosis on the main bearing of diesel engine, this paper presents a new approach based on wavelet packet images processing of sound signal of diesel engine. Thus, the standard time-frequency distribution images of all fault conditions including the gap abrasion information of the main bearing can be defined. Correspondingly, a gap abrasion fault diagnosis model of the main bearing with images matching is set up. Through comparing the Euclid distance between standard fault image and the test image, the model can recognize the gap abrasion condition. The results show that this method makes the best use of fault information and is simple and effective.

**Key words** Fault diagnosis, wavelet packet, time-frequency distribution, image processing, sound signal

1) 国家自然科学基金(60274015)和国家“863”计划(2002AA412420)资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60274015) and National “863” Project (2002AA412420)

收稿日期 2002-10-24 收修改稿日期 2003-04-17

Received October 24, 2002; in revised form April 17, 2003

## 1 引言

目前,多数关于内燃机的状态监测与诊断是利用振动信号分析<sup>[1~4]</sup>,一般集中于活塞缸套、进排气门等部位,这是因为这些部位便于振动传感器接近,振动量对这些部位的故障较为敏感.而主轴承磨损的监测则存在两方面的困难<sup>[1,5]</sup>.首先,主轴承位于发动机内部,若在主轴承附近的测点上安装振动传感器,需要拆装发动机,这将造成相当的不便.另一困难是主轴承间隙的变化并不会引起机体表面振动与声信号的明显变化.内燃机工作过程是一个非平稳的冲击振动过程,其能量在频域内呈现宽频带分布,从普通频谱图上很难找到类似于旋转机械那样的故障特征.基于此,本文提出了基于机体外工作信号测量主轴承间隙磨损,采用小波包和图像处理的方法,得到含有待诊断柴油机主轴承磨损故障信息的声信号时频分布图,并由此定义图像,得到主轴承在不同间隙磨损状态下的“标准”时-频分布图,建立了柴油机主轴承间隙磨损故障的图像匹配诊断模型.

## 2 试验及试验工况

为研究内燃机主轴承磨损状态与其声信号之间的相互关系,专门建立了一套试验台架,如图 1 所示,试验用发动机为一台 2100 柴油机,将该机连接于水力测功器,可调整其输出功率.在发动机机体外一端靠近主轴承 0.8m 处用三角架支撑 ND2 型精密倍频程声级计,声级计距地面高度 0.75m,使声级计的电容传声器基本上与试验台上发动机主轴承在同一水平面上.用声级计对机体外表面扫描,定位出声信号测量的最佳位置,以便基本保证了测量的最佳声能辐射方向和声能的最小测量前衰减<sup>[1]</sup>.采用上述的测量位置可以降低背景噪声的影响.本文的研究是基于柴油机主轴承的磨损故障,其它的各个零部件均正常,实测的工作声信号不包含其它零部件的故障信息.

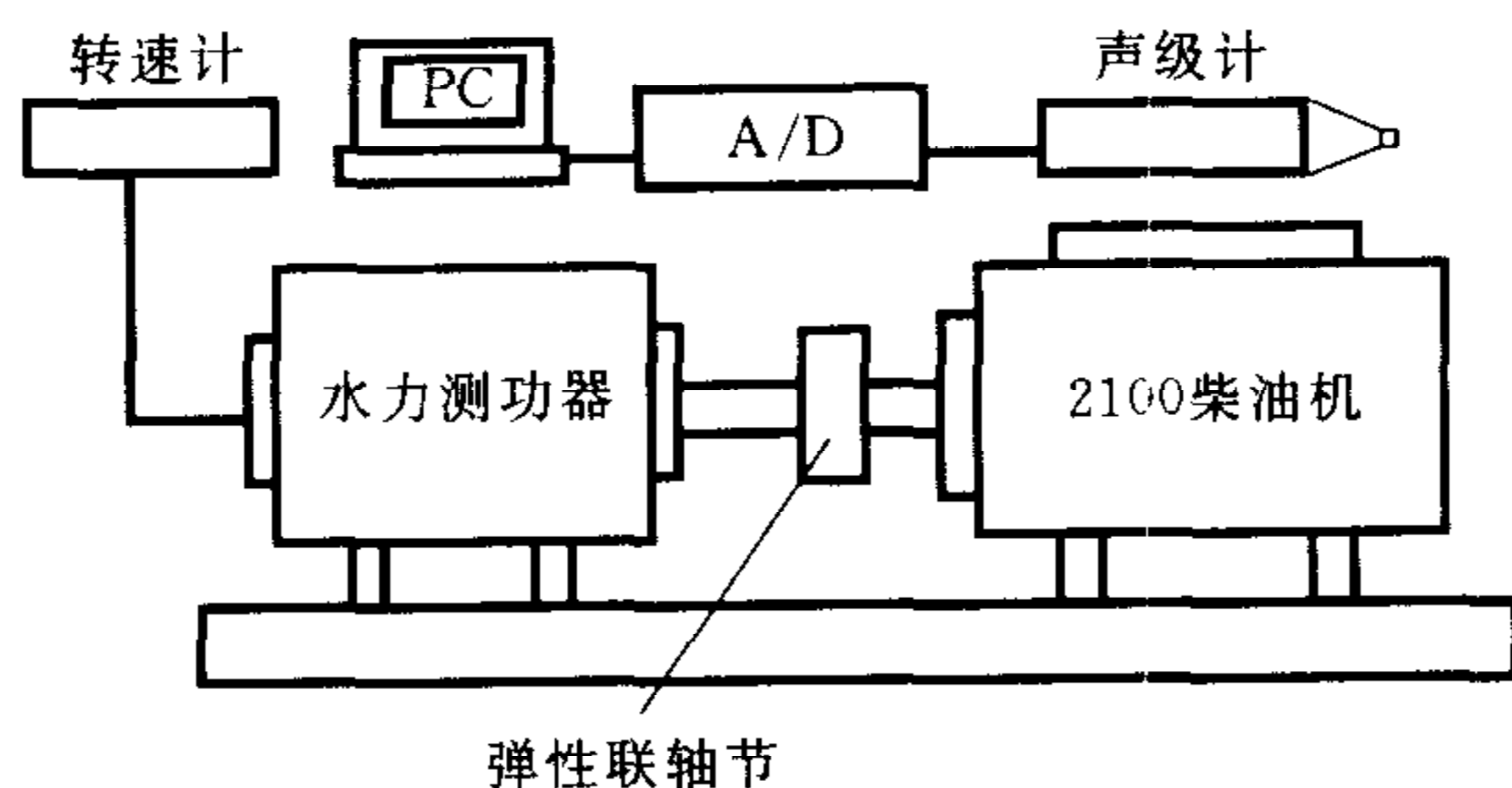


图 1 试验装置图

Fig. 1 Sketch of test system

为了更准确地得到测量结果,将第一、第二、第三主轴承瓦的间隙均同时调整,使其更接近磨损的实际状况.试验间隙分别为 0.12mm,0.20mm,0.26mm,0.30mm.该机主轴承的标定极限间隙为 0.25mm.固定曲轴转速和输出功率,在固定的工况下测量声信号.试验时曲轴转速 1200r/min,输出功率 80% 负荷,采样频率 10.8KHz,采样点数 8192.试验中,通过采集缸内断油时的气缸压力信号,对声信号进行了标定.柴油机一个工作循环内的声信号角度

范围为 $-360^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ,采集数据时,以断油时的压缩压力最大值点为 $0^{\circ}$ ,即压缩上止点.这样保证最后的声信号长度为柴油机一个工作循环的整数倍.

### 3 声信号的小波包分解及图像生成

限于篇幅,关于小波包的原理可以参阅相应文献.有多种方法可以将信号的时频特性直观地表示出来,如三维谱图法、等高线法、相平面表示法等.对于声信号的小波包分解结果表示,本文采用时频相平面图表示.

相平面指由时间和频率轴构成的一个二维平面<sup>[2,4,5]</sup>.它与一般的坐标平面不同,不反映函数关系,而是一种时频状态表示,相平面的任一点都有一个状态值.设原始信号(离散)的样本数为 $N$ ,小波包分解结果可以表示为时频相平面上 $N$ 个面积为 $\Delta t \times \Delta f$ 的相邻小矩形, $\Delta t$ 和 $\Delta f$ 分别为时间轴和频率轴上的分辨率.在矩形内填充不同灰度的颜色,灰度值的大小反映幅值的大小,信号的时频特性就可以清晰地表示出来.对于不同的主轴承磨损状态,将导致声信号时-频分布的明显改变.

图像的灰度值通过如下方法决定:首先,将采用5层Symlets4小波包分解所得的各层系数取绝对值后归一;将归一后的系数乘以255<sup>[6]</sup>,得到相应的灰度值.通过分析,发现不同的间隙对应不同的时频分布图.即使同一间隙下的不同采样时刻的声信号,其时-频分布图也稍有区别.这说明在柴油机工作过程中,由于不同工作循环间存在波动,体现在声信号时域波形特定时刻信号的幅值发生了变化,在时-频分布图中,表现为相应位置处的像素灰度值发生变化.这说明小波包分解后的时-频分布图包含了反映柴油机工作状态的信息.小波包分解可以体现出信号在特定时刻和频带处幅值大小.

通过读取屏幕上信号小波包分解得到的时-频分布图所在范围内的所有像素点的位置坐标与灰度值,作为图像文件存储.从而得到不同间隙状态下的时-频分布图像.试验中,图像大小为 $481 \times 386$ ,灰度值范围扩大也可以将其分辨率提高,使更多的小波包分解后信号的细节反映出来.本文取 $0\sim 255$ 灰度级范围.

## 4 基于图像匹配的内燃机主轴承诊断模型

### 4.1 图像平均处理

由前述可知,柴油机工作循环间存在波动,而且同一循环内也存在波动.由此导致的信号频率分布、时域特点差别是不容忽视的.若仅以某一个循环内的信号,或者说仅以一个单独的声信号采集样本作为故障诊断的依据,缺乏代表性.因此,可以在特征提取后对特征参数进行平均,即采用参数平均法,以减小循环间和循环内波动的影响.这一过程相当于将柴油机声信号的频率信息进行了压缩与提取,突出故障信息,在一定程度上减小了噪声干扰.在获取“标准”图像时采用10次平均,而在故障诊断时对时-频图采用5次平均(为叙述方便,本文后面对时-频分布图像均称图像).

设有图像簇 $A_k(i, j)$ ,  $k=0, 1, 2, \dots, N$ . 设 $A_k(i, j)$ 内第 $i$ 行、第 $j$ 列像素的灰度值为 $G_k(i, j)$ , 则得主轴承间隙为某一状态时的平均“标准图像”的第 $i$ 行、第 $j$ 列像素的灰度值为

$$SG_m(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} G_k(i, j) \quad (1)$$

上式中  $m=1, 2, 3, 4; i=1, 2, \dots, N_L; j=1, 2, \dots, N_S; N_L, N_S$  分别为图像像系的行数与列数。在求“标准图像”时, 取式(1)中的  $N=10$ , 在故障诊断时取  $N=5$ 。

图像之间的欧氏距离定义为

$$D_m = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^{i=N_L} \sum_{j=1}^{j=N_S} [A(i, j) - SG_m(i, j)]^2}, \quad m = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

这里  $N=N_L \times N_S$ , 即为图像所包含的像素总个数;  $A(i, j)$  为用于诊断的图像在第  $i$  行、第  $j$  列像素点的灰度值;  $SG_m(i, j)$  为第  $m$  种标准图像在第  $i$  行、第  $j$  列像素点的灰度值。

#### 4.2 诊断阈值的确定

在故障诊断中, 任意取一种主轴承间隙状态的声信号的 5 次平均图像  $A(i, j)$ , 依据式(2)分别求出其与 4 幅标准图像之间的欧氏距离  $D_m, m=1, 2, 3, 4$ 。令  $D_{\min} = \min\{D_m\}$ , 定义欧氏距离之间的差值为

$$C_m = |D_m - D_{\min}| \quad (3)$$

设诊断阈值为  $V_d$ , 通过试验计算与经验估计, 本文取  $V_d=5$ 。对某一待诊断图像, 依式(3)计算出  $C_m$ , 若只有一个  $C_m < V_d$ , 则主轴承间隙状态为此  $C_m$  所对应的间隙状态, 即为第  $m$  种间隙状态; 若不止一个  $C_m < V_d$ , 则认为无法判断。

## 5 诊断实例

限于篇幅, 图 2 仅列出了 4 种间隙状态中的 0.20mm 和 0.30mm 间隙下的图像, 可以看出两间隙下的时-频分布图有很大的差异。左侧为各间隙下的标准模板图像(10 次平均图像), 右侧为已知的各间隙下的待诊断图像(5 次平均图像)。按照图 3 过程进行诊断, 其部分

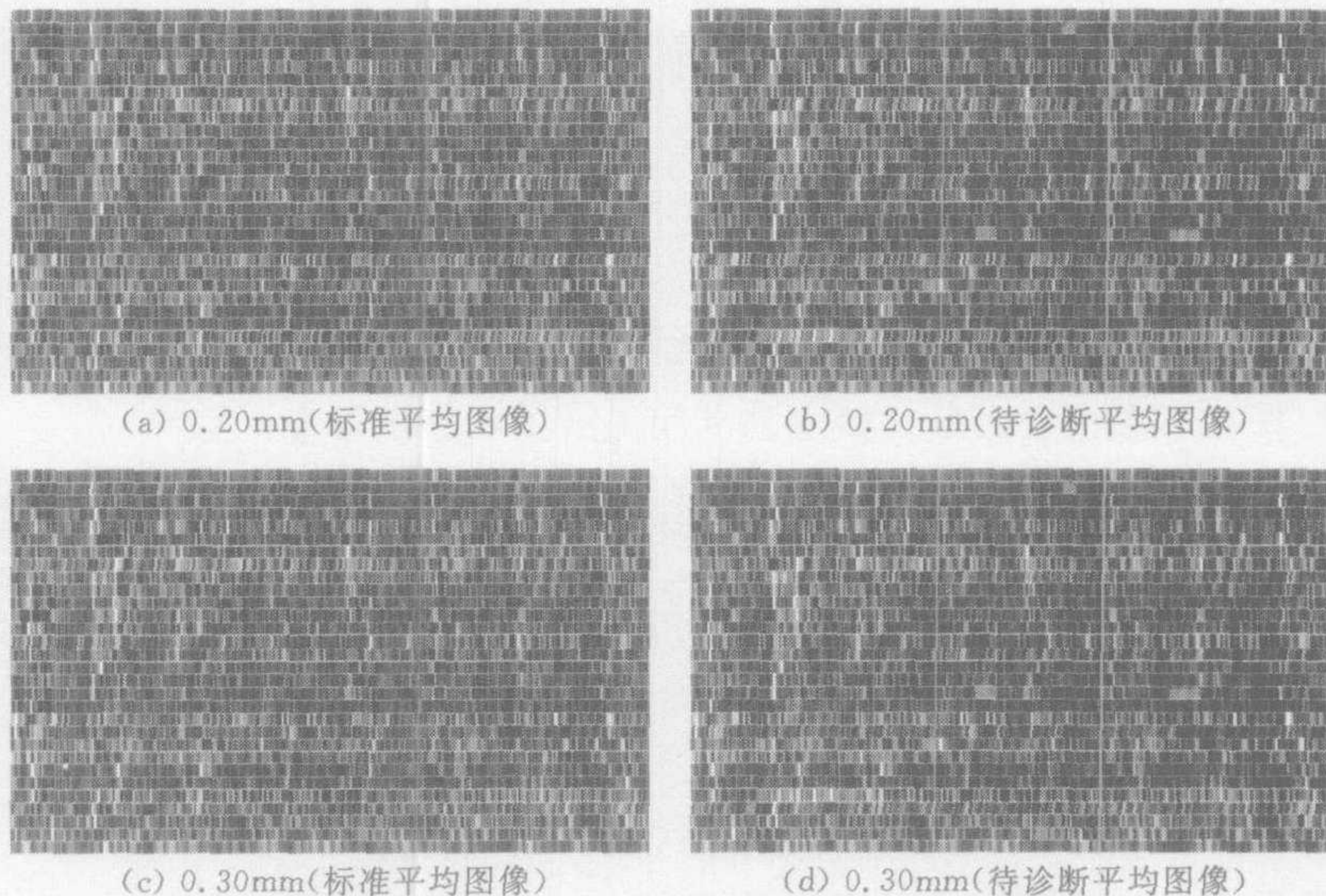


图 2 0.20mm, 0.30mm 间隙下的标准图像与待诊断图像

Fig. 2 Standard Images and Test Images under the gap condition of 0.20mm, 0.30mm

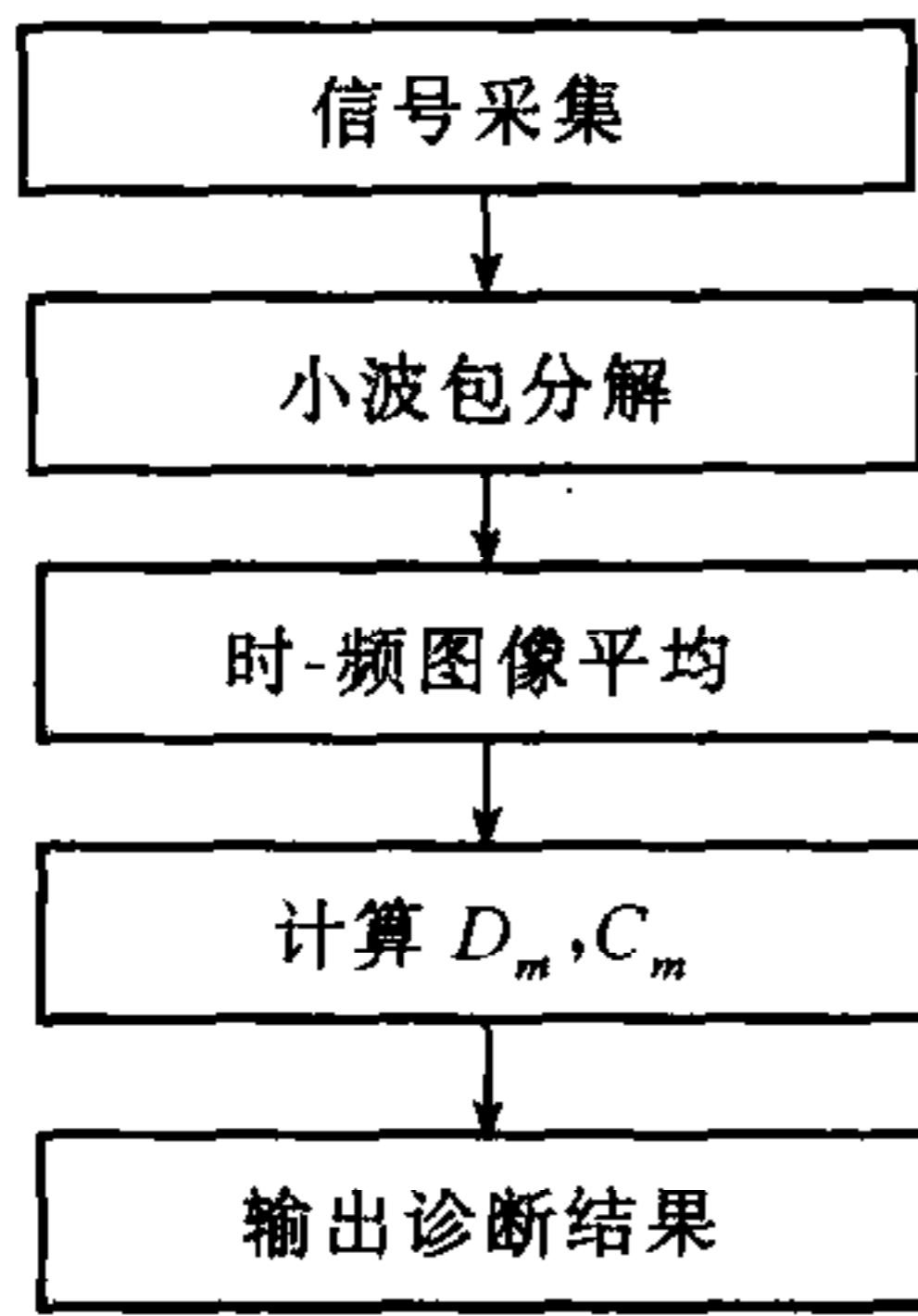


图 3 故障诊断过程  
Fig. 3 Process of diagnosis

结果见表 1. 从表 1 可以看出, 待诊断图像与 4 幅标准图像之间的欧氏距离(即  $D_m$ ) 差异较大. 而每一特定间隙下的待诊断图像与相应标准图像之间的欧氏距离相差不大, 因为图像平均将图像中的特征进行了提取, 降低了噪声. 从表 1 还可以看到: 即使在同一工况和间隙下, 待诊断图像与相应的标准图像之间的  $D_m$  也不小, 这正是因为柴油机的工作循环波动效应, 尽管采取了平均方法来减小这一影响, 但不可能从根本上解决这一问题. 同时, 参与平均的图像个数对每一个  $D_m$  也是有影响的, 但其它 3 种间隙下的  $D_m$  较之本间隙下的  $D_m$  相差是明显的, 因为在不同的磨损状态下, 声信号的时-频分布图之间有明显差别. 所以如果待诊断图像与某一

特定间隙状态一致, 则它与此标准图像之间的  $D_m$  将是最小的. 试验用 25 个 5 次平均的图像进行诊断, 只有 1 个图像无法判断, 其它均可正确判断出结果. 说明此方法是可行的, 具有实用性.

表 1 样本图像与标准图像之间的欧氏距离  
Table. 1 Euclid distance between standard images and test images

	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	诊断结果
样本 1	15.3	65.7	56.7	52.1	间隙 1
样本 2	63.6	29.3	66.1	58.7	间隙 2
样本 3	57.4	69.3	27.7	62.5	间隙 3
样本 4	54.1	62.3	61.7	16.5	间隙 4
样本 5	17.2	67.9	58.1	53.3	间隙 1
样本 6	60.4	26.1	63.8	56.7	间隙 2
样本 7	55.5	67.5	25.5	57.4	间隙 3
样本 8	53.9	61.6	63.2	17.6	间隙 4

注 1. 表中  $D_1, D_2, D_3, D_4$  分别代表各测试样本图像(样本 1~样本 8)与已建立的标准图像  $SG_1 \sim SG_4$ (代表 0.12mm, 0.20mm, 0.26mm, 0.30mm 四种间隙状态)之间的欧氏距离值.

## 6 结束语

利用声信号的小波包分解图像匹配模型, 可以充分考虑特定时间段和特定频率段的特点, 得到的时-频分布图包含大量反映主轴承间隙磨损状态的信息.

在基于振动信号分析的研究中<sup>[5]</sup>, 发现对于柴油机多部件故障同时存在的情况, 虽然少数部件的故障特征频率也有不同程度的重叠, 但基本上还是不相同的. 而且, 只要正确选择测点和故障特征频率, 以及对多故障特征值进行融合, 完全可以分离出各种不同的故障. 基于声信号的故障诊断与振动方法有很大的关联性, 可对声信号进行多故障特征信息融合来分离各部件的故障.

目前, 本文中的诊断阈值选取主要是通过实验中的经验值来选取, 还没有一个确切的定量或定性的选取方法. 这还需要在以后的研究工作中改进.

### References

- 1 Xu Min. The Handbook of Equipment Fault Diagnosis. Xi'an; Xi'an Jiaotong University Press, 1998. 171~187(in Chinese)
- 2 Geng Zhong-Xing, Qu Liang-Sheng. The principle of wavelet packet and application on machinery fault diagnosis. *Signal Processing*, 1994, **10**(4): 244~249(in Chinese)
- 3 Liu Shi-Yuan, Du Run-Sheng, Yang Shu-Zi. Engine diagnosis by wavelet packets decomposition of vibration signal measured on cylinder head. *Journal of Huangzhong University of Science and Technology*, 1999, **27**(8): 7~9 (in Chinese)
- 4 Xia Yong, Shang Bin-Liang, Zhang Zhen-Ren. Research on fault diagnosis for internal combustion engines using wavelet packet. *Transactions of Chinese Society for Internal Combustion Engines*, 2001, **19**(1): 62~68(in Chinese)
- 5 Lu Chen. Condition monitoring and fault diagnosis of main bearing of internal combustion engines based on noise analysis[Ph. D. dissertation]. Dalian; Dalian University of Technology, 2002. 58~69(in Chinese)
- 6 Hu Chang-Hua, Zhang Ju-Bo. System Analysis and Design Based on MATLAB—Wavelet Analysis. Xi'an; Xi'an University of Electronic Technology Press, 1999. 6~23(in Chinese)

吕琛 博士后. 主要从事动态系统故障诊断的研究.

(**LU Chen** Postdoctor. His research interests include fault diagnosis of dynamic system.)

王桂增 教授, 博士生导师. 主要从事过程控制和动态系统故障诊断方面的研究.

(**WANG Gui-Zeng** Professor, Ph. D. supervisor. His research interests include process control and fault diagnosis of dynamic system.)

邱庆刚 讲师. 主要从事动力机械控制与故障诊断的研究.

(**QIU Qing-Gang** Lector. His research interests include the control and fault diagnosis of power machinery.)