

文章编号 1004-924X(2007)09-1342-05

光纤位移传感器在低温装置中测量超导转子 悬浮微位移的应用

胡新宁^{1,2}, 崔春艳^{1,2}, 雷沅忠¹, 韩立¹, 王秋良¹

(1. 中国科学院 电工研究所 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100080;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:介绍了一种补偿式光纤位移传感器,对比分析了该传感器在室温(293 K)下和液氮温度(77 K)下的传输特性。结果表明,该传感器能有效地消除外界环境的影响,可用于宽温度范围的位移测量。在液氮温度(4.2 K)下测量超导转子悬浮微位移的实验结果表明,该传感器可在低温下进行位移测量,测量分辨率达到10 μm 。实验结果为光纤位移传感器在低温环境下的应用提供了参考。

关键词:光纤传感器; 微位移测量; 低温实验法; 超导体

中图分类号:TN253 文献标识码:A

Application of fiber optic displacement sensor to measuring suspension micro-displacement of superconducting rotor in cryogenic instrument

HU Xin-ning^{1,2}, CUI Chun-yan^{1,2}, LEI Yuan-zhong¹, HAN Li¹, WANG Qiu-liang¹

(1. *Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: A Compensated Fiber Optic Displacement Sensor (CFODS) was introduced and its transmission properties at room temperature (293 K) and liquid nitrogen temperature (77 K) were analyzed comparatively. The analysis shows that this sensor can effectively eliminate environment effects, so it can be used to measure displacement at a large temperature range. The results of measuring suspension micro-displacement of superconducting rotor at liquid helium temperature (4.2 K) demonstrate that it is feasible to measure micro-displacement of objects using the CFODS with measuring resolution about 10 μm at low temperature, which gives some useful reference for the application of the CFODS to cryogenic environment.

Key words: fiber optic sensor; micro-displacement measurement; cryogenics; superconductor

收稿日期:2007-02-05; 修订日期:2007-05-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50577063)

1 引言

光纤传感器具有抗电磁干扰、非接触测量、体积小和灵敏度高等特点,目前已研制出多种测量物理量的光纤传感器,其中反射式强度调制光纤位移传感器是通过接收光强的变化来测量光纤端面和被测反射面间的距离变化的传感器,它具有结构简单、分辨率高、设计制造方便和适用于各种环境等特点而被广泛应用。但这种强度调制方式也有不足之处,它对光源功率波动、光纤传输损耗、环境光干扰以及其它系统元件存在的特性变化非常敏感,光信号通道中被传输的光强很容易受到这些因素的干扰而发生变化,从而引起较大的误差。因此,对于测量精度和稳定性要求较高的场合,需要应用补偿式光纤位移传感器进行位移测量。

目前随着超导材料、低温技术的不断发展,光纤传感器在低温下的应用也越来越广泛。国内外对低温下应用光纤传感器测量压力、应变、温度、液位等的研究报道较多^[1-2],但对于位移测量只有液氮温度(77 K)下的^[3]报道,关于液氮温度(4.2 K)下的报道很少。超导磁悬浮技术是超导技术应用的重要内容,它的发展和應用将使惯性导航的精度达到一个新的高度。由于超导精密仪器结构复杂,将光纤从低温装置内部引到室温环境下非常困难,因此只能将光纤传感器安装在杜瓦内部低温环境下使用。为测量超导转子的悬浮位移,本文将光纤传感技术应用于低温环境,比较了光纤传感器在常温和液氮温度下的传输特性,考察了温度对补偿式光纤传感器精确度的影响,分析了补偿式光纤位移传感器在液氮温度下的传输特性并对其进行标定,进一步确定了传感器的测量分辨率。最后,测量了在液氮温度(4.2 K)装置中的超导转子悬浮位移,并对测量结果进行了分析,其结果为光纤位移传感器在低温环境下的应用提供了参考。

2 补偿反射式光纤传感器的基本原理

反射式光纤位移传感器由光源器件发出光照射到检测面上,其中一部分反射光由接收光纤传回到探测器上,通过反射光的强弱,就能测出光

纤探头到被检测面的距离。接收光纤所接收到的反射光强可表示为:

$$I(x) = I_0 K_0 K_1 R f(d, x), \quad (1)$$

式中 I_0 为光源注入光源光纤的光强, K_0 为光源光纤的本征损耗系数, K_1 为接收光纤的本征损耗系数, R 为反射面的反射系数, d 为两光纤的中心间距。 $f(d, x)$ 由下式给出:

$$f(d, x) = \frac{a_0^2}{R^2(2x)} \exp\left\{-\frac{d^2}{R^2(2x)}\right\}, \quad (2)$$

其中:

$$R(x) = a_0 [1 + \xi(x/a_0)^{3/2}],$$

a_0 为光纤芯半径, ξ 为与光源种类及光源跟光纤耦合情况有关的调制参数。对于双光纤传感系统而言,当光源光强 I_0 不稳定时,探测器所接收到的光强值 $I(x)$ 会发生变化,因此这种传感器对光源稳定性要求较高,对外界条件变化的适应性较差。

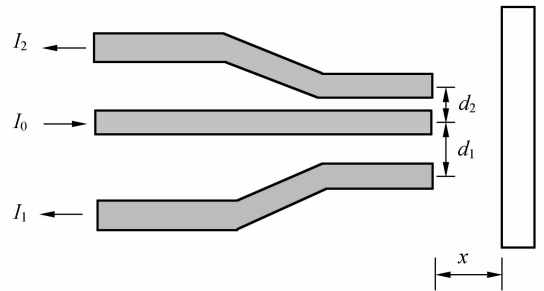


图1 补偿式光纤传感器结构示意图

Fig.1 Configuration of compensated optic fiber sensor

补偿反射式三光纤传感器结构^[4-6]如图1所示。在该调制系统中,三光纤的间隔距离不等,两接收光纤所接收到的反射光强的比值可表示为:

$$\frac{I_1(x)}{I_2(x)} = \frac{I_0 K_0 K_1 R f(d_1, x)}{I_0 K_0 K_2 R f(d_2, x)}, \quad (3)$$

式中 K_1 、 K_2 分别为两根接收光纤的本征损耗系数,如果三光纤为同种光纤,则有 $K_1 = K_2$, 于是式(3)简化为:

$$\frac{I_1}{I_2} = \exp\left[\frac{d_2^2 - d_1^2}{R^2(2x)}\right], \quad (4)$$

式(4)即为补偿式三光纤传感器的调制函数。这表明两光纤光强输出比值与两接收光纤与光源光纤之间的间隔 d 及光纤端面到反射器之间的距离 x 有关,而与光源强度、反射体的反射率以及外界环境变化等因素无关,因而能自动补偿这些因素对测量结果的影响。当光纤间隔固定后,在

一定的测量距离范围内,传感器接收光强的比值和测量距离接近线性关系,在这个范围内通过标定传感器确定传感器测量分辨率就可以实现微位移的测量^[7-10]。

3 光纤传感器在低温下传输特性的分析

由于传感器安装在杜瓦内低温环境下,因此需要对传感器在低温下的传输特性进行分析。实验采用三光纤补偿式光纤传感器、LED 光源,光源中心波长为 890 nm,探测器为硅 PIN 光电二极管,三根光纤的间距为 $d_1 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0.5 \text{ mm}$ 。光纤芯半径为 $a_0 = 100 \text{ }\mu\text{m}$, $\xi = 0.081$ 。将传感器探头固定在测试平台上,标定时探头在测试平台上的最小移动距离为 $5 \text{ }\mu\text{m}$,探测器端接放大器并用 Kethley2 000 数字多用表进行信号采集。通过实验测得光纤传感器在常温(293 K)下距离发射光纤中心 d_1 的探测器 PIN₁ 和距离发射光纤中心 d_2 的探测器 PIN₂ 输出电压与位移的关系曲线。根据传感器在液氮温度下的工作要求,又在液氮温度(77 K)下测得光纤传感器的输出电压与位移的关系曲线。两个温度下的传感器输出电压与位移关系曲线如图 2 所示,图中可以看出在相同测量距离下离发射光纤中心更近的 PIN₂ 比 PIN₁ 输出的电压值更大,并且同一探测器在液氮温度下输出的电压值比常温下输出的电压值大。常温下和液氮温度下 PIN₁ 与 PIN₂ 输出电压的比值与位移关系曲线如图 3 所示,从曲线可以看出强度补偿式光纤传感器在液氮温度下拟合的曲线与常温下的拟合曲线非常接近,在 1.5 ~ 3.5 mm 距离段两曲线基本重合。对 1.5 ~ 3.5 mm 距离段的 77 K 下的拟合曲线进行了线性标定,通过计算分析可得从 293 K 到 77 K 两个拟合曲线在 1.5 ~ 3.5 mm 段的平均相对测量误差为 2.3%。这说明温度变化对补偿式光纤位移传感器测量精确度和分辨率的影响很小,因此在满足传感器低温正常稳定工作,实验测量分辨率以及精度要求的情况下,可以用常温(293 K)下和液氮温度(77 K)下标定的测量曲线进行外推来测量液氮温度(4.2 K)下转子的悬浮位移。实验中采集传感器两路输出电压信号通过已标定的曲

线即可测量位移大小。考虑到传感器标定时最小位移和光纤衰减等因素的影响后,得到本传感器在低温下的分辨率为 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 。

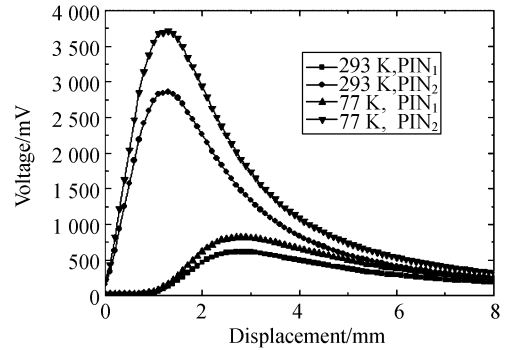


图 2 不同温度下传感器输出电压与位移关系曲线
Fig. 2 Relation of output voltage and displacement of sensor at different temperatures

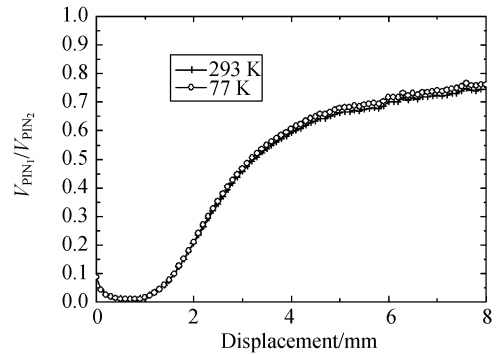


图 3 不同温度下传感器输出电压比值与位移关系曲线
Fig. 3 Relation of output voltage ratio and displacement of sensor at different temperatures

4 实验结果和分析

将标定好的光纤位移传感器安装在低温装置内对超导转子进行悬浮高度位移测量,装置如图 4 所示。转子的最大悬浮高度为 1.2 mm,由于在 1.5 ~ 3.5 mm 传感器具有很好线性度,所以将传感器探头安装在距离转子顶面 3 mm 处。实验在液氮温度(4.2 K)下进行,当给下悬浮线圈通电达到一定值时,由于超导迈斯纳效应产生的磁悬浮力便会克服转子的重力而使转子悬浮起来,这时通过补偿式光纤位移传感器测量转子的悬浮高度变化,从而监控转子的悬浮位置。线圈以 0.5 A/s 的速度励磁,直到电压采集表显示无

变化时,停止励磁。从实验中得到线圈通电流大小与超导转子悬浮高度关系曲线,如图5所示。从图中可以看出,当线圈电流 >8 A时,转子慢慢悬浮,而接近12 A时转子达到最顶端。虽然转子悬浮位移很小,但通电流大小和悬浮位移并不成线性关系。因此,可以通过光纤传感器测量转子悬浮高度来控制线圈电流大小,使转子悬浮在工作所需高度位置上。由于转子腔内有严格的磁通回路,顶端安装光纤传感器的空间内没有磁场,另外转子通过内部力矩线圈进行定中,这种补偿式光纤传感器在原理上可有效地补偿和消除外界因素对测量的影响,因此转子悬浮时环境磁场和转子振动对传感器测量结果没有影响。从测量结果来看,该光纤传感器可以在液氮温度下正常工作,而且传感器性能稳定、重复性很好,能达到一定的测量精度,适于安装在各种精密复杂的低温装置内进行位移测量。

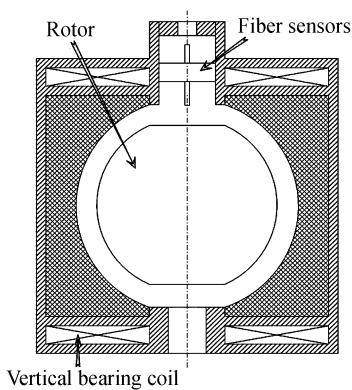


图4 超导转子悬浮装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the device for superconducting rotor suspension

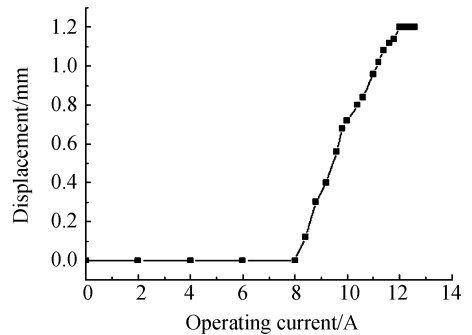


图5 转子悬浮位移测量结果

Fig. 5 Measurement results of suspension displacement of rotor

5 结 论

本文介绍了一种补偿反射式光纤位移传感器,该传感器能自动补偿光源强度变化、外界温度变化等因素对测量结果的影响。为了确保此光纤传感器可以在低温下测量超导转子的悬浮位移,对光纤传感器在常温下和液氮温度下的传输特性进行了分析比较,从两个温度下的拟合曲线可以看出温度对传感器测量精度的影响很小。对补偿式光纤位移传感器在液氮温度下进行了标定,确定传感器在低温下的测量分辨率达到了 $10\ \mu\text{m}$,并在液氮温度下对超导转子悬浮位移进行了测量。实验结果表明,该传感器可以在低温下正常工作,重复性好,可用于宽温度范围的位移测量,为光纤位移传感器在低温下的进一步应用提供了依据。

参考文献:

- [1] van OORT J M. A fiber optics sensor for strain and stress measurements in superconducting accelerator magnets [J]. *IEEE Transactions on Magnets*, 1994, 30(4): 2600-2604.
- [2] YANG C N, CHEN S P, YANG G G. Fiber-optical liquid level sensor under cryogenic environment [J]. *Sensors and Actuators*, 2001(94): 69-75.
- [3] 杨晶磊, 胡小方, 伍小平. 低温环境下光纤位移传感器测试系统的实验研究 [J]. *实验力学*, 2002, 17(1): 55-61.
YANG J L, HU X F, WU X P. Experiments on fiber optic displacement sensor for cryogenic environment [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, 17(1): 55-61. (in Chinese)
- [4] 孙晶华, 钱华明, 苑立波. 光纤接收光强的计算及其应用 [J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 1998, 2: 24-27.
SUN J H, QIAN H M, YUAN L B. The calculation of receiving light power in optical fiber and its applications [J]. *Optical Fiber and Electric Cable*, 1998, 2: 24-27. (in Chinese)
- [5] 唐继, 李朝英. 强度补偿型光纤位移传感器研究 [J]. *传感器世界*, 1999, 5(12): 15-18.

- TANG J, LI CH Y. Study on optic fiber displacement sensor with intensity compensation[J]. *Sensor World*, 1999, 5(12): 15-18. (in Chinese)
- [6] 徐涛, 吕海宝. 一种强度补偿反射式光纤位移传感器的研究[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(6): 109-112.
XU T, LV H B. Research of a reflective fiber-optic displacement sensor with intensity compensation[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, 22(6): 109-112. (in Chinese)
- [7] 金远强, 刘丽华, 马惠萍, 等. 用于高速转轴径向震动检测的光纤传感技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(1): 95-99.
JIN Y Q, LIU L H, MA H P, *et al.*. Fiber sensor used in detecting radial vibration of high rotating speed shaft [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 95-99. (in Chinese)
- [8] 刘丽华, 车仁生, 李建新, 等. 三层反射式同轴光纤束位移传感器设计[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增): 25-29.
LIU L H, CHE R SH, LI J X, *et al.*. Design of reflective fiber displacement sensor with three-layer coaxial fiber bundle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 25-29. (in Chinese)
- [9] 杨华勇, 吕海宝. 反射面形状对反射式光纤位移传感器理论特性的影响[J]. 光学精密工程, 2002, 10(4): 379-382.
YANG H Y, LV H B. Influence on the intensity modulation of a reflective fiber optic displacement sensor induced by reflector shape[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(4): 379-382. (in Chinese)
- [10] MURTHY S A N, PADHY B B. Fiber-optic displacement sensor[J]. *Journal of Optics*, 2000, 29(4): 179-191.

作者简介: 胡新宁(1977—), 男, 山东乳山人, 中国科学院电工研究所助理研究员, 主要从事低温测控及微细加工技术研究。E-mail: xininghu@mail. iee. ac. cn