

文章编号 1004-924X(2008)11-2092-06

光纤传感测量系统在超导转子旋转装置中的应用

胡新宁^{1,2}, 王秋良¹, 崔春艳^{1,2}, 韩立¹, 鞠昱^{2,3}, 王欣³, 谢亮³

(1. 中国科学院电工研究所应用超导重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要:介绍了超导转子旋转驱动原理以及应用在超导转子旋转装置中的一种光纤传感测量系统。光纤传感测量系统包括微位移光纤传感器、转速光纤传感器、电机控制光纤传感器和信号读取图形,该系统能够进行转子悬浮微位移和旋转速度的测量并提供转子旋转所需的控制信号。在 4.2 K 低温下进行了转子悬浮和旋转实验,超导球形转子悬浮微位移测量分辨率为 10 μm ,转子转速达到了 1 365 r/min。实验结果为进一步应用光纤传感测量系统精确监控超导转子工作姿态提供了参考。

关键词: 光纤传感器; 低温; 超导转子; 电磁力

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Application of fiber optic sensor measurement system to spinning superconducting rotor instrument

HU Xin-ning^{1,2}, WANG Qiu-liang¹, CUI Chun-yan^{1,2}, HAN Li¹, JU Yu^{2,3}, WANG Xin³, XIE Liang³

(1. *Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*
3. *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: The spin drive principle of superconducting rotor and a fiber optic sensor measurement system used in spinning superconducting rotor instrument were introduced. The measurement system includes a displacement fiber optic sensor, a speed fiber optic sensor, a motor control fiber optic sensor and signal readout patterns. It can not only gauge suspension micro-displacement and the rotative velocity of rotor, but also can generate some necessary motor control signals to drive rotor. The experimental results of the suspension and rotation of rotor at liquid helium temperature (4.2 K) show that the measurement resolution of suspension micro-displacement of superconducting spherical rotor is 10 μm and the rotor rotary speed is 1 365 r/min, which can give some useful references for the further application of fiber optic sensor measurement system to monitoring operating position of a rotor accurately.

Key words: fiber optic sensor; cryogenic environment; superconducting rotor; electromagnetic force

收稿日期: 2008-03-26; 修订日期: 2008-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50577063)

1 引 言

超导材料和低温技术的不断发展对新型精密仪器装置设备的研制起着巨大的推动作用。超导体独特的物理性能有着其它材料不可比拟的应用优势,尤其是超导磁悬浮技术越来越受到广泛关注。超导磁悬浮技术有很多优点:(1)整个悬浮系统工作在低温环境下,材料的化学活动性、膨胀系数等都大大降低;(2)超导体的零电阻和迈斯纳效应使其能量损耗几乎为零;(3)超导磁悬浮具有自适应稳定性,转子可承受较高的过载能力。超导磁悬浮技术的这些特点为发展高精度惯性导航器件和仪器装置奠定了基础^[1-3]。

光纤传感器具有抗电磁干扰、体积小、结构简单和灵敏度高等特点。国内外在低温装置内通过光纤传感器探测各种物理量的应用已越来越广泛,常见的包括对大型超导磁体线圈的压力、应变以及温度的测量,对低温装置内液体液位的测量等^[4-5],但在低温惯导仪器装置内应用光纤传感器的报导极少^[6]。为了能够测量超导转子悬浮微位移和旋转速度并向旋转驱动电机提供驱动信号,本文将光纤传感技术应用于低温精密仪器内,介绍了应用在超导转子旋转装置内的一种光纤传感测量系统,通过该系统设计实现了对转子悬浮位置和旋转速度的测量并同时能够向驱动电机提供驱动转子旋转所需的连续驱动控制信号,分析了光纤传感器测量系统精度对转子旋转速度的影响。最后,在 4.2 K 低温装置内进行了超导转子的悬浮和旋转实验。实验结果及讨论为在超导转子旋转装置中应用光纤测量系统并进一步提高转子监控精度奠定了基础,对今后工作中进一步提高转子转速具有重要参考价值。

2 超导转子旋转驱动原理

超导转子旋转驱动原理是基于超导体的迈斯纳效应。根据迈斯纳效应的特点,处于零电阻状态的超导体,外磁场不能穿透超导体,仅在超导体表面产生感应电流。感应电流产生的磁场与外磁场大小相等方向相反,此时它们之间便有电磁力的相互作用表现出超导体的抗磁性,这个电磁力即磁压力对外可表现为非接触式的机械力的形

式^[7]。这即是设计超导转子悬浮旋转方法和仪器装置的理论基础和出发点。对于超导体表面磁压力的大小和方向,有以下两个结论:第一,磁场中的超导体表面受到的磁压力的方向垂直于超导体表面向里。第二,单位面积上磁压力 f 的大小与超导体表面的磁感应强度 B 的平方成正比,即:

$$f = B^2 / 2\mu_0, \quad (1)$$

可以看出,超导体的表面磁压力只与超导体的表面磁场强度有关,单位为 N/m^2 。另外,转子旋转加速度 a 与转子受到的转动合力矩和转子的转动惯量有关,即:

$$a = M/J, \quad (2)$$

其中, M 为转子受到的转动合力矩, J 为转子的转动惯量。

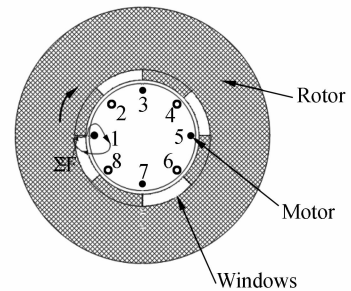


图 1 超导转子驱动原理

Fig. 1 Drive principle of superconducting rotor

将超导金属材料转子设计成空心球,中心孔内装入带有超导线圈的中心柱作为定子,将转子内孔壁等间隔开一定厚度的凹槽形成窗口,利用定子上的超导线圈产生的磁场在窗口侧壁上产生的磁压力形成转动力矩推动转子旋转。驱动原理如图 1 所示,当绕组 1 通电产生磁场时,作用在离其最近的窗口的两个侧壁上的磁压力大小不同而产生一个方向的合力矩从而推动转子旋转。中心柱定子上有 8 组线圈,其中 1、3、5、7 四组串联在一起作为 A 相,2、4、6、8 串联在一起作为 B 相。在驱动过程中,当转子处于图 1 的位置时给线圈绕组 A 相通电,此时绕组产生顺时针方向的磁场,由于磁压力对临近窗口侧壁顺时针的力矩大于逆时针的力矩,使得转子受到一个顺时针的合力矩的作用开始按顺时针方向加速转动。当转子转过 22.5° 时, A 相的驱动线圈正处于窗口中间位置,此时对窗口两侧壁的合力矩正好相等。当转子继续顺时针旋转时, A 相驱动线圈的合力

矩方向变为逆时针,而此时 B 相驱动线圈产生合力矩方向为顺时针。因此在 A 向驱动线圈处于窗口中间位置时,对 A 相线圈停止通电同时给 B 相线圈通电,B 相线圈就能继续驱动超导转子顺时针方向加速转动。如此 A、B 相绕组根据转子窗口的位置交替通电就能驱动转子连续加速转动。把加速的时序反相就可控制转子做减速运动,直至最后转子停止然后作反向加速运动。同理提供不同的通电时序即可控制转子逆时针的加速减速旋转运动。要使 A、B 相线圈绕组连续交替通电控制转子旋转状态,必须根据窗口位置提供正确的通电时序。因此根据上述转子驱动方式进行了光纤传感测量系统的设计,根据光纤传感测量系统提供转子旋转时的窗口位置信息,通过信号处理变换得到控制转子加速减速的时序信号。

3 光纤传感测量系统设计

光纤传感测量系统的作用是能够进行转子悬浮微位移和旋转速度测量并产生驱动转子旋转所需的控制时序信号。该系统主要包括微位移光纤传感器、转速光纤传感器、电机控制光纤传感器和转子顶部平面上的信号读取图形,如图 2 所示。转子腔内各部件结构紧凑,超导球转子与壳体之间的间隙仅为 0.5 mm,所以传感器只能安装在转子顶部上方空间。将转子顶部加工成平面作为反射面,在反射面上加工漫反射图形形成驱动控制系统所需的信号读取图形。

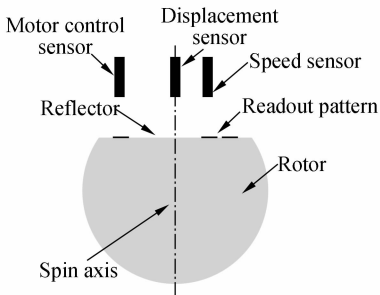


图 2 光纤传感测量系统

Fig. 2 Schematic diagram of fiber optic sensor system

微位移光纤传感器安装在转子旋转轴线上测量转子在轴线方向上的悬浮位移大小。转速光纤传感器和电机控制光纤传感器分别安装在微位移光纤传感器的两侧,并与微位移光纤传感器安装

在一条水平直线上。微位移光纤传感器为三光纤补偿式结构^[8-11],一路发光,两路接收反射光,发出的光经过转子顶面反射回后通过传感器的探测器进行光电转换输出连续模拟电压信号。探测器二极管接在反馈放大电路上,传感器输出电压为光电二极管产生的光电流与反馈电阻的乘积。通过标定传感器探头到转子顶面距离与传感器输出两路电压比值的关系曲线,在线性测量范围内测量转子悬浮微位移大小。转速光纤传感器和电机控制光纤传感器只获取脉冲信号,所以传感器均为两光纤结构,一路发光,一路接收。信号处理时在光电二极管反馈放大电路输出电压端接运算放大器比较电路,当光照在花纹漫反射图形上时,探测器接收光量很少,光电流值较小,输出电压较低,此时可根据测量系统设计的要求通过运算放大器比较电路处理后输出高电平。相反,当光照在转子顶面时,电路输出低电平。转子顶面花纹图形对应转子窗口的位置,传感器通过全反射和漫反射产生的高低电压经过运放电路处理输出符合驱动逻辑要求的标准 TTL 电平信号来测量转子转速并提供转子旋转驱动所需的电机驱动脉冲时序信号。微位移光纤传感器和转速光纤传感器以及电机控制光纤传感器均为自研的光纤传感器。光纤为石英多模光纤,单根光纤芯径为 200 μm 。传感器光源为 LD,波长为 1 310 μm ,功率为 1 mW。光纤传感器如图 3 所示。实验标定表明,传感器在 2 mm 的测量范围内分辨率为 10 μm ^[6]。

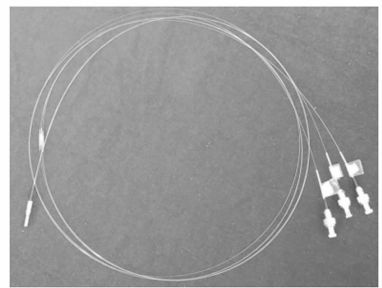


图 3 光纤传感器

Fig. 3 Photo of fiber optic sensor

转子顶部平面信号读取图形对于整个测量系统至关重要,它不仅提供转子的旋转速度及方向信息,还提供驱动转子旋转的电机控制信息。转子顶部是直径为 15 mm 的圆平面,平面上刻制的

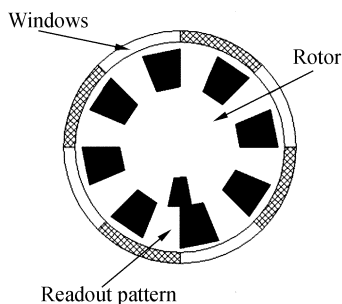


图 4 信号读取图形

Fig. 4 Signal readout patterns

信号读取图形及其与转子内孔壁上窗口位置的对应关系如图 4 所示。工作时传感器在刻制的漫反射图形上输出高电平,而在转子顶部的反射面上输出低电平。信号读取图形外围一周有 8 个梯形花纹,每个梯形腰两边均成 22.5° 夹角。转子旋转过 45° 即一个窗口角度时,电机控制传感器将探测输出一对等脉宽的高低电平。内侧一周有一个梯形花纹,当转子旋转一周时,在经过单个花纹时输出一个高电平,通过计数来测量转子转速,另外通过与外围临近的一个花纹相位比较来判别转子的旋转方向。当转子内孔壁的窗口与顶部信号读取图形位置对应,电机的某相绕组与电机控制传感器和转速传感器位置对应后,就可以根据两传感器输出的电平信号通过时序处理来提供驱动转子的正反加减速的控制时序信号。另外,对于漫反射面制作,不仅要保证漫反射效果,还要保证漫反射图形边缘的精度,一般图形制作误差应控制在 0.5% 以内。

整个光纤测量系统精度不仅决定着转子姿态监控精度,而且对于转子转速大小有着很大影响。首先,位移光纤传感器测量精度决定了转子悬浮在球腔中心位置的精度,转子位于球腔中心时与球腔间隙均相等,受到的电磁干扰力矩最小,有助于提高旋转速度。其次,花纹图形直接对应转子窗口位置,若对应位置不精确使逻辑驱动信号相位产生误差会降低转子驱动效率。只有提高了传感器安装精度和花纹图形的制作精度才能改善图形信号的读出精度以便获得更精确的驱动信号相位从而拥有较高的转子驱动效率。因此,为进一步提高转子旋转速度,需要不断提高整个光纤测

量系统的制作、安装和测量精度。

4 实验结果与讨论

将光纤传感测量系统安装在转子腔内进行超导转子悬浮旋转实验,实验装置如图 5 所示。转子直径 50 mm,球腔内径的大小决定转子悬浮的最大高度,本装置转子悬浮最大高度为 1 mm。位移光纤传感器在 $1.5\sim 3$ mm 具有很好的线性度,因此将光纤传感器探头安装在距离转子顶面 3 mm 处。转子腔浸泡在液氦容器内,液氦容器

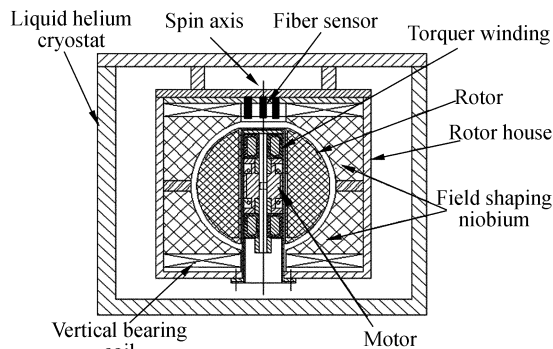


图 5 超导转子旋转装置

Fig. 5 Experimental setup for spinning superconducting rotor

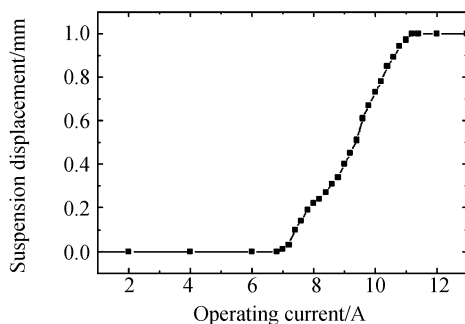


图 6 转子悬浮位移测量结果

Fig. 6 Measurement results of suspension displacement of rotor

通过外围低温装置不断制冷来保存液氦。实验在液氦(4.2 K)温度下进行,首先给力矩器线圈通 20 A 的电流以消除转子质量不平衡产生的转子偏移,使转子旋转轴尽量保持竖直,转子与中心柱定子的间隙为 0.5 mm。然后给下悬浮线圈以 0.2 A/s 的速度励磁,当励磁电流达到一定值时,

由于超导迈斯纳效应产生的磁悬浮力便会克服重力使转子悬浮起来,悬浮过程中通过光纤位移传感器测量转子的悬浮高度,转子在 7 A 时开始悬浮,悬浮电流在 9.4 A 左右时转子上升到转子腔的中心位置附近,在 11 A 时位于悬浮最大高度位置,测量结果如图 6 所示。可以看出,在缓慢励磁下,转子悬浮高度与悬浮电流基本保持线性关系。但在刚起支悬浮起来时由于转子与球腔间隙很小,磁场均匀度不好,产生的悬浮力不稳定,从图形可以看出,电流在 7~8 A 时悬浮的线性度稍差一些。经过多次实验测量结果来看,传感器性能稳定、重复性好,达到一定的测量精度,对精确监控转子的悬浮位置提供了有力的保证。当转子位于球腔中心位置附近时,开始同时增大上下悬浮线圈电流来增加转子支撑刚度,并通过调节使上下悬浮线圈保持一定电流差,使转子处于腔体中心位置。此时同时给电机 A、B 两相绕组一个 10 A 的启动脉冲电平驱动信号使转子旋转起来。将转速传感器和电机控制传感器探测输出的信号经过转换产生驱动转子连续加速旋转的时序信号,并通过电源输出给超导电机驱动线圈,通过控制电机电流大小来控制转子旋转的角加速度。实验时电机通 14 A 电流,转子转速从零开始加速,经过 29.7 min 达到 1 365 r/min,转子转速可由测量系统外接仪器直接显示。实验中转子旋转及驱动信号波形如图 7 所示,第三行和第四行的波形分别为电机控制传感器和转速传感器的输出信号波形,当转子旋转一周时两个传感器分别输出 8 个和 1 个高电平。第一和第二行信号波形为通过电机控制传感器和转速传感器的输出信号处理转换得到的电机 A、B 相的加速旋转驱动时序信号。转子转速主要与光纤传感测量系统精度、驱动电机电流、转子腔内的真空度、转子质量不平衡干扰力矩以及腔内电磁干扰力矩等有关。为了进一步提高转速,在增大驱动电流的同时必须提高测量系统精度、转子腔内真空度以及减小各种干扰力矩,这就要求转子和转子腔体必须要有极高的

加工精度以及保证装置内各种低温真空密封具有较高的可靠性。这些都需要在进一步的工作中不断提高和完善。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,另外转子具有一定的定轴性和支承刚度,因此转子悬浮旋转时环境磁场和转子振动对系统测量结果没有影响。从测量结果来看,光纤传感测量系统可有效进行转子悬浮微位移测量、转子转速测量并提供转子旋转的驱动时序信号。通过反复实验表明,测量系统性能稳定,达到了一定的精度,因此适用于在低温惯导仪器装置中监控转子的工作姿态。

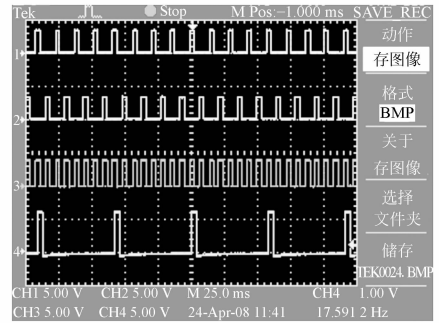


图 7 转子转速及电机驱动信号测量结果

Fig. 7 Measurement results of rotor rotary speed and motor control signal

5 结 论

本文介绍了超导转子旋转驱动原理以及应用在超导转子旋转装置中的一种光纤传感测量系统。该系统能够进行转子悬浮微位移和旋转速度测量并产生驱动转子旋转所需的控制信号。在 4.2 K 低温下进行了转子悬浮旋转实验,超导球形转子悬浮微位移测量分辨率为 $10 \mu\text{m}$,转子转速达到 1 365 r/min。实验结果表明,该测量系统性能稳定,重复性好,受外界干扰小,达到了一定的精度,为进一步应用光纤传感测量系统精确监控转子工作姿态以及提高转子转速提供了参考。

参考文献:

- [1] BENCZE W J, EGLINGTON M E, BRUMLEY R W, *et al.*. Precision electrostatic suspension system for the gravity probe B relativity mission's science gyroscopes[J]. *Advances in Space Research*, 2006; 1-6.
- [2] LOU S Y. Systems engineering for the gravity probe-b program[J]. *SPIE*, 1986, 619; 47-57.

- [3] 何川,王秋良. 旋转超导球体在均匀磁场中的力矩分析[J]. 兵工学报,2007,28(6):709-713.
HE CH,WANG Q L. Analysis on magnetic torque of superconducting sphere with high rotating speed in uniform magnetic field[J]. *Acta Armamentar*,2007,28(6):709-713. (in Chinese)
- [4] RAJINIKUMAR R,NARAYANKHEDKAR K G,KRIEG G, *et al.*. Fiber bragg gratings for sensing temperature and stress in superconducting coils[J]. *IEEE*,2006,16(2):1737-1740.
- [5] 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.
- [6] 胡新宁,崔春艳,雷沅忠,等. 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[J]. 光学精密工程,2007,15(9):1342-1346.
HU X N,CUI CH Y,LEI Y ZH, *et al.*. Application of fiber displacement sensor to measuring suspension micro-displacement of superconducting rotor in cryogenic instrument[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(9):1342-1346. (in Chinese)
- [7] 陈秉乾,舒幼生,胡望语. 电磁学专题问题研究[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
CHEN B Q,SHU Y SH,HU W Y. *Research on Electromagnetic Special Issues*[M]. Beijing:Higher Education Press,2001. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 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& Electric Cable*,1998(2):24-27. (in Chinese)
- [11] 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)

作者简介:胡新宁(1977—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事低温精密仪器科学技术研究。E-mail: xininghu@mail. iee. ac. cn

导师简介:王秋良(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事超导磁体科学技术研究。E-mail: qiuliang@mail. iee. ac. cn