

# 滚动轴承保持架位移故障诊断与测量研究

方坤礼<sup>1</sup>, 徐浩然<sup>2</sup>, 刘文军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>衢州职业技术学院, 浙江 衢州

<sup>2</sup>浙江金浙工业设备安装有限公司, 浙江 衢州

收稿日期: 2022年4月28日; 录用日期: 2022年7月8日; 发布日期: 2022年7月19日

## 摘要

涡流检测技术是一种无损、非接触式的测量检测技术。由于电涡流检测采用的电涡流传感器具有结构简单、灵敏度高、测量的线性范围大、抗干扰能力强、不受油介质影响等特点, 在位移和厚度的测量中得到了广泛的应用。位移信号传感器作为轴承保持架测量系统的反馈回路, 用于检测轴承保持架的轴向和径向位移信号, 在高速、高温的注油环境下, 位移传感器的性能至关重要。目前轴承位移测量的应用主要包括电涡流传感器、差动变压器式位移传感器和其他几种非接触式测量传感器。本文将讨论和分析电涡流传感器的应用以及其中出现的问题。

## 关键词

电涡流传感器, 轴承保持架, 位移测量, 非接触测量

# Research on Rolling Bearing Cage Displacement Fault Diagnosis and Measurement

Kunli Fang<sup>1</sup>, Haoran Xu<sup>2</sup>, Wenjun Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Quzhou College of Technology, Quzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Zhejiang Jinzhe Industrial Equipment Installation Co. Ltd., Quzhou Zhejiang

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 8<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 19<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Eddy current detection technology is a non-destructive, non-contact measurement and detection technology. Due to the eddy current sensor used in eddy current detection has a simple structure,

文章引用: 方坤礼, 徐浩然, 刘文军. 滚动轴承保持架位移故障诊断与测量研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(3): 420-425. DOI: 10.12677/jsta.2022.103051

high sensitivity, large linear range of measurement, strong anti-interference ability, independence of the oil medium, etc., it is widely used in the measurement of displacement and thickness. Displacement signal sensor is used as the feedback loop of bearing cage measurement system to detect the axial and radial displacement signals of bearing cage, and the performance of displacement sensor is crucial in the high speed and high temperature oil injection environment. The current applications of bearing displacement measurement mainly include eddy current sensors, differential transformer type displacement sensors and several other non-contact measurement sensors. This paper will discuss and analyze the application of eddy current sensors and the issues that arise in them.

## Keywords

Eddy Current Sensors, Bearing Cage, Displacement Measurement, Non-Contact Measurement

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

轴承作为一种精密零部件,广泛应用于各种旋转机械中。随着高端装备制造业的发展,对轴承的工作性能提出了更高的要求,高转速、高精度、长寿命将是未来轴承的特点[1] [2]。轴承失效的表现形式很多,例如:在高速轻载工况下,轴承常常会出现打滑现象,使得轴承早期失效,严重影响滚动轴承的使用寿命。轴承打滑较常见的一种形式为滚动体打滑,主要是由于滚动体与滚道的接触表面打滑,打滑还会造成磨损并产生噪音,滚动体与滚道打滑表现为保持架实际转速低于保持架理论计算的旋转速度。因此,对于高速滚动轴承保持架实际转速的测量及打滑率分析是极为重要的[3] [4]。在轴承回转时,保持架与滚动体、保持架与内外圈之间,润滑不足或润滑环境污染时,保持架与相互作用部件间的摩擦、磨损和碰撞加剧,产生的摩擦力和碰撞力对保持架的受力和稳定性影响很大。由于摩擦而造成轴承发热和磨损,特别是在高速运转的条件下,由于离心力、惯性力的作用,加速了轴承内部滚动体内外圈与保持架的碰撞、摩擦磨损与发热,严重时会造成保持架烧伤和断裂,致使轴承不能正常使用,保持架损坏在轴承失效形式分析中占重要地位。因此,研究保持架的运动轨迹及其稳定性是为了判断轴承的在线运转条件,以及选取轴承设计参数提供依据[5] [6]。

在本次特种轴承性能测试试验中,轴承在高温润滑油的喷淋下高速运转,并受到轴向和径向的大载荷加载以及不定时的冲击载荷。而保持架的外形和所处位置更难以进行测量。所以整个系统的难点是保持架的测量部分。非接触的位移传感器主要有电涡流传感器,差动变压器式,红外或激光位移传感器等几种。在润滑油喷淋下,红外和激光传感器基本是失效,而差动变压器式位移传感器的频响太低,不能满足高速旋转保持架的动态测量,故而电涡流位移传感器是最佳选择。

## 2. 测量原理与过程

### 2.1. 位移传感器工作原理

电涡流位移传感器的前置器内部的振荡电路产生高频振荡电流,该高频振荡电流经连接电缆进入探头内置线圈,探头由此产生高频变化的磁场。当金属被测物体靠近探头的较近位置时,金属被测物体产生涡流。涡流再生涡流磁场,磁力线方向与探头线圈相反,由此改变了探头的阻抗,引起振荡电路的振

荡电压幅值发生变化[7]。变化后的振荡电压经电压检测电路并滤波放大后，形成输出电压。由此可见，位移变化引起输出电压变化就是电涡流位移传感器的工作机理[8] [9]。

电涡流位移传感器是一种建立在电涡流效应原理上的传感器，能非接触、高线性度、高分辨率地测量探头与被测金属导体之间静态和动态的相对位移变化，广泛应用于工业现场和实验室研究。电涡流位移传感器的性能对位移测量结果有至关重要的影响，如何优化探测线圈、设计传感器电路系统和提高传感器的线性度及稳定性是设计高性能电涡流位移传感器的难点[10] [11]。

电涡流传感器测量对象直径要大于 2 倍传感器测头直径，由于该保持架的厚度仅有 4 mm，所以需要的传感器测头直径小于 2 mm。市场上这么小直径的电涡流传感器很稀少，最终选用的 AEC 电涡流传感器 PU02A 测头直径 2.2 mm。如图 1 所示。



Figure 1. Electric eddy current sensors  
图 1. 电涡流传感器

电涡流传感器在这种非标准状态下使用，传感器测头的测量会产生测值误差，所以需要重新标定校准。整体设备如图 2 所示。



Figure 2. Measuring equipment  
图 2. 设备图

## 2.2. 电涡流位移传感器的校准

电涡流传感器厂家提供的标定值是针对于标准尺寸和常规金属材质，但是实际使用状况是特殊金属材质和尺寸不标准的工件，所以存在比较大的误差。这就需要重新标定。我们采用经过计量院鉴定过的微动台架进行标定。台架的精度为 0.2  $\mu\text{m}$ ，量程 600  $\mu\text{m}$ ，而电涡流传感器的分辨率为 0.3  $\mu\text{m}$ ，量程 500  $\mu\text{m}$ ，线性度为 $\pm 2\%$ ，可以进行标定。而且在取得标定值之后，通过软件对传感器的线性进行修正，将电涡流传感器的线性度提高一倍以上，确保了测量值的准确。另外，在多次反复标定过程中，可以确认电涡流传感器的重复性稳定性良好[12] [13]。

### 2.3. 涡流传感器安装

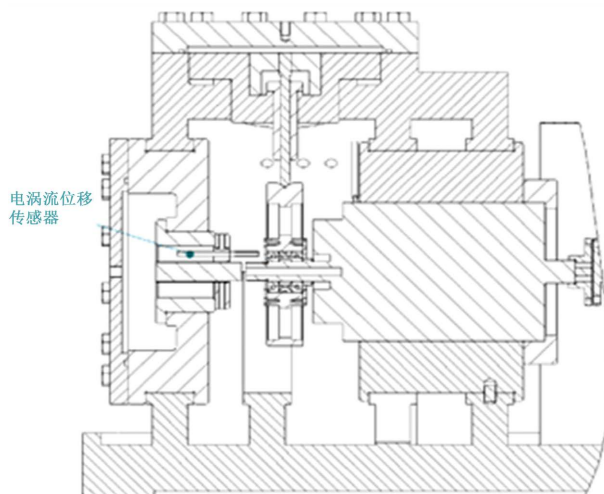
电涡流传感器标定台架如图 3 所示。



**Figure 3.** The eddy current sensor calibration bench  
**图 3.** 电涡流传感器标定台架

电涡流传感器安装条件有两个：1) 传感器需要微米级的调整。2) 传感器调整好位置，锁紧的时候不会出现位置的微量变化[14] [15]。

这就需要一套机械结构来保证了。我们根据传感器尺寸，设计制作了能够装夹传感器，能够微调传感器位置，能够锁定位置的卡具，解决了问题。电涡流传感器安装位置简图如图 4 所示。



**Figure 4.** Eddy current sensor installation  
**图 4.** 电涡流传感器安装

### 2.4. 抗干扰

电涡流传感器测量在本次应用的电气难点在于解决干扰问题。由于驱动部分采用吉泰科同步变频器 GK820-4T90，性能数据为：额定电流 176 A；驱动电机功率 90 kw；最大转速 20,000 rpm。这个变频器会

产生很强的传导干扰和辐射干扰,造成测量值严重失真。为了消除干扰,所以采用了多种办法消除干扰[16]。

#### 1) 变频器与电涡流变送器分开

将变频器安装在动力机柜内,电涡流变送器安装在控制机柜内,完全物理隔绝。并给变频器配备滤波器,减少对整个设备电源的干扰[17]。

#### 2) 信号线与动力线分开走线

为了减少模拟量受来自变频器和其它设备的干扰,将模拟量信号线与强电动力线分开走线。距离在30 cm以上。即使在控制柜内,同样要保持这样的接线规范。

#### 3) 信号线与动力线分别放置在不同的金属软管内

由于整个设备比较大,机械主体距离动力柜和控制柜较远,所以电涡流传感器的弱电信号极易受到变频器和外部设备的干扰;同时由于变频器的电抗器,所以变频器的输入和输出级动力线对外部会产生极强的干扰,因此将电涡流信号线与动力线分别单独走金属软管,以保证信号线与动力线的彻底分开。

4) 模拟量控制信号线应使用双股绞合屏蔽线,电线规格为 $0.5\text{ mm}^2$ 。在接线时对剥线以后的屏蔽层要用绝缘胶布包起来,以防止屏蔽线与其它设备接触引入干扰。

#### 5) 接地处理

a) 设备现场配电柜的接地铜排经过测量后发现的接地不太理想,所以我们在室外将1米角钢砸入地下,周围撒上盐水,重新制作了接地点,接地电阻小于 $4\ \Omega$ 。

b) 变频器的接地与电涡流模拟量信号回路各自单独接地。

c) 变频器接地线线径使用 $22\text{ mm}^2$ 。

电涡流模拟量信号回路接地线线径 $4\text{ mm}^2$ ,而且接地线在可能范围内尽量短,防止接地点离太远,接地端子的电位不安定。

d) 变频电机和设备机械主体的可靠接地。

由于传感器的金属外壳与机械主体之间是导通的,变频电机的干扰会通过机械主体传导到测器上,造成电涡流传感器的测量数值减小非常多。

e) 电涡流传感器电源的处理。

变频器干扰传感器供电电源,对测量产生较大影响。经过反复试验,采用了隔离变压器、精密稳压电源模块、滤波器模块、缠绕磁环、线性电源等方法,才最终解决了干扰问题[18][19]。

## 2.5. 数据摄取处理分析

利用AEC电涡流传感器高达20 K赫兹的反应频率,通过NI公司的16位多功能同步采集卡PCI-6143,NI的CVI开发软件进行开发。在变载负载下,对高速旋转的轴承保持架轴向多点高速同步数据摄取,经过数据处理和计算,最终可以得到保持架打滑度、倾斜角、动态轨迹等重要的性能参数,为下一步的轴承性能改进提供了有力支撑。

## 3. 结束语

电涡流传感器是一种非接触的线性测量工具,它能够准确测量出被测体和探头端面的相对位置,该传感器可靠性好、灵敏度高、有较强的抗干扰能力,还能准确分析出设备的工作状况及故障原因。本文通过合理布置AEC电涡流传感器对大型旋转机械的保持架打滑度、倾斜角、动态轨迹等重要的性能参数等参数进行实时监测。

## 基金项目

衢州市科技计划指导性项目(2020010, 2019006)资助。

## 参考文献

- [1] 吴磊涛, 王东, 苏振中, 等. 异极式永磁偏置径向磁轴承的建模与实验[J]. 电工技术学报, 2018, (5): 1051-1057. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170094>
- [2] 张维煜, 朱焯秋, 袁野. 磁悬浮轴承应用发展及关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 12-20.
- [3] 张云鹏, 薛博文, 刘淑琴, 等. 基于气隙磁通边缘效应的轴向混合磁轴承承载力解析计算[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(9): 54-59, 67.
- [4] 高辉, 徐龙祥. 主动磁悬浮轴承系统拍振现象分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 104-112.
- [5] 董宏林, 闫颖鑫, 王科俊, 等. 径向电磁轴承气隙磁阻近似计算方法分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 43-47.
- [6] 朱焯秋, 丁书玲. 计及边缘效应的交流混合磁轴承建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6528-6535.
- [7] 张云鹏, 刘淑琴, 李红伟, 等. 基于磁路分析的轴向混合磁轴承径向承载力解析计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 137-142.
- [8] 赵旭升, 邓智泉, 汪波. 永磁偏置径向磁轴承的原理分析与参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 127-134.
- [9] 李明岩, 司东宏, 余永健, 等. 轴承试验机磁性离合机构磁力装置的设计分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(2): 39-44. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3881.2022.02.008>
- [10] 王荣辉. 考虑磁路耦合的自传感磁轴承及其电磁阻尼控制[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2021.
- [11] 侯旭辰. 主动磁悬浮轴承结构设计及磁场与力的特征分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [12] 曹东辉, 赵文祥, 吉敬华, 等. 基于网格剖分法的磁通切换永磁电机等效磁网络建模与分析[J]. 中国科学(技术科学), 2021, 51(8): 970-980. <https://doi.org/10.1360/SST-2020-0388>
- [13] Le, Y., Fang, J.C., Han, B.C., *et al.* (2014) Dynamic Circuit Model of a Radial Magnetic Bearing with Permanent Magnet Bias and Laminated Cores. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, **46**, 43-60. <https://doi.org/10.3233/JAE-141746>
- [14] 钟建朋, 李黎川. 一种开关驱动的电涡流式位移传感器的原理与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(11): 2453-2460.
- [15] 王志强, 刘刚, 李红. 磁轴承用电涡流位移传感器串扰产生及抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1035-1040.
- [16] 王晓丽, 段春霞, 周阳. 光电稳定跟踪装置框架间非线性解耦[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 999-1002.
- [17] 陈虎勋, 田新启. 电涡流传感器对被测材料敏感性的实验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2009(10): 13-15, 24.
- [18] 高敏, 卢文科, 孙仁涛. 基于二维回归分析法的霍尔电流传感器温度补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(2): 100-104.
- [19] 金超武, 徐龙祥. 差动变压器式位移传感器及其在磁悬浮轴承中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 78-84.