

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210435

基于耦合源误差分析的转子振动信号识别方法*

李胜波¹, 柳一凡¹, 林志树¹, 舒金吉尼斯², 罗 远¹

(1. 厦门理工学院机械与汽车工程学院 厦门 361024; 2. 奥廖尔国立大学机械电子及机器人系 奥廖尔 302026)

摘要: 转子振动信号实时监测是保障旋转机械健康运行的关键, 转子圆度误差和电涡流位移传感器误差的耦合源误差在以往的研究和振动监测中很少考虑, 使得转子振动信号有一定的失真, 甚至会引起误判。以实际转子为例, 提出了圆度误差测量表达式, 测量和分析了两种常用电涡流位移传感器的误差, 利用傅里叶拟合方法构建了圆度误差和电涡流位移传感器耦合源误差表达式, 建立了耦合源误差与转子振动信号之间的映射关系。提出了点-点法、平均值法与最大值法 3 种转子振动信号识别方法, 3 种方法都能有效识别转子振动信号, 其中点-点法最精确, 识别误差占比约 20%; 平均值法计算简便, 识别误差占比约 10%; 最大值法偏保守, 但可有效避免误判, 识别误差占比约 32%。

关键词: 转子; 耦合源误差; 傅里叶拟合; 振动信号识别

中图分类号: TH113.1 TB53 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Rotor vibration signal recognition method based on coupling source error analysis

Li Shengbo¹, Liu Yifan¹, Lin Zhishu¹, Shutin Denis², Luo Yuan¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Department of Mechanical Electronics and Robotics, Orel State University n. a. I. S. Turgenev, Orel 302026, Russia)

Abstract: Real-time monitoring of the rotor vibration signal is a key to ensure rotating machinery running steadily. The coupling source error of rotor roundness error and eddy current displacement sensor error is rarely considered in previous research and vibration monitoring, which causes distortion of the rotor vibration signal, and even causes misjudgment. Taking an actual rotor as an example, a measurement expression of the roundness error is proposed. The errors of two common eddy current displacement sensors are measured and analyzed. The expression of source error which is coupled by roundness error and eddy current displacement sensor error is constructed by Fourier fitting. The mapping relationship between coupling source error and rotor vibration signal is established. Three rotor vibration signal recognition methods are proposed, including the point-point method, the average value method and the max value method. All three methods can effectively recognize the rotor vibration signal. The point-point method is the most accurate, and its recognize error accounts for about 20%. The average value method is simple to calculate, and its recognize error accounts for about 10%. The maximum value method is conservative. However, it helps to effectively avoid misjudgment and its recognize error accounts for about 32%.

Keywords: rotor; coupling source; Fourier fitting; vibration signal identification

0 引 言

轴承-转子系统作为旋转机械的重要组成部分, 被广泛应用于多种旋转机械中^[1-4], 其运转时振动状态直接影响着旋转机械的运行可靠性。为了保障旋转机械的运行

可靠性, 进行转子振动信号监测是十分必要的^[5-6]。在转子振动状态监测中, 由加工制造所产生转子形状误差及振动位移传感器自身的误差均会对转子振动信号检测分析造成不可忽视的影响, 而在转子形状误差中的圆度误差值与轴承-转子系统运转时油膜厚度又属于同一数量级(μm 级), 因此更有必要考虑圆度误差对转子系统振

收稿日期: 2022-09-14 Received Date: 2022-09-14

* 基金项目: 福建省自然科学基金(2022J011249)项目资助

动信号的影响,以免引起轴承-转子系统运转状态误判。侯志泉等^[7]发现了转子圆度误差是轴承-转子系统中主轴形成回转误差的主要影响因素,且回转误差精度约为圆度误差的10%。Mahdal等^[8]以电涡流位移传感器、电容式传感器及机械式千分表对不同材料的实心及空心转子做了对比性实验,发现了电涡流位移传感器的测量精度受到转子的圆度影响较大。Li等^[9]发现电涡流位移传感器测量结果误差约为油膜间隙的3%~13%,且实验结果具有重复性。杨赫然等^[10]以改进遗传算法为基础,提出了针对机床主轴圆度误差和回转误差的测量分离方法,并选用电涡流位移传感器测量径向位移,成功分离了主轴形状误差和回转误差。

在转子系统振动监测中,由于电涡流位移传感器具有结构简单、体积小、灵敏度高、线性范围大、抗干扰能力强、性能稳定、不受油污等介质的影响等优点,因此广泛采用电涡流位移传感器测量转子的振动位移^[11-14]。

在使用电涡流位移传感器监测转子振动信号时,转子圆度误差和电涡流位移传感器误差通常会耦合,形成难以处理的耦合源误差信号,干扰实际测量信号,造成转子振动信号有一定失真现象,转子圆度误差和电涡流位移传感器误差的耦合源误差在以往的研究和振动监测中很少考虑。因此,本文考虑转子圆度误差及电涡流位移传感器误差的耦合源误差,进行误差补偿、平均化等有效处理,使振动信号更接近于真值,为转子振动信号实时监测和识别提供理论和实际处理方法。

1 转子圆度和电涡流位移传感器耦合源误差

1.1 转子圆度误差

圆度是指回转体零件某一横截面的实际被测轮廓与其理想轮廓的变动量,即工件截面趋近圆的程度。圆度误差指同一截面上包容被测轮廓的两个最小同心圆的半径之差,如图1所示, S_c 为实际被测轮廓, P_c 为最小包容同心圆,其中两圆的半径差即为圆度误差 f ^[15]。

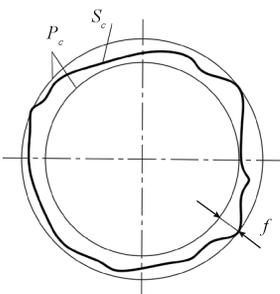


图1 转子圆度误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rotor roundness error

为了识别转子振动信号中的圆度误差,提出了如下转子圆度误差测量方法,并结合最小二乘拟合法测得圆度误差值。

如图2所示,设 xy 平面中被测转子的 n 个点的坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$,理想轮廓圆心记为 (x_c, y_c) ,其中 (x_i, y_i) 为转角为 θ_i 处的测量点坐标。

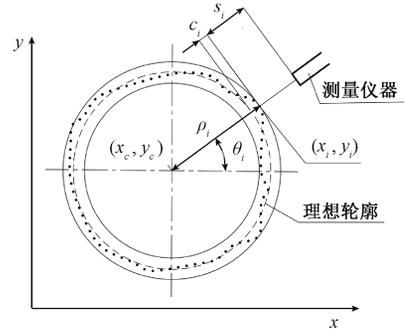


图2 圆度误差的测量

Fig. 2 Measurement of roundness error

第 i 个测量点 (x_i, y_i) 极坐标还可表示为:

$$\begin{cases} x_i = \rho_i \cos \theta_i \\ y_i = \rho_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

其中, ρ_i 为转角为 θ_i 处测量点至圆心的距离。则第 i 个点 (x_i, y_i) 至理想圆心 (x_c, y_c) 的半径为:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} = \rho_i \quad (2)$$

则可得圆度误差 f 为:

$$f = r_M - r_m = \rho_M - \rho_m \quad (3)$$

其中,下标M和m分别代表最大值和最小值。

设测量仪器在角度 θ_i 处测得转子轮廓距离值为 s_i ,在 θ_i 处的测量点至转子理想轮廓距离记为 c_i ,则 s_i 的平均值表示为:

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i \quad (4)$$

取式(4)计算 s_i 的平均值为测量仪器至转子理想轮廓距离值,则有:

$$c_i = s_i - \bar{s} \quad (5)$$

因此有圆度误差 $f = c_M - c_m$,其中 c_M 和 c_m 分别代表最大值和最小值。

1.2 电涡流位移传感器误差

电涡流位移传感器是根据电涡流效应制成的传感器,电涡流传感器能准确测量被测体(金属导体)与探头端面之间静态和动态的相对位移变化,分辨率通常在微米级到亚微米级,在精密测量中,其误差不容忽视^[16]。如图2所示,设电涡流位移传感器在角度 θ_i 处测得转子轮廓距离值为 $\delta_i(\theta_i)$,则这个测量值中包含电涡流位移

传感器误差 ε_i , 有:

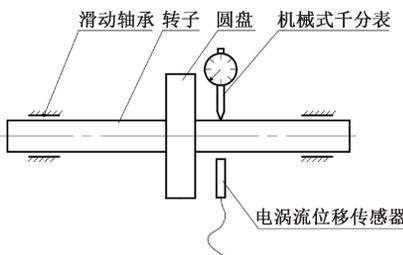
$$\varepsilon_i = c_{\delta_i} - c_i = \delta_i - \bar{\delta} - (s_i - \bar{s}) \quad (6)$$

其中, c_{δ_i} 电涡流位移传感器对转子圆度测量值, c_i 依据式(5) 计算求得。

2 转子圆度和电涡流位移传感器源误差测量实验

为了探求转子圆度误差和电涡流位移传感器误差的耦合关系, 进行了一系列转子圆度误差与电涡流位移传感器误差测量实验。

以单圆盘转子系统为基础, 转子两端采用四腔静压轴承支承, 静压 0.3 MPa 供油浮起, 将机械式千分表与电涡流位移传感器放置在转子同一截面处并与转子垂直, 保证两种仪器测量的是同一个截面处圆度(图 3)。其中转子与圆盘材质为 45 钢, 转子为实心结构, 转子直径为 38 mm, 圆盘直径 150 mm, 通过旋转转子进行测量, 旋转步长为 10° 。测量仪器采用的机械式千分表精度为 $1 \mu\text{m}$ (型号 Links); 传感器采用 CWY-DO-TR-81 型电涡流位移传感器(电涡流位移传感器 1)与 Fuchs IA6-12GM50-IU-V1 型电涡流位移传感器(电涡流位移传感器 2), 这两种传感器测量范围与分辨率相近, 可以互相对比。电涡流位移传感器数据通过 NI-DAQ 数据采集器采集, 利用式(6) 所述方法计算 δ 。



(a) 实验系统示意图

(a) Schematic diagram of the experimental system



(b) 实验系统设备图

(b) Equipment diagram of the experimental system

图 3 转子圆度误差测量系统

Fig. 3 Measurement system of rotor roundness error

测量实验前, 首先对传感器进行标定实验, 以电涡流位移传感器 1 为例, 标定结果如图 4 所示。

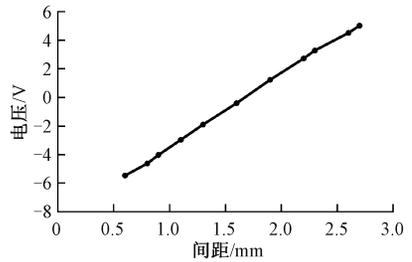
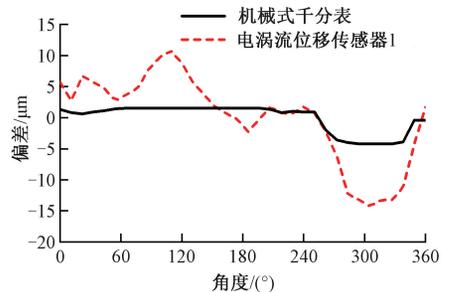


图 4 电涡流位移传感器 1 的标定实验

Fig. 4 The calibration experiment of eddy current displacement sensor 1

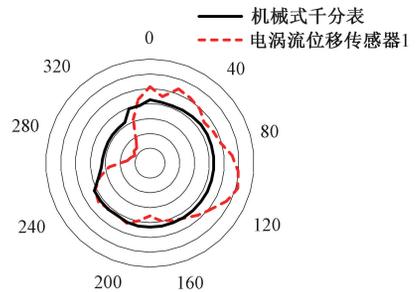
由图 4 可以看出, 电涡流位移传感器在 0.8~2.3 mm 区间内线性度良好, 斜率为 5.192 V/mm。因此, 测量时设置电涡流位移传感器探头距离被测转子间距为 1.7 mm, 使其完全工作在线性区间。

图 5 为电涡流位移传感器 1 与机械式千分表两种测量仪器对直径 38 mm 转子的圆度测量结果。



(a) 偏差-角度曲线图

(a) Deviation-angle curve diagram



(b) 偏差-角度雷达图

(b) Deviation-angle radar diagram

图 5 直径 38 mm 转子的圆度误差测量

Fig. 5 Roundness error measurement of the 38 mm diameter rotor

从图 5(a) 中可以看出, 机械式千分表测量值在 $0^\circ \sim 240^\circ$ 内均为正值, 且变化幅度较小, 在 $240^\circ \sim 360^\circ$ 内出现负值, 且呈现先减小后增大趋势。电涡流位移传感器的测量值在 $0^\circ \sim 240^\circ$ 内出现正负值的波动, 且变化幅度较

大,在 $240^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 内出现负值也呈现先减小后增大趋势,在整个 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 内电涡流位移传感器测量值较机械式千分表变化更大,两者测量值在同一测量角度处的最大差值约为 $13\ \mu\text{m}$ 。其中机械式千分表测得最大值与最小值差值约为 $5\ \mu\text{m}$,由1.1节可知此差值即为机械式千分表所测圆度误差。同理可得电涡流位移传感器1在同一转子位置所测圆度误差约为 $27\ \mu\text{m}$,因此可得电涡流位移传感器1所测直径 $38\ \text{mm}$ 转子圆度误差与机械式千分表相比多出 $22\ \mu\text{m}$ 误差。

结合图5(a)与(b)可以看出,电涡流位移传感器对转子圆度的测量值与机械式千分表的测量值变化趋势近似。但是,凹坑处传感器误差也相应增大,表明转子圆度误差与电涡流位移传感器误差存在单向耦合效应。

为了探求电涡流位移传感器的误差是否与被测转子直径相关,又以直径为 $150\ \text{mm}$ 圆盘转子为测量对象进行了同样实验。如图6所示。

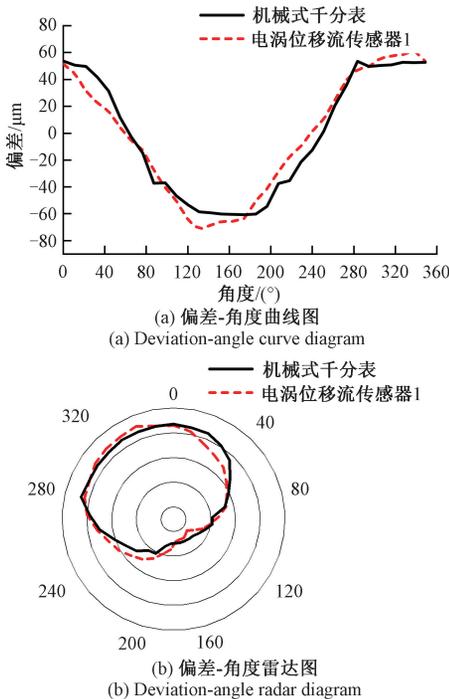


图6 直径 $150\ \text{mm}$ 转子的圆度误差测量
Fig. 6 Roundness error measurement of the $150\ \text{mm}$ diameter rotor

图6(a)显示,两种仪器在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 内均呈现先下降后上升趋势,两者测量结果在同一测量角度处的最大差值约为 $17\ \mu\text{m}$ 。图6(b)表明被测转子轮廓为椭圆,两种仪器测得圆度误差分别约为 $110\ \mu\text{m}$ 与 $134\ \mu\text{m}$,即电涡流位移传感器1所测圆度误差与机械

式千分表相比多出 $24\ \mu\text{m}$ 误差。与上一实验结果相似,两种仪器测量结果具有相同变化趋势,且电涡流位移传感器1对转子的不同直径处所测圆度误差与机械式千分表相比多出的值相近(分别为 $22\ \mu\text{m}$ 与 $24\ \mu\text{m}$),表明电涡流位移传感器具有自身误差,且被测转子直径对其影响较小。

将图5与6的电涡流位移传感器测量结果减去机械式千分表测量结果,即可分别提取出电涡流位移传感器1对所测直径转子的测量误差 ε ,将此误差除以所测转子直径 d_{ia} ,得其量纲一化误差 $\bar{\varepsilon}$,结果如图7所示。

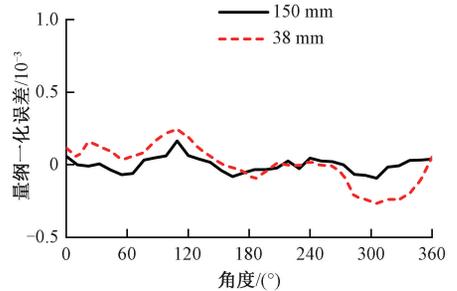


图7 电涡流位移传感器1对两种不同直径转子的测量量纲一化误差

Fig. 7 The dimensionless error of two different diameters rotors by eddy current displacement sensor 1

由图7可知,量纲一化后,电涡流位移传感器对不同直径转子的误差曲线基本吻合,由于直径 $38\ \text{mm}$ 转子处与直径 $150\ \text{mm}$ 圆盘处加工工艺不同,故两者表面粗糙度不同,对测量误差有一定影响,因此,导致误差曲线并未完全重合,进一步分析,可以认为被测转子直径对电涡流传感器误差并无影响,电涡流传感器存在着固定的误差,因此,从电涡流位移传感器测量结果直接减去千分表测量结果,即从耦合源误差中解耦出电涡流位移传感器量纲一化误差。

为了探求不同电涡流位移传感器是否具有相似的误差,采用Fuchs IA6-12GM50-IU-V1型电涡流位移传感器(电涡流位移传感器2)对直径 $38\ \text{mm}$ 转子的圆度误差进行了同样的实验。

图8为电涡流位移传感器2对直径 $38\ \text{mm}$ 转子的圆度测量值。从图8可以看出,在 $60^{\circ}\sim 280^{\circ}$ 内,两种仪器对转子测量结果均为负值,即此范围内转子有凹陷,在其他角度处转子有凸起。两种测量仪器的测量结果仍具有相似的变化趋势,且电涡流位移传感器相比机械式千分表在某个测量角度下的测量值相差最大约为 $12\ \mu\text{m}$ 。机械式千分表所测圆度误差约为 $4\ \mu\text{m}$,而电涡流位移传感器2所测圆度误差约为 $17\ \mu\text{m}$ 。

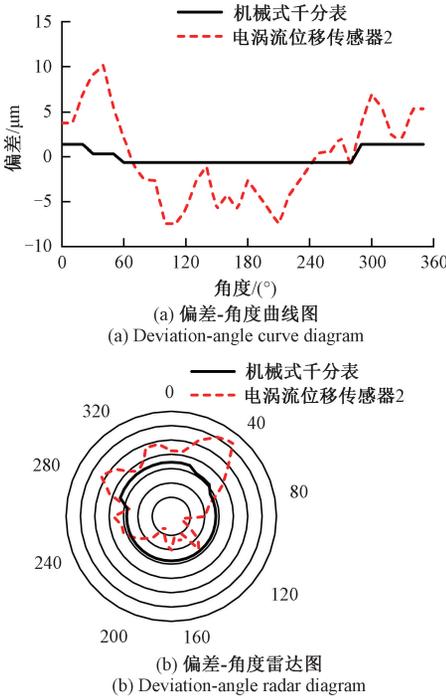


图 8 电涡流位移传感器 2 测量直径 38 mm 转子
Fig. 8 The 38 mm diameter rotor measurement by using eddy current displacement sensor 2

由图 5 和 8 实验结果可知,电涡流位移传感器 2 与电涡流位移传感器 1 有相近的误差测量值,图 5 和 8 中的机械式千分表所测圆度误差分别为 5 和 4 μm (比值为 1.25)、电涡流位移传感器所测圆度误差分别为 27 和 17 μm (比值为 1.59),图 5 中机械式千分表与电涡流位移传感器所测圆度误差幅值略大于图 8,两个实验中电涡流位移传感器所测圆度误差比值为 1.59、机械式千分表所测圆度误差比值为 1.25,进一步验证了电涡流位移传感器比机械式千分表的误差测量更具有敏感性,从而表明了电涡流位移传感器在测量时有自身误差,且可认为传感器型号对自身误差影响很小。

综上所述,测量转子圆度实验中,电涡流位移传感器测量值与机械式千分表测量值随着角度变化趋势相似,但电涡流位移传感器测量结果波动较大,两者测量值最大能产生 13~17 μm 差值。这种差值受测量转子直径和传感器型号影响较小,证明此即为电涡流位移传感器自身误差,因此属于源误差,且转子圆度误差与电涡流位移传感器源误差耦合在一起,形成耦合源误差,存在于转子振动信号监测中。当转子振幅接近于这种耦合源误差时,此耦合源误差会成为转子振动信号的主要干扰,需要采取误差分析及处理方法对监测信号加以识别。

3 转子振动信号识别方法

在第 2 节中已测出转子圆度误差 f 与电涡流位移传感器误差 ε ,其中 f 与转子自身相关,可通过文中第 2 节所用方法或其他圆度误差测量法测量;而 ε 为电涡流位移传感器自身固有误差,可以通过文中第 2 节介绍方法测量。这两种误差和为耦合源误差信号 δ ,即 $\delta=f+\varepsilon$ 。后续只需对 δ 进行分析和处理即可从实际信号中识别出真实信号。

设实际监测转子振动信号为 $x_r(t)$,并设其理想无误差信号 δ 的信号为 $x_l(t)$,转子信号对应转速为 ω (rad/s)。文中第 1 节中已有 $\delta=\delta(\theta)$,其中 $\theta=\omega t+\varphi_s$, φ_s 为 ε 的初始相位,因此, δ 也可被看作关于 t 的函数,即 $\delta=\delta(\omega t+\varphi_s)$ 。则 $x_r(t)$ 可被分解为 $x_r(t)=x_l(t)+\delta$ 。基于上述推论,本文提出了 3 种信号识别方法。

1) 点-点法

转子振动信号监测实质是采集转子在旋转过程中某一方向上的振动位移信号并分析。因此可使用采样信号与误差信号点对点相减方法进行信号识别,本文称为“点-点法”。

由于 $x_r(t)=x_l(t)+\delta$,则可得:

$$x_l(t) = x_r(t) - \delta \tag{7}$$

在文中第 2 节中已测出了一个周期内的耦合源误差信号 $\delta(\theta)$ 。可采用周期延拓 $\delta(\theta)=\delta(\theta+2\pi)$ 的方法将 $\delta(\theta)$ 扩展到整个时域,由 $\theta=\omega t+\varphi_s$,即可得 $\delta(\omega t+\varphi_s)$,延拓后采用对齐 $\delta(\omega t+\varphi_s)$ 与 $x_r(t)$ 的周期即可消除 δ 与 $x_r(t)$ 的相位差 φ_s ,将 $\delta(\omega t)$ 记为 $\delta(t)$ 。

由于 $\delta(t)=f+\varepsilon$;将量纲一化 $\bar{\varepsilon}$ 傅里叶拟合得:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_0 + \sum_{i=1}^k \bar{\varepsilon}_i \sin(i\omega t + \psi_i) \tag{8}$$

则 ε 为:

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} d_{ia} = \left(\bar{\varepsilon}_0 + \sum_{i=1}^k \bar{\varepsilon}_i \sin(i\omega t + \psi_i) \right) d_{ia} = \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^k \varepsilon_i \sin(i\omega t + \psi_i) \tag{9}$$

其中, d_{ia} 为所测转子直径, $\varepsilon_0 = \bar{\varepsilon}_0 d_{ia}$, $\varepsilon_i = \bar{\varepsilon}_i d_{ia}$ 。

圆度误差曲线的拟合为:

$$f = f_0 + \sum_{i=1}^k f_i \cos(i\omega t + \Psi_i) \tag{10}$$

则有:

$$\delta = \varepsilon + f = \varepsilon_0 + f_0 + \sum_{i=1}^k (\varepsilon_i \sin(i\omega t + \psi_i)) + \sum_{i=1}^k f_i \cos(i\omega t + \Psi_i) \tag{11}$$

设:

$$\begin{cases} \delta_0 = \varepsilon_0 + f_0 \\ \delta_i = \sqrt{\varepsilon_i^2 + f_i^2 \cos^2(\Psi_i - \psi_i)}, i \text{ 为奇数} \\ \delta_i = \sqrt{\varepsilon_i - f_i \sin \Psi_i}, i \text{ 为偶数} \\ \varphi_i = \arctan \frac{\varepsilon_i}{f_i \cos(\Psi_i - \psi_i)}, i \text{ 为奇数} \\ \varphi_i = \psi_i, i \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (12)$$

则 δ 可简写为:

$$\delta = \delta_0 + \sum_{i=1}^{2k} \delta_i \sin(i\omega t + \varphi_i) \quad (13)$$

由于两种误差分别拟合后相加之和也是傅里叶级数,与耦合源误差傅里叶拟合等效,因此,可直接对耦合源误差 δ 进行傅里叶拟合。

对 $x_r(t)$ 与 $\delta(t)$ 分别进行傅里叶拟合得:

$$x_r(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(i\omega t + \nu_i) \quad (14)$$

$$\delta(t) = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i \sin(i\omega t + \varphi_i) \quad (15)$$

将式(14)与(15)代入式(7)中,即可得识别后信号 $x_i(t)$ 。

2) 平均值法

在一般精度要求的振动信号识别中,可采用计算较为简便的平均值法。由第2节实验结果可知, δ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 旋转周期内的平均值近似等于0,因此可使用平均值法识别误差信号。

取 δ 的绝对值 $|\delta|$ 幅值的平均值,并记为 $E(|\delta|)$,使用式(7)计算理想无误差信号 $x_i(t)$:

$$x_i(t) = \frac{A - E(|\delta|)}{A} x_r(t) \quad (16)$$

其中, $E(|\delta|)$ 可以通过实验数据计算可得,因此在转子信号监测中无须再次计算。

其残差为:

$$R = x_r(t) - x_i(t) = \frac{E(|\delta|)}{A} x_r(t) \quad (17)$$

由式(10)可知,当最大振幅 A 越大时,残差 R 越小,即实际转子振动幅值越大时,平均值法识别信号越精确。

3) 最大值法

在转子振动信号实时监测时,为防止最大耦合误差对系统信号的极限影响,对振动信号真值误判,触发误动作,可采用最大值法。考虑使用 δ 的最大幅值 δ_M 作为估计误差信号,采用类似平均值法的计算方式,则识别后信号 $x_i(t)$ 为:

$$x_i(t) = \frac{A - \delta_M}{A} x_r(t) \quad (18)$$

δ_M 的值可在转子振动实验前通过第2节实验测得。

与平均值法相比,由于 δ_M 一定大于 $E(|\delta|)$,因此用最大值法识别所得信号幅值一定比用平均值法识别所得信号幅值小。

4 计及耦合源误差的实际转子振动信号识别

为探求上述信号识别方法的可行性与识别精度,对实际转子振动信号进行了分析与识别处理。

1) 点-点法

由式(8)可知,点-点法需要误差信号 δ 的拟合函数,依照图5的测量结果对 δ 进行傅里叶8级拟合可得:

$$\delta(t) = a_0 + \sum_{i=1}^8 (a_i \cos(i\omega t) + b_i \sin(i\omega t)) \quad (19)$$

其中系数值如表1所示。

表1 δ 的傅里叶拟合函数系数

Table 1 Fourier fitting function parameters of δ

名称	数值	名称	数值
a_0	0.001 05	b_1	7.785 0
a_1	-1.973 0	b_2	3.561 2
a_2	0.096 1	b_3	-0.541 7
a_3	4.238 1	b_4	0.361 1
a_4	0.858 5	b_5	0.368 6
a_5	-0.227 1	b_6	-0.259 1
a_6	0.229 5	b_7	-0.751 5
a_7	0.611 3	b_8	-0.480 9
a_8	-0.316 7		

拟合表达式(19)中 ω 为转子角速度,识别信号时,求取 δ 的零点与实际信号零点之间相位差 φ_s ,将此 $\delta(t+\varphi_s)$ 作为 $\delta(t)$ 代入式(7)即可得到识别后信号。

使用点-点法识别转频为30 Hz的转子振动信号,结果如图9所示。图9(a)为转子的轴心轨迹图,其中 x 、 y 分别为转子轴心的水平和垂直位移。可以看出,在此转速下转子发生了一定的转子不平衡,经过点-点法识别信号后,能更清晰的发现此故障,更精准地把控转子状态,此方法准确识别出了转子真实振动信号。由图9(b)可以看出,此信号振幅仅约20 μm ,识别后信号最大振幅约为16 μm ,即耦合源误差占比约20%,且对比识别前后信号,可以识别出原始信号中有被误差信号掩盖的波形。

2) 平均值法

取转频65 Hz的转子振动信号使用平均值法识别,结果如图10所示。

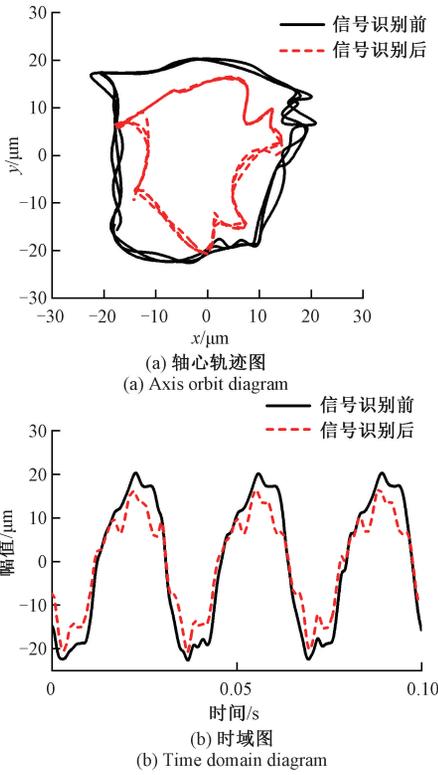


图 9 点-点法信号识别结果

Fig. 9 Results of signal identification by the point-point method

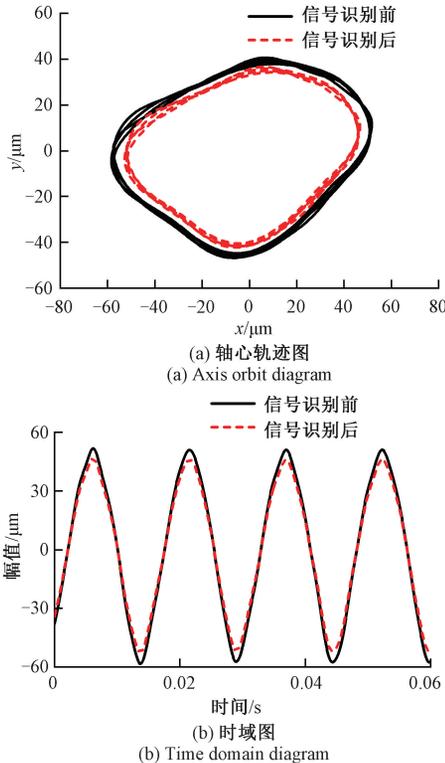


图 10 平均值法信号识别结果

Fig. 10 Results of signal identification by the average value method

从图 10 (a)轴心轨迹图可知,此转子运行较为平稳,使用平均值法识别后,能够识别更精确的轴心轨迹。图 10 (b)显示使用平均值法识别前振幅为 $51 \mu\text{m}$,而识别后约为 $46 \mu\text{m}$,识别前后相差 $5 \mu\text{m}$,即经过平均值法识别误差信号后,识别后信号幅值减小了约为 10%。在转子运行稳定情况下,平均值法能得到较准确的轴心轨迹,能够反映实际转子运转状态。

3) 最大值法

为了考察最大耦合源误差对转子振动信号的影响,识别出信号真值,对平均值法所识别信号进行最大值法识别,识别后信号如图 11 所示。

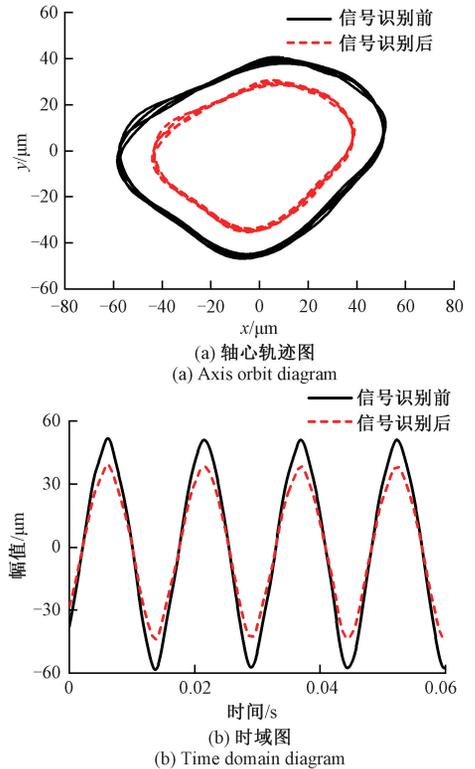


图 11 最大值法信号识别结果

Fig. 11 Results of signal identification by max value method

从图 11 中可以看出,轴心轨迹和时域图形状并未发生改变,但振动幅值减小明显。最大值法识别后振幅为 $35 \mu\text{m}$,识别前后相差 $16 \mu\text{m}$,识别后信号幅值减小了约为 32%,即最大耦合源误差对转子振动信号的影响显著。尽管最大值法识别振动信号比较保守,但是在确保实时监测转子振动信号不引起误判的场合下,最大值可有效剔除耦合源误差影响。

综上所述,点-点法在识别振动幅值较小的信号中,能够点对点对振动信号进行处理,还原真实信号,识别精确。平均值法在识别一般精度要求的信号中,由于计算简便,可作为主要识别方法。最大值法在要求振动检测

可靠性高的信号中,由于能够剔除最大耦合误差,所以可防止转子振动信号误判。

5 结 论

本文对圆度误差与电涡流位移传感器误差进行了测量和分析,两者存在单向耦合关系,得出了直径 38 mm 转子的圆度误差约为 $5\ \mu\text{m}$,两种电涡流位移传感器误差约为 $13\sim 17\ \mu\text{m}$ 。表明这两种误差的耦合源误差对转子振动监测信号有较大影响。

针对圆度误差与电涡流位移传感器耦合源误差,推导了傅里叶变换拟合函数式、极值、平均值及最大值等数学表达式,得出了适用于耦合源误差的误差式,并依此提出了 3 种转子振动信号的识别方法(点-点法,平均值法与最大值法)。

对实际转子振动信号识别表明,3 种信号识别方法中,点-点法最为精确,在幅值为 $20\ \mu\text{m}$ 实际转子振动信号中,误差信号占比约 20%,能精确地识别出转子振动信号原始振动波形,并可以作为转子振动信号滤波手段之一;在振幅 $51\ \mu\text{m}$ 的实际转子振动信号中,平均值法能识别误差信号幅值占比约 10%,因其数式简便,能够较好地实现其程序编写;而最大值法能识别误差信号幅值占比约 32%,虽较为保守,但考虑了最大耦合源误差,可用于防止转子振动状态误判。

参 考 文 献

- [1] WU X Y, ZHANG Y, CHENG C M, et al. A hybrid classification autoencoder for semi-supervised fault diagnosis in rotating machinery[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 149: 107327.
- [2] 赵博,李鹤. 结合 EMD 和 LSF 的振动信号降噪方法的研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2022, 42(3): 606-610.
ZHAO B, LI H. Noise reduction method of vibration signal combining EMD and LSF [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(3): 606-610.
- [3] 张云强,张培林,王怀光,等. 基于双时域微弱故障特征增强的轴承早期故障智能识别[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(21): 96-103.
ZHANG Y Q, ZHANG P L, WANG H G, et al. Rolling bearing early fault intelligence recognition based on weak fault feature enhancement in time-time domain [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(21): 96-103.
- [4] 徐倩倩,林茂海,刘凯,等. 轴承振动信号 PF 分量的分数低阶特征提取[J]. *振动、测试与诊断*, 2020,

40(6): 1141-1149.

XU Q Q, LIN M H, LIU K, et al. Fractional lower order feature extraction method of PF components of rolling bearings [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2020, 40(6): 1141-1149.

- [5] 曲建岭,余路,袁涛,等. 基于一维卷积神经网络的滚动轴承自适应故障诊断算法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7): 134-143.
QU J L, YU L, YUAN T, et al. Adaptive fault diagnosis algorithm for rolling bearings based on one-dimensional convolutional neural network [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7): 134-143.
- [6] 马伦,康建设,孟妍,等. 基于 Morlet 小波变换的滚动轴承早期故障特征提取研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(4): 920-926.
MA L, KANG J SH, MENG Y, et al. Research on feature extraction of rolling bearing incipient fault based on Morlet wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4): 920-926.
- [7] 侯志泉,熊万里,吕浪,等. 轴颈形状误差对液体静压主轴回转精度的影响[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(15): 147-154.
HOU ZH Q, XIONG W L, LYU L, et al. Study on the influence of the journal shape error for hydrostatic spindle rotational error motion [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(15): 147-154.
- [8] MAHDAL M, LOS J, ZAVADIL J. Verification method of rotors instability measurement[C]. *Proceedings of the 14th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2013: 228-231.
- [9] LI S, ZHOU C J, SAVIN L, et al. Theoretical and experimental study of motion suppression and friction reduction of rotor systems with active hybrid fluid-film bearings[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 182: 109548.
- [10] 杨赫然,赵桐,孙兴伟,等. 基于改进遗传算法的机床主轴径向回转误差分离技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(1): 82-91.
YANG H R, ZHAO T, SUN X W, et al. Research on radial rotation error separation technology of machine tool spindle based on the improved genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(1): 82-91.

- [11] 张炜,朱焜秋. 基于电涡流传感器的无轴承永磁薄片电机转子初始位置快速检测方法[J]. 微电机,2020,53(9):69-74.
ZHANG W, ZHU H Q. A fast initial rotor position detection method for bearingless permanent magnet slice motor based on eddy current sensors[J]. Micromotors, 2020,53(9):69-74.
- [12] 钦杰,张力平,叶云飞,等. 一种基于卷积神经网络的电涡流金属辨识方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(4):172-179.
QIN J, ZHANG L P, YE Y F, et al. Metal type identification method based on convolutional neural network and eddy current[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 34(4):172-179.
- [13] 佟宇,张东利,姜禄,等. 基于涡流检测信号的金属曲面距离测量方法研究[J]. 中国测试,2021,47(1):133-138.
TONG Y, ZHANG D L, JIANG L, et al. Research on measurement method of metal surface distance based on eddy current test signal[J]. China Measurement & Testing Technology,2021,47(1):133-138.
- [14] 周德强,王俊,张秋菊,等. 铁磁性构件缺陷的脉冲涡流检测传感机理研究[J]. 仪器仪表学报,2015,36(5):989-995.
ZHOU D Q, WANG J, ZHANG Q J, et al. Research on sensing mechanism of ferromagnetic component flaw using pulsed eddy current testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2015,36(5):989-995.
- [15] 宋慈,焦黎,王西彬,等. 面向轴孔类零件圆度误差评定的改进式最小区域圆法[J]. 中国机械工程,2022,33(9):1090-1097.
SONG C, JIAO L, WANG X B, et al. Improved minimum zone circle method for roundness error evaluation of shaft and hole parts[J]. China Mechanical

Engineering,2022,33(9):1090-1097.

- [16] 李满宏,王经天,吴玉,等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. 仪器仪表学报,2019,40(7):233-243.
LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(7):233-243.

作者简介



李胜波(通信作者),2001年于黑龙江科技学院(现更名为黑龙江科技大学)获得学士学位,2006年于俄罗斯远东国立理工大学获得硕士学位,2012年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为厦门理工学院副教授,主要研究方向为转子振动、测试与分析、流体动力润滑。
E-mail:hit4057@xmut.edu.cn

Li Shengbo (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Heilongjiang Institute of Science and Technology (Now renamed Heilongjiang University of Science and Technology) in 2001, received his M.Sc. from Russian Far Eastern National Technical University in 2006, and received his Ph.D. degree from Harbin Institute of Technology in 2012. He is currently an associate professor at Xiamen University of Technology. His main research interests include rotor vibration, measurement and analysis, and hydrodynamic lubrication.



舒金吉尼斯,2010年于奥廖尔国立技术大学获得工程师学位,2016年于图拉国立大学获得副博士学位,现为奥廖尔国立大学副研究员,主要研究方向为转子动力学、机械系统控制、测试与分析。
E-mail:rover.ru@gmail.com

Shutin Denis received his engineer's degree from Orel State Technical University in 2010, and received his Candidate of Technical Science degree from Tula State University in 2016. He is currently an associate professor and a researcher at Orel State University n. a. I. S. Turgenev. His main research interests include rotor dynamics, control systems, measurement and analysis.