doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.048

轴类零件电跳动在位测量方法*

茅　健[1]　陈小龙[2]　林载誉[2]　杨将新[2]　曹衍龙[2]

(1.上海工程技术大学机械工程学院,上海 201620;2.浙江大学机械工程学系,杭州 310027)

摘要:电跳动误差反映了轴类零件表面材料的电磁性质分布差异,加工过程中对此类零件电跳动进行在位测量有助于检验电跳动是否满足加工和机器运行的要求,对控制产品的质量和保证工作性能十分重要。本文提出了一种基于电涡流的电跳动轴类零件在位测量技术,首先介绍了电涡流传感器的工作原理及其电涡流分布规律,然后建立了电跳动检测的有限元分析模型,最后搭建了电跳动在位测量系统,针对空压机转子进行了电跳动在位测量试验,测量结果验证了系统的有效性。

关键词:轴类零件　电跳动　电涡流检测　有限元　在位测量

中图分类号:TP216　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)05-0310-05

引言

轴类零件在经过锻造、表面处理等加工过程后,其表面电磁性质会出现分布不均问题,回转时电涡流传感器可能识别为位移的偏移[1],实际上此偏移量是不存在的,这部分偏移量称为电跳动(Electrical runout, ERO),电跳动和机械跳动分别体现了零件表面材料电磁性质不均性和机械加工误差,被电涡流传感器检测为综合跳动[2-3],影响传感器测到的振动监测值。因此,电跳动进行在位测量有助于检验轴类零件电跳动是否满足加工要求,对于控制产品的质量以及保证工作性能尤为重要[4]。

国内外学者开展了有关研究,建模理论研究方面,Theodoros[5]提出在线圈周围一定距离处加上磁场绝缘边界,利用偏微分方程理论将线圈阻抗积分表达式转化为级数表达式。于亚婷[6]建立了线圈阻抗计算的统一数学模型,通过数学物理方法推导出磁性及非磁性被测体的阻抗表达式,并设计相关求解算法。Kim[7]利用传感器和被测体的几何与电磁数据进行电涡流传感器的建模,可以预测传感器输出且能预测与输出相关的被测体媒质的性质。Veeraraghavan[8]根据涡流的集肤效应探测不同厚度层的电导率大小,构建了沿试件厚度分布的电导率模型。测量补充技术方面,Petar[9]用电跳动信号对涡流传感器的输出进行动态补偿,以提高探头测量精度。黄春霞[10]提出了在线检测与补偿误差的方法,可达到微米级定位要求。孙惠娟[11]利用机器视觉技术对机床旋转轴转角定位误差进行检测,为此类误差的补偿提供了依据。实际检测系统研究方面,Kikaganeshwala[12]提出一种电驱动轴类零件低转速测量和相应修补方法来降低电跳动和机械跳动的误差值。

然而,目前电跳动测量仪器尚无法较好地分离机床主轴回转误差所引入的测量误差。本文提出一种电跳动轴类零件在位测量技术,建立电跳动涡流检测的有限元分析模型,搭建轴类零件的电跳动在位测量系统,实现对空压机转子电跳动的在位测量。

1　基本理论

电跳动误差测量依靠电涡流传感器进行,电涡流传感器通过探头线圈阻抗作为输出来反映被测量,线圈阻抗是研究电涡流检测机理的一个至关重要的物理量,有限元法在求解此类问题中有着广泛的应用[13-14]。

1.1　工作原理

电涡流传感器工作原理如图 1 所示,主要元件是一只固定在框架上的扁平线圈,线圈与一电容并联,构成并联谐振回路。线圈通以高频电流 $I_1(t)$,产生一高频交变磁场 $H_1(t)$。当被测导体靠近传感器时,在磁场作用范围内的导体表层便产生了与电流 $I_1(t)$ 方向相反的电涡流 $I_2(t)$,而此电涡流又将产生一交变磁场 $H_2(t)$,阻碍磁场 $H_1(t)$ 的变化。

收稿日期:2013-10-27　修回日期:2013-12-25

*国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB706505)

作者简介:茅健,副教授,博士,主要从事精密检测与控制、计算机辅助精度设计的研究,E-mail:jmao@sues.edu.cn

通讯作者:曹衍龙,教授,博士生导师,主要从事计算机辅助公差设计、检测与控制、质量工程等研究,E-mail:sdcaoyl@zju.edu.cn

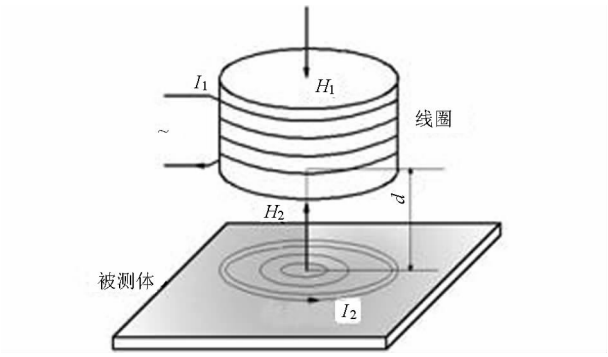


图 1　涡流检测工作原理图

Fig. 1　Principle of eddy current measurement

被测体中的焦耳热和磁滞损耗造成交变磁场能量的损失。该能量损耗使得传感器等效阻抗 Z、等效电感 L、品质因数 Q 变化。而传感器的等效阻抗、等效电感、品质因数与传感器至被测体间距离(即提离)d、被测体电导率 σ、磁导率 μ 以及线圈激励频率 f 有关,可表示为

$$\begin{cases} Z = F_1(d,\sigma,\mu,f) \\ L = F_2(d,\sigma,\mu,f) \\ Q = F_3(d,\sigma,\mu,f) \end{cases} \tag{1}$$

测量仪表中传感器的频率为定值,因此如果将其他 3 个参数中的 2 个保持不变,就可将剩余参数转化为传感器输出等效阻抗、等效电感或品质因数来实现相关参数的测量。

1.2　电涡流分布规律

电涡流是被测表面上垂直于磁力线的封闭漩涡状感应电流,其分布呈现一定规律。由于集肤效应[15],电涡流集中在靠近激励线圈的金属导体表面,其强度随被测体深度的增加而呈指数衰减。

根据平面电磁波理论,在导电媒质中,波传播常数 $\dot{k}$ 表达为

$$\dot{k} = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} - \mathrm{j}\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \beta - \mathrm{j}\alpha \tag{2}$$

式中　β——相位常数　　α——衰减常数

ω——激励电流角频率

通常采用集肤深度 δ 来表示电磁波在被测体内的衰减或穿透能力,定义为电磁波场强衰减到表面值的 1/e 时与表面的距离,即

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \tag{3}$$

从式(2)可以看出,激励磁场并不能无限制穿透被测导体,其穿透深度与激励频率以及被测体电磁性质有关。在被测体已定时,激励频率越高,集肤深度越小;激励频率越低,集肤深度越大。工业中大多数涡流检测的频率选在 5 Hz 到 10 MHz 之间。

环状涡流的具体形状和分布与线圈的位置有密切关系。假设在金属板上方 d 处放置一个内径 r_1、外径 r_2 的线圈,涡流环路可以看作以线圈轴线为中心的无数个同心短路环,其中任意环的电涡流密度是环半径和综合磁感应分布的函数。按照劳斯提出的有限分割环计算方法,涡流分布规律可近似表达为

$$\frac{J_r}{J_0} = \begin{cases} v^4 \mathrm{e}^{-4(1-v)} & (0 \leqslant v \leqslant 1) \\ v^{14} \mathrm{e}^{-14(1-v)} & (1 \leqslant v) \end{cases} \tag{4}$$

式中 $v = r/r_2$,J_0 为 $r = r_2$ 处最大电流密度。可知涡流的形成范围大约在线圈外径 vr_2 的 0.5 ~ 1.8 倍范围内,涡流密度最大值发生在 $r = r_2$ 附近的狭窄区域内。

2　电跳动检测有限元建模

由于线圈频率、匝数较低,有限元法需进行如下假设[5]:电流密度及场量均随时间按正弦规律变化;线圈激励电压在其区域内均匀分布;探头运动速度影响忽略;线圈中涡流忽略;各材料的电导率和磁导率均为常数;位移电流可忽略;被测电阻率温度效应可忽略。

有限元法通过划分单元将连续区域离散成三角形或者四边形区域,采用分片插值来获得求解区域内任意点的值。需要先求得磁矢势,进而求得阻抗,磁矢势通过能量最小求得。

电磁感应问题场能分布通常利用磁矢势 A 描述,即

$$\nabla^2 A - \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -\mu J \tag{5}$$

在轴对称模型以及激励电流正弦变化的情况下,涡流控制方程可以写成

$$\frac{\partial^2 A}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial A}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{\rho^2} = -\mathrm{j}\omega\mu\sigma A \tag{6}$$

根据电磁场理论,满足第一类和第二类边界条件的泊松方程泛函为

$$S(A) = -\frac{1}{2}\iint_R (\nabla^2 A^2 + 2A^2 \mathrm{j}\omega\mu\sigma)\rho \mathrm{d}\rho \mathrm{d}z \tag{7}$$

根据 Green's 定理,能量方程为

$$S(A) = -\iint_R \left[\frac{1}{2\mu}\left(\left|\frac{\partial A}{\partial z}\right|^2 + \left|\frac{\partial A}{\partial \rho} + \frac{A}{\rho}\right|^2\right) - \mathrm{j}\omega\sigma|A|^2\right]\rho \mathrm{d}\rho \mathrm{d}z \tag{8}$$

其中 R 为求解域。对 $S(A)$ 求偏导,并使导数为零,得能量最小时的磁矢势矩阵方程

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{G}^{-1}\boldsymbol{Q} \tag{9}$$

式中　$\boldsymbol{A}$——$n \times 1$ 阶磁矢势矩阵

$\boldsymbol{G}$——$n \times n$ 阶系数矩阵

$\boldsymbol{Q}$——$n \times 1$ 阶激励矩阵

n——单元节点数

得到各个节点上的磁矢势量之后,可得出线圈电流 I,线圈激励电压已知为 U,则线圈阻抗为

$$Z=\frac{UI_r}{I_r^2+I_i^2}-\mathrm{j}\frac{UI_i}{I_r^2+I_i^2} \tag{10}$$

式中 I_r——电流实部 I_i——电流虚部

在电跳动误差涡流检测模型中,主要有电涡流传感器线圈、被测轴零件和近场空气 3 种媒质。对于电涡流传感器而言,因被测轴直径超过线圈外径 10 倍以上,可认为被测表面为平面,因此被测体可简化为立方体形状。由于模型中的传感器、被测体、空气几何形状和载荷都呈轴对称分布,建模时只取对称轴右边 1/2 部分。图 2 为电跳动涡流检测的二维有限元分析物理模型。

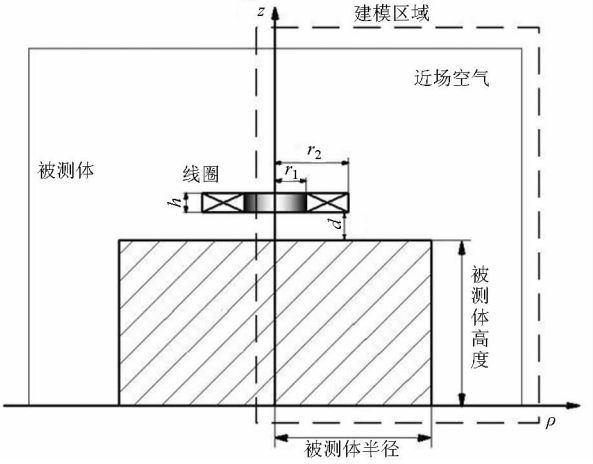


图 2 物理模型

Fig. 2 Physical model

采用 ANSYS 的 APDL 进行参数化建模,模型中根据经验简化了包围在线圈和被测体四周的空气,用矩形建立空气模型。在涡流区域,谐波模型只能用矢量位方程描述。模型分析对象具有轴对称性,对称轴两边励磁相位方向相反,所以对分析区域的边界施加狄利克莱边界条件。模型中线圈采用交流电压驱动,$U_0=24$ V,频率为 1 MHz。在谐波分析下加载电压载荷,设置电压交流频率,然后从后处理观察磁力线、电流实部、电流虚部等分析结果。

将被测体表面的涡流密度对其表面径向路径进行映射,得到模型被测体中的电流密度径向分布,如图 3 所示。从涡流密度分布曲线可以看出,涡流密度沿被测体半径曲线呈现抛物线形状,且在线圈外径附近出现最大值。这与上节所述涡流径向分布规律相一致,由此可证明有限元模型的正确性。

根据有限元模型,可以分析检测参数对涡流场的影响规律,即将检测参数对象作为自变量,改变其数值并重新建模得出涡流场分析结果,以此得出涡流场磁力线分布和它影响的线圈阻抗输出的变化情况。

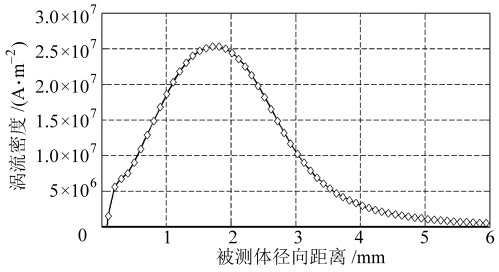


图 3 涡流密度沿被测体径向分布

Fig. 3 Radial distribution of eddy current density in measured object

利用有限元模型计算不同提离下的阻抗特性图,确定特性线斜率,拟合直线截距与提离的对应关系,然后在传感器阻抗信号处理部分取得阻抗的电阻和感抗分别输出。在检测过程中,对于每一个测点的阻抗数据都可在阻抗分析图中找到其位置,确定该点的特性线截距。最后由截距与提离的关系确定实际提离大小,与传感器输出提离比较即可获得由材料电磁性质变化引起的电提离,从而实现电跳动误差的检测。

3 实例

为了验证本文提出的测量方法,建立图 4 所示的电跳动在位测量系统总体框架,测量系统由控制模块、采集模块、传输模块和数据处理模块组成。根据图 4 搭建了测量系统,首先分别用本系统和国外检测设备对数控车床的电动机转子样棒进行检测,在转速 60 r/min 下对同一位置重复测量数次,测量结果见表 1。用国外检测设备对电动机转子样棒试验进行测量,电跳动误差为 12.3 μm, 机械跳动误差为 4.8 μm,综合跳动误差为 12.0 μm。

可以看出两次测量结果吻合度较好,利用本系统得到的测量结果比用国外设备的测量结果精度要高。

然后对空压机转子进行测量,试验分别测量了轴颈、中间位置在不同主轴转速下的电跳动、机械跳动等误差,测量结果如表 2 所示。

分析空压机转子试验中不同转速下的测量结果可以看出,转速对于跳动误差的测量结果有一定影响。虽然消一次谐波使得转速造成的主轴旋转偏心的差异在一定程度上得以消除,但由于主轴回转误差的存在,实际在位测量时应对测量转速做一定范围的限定。此外,对于同一位置测量结果反映的跳动变化趋势大致相同,它们截取相位的差异主要是由于定转速手动测量模式造成的,如采用磁钢自动触发测量方式,则截取相位大致相同。

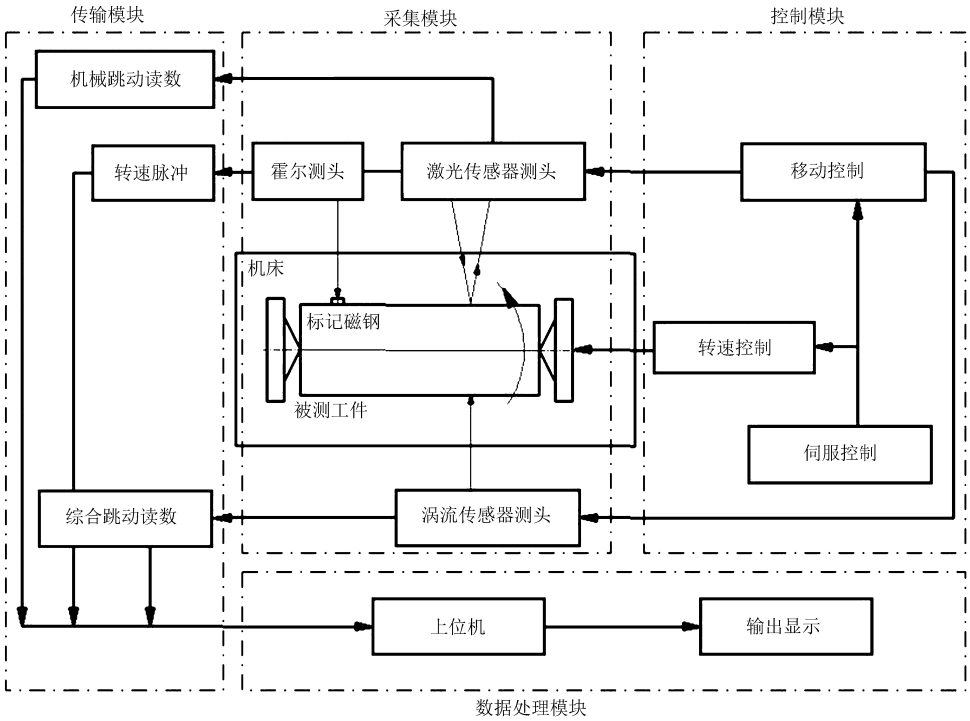


图 4　电跳动在位测量系统总体结构图

Fig. 4　Framework of on-site measuring system of ERO

表 1　电动机转子样棒测量结果

Tab. 1　Measurement result of sample rotor　μm

序号	电跳动误差	机械跳动误差	综合跳动误差
1	11.58	3.29	11.95
2	12.87	5.68	11.40
3	12.53	3.46	12.77
4	11.70	3.46	11.38
5	11.77	4.02	11.41
6	11.62	4.81	11.71
均值	12.01	4.12	11.77
方差	0.55	0.95	0.54

表 2　空压机转子试验测量结果

Tab. 2　Measurement result of air compressor rotor

序号	测量位置	主轴转速/($r \cdot min^{-1}$)	电跳动误差/μm	机械跳动误差/μm	综合跳动误差/μm
1		50	58.57	10.06	53.57
2	轴颈	60	62.52	10.19	59.09
3		80	63.97	9.85	58.06
4		50	47.71	14.59	36.51
5	轴中间	60	47.84	13.50	42.08
6		80	53.21	14.80	46.00

4　结束语

电跳动误差的在位检测对于空压机、汽轮机等回转机械主轴加工质量的保证及其运行状态稳定性的监测与控制都具有重要意义。提出了一种电跳动涡流检测在位测量方法，建立了电跳动涡流检测的有限元分析模型。搭建了轴类零件的电跳动在位测量系统，针对空压机转子进行了电跳动在位测量，验证了本测量方法的有效性和可靠性。

参　考　文　献

1　Littrell N. Understanding and mitigating shaft runout[J]. Orbit Magazine, 2005, 25(3): 5 – 17.

2　王伯平. 互换性与测量技术基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2004:10 – 105.

3　张玉梅, 左春柽, 李春芳. 基于 IRM 和小波变换的圆度误差在线检测技术[J]. 农业机械学报,2009,40(7):212 – 216.
Zhang Yumei, Zuo Chuncheng, Li Chunfang. Roundness on-machine measurement method based on IRM and wavelet transform [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 212 – 216. (in Chinese)

4　De Block M J, Wood B M, McDonnell J W. Predicting shaft proximity probe track runout on API motors and generators[C]//2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 2007:1 – 8.

5　Theodoulidis T P, Kriezis E E. Impedance evaluation of rectangular coils for eddy current testing of planar media[J]. NDT & E International, 2002, 35(6): 407 – 414.

6　于亚婷. 与被测材料无关的电涡流传感器基础理论与实现方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2007.
Yu Yating. Theory and method of implementation based on independent of measured material eddy current sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2007. (in Chinese)

7 Kim T O, Lee G S, Kim H Y, et al. Modeling of eddy current sensor using geometric and electromagnetic data[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2007, 21(3): 465 - 475.

8 Sundararaghavan V, Balasubramaniam K, Babu N R, et al. A multi-frequency eddy current inversion method for characterizing conductivity gradients on water jet peened components[J]. NDT & E International, 2005, 38(7): 541 - 547.

9 Petar B Petrovic, Zivana Jakovljevic. Dynamic compensation of electrical run-out in eddy current contactless measurements of non-stationary ferromagnetic target[J]. Sensor Letters, 2009, 7: 191 - 202.

10 黄春霞,曹其新,付庄,等. 晶圆对心转台亚微米级径跳误差补偿方法[J]. 机械工程学报,2008,44(9):123 - 127.
Huang Chunxia, Cao Qixin, Fu Zhuang, et al. Submicron radial runout error compensation method for the turntable in a wafer prealigner[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 123 - 127. (in Chinese)

11 孙惠娟, 蒋红海, 殷国富. 基于机器视觉的五坐标机床旋转轴误差检测方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 293 - 298.
Sun Huijuan, Jiang Honghai, Yin Goufu. Error measurement method for rotation axes of five axis machine tool based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 293 - 298. (in Chinese)

12 Kikaganeshwala Y. Method for measuring slow roll characteristics of partially machined shaft of an electrodynamic machine: U. S. Patent Application 12/818,308[P]. 2010 - 6 - 18.

13 Féliachi M. 3-D movement simulation techniques using FE methods: application to eddy current non-destructive testing[J]. NDT & E International, 2007, 40(1): 35 - 42.

14 Yang L, Han B, Sun J. Analysis of eddy current displacement sensor based on FEM by using Ansys[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(10): 15 - 17.

15 张玉民, 戚伯云. 电磁学[M]. 北京:科学出版社, 2007: 304 - 357.

On-site Measuring Method for Electrical Runout on Main Shaft

Mao Jian[1] Chen Xiaolong[2] Lin Zaiyu[2] Yang Jiangxin[2] Cao Yanlong[2]

(1. *College of Mechanical Engineering*, *Shanghai University of Engineering Science*, *Shanghai* 201620, *China*
2. *College of Mechanical Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 510641, *China*)

Abstract: Electrical runout (ERO) reflects the heterogeneity of electromagnetic characteristics on surface of shaft. On-site measurement can inspect whether the ERO satisfies the processing and the machine operating requirements. It is very important for controlling the product quality and ensuring the working property. An on-site measurement technology of ERO on shaft based on eddy current was presented. Firstly, the working principle of eddy current sensor and the distribution of eddy were introduced. Then, a finite element analytical model for measuring ERO was developed. Finally, an on-site measurement system was set up to measure the ERO of air compressor main shaft. The results verify the validity of measurement system.

Key words: Shaft part Electrical runout Eddy current measurement Finite element analysis On-site measurement