

高温磁悬浮轴承用位移传感器的研究

金超武^{*}, 徐龙祥, 朱益利

南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016

摘要: 针对差动变压器式位移传感器的性能及其在高温磁悬浮轴承中的应用, 对环境温度升高影响差动变压器式位移传感器(DTDS)性能的机理和特征以及所采用的温度补偿技术进行了研究。采用比值方式的电路以及加入补偿电阻的方法改善了温度升高所带来位移传感器灵敏度升高、温度漂移和时间漂移的问题。对不同温度下的差动变压器式位移传感器进行标定得到了位移传感器的动静态性能, 并将其应用到单自由度高温磁悬浮轴承(HTAMB)试验台上进行静态和模拟动态悬浮。研究表明, 环境温度为 550 °C, 被测物体移动范围在 -0.35~+0.35 mm 时, 位移传感器的灵敏度在 19.62 mV/ μm , 线性度为 $\pm 0.74\%$, 迟滞性为 $\pm 0.40\%$, 重复性为 $\pm 0.97\%$, 传感器截止频率在 800 Hz 左右; 在单自由度高温磁悬浮轴承试验台上使用所研制的高温位移传感器, 能实现被悬浮物体的稳定悬浮。

关键词: 高温; 位移测量; 传感器; 变压器; 磁悬浮轴承; 航空发动机

中图分类号: V233.4⁺5; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2014)01-0230-10

磁悬浮轴承由于其无磨损、无需润滑、回转速度高等优点, 已经越来越多地应用在高速旋转机械中^[1]。高温磁悬浮轴承主要应用在航空多电发动机领域, 航空多电发动机是以传统航空燃气涡轮发动机为基础, 装配主动磁悬浮轴承、内置一体化起动机/发电机、分布式电子控制系统、电动燃油泵和电力作动器等新部件和系统的一种新型航空发动机^[2]。航空多电发动机具有普通航空发动机无法比拟的优点, 已经是国内外研究的热点。高温磁悬浮轴承作为航空多电发动机关键技术之一, 国内外相继对其开展了研究。目前市场上能够买到的位移传感器只能在 180 °C 以下工作, 无法适应发动机的工作环境, 虽然可以采用冷却的方式, 但需要复杂的冷却系统, 不能充分发挥磁悬浮轴承的优点。因此, 研制、开发能够在 550 °C 左

右工作的位移传感器是实现高温磁悬浮轴承最关键的核心技术之一^[3-4]。

1994 年美国的 Meeks 等所研制的高温磁悬浮轴承, 其位移传感器采用电感式位移传感器, 高温位移传感器线圈的导线材料和绝缘方法采用与高温磁悬浮轴承定子线圈相同制作工艺^[5]。美国德雷伯实验室(Draper Laboratory)的高温位移传感器采用磁通传感器^[6-8], 日本 Ebara 公司的高温位移传感器也采用电感式位移传感器^[9], 而美国 Synchrony 公司的高温位移传感器则采用电容传感器^[10]。在 2006 年第 10 届国际磁悬浮轴承会议上, 瑞士联邦技术研究所 Burdet 等采用厚膜技术制造出一种高温电涡流位移传感器, 能工作在 600 °C^[11]的环境下。国内南京航空航天大学已成功研制出能应用于 550 °C 的电涡流位移传感器, 此高温位移传感器常温下灵敏

收稿日期: 2013-03-30; 退修日期: 2013-06-19; 录用日期: 2013-07-04; 网络出版时间: 2013-07-16 13:40

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130716.1340.001.html

基金项目: 国家自然科学基金(51075200); 江苏省自然科学基金(BK2011070)

* 通讯作者. Tel.: 025-84892594 E-mail: jinchaowu@nuaa.edu.cn

引用格式: Jin C W, Xu L X, Zhu Y L. Research on displacement sensor of high temperature active magnetic bearing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 230-239. 金超武, 徐龙祥, 朱益利. 高温磁悬浮轴承用位移传感器的研究[J]. 航空学报, 2014, 35(1): 230-239.

度为 $7.81 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 当温度升高到 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 其灵敏度为 $7.22 \text{ mV}/\mu\text{m}^{[12-13]}$ 。

本文以差动变压器式位移传感器为研究对象, 对环境温度升高影响差动变压器式位移传感器性能的机理和特征以及所采用的温度补偿技术进行了研究, 改善了由于温度升高带来的位移传感器灵敏度升高、温漂和时漂问题, 在 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境下, 对差动变压器式位移传感器进行动静态标定, 并将其应用到单自由度高温磁悬浮轴承试验台上, 这些研究成果将为高温磁悬浮轴承应用到航空多电发动机上奠定一定的基础。

1 差动变压器式位移传感器的原理

差动变压器式位移传感器是基于变压器原理制成的, 是将被测物体位移的变化转换为初级线圈与次级线圈互感的变化, 从而引起次级线圈感应电压发生变化, 最后通过外部处理电路将次级线圈上的感应信号转换为与被测物体位移大小和方向相对应的直流电压信号^[14]。

差动变压器的结构原理简图如图 1 所示。图中 N_{a_1} 、 N_{a_2} 为差动变压器上下两只铁芯上初级线圈(也称励磁线圈)的匝数; N_{b_1} 、 N_{b_2} 为差动变压器上下两只铁芯上次级线圈(也称输出线圈)的匝数; U_{in} 为两个初级线圈串联后所接交流励磁电源电压; U_{out} 为两个次级线圈按电势反相串联的输出; δ_1 为上变压器铁芯与被测物体间气隙; δ_2 为

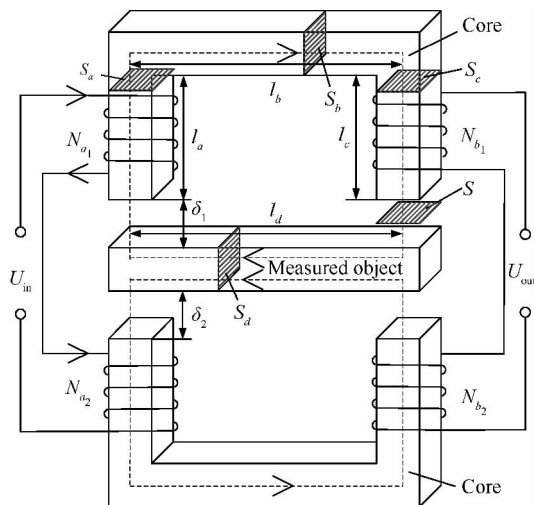


图 1 差动变压器或位移传感器结构原理简图

Fig 1 Diagram of differential transformer displacement sensor structure

下变压器铁芯与被测物体间气隙; $l_i (i=a, b, c, d)$ 为各段导磁体(变压器铁芯和被测物体)的长度; S 为铁芯与被测物体间气隙截面积; $S_i (i=a, b, c, d)$ 为各段导磁体(变压器铁芯和被测物体)的截面积。

经推导(推导过程可参看文献[15])可得差动变压器式位移传感器的输出为

$$U_{out} \approx \frac{N_{b_1} (\delta_1 - \delta_2)}{N_{a_1} (\delta_1 + \delta_2)} U_{in} \quad (1)$$

2 高温差动变压器式位移传感器

2.1 高温环境下影响位移传感器性能的因素

由式(1)可以看出, 经简化后的差动变压器式位移传感器输出与被测物体和上下变压器铁芯之间气隙, 初次级线圈匝数比, 以及激励电压有关。在差动变压器式位移传感器的制作过程中, 其结构和参数不可能完全对称或者出现初级线圈品质因数不够高的情况, 这都会导致传感器实际输出与理论输出有所差别。式(1)中气隙 δ_1 和 δ_2 会受环境温度的影响, 差动变压器的初级线圈电阻、电感和初、次级线圈之间的互感会随着温度的变化而发生改变, 这将造成差动变压器式位移传感器的动静态性能也会随温度的变化而发生改变。

对差动变压器式位移传感器铁芯材料的要求是: 高磁导率、高饱和磁感应强度和较小的磁滞损耗、剩磁和矫顽磁力。所研制的差动变压器式位移传感器的环境温度为 $550 \text{ }^\circ\text{C}$, 这要求铁芯材料具有高的居里点。文中差动变压器式位移传感器的铁芯材料采用高饱和磁感应强度的铁钴钒软磁材料 1J22, 其饱和磁感应强度为 2.4 T , 居里点为 $980 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 高温环境下传感器温度补偿方式

差动变压器式位移传感器次级线圈的感应电势 E_{b_1} 和 E_{b_2} 是环境温度的函数, 而且关系较为复杂, 所以为了使差动变压器式位移传感器性能不受温度影响, 需采取一定的温度补偿方式。

差动变压器式位移传感器次级线圈感应电势是一个与被测物体位移 x 、激励频率 f 、初级线圈激励电流 I 以及各段导磁体磁导率 μ_i 有关的函

数,将差动变压器式位移传感器上下次级线圈感应电势写为

$$\begin{cases} E_{b_1} = F_1(k_1, \mu_i, I, f, x) \\ E_{b_2} = F_2(k_2, \mu_i, I, f, -x) \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_1, k_2 为常数,它的大小与被测物体结构,初次级线圈匝数和尺寸等有关; $F_1(\cdot), F_2(\cdot)$ 分别为上下次级线圈感应电势与导磁体磁导率、激励电流、激励频率和被测物体位移的函数。

如果被测物体位移 x 变化很小时,则式(2)可以写为

$$\begin{cases} F_1(k_1, \mu_i, I, f, x) = G(k_1, \mu_i, I, f)F(x) \\ F_2(k_2, \mu_i, I, f, -x) = G(k_2, \mu_i, I, f)F(-x) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $F(x)$ 为被测物体位移 x 的变化; $G(\cdot)$ 为上下次级线圈感应电势与导磁体磁导率激励电流以及激励频率的函数。

当差动变压器式位移传感器上下结构和参数做得十分对称时,可以认为常数 k_1 和 k_2 相等,令 $k_1 = k_2 = k$,由于变压器铁芯材料的磁导率是温度、激励电流和激励频率的函数,即 $\mu_i = M(T, I, f)$,可将式(3)中的 G 函数写为

$$\begin{cases} G(k_1, \mu_i, I, f) = J(k, T, I, f) \\ G(k_2, \mu_i, I, f) = J(k, T, I, f) \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2)得

$$\begin{cases} E_{b_1} = J(k, T, I, f)F(x) \\ E_{b_2} = J(k, T, I, f)F(-x) \end{cases} \quad (5)$$

差动变压器式位移传感器上下次级线圈感应电势做差为

$$E_{b_1} - E_{b_2} = J(k, T, I, f)(F(x) - F(-x)) \quad (6)$$

如果外部处理电路采用上下次级线圈感应电势之差与感应电势之和的比值,则传感器的输出可写为

$$\begin{aligned} U_{\text{out}} &= \frac{E_{b_1} - E_{b_2}}{E_{b_1} + E_{b_2}} = \\ &= \frac{J(k, T, I, f)(F(x) - F(-x))}{J(k, T, I, f)(F(x) + F(-x))} = \\ &= \frac{F(x) - F(-x)}{F(x) + F(-x)} \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)与式(1)进行对比,两个公式形式很相似,如果传感器外部处理电路采用这种比值方

式,则它的输出只与被测物体的位移有关,而与温度和其他参数无关。从理论上说,被测物体位移 x ,差动变压器式位移传感器上次级线圈感应电势 $(F(x))$ 的增加量应等于下次级线圈感应电势 $(F(-x))$ 的减少量,所以 $F(x) + F(-x)$ 为一常数,则位移传感器输出只依赖 $F(x)$ 与 $F(-x)$ 的差值信号。文中所研制的差动变压器式位移传感器的外部处理芯片为 AD598,它正是采用这种比值的处理方式。

外部处理电路采用比值方式可以忽略温度、结构参数、激励电流和激励频率对传感器输出的影响,但理论推导是基于差动变压器结构和参数上做得十分对称这一假设条件,而在实际制作过程中差动变压器很难做得完全对称,所以为进一步消除温度对传感器性能的影响还需采取其他的补偿方式。

当采用恒压源作为激励源时,初级线圈中激励电流为

$$I = \frac{U_{\text{in}}}{R_{a_1} + j\omega L_{a_1} + R_{a_2} + j\omega L_{a_2}} \quad (8)$$

激励电流影响磁路中的激励磁通、导磁材料的磁导率和涡流损耗等。式(8)中励磁电源电压 U_{in} 不受温度影响,但上下铁芯的初级线圈电阻 R_{a_1}, R_{a_2} 和电感 L_{a_1}, L_{a_2} 会随温度发生变化,导致激励电流 I 也随温度变化,最终使次级线圈感应电势也随温度发生变化。如图 2 所示,可以通过在初级回路中串联一个大电阻稳定激励电流的方法来减小温度对激励电流的影响。图中 R_{b_1}, R_{b_2} 分别为上下铁芯次级线圈电阻; L_{b_1}, L_{b_2} 分别为上下铁芯次级线圈电感; M_1, M_2 分别为上下铁芯初级线圈与次级线圈之间的互感系数。

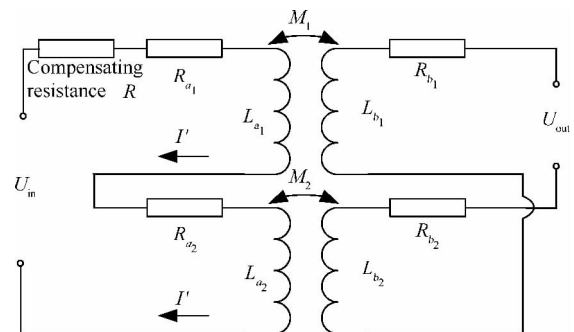


图 2 高温差动变压器式位移传感器电参数补偿方式原理图
Fig 2 Electrical parameter compensation schematic of high temperature differential transformer displacement sensor

图 2 中初级线圈中激励电流为

$$I' = \frac{U_{in}}{R + R_{a_1} + j\omega L_{a_1} + R_{a_2} + j\omega L_{a_2}} \quad (9)$$

当补偿电阻 R 的阻值远远大于初级线圈阻抗时,可以认为激励电流 I' 的大小只与励磁电源电压 U_{in} 和补偿电阻 R 有关,而与初级线圈阻抗无关。因为补偿电阻 R 不处于高温环境中,它不受温度的影响,所以避免了激励电流受温度影响。补偿电阻 R 阻值的选取有一定要求,它应该足够大,在一定的激励电压下,使激励电流不随初级线圈阻抗变化而改变,同时又要求不能过大,需保证有足够大的激励电流维持激励磁通。

3 高温环境下位移传感器的静动态性能

3.1 静态标定

差动变压器式位移传感器的静态性能包括传感器的线性度、灵敏度、迟滞性和重复性。高温差动变压器式位移传感器静态标定装置原理简图如图 3(a)所示,实物图如图 3(b)所示。

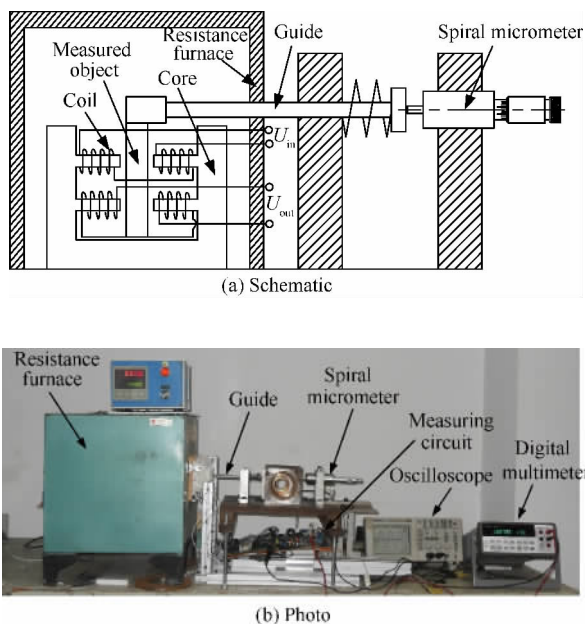


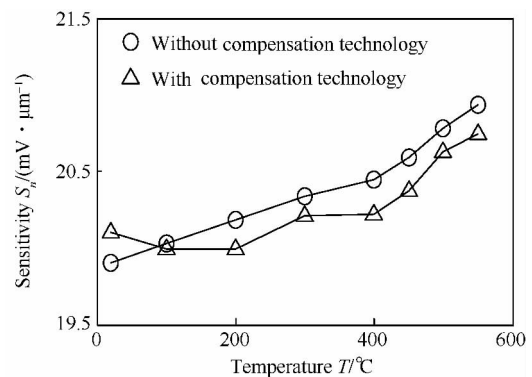
图 3 高温差动变压器式位移传感器静态标定装置图
Fig 3 Static calibration device of high temperature differential transformer displacement sensor

差动变压器的高温工作环境通过电阻炉加热

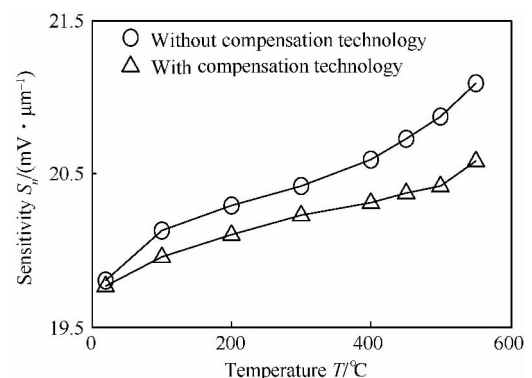
来模拟,导杆带动被测物体左右移动,其移动量由螺旋测微仪进行测量,由数字万用表读取位移传感器处理电路的输出值,对记录数据进行处理后可得不同温度时位移传感器的静态性能指标。试验条件为:被测物体处于初始位置时 $\delta_1 = \delta_2 = 0.8$ mm、初次级线圈匝数比为 1、激励电压幅值 $U_{a_1} = 3$ V、激励频率 $f = 5, 10, 15, 20$ kHz。被测物体每移动 0.05 mm 记录一个数据,总共测量 15 个点,测量范围在 $-0.35 \sim +0.35$ mm(位移的“+”和“-”表示被测物体偏离初始位置的不同方向)。

差动变压器式位移传感器处理电路的放大倍数固定不变,当选取不同激励频率时,测试位移传感器灵敏度随温度变化情况,曲线如图 4 所示,其中图 4(a)~图 4(d)分别是激励频率 f 为 5, 10, 15, 20 kHz 时,在加入补偿电阻和不加补偿电阻时差动变压器式位移传感器灵敏度随温度变化曲线。

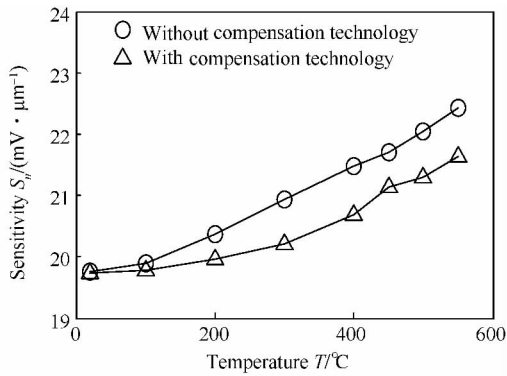
如图 4 所示:虽然激励频率不同,但差动变压器式位移传感器灵敏度都会随温度升高而增加,在无温度补偿电阻时,位移传感器灵敏度增幅分别为 1.03, 1.29, 2.68, 3.83 mV/ μ m;加入温度补



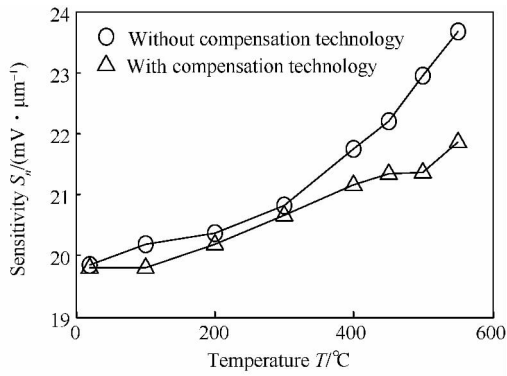
(a) Exciting frequency is 5 kHz



(b) Exciting frequency is 10 kHz



(c) Exciting frequency is 15 kHz



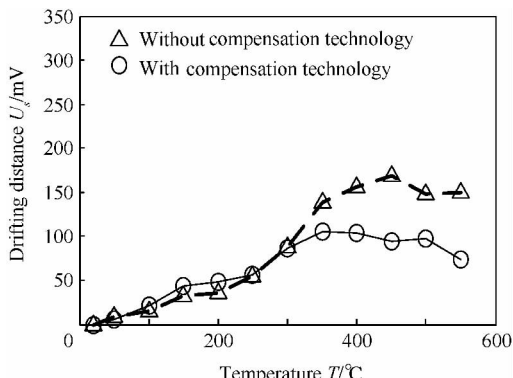
(d) Exciting frequency is 20 kHz

图 4 高温差动变压器位移传感器灵敏度随温度的变化曲线

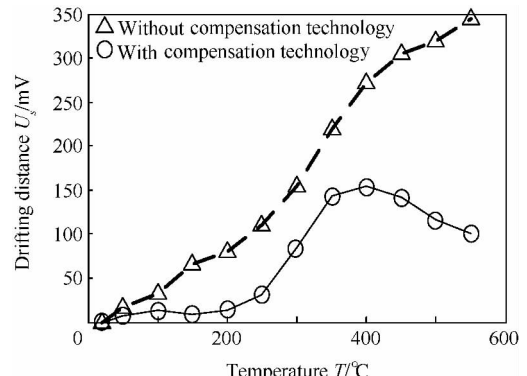
Fig 4 Curves of high temperature differential transformer displacement sensor sensitivity with temperature

偿电阻后,灵敏度增幅分别为 0.64,0.81,1.89,2.06 mV/μm。由图 4 可以得出,通过降低初级线圈激励频率可以减小位移传感器灵敏度受温度的影响程度。

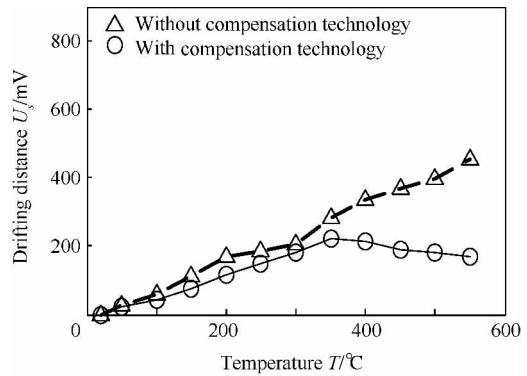
固定被测物体,当选取不同激励频率时,测试差动变压器式位移传感器输出电压随温度变化情况,曲线如图 5 所示。激励频率 f 为 5,10,15,



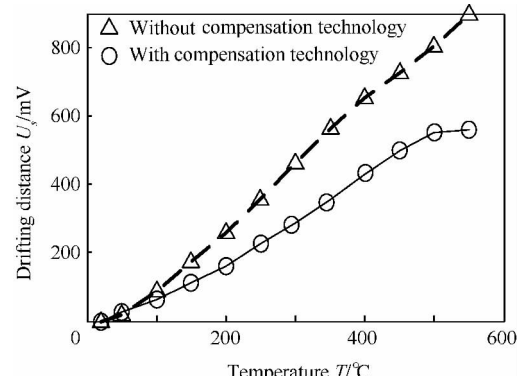
(a) Exciting frequency is 5 kHz



(b) Exciting frequency is 10 kHz



(c) Exciting frequency is 15 kHz



(d) Exciting frequency is 20 kHz

图 5 高温差动变压器位移传感器的温漂曲线(灵敏度为 20 mV/μm)

Fig 5 Curves of high temperature differential transformer displacement sensor temperature drift (sensitivity is 20 mV/μm)

20 kHz时,无温度补偿电阻位移传感器最大温漂分别为 169,344,455,899 mV;加入温度补偿电阻后最大温漂分别为 100,150,222,561 mV(不同激励频率下位移传感器灵敏度都为 20 mV/μm)。由图 6 可以得出:加入温度补偿电阻可以有效地降低位移传感器温漂幅度,最大降幅在 37.6%;位移传感器温漂受激励频率的影响较大,

通过降低激励频率可进一步减小温漂值。

固定被测物体,当选取不同激励频率时,测试同一环境温度下差动变压器式位移传感器输出电压随时间的变化情况,曲线如图 6 所示。无论是是否加入温度补偿电阻,在 550 °C 环境下位移传感器输出随时间的变化量都要大于常温时的变化量;同一温度下,加入温度补偿电阻后位移传感器

输出随时间的变化量都要小于无温度补偿电阻的变化量;加入温度补偿电阻后,550 °C 时的位移传感器的时漂基本稳定在 12 mV 以内,同样激励频率越高,位移传感器时漂越大。

在图 3(b) 所示的试验台上分别对不同温度下的差动变压器式位移传感器进行静态标定,得到位移传感器的静态性能指标如表 1 所示。

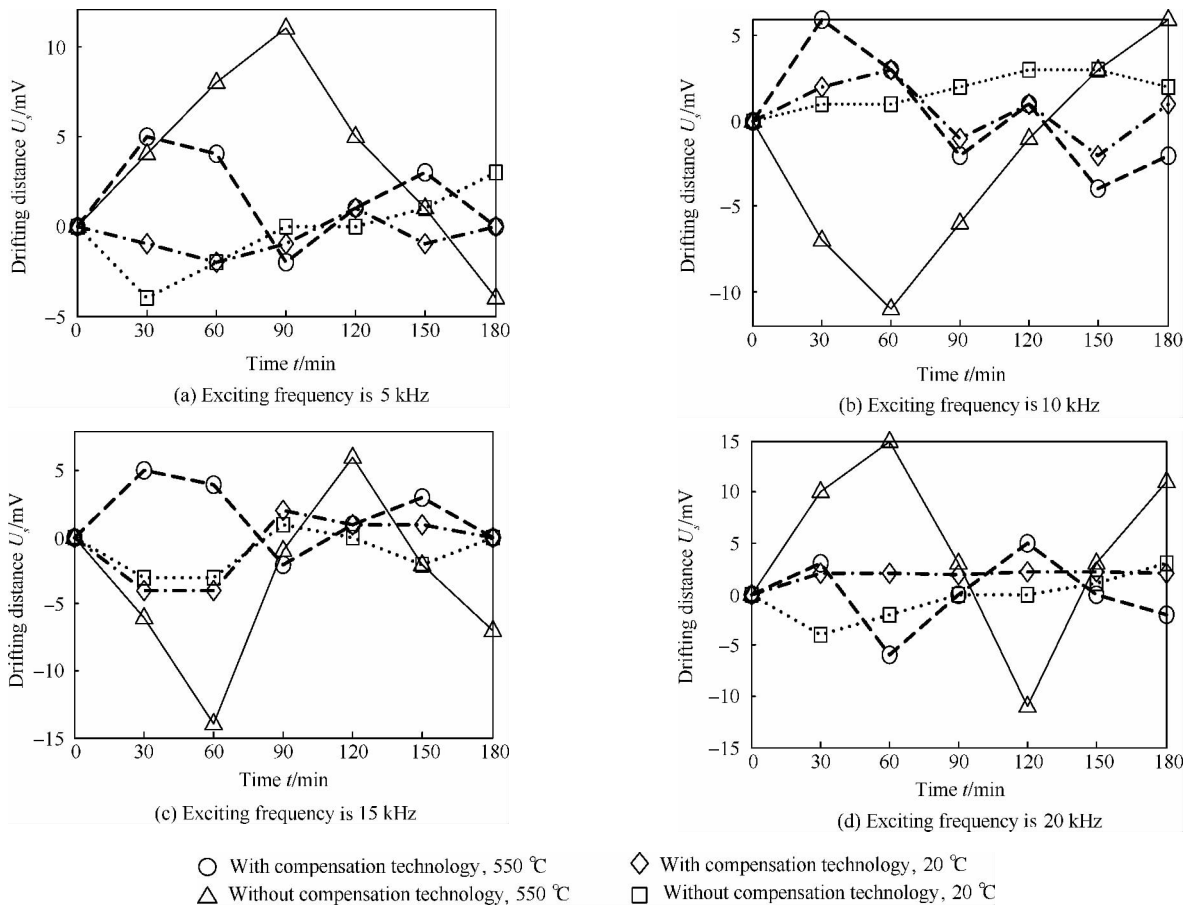


图 6 高温差动变压器位移传感器的时漂曲线 (灵敏度为 20 mV/μm)

Fig. 6 Curves of high temperature differential transformer displacement sensor time drift (sensitivity is 20 mV/μm)

表 1 高温差动变压器式位移传感器的静态性能

Table 1 Static performance of high temperature differential transformer displacement sensor

T/°C	f/kHz	x/cm	S _n /(mV·μm ⁻¹)	e _L /%	e _R /%	e _H /%
20	5	-0.35+0.35	18.30	0.87	±1.33	±0.65
	10		19.93	0.89	±0.78	±0.30
	15		18.98	0.84	±0.63	±0.21
	20		19.35	0.96	±0.52	±0.16
550	5	-0.35+0.35	19.83	0.89	±1.08	±0.91
	10		19.62	0.74	±0.97	±0.40
	15		19.74	0.94	±0.89	±0.43
	20		19.72	1.01	±0.87	±0.37

注:S_n is sensitivity; e_L is linearity; e_R is repeatability; e_H is hysteresis.

从表 1 中试验数据可以看出:新研制的高温差动变压器式位移传感器的静态性能(线性度、重复性和迟滞性)随着温度的升高有不同程度的改变(传感器工作在 550 °C 与 20 °C 时进行比较);前文提到,激励频率的不同,位移传感器的灵敏度、温漂和时漂受温度的影响程度也不同,而从表 1 可看出激励频率也会影响位移传感器的静态性能,所以应综合考虑其中的一些影响因素选择合适的激励频率;位移传感器在小测量范围时具有较好的线性度和灵敏度,一般磁悬浮轴承转子的移动范围在 -0.25~+0.25 mm,在转子稳定悬浮后,转子实际移动量更小,所以新研制的高温差动变压器式位移传感器是能够满足磁悬浮轴承系统要求的。

3.2 动态标定

对新研制的高温差动变压器式位移传感器完成静态标定后,需对其进行动态标定。为得到高温位移传感器的动态性能需将被测物体处于高温环境下,采用传统使被测物体产生不同频率的运动,通过记录位移传感器的输出值得出位移传感器幅频特性曲线的方法,实现难度较大。文中提出一种由系统辨识得到差动变压器式位移传感器幅频特性的方法,即先得到不同温度下位移传感器的传递函数,再通过传递函数画出位移传感器的幅频特性曲线,如图 7 所示为高温差动变压器式位移传感器动态标定装置原理简图。

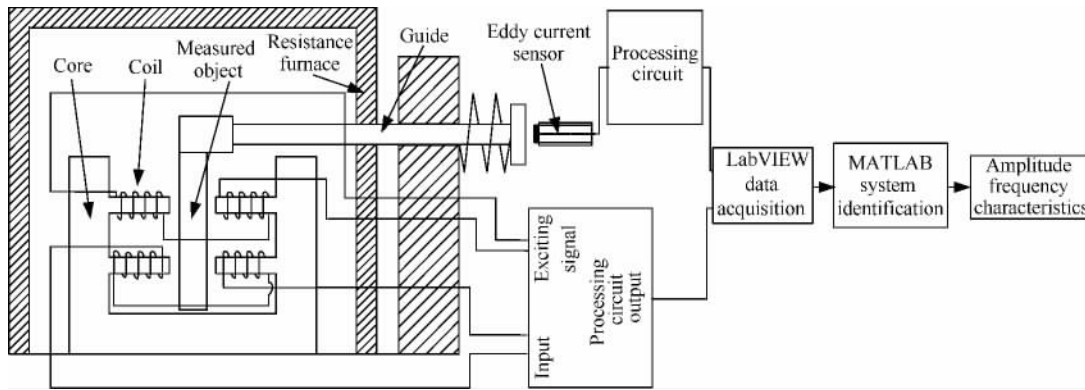


图 7 高温差动变压器位移传感器动态标定装置原理简图

Fig. 7 Dynamic calibration device diagram of high temperature differential transformer displacement sensor

为辨识出差动变压器式位移传感器的传递函数首先给被测物体一个从左至右的瞬时位移,通过 LabVIEW 采集卡采集差动变压器式位移传感器对被测物体的阶跃响应,同时采集电涡流传感器输出信号作为辨识模型的触发信号,将触发信号和阶跃响应信号同时送给 MATLAB 中的系统辨识(System Identification)工具箱即可辨识出位移传感器的传递函数,最终由传递函数画出幅频特性曲线。由此种方法得到高温差动变压器式位移传感器的幅频特性曲线如图 8 所示。从图中可以看出:以位移传感器输出电压增益下降 3 dB 所对应的频率为位移传感器的截止频率,环境温度为 550 °C,激励频率为 5,10,15,20 kHz 时,位移传感器的截止频率分别为 580,800,1 800,3 500 Hz 左右。激励频率的升高,位移传感器的

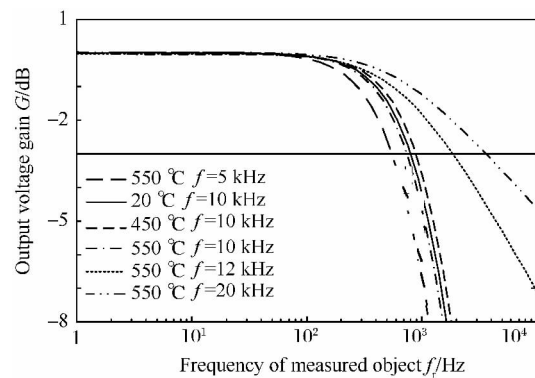


图 8 高温差动变压器式位移传感器幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude frequency characteristics of high temperature differential transformer displacement sensor

截止频率上升,位移传感器的动态性能可通过升高激励频率得到改善,但位移传感器各项静态性

能受温度的影响程度也会随激励频率的不同而不同。

文中选定激励频率为 10 kHz,测试不同温度下位移传感器的动态性能。在常温、450 °C 和 550 °C 时,位移传感器的截止频率分别为 830, 890, 800 Hz 左右,说明位移传感器的截止频率也会随温度升高有一定波动。

4 在磁悬浮轴承系统中的应用

为了验证文中所研制的高温差动变压器式位移传感器应用于高温磁悬浮轴承系统的可行性,文中采用了一套单自由度高温磁悬浮轴承试验台来进行测试,如图 9 所示为所设计的单自由度高温磁悬浮轴承试验台原理简图,该试验台中差动变压器式传感器铁芯与被悬浮物体的单边间隙为 0.8 mm,磁悬浮轴承磁极与被悬浮物体的单边间隙为 0.35 mm,保护间隙单边为 0.2 mm。

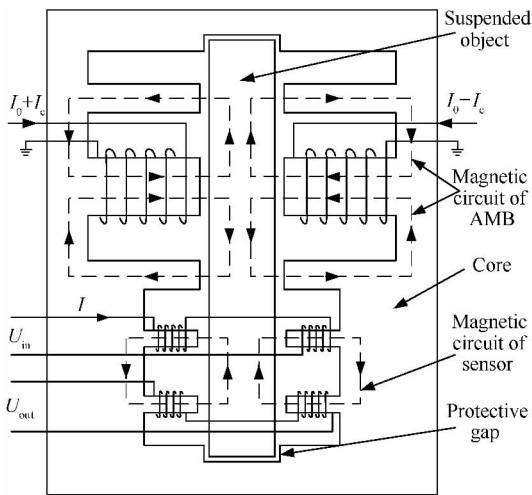


图 9 单自由度高温磁悬浮轴承试验台原理简图

Fig. 9 Diagram of single degree-of-freedom high temperature magnetic bearing test bed

图 10 所示是单自由度高温磁悬浮轴承试验台静态悬浮时的振动曲线,图 10(a)和图 10(b)分别是环境温度为 22 °C 和 550 °C 时,被悬浮物体的位移曲线和线圈中的电流曲线。从图 10 可以看出被悬浮物体静态悬浮稳定,环境温度为 22 °C 和 550 °C 时位移曲线波动量分别小于 100 mV 和 150 mV,说明被悬浮物体振动峰峰值分别小于 8 μm 和 12 μm (位移传感器灵敏度为 12.5 mV/ μm)

(μm),这说明环境温度升高被悬浮物体振动量增加,系统控制效果变差;环境温度由 22 °C 升至 550 °C 时,线圈中的电流下降了 120 mA,由位移传感器和功率放大器灵敏度可以换算出由于温度变化相当于被悬浮物体移动了 24 μm (功率放大器的灵敏度是 0.4 mA/mV)。单自由度高温磁悬浮轴承系统在 550 °C 高温环境中连续静态悬浮 8 h。

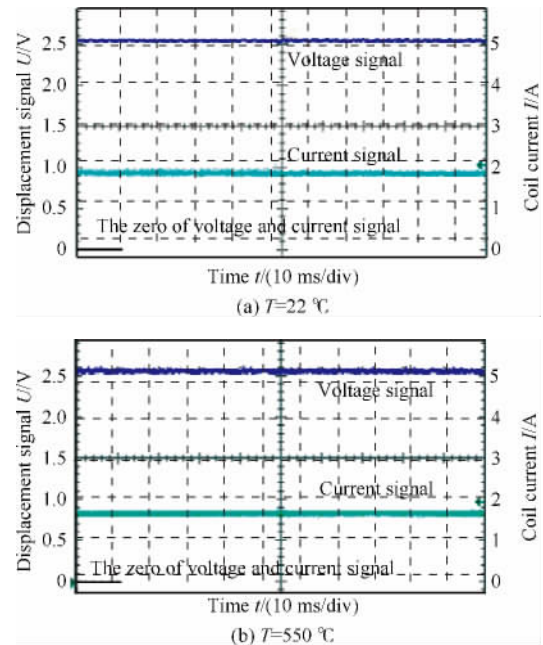


图 10 不同温度下静态悬浮曲线

Fig. 10 Static suspension curve with different temperatures

在环境温度为 550 °C 时,对该系统施加激振干扰信号,模拟被悬浮物体在高速旋转环境下的动态悬浮情况。用信号发生器在功率放大器输入端叠加一个 ± 1 V 的正弦波信号,记录被悬浮物体的位移信号和线圈中的电流信号。如图 11 所示为施加干扰后的振动曲线,图 11(a)和图 11(b)分别为激振信号频率在 100, 500 Hz 时,被悬浮物体的位移曲线和线圈中的电流曲线。从图中可以看出,激振信号频率在 100, 500 Hz 时被悬浮物体位移曲线波动量分别为 200 mV 和 100 mV,说明被悬浮物体的振动量分别为 16 μm 和 8 μm (位移传感器灵敏度为 12.5 mV/ μm)。施加干扰信号后,通过控制器的控制,被悬浮物体仍能稳定悬浮且振动位移较小,所研制的高温差动变压器式位移传感器能够满足磁悬浮轴承高速旋转的动态要求。

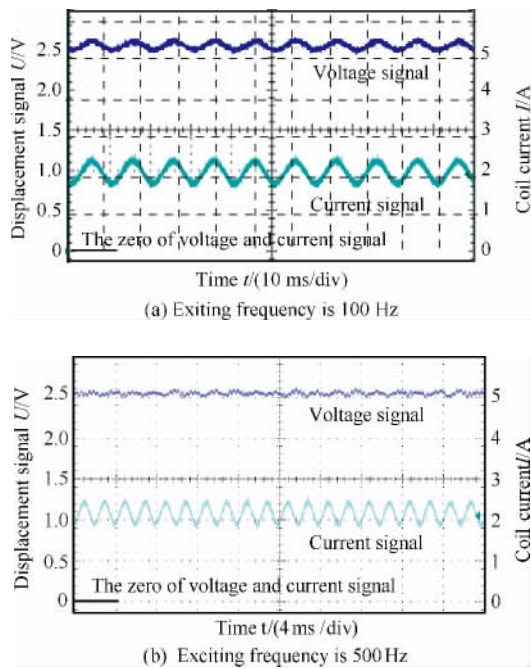


图 11 施加干扰后的曲线

Fig 11 Suspension curves with external disturbance

5 结论

对高温磁悬浮轴承用差动变压器式位移传感器进行了研究,研究了环境温度升高影响差动变压器式位移传感器性能的机理和特征以及所采用的温度补偿技术,传感器常温和高温下的静态性能以及它在单自由度高温磁悬浮轴承试验台中的应用。通过分析得出以下结论:

1) 环境温度升高导致差动变压器式位移传感器的灵敏度升高,通过降低初级线圈激励频率和加入温度补偿电阻可使灵敏度升高幅度明显降低。

2) 使被测物体不产生位移量,差动变压器式位移传感器输出会产生温度漂移和时间漂移,通过加入温度补偿电阻,可以使位移传感器的温度漂移和时间漂移大幅度减小。

3) 差动变压器式位移传感器动态性能也会受到温度的影响,通过提高传感器初级线圈的激励频率,可以改善传感器的动态性能,但激励频率越高,位移传感器的静态性能受温度影响程度也越大,经综合考虑后选择合适参数,所研制的高温差动变压器式位移传感器能够满足高温磁悬浮轴

承系统的要求。

本文的研究结果为高温磁悬浮轴承在航空多电发动机的应用奠定一定基础。

参考文献

- [1] Gerhard S, Maslen E H. Magnetic bearings theory, design, and application to rotating machinery [M]. New York: Springer, 2009.
- [2] Liang C H. More electric engines in the west [J]. International Aviation, 2009(5): 61-63. (in Chinese)
梁春华. 欧美积极开展多电发动机研究[J]. 国际航空, 2009(5): 61-63.
- [3] Xu L X, Zhou B. The current situation and development trend for more-electric gas turbine engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1): 51-59. (in Chinese)
徐龙祥, 周波. 磁浮多电航空发动机的研究现状及关键技术[J]. 航空动力学报, 2003, 18(1): 51-59.
- [4] Clark D J, Jansen M J, Montague G T. An overview of magnetic bearing technology for gas turbine engines[R]. NASA/TM-2004-213177.
- [5] Meeks C, McMullen P, Hibner D, et al. Lightweight magnetic bearing system for aircraft gas turbine engines [C]// Proceeding of the Fourth International Symposium on Magnetic Bearings, 1994: 429-434.
- [6] Iannello V. Magnetic bearing systems for gas turbine engines [C]//Proceedings of MAG'95, 1995: 77-86.
- [7] Kelleher W P, Kondoleon A S. A magnetic bearing suspension system for high temperature gas turbine application part 3-magnetic actuator development [C]//International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, 1997: 15-24.
- [8] Scholten J R. A Magnetic bearing suspension system for high temperature gas turbine application-control system design [C]//ASME Turbo Expo' 97. Orlando, Florida: USA, 1997.
- [9] Ohsawa M, Yoshida K, Ninomiya H, et al. High-temperature blower for molten carbonate fuel cell supported by magnetic bearings [C]//Proceeding of the Sixth International Symposium on Magnetic Bearings, 1998: 32-41.
- [10] Field R. J, Iannello V. A reliable magnetic bearing system for turbomachinery [C]//Proceeding of the Sixth International Symposium on Magnetic Bearings, 1998: 42-51.
- [11] Burdet L, Maeder T, Siegwart R, et al. Thick-film radial position sensor for high temperature active magnetic bearings [C]//Proceeding of the Tenth International Symposium on Magnetic Bearings, 2006: 555-559.
- [12] Xu L X, Wang L T, Schweitzer G. Development of magnetic bearings for high temperature suspension [C]//Proceeding of the Seventh International Symposium on Mag-

- netic Bearings, 2000: 117-122.
- [13] Xu L X, Zhang J Y, Schweitzer G. High temperature displacement sensor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 3(18): 449-452.
- [14] Meng L F, Zheng B. The principle and technology of sensor [M], Beijing: Ordnance Industry Press, 2002. (in Chinese)
孟立凡, 郑宾. 传感器原理与技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.
- [15] Jin C W. Research on some key technologies of high temperature active magnetic bearing [D]. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)

金超武. 高温磁悬浮轴承若干关键技术研究[D]. 南京航空航天大学机电学院, 2011.

作者简介:

金超武 男, 讲师。主要研究方向: 磁悬浮技术, 位移传感器, 机电系统控制等。

Tel: 025-84892594

E-mail: jinchaowu@nuaa.edu.cn

徐龙祥 男, 教授。主要研究方向: 磁悬浮技术, 计算机与机电系统控制, 旋转机械动力学等。

Tel: 025-84892598

E-mail: fqp@nuaa.edu.cn

Research on Displacement Sensor of High Temperature Active Magnetic Bearing

JIN Chaowu^{*}, XU Longxiang, ZHU Yili

College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: The influence of high operating temperature on the differential transformer displacement sensor (DTDS) mechanism and characteristics and the following temperature compensation technology are mainly analyzed in view of the performance of DTDS and its application in high temperature active magnetic bearing (HTAMB). The technical problems of sensor sensitivity increase, temperature and time drift caused by the temperature rise are improved through the processing circuit of ratio mode and compensation resistance. The DTDS at high temperature is statically and dynamically calibrated and applied to a single degree-of-freedom (DOF) HTAMB system for static and dynamic simulation suspension. When the measurement range is $-0.35\sim+0.35$ mm with the working temperature $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, the DTDS has the following characteristics: sensitivity is $19.62\text{ mV}/\mu\text{m}$, linearity is $\pm 0.74\%$, hysteresis is $\pm 0.40\%$, repeatability is $\pm 0.97\%$ and the cutoff frequency reaches 800 Hz. Finally, this DTDS is successfully used in a DOF HTAMB test bed. The results provide promotion for the HTAMB application in more-electric gas turbine engines system.

Key words: high temperature; displacement measurement; sensors; transformer windings; active magnetic bearing; aircraft engines

Received: 2013-03-30; Revised: 2013-06-19; Accepted: 2013-07-04; Published online: 2013-07-16 13:40

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130716.1340.001.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51075200); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011070)

^{*} Corresponding author. Tel.: 025-84892594 E-mail: jinchaowu@nuaa.edu.cn