

DOI: 10.3901/JME.2009.05.034

## 基于声全息故障诊断方法\*

李加庆<sup>1</sup> 陈进<sup>2</sup> 史重九<sup>1</sup>

(1. 上海机动车检测中心 上海 201805;

2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240)

**摘要:** 基于振动信号的故障诊断方法在某些场合下存在着局限性。机械噪声蕴含着丰富的设备状态信息,而且具有非接触式测量的优点,可以部分地替代振动信号,用于故障诊断。传统的噪声诊断方法主要基于频谱分析,无法反映声源位置和强度的变化信息,只能进行初步的故障诊断。基于此,提出一种基于声全息的故障诊断方法。该方法采用由少量传声器组成的阵列测量声压,应用波叠加法重构物体的外部声场,可以方便快速地进行声场可视化。一旦准确地重建出物体的外部声场,就可以利用这些全息场的信息进行故障诊断。通过建立基于全息图的正常状态与故障状态的模板,将机器的运行信息与这些模板对比,就可以判定机器的运行状态,从而进行故障诊断。采用由多个脉动球组成的声源模型进行了数值仿真,并在消声室内对两只音箱噪声源进行了试验研究,都准确地识别出辐射体声场状态变化,找出了故障。从而验证了该方法的正确性和实用性,为其在现场应用打下基础。

**关键词:** 故障诊断 特征提取 声全息 波叠加法

中图分类号: TB53 O42

## Fault Diagnosis Method Based on Acoustic Holography

LI Jiaqing<sup>1</sup> CHEN Jin<sup>2</sup> SHI Chongjiu<sup>1</sup>

(1. Shanghai Motor Vehicle Inspection Center, Shanghai 201805;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** Fault diagnosis method based on vibration signals has limits in certain situations. However, machine noise contains abundant condition information about machines. It possesses the advantage of non-contacting test. It can be used for fault diagnosis as a substitution of vibration signals. Traditional fault diagnosis methods based on noise signals are mainly on the basis of spectrum analysis. They cannot provide the location and the strength of sound sources. So they can only be used in some simple conditions. A fault diagnosis method based on acoustic holography is presented. A microphone array composed of a few microphones is used to acquire sound field. And the wave superposition method is adopted for sound field reconstruction. The sound field around a machine can be easily visualized by using such a method. Once the exterior sound field around the machine is reconstructed, the information extracted from the holography can be used for fault diagnosis. A number of templates of normal condition and fault condition can be made from the holography. A certain condition of the machine can be confirmed by comparison of it with these templates. Then the faults of the machine can be found. Numerical simulations are performed on the basis of a multiple pulse-ball sound source model, and experiments are also done with two sound boxes in an anechoic chamber. Both the simulations and the experiments have accurately identified the changes of the sound field radiated from the radiator, and have found out the faults. It shows that the method

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2006AA04Z175)和国家自然科学基金(50675140)资助项目。20080717 收到初稿, 20090320 收到修改稿

is validated and feasible, which lays a foundation for its on-site applications.

**Key words:** Fault diagnosis Feature extraction Acoustic holography Wave superposition

## 0 前言

目前机械设备故障诊断采用的技术主要基于振动信号测量与分析。由于很多设备的振动信号不易测取, 这种方法有一定的局限性。机械噪声蕴含着丰富的设备状态信息, 可以部分地替代振动信号作为故障诊断的手段之一。基于声学的故障诊断方法具有测量仪器简单, 非接触式测量, 不影响设备正常工作等优点, 是一种简易快速的故障诊断方法。很多学者对声学诊断进行了大量研究, 他们借鉴振动诊断技术, 提出了各种声学诊断方法。吕琛等<sup>[1]</sup>基于噪声信号, 通过小波包络谱和图像处理等技术, 对内燃机主轴间隙故障进行了诊断研究。舒大文等<sup>[2]</sup>基于噪声信号对汽车变速箱齿轮的故障进行了研究。卢学军等<sup>[3]</sup>、吴军彪等<sup>[4]</sup>也开展了类似的研究。

传统的噪声诊断方法主要基于频谱分析<sup>[2-3]</sup>。它们无法给出声源的位置和强度的变化信息, 只能进行初步的故障诊断。文献[1]在发动机外采集噪声信号, 应用时频分布图模型进行故障诊断, 为声学故障诊断提供了一种新思路。然而, 由于该方法仅采用一只传声器, 获取的声场信息有限, 只能对单一的设备进行诊断。因此, 提出一种基于声全息的故障诊断方法, 采用传声器阵列测量物体外部声压场, 并应用波叠加方法重构物体外部声场。通过一次采集、计算就可以获得物体外部一个面上的声全息图, 大大增加了信息量。一旦准确地重建出物体外部声场, 通过建立基于全息图的正常状态与故障状态的模板, 将机器运行信息与这些模板对比, 就可以判定机器的运行状态; 再结合机器的某些运行参数, 就能进行故障诊断。波叠加方法一种在全频率域内稳健的声场重构算法<sup>[5]</sup>。在这里是它被选择用来进行声场重构。

## 1 基于波叠加的声全息

考虑一个振动体, 置于均质流体中。流体密度为  $\rho$ , 流体中的声速为  $c$ 。振动体的表面记为  $S'$ , 其内部和外部分别为  $D$  和  $E$ , 如图 1 所示。 $\mathbf{n}$  为振动体表面的外法矢量,  $P$  为外部  $E$  中的一点。假设在  $D$  内有一连续分布的等效声源体  $\Omega$ , 其虚拟边界  $S$  作为等效源面,  $Q$  为  $S$  上一点。 $P$  和  $Q$  间的距离记为  $R$ 。

通常, 考虑随时间简谐变化的波动, 边界条件为 Neumann 边界条件。对于外域问题, 还需满足

Sommerfeld 辐射条件 (Sommerfeld radiation condition, SRC), 以保证无穷远处只有外行波, 而没有反射波。因此, 外域 Neumann 问题表述如下

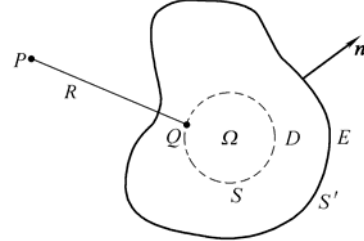


图 1 振动体与等效源配置几何示意图

$$\begin{cases} \nabla^2 p + k^2 p = 0 & \in E \\ v_n = \bar{v}_n & \in S' \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \left[ R \left( \frac{\partial p}{\partial R} + ikp \right) \right] = 0 & \in E \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\nabla$  为拉普拉斯算子,  $k$  为波数,  $v_n$  为振速,  $\bar{v}_n$  为边界上的给定振速。方程组式(1)的解可通过 Helmholtz 积分方程, 并应用质量守恒定律得到一个修正的 Helmholtz 方程, 两方程联立求解, 得到  $P$  点的声压和质点振速表达式

$$p(P) = \int_S i\rho\omega\sigma(Q)G(P,Q)dS(Q) \quad (2)$$

$$v_n(P) = \int_S \sigma(Q) \frac{\partial G(P,Q)}{\partial n_p} dS(Q) \quad (3)$$

式中,  $i$  是虚数单位,  $\sigma$  为未知的等效源强度,  $G(P, Q)$  是自由场格林函数

$$G(P, Q) = \frac{\exp(-ikR)}{4\pi R} \quad (4)$$

均匀地对等效源面  $S$  进行离散, 并假设等效源的源强度分布和 Green 函数在每一单元上为一常量。物体的外部声压和质点振速的离散表达式为

$$\mathbf{p} = \mathbf{H}\boldsymbol{\sigma} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_n = \mathbf{T}\boldsymbol{\sigma} \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{p}$  和  $\mathbf{v}_n$  分别为声压矢量和法向振速矢量,  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{T}$  为传递函数或辐射因子,  $\boldsymbol{\sigma}$  是未知的源强度矢量。一旦配置好等效源, 传递函数  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{T}$  可以通过计算格林函数得到, 然后利用传声器阵列获取物体外部声压场, 将这些声压值代入式(5), 就可以很容易求得未知的等效源的源强度  $\boldsymbol{\sigma}$ 。再次利用式(5)、(6), 可以对物体外部任意面实现声场重构。

## 2 基于声全息的故障诊断原理

从重构的声强全息图上可以准确地识别出声源

的个数、位置,通过颜色深度可以读出声源强度。又因为全息图是在频域进行声场重构的,所以全息图还包含了噪声的频率信息。因此,声全息图包含了许多振动信号所不具备的信息,特别是位置信息。在得到全息图之后,首先将其划分网格并制作成为灰度图,储存在计算机中。经过大量试验,分别获取机器在良好工作状态下和故障状态下的声全息图像,分别制成模板库,并建立故障特征映射表。将机器实时采集的状态与这些模板进行比较,就可以判定机器的运行状态;进一步结合机器的一些特征参数,参照故障特征映射表就可以判定机器的故障类型。基于声全息的故障诊断原理如图 2 所示。

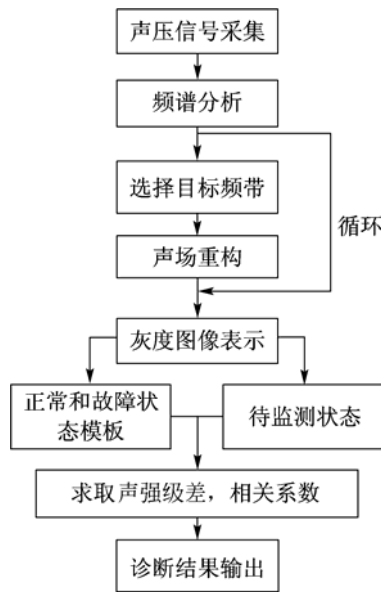


图 2 声全息故障诊断原理图

声压信号采集可以采用传声器阵列一次性获取。然后,进行频谱分析,找出感兴趣的频率成分;再对这些频段进行声场重构。重构的频率分辨率等于采样的频率分辨率。这样,对于宽频信号,需要进行多次循环,才能求出叠加之后的声场。这里,采用声强全息图来进行故障诊断。一方面,因为声强是物体辐射声能量的量度;另一方面,声强比声压更稳定。重构的声强全息图可以表示成灰度图像文件。按照重建网格密度划分成相等面积的小矩形,在每个矩形内填充不同灰度的颜色,灰度值的大小反应了该网格内幅值的大小。在 MATLAB 中,灰度图采用 8 位无符号整数表示,所以数值的取值范围是 0~255。这里,声强重构的结果表示成声强级。人的可听声的范围是 0~120 dB,所以声强数据可以直接保存成灰度图。具体实施时只需要将声强级取整就可以得到各像素点的灰度值。

采集机器正常状态和故障状态情况下的声压数据,按照上述方法建立图像模板。同样地,将待监测的状态也表示成灰度图,与标准模板进行比较,

求取它们之间的声强级差,就可以找到其所属的状态。声强级差定义为

$$L_{ij} = |\tilde{A}_{ij} - A_{ij}| = 10 \lg \left( \left| 10^{\frac{\tilde{I}_{ij}}{10}} - 10^{\frac{I_{ij}}{10}} \right| \right) \quad (7)$$

$$i = 1, \dots, M \quad j = 1, \dots, N$$

式中,  $M$  和  $N$  分别表示图像水平方向和竖直格点的个数,  $\tilde{A}_{ij}$  表示待监测图像的  $(i, j)$  号格点的灰度值,  $A_{ij}$  表示标准图像模板的  $(i, j)$  号格点的灰度值,  $\tilde{I}_{ij}$  表示待监测图像的  $(i, j)$  号格点的声强值,  $I_{ij}$  表示标准图像模板的  $(i, j)$  号格点的声强值。式(7)的物理意义在于它表示了两个状态间的声强级差。

除此之外,作为声强级差的补充,还计算了两个图像之间的二维相关系数

$$R = \frac{\sum \sum (\tilde{A}_{ij} - \bar{\tilde{A}})(A_{ij} - \bar{A})}{\sqrt{\left[ \sum \sum (\tilde{A}_{ij} - \bar{\tilde{A}})^2 \right] \left[ \sum \sum (A_{ij} - \bar{A})^2 \right]}} \quad (8)$$

式中,  $\bar{\tilde{A}}$  和  $\bar{A}$  分别表示  $\tilde{A}$  和  $A$  的均值。

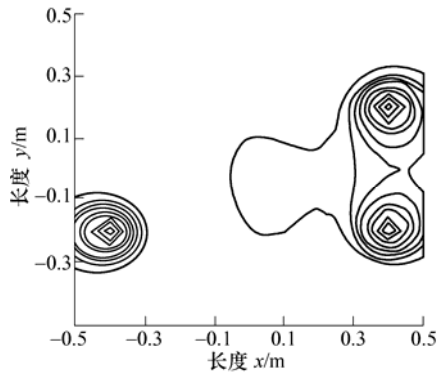
式(8)描述了图像之间的相似程度。因此,依据最小的声强级差和最大的相关系数就可以确定故障类型。

### 3 数值仿真

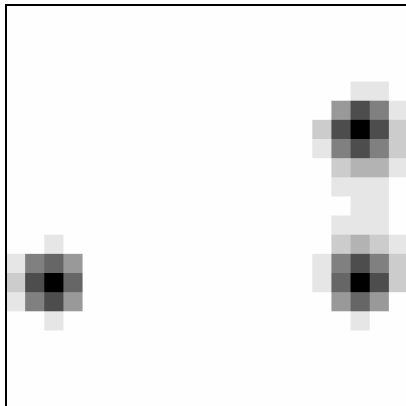
为验证该方法的可行性和准确性,设计了一个由多个点声源组成的声辐射模型,进行了数值仿真。通过改变声源的个数、位置、幅值以及频率,来模拟故障特征的变化。假设某辐射体表面存在三个不相干声源,彼此分开一定距离,用三个小脉动球声源模拟。仿真条件:  $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 340 \text{ m/s}$ , 球半径为 0.05 m, 球表面的脉动速度为 0.2 mm/s, 脉动频率均为 800 Hz, 位置分别为  $(0.4 \text{ m}, 0.2 \text{ m}, 0)$ ,  $(-0.4 \text{ m}, -0.2 \text{ m}, 0)$ ,  $(0.4 \text{ m}, -0.2 \text{ m}, 0)$ 。测量距离为 0.2 m, 测量阵列为  $5 \times 5$  的传声器阵列, 间距为 0.2 m。采用波叠加方法对该模型进行声场重构, 重构面位于辐射体前方 0.06 m, 结果见图 3。

首先进行频谱分析,在 800 Hz 存在谱峰。所以只在 800 Hz 频率附近进行了声场重构。图 3a 是正常状态下的声强重构图,可以看出存在三个声源,强度相当。声源位置与事先给定的位置一致。图 3b 是由图 3a 制作的灰度图模板。因为要利用这些灰度图模板进行故障诊断,所以没对它们进行图像增强、锐化等处理。之所以选择基于图像匹配的方法,主要是因为使用图片更容易与其他系统交互。图 3c 是故障状态下的灰度图,与图 3a 相比,左上角第一个声源处发生了故障;而其他部分颜色很浅,接近于白色,表明这些部分灰度接近于零,即两个图像

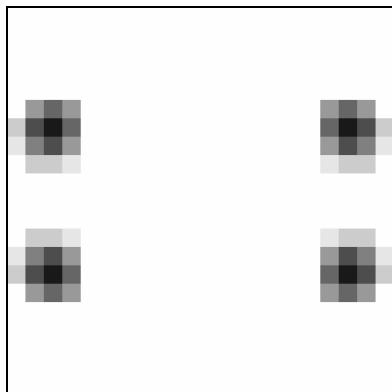
很相似。将图 3c 与图 3b 比较，按照图 2 的诊断原理和式(7)计算两幅图像之间的声强级差，结果如图 3d 所示。从图 3d 可以看出，在左上角第一个声源的位置，两幅图像的差别最大，而其他位置差别不大。而两幅图像之间的二维相关系数为 0.57，表示该状态已远远偏离正常状态。所以，可以诊断该状态为故障状态。根据位置信息判断，故障发生在第一个声源位置。从频率上看，故障频率为 800 Hz。这与设定的故障一致，从而证明了该方法的可行性与准确性。



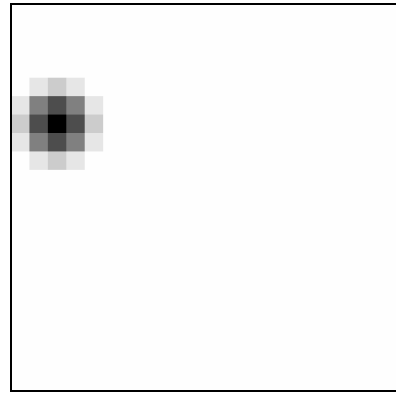
(a) 正常状态



(b) 正常状态的灰度图



(c) 故障状态灰度图：增加一个声源



(d) 诊断结果，与正常状态的相关系数为 0.57

图 3 故障诊断仿真结果

同样地，还仿真了声源位置发生变化、频率发生变化、强度发生变化的情况。但因篇幅限制，没有列出这些结果。为了更准确地诊断出机器故障，需要建立大量的正常状态和故障状态的图像库。依据图 2 的原理，按照最大相关性和最小声强级差的原则，就可以判断故障种类。在这些仿真中，也同样地检测到了声源的故障变化信息。

### 4 试验结果

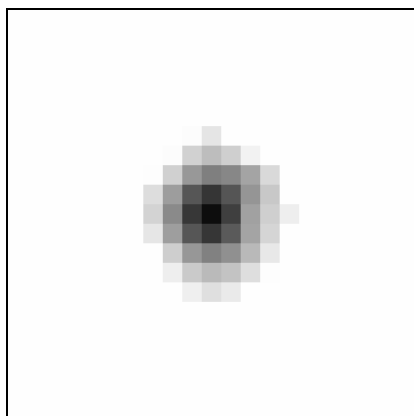
为了进一步检验算法的准确性与可行性，用两个音箱作为声源，在消声室进行了试验研究。

试验配置如图 4 所示。采用两只音箱模拟噪声源，标记为声源 A、B。它们被布置在同一平面。以传声器阵列的中心位置为基准，确立水平坐标  $x$  轴和竖直坐标  $y$  轴的原点，以音箱表面为高度坐标  $z$  轴原点，建立直角坐标系。传声器阵列网格形式，由 25 个传声器组成。阵列的外围尺寸  $0.8\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ ，传声器间距为  $0.2\text{ m}$ 。传声器阵列距离音箱表面的高度  $0.2\text{ m}$ ，重构距离为  $0.06\text{ m}$ 。采用 **BBM Muller 32** 通道数据系统采集声压数据，见图 4 左下角。采样频率为  $16\ 384\text{ Hz}$ ，数据长度为  $10\text{ s}$ 。利用信号发生器发出信号，频率为  $800\text{ Hz}$ ，经功率放大器放大后驱动音箱发声。利用上述系统采集数据，然后应用波叠加算法进行声场重构，然后再进行故障诊断。正常状态下，只有一只音箱声源发声，声源位置为  $(0, 0, 0)$ ；故障状态下，两只音箱声源同时发声，声源位置为分别为  $(-0.2\text{ m}, 0, 0)$ ,  $(0.2\text{ m}, 0, 0)$ 。

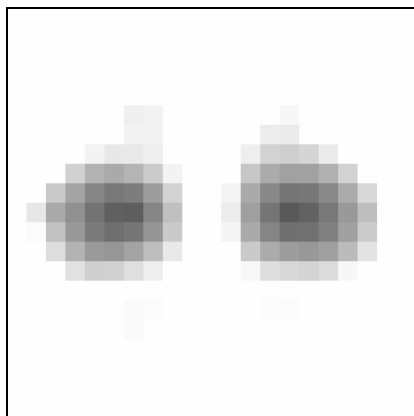


图 4 试验配置图

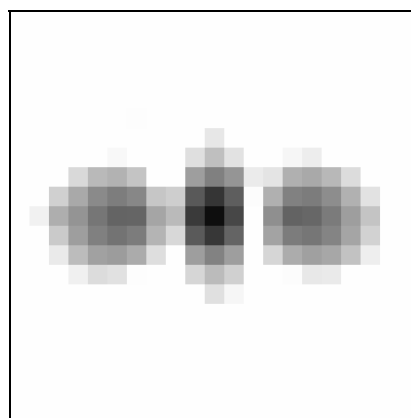
图 5a 是正常状态下的声强重构灰度图,从中可以辨认出存在一个声源,其位置与事先给定的位置一致。图 5b 模拟了增加一个声源、同时改变声源位置的故障状态。可以看出,在图像中央存在两个声源(黑斑)。图 5a 与图 5b 比较,应用图 2 的原理进行故障诊断,计算两幅图像之间的声强级差如图 5c 所示。明显地,从图 5c 可以看出,在图像中间位置,差别比较明显,在新的声源位置处也有差别。再看两幅图像之间的二维相关系数为 0.32,表示该状态已远远偏离正常状态。所以,可以诊断该状态为故障状态。根据图 5c 中显示的位置信息,结合声源的频率信息,可以知道 800 Hz 频率处,原来的那个声源消失,在其周围两侧的位置出现了两个新的声源。依据这个信息,结合设备信息,就可以找出该故障。



(a) 正常状态灰度图



(b) 故障状态: 增加一个声源,同时改变位置



(c) 诊断结果,与正常状态的相关系数为 0.32

图 5 故障诊断试验结果

## 5 结论

(1) 提出了基于声全息故障诊断方法。通过仿真和试验,验证了该方法的可行性和准确性。从工业现场机械设备的状态监测与故障诊断的角度来看,因为该方法具有非接触测量的优势,只需要采用少量传声器,计算效率高,为现场故障诊断问题提供一种新的解决方案。

(2) 相对于基于振动信号的故障诊断,基于声全息的故障诊断方法的优势在于它可以感知声源(振动源)的位置变化信息;另外,它是非接触测量。它可以作为振动信号的一个补充,部分的替代基于振动信号的故障诊断。当然,如果能与振动信号融合,将能获得更准确的诊断结果。

(3) 目前,该研究还处于诊断方法的初步研究阶段。应用到现场设备的故障诊断,还需要针对具体设备建立大量的故障诊断图库和故障特征对应表,再依据最大相关性和最小声强级差的原则,就可以判断故障类型。

## 参 考 文 献

- [1] 吕琛,王桂增.基于时频域模型的噪声故障诊断[J].振动与冲击,2005,24(2):54-57.  
LV Chen, WANG Guizeng. Noise fault diagnosis based on time-frequency domain model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(2): 54-57.
- [2] 舒大文,廖伯瑜.用振动和噪声信号诊断汽车变速箱齿轮故障的研究[J].昆明理工大学学报,1997,22(4):54-61.  
SHU Dawen, LIAO Baiyu. Research on diagnosing gear failure of automobile transmission-case by the vibration and noise signals[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 1997, 22(4): 54-61.

- [3] 卢学军, 魏智. 变速箱噪声的频谱分析与故障诊断[J]. 振动与冲击, 1999, 18(2): 75-78.  
LU Xuejun, WEI Zhi. Spectral analysis and diagnosis of gearbox noise[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(2): 75-78.
- [4] 吴军彪, 陈进, 钟平, 等. 机械噪声故障特征提取的盲分离法与小波提纯法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(5): 766-769.  
WU Junbiao, CHEN Jin, ZHONG Ping, et al. Acoustic feature extraction of rotating machines using blind source separation and wavelet analysis[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(5): 766-769.
- [5] JEANS R, MATHEWS I C. The wave superposition method as a robust technique for computing acoustic fields[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1992, 92(2): 1 156-1 166.

---

作者简介: 李加庆, 男, 1977 年出生, 博士。研究方向为声信号处理理论与方法及其在故障特征提取中的应用。

E-mail: jqlivsn@163.com