

# 径向型超导轴承的计算和实验研究

邹银才<sup>1,2</sup>, 商晋<sup>1,2</sup>, 关翔<sup>1,2</sup>, 边星<sup>1</sup>, 伍继浩<sup>1,2</sup>, 李青<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100190)

(2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 针对应用于离心式氦气冷压机的径向型高温超导磁悬浮轴承, 给出了永磁转子磁场计算和结构设计方法, 并开展了轴承径向力和径向刚度的计算研究, 搭建了超导轴承性能测量平台, 开展了轴承转子空间磁场测量和轴承性能测试。计算和测试结果表明, 磁场计算方法可行, 且结果准确, 在距离永磁转子外表面 1 mm 处的最大外磁场强度约为 0.5 T。轴承径向力在场冷和零场冷条件下的计算结果均随转子偏心量的增大而增大, 与测试结果在线性度和趋势上具有很好的一致性。实验轴承径向刚度测试值为 362.4 N/mm, 与场冷条件下的径向刚度计算结果 334.594 N/mm 接近。所述的径向轴承磁力计算方法可用于超导轴承径向刚度的定性计算和设计, 对超导轴承的应用研究具有一定的指导意义。

**关键词:** 氦气冷压机; 径向型超导轴承; 径向力计算; 性能测试

中图分类号: TM26

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)09-3077-07

随着超导现象的发现和超导技术的发展, 对低温制冷技术有了更高的需求, 同时, 低温制冷技术的进步又促进了超导强磁场技术的应用和发展。国内外正在建设和已经建设的强子对撞机, 热核反应堆, 离子加速器, 散裂中子源等大科学装置都需要超导磁体提供稳定强磁场<sup>[1-4]</sup>。由于超流氦的黏性极低, 等效导热系数极大, 可以迅速消除大型紧密磁体部件之间的热扰动, 提高并保持超导磁体在大科学工程中的稳定性。因此, 建设大型超流氦低温制冷系统并保证其稳定运行是目前实现大科学装置稳定低温环境的唯一手段。

对于超流氦的获取, 国内外普遍采用多级离心式冷压机在低温低压下直接对液氦槽进行抽压降温的方法<sup>[5-7]</sup>。由于冷压机的高压缩比特点, 可以大大缩小超流氦低温系统的体积, 但冷压机面临着运行在低温, 负压, 高转速等复杂工况的难题。作为超流氦低温系统的核心设备, 冷压机的安全可靠运行至关重要。但由于冷压机运行在极端复杂工况, 其轴承支撑技术成为影响冷压机稳定可靠运行的关键, 目前国内还没有一款技术成熟, 稳定可靠的冷压机设备。中国科学院理化技术研究所主动式磁悬浮轴承技术及其应用的冷压机设备研制上取得了重要进展<sup>[8-10]</sup>, 正在进行长期稳定运行试验研究。同时在陶瓷球轴承技术<sup>[11]</sup>和高温超导磁悬浮轴承技术<sup>[12]</sup>上开展了研究。

高温超导磁悬浮轴承是一种能够实现自控稳定的无接触式承载轴承, 其依靠高温超导体特有的 messiner 效应和磁通钉扎特性, 在特殊设计的外磁场作用下, 可以实现转子的稳定悬浮和高速旋转, 同时在低温系统中应用具有低温环境容易获得的优势。目前超导轴承悬浮力计算主要集中在对轴向型超导轴承的悬浮力计算研究, 对径向轴承径向力计算的研究工作较少。因此开展了径向型高温超导磁悬浮轴承的结构设计和径向力三维仿真计算研究, 并搭建了相应的实验测试平台, 为超导磁悬浮轴承的应用研究打下一定基础。

## 1 超导轴承研究方法

### 1.1 轴承系统结构

对于氦气冷压缩机应用的高温超导磁悬浮轴承, 采用具有高速适应性和大承载扩展性的内转子外定子型径向超导轴承更为适合<sup>[13]</sup>。径向型高温超导磁悬浮轴承通常由永磁转子和超导定子组成, 其结构示意图如图 1 所示。永磁转子由轴向充磁的永磁环和磁导率很大的聚磁环组成, 聚磁环置于相邻永磁环之间, 相邻永磁环端面的极性相同, 两两相对依次叠加排布。

永磁场施加在超导体上的力  $F = -\text{grad}[(M \times B)dv]$ , 其中  $B$  是由永磁体或永磁结构磁体产生的磁场,  $M$  是

收稿日期: 2019-09-03

基金项目: 国家重大科研装备研制专项 (ZDYZ2014-1); 航天低温推进剂技术国家重点实验室基金课题 (SKLTSCP1603, SKLTSCP1902)

作者简介: 邹银才, 男, 1992 年生, 博士, 中国科学院理化技术研究所航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100190, 电话: 010-82543505, E-mail: zouyincai92@126.com

超导体的磁化强度，通过两者体积分再取梯度计算得到永磁超导系统之间的作用力<sup>[14]</sup>。由此可见，永磁场的磁场大小和磁场分布，以及超导体的性能，永磁超导系统的结构尺寸，直接影响超导磁悬浮系统的性能。采用 ANSYS 有限元软件进行永磁转子磁场计算和超导体性能表达计算，并完成了超导轴承结构设计，针对设计的径向超导轴承开展了径向力计算研究。另外，通过搭建相应实验平台，开展了实验测量和验证工作。

### 1.2 永磁转子磁场计算

由于超导轴承转子采用永磁体和聚磁铁组成，且永磁体的性能参数容易通过测量得到，因此可方便通过开展永磁转子静态磁场计算，得到永磁转子的磁场及磁场分布，本文采用 ANSYS 有限元软件进行永磁转子磁场计算。为此，首先建立或者导入永磁转子模型，并在转子模型周围建立空间域。接着定义材料属性，永磁环采用钕铁硼强磁性材料，定义为线性硬磁性材料，给定材料矫顽力和剩余磁感应强度表征材料特性；聚磁环采用硅钢片，定义为非线性软磁性材料，通过  $B-H$  曲线参数表征材料特性。对永磁转子进行参数定义时，还需要特别注意每个永磁环的磁场取向。然后对计算模型进行网格划分，最后进行结果求解和结果提取。

### 1.3 超导体超导特性表达

高温超导体与外磁场作用时的性能与超导体的磁化强度  $M$  直接相关，高温超导体磁化强度与外磁场的关系可以通过磁化曲线  $M(H)$  表示，超导体的磁化曲线方程表达了超导体在外磁场作用下的超导特性。因此，

通过高温超导体的磁化曲线方程求得其磁化特性参数，并将其赋值给有限元计算模型，即可通过有限元计算方式表达超导磁悬浮系统性能。

超导电磁本构模型是反映了超导体电磁特性的基本方程组，而 Bean 临界态模型是定量研究超导特性普遍采用的表达式<sup>[15]</sup>，本文采用 Bean 模型来确定高温超导体的磁化曲线。为此需对计算模型做如下假设：

(1) 由于高温超导体晶粒轴向生长的方向临界电流密度远大于其它方向，因此假设高温超导体为各向同性材料；

(2) 由于径向型高温超导磁悬浮轴承的永磁转子表面与超导体表面间距较小，且轴承直径相对较大，可以近似认为永磁转子外磁场平行于超导体轴向生长方向；

(3) 假设超导体内的感应电流密度在外磁场作用下为常数，数值上为超导体的临界电流密度  $J_c$ 。

在零场冷却条件下，超导体未被外磁场穿透的磁化曲线方程<sup>[16]</sup>。初始磁化曲线（永磁体靠近超导体过程  $0 < H < H_m$ ）方程：

$$M(H) = -H - \frac{H^2}{H_p} - \frac{H^3}{3H_p^2} \quad (0 < H < H_p) \quad (1)$$

退磁曲线（永磁体远离超导体过程  $H_m < H_p$ ）方程：

$$M(H) = -H + \frac{(H_m^2 + 2HH_m - H^2)}{2H_p} - \frac{(3H_m^3 - 3H_m^2H - 3H_mH^2 - H^3)}{12H_p^2} \quad (-H_m < H < H_m) \quad (2)$$

在有场冷却条件下，超导体未被外磁场穿透的磁化曲线。初始磁化曲线（永磁体靠近超导体过程  $0 < H < H_m$ ）方程：

$$M(H) = -H + H_m - \frac{H_m^2 - 2H_m(H - H_m) - (H - H_m)^2}{2H_p} + \frac{3H_m^3 - 3H_m^2(H - H_m) - 3H_m(H - H_m)^2 - (H - H_m)^3}{12H_p^2} \quad (0 < H < H_m) \quad (3)$$

退磁曲线（永磁体远离超导体过程  $H_m < H_p$ ）方程：

$$M(H) = -H + H_m - \frac{(H - H_m)^2}{H_p} - \frac{(H - H_m)^3}{3H_p^2} \quad (0 < H < H_m)$$

其中  $H_m$  为施加的最大外磁场， $H_m = J_c l$ ，为外磁场完全穿透超导体时的临界磁场， $J_c$  为超导体临界电流密度， $l$  为径向轴承剖分投影后短边长的一半，即剖分后矩形超导体短边长的一半<sup>[17]</sup>。根据实际使用超导材料的形状尺寸、临界电流密度及最大外磁场强度，可以得到描述超导体的特性参数，将此特性参数及实际使用永磁体特性参数导入电磁场有限元分析软件 ANSYS 中，对单元计算模型赋予对应材料特性。

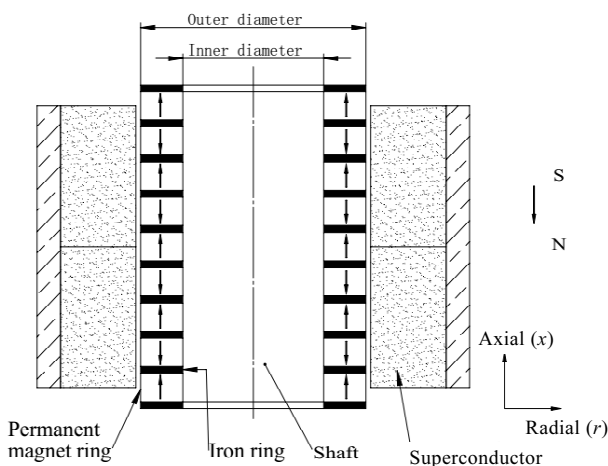


图 1 径向型高温超导磁悬浮轴承的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of radial superconducting magnetic bearing

### 1.4 超导轴承径向力计算

由于径向型高温超导轴承的永磁转子和超导定子为轴对称结构，当永磁转子位于超导定子中心，也就是初始定位位置时，永磁转子与超导定子之间在径向上作用的合力为零；当永磁转子相对超导定子存在一定偏心时，永磁转子相对超导定子在圆周上各处的磁隙均不相同，且不同的偏心量使得超导轴承表现出不同的径向力，此时，需要通过三维有限元仿真得到存在偏心情况的径向力情况。

实际运行中，永磁转子相对超导定子一直存在径向运动，也就是永磁转子相对超导定子始终同时存在靠近和远离过程。将超导定子沿垂直于永磁转子运动方向对称剖开，命靠近永磁转子的部分为靠近区，远离永磁转子的部分为远离区。径向轴承径向力等于靠近区超导体与永磁转子的作用力和远离区超导体与永磁转子的作用力的合力。因此，利用上述永磁转子磁场计算方法和超导体超导特性表达方法，采用初始磁化曲线方程和退磁曲线方程分别计算得到靠近区和远离区超导体的特性参数，建立径向轴承三维有限元仿真模型，利用 ANSYS Workbench 静磁场分析模块即可计算出永磁转子在不同偏心位移下径向轴承的径向力情况。再根据径向力随偏心位移的变化率即可得出径向轴承的径向刚度。图 2 为径向超导磁悬浮轴承计算过程轴承横截面示意图，其中  $d$  为超导定子剖分后沿永磁转子运动方向投影后的在垂直于运动方向的长度，其值为超导轴承定子内直径， $2l$  为超导定子投影后在轴向方向的长度，其值为超导轴承定子轴向长度。

### 1.5 实验测试平台

为了验证磁场有限元计算的正确性，搭建了如图 3 所示磁场测量平台。该测量平台主要由高斯计，三维霍尔探头，三维电控位移平台，旋转位移台，探头

支撑夹持机构，和被测永磁转子组成。三维霍尔探头通过探头支撑夹持机构定位于三维电控位移平台上，进而对探头进行精密定位控制。被测永磁转子通过夹具固定于旋转位移台上。该测量平台可以对永磁转子的空间磁场进行全方位的测量。

本研究工作已完成了超导轴承永磁转子结构设计<sup>[12]</sup>，并完成了适用于冷压机高速工况运行的径向型高温超导磁悬浮轴承结构设计和轴承制造工作。实验用超导体由德国 ATZ 公司生产，该超导体在 77 K 和 3 T 环境下的临界电流密度为  $1.5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 。测试用超导轴承定子的内径为 50 mm，长度为 60 mm，超导轴承永磁转子内径为 30 mm，外径为 48 mm，长度为 70 mm。为了得到所设计超导轴承的承载性能，搭建了图 4 所示的超导轴承性能测试平台。测试平台主要由超导轴承主体测试装置，以及液氮杜瓦，真空泵组，和传感器及多通道采集仪表组成。超导轴承主体测试装置在轴向

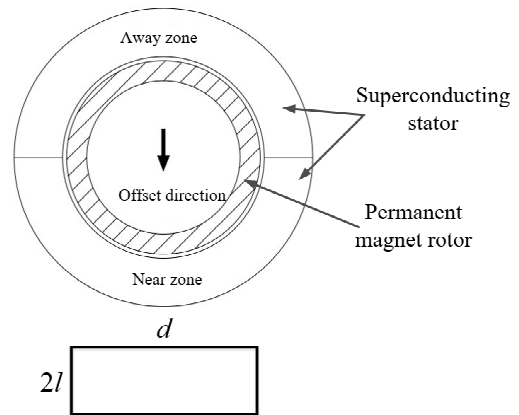


图 2 径向超导磁悬浮轴承计算过程横截面示意图

Fig.2 Schematic diagram of the calculation process of radial superconducting magnetic bearing

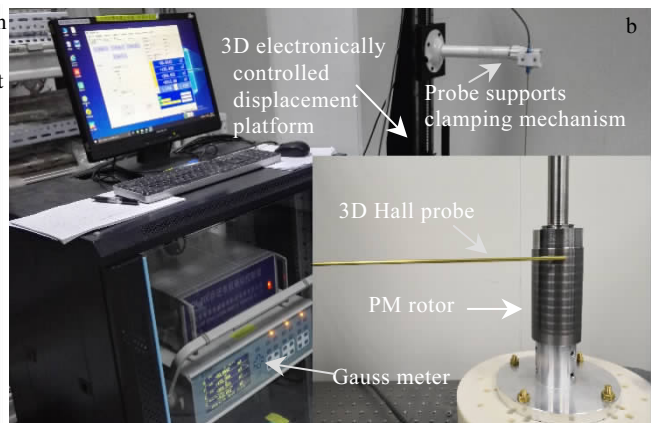
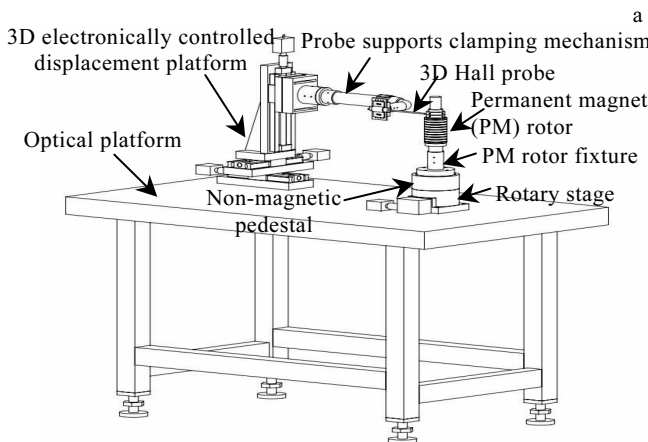


图 3 磁场测量平台

Fig.3 Magnetic field measurement platform: (a) schematic of rotor magnetic field and (b) physical picture

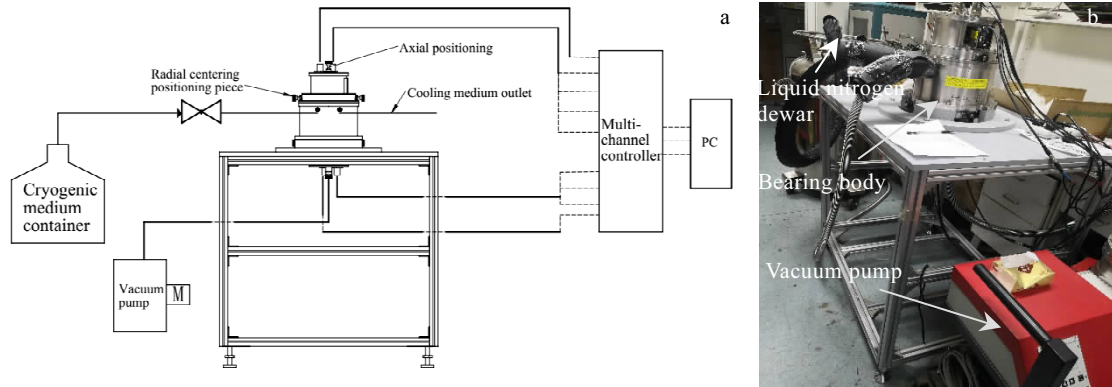


图 4 超导轴承性能测试平台

Fig.4 Superconducting bearing performance measurement platform: (a) schematic of measurement platform and (b) physical picture

和径向上布置有力和位移传感器,并具有轴向定位和径向定位功能。超导定子包括超导体和液氮腔体,超导体固定于圆环液氮腔体的内壁,当液氮腔体中通入液氮时,通过热传导的方式对超导体进行冷却。超导定子通过定位绝热支撑件固定于轴承主体测试装置内。实验过程中,先对超导轴承主体测试装置进行抽真空,保证测试腔体的真空度,再将永磁转子固定于超导定子的中心,接着通入液氮,当布置在超导体上的温度传感器显示温度稳定后,撤掉永磁转子定位部件,然后即可开展径向力测试,记录力和位移传感器数据,即可得到径向轴承径向力和径向刚度值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁场计算和测量结果

针对设计的超导轴承转子 (48 mm×30 mm×70 mm),开展了永磁转子磁场有限元计算,并利用搭建的磁场测量平台开展了相同路径上的磁场测量。图 5 所示为距离永磁转子外表面 1 mm,轴向路径-15 mm

$\leq x \leq 85$  mm 上的磁场分布的计算和测量结果,其中超导轴承转子位于  $0 \text{ mm} \leq x \leq 70 \text{ mm}$ ,  $B_x$  为平行于转子轴向方向磁场,  $B_y$  为转子径向方向 ( $B_r$ ) 磁场,  $B_z$  为垂直于径向方向磁场,  $B$  为 3 个方向磁场的矢量和,坐标见图 1 所示。

本研究采用的永磁环为钕铁硼 N52 磁环,其矫顽力为  $9 \times 10^5 \text{ A/m}$ ,剩磁为 1.42 T。由图 5 永磁转子磁场分布计算值和测试值结果对比可知,计算结果与测试结果趋势完全一致,且结果相近,同时可以看出距离永磁转子外表面 1 mm 处的最大外磁场强度约为 0.5 T,说明采用此有限元方法开展永磁转子磁场计算和永磁转子结构设计是可行的,另外,开展永磁转子的磁场计算和测量还能提升超导轴承磁力计算时参数获取的准确性。

### 2.2 径向力和径向刚度计算结果

由于永磁转子在轴向上具有周期性排列特点,因此为节省计算时间和资源,本文采用计算一个周期单元的形式,先获得超导轴承定子远离区和靠近区在永

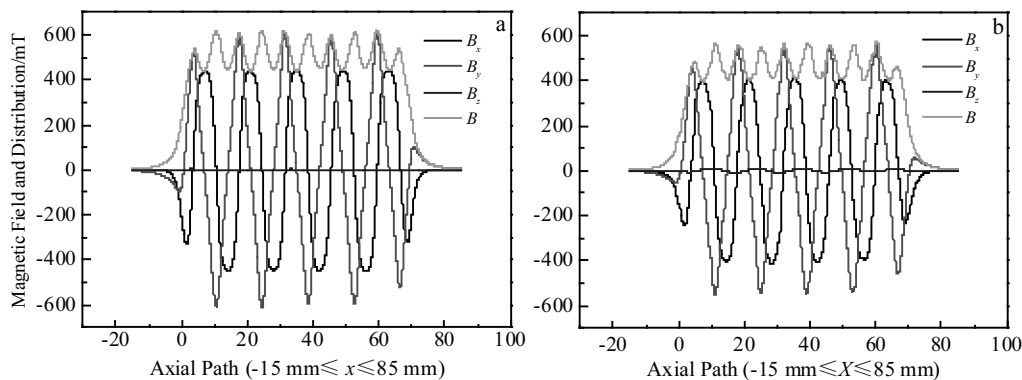


图 5 永磁转子磁场分布 (距转子外表面 1 mm, 轴向路径-15 mm ≤ x ≤ 85 mm)

Fig.5 Magnetic field distribution of permanent magnet rotor (1 mm from the outer surface of the rotor, axial path -15 mm ≤ x ≤ 85 mm): (a) calculation result and (b) measurement result

磁转子不同偏心位移下的受力情况，通过远离区和靠近区超导定子的合力得到超导轴承单元的径向力，再根据超导轴承总轴向尺寸的大小，叠加得到超导轴承总的径向合力即径向力，最后根据力与位移的关系即可得到超导轴承的径向刚度。该方法同时有助于开展超导轴承轴向尺寸的设计和对任意轴向尺寸轴承的径向负载能力的预算。

首先对设计的 1 mm 磁隙大小的超导轴承进行磁力计算和分析。图 6 为超导轴承周期单元的磁力计算情况，其磁力为在靠近或远离过程中，经过各偏心量时的磁悬浮力。超导体特性参数采用零场冷下的磁化曲线方程求得，计算中临界电流密度取值为  $1.1 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 。可以看出，靠近区超导定子所受磁力随着转子偏心量的增大而增大，远离区超导定子所受磁力随着转子偏心量的增大而减小，也就是永磁转子离靠近区超导体越近，所受磁力越大，离远离区超导体越远，所受磁力越小。并且靠近区和远离区超导体所受磁力的方向相反。

图 7 为靠近区和远离区超导体所受合力即轴承径向力在不同永磁转子偏心量和不同临界电流密度下的零场冷计算结果，其磁力为超导体相对永磁转子运动过程中，经过各偏心量时的磁悬浮力。可以看出，超导轴承径向力随永磁转子偏心量的增大呈线性增大关系。另外，计算中所用的临界电流密度大小对计算结果有明显的影 响，整体而言，临界电流密度越大，径向力以及径向力随偏心量增加的幅度即径向刚度越大。由此可见，采用 Bean 临界态模型进行磁场计算时，临界电流密度的取值大小是影响计算结果准确性的重要原因。但是与后续测试结果对比可知，该方法的计算结果与测试结果在线性度和趋势上具有很好的一致性，可以用于超导轴承性能的定性计算和设计。

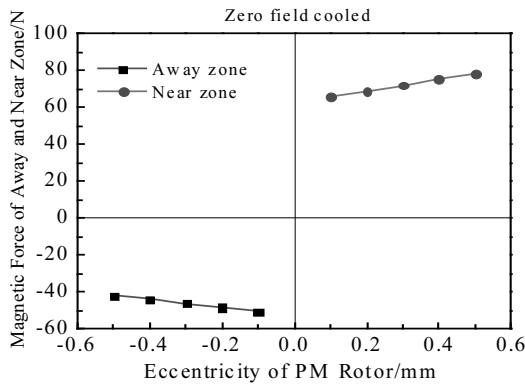


图 6 超导轴承单元零场冷磁力计算结果

Fig.6 Magnetic force results of zero field cold calculation of superconducting bearing unit

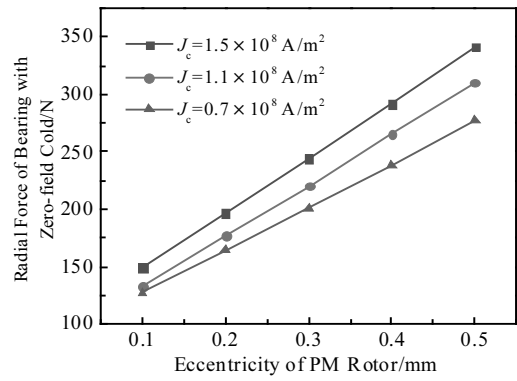


图 7 超导轴承零场冷径向合力计算结果

Fig.7 Radial force results of zero field cold calculation of superconducting bearing

图 8 为场冷条件下计算求得的超导轴承周期单元的磁力计算情况，其磁力为在靠近或远离过程中，经过各偏心量时的磁悬浮力。计算中临界电流密度取值为  $1.1 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 。可以看出，靠近区和远离区超导定子所受磁力均随着转子偏心量的增大而增大，也就是永磁转子离靠近区超导体越近，所受磁力越大，同时，离远离区超导体越远，所受磁力也增大，但靠近区磁力增大的趋势更明显。靠近区和远离区超导体所受磁力的方向相同。这说明场冷条件下在永磁转子远离超导体时，远离区超导体受到吸引力的作用。这是由于随着永磁转子的远离，远离区超导体表面的磁通减弱，超导体为了阻碍磁通的变化而产生了阻碍永磁转子远离的吸引力作用。

同理，计算了在场冷条件下超导轴承在不同永磁转子偏心量和不同临界电流密度下的径向力变化情况。如图 9 所示，和零场冷计算结果类似，超导轴承径向力随永磁转子偏心量的增大呈线性增大关系。另外，计算中所用的临界电流密度大小对计算结果也有

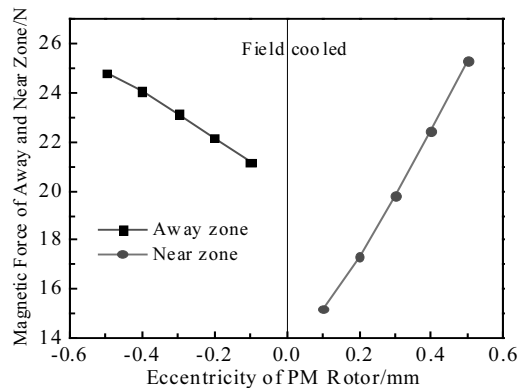


图 8 超导轴承单元场冷磁力计算结果

Fig.8 Magnetic force results of field cold calculation of superconducting bearing unit

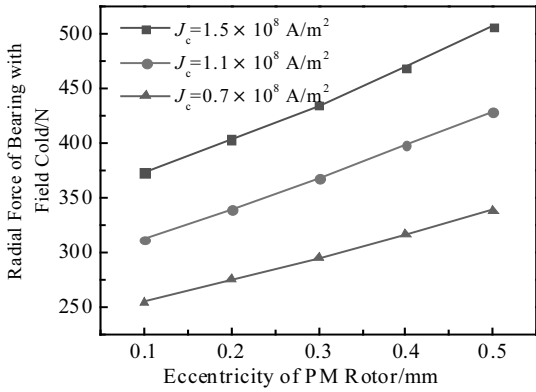


图 9 超导轴承场冷径向合力计算结果

Fig.9 Radial force results of field cold calculation of superconducting bearing

明显的影响，整体而言，临界电流密度越大，径向力以及径向力随偏心率增加的幅度即径向刚度越大。除此之外，还可以看出在相同临界电流密度下，场冷条件下计算的径向刚度值比零场冷条件计算的刚度值小。由此可见，场冷计算结果和零场冷计算结果与测试结果在线性度和趋势上具有很好的一致性，可以用于超导轴承性能的定性计算和设计，但场冷计算结果与零场冷计算结果在数值上有区别，针对不同的应用工况，选择不同的计算条件会影响计算结果的准确性。

高温超导磁悬浮轴承定子与转子之间的磁隙大小会影响永磁转子在超导体上的磁场分布，进而影响超导轴承的性能。本研究完成了 0.5, 1, 2.5 mm 磁隙对应下的最优永磁转子结构设计。3 组超导轴承定子结构尺寸一样，3 组超导轴承永磁转子的内径均为 30 mm，轴向长度分别为 61.6, 70, 67.2 mm。根据所述超导轴承径向力计算方法，开展了 3 组轴承在不同条件下

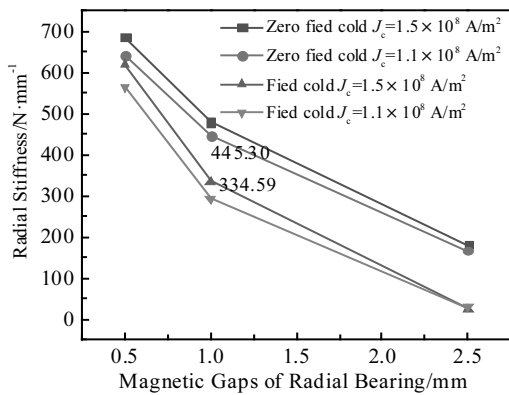


图 10 不同磁隙大小轴承的径向刚度计算结果

Fig.10 Radial stiffness calculation results for bearings with different magnetic gaps

的径向刚度计算，计算结果见图 10 所示，其中 0.5 mm 磁隙轴承的径向刚度是在 0.1~0.4 mm 偏心率范围内径向力变化线性拟合的结果，1 和 2.5 mm 磁隙轴承的径向刚度是在 0.1 mm 至 0.5 mm 偏心率范围内径向力变化线性拟合的结果。可以看出，对于越小磁隙的超导轴承，其径向刚度越大；对于不同磁隙的超导轴承，零场冷计算的径向刚度均大于场冷条件计算的结果；对于磁隙较小的超导轴承，临界电流密度越大，径向刚度越大，对于较大磁隙时的超导轴承，临界电流密度对轴承径向刚度的影响减小。

### 2.3 径向力和径向刚度测试结果

针对设计的超导轴承（1 mm 磁隙），利用搭建的超导轴承性能测试平台，测试了转子在 0.5 mm 范围内所受的推力情况，测试结果如图 11 所示。在推动永磁转子偏离过程中，每隔 0.05 mm 测试并记录下永磁转子所受的推力，可以看到转子所受径向力在 0.5 mm 偏移量的范围内基本呈线性增加，拟合得到的刚度值为 362.4 N/mm，此结果与场冷计算结果 334.594 N/mm 相近，这与实验过程为有场冷却后测试的情况相符。可见所述的径向轴承磁力计算方法用于超导轴承径向刚度的计算和设计具有一定的参考价值。

在轴承径向性能测量中，还测量了当转子被推到极限（第 1 次偏离过程）后第 1 次回程过程中转子所受的径向力情况。由图 11 测试结果可以看出，第 1 次回程过程转子受力与偏心率之间依然有较好的线性度关系，通过测量值可以拟合得到第 1 次回程过程的径向刚度为 399.9 N/mm，相对第 1 次偏离过程有所提升，但在相同偏心率下，第 1 次回程过程转子所受径向力较第 1 次偏离过程减小明显，从第 1 次偏离极限位置返程回到原点时，所受径向力的方向已经改变。这是由

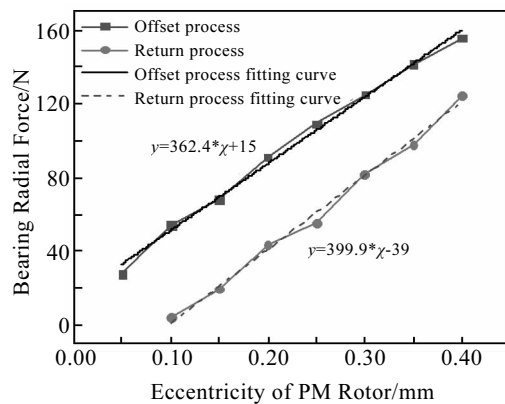


图 11 超导轴承径向力和刚度测量结果

Fig.11 Radial force and stiffness measurement results of superconducting bearing

于在推动永磁转子运动过程中,超导体内产生了磁滞损耗和涡流损耗导致超导轴承悬浮性能衰减所致。

### 3 结 论

1) 永磁转子磁场分布计算结果与测试结果完全一致,磁场大小误差较小,在距离永磁转子外表面 1 mm 处的最大外磁场强度约为 0.5 T。

2) 轴承径向力随偏心量变化的计算结果与测试结果在线性度和趋势上具有很好的一致性,可用于超导轴承性能的定性计算和设计,但计算精度受临界电流密度影响较大。整体上场冷计算的径向刚度值 334.594 N/mm 与测试值 362.4 N/mm 接近。

3) 通过不同磁隙大小的轴承径向刚度计算结果可知,轴承定转子间的磁隙大小对径向刚度具有重要影响,磁隙越小,径向刚度越大。

#### 参考文献 References

- [1] Lebrun P. *Cryogenics*[J], 1994, 34: 1
- [2] Yang J C, Xia J W, Xiao G Q *et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*[J], 2013, 317: 263
- [3] Gravil B, Jager B. *Advances in Cryogenic Engineering*[J], 2013, 43: 571
- [4] Caplanne G, Berthier R, Pfister R *et al. IOP Conf Ser Mater Sci Eng*[J], 2017, 171: 012 107
- [5] Bevins B S, Keese M S, Chronis W C. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*[J], 1996, 41: 663
- [6] Benda V, Granier M, Lebrun P *et al. Cryogenics*[J], 1994, 34(9): 733
- [7] Ueyama H, Kubo A, Takahata R *et al. Engineering*[J], 2000, 158: 16
- [8] Wei C B, Xu Y, Zhang K *et al. Vacuum*[J], 2018, 159: 76
- [9] Zhang S Y, Pan W, Wei C B *et al. IOP Conf Ser Mater Sci Eng*[J], 2017: 278
- [10] Zhang S Y, Wei C B, Li J *et al. Proc 29th Chinese Control Decis Conf CCDC*[C]. Singapore: IEEE, 2017: 46
- [11] Su He(苏 和), Dong Xinbo(董欣勃), Wei Chaobing(魏操兵) *et al. Cryogenics & Superconductivity(低温与超导)*[J], 2019, 47(2): 4
- [12] Zou Yincai(邹银才), Wei Chaobing(魏操兵), Pan Wei(潘 薇) *et al. Cryogenics & Superconductivity(低温超导)*[J], 2018, 46(5): 17
- [13] Zou Yincai(邹银才), Pan Wei(潘 薇), Shang Ji(商 晋) *et al. Cryogenics & Superconductivity(低温与超导)*[J], 2018, 46(6): 1
- [14] Werfel F N, Floegel-Delor U, Riedel T *et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2013, 13(2): 2173
- [15] Ruiz-Alonso D, Coombs T A, Campbell A M. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2004, 14(4): 2053
- [16] Ji Dezhi(纪德志). *Thesis for Master Degree(硕士论文)*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007
- [17] Ji Helin(吉和林), Jin Xin(金 新), Fan Hongchang(范宏昌). *Chinese Journal of Low Temperature Physics(低温物理学报)*[J], 1992, 14(1): 12

## Calculation and Experimental Study of Radial High-temperature Superconducting Magnetic Bearing

Zou Yincai<sup>1,2</sup>, Shang Jin<sup>1,2</sup>, Guan Xiang<sup>1,2</sup>, Bian Xing<sup>1</sup>, Wu Jihao<sup>1,2</sup>, Li Qing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For the radial high-temperature superconducting magnetic bearing used in centrifugal helium cold compressor, the magnetic field calculation and structural design method of permanent magnet rotor were given, and the calculation of radial force and radial stiffness was carried out. A superconducting bearing performance measurement platform was built, and bearing rotor space magnetic field and bearing performance were measured. The calculation and measurement results show that the magnetic field calculation method is feasible and the result is accurate. The maximum external magnetic field at 1 mm from the outer surface of the permanent magnet rotor is about 0.5 T. The calculated radial force under field cooling and zero field cooling conditions both increase with the increase of the rotor eccentricity, which is in good agreement with the measurement results in linearity and trend. The measured radial stiffness value of the experimental bearing is 362.4 N/mm, which is close to the calculated radial stiffness 334.594 N/mm under field cooling conditions. The radial force calculation method described in this paper can be used for the qualitative radial stiffness calculation and design of high-temperature superconducting magnetic bearings, which has certain guiding significance for the application research of superconducting bearings.

**Key words:** helium cold compressor; radial superconducting magnetic bearing; radial force calculation; performance measurement

Corresponding author: Li Qing, Ph. D., Professor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P. R. China, Tel: 0086-10-82543660, E-mail: liqing@mail.ipc.ac.cn