

文章编号: 2095-4980(2014)06-0937-05

电涡流传感器热稳定性标定技术

李国会^{a,b}, 杨媛^{a,b}, 何忠武^{a,b}, 田飞^{a,b}, 向汝建^{a,b}, 徐宏来^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.高能激光科学与技术重点实验室; b.应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 介绍电涡流传感器位移测量原理, 分析温度变化时传感器线圈和探头热胀冷缩在测量位移过程中造成的温度漂移现象。针对传感器的温漂, 研制出具有温度补偿功能的电涡流传感器热稳定性标定装置, 对传感器输出电压进行温度补偿, 减小温度变化对传感器输出电压的影响。同时介绍利用该装置进行温度标定的实现方法, 并进行实验验证, 实现固定位移条件下环境温度变化时对电涡流传感器输出电压的标定, 与无温度补偿时输出电压对比, 电压变化量减小了近50%。

关键词: 电涡流传感器; 温度漂移; 温度补偿; 热稳定性

中图分类号: TN911.72; TP382 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201406.0937

Research on the test of temperature stability calibration device for eddy current sensor

LI Guo-hui^{a,b}, YANG Yuan^{a,b}, HE Zhong-wu^{a,b}, TIAN Fei^{a,b}, XIANG Ru-jian^{a,b}, XU Hong-lai^{a,b}

(a.Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser; b.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: The displacement detection principle of eddy current sensor is introduced. The temperature drifting phenomena occurred in measuring displacement are analyzed, which are caused by thermal expansion and contraction of sensor winding and detector. Referring to the temperature drifting of sensor, a calibrating device with compensating function of eddy current sensor is manufactured, and the temperature for output voltage of sensor is compensated, which reduces the influence of temperature changes on output voltage of sensor. The implementation method of temperature calibration by this device is proposed and validated in experiment, which realizes the calibration for output voltage of eddy current sensor under the circumstance temperature variation and fixed displacement. Comparing to the detection without temperature compensation, the variation of voltage decreases by about 50%.

Key words: eddy current sensor; temperature drift; temperature compensation; thermal stability

电涡流传感器由探头、前置放大器和线缆3部分组成, 它可以将机械位移、振幅和转速等转换成电压信号进行输出, 是一种理想的非接触式测量仪器, 广泛应用于非接触测量系统中, 它的主要优点是高精度度、高带宽以及高动态特性^[1-4]。实际应用中, 电涡流传感器的输出电压随着环境温度而变化, 而该电压的变化并非被测参数的实际变化, 对于闭环控制系统, 会给反馈系统带来“伪信号”, 导致控制系统控制不准确或不稳定, 系统随机振动加剧等不良影响^[5]。本文针对这一现象, 研制出了电涡流传感器热稳定性标定装置, 用来标定电涡流传感器的热稳定性, 从而提高传感器的测量精确度。

1 电涡流传感器位移测量原理

电涡流传感器的主要部件是封装在探头里面的绕组线圈和处理电路即前置放大器。当传感器线圈内通过高频交变电流 i_1 时, 在线圈周围将会产生交变磁场 ϕ_1 , 交变磁场 ϕ_1 靠近金属被测靶面时, 金属表面将产生电涡流, 并形成交变磁场 ϕ_2 , ϕ_2 和 ϕ_1 方向相反, 并对 ϕ_1 有反作用, 导致电流 i_1 的强弱和相位发生变化, 即线圈的阻抗发生变

收稿日期: 2013-12-12; 修回日期: 2014-03-10

基金项目: 高能激光科学与技术重点实验室资助项目

化,从而形成电涡流效应^[6-7]。由处理电路对变化的电流进行处理,以电压的形式表征出来,标定出被测靶面与探头之间的距离 δ 与电压的对应关系,即可测量被测靶面的位移。电涡流传感器的工作原理见图 1。

2 温度漂移的来源

电涡流传感器的温度漂移主要是由探头及内部线圈和信号处理电路受温度影响产生的。对于信号处理电路产生的温度漂移,主要是元器件性能随温度变化而改变所造成的,可以通过提高检波电路的检测能力,以及采取可靠的滤波技术,同时添加温度补偿元件等措施减小温漂,而线圈及探头的热胀冷缩以及线圈阻抗的变化是导致传感器输出变化的主要因素,在大多数环境下,这种影响是不可避免的。

下面针对探头受温度的影响进行分析。如图 2 所示,当温度升高时,电涡流传感器探头膨胀,它与被测靶面之间的距离 δ 发生变化,其变化量为 $\Delta\delta$,相应的,探头与被测靶面的距离 L 变小了,传感器的输出电压随之发生变化,而传感器的输出电压是表征探头与被测靶面之间的距离,所以由于温度变化造成的探头热胀冷缩引起传感器的输出电压的变化,就误认为是探头与被测靶面之间的相对位置发生了变化,从而造成了测量误差,所以必须选择温度系数较小的材料作为探头材料,进而减小误差来源。一般情况下,探头封装壳、基座和安装座都采用殷钢材(4J32),减小材料热变形对测量结果的影响。

温度变化时,线圈的几何尺寸、电感和电阻的变化也会导致传感器输出电压发生变化,同样会造成测量误差,而由这些参数共同表征的品质因数与传感器的输出电压有直接的关联,并可以从品质因数的公式定性判断温度变化时测量误差与哪些参数相关。传感器品质因数 Q 公式如下^[8]:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

式中: R 为电阻; L 为电感; C 为电容。从上式可以看出,温度变化时,线圈直径热胀冷缩,其电感 L 随之变化,同时,由于高频肌肤效应,电阻 R 也发生变化,传感器线圈的品质因数随之变化,从而导致输出电压的变化,同样造成测量误差。因此环境温度变化时,电阻 R 和电感 L 的参数匹配关系是处理电路必须考虑的问题。在电涡流传感器的研制和生产过程中,传感器的结构尺寸确定以后,处理电路对传感器输出电压起着决定性作用,其中需要重点考虑电阻在前置放大电路中的调节作用,具体方式是挑选合适的电阻并进行大量的实验,使电阻与输出电压合理匹配,力求温度变化对处理电路的影响降到最低。

3 电涡流传感器热稳定性标定装置及方法

针对特定需求,在闭环控制系统中,由电涡流传感器提供位置反馈信号,控制系统控制被测靶面的位置状态,要求被测靶面处于平衡位置,且保持相对稳定,即要求被测靶面与传感器探头之间的相对位置保持不变。理想情况下,如果电涡流传感器探头与被测靶面之间没有位移变化,传感器的输出电压也不会变化,位置反馈信号的变化量为零,控制系统将不会改变被测靶面的相对位置。实际应用中,环境温度变化范围在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 从上文分析可知,传感器自身温漂将会造成测量误差,这个误差会被当成是被测靶面与传感器探头之间的距离变化而造成的,控制系统将对被测靶面进行闭环控制,改变被测靶面的实际位置,从而造成对本不该控制的情况进行控制。

针对上述应用,本文研制出了具有温度补偿功能的电涡流传感器热稳定性标定装置,它可以用来标定固定位移条件下环境温度在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内传感器的输出电压与温度之间的对应关系,经曲线拟合并采取插值方法,通过闭环控制系统的实时控制,可以有效地将被测靶面控制在平衡位置上。

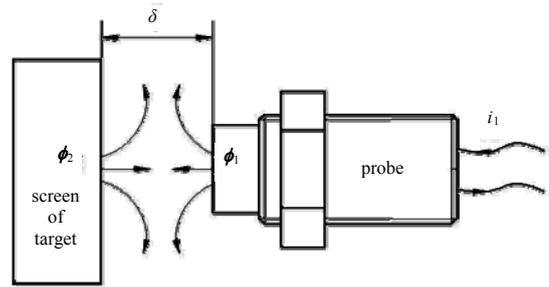


Fig.1 Detection principle scheme of eddy current sensor
图 1 电涡流传感器工作原理图

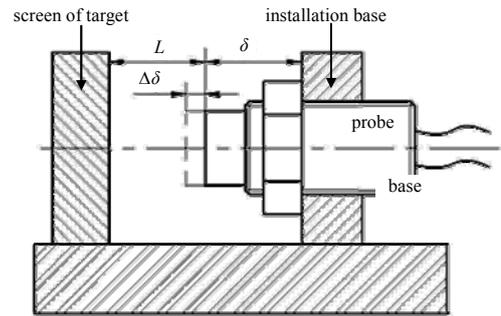


Fig.2 Temperature drift character layout of eddy current sensor
图 2 电涡流传感器温度漂移示意图

图 3 是具有温度补偿功能的电涡流传感器热稳定性标定装置^[9]。电涡流传感器紧固在内框上，外框内部分别放置基板和隔板，螺钉、螺母、弹簧和盖板等部件将电涡流传感器紧压在隔板上。外框、基板和内框采用温度系数较小的殷钢(4J32)材料，隔板采用温度系数更小的氧化锆陶瓷(XrO₂)材料，隔板厚度根据传感器的量程而定，也可以根据实际应用时探头与被测靶面之间的距离选择隔板的厚度。针对实际应用，隔板厚度为 1.5 mm。

温度变化时，该装置中的所有部件都会热胀冷缩，即出现整体平动。由于隔板的线膨胀系数为 $7.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，而其厚度为 1.5 mm，在 $-40 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 范围内，它的厚度变化量极其微小，可以忽略不计。弹簧始终将电涡流传感器的探头紧压在隔板上，使隔板与基板(可当成被测靶面)之间的距离始终保持在 1.5 mm，其余部件的热胀冷缩不会导致该距离的变化，即实现了温度补偿功能。

传感器热稳定性标定时，将该装置整体放入高精度温度试验箱中，程序控制温度的升降和持续时间，由采集系统采集电涡流传感器的输出电压并绘制温度和电压曲线，从而标定出等位移条件下环境温度变化时电涡流传感器输出电压与温度的对应关系曲线，为控制系统提供可靠的位置反馈信号。

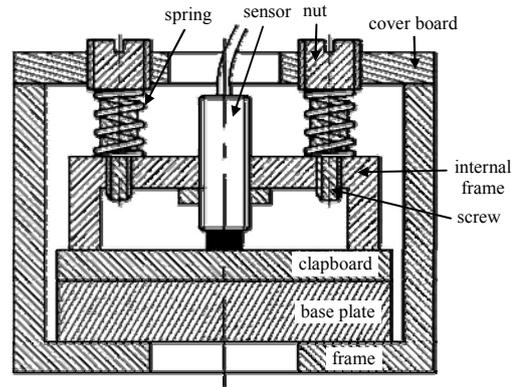


Fig.3 Test device layout for the temperature stability of eddy current sensor
图 3 电涡流传感器热稳定性标定装置示意图

4 电涡流传感器热稳定性标定实验

电涡流传感器热稳定性标定时，每一个温度状态需要保持一定时间，使传感器探头和标定装置的温度稳定下来，这样才能更准确地反应出传感器的输出状态。图 4 是传感器热稳定性标定时温度加载曲线。从图中看出，传感器温度标定时，程序控制高低温试验箱的温度变化，从常温 20 °C 降温至 -40 °C，随后逐步升温至 60 °C，最后再回到常温 20 °C，一个温度实验循环需要 12 h，从 -40 °C 到 60 °C，每一个温度状态保持 30 min。为了减小温度变化对传感器的冲击，从常温 20 °C 降温至 -40 °C，设定时间为 1 h。采集系统采集 -40 °C 到 60 °C 时间段内每个温度状态变更前传感器的输出电压，并多次采集取平均，从而获得该温度条件下传感器的实际输出电压。

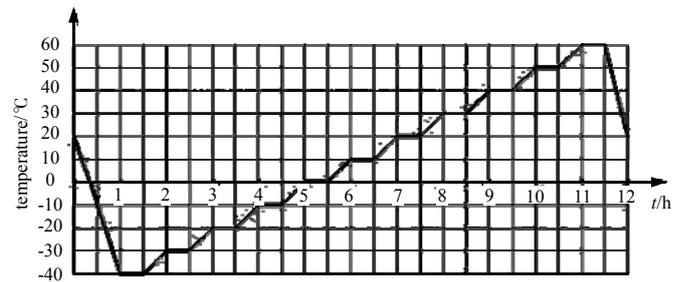


Fig.4 Loading temperature curves of eddy current sensor
图 4 传感器温度实验时温度加载曲线

为了更准确的标定电压与温度的关系，可以减小温度间距，测量更多的不同温度下对应的输出电压，最终的拟合曲线更能准确地反应传感器的输出电压与温度的对应关系。

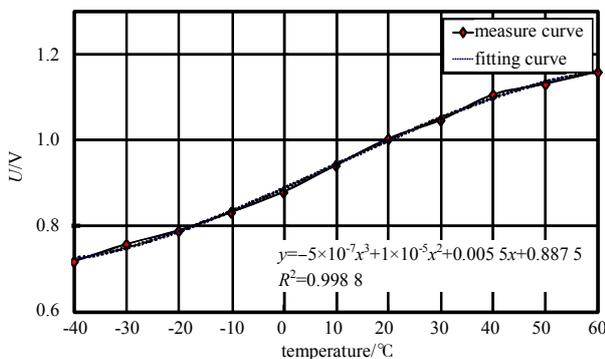


Fig.5 Voltage-temperature curves of eddy current sensor without temperature compensation
图 5 无温度补偿功能的传感器电压-温度曲线

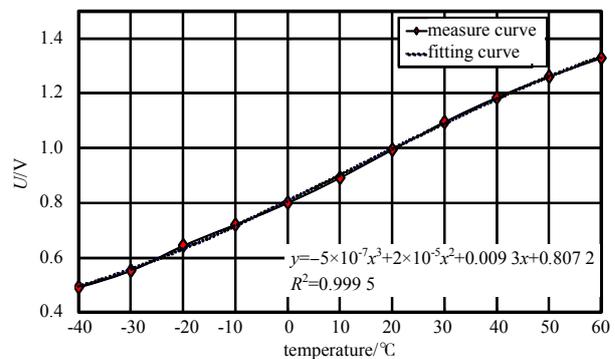


Fig.6 Voltage-temperature curves of eddy current sensor with temperature compensation
图 6 有温度补偿功能的传感器电压-温度曲线

为了便于对比,采用图2和图3两种不同的方式标定传感器的热稳定性,温度加载曲线、温度实验箱等其余测试条件完全相同,对比2种条件下传感器输出电压与温度的变化情况,其中,实色曲线为测量结果,虚色曲线为三阶多项式拟合结果。图5是采用无温度补偿功能时的传感器热稳定性曲线(实验装置见图2),图6是有温度补偿时传感器的热稳定性曲线(实验装置见图3)。

对比图5和图6,不难看出,当温度从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中,传感器的输出电压均有上升的趋势,在无温度补偿时,输出电压的变化量为 0.84 V ,有温度补偿时,输出电压变化量为 0.44 V ,变化量减小接近50%。由于除了标定装置不同之外,其余测试条件相同,所以可以肯定这种偏差是被测靶面与传感器探头之间的相对距离发生变化而造成的额外偏差。从图5和图6看出,不管哪种标定装置,在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,电涡流传感器输出电压的变化量都比较大,这是由厂家生产的传感器的性能决定的。

有温度补偿时,反应的是传感器与被测靶面之间的距离保持相对稳定,输出电压与温度的对应关系;而没有温度补偿时,不能真实地反应传感器的输出电压是受温度影响还是受探头或被测靶面热胀冷缩引起的电压变化。

针对特定需求,在闭环控制系统中,要求被测靶面与探头之间的距离保持相对稳定,为了减小环境温度的变化造成的额外误差,需标定出传感器热稳定性曲线,采用三阶多项式进行曲线拟合,并采用插值法为反馈系统提供不同温度下传感器的位置反馈信号,从而实现对被测靶面的实时闭环控制,确保被测靶面在平衡位置保持相对稳定。

5 结论

针对电涡流传感器受温度影响导致输出电压发生变化这一现象,分析了输出电压的变化根源,并研制出固定间距情况下具有温度补偿功能的电涡流传感器热稳定性标定装置。对比具有温度补偿和没有温度补偿2种条件下传感器的输出电压和温度的对应关系,结果表明,具有温度补偿时,电压的变化量比没有温度补偿时减小接近50%。由于采取了温度补偿措施,被测靶面与探头之间的距离保持相对稳定,标定出的电压与温度的对应关系曲线经三阶多项式拟合,并采取插值方法可以为闭环控制系统提供更可靠的位置反馈信号,从而实现被测靶面相对位置的精确控制。

参考文献:

- [1] 陈虎隰,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. (CHEN Hu-yun, TIAN Xin-qi. Experimental study on material sensitivity of eddy current sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(10):13-15.)
- [2] 刘柱,李巍,金建新. 电涡流传感器的特性分析与标定方法[J]. 机械与电子, 2013(2):14-20. (LIU Zhu, LI Wei, JIN Jian-xin. Characteristics analysis and calibration of eddy current sensor[J]. Machinery & Electronics, 2013(2):14-20.)
- [3] 王刚,张超. 电涡流传感器及其最佳特性曲线拟合方程式[J]. 石油化工自动化, 2005(3):81-83. (WANG Gang, ZHANG Chao. Eddy current sensor and its optimal characteristic curve fitting equation[J]. Automation in Petro-Chemical Industry, 2005(3):81-83.)
- [4] 张洪润,傅瑾新,吕泉,等. 传感器技术大全:下册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2007. (ZHANG Hong-run, FU Jin-xin, LV Quan. Sensor technology encyclopedia:lower volumes[M]. Beijing:Beihang University Press, 2007.)
- [5] 葛萍,方勇,解本政,等. 温度测试系统中的误差分析与控制方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011,9(6):790-794. (GE Ping, FANG Yong, XIE Ben-zheng, et al. Error analysis and control in the temperature measuring system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011,9(6):790-794.)
- [6] 浦铁成,白晶. 电涡流位移传感器线圈优化设计[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2007,8(6):285-288. (PU Tie-cheng, BAI Jing. Optimization design on coil of the eddy current sensor[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2007,8(6):285-288.)
- [7] Hans H Gatzten, Ekaterina Andreeva, Heri Iswahjudi. Eddy-current microsensor based on thin-film technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002,28(5):3368-3370.
- [8] 王薇,曲昀卿,李娟,等. 电涡流传感器的温度补偿[J]. 传感器与仪器仪表, 2008(24):157-159. (WANG Wei, QU Yun-qing, LI Juan, et al. Temperature compensate of eddy current sensor[J]. Sensor and Instrumentation, 2008(24):157-159.)
- [9] 李国会,杨媛,徐宏来,等. 电涡流传感器热稳定性标定装置:中国,ZL201220309846.X.[P]. 2013-01-09. (LI Guo-hui, YANG Yuan, XU Hong-lai, et al. Temperature stability standardized equipment of eddy current sensor temperature:China, ZL2012 20309846.X.[P]. 2013-01-09.)

作者简介：



李国会(1977-), 男, 四川省通江县人, 高级工程师, 主要从事自适应光学系统硬件及控制系统研究.email:hitliguohui@163.com.

杨 媛(1982-), 女, 山西省忻州市人, 工程师, 主要从事控制技术研究.

何忠武(1975-), 男, 重庆市人, 副研究员, 主要从事自适应光学系统硬件及控制系统研究.

向汝建(1975-), 男, 安徽省桐城市人, 研究员, 主要从事激光技术应用研究.

田 飞(1986-), 女, 西安市人, 工程师, 主要从事固体激光技术研究.

徐宏来(1979-), 女, 江苏省苏州市人, 副研究员, 主要从事自适应光学系统硬件研制.

UAV SHOW CHINA 2015
尖兵之翼 第六届中国无人机大会暨展览会
 2015年 北京

中国无人机从此飞向世界

“尖兵之翼——中国无人机大会暨展览会”自2006年起, 由高博特公司发起、策划并实施, 得到众多权威机构和无人机制造及应用领域者的大力支持和帮助, 已成为我国无人机行业的知名品牌, 为无人机领域管、产、学、研、商、用单位提供了优质的交流平台、展示平台、交易平台。

经过8年的积淀尤其是2014的洗礼, 从行业覆盖、客户质量、展品质量、观众数量、成交额、参展商满意度等方面更证明了“尖兵之翼”品牌的价值。为紧跟技术进步, 引领行业发展, 让航天、电子、兵器等行业融入无人机大舞台, “尖兵之翼——中国无人机大会暨展览会”自2015年起改为一年一届, 期间还将围绕无人机的应用举办不同主题的交流展示飞行活动, 希望得到大家继续支持。

高博特军工
 www.gobetter.com.cn

电话: 010-88587506 88587507 网址: www.gobetter.com.cn www.gbt863.com E-mail: gbt@gobetter.com.cn