

文章编号 1004-924X(2010)01-0169-06

# 超导转子旋转驱动装置的设计

胡新宁<sup>1,2</sup>, 王厚生<sup>1</sup>, 王 晖<sup>1</sup>, 王秋良<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 为了实现超导球形转子在低温环境下高速稳定的旋转, 设计了一种基于迈斯纳效应的超导转子旋转驱动装置。该旋转驱动装置主要包括超导定子和超导球形转子两部分, 定子采用两相结构, 转子采用在其内壁上开有 4 个窗口的空心结构。利用定子超导线圈的磁场在空心转子内壁窗口上产生的转动转矩驱动转子旋转。然后, 通过 Ansoft 软件对超导转子旋转驱动力进行了有限元分析。分析表明, 驱动力矩与驱动电流的平方近似成正比例关系。在 4.2 K, 30 Pa 下进行了转子旋转实验, 结果显示, 30 A 驱动电流下转子转速达到了 8 512 r/min, 表明该旋转驱动装置能够将转子加速到 8 500 r/min 以上的工作区域, 为进一步优化装置设计参数以及提高转子旋转稳定性奠定了基础。

**关键词:** 超导转子; 驱动装置; 电磁力; 有限元分析; 低温

**中图分类号:** TM26; TH703 **文献标识码:** A

## Design of drive device for spinning superconducting rotors

HU Xin-ning<sup>1,2</sup>, WANG Hou-sheng<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, WANG Qiu-liang<sup>1</sup>

(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*)

**Abstract:** In order to maintain a stable spin and high-speed rotation of superconducting spherical rotors at low temperatures, a spin drive device for superconducting rotors is designed based on the Meissner effect. The spin drive device includes a superconducting stator and a superconducting spherical rotor. The stator is fitted two-phase coils and the rotor is a hollow structure with four windows in its inner wall. The electromagnetic field generated by the stator coils can produce a rotating torque on the windows in the inner wall to drive the rotor to rotate. Then, the driving force is calculated using the Ansoft software, and analysis results show that the driving torque is approximately in proportional to the square of drive current. Rotation experiments are performed at 4.2 K, 30 Pa and rotation speed is up to 8 512 r/min in a drive current of 30 A. Experimental results indicate that the drive device can accelerate the rotor to an operating speed above 8 500 r/min, which provides valuable references for the further improvement of the design parameters of drive devices and the rotation stability of superconducting spherical rotors.

收稿日期: 2009-02-13; 修订日期: 2009-03-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50577063)

**Key words:** superconducting rotor; drive device; electromagnetic force; Finite Element Analysis (FEA); cryogenic environment

## 1 引言

随着超导材料和低温技术的不断发展,超导磁悬浮技术在各个领域的应用也越来越广泛,例如超导磁悬浮列车、超导磁悬浮轴承、超导飞轮储能、重力加速度仪等<sup>[1-4]</sup>。由于超导体的完全抗磁性(即迈斯纳效应)可以得到稳定的超导磁悬浮状态,同时这种非接触的悬浮可以在没有能量损失的情况下稳定运行,因此应用超导磁悬浮技术研制生产各类高精度精密仪器有着巨大的潜能和广阔的前景。

利用高速旋转的超导转子旋转轴作为测量基准,可以进行角速度和方位的测量。国外 20 世纪 60 年代就开始了此方面超导仪器的研制并成功进行了应用,而我国在此方面的工作起步较晚,目前还没有相关较为成熟的研究和报道。本文对基于迈斯纳效应的超导转子旋转驱动原理和装置结构设计进行了讨论,分析了驱动结构的电磁场分布特点以及驱动电流与旋转加速度的关系。通过旋转实验比较了驱动力分析计算结果,并且在驱动装置上使转子转速达到了 8 500 r/min 以上,证明了此驱动装置设计合理、运行可靠。实验结果及讨论为今后进一步优化旋转装置设计,提高转子旋转的稳定性及转子漂移测试工作提供了参考。

## 2 转子旋转驱动装置的设计

处于超导态的理想超导体,不管外加磁场如何变化,超导体内的磁感应强度总是等于零,这个效应称为迈斯纳效应。根据迈斯纳效应可知,磁场不能穿透超导体,处于外磁场中的超导体产生的感应电流仅在超导体表面的穿透层中流过,感应电流产生的感应磁场与外加磁场大小相等而方向相反,因此它们之间便有电磁力的相互作用,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<sup>[5]</sup>。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。

转子旋转驱动装置主要包括超导球形转子、

中心柱定子、球形超导支承腔及超导线圈等。超导球形转子是转子旋转驱动装置的核心部件。其中,超导转子旋转驱动装置工作时,转子依靠电磁力悬浮在超导磁悬浮支承腔内做高速旋转。在理想条件下,超导转子不受任何外力作用,完全工作在自由状态,其旋转轴将保持在惯性空间内永远不动。为了实现这种理想的工作状态,超导球形转子的材料必须是高刚度、高稳定性、质量分布均匀的超导材料,并且这种材料尽可能具有较高的临界磁场和临界温度。转子质心与外球面几何中心重合,转子外球面在旋转状态时应是理想的圆球面。由于超导材料临界磁场的限制,转子的支承力是有限的。在相同支承力条件下,转子能承受的过载加速度与转子质量成反比,因此一般可将转子做成空心来降低转子质量,另外可以适当增大转子半径来降低转子加工精度的高要求。从技术难易程度上考虑,选择空心大球转子方案更可行一些。目前,制作超导球形转子和悬浮支承腔的超导材料均选用高纯金属铌。铌材料的上临界磁场可达 0.199 4 T,临界温度达到 9.2 K,相比其他较易加工的理想超导金属材料具有较高的临界磁场和临界温度。超导球形转子的结构设计要综合考虑承载能力、支承方式、支承间隙大小、额定转速、离心变形以及电磁干扰力矩等因素。本文设计的驱动装置的超导转子结构如图 1 所示,转子为赤道加厚的空心薄壁圆球,直径为 50 mm,质量 105.7 g。

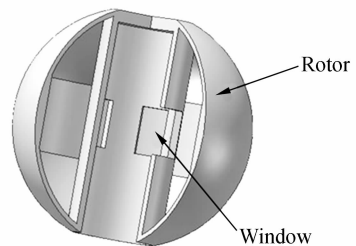


图 1 超导转子结构示意图

Fig. 1 Structure of superconducting rotor

若装有旋转驱动线圈的定子球形转子外,每个线圈所产生的磁压力是沿法线作用在转子光滑表面上的,也就不会产生旋转力矩。如果线圈

是多相绕组的一部分,在这样的绕组中通上电流即可建立旋转磁场,但是这个磁场对转子的作用只表现为垂直于表面的压力,也不会产生旋转力矩。若借助上述超导磁压力来进行驱动旋转,为保证转子外球面不被破坏,就不能采用定子位于转子外面的结构。如果定子在转子内部,就可在处于定子线圈附近区域的空心转子内孔壁上开窗口从而产生转动转矩来驱动旋转。转子内孔壁有一定的厚度,在转子内孔壁上等间距开一定厚度的凹槽形成窗口,由于内孔内安装了带有超导驱动线圈的中心柱作为定子,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即可形成转动转矩推动转子旋转。定子线圈的驱动效率跟线圈的相数和极数有关,线圈极数与相数越多,转子驱动效率越高,但转子内孔窗口和中心柱的制作难度增加,并且增大了线路的电感和超导线圈电源控制的难度。另外,定子线圈每相绕组是采用并联还是串联方式通电得到的转子驱动效率也是不同的。考虑电路控制的难易以及驱动力的均衡与平稳,一般可采用串联方式通电<sup>[6]</sup>。综合考虑驱动效率、加工难度和控制系统的复杂性,设计的旋转驱动装置的定子采用两相四极的线圈结构,如图 2 所示。根据光纤传感测量系统提供的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,将时序信号经过电源放大以脉冲电流形式供给 A、B 相定子线圈交替通电驱动转子连续加速或减速旋转<sup>[7-8]</sup>。

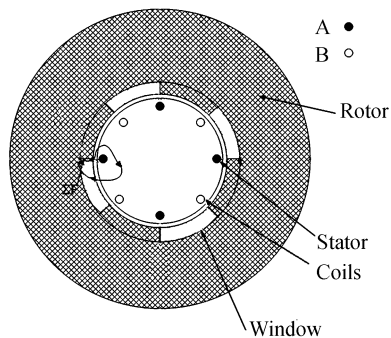


图 2 旋转驱动结构示意图

Fig. 2 Drive structure of superconducting rotor device

### 3 转子旋转驱动力分析

本文根据驱动装置结构设计对转子旋转驱动

力进行了分析,计算了转子在不同驱动电流下的驱动力矩和旋转加速度,为实验中设定合理的运行参数以及保持转子加速过程的稳定提供依据。

由于驱动装置的电磁结构比较复杂,理论上很难准确计算超导转子内孔壁表面的电磁场分布以及它所受到的电磁作用力,因此,只能用数值分析的方法分析计算<sup>[9-10]</sup>。根据图 2,各部件的相对位置参数中心柱定子线圈中心到转子旋转轴的距离为 6.33 mm,转子内孔壁到旋转轴的距离为 8.33 mm,转子内孔壁的厚度为 0.8 mm,通过有限元分析软件 Ansoft 进行电磁场及驱动力的分析计算。图 3 是转子在某位置时单相驱动线圈通 20 A 电流时驱动结构内的磁场分布图。由图可知,中心柱定子线圈产生的磁场最大值为  $4.47 \times 10^{-2}$  T,线圈周围的磁场在径向上不断减小,从而在窗口侧壁两端上产生大小不同的磁场,此磁压力差即可形成转动转矩推动转子旋转。驱动线圈通 50 A 电流时,计算最大磁场强度为 0.112 7 T;80 A 时最大磁场强度为 0.181 3 T。综合考虑铌的临界磁场值、转子驱动稳定性和电流引线的漏热等影响因素,一般取驱动线圈工作电流小于 50 A。

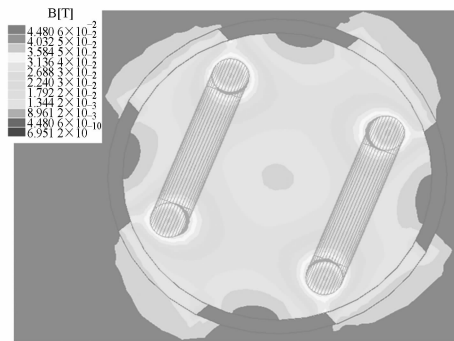


图 3 单相定子线圈电磁场分布图

Fig. 3 Electromagnetic field distribution under single-phase stator coils

已知转子极轴转动惯量为  $504.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ ,通过计算得到不同电流下转子转动转矩和旋转加速度值,如表 1 所示。计算结果分析可得,转子驱动力矩近似与驱动电流的平方成正比。因此,可根据实验装置实际供电范围和转子驱动稳定性需要合理选择驱动电流大小。

表 1 不同驱动电流下旋转角加速度计算

Tab. 1 Calculation of rotary accelerations at different drive currents

电流/A	转动力矩/(N·m)	角加速度/(rad/s <sup>2</sup> )
10	$9.64 \times 10^{-6}$	0.191
15	$2.17 \times 10^{-5}$	0.430
20	$3.86 \times 10^{-5}$	0.765
25	$6.03 \times 10^{-5}$	1.196
30	$8.68 \times 10^{-5}$	1.721
40	$1.54 \times 10^{-4}$	3.053
50	$2.41 \times 10^{-4}$	4.778

#### 4 转子旋转实验结果及讨论

在超洁净室内将装置各部分元件按照装配精度要求逐一安装形成旋转驱动装置,如图 4 所

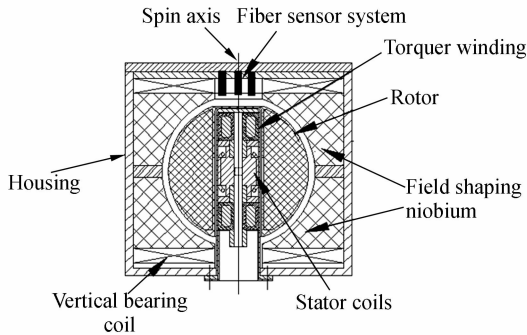


图 4 超导转子旋转驱动装置

Fig. 4 Drive device of spinning superconducting rotor

示。驱动装置安装在超导球形转子旋转装置的液氮腔内,液氮腔与具有微震动特性的脉管制冷机连接,工作时通过制冷机制冷保存液氮。转子悬浮最大高度为 1 mm,利用光纤传感测量系统进行转子悬浮位移测量和驱动信号的采集和处理,位移测量分辨率为  $10 \mu\text{m}^{[7-8]}$ 。驱动装置工作时浸泡在液氮中,实验在液氮(4.2 K)温度下进行,将支承腔内冲入 30 Pa 的氦气进行热量交换以保持转子温度的稳定。首先给中心柱内的力矩器线圈通 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。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系统转子的悬浮高度。悬浮电流在 7 A 左右时转子开始悬浮,9.4 A 左右时

转子上升到支承腔的中心位置,在 11.5 A 左右时转子位于悬浮最大高度位置。通过光纤传感测量系统精确监控转子的悬浮位置,当转子悬浮于支承腔中心位置时,增加上、下悬浮线圈电流来增大转子支承刚度,并调节线圈电流以保持转子处于支承腔的中心位置。此时,同时给中心柱的 A、B 两相定子线圈一个 15 A 的启动脉冲电流使转子产生初始旋转。然后通过转换光纤传感测量系统采集的信号产生驱动转子连续加速旋转的时序信号,再通过电源把脉冲电流输出供给中心柱定子线圈使转子不断加速旋转,通过控制驱动电流大小来控制转子旋转的加速度。在 2 000 r/min 内的低转速下对不同驱动电流下的旋转加速度进行了实验测量,与理论计算分析对比如图 5 所示。从图中可以看出理论计算值略小于实验值,平均误差在 7% 以内,证明计算模型和结果还是较为准确的。旋转加速度的合理控制,可以保证转子从启动到高转速过程的稳定性。加速度过快,脉冲力矩过大容易产生严重侧摆运动;加速度过慢,转子不易迅速通过临界转速从而导致共振振幅较大,严重时转子会碰到中心柱定子。因此,必须合理选择加速度范围才能使转子较为稳定的加速旋转直至额定工作转速。

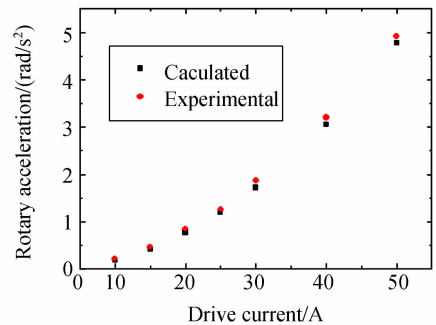


图 5 驱动电流与转子旋转加速度关系

Fig. 5 Drive currents versus rotary accelerations

转子只有达到额定工作转速才能具有较高的定中精度。转子转速主要与光纤传感测量系统精度、驱动电流、支承腔内的真空度、转子质量不平衡干扰力矩以及腔内电磁干扰力矩等有关。在相关研究工作取得一定提高和改善后,进行了转子的高转速实验。实验时,支承腔内真空 30 Pa,两相定子线圈通 30 A 电流进行加速,转子转速从 0 开始经过 36.5 min 达到了 8 512 r/min,转子转

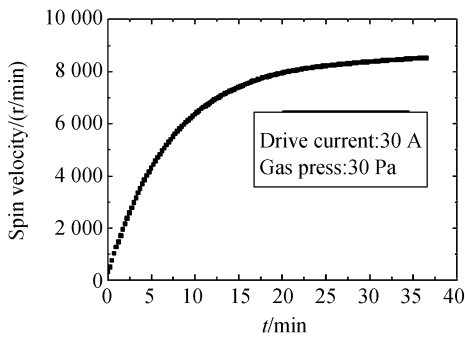


图 6 超导转子旋转实验结果

Fig. 6 Experimental results of accelerating superconducting rotor

速可由测量系统外接计算机直接显示和保存,加速过程如图 6 所示。从图中可以看出整个加速过程并不是线性的,在 4 000 r/min 以下的低转速区,转子转速与加速时间基本成线性关系。而随着转速的继续增加,气体阻尼开始不断增大,旋转加速度开始减小,加速过程变得越来越平缓。当转子加速到额定工作转速后,撤掉驱动电流并将支承腔内真空提高到  $10^{-3}$  Pa 量级可保持转子转

## 参考文献:

- [1] MA G T, WANG J S, WANG S Y, *et al.*. A novel propulsion method for high-Tc superconducting maglev vehicle [J]. *Physica C: Superconductivity*, 2008, 468: 7-11.
- [2] 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.
- [3] ICHIHARA T, MATSUNAGA K, *et al.*. Fabrication and evaluation of superconducting magnetic bearing for 10 kW h-class flywheel energy storage system [J]. *Physica C: Superconductivity*, 2005, 426: 752-758.
- [4] LIZUKA T, SAKAI N, FUJITA H. Position feedback control using magneto impedance sensors on conveyor with superconducting magnetic levitation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 150 (1): 110-115.
- [5] 张裕恒. 超导物理 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1997.  
ZHANG Y H. *Superconducting Physics* [M].

速基本不变。从实验结果来看,转子旋转驱动装置可安全稳定的将超导转子加速到工作区域 (8 000~11 000 r/min), 并且随着超导球形转子质量平衡精度、球面精度以及支承腔体加工装配精度的进一步提高,可实现转子的漂移测试工作。

## 5 结 论

本文介绍了一种基于迈斯纳效应的超导转子旋转驱动装置,利用驱动装置的定子线圈产生的磁场在空心转子内孔窗口产生的转动力矩驱动转子旋转。对超导转子旋转驱动力进行了有限元分析计算,转子驱动力矩近似与驱动电流的平方成正比,并通过实验证明平均误差在 7% 以内。然后,在 4.2 K、30 Pa 下进行了转子旋转实验,30 A 驱动电流下转子转速达到了 8 512 r/min。实验结果表明,转子旋转驱动装置可以稳定地将转子加速到额定工作转速区域,为今后优化旋转装置设计、进一步提高转子旋转的稳定性以及转子漂移测试的研究工作打下了基础。

Hefei: USTC Press, 1997. (in Chinese)

- [6] SHANG M X, DAI Y M, WANG Q L, *et al.*. Design and electromagnetic analysis of a superconducting diamagnetic motor [J]. *IEEE Trans. On Applied superconductivity*, 2006, 16(2): 1481-1484.
- [7] 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 Z, *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)
- [8] 胡新宁, 王秋良, 崔春艳, 等. 光纤传感测量系统在超导转子旋转装置中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2092-2097.  
HU X N, WANG Q L, CUI CH Y, *et al.*. Application of fiber optic sensor measurement system to spinning superconducting rotor instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2092-2097. (in Chinese)
- [9] 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)

[10] 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 S, HU W Y. *Research on Electromagnetic Special Issues*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)

#### 作者简介:



胡新宁(1977—),男,山东乳山人,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: xining-hu@mail. iee. ac. cn



王 晖(1972—),男,山西太原人,博士,副研究员,主要从事强磁场下材料性能及加工技术研究。E-mail: hui-wang@mail. iee. ac. cn



王厚生(1972—),男,山东德州人,博士,副研究员,主要从事超导磁体设计及电磁场计算研究 E-mail: hudson@mail. iee. ac. cn

#### 导师简介:



王秋良(1965—),男,湖北黄冈人,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

#### ● 下期预告

## 飞机三维姿态测量的角平分线方向向量法

王习文<sup>1,2,3</sup>, 马 军<sup>1</sup>, 陈 娟<sup>1</sup>, 郭 劲<sup>1</sup>, 曹立华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林大学, 吉林 长春 130025)

为实现用靶场光测图像获得飞机的三维姿态,基于交会测量提出一种飞机三维姿态测量的新方法—角平分线方向向量法。对交会图像进行边缘检测和特征线提取,获得飞机两机翼边缘特征线上适当两点的坐标,经两次坐标转换到特定坐标系下,联合经纬仪参数及跟踪的俯仰、方位角,解算机翼边缘特征线在特定坐标系下的方向向量,利用飞机结构的对称性,在机翼特征线平面求解其两条角平分线方向向量,重构飞机中轴线及其同面垂线的方向向量,据此计算出飞机的俯仰、偏航和滚动三维姿态。利用两台光电经纬仪交会跟踪飞机的机动飞行表明:上述方法稳定、可行、实用,只要图像上机翼边缘线成像清晰,测量的姿态角误差不会超过 $1^\circ$ 。此法不仅可为靶场光测设备跟踪图像的处理提供了一种新途径,而且可为其他运动目标的姿态测量提供借鉴。