

# 轴承故障声发射信号的涡旋聚焦传输方法

吴冠武 吴立群 王洪成 王亚星 郭金帅\* 张正 吴佳欣 李亮亮

杭州电子科技大学机械工程学院,杭州,310018

**摘要:**针对滚动轴承内部供电及电信号传输难题,研究了基于声发射的轴承智能感知技术。首先,基于故障轴承转动振动特性构建声信号时序相差涡旋传输模型。然后,设计了环形中空式声超表面结构,研究了声涡旋聚焦机制及超表面透射性能,并仿真分析了故障类型与声场涡旋拓扑荷数的关联关系。最后,通过故障轴承的模拟与试验装置验证了轴承故障声发射信号的涡旋聚焦传输方法。

**关键词:**声涡旋聚焦;时序相差模型;环形超表面;智能轴承;声发射信号

**中图分类号:**TH133.33

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.008

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## A Vortex Focused Transmission Method for Bearing Fault Acoustic Emission Signals

WU Guanwu WU Liqun WANG Hongcheng WANG Yaxing GUO Jinshuai\*  
ZHANG Zheng WU Jiabin LI Liangliang

School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 310018

**Abstract:** Aiming at the challenges of internal power supply and electrical signal transmission in rolling bearings, the intelligent sensing technology for bearings was studied based on acoustic emission. Firstly, based on the rotational vibration characteristics of the faulty bearings, a temporal phase difference vortex transmission model of acoustic signals was constructed. Then, a circular hollow acoustic metasurface structure was designed, and the acoustic vortex focusing mechanism and metasurface transmission performance were studied. The correlation between fault types and acoustic vortex topological charges was simulated and analyzed. Finally, the vortex focusing transmission method of bearing fault acoustic emission signals was verified through simulation and experimental setup of faulty bearings.

**Key words:** acoustic vortex focusing; phase-difference model of time series; circular metasurface; intelligent bearing; acoustic emission signal

### 0 引言

轴承是旋转机械的重要部件,对其动态性能、使用寿命和稳定性的要求非常严苛<sup>[1-4]</sup>,轴承滚动体打滑<sup>[5-6]</sup>、内外圈磨损<sup>[7-9]</sup>、轴承跳动、扭曲断裂<sup>[4,10]</sup>等因素是高速滚子轴承失效和服役可靠性降低的根本原因。

声发射(acoustic emission, AE)技术以其高灵敏、宽频响、多信息和动态检测等特点,为轴承故障诊断提供了一条新的途径。LIU等<sup>[11]</sup>通过检测声发射信号来评估滚动轴承运行状态;文献<sup>[12-14]</sup>先后开展了基于声信号的故障检测,通过非接触式传感器采集轴承部件工作的声发射信号特征。

当前,轴承故障声发射检测技术采用传感器采集声信号<sup>[15]</sup>,并借助计算机进行滤波整合,后期处理难度较大<sup>[16-17]</sup>。轴承早期微弱故障信号的

采集较为困难,早期故障声发射信号的发散性严重影响信号的可测性、灵敏性、鲁棒性<sup>[18-19]</sup>。因此,笔者提出一种基于轴承故障涡旋声场超表面<sup>[20-24]</sup>聚焦的信号定向传输方法,从轴承失效源头研究轴承故障信息,提高服役轴承内部微弱故障信号的检测能力,达到轴承故障“早发现,早预案”的工程智能化目的,为构建新型智能轴承系统提供解决方案。

### 1 滚动轴承声发射的涡旋聚焦机理

轴承转动时,滚动体在内外圈之间滚动。滚动表面出现损伤时,轴承转动产生交变的激振应力。激振应力以弹性波的形式释放应变能的过程即为声发射。如图 1 所示,轴承外圈滚道出现缺陷时,轴承在转动过程中会产生瞬态弹性波,释放出高频声发射能量,大幅值的声发射信号可从轴承工作环境的背景噪声中有效分离,提高信噪比。因此从轴承工作的复杂环境角度出发,研究轴承

故障的声发射有助于轴承工作状态的检测和诊断。

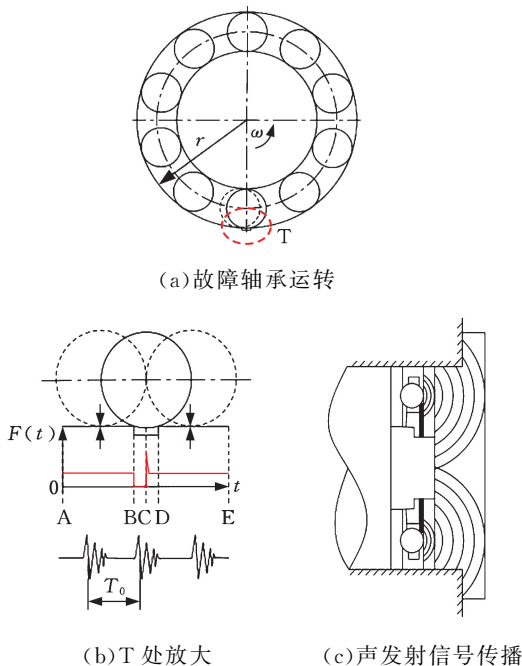


图 1 轴承自激声发射示意图

Fig.1 Schematic diagram of self-excited acoustic emission from bearings

滚子撞击轴承内外圈的局域缺陷或滚子缺陷经过轴承内外圈都会产生动态的高频激振时序脉冲声发射序列。滚动轴承故障诊断存在供电难、布线难、电子信号传输难等问题。基于轴承故障的转动特性可构建轴承的无源相位自调控涡旋模型研究方法,即借助声涡旋的信号传输方式研究轴承的缺陷信息。

轴承早期故障的声发射信号微弱、分散且杂乱无章,因此本文重新梳理滚子故障源信号序列,构建轴承端面环形阵列声发射传输超结构(图 2),建立轴承故障声发射信号超表面涡旋聚焦传输机制,提高轴承早期故障的预警品质与灵敏度。

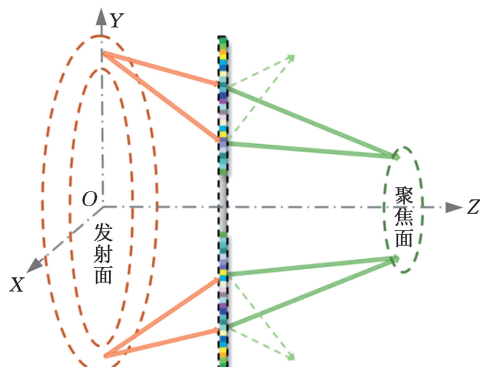


图 2 故障声发射涡旋聚焦框架图

Fig.2 Schematic diagram of fault acoustic emission focusing

## 2 声场涡旋聚焦理论

### 2.1 声场涡旋与聚焦理论

螺旋波在绕轴旋转传播时,其振幅沿径向分布,形成一个环状声场,螺旋中心即相位奇点处的振幅为零,这一特性在数学上可以通过特定的函数或方程来表示:

$$\omega(r, \theta, z) = f(r)g(\theta)b(z) \quad (1)$$

式中: $r$  为径向距离; $\theta$  为极角; $z$  为轴向距离; $f(r)$ 、 $g(\theta)$ 、 $b(z)$  分别为波函数对应的径向函数、角向函数和轴向函数。

波在空间中的传播行为可用 Helmholtz 方程描述,因此波函数  $\omega(r, \theta, z)$  满足如下关系:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + k^2 \omega = 0 \quad (2)$$

式中: $k$  为波数; $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \omega}{\partial r} \right)$ 、 $\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2}$ 、 $\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}$  分别表示径向、角向和轴向的波动特性。

式(2)描述了声场在柱坐标系中的传播行为,通过求解可得声场  $\omega$  随距离  $r$ 、极角  $\theta$  和轴向距离  $z$  的变化规律。式(2)的一组正交解被称为贝塞尔柱状涡旋,即

$$\omega(r, \theta, z, t) = A J_m(k_{\perp} r) \exp(j(m\theta + k_z z - \omega t)) \quad (3)$$

$$k_{\perp} = \sqrt{k^2 - k_z^2} \quad k = \| \mathbf{k} \| = \omega / c_0$$

式中: $A$  为声涡旋的振幅常数; $m$  为拓扑荷数; $J_m(\ast)$  为  $m$  阶的第一类贝塞尔函数; $k_{\perp}$  为波矢  $\mathbf{k}$  的垂直(径向)分量,与极角  $\theta$  相关; $k_z$  为波矢  $\mathbf{k}$  在  $Z$  轴上的投影; $\omega$  为波的角频率; $c_0$  为声速。

声涡旋聚焦模型如图 3 所示, $N$  个半径为  $b$  的声源均匀布置在半径为  $R$  的圆上,2 个相邻声源的方位角间距  $\Delta\varphi = 2\pi/N$ 。声源从同一发射面处以角频率  $\omega$ 、相位差  $\Delta\phi = m\Delta\varphi$  依次激发同频声波,从而产生声涡旋。令方位角  $\varphi_{0n} = (n-1)\Delta\varphi$ ,则第  $n$  个声源  $S_n$  的初相位  $\phi_{0n} = (n-1)\Delta\phi$ ,声源  $S_n$ 、检测点  $Q$  所在位置的坐标分别为  $(R, \varphi_{0n}, 0)$  和  $(r, \varphi, z)$ ,则声源  $S_n$  在  $Q$  点产生的声压为

$$p_n(r, \varphi, z) = j \frac{\omega \rho_0 u_0 b}{R_n k_0 \sin \theta} J_1(k_0 b \sin \theta) \cdot \exp(j(k_0 R_n - \omega t + \varphi_{0n})) \quad (4)$$

式中: $J_1(\ast)$  为一阶柱面贝塞尔函数; $\rho_0$  为传播介质(空气)的密度; $u_0$  为声源表面振动的幅度; $k_0$  为声速  $c_0$  对应的波数, $k_0 = \omega / c_0$ 。

声源  $S_n$  到观察点  $Q$  的距离为

$$R_n = \sqrt{r \cos \varphi - R + r \sin \varphi + z^2} \quad (5)$$

因此,空间上,涡旋聚焦声场的声压为

$$p(r, \varphi, z) = j \frac{\rho_0 u_0 c_0 b J_1(k_0 b \sin \theta)}{\sin \theta} \cdot$$

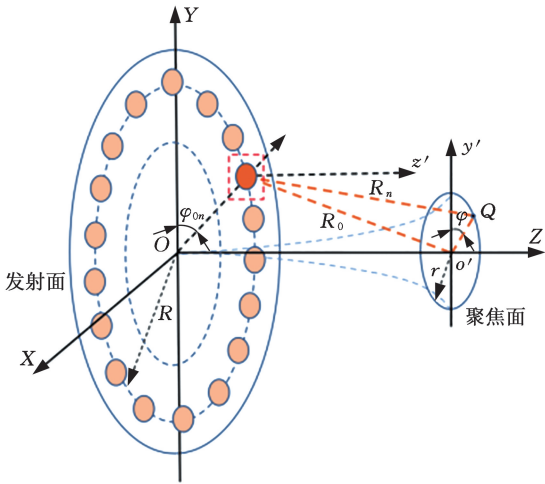


图 3 环形聚焦声涡旋模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of circular focusing acoustic vortex model

$$\sum_{n=1}^N \frac{\exp(j(k_0 R_n - \omega t + \varphi_{0n}))}{R_n} \quad (6)$$

由式(6)可知,声场声压只受  $k_0$ 、 $b$ 、 $R_n$ 、 $\theta$ 、 $\varphi_{0n}$  等参数影响。声源半径远小于波长即  $k_0 b \ll 1$  时,式(6)可简化为

$$p(r, \varphi, z) = j \frac{\rho_0 u_0 c k b^2}{2} \sum_{n=1}^N \frac{\exp(j(k R_n - \omega t + \varphi_{0n}))}{R_n} \quad (7)$$

式(7)是多个点声源产生的涡旋聚焦声场的声压表达式,该式显示空间中形成的涡旋聚焦声场具有高密度、高能量聚焦的特点。

### 2.2 时序相差涡旋聚焦机制

如图 4 所示,轴承的故障主要为滚子故障。缺陷滚子在自转与公转时会产生高频间歇的脉冲声发射序列,内外圈作用在滚子上的应力不同时,滚子缺陷与内外圈作用产生的声发射信号共振幅值也不同,即滚子缺陷将产生幅值交替变化的间歇式脉冲序列声发射信号。



(a) 内圈故障 (b) 滚子故障

图 4 轴承故障示意图

Fig.4 Schematic diagram of bearing faults

针对轴承内圈和轴承滚子故障的转动振动特性,构建回转体轴承缺陷的时序相差自振模型,如图 5 所示,模型中,轴承的内圈与轴同步转动。内圈故障可视为一个旋转且有时序间隔的单一动点声源;滚子故障可视为一个双重(双接触的)、追赶

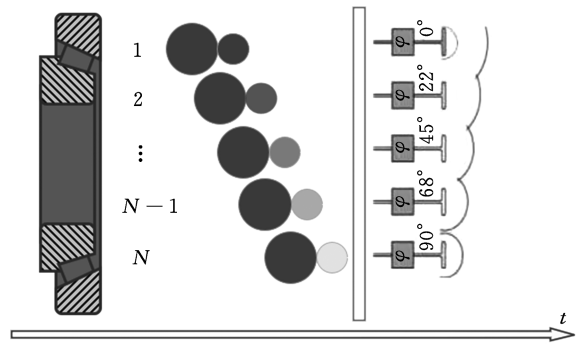


图 5 滚子缺陷时序相差模型

Fig.5 Roller defect timing difference model

式(间隔式)的复合脉冲声信号。

### 3 环式超结构设计及声涡旋仿真

首先,构建适合轴承端面结构的环形中空式声超表面结构单元,并对其进行入射声波的透射率及透射相位的仿真分析;然后,基于仿真参数构建一种可设于轴承端面的声超表面结构,并对该结构进行二维声波透射聚焦的性能研究;最后,仿真分析了基于超表面下的轴承外圈故障及轴承滚子故障的声场形式。

#### 3.1 超表面单元结构设计

声波在传播过程中会受障碍物的影响而产生衍射。障碍物的尺寸不超过声波波长时,衍射现象显著。声学超表面结构的衍射声场( $z > 0$ )可表示为

$$P(x, y, z) = \frac{P_0}{j\lambda} \iint_{z=0} \frac{z+s}{2s^2} \exp(jk_0 s) dx' dy' \quad (8)$$

式中: $P_0$  为入射声波的振幅; $\lambda$  为声波的波长; $s$  为示平面  $z = 0$  上的点  $(x', y')$  到聚焦平面上的点  $(x, y)$  的距离; $k_0$  为入射声波的波数。

基于广义斯奈尔折射定律,通过对声波传输界面微结构单元的结构参数设计可改变声波的传播方向、幅度和相位等参数。构建的单元结构如图 6 所示,仿真参数如下:入射声波频率  $f_0 = 25$  kHz,结构单元的密度  $\rho = 7980$  kg/m<sup>3</sup>,结构单元的声速  $c = 5200$  m/s;空气密度  $\rho_0 = 1.21$  kg/m<sup>3</sup>,20 °C 时的空气声速  $c_0 = 343$  m/s,波长  $\lambda = 13.72$  mm。仿真中,结构单元为刚性材料,即声学硬边界声场。结构单元的高度  $h$  取  $0.1\lambda$  来确保亚波长结构的分辨率。为保证超表面亚波长结构的声波高透射率特性,取  $\omega = 0.5\lambda$ 。此外,Helmholtz 的短管间距  $\omega_1 = 0.105\lambda$ ,短管宽度  $\omega_2 = 0.01\lambda$ ,单元壁厚  $h_2 = 0.01\lambda$ ,腔体宽度  $\omega_3 = 0.1125\lambda$ ,共振腔的高度  $h_3 = h - h_1 - h_2$ 。改变长直导管的高度  $h_1$  时, $h_3$  也会改变,由此实现对声超表面结构单元的调控,进而实现对入射声波的相位调控。

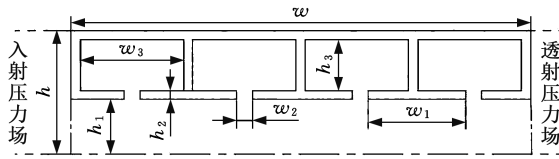
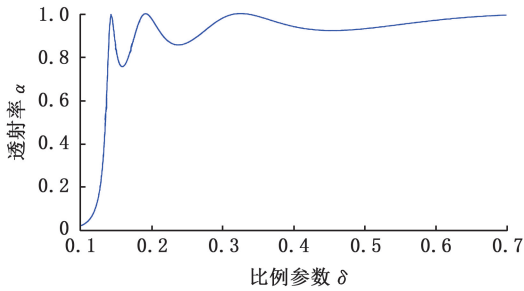


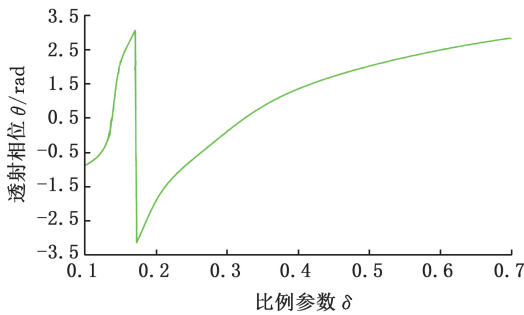
图 6 声超表面结构单元示意图

Fig.6 Schematic diagram of acoustic meta-surface structural units

设置比例参数  $\delta = h_1/h$ 。在模型左侧施加入射压力场,并用局部探针测取声波透射超表面结构前后的压力场强度。透射后压力与透射前压力的比值即为该仿真单元的声波透射率(声波透射系数)。设置  $\delta$  的取值范围为  $0.1 \sim 0.7$ , 步长为  $0.002$ , 入射声波的频率  $f_0$  为  $25 \text{ kHz}$ , 入射声压为  $6.3 \text{ Pa}$ 。频率为  $25 \text{ kHz}$  的声波入射超表面单元时,不同比例参数  $\delta$  下的仿真透射率与相移如图 7 所示。



(a) 透射率



(b) 透射相位

图 7 声超表面透射能力与相位仿真曲线

Fig.7 Simulation curve of transmission capability and phase of acoustic meta-surface

由图 7 可见,比例参数  $\delta$  为  $0.14 \sim 0.70$  时,超表面结构有较高的声波透射率,且几乎保持  $[-\pi, \pi]$  的全相位调控能力;通过选取合适的比例参数  $\delta$  即可实现对声波透射率和相位的精确控制,如表 1 所示。

图 8 所示为  $6250 \sim 43750 \text{ Hz}$  声波的透射能力曲线,频率  $25000 \text{ Hz}$  以下的入射声波具有较优的能量传输能力和较高的聚焦强度,其他频率的声波透射率均小于设计频率  $25000 \text{ Hz}$  的声波透射率,这表明所构建的超表面具有较高的透射

表 1 仿真相位参数选择

Tab.1 Selection of simulation phase parameters

设定相位/rad	透射相位/rad	比例参数 $\delta$
$-3\pi/4$	-2.356	0.188
$-\pi/2$	-1.571	0.209
$-\pi/4$	-0.785	0.246
0	0	0.292
$\pi/4$	0.785	0.344
$\pi/2$	1.571	0.426
$3\pi/4$	2.356	0.562
$\pi$	3.14	0.700

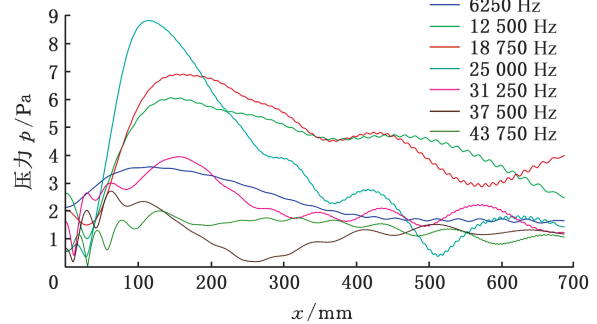


图 8 不同透射频率下的透射能力曲线

Fig.8 Transmission capability curves at different transmission frequencies

率和较好的聚焦性能。

### 3.2 环形声超表面构建

图 9 所示的超表面结构内径为  $70 \text{ mm}$ , 外径为  $114 \text{ mm}$ , 厚度为  $6.86 \text{ mm}$  (一个半波长)。该超表面结构内部由多个环形串联的声学 Helmholtz 共振腔和环形 Fabry-Perot 直列谐振腔构成(图 9c),在超表面轴向(如图 9a)构建有等间隔的多条连接筋。

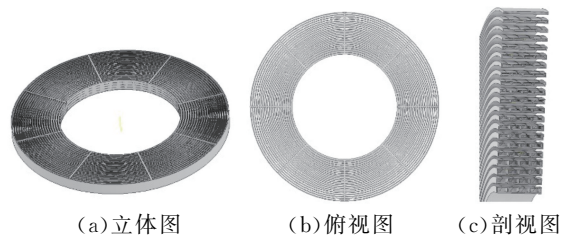


图 9 环形中空式超表面结构

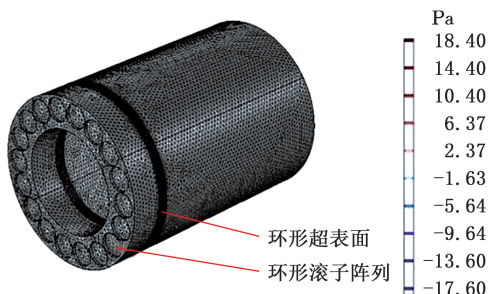
Fig.9 Circular hollow meta-surface structure

如图 10 所示,滚子激发面到超表面的距离约为一个波长,设环形滚子依次激发的超声信号经超表面结构透射传输,形成聚焦形态的涡旋声场。

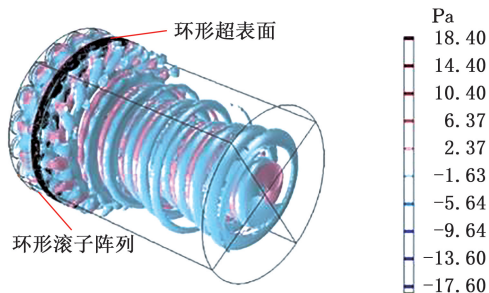
图 10b 中的声涡旋柱面中心发生明显的聚拢收缩,且涡旋声场中心的声场能量沿轴线显著增强,这表明环形中空式声超表面结构对所构建的涡旋声场具有明显的声场聚焦效果。

### 3.3 轴承典型故障声涡旋聚焦特征仿真分析

滚动轴承在转动过程中产生的故障有外圈故障、内圈故障和滚子故障,不同故障对应的声场特



(a) 涡旋声发射超表面模型网格化



(b) 聚焦涡旋仿真

图 10 轴承超表面模型及聚焦涡旋仿真

Fig.10 Vortex meta-surface model and focused vortex simulation

性大不相同。滚子外圈与轴承箱固定,外圈某处出现的缺陷为定缺陷,即为固定点声源,其对应仿真中的 1 个固定点声源(频率为 25 kHz),轴承外圈故障声场经超表面透射后呈现出声偏转特性,如图 11 所示,轴承外圈的定点缺陷信息在声超表面结构的作用下实现轴向的信号增强,进而更容易在轴承轴向获得该故障的信号。

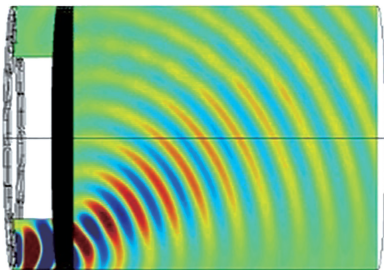


图 11 外圈固定轴承故障定缺陷声偏转仿真

Fig.11 Simulation of bearing outer ring fault and fixed defect acoustic deflection

轴承转动过程中,轴承滚子既有绕轴的公转,也有自身的自转。滚子出现一个缺陷时,滚子会与轴承内圈和外圈各发生一次碰撞。等效的 2 个脉冲声发射信号可看做两处动缺陷即双动点声源,仿真对应双涡旋声场。如图 12 所示,在声超表面的作用下,双涡旋声场明显聚焦在了第二切面、第三切面上。

基于上述仿真分析,轴承元件的缺陷可分为定缺陷和动缺陷,不同类型的缺陷对应不同的声场分布形态。所构建的声超表面结构将声场聚拢

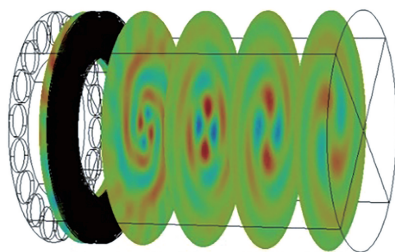


图 12 轴承滚子故障缺陷双涡旋聚焦仿真

Fig.12 Simulation of double vortex focusing for bearing roller faults and dynamic defects

于指定的轴线上,有效提高了定点检测微弱故障信号的灵敏度。

#### 4 模拟校核及试验分析

##### 4.1 模拟校核设计

“模拟轴承”声发射装置的原理:通过设定时间延迟来依次激励各超声换能器单元发出声波,使各单元发射的超声波信号之间有一定的相位差,在空间形成波束叠加、扭转等效果。该装置需按照预设的时序相控逻辑,快速响应 18 个通道,独立控制各个换能器的驱动相位。图 13 为该装置的电路原理简化图。

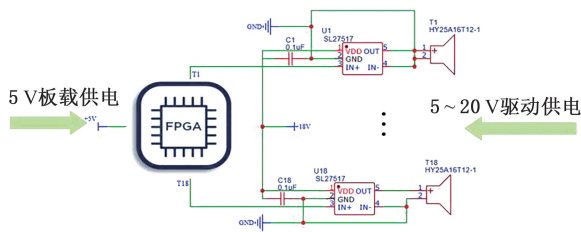


图 13 声发射装置电路原理简化图

Fig.13 Simplified circuit diagram of acoustic emission device

图 14 所示为换能器组合而成的环形阵列,构建的声发射装置采用 18 个超声换能器模拟滚子故障声源的激发点,输入电压(5~20 V)间断控制换能器发出周期矩形声波来模拟轴承故障声源。

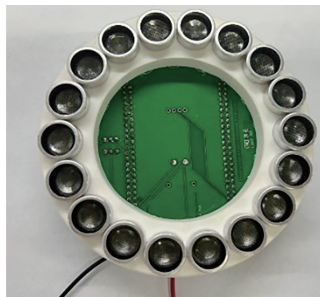


图 14 声发射装置实物图

Fig.14 Physical image of acoustic emission device

超表面结构内部为复杂的空腔结构,较小的尺寸限制了其一体化加工的可能,故本文的超表

面结构采用分层切片式加工,结构剖面如图 15 所示。

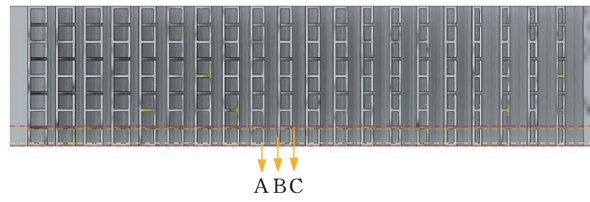


图 15 超表面结构剖面图

Fig.15 Cross section of meta-surface structure

如图 15 所示,将超表面结构切分为 A(厚度 0.14 mm)、B(厚度 0.20 mm)、C(厚度 0.20 mm) 三块,对应的数量分别为 5、24、4。将加工所得的超表面切面进行叠加,按照叠加顺序 A-B-B-B-C-B-B-B-A-B-B-B-C……,其中, A-B-B-B-C-B-B-B-A 为一层超表面结构,叠加 4 层该结构即可得到本实验所需的三维超表面结构,如图 16 所示。

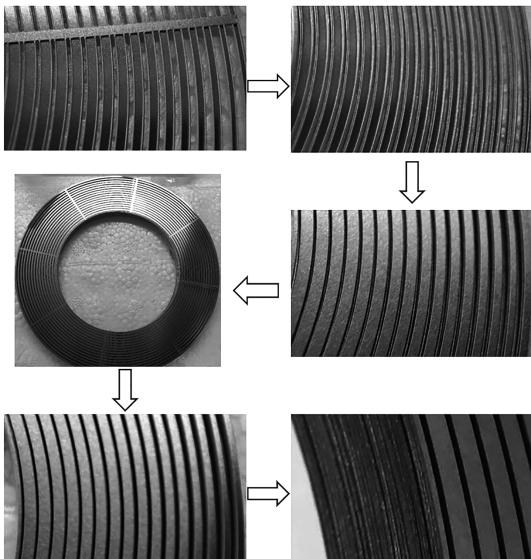


图 16 超表面切面叠加过程

Fig.16 The superposition process of meta-surface sections

本试验包括有纹影镜试验、声强检测试验,如图 17 所示。纹影镜试验结果如图 18、图 19 所示,无超表面结构的声场分布较为发散,能量相对不集中;有超表面结构的声场向中间聚集,中心声场能量高于周围声场能量。实验结果与仿真结果

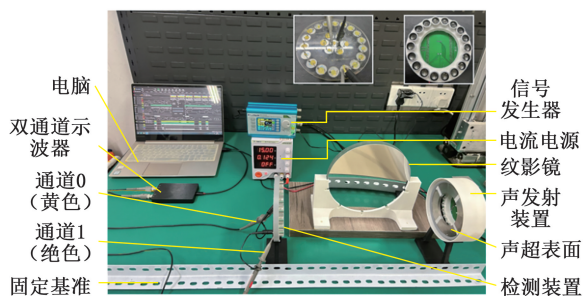


图 17 整体试验装置

Fig.17 Integral experimental setup

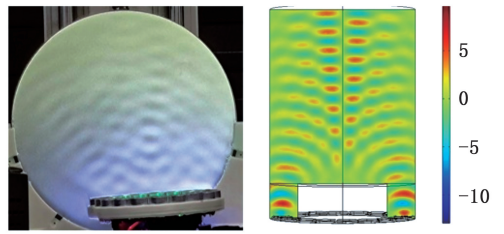


图 18 无超表面下涡旋声场图

Fig.18 Vortex acoustic field without meta-surface

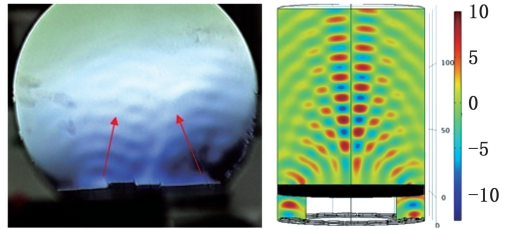


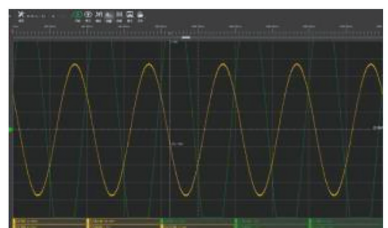
图 19 超表面下聚焦涡旋声场图

Fig.19 Focused vortex acoustic field under a meta-surface

一致,证明了环形中空声超表面结构对声发射涡旋声场具有偏转聚焦的作用。

为研究环形中空式声超表面结构对滚子时序相差涡旋声发射模型的聚焦能力,对声发射装置进行声压校核检测。检测面采用超声波接收模块 TCT25-16R,通过双通道示波器分别用黄色探头测取检测面中心(涡旋中心声场)、绿色探头测取检测面外圈(外圈声场)的声压幅值。

将检测面远离声发射装置并进行多次测试。不施加超表面结构时,外圈的声压幅值(绿色曲线)大于内圈中心的声压幅值(黄色曲线),如图 20a 所示。安装超表面结构后,内圈中心的声压高于外圈声压,如图 20b 所示。施加超表面后,声发射装置激发的周围声压能量聚焦到轴中心,这



(a) 无超表面



(b) 有超表面

图 20 声发射装置声压校核测试

Fig.20 Sound pressure verification test of acoustic emission device

与仿真、纹影法实验结果一致,聚焦有效缩短了检测距离。

### 4.2 故障轴承的声发射测试

实验装置如图 21 所示,轴承外圈固定,内圈通过电机连接并保持转速为 3500 r/min,采用透明亚克力管对试验环境进行隔音降噪处理。检测面使用的接收阵列分三层(外圈、内圈、中心轴),接收模块与“模拟轴承”检测试验的相同。

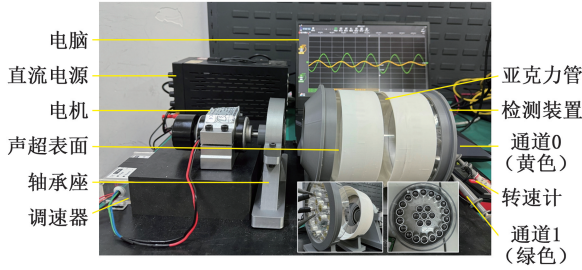


图 21 轴承故障声发射信号涡旋聚焦试验装置

Fig.21 Vortex focusing test device for bearing fault acoustic emission signal

采用激光加工设备对 NJ307 轴承的外圈、内圈和滚子进行激光烧蚀,以完成对应故障点(微裂缝)的加工,如图 22 所示。

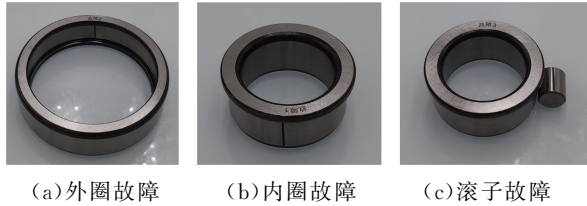


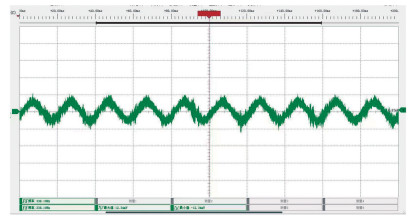
图 22 轴承故障示意图

Fig.22 Schematic diagram of bearing failure

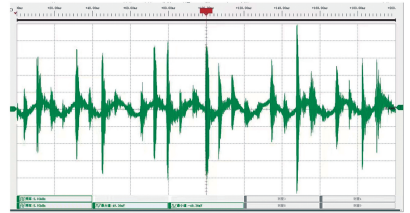
对正常轴承及 3 种故障轴承依次开展试验。在室温、短时间运转、涂油润滑的工况(下述试验工况相同)下,声发射信号声强测试的时域波形如图 23 所示(纵坐标电压  $U$  的单位刻度表示 10 mV),可以看到,故障状态下声发射信号中存在明显的“冲击”现象。经 MALLAB 编程 FFT 频谱分析,高频段 25 kHz 的中心频率信号分布集中。

对滚子单一故障点激发的声场形态进行测试分析。试验检测场景如图 24a 所示(为观测清晰,试验检测移除了亚克力罩子),2 个探头之间的夹角为  $90^\circ$ 。声场检测波形如图 24b 所示,2 个位置的声压近似相等,相位相差为  $\pi$ ,符合双涡旋特征。

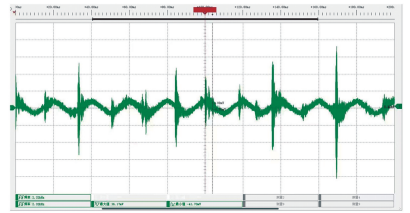
探头布置如图 25a 所示。施加超表面结构后,实测中心声压(黄色曲线)明显增大,内圈声压(绿色曲线)得到抑制,如图 25b 所示,可知故障轴承转动具有涡旋声场特性并在声超表面结构表现出聚焦特性。



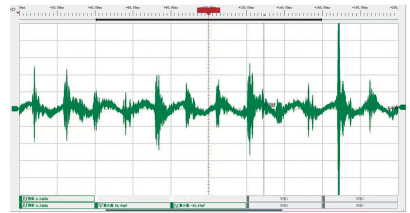
(a) 正常轴承



(b) 外圈故障轴承



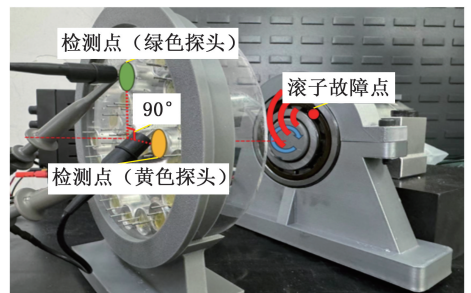
(c) 内圈故障轴承



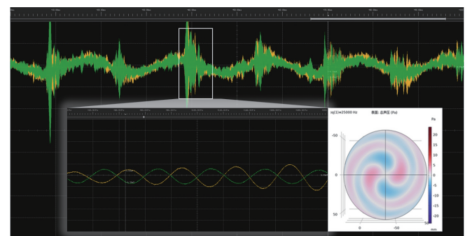
(d) 滚子故障轴承

图 23 正常轴承及故障轴承声发射信号的时域波形图

Fig.23 Time domain waveform diagram of acoustic emission signals from normal and faulty bearing



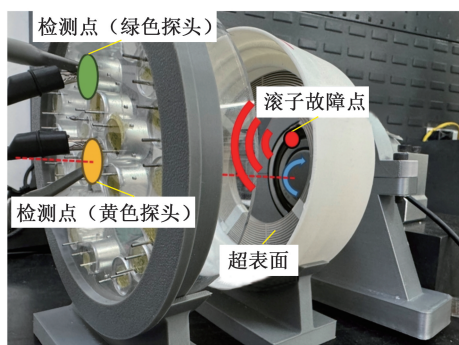
(a) 滚子故障相移检测探头布置



(b) 声场相移测试曲线

图 24 滚子故障声场下的正交声场相移测试

Fig.24 Orthogonal sound field phase shift test under roller fault sound field



(a) 滚子故障检测探头布置



(b) 超表面声场测试结果

图 25 滚子故障声场超表面聚焦测试试验

Fig.25 Experiment on meta-surface focusing test for rollerfault acousticfield

## 5 结论

1) 基于轴承故障的转动特性和声发射特性建立了轴承故障超声发射信号的时序相差声涡旋模型。基于广义斯奈尔定律,将不同声波透射单元组合成环形中空式超表面结构,建立了涡旋聚焦传输机制。

2) 仿真研究了轴承典型故障与涡旋聚焦声场特性之间的联系,建立了传输涡旋拓扑荷数  $m$  与轴承典型故障的对应关系。静态固定缺陷对应拓扑荷数  $m=0$  的点聚焦形态,滚子的单一动态缺陷对应拓扑荷数  $m=2$  的双涡旋聚焦形态。

3) 设计了 25 kHz 超声发射及接收的校核试验装置,验证了超表面结构的声涡旋聚焦功能;利用轴承故障试验平台,实测了故障轴承的声发射信号。通过测试探头检测出轴承故障的 25 kHz 超声信号,通过双通道探头空间正交、对称排列等测试方法观察到信号波形的相位差。相位差分布特征与声涡旋的拓扑荷数  $m$  对应。实际故障轴承的声发射测试结果与仿真分析、纹影镜试验结果一致。

### 参考文献:

[1] QIN Yi, LI Chengcheng, WU Xingguo, et al. Multiple-degree-of-freedom Dynamic Model of Rolling Bearing with a Localized Surface Defect[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 154:104047.

[2] GAO Shuai, CHATTERTON S, NALDI L, et al. Ball Bearing Skidding and Over-skidding in Large-scale Angular Contact Ball Bearings: Nonlinear Dynamic Model with Thermal Effects and Experimental Results[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 147:107120.

[3] GAO Shuai, HAN Qinkai, ZHOU Ningning, et al. Stability and Skidding Behavior of Spacecraft Porous Oil-containing Polyimide Cages Based on High-speed Photography Technology[J]. Tribology International, 2022, 165:107294

[4] GAO Shuai, HAN Qinkai, ZHOU Ningning, et al. Experimental and Theoretical Approaches for Determining Cage Motion Dynamic Characteristics of Angular Contact Ball Bearings Considering Whirling and Overall Skidding Behaviors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 168:108704.

[5] 景新, 曹宏瑞, 陈雪峰. 保持架打滑对航空发动机主轴承故障特征频率的影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(5):1145-1152.

JING Xin, CAO Hongrui, CHEN Xuefeng. Effect of Cage Slipping on Fault Characteristic Frequencies of Aeroengine Main-shaft Bearings[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5):1145-1152.

[6] GAO Shuai, HAN Qinkai, JIANG Ziyuan, et al. Triboelectric Based High-precision Self-Powering Cage Skidding Sensor and Application on Main Bearing of Jet Engine[J]. SSRN Electronic Journal, 2022, 99:107387.

[7] KWAK W, LEE J, LEE Y B. Theoretical and Experimental Approach to Ball Bearing Frictional Characteristics Compared with Cryogenic Friction Model and Dry Friction Model[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124:424-438.

[8] JANG G, JEONG S W. Vibration Analysis of a Rotating System due to the Effect of Ball Bearing Waviness[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 269(3/5):709-726.

[9] 张宇, 付雪艳, 李爽, 等. 多轴承支承主轴系统轴承磨损研究[J]. 机械强度, 2021, 43(6):1393-1401.

ZHANG Yu, FU Xueyan, LI Shuang, et al. Bearing Wear Analysis in Multi-bearing Spindle System [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(6): 1393-1401.

[10] 王洪伟. 航空发动机滚动轴承故障诊断与预测关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.

WANG Hongwei. Research on Key Technologies of Fault Diagnosis and Prediction of Aero-engine Rolling Bearing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[11] LIU Chang, WU Xing, MAO Jianlin, et al.

- Acoustic Emission Signal Processing for Rolling Bearing Running State Assessment Using Compressive Sensing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 91:395-406.
- [12] 胡飞. 列车轴承故障轨边声学检测系统关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013.  
HU Fei. Research on Key Technologies of Acoustic Detection System for Train Bearing Fault Rail Edge[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [13] 刘育玮, 张航, 张振臻, 等. 基于声信号的故障检测方法在运载火箭上的应用[J]. 火箭推进, 2021, 47(3):1-7.  
LIU Yuwei, ZHANG Hang, ZHENG Zhenzhen, et al. Application of Fault Detection Method Based on Acoustic Signal in Launch Vehicle[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(3):1-7.
- [14] HOU Dongming, QI Hongyuan, LI Defa, et al. High-speed Train Wheel Set Bearing Fault Diagnosis and Prognostics: Research on Acoustic Emission Detection Mechanism[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 179:109325.
- [15] DENEUVILLE F, DUQUENNOY M, OUAFTOUH M, et al. High Frequency Ultrasonic Detection of C-crack Defects in Silicon Nitride Bearing Balls[J]. Ultrasonics, 2009, 49(1):89-93.
- [16] 徐世明. 基于 HMM-SVM 的轴承声发射信号故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.  
XU Shiming. Research on Fault Diagnosis Method of Bearing Acoustic Emission Signal Based on HMM-SVM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [17] 肖文强. 基于声发射信号多特征融合卷积神经网络的滑动轴承故障诊断研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2023.  
XIAO Wenqiang. Research on Fault Diagnosis of Sliding Bearing Based on Multi-feature Fusion Convolutional Neural Network of Acoustic Emission Signal [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2023.
- [18] ZHAO Liang, KANG Le, YAO Shuang. Research and Application of Acoustic Emission Signal Processing Technology[J]. IEEE Access, 2019, 7: 984-993.
- [19] FERRANDO CHACON J L, KAPPATOS V, BALACHANDRAN W, et al. A Novel Approach for Incipient Defect Detection in Rolling Bearings Using Acoustic Emission Technique[J]. Applied Acoustics, 2015, 89:88-100.
- [20] WU Ying, YANG Min, SHENG Ping. Perspective: Acoustic Meta-Materials in Transition [J]. Journal of Applied Physics, 2018, 123(9):090901.
- [21] 欧阳华江, 周鑫, 龚柯梦, 等. 主动式声学超表面研究及其控制系统设计[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(5):441-453.  
OUYANG Huajiang, ZHOU Xin, GONG Kemeng, et al. Study of Active Acoustic Metasurface and Design of Its Control System[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(5): 441-453.
- [22] 周鑫. 可编程调节共振腔型声学超表面的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2022.  
ZHOU Xin. Study on Programmable Tuning Resonant Cavity Acoustic Supersurface[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [23] 丁昌林, 董仪宝, 赵晓鹏. 声学超材料与超表面研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(19):144-158.  
DING Changlin, DONG Yibao, ZHAO Xiaopeng. Research Advances in Acoustic Metamaterials and Metasurface [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(19):144-158.
- [24] 韩理想. 声学超表面对声波调控的研究[D]. 广州:广东工业大学, 2018.  
HAN Lixiang. Study on the Regulation of Acoustic Waves by Acoustic Supersurface[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.

(编辑 张 洋)

作者简介:吴冠武,男,1998年生,硕士研究生。研究方向为声学超结构设计加工。发表论文3篇。E-mail:guanwu\_cc@hdu.edu.cn。郭金帅\*(通信作者),男,2001年生,硕士研究生。研究方向为智能轴承、非线性声学。发表论文1篇。E-mail:231010028@hdu.edu.cn。

#### 本文引用格式:

吴冠武,吴立群,王洪成,等. 轴承故障声发射信号的涡旋聚焦传输方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(1):78-86.

WU Guanwu, WU Liqun, WANG Hongcheng, et al. A Vortex Focused Transmission Method for Bearing Fault Acoustic Emission Signal[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):78-86.