

DOI: 10.3901/JME.2009.11.078

差动变压器式位移传感器及其在磁悬浮 轴承中的应用*

金超武 徐龙祥

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要: 针对差动变压器式位移传感器的性能及其在磁悬浮轴承中的应用, 理论分析传感器与磁悬浮轴承转子之间加入不同隔层时对传感器输出的影响; 对传感器进行静态和动态标定, 并将其应用于2自由度和5自由度磁悬浮轴承试验台进行静态和动态悬浮。研究表明: 该传感器测试范围在 $-0.5 \sim +0.5$ mm时, 线性度可达 $\pm 1.38\%$, 灵敏度为 20.18 mV/ μm , 截止频率在 800 Hz左右; 理论分析加入非导磁隔层不影响传感器性能, 但实际中涡流、漏磁等多方面原因将影响传感器的静态性能; 在2自由度试验台上实现磁悬浮转子2自由度的静态悬浮, 不加入隔层时转子的静态位移振动峰峰值小于 5 μm , 加入隔层时转子的静态位移振动峰峰值小于 10 μm ; 在5自由度试验台上实现了磁悬浮转子的高速旋转, 转速为 30 kr/min, 不加隔层时转子两端的径向振动峰峰值为 25 μm , 加入隔层时转子两端的径向振动峰峰值为 25 μm , 但波形没有不加隔层时规则。研究结果为差动变压器式位移传感器的设计, 并将其应用于磁悬浮轴承系统中提供一定的理论和试验基础。

关键词: 差动变压器 位移传感器 主动磁悬浮轴承 隔层

中图分类号: TP212.1 TH133.3

Differential Transformer Displacement Sensors and Application in Active Magnetic Bearings

JIN Chaowu XU Longxiang

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Different sensor outputs with different interlayer added between the sensor and rotor are theoretically analyzed in view of the performance of differential transformer displacement sensor and its application in active magnetic bearing (AMB) system. The sensors are statically and dynamically calibrated and applied to both two degrees of freedom and five degrees of freedom AMB systems for static and dynamic suspensions. The results show that the linearity of the sensor is $\pm 1.38\%$, sensitivity is 20.18 mV/ μm in the measuring range of $-0.5 \sim +0.5$ mm, and the cut-off frequency reaches 800 Hz. The sensor performance is not affected by non-magnetic layers according to the theoretical analysis result, but the eddy current, magnetic flux leakage, etc. In actual applications have an impact on the static and dynamic properties of the sensor. The two-degree-of-freedom magnetic rotor can be statically levitated, the vibration magnitude of rotor in the radial direction without the interlayer is less than 5 μm , and the magnitude is 10 μm when a non magnetic-conducting thin wall is installed between the sensor and the rotor. The five-degree-of-freedom magnetic rotor can be stably suspended and rotated up to 30 kr/min, and the vibration magnitude of rotor two ends in the radial direction is 25 μm . When a non magnetic-conducting thin wall is installed, the magnitude does not change, but the wave shape is not as regular as the former one. The results provide a theoretical and experimental foundation for the design of the differential transformer displacement sensor and its application in AMB system.

Key words: Differential transformer Displacement sensor Active magnetic bearing Thin wall

0 前言

磁悬浮轴承是利用磁场力将转子悬浮于空间,

使转子和定子之间没有任何机械接触的一种新型高性能轴承, 由于它具有无机摩擦、能耗低、噪声小、寿命长及无污染等优点, 在航空航天等多个工业领域有着广泛的应用前景^[1]。位移传感器作为磁悬浮轴承系统的检测部分, 其类型、结构以及安装位置都直接影响检测信号的精度和磁悬浮轴承的性

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2006AA05Z205)、国家自然科学基金重点(50437010)和江苏省“六大人才高峰”(07-D-013)资助项目。
20081124 收到初稿, 20090610 收到修改稿

能^[2]。目前国际上用于磁悬浮轴承的位移传感器主要有电涡流传感器、电感传感器、电容传感器、光电传感器和激光传感器^[3]。电容传感器由于受空间限制，电容极板面积一般很小，所以电容量小，阻抗很高，给测量电路带来一定的困难，而且容易受分布电容的影响。光电传感器对工作环境要求苛刻，如灰尘等污物会直接影响其灵敏度和工作点，而且随着时间的推移，光电器件的灵敏度也会下降。电涡流传感器具有结构简单、灵敏度高和不受油污影响等优点，磁悬浮轴承系统中多采用电涡流传感器^[4-6]，但是电涡流传感器也存在一些不足之处。

(1) 在某些特殊应用场合，如防尘，隔离等，需要在磁悬浮转子和定子之间加一层金属隔层，由于电涡流传感器反映的是金属表面的运动，加入固定的金属隔层时，电涡流传感器就不能检测磁悬浮转子的运动。

(2) 每个自由度采用一个电涡流传感器时，会由于结构原因而产生测量误差，使控制精度降低。使用两个电涡流传感器构成差动输出虽然可以克服上述缺陷，但成本会大幅度提高，结构也更趋于复杂，而且在装配时，很难保证两个差动传感器的原始位移相同，由此会增加测量时传感器的温度漂移。

(3) 由于电涡流传感器激励频率较高，所以在使用时必须考虑连接导线的分布电容对传感器的影响，不适合较长距离的信号传输。

差动变压器式位移传感器具有电涡流传感器没有的一些优点。

(1) 可在磁悬浮转子和传感器之间加一层非导磁金属隔层^[7]。

(2) 通过加工可以保证两个差动的传感器原始位移相同，可减小位移测量时温度漂移。

(3) 差动变压器式位移传感器的载波频率比较低，导线分布电容对传感器影响比较小。

(4) 差动变压器式位移传感器的研究为无传感器磁悬浮轴承的研究奠定了一定基础^[8]。

国际上选用差动变压器式位移传感器的灵敏度可达 20 mV/μm 以上，使用效果良好^[9]，法国的 S2M 公司已经采用了这种传感器。汪希平等^[2]对此类传感器进行了理论分析和试验研究，并推荐使用此类传感器。杨朝英等^[10]对影响差动变压器式传感器性能指标的主要参数进行了试验对比，主要参数为线圈匝数、磁极夹角、激励信号幅值、激励频率和转子材料等。

1 变压器输出仿真

1.1 无隔层传感器输出

差动变压器式位移传感器是基于变压器原理制成的，它将被测物体位移的变化转换为互感的变化，导致次级线圈感应电压也产生相应的变化，再采用相应的处理电路将线圈感应出来的电压信号转换为与被测物体位移大小和方向对应的直流电信号。

图 1 所示是差动变压器的基本结构图。从图 1 中可以看出差动变压器上下两只铁心上各有一个初级线圈 N_1 (也称励磁线圈)和一个次级线圈 N_2 (也称输出线圈)。上下两个初级线圈串联后接交流励磁电源电压 U_{in} ，两个次级线圈则按电势反相串联。

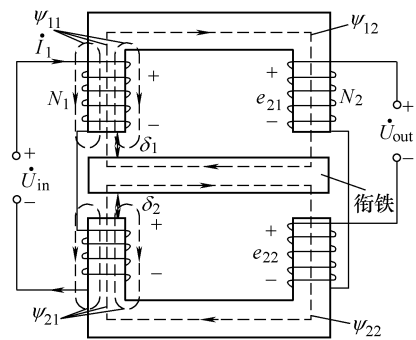


图 1 差动变压器结构示意图

当铁心的初级线圈通入交变电流 \dot{I}_1 时，在次级线圈中感应出电势 e_{21} 、 e_{22} ，其值为 \dot{E}_{21} 、 \dot{E}_{22} 。变压器输出

$$\dot{U}_{out} = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} = -j\omega \dot{I}_1 (M_1 - M_2)$$

式中 \dot{U}_{out} ——差动变压器输出电压

\dot{E}_{21} 、 \dot{E}_{22} ——上、下次级线圈感应电势值

\dot{I}_1 ——初级线圈激励电流

M_1, M_2 ——上、下铁心线圈 N_1 对线圈 N_2 的互感系数

ω ——电源角频率

若初级线圈的品质因数足够高，可进一步推出差动变压器电压输出

$$\dot{U}_{out} = \frac{N_2(R_{up} - R_{down})}{N_1(R_{up} + R_{down})} \dot{U}_{in} = \frac{2N_2(\delta_1 - \delta_2)}{N_1\mu_0 S(R_{up} + R_{down})} \dot{U}_{in} \quad (1)$$

式中 R_{up}, R_{down} ——变压器上、下磁路磁阻

加入隔层时变压器输出值大于不加入隔层时变压器输出值。

图 5 为衔铁位移取某一固定值时隔层材料的 μ_r 与变压器上下磁路磁阻的关系图。从图 5 中可以看出,随着 μ_r 的增加,上下磁路的磁阻都呈下降趋势,而它们之间的差值则先增加后减小。式(2)中的 R_2 和 R_4 都随 μ_r 的增加而变小,而 R_3 和 R_5 不变, μ_r 的增加导致整个磁阻变小,所以上下磁路的磁阻都呈下降趋势。当 $\mu_r=1$ 时, R_5 和 R_4 的值为同一个数量级, R_2 则比它们高一个数量级, R_2 和 $2R_5+2R_4$ 是并联关系, R_5+R_4 对于式(2)中分式部分的值影响较大, μ_r 增加时, R_2 和 R_4 减小,由于 R_4 的减小 R_5+R_4 中 R_5 的权重系数越来越大;当 μ_r 增大到一定值时使 $R_2=2R_5+2R_4$, μ_r 再增大, R_2 的减小对式(2)中分式部分的值影响增大,导致 R_5 的权重系数减小,所以衔铁移动气隙 δ'_1 对磁路的磁阻大小的影响程度随 μ_r 的增大先增加后减小。这使得上下磁路磁阻相差大小值也是先增大后减小,从而使变压器输出在隔层材料磁导率变化时出现极值。同时也说明随着 μ_r 的增大, $2R_5+2R_4$ 的值先小于 R_2 , 然后会大于 R_2 , 磁路中的磁通则从变压器铁心、气隙和衔铁磁回路通过转移到从变压器铁心、气隙和隔层磁回路通过,用于检测衔铁位移的磁通越来越小,所以变压器输出电压也越来越小。

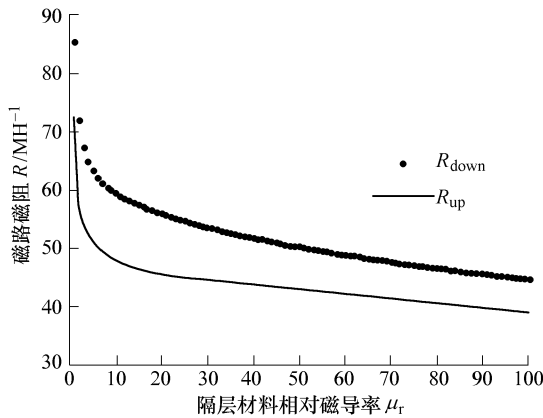


图 5 隔层材料与磁路磁阻的关系

通过选取不同相对磁导率的隔层,对衔铁位移在 $-0.4\sim+0.4\text{ mm}$ 变化时(位移正负号仅表示衔铁移动方向)变压器输出作了仿真,结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,隔层的 $\mu_r=10$ 时,相对无隔层时变压器灵敏度增加了 13.78%,这和前面的仿真相符。当隔层的 $\mu_r=100$ 时,相对于无隔层变压器灵敏度下降 25.51%。而 $\mu_r=500$ 时,变压器输出衰减比较明显并且出现了非线性。这说明加入非导磁

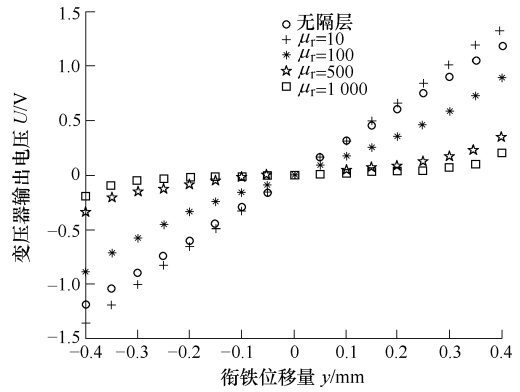


图 6 衔铁位移与传感器输出关系

材料隔层时,理论上是不破坏变压器的灵敏度和线性度的,而加入导磁材料隔层时,变压器线性和灵敏度明显变差。

2 信号处理电路

AD598 芯片集成了正弦交流激励信号的产生与放大、输入信号的解调、放大和温度补偿等几部分电路。AD598 芯片能适应多个不同类型的差动变压器,它驱动差动变压器初级线圈的激励电压有效值可达 24 V,接收差动变压器次级线圈输出电压有效值可低至 100 mV;AD598 由外加电容决定差动变压器初级线圈的激励频率,频率范围为 20 Hz~20 kHz;AD598 采用比值方案,因此差动变压器初级与次级线圈之间的相位偏移不会影响整个电路的性能。由于这些突出的特点,使得用该芯片设计的传感器测量电路结构大大简化。

3 传感器静态性能

3.1 静态标定

一个高精度传感器必须有良好的静态和动态特性,这样它才能完成信号(或能量)无失真的转换。衡量传感器静态特性的重要指标有线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

对传感器进行静态标定的装置部分剖面图如图 7 所示。差动变压器式传感器固定在座体上,转子固定在滑块上,通过给滑块一个左右方向的位移,滑块带动转子相对于差动变压器式传感器产生一个径向的位移,相对位移的大小由一个千分尺读出。

传感器的测试范围为 $-0.5\sim+0.5\text{ mm}$ (其中位移的零点表示平衡位置,位移的“+”和“-”表示偏离平衡位置的不同方向),每隔 0.05 mm 测一个数据,重复试验多次记录试验数据。

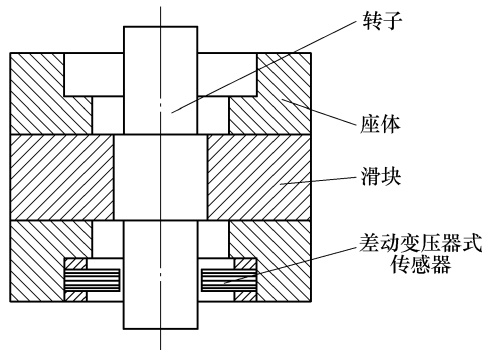


图7 静态标定装置的部分剖面图

用 Matlab 软件对其中一组试验数据进行线性拟合,如图8所示为转子位移和差动变压器式传感器输出电压拟合曲线图,通过计算可得图8的灵敏度为 $20.18 \text{ mV}/\mu\text{m}$,线性度为 $\pm 1.38\%$ 。

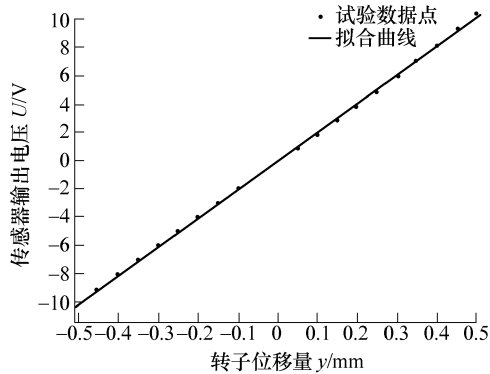


图8 静态标定拟合曲线图

3.2 动态标定

一个性能优良的传感器不仅要有良好的静态特性,而且还应具有良好的动态特性,因而必须对所研制的传感器进行动态标定。动态标定盘如图9所示,动态标定盘圆周为均匀凹凸分布结构。高速电动机带动动态标定盘旋转,使差动变压器式传感器得到一个三倍频于电动机转速的激励信号。

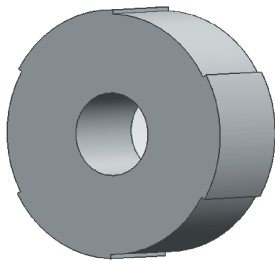


图9 动态标定盘

差动变压器式位移传感器动态标定装置简图如图10所示。高速电动机带动动态标定盘以不同转速旋转时,相对于传感器就产生一个高频激励信号,使用示波器记录传感器的输出波形。通过计算机对示波器数据进行计算,绘制出传感器的幅频特性曲线。

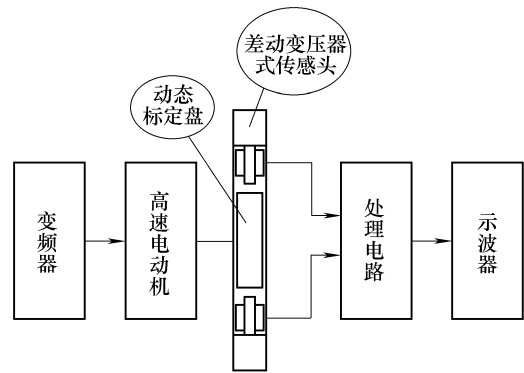


图10 动态标定装置简图

差动变压器式位移传感器的幅频特性图如图11所示。

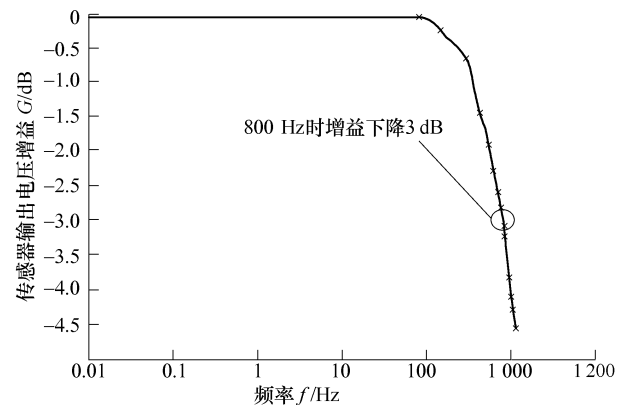


图11 差动变压器式传感器幅频特性图

从图11可以看出,在频率为 800 Hz 时,差动变压器式位移传感器输出电压增益下降了 3 dB ,说明传感器的截止频率为 800 Hz 。通过适当提高差动变压器式位移传感器初级线圈电压的激励频率可以提高传感器的动态性能,但是随着激励频率的提高转子上的涡流效应也更加明显,这就限制了传感器的带宽^[12]。

通过标定,差动变压器式位移传感器的静态性能如表2所示。从表2中可以看出:在测试范围内差动变压器式位移传感器具有良好的静态性能,而受激励频率的限制动态性能不够理想,但是所研制的差动变压器式位移传感器能够满足一般磁悬浮轴承系统的应用要求。

表2 传感器的性能指标

测试范围 y/mm	线性度 $e_L/\%$	灵敏度 $S_n/(\text{mV} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	迟滞 $e_H/\%$	重复性 $e_R/\%$	截止频率 f_c/Hz
-0.50~ +0.50	± 1.38	20.18	± 0.11	± 0.44	800

4 在磁悬浮轴承系统中的应用

4.1 静态悬浮

通过仿真研究得出在差动变压器式传感器和

转子间加入非导磁隔层是不会影响传感器性能的，但仿真是基于不考虑传感器漏磁和涡流影响下进行的。为验证所研制的差动变压器式传感器在不加入和加入非导磁隔层时都能正常工作，设计并制作了一个 2 自由度试验台，其原理图如图 12 所示。此试验台所实现的是转子在水平方向 2 自由度的静态悬浮。保护环(防止转子与磁悬浮轴承磁极吸死)与转子的单边间隙为 0.125 mm，磁悬浮轴承磁极与转子的单边间隙为 0.25 mm，差动变压器式传感器磁极与转子的单边间隙为 1 mm，非导磁隔层厚度为 0.1 mm。

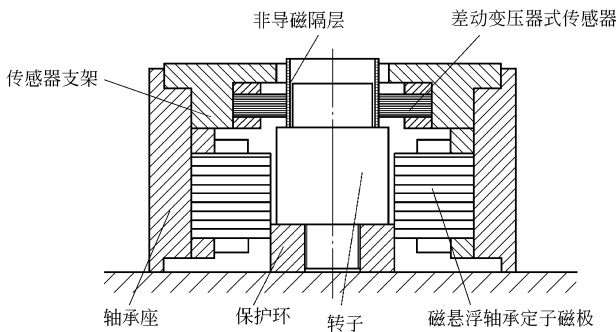


图 12 加入隔层试验台原理图

当差动变压器式传感器与转子之间不加入非导磁隔层时，在 2 自由度试验台上进行静态悬浮，转子静态悬浮时用示波器交流显示传感器输出电压信号的峰峰值小于 100 mV，传感器灵敏度设置为 20 mV/μm，表明转子的静态位移振动峰峰值小于 5 μm，转子的静态悬浮是非常稳定的。

当加入隔层后，转子仍然能悬浮在轴承中心位置，且转子的静态位移振动峰峰值小于 10 μm。试验表明：磁悬浮转子与差动变压器式传感器之间加入非导磁隔层，转子静态位移振动峰峰值有所增加，加入非导磁隔层后致使差动变压器式传感器性能有所下降，但传感器仍能正常工作。

4.2 动态悬浮

为了检测差动变压器式传感器的运行特性，将差动变压器式传感器应用在 5 自由度磁悬浮轴承试验台上，进行了高速运转试验，转子转速为 30 kr/min，即转动频率为 500 Hz。

5 自由度磁悬浮轴承试验台的原理图如图 13 所示，磁悬浮转子其中的 2 径向自由度位移由差动变压器式传感器检测，另外 2 径向自由度和轴向的位移由电涡流传感器检测。

5 自由度磁悬浮轴承试验台转子高速旋转时，4 径向自由度的位移传感器信号如图 14 所示。其中第一和第二通道为电涡流传感器的位移检测信号，第三和第四通道为差动变压器式传感器的位移检测信号。从图 14 中可以看出，转子 30 kr/min 转速运转

时，电涡流传感器检测到磁悬浮转子的振动峰峰值为 500 mV，差动变压器式传感器检测到磁悬浮转子的振动峰峰值同为 500 mV。两类传感器的灵敏度同为 20 mV/μm，则转子两端的径向振动量都为 25 μm。

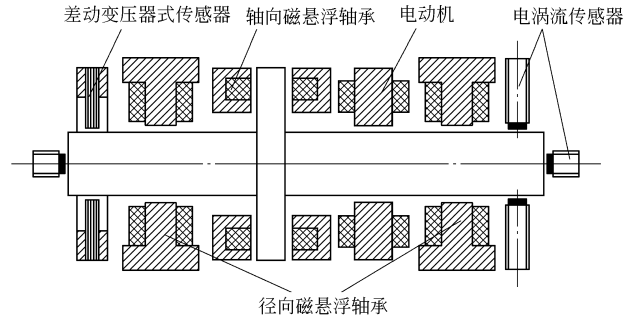


图 13 5 自由度磁悬浮轴承试验台原理图

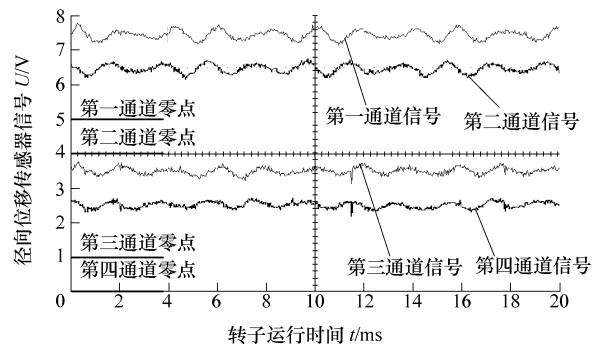


图 14 转子 500 Hz 转动径向位移信号图

从图 14 可以看出，转子在高速运转时，位移信号峰峰值之间的时间为 2 ms，对应为 500 Hz，说明和转速同频的振动一直占主导地位，通过调试控制参数，其幅值不是很大，不会导致转子失稳。在此磁悬浮系统中，所研制的差动变压器式传感器能像电涡流传感器一样完成转子位移的检测功能。

为验证在 5 自由度试验台上差动变压器式传感器和转子之间加入非导磁隔层，转子仍能动态悬浮，在差动变压器式传感器和磁悬浮转子之间加入了一层厚度为 0.1 mm 的非导磁隔层，并实现了转子在 30 kr/min 的高速旋转。

在差动变压器式传感器和转子之间加入非导磁隔层后 5 自由度试验台转子高速旋转 4 径向自由度的位移信号图如图 15 所示。加入非导磁隔层后，转子在高速旋转时的 4 径向位移信号没有不加隔层时的规则，但位移信号中和转速同频的振动同样一直占主导地位。试验表明：加入非导磁隔层后，在转子高速旋转时差动变压器式传感器仍然能工作，但由于涡流效应、漏磁加剧等原因，差动变压器式

传感器的部分性能受到影响。

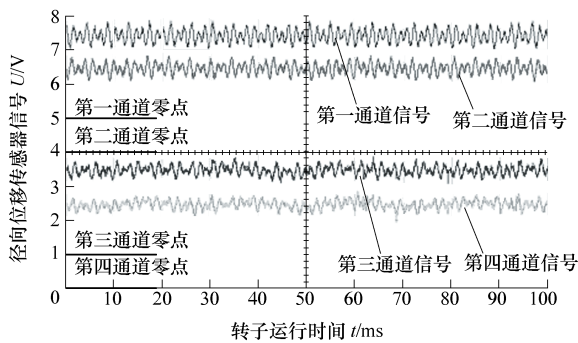


图 15 加入隔层转子 500 Hz 转动径向位移信号图

5 结论

(1) 所研制的差动变压器式位移传感器在测试范围内线性度可达 $\pm 1.38\%$,灵敏度为 $20.18 \text{ mV}/\mu\text{m}$,截止频率在 800 Hz 左右,安装到 5 自由度磁悬浮试验台能实现高速运转,试验结果表明差动变压器式位移传感器能够满足一般磁悬浮轴承的应用要求。

(2) 加入非导磁隔层后理论上不影响差动变压器式位移传感器的磁路,所以不会影响差动变压器式位移传感器的性能,但从实际的试验显示,加入隔层后传感器性能受到影响,效果变差。加入隔层后影响传感器性能的因素还须进一步研究,为差动变压器式位移传感器应用于特殊应用场合的磁悬浮轴承系统提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] SCHWEITER G, BLEULER H, TRAXLER A. Active magnetic bearings-basics, properties and application of active magnetic bearings[M]. Zurich: VDF Hochschulverlag AG an der ETH, 1994.
- [2] 汪希平, 崔卫东. 电磁轴承用非接触式位移传感器的研究[J]. 上海大学学报, 1998, 4(1): 54-60.
WANG Xiping, CUI Weidong. Investigation on contact-free displacement sensors for active magnetic bearings [J]. Journal of Shanghai University, 1998, 4(1): 54-60.
- [3] BOEHM J. Sensors for magnetic bearings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(29): 2 962-2 964.
- [4] LARSONNEUR R, BÜHLER P. New radial sensor for active magnetic bearing[C]// Proceedings of the Ninth International Symposium on Magnetic Bearings, August 3-6, 2004. Kentucky, USA: University of Kentucky Bearings and Seals Laboratory, 2004: 86-90.
- [5] XU Longxiang, ZHANG Jinyu, SCHWEITER G. High temperature displacement sensor[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 3(18): 449-452.
- [6] BURDET L, MAEDER T, SIEGWART T, et al. Thick film radial position sensor for high temperature active magnetic bearing[C]// Proceedings of the Tenth International Symposium on Magnetic Bearings, August 21-23, 2006. Martigny, Switzerland: EPFL Lausanne and Politecnico di Torino, 2006: 37-41.
- [7] MORIYAMA S, WATANABE K, HAGA T. Inductive sensing system for active magnetic suspension control [C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Magnetic Bearings, August 5-7, 1998. Cambridge: Technomic Publishing Company, 1998: 529-537.
- [8] DIAZ D, GARCIA A, BARANDIARAN J, et al. Comparative study of alternative circuit configuration for inductive sensors[J]. Sensors and Actuators, 2001, A91(1-2): 226-229.
- [9] HABERMANN H, LIARD G L. Practical magnetic bearings[J]. IEEE Spectrum, 1979, 16(9): 26-30.
- [10] 杨朝英. 电感传感器在磁悬浮轴承中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
YANG Chaoying. Research on inductive sensor for active magnetic bearings[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [11] 孟立凡, 郑宾. 传感器原理及技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.
MENG Lifan, ZHENG Bin. The principle and technology of sensor[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2002.
- [12] NOH M D, JEONG M K, PARK B C. Development of a low cost inductive sensor using switching noise demodulation[C]//Proceedings of the Eighth International Symposium on Magnetic Bearings, August 26-28, 2002. Japan: Dynamics and Control Lab, Dept. of Mechanical Eng., Ibaraki University, 2002: 311-314.

作者简介: 金超武, 男, 1980 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机电一体化。

E-mail: jinchaowu@nuaa.edu.cn

徐龙祥, 男, 1959 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电一体化。

E-mail: fqp@nuaa.edu.cn