

超导转子磁悬浮结构磁耦合特性 及承载能力分析*

张源¹⁾²⁾ 胡新宁^{1)2)†} 崔春艳¹⁾ 崔旭³⁾ 牛飞飞¹⁾²⁾
黄兴¹⁾²⁾ 王路忠¹⁾²⁾ 王秋良¹⁾²⁾

1) (中国科学院电工研究所, 北京 100190)

2) (中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

3) (中国科学院赣江创新研究院, 赣州 341119)

(2023 年 3 月 5 日收到; 2023 年 3 月 28 日收到修改稿)

高速旋转的超导转子可用作高精度角速度传感器, 其转子结构的质量偏心和球面误差是限制其精度提升的关键因素, 转子结构越复杂, 其制作和装配过程造成的质量偏心和球面误差就越大, 则其测量角速度的精度越低. 基于此介绍了一种转子结构简单的超导转子磁悬浮结构, 并通过有限元方法对其磁悬浮结构的磁耦合特性进行研究, 分析其对超导转子磁支承力的影响. 然后基于磁路原理对磁支承结构的磁路建模, 提出了一种对超导转子磁支承结构承载能力分析的方法, 并设计出一种优化超导转子磁支承结构承载能力的方案. 研究结果为超导转子磁悬浮系统的结构设计和优化, 及其承载能力的分析和优化提供参考.

关键词: 超导磁悬浮, 超导转子, 磁场耦合, 磁悬浮结构承载能力

PACS: 84.71.Ba, 85.70.Rp, 45.20.Da

DOI: 10.7498/aps.72.20230328

1 引言

超导体的完全抗磁性和零电阻特性使磁场中的超导体可实现几乎没有损耗的无接触支承, 且超导温度下材料的蠕变小、膨胀系数小、化学活性低^[1-5], 故超导磁悬浮系统相对其他悬浮系统制作的精密仪器具有更高的精度潜力. 高速旋转的转子具有定轴性, 依据此特性可制作惯性器件测量载体角位置和角速度. 超导转子磁悬浮装置的非接触支承和零损耗特性, 可使其不仅能实现测角速度的高精度, 而且可以使其长时间续航. 国外从 20 世纪 60 年代就报道了超导转子磁悬浮装置的研究, 其中美国通用电气公司制作的超导转子磁悬浮装置样机的测

角精度达到 $0.005\ (^{\circ})/\text{h}$ ^[6], 美国喷气推进实验室制作的超导转子磁悬浮装置精度达到 $0.013\ (^{\circ})/\text{h}$ ^[7]. 超导转子测量误差的主要来源是转子质量偏心和球面误差^[8].

已报道的精度最高的超导转子磁悬浮系统由美国通用电气公司设计制作^[9], 其采用定子和力矩器置于超导转子内开圆柱孔 (I 号模型和 II 号模型), 或只力矩器置于转子内开圆柱孔 (0 号模型) 的形式. 此结构的超导转子结构复杂, 不易加工和装配成高精度的质量偏心和球面误差, 这限制了其精度的进一步提升. 基于此本文介绍了一种转子结构相对简单的超导转子磁支承结构, 其转子球结构是一个完整对称的封闭结构, 且转子球不存在理论质量偏心. 本文介绍的超导转子磁悬浮系统电

* 国家自然科学基金 (批准号: 51721005) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xininghu@mail.iee.ac.cn

磁结构更加简化, 实现了电机线圈和力矩线圈一体化结构, 本文主要针对此磁支承结构的磁悬浮特性进行分析.

文献 [10–12] 对超导转子磁悬浮装置的磁悬浮力进行了分析和计算, 文献 [13] 对超导转子磁悬浮结构的稳定性进行了分析, 文献 [14] 选取了 3 组电流对其最承载能力进行了定性分析. 本文在此基础上进一步分析了超导转子磁悬浮结构的上、下悬浮线圈和定子线圈之间在超导转子表面产生磁场的耦合作用, 并运用磁路定理和有限元方法对超导转子的磁路进行建模, 定量分析了超导转子磁支承结构悬浮电流对其承载能力的关系. 分析结果为超导转子磁悬浮系统的设计、优化和超导转子承载能力的评估提供参考.

2 超导转子磁悬浮系统结构

迈斯纳效应使超导体表面的磁场磁力线严格平行其表面, 而且超导体表面任一点的磁场作用力垂直其表面向内. 超导磁悬浮系统就是利用向内的磁场作用力实现对超导转子的支承, 超导体任一表面微元面 ds 的磁场力 dF 如下 [15]:

$$dF = \frac{B^2}{2\mu_0} ds, \quad (1)$$

式中, B 为微元面积 ds 处的磁场强度, μ_0 为真空磁导率.

基于 (1) 式, 求出超导转子表面磁场 B 分布即可计算超导转子的磁支承力. 超导转子表面磁场强度可基于超导电动力学进行分析 [16–18]. 但求取超导转子表面磁场的解析分布十分复杂, 在此主要通过数值方法对超导转子表面的磁场分布和磁支承力进行分析. 本文介绍的超导转子磁支承结构如图 1 所示, 其包括超导球形转子、整形铌瓦、定子线圈和悬浮线圈. 超导转子是采用赤道加厚的半径 25 mm, 质量 84 g 的薄壁铌球. 超导转子在垂直其赤道面均匀切削了 8 个半径 7 mm 圆面作为驱动面; 整形铌瓦上、下两部分分别由 4 个完全相同的铌块用绝缘材料粘贴而成, 其内表面形成的球腔半径 26 mm. 超导转子和整形铌瓦由 99.5% 的纯铌材料制作而成. 悬浮线圈和定子均是铌钛线双绕绕制的盘形线圈. 悬浮线圈有两个, 分别位于超导球腔的顶部和底部. 定子共有 4 个, 均匀分布在

超导球腔赤道处并依次串联成两路. 定子其中一路 (定中路) 在加转过程始终通电维持转子的竖直状态, 另一路在加转过程中按相应时序通电驱动超导转子 (驱动路). 定子线圈工作的原理是其通电产生的磁场力垂直作用在超导转子切削圆面, 对超导转子产生转矩, 从而驱动超导转子或保持超导转子的竖直状态. 悬浮线圈通电产生的磁通由于迈斯纳效应不能穿过转子和整形铌瓦, 从而被迫流入超导转子和整形铌瓦之间的狭窄缝隙, 形成高密磁通对超导转子实现支承作用.

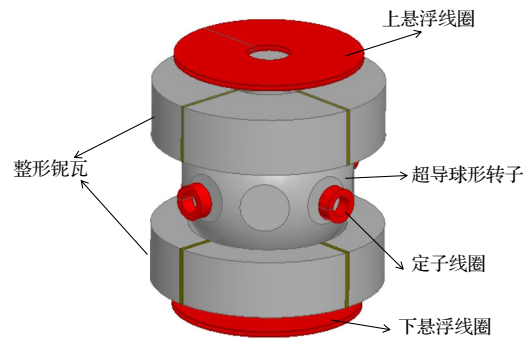


图 1 超导转子支承结构模型图

Fig. 1. Structure model of superconducting rotor supporting.

3 超导转子磁悬浮结构的磁耦合特性分析

悬浮线圈和定子线圈通电产生的磁场作用在超导转子表面, 对其实现支承、定中和驱动. 超导转子在加转过程中, 悬浮线圈和定子线圈同时作用, 分析其耦合作用对超导转子的有效驱动具有重要意义. 以超导转子球心为原点建立球面坐标系, 球面任一点用坐标 (R, θ, Φ) 表示, 其中 R 转子半径, θ 转子表面任一点和原点连线与 z 轴正方向的夹角, Φ 是转子表面任一点在 xoy 面的投影和原点连线与 x 轴正方向夹角. 计算上、下悬浮线圈分别通电 $I_u = 3$ A 和 $I_d = 2$ A, 及同时通电 $I_u = 3$ A, $I_d = 2$ A 时, 超导转子悬浮在超导球腔不同位置的表面磁场分布, 如图 2 所示. 图 2 的计算结果是超导转子表面上的平分子午线磁场分布, 其具体位置如图 2(a), 即平分两相邻切削圆面的子午线. 计算结果表明上、下悬浮线圈在转子表面产生的磁场是解耦的, 二者互不影响. 根据麦克斯韦方程 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$, 上述分析结果适用上、下悬浮线圈通电任意值.

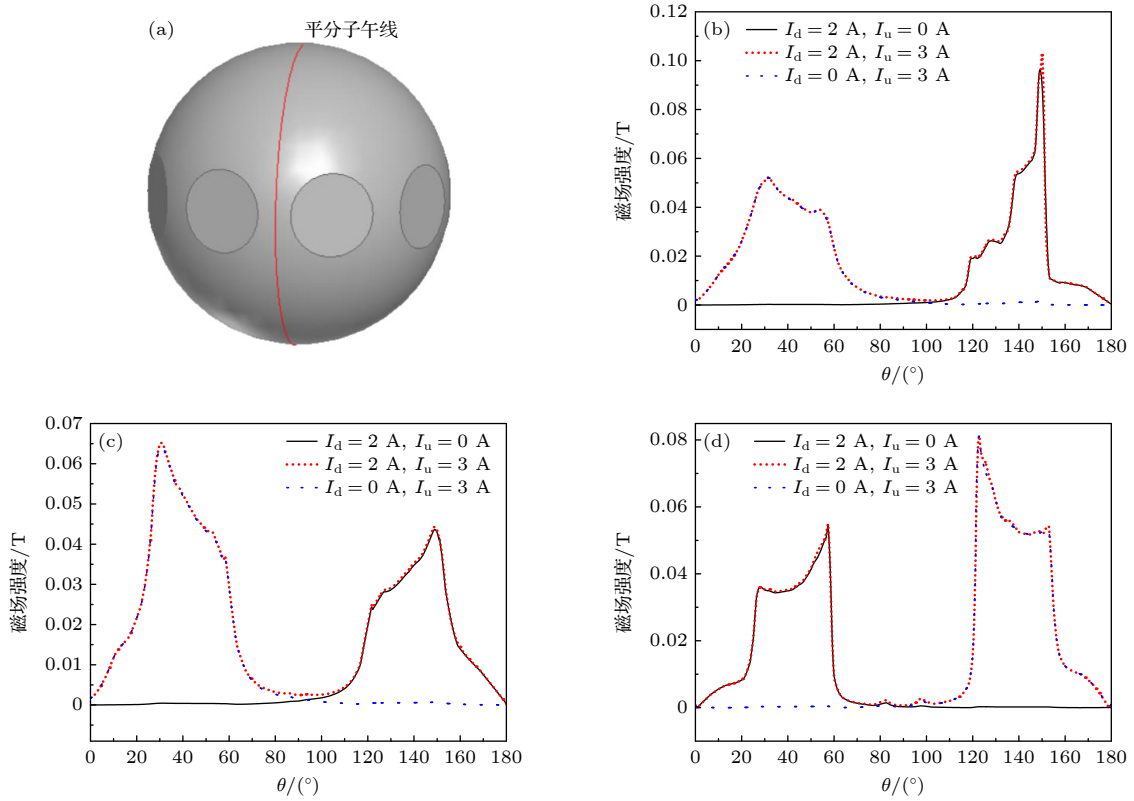


图2 超导转子悬浮在不同位置时的表面磁场分布 (a) 平分子午线位置; (b) 超导球腔底部位置; (c) 超导球腔中心位置; (d) 超导球腔侧偏 1 mm 位置

Fig. 2. Distribution of the surface magnetic field at different positions of the superconducting rotor suspension: (a) Meridian position; (b) the bottom position of the superconducting cavity; (c) the center of the superconducting cavity; (d) 1 mm off the side of the superconducting cavity.

定子和悬浮线圈在超导转子表面产生的磁场也发生耦合作用. 首先分析第一种情况上、下悬浮线圈同向通电, 定子通电产生磁场背向球心, 则定子磁场增强上悬浮线圈在转子表面产生的磁场, 削弱下悬浮线圈在超导转子表面产生的磁场. 同理, 当定子通电产生磁场指向球心, 则定子磁场削弱上悬浮线圈在转子表面产生的磁场, 增强下悬浮线圈在超导转子表面产生的磁场, 如图 3(a) 所示. 当上、下悬浮线圈匝数各 480 匝, 下悬浮电流 4.6 A, 上悬浮 3.75 A, 定子磁场背向球心 (背心) 或指向球心 (向心) 时, 超导转子在不同悬浮位置的悬浮力如图 3(b), 定子通电 10 和 20 A, 球腔中心的位置是零位置, 向上是正方向. 图 3 表明悬浮线圈同向通电时, 定子磁场背心削弱了悬浮线圈对转子的支承力, 定子磁场向心增强了悬浮线圈对转子的支承力. 定子通电 10 A, 其对超导转子悬浮力的影响可达到 20%.

第 2 种情况是上、下悬浮线圈电流反向, 如图 4(a), 此时定子磁场方向背心 (向心), 其对上、

下悬浮线圈在超导转子表面产生的磁场是同时削弱 (增强). 同样设置下悬浮电流为 4.6 A, 上悬浮电流为 3.75 A, 超导转子在不同位置的悬浮力如图 4(b). 图 4 表明悬浮线圈电流反向时, 定子通电 10 A, 定子电流对超导转子悬浮力影响不超过 1.7%, 即定子磁场对悬浮线圈的支承力影响可忽略. 超导转子在驱动过程中, 定子驱动路按一定的时序通、断电, 此时若上、下悬浮线圈同向通电, 则超导转子悬浮力会随着定子通、断电周期性变化, 产生强迫振动影响转子的悬浮稳定性, 从而影响驱动效果. 故此超导转子磁浮装置上、下悬浮线圈设置反向通电.

4 基于磁路原理的超导转子磁悬浮系统的承载能力分析

4.1 超导转子的磁悬浮力计算

悬浮力由悬浮线圈决定, 上、下悬浮线圈对转子的支承作用是解耦的, 所以可先分析单个悬浮线

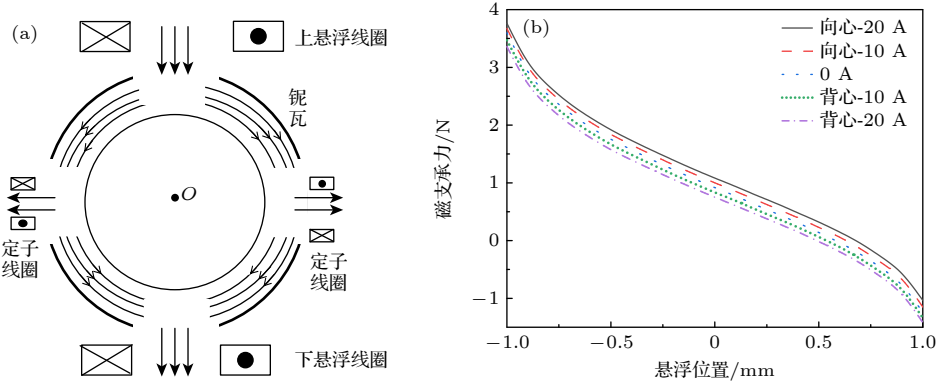


图 3 悬浮线圈电流同向-定子电流背心 (a) 悬浮线圈电流同向球腔磁场模型; (b) 不同位置悬浮力分布

Fig. 3. Codirectional suspension coil currents-stator current backward to cavity center: (a) Cavity magnetic field model with codirectional suspension coil current; (b) suspension force distribution at different positions.

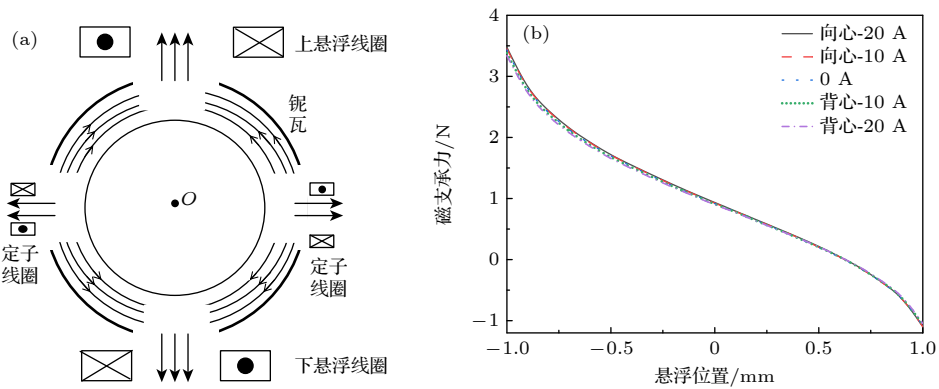


图 4 悬浮线圈电流反向-定子电流背心 (a) 悬浮线圈电流反向球腔磁场模型; (b) 不同位置悬浮力分布

Fig. 4. Reverse suspension coil current-stator current backward to cavity center: (a) Spherical cavity magnetic field model with reverse suspension coil current; (b) suspension force distribution at different positions.

圈对超导转子支承力。下悬浮线圈通电, 通过有限元软件 Ansoft 计算超导转子的竖直方向受力, 如图 5 所示。

超导转子悬浮位置一定, 根据麦克斯韦方程 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ 及 (1) 式得超导转子的受力与下线圈

电流的平方成正比, 设:

$$y = F_d(I, x)/I^2, \quad (2)$$

超导转子磁悬浮结构下线圈通电的悬浮力拟合式为

$$y = 0.0347x^2 - 0.0569x + 0.1267, \quad R^2 = 0.9695, \quad (3)$$

式中, $F_d(I, x)$ 是磁场支承力, x (mm) 是超导转子的悬浮位置, I 是下线圈悬浮电流, R^2 是拟合系数。

由上、下悬浮线圈的结构对称性, 可确定上悬浮线圈通电的支承力式为

$$F_u(I, x) = (0.0347x^2 + 0.0569x + 0.1267)I_u^2. \quad (4)$$

式中 I_u 是上悬浮线圈通电电流。

超导转子下线圈悬浮力 $F_d(I, x)$ 减上线圈悬浮力 $F_u(I, x)$:

$$\begin{aligned} F_{\text{total}} &= F_d(I_d, x) - F_u(I_u, x) \\ &= 0.0347x^2(I_d^2 - I_u^2) - 0.0569x(I_d^2 + I_u^2) \\ &\quad + 0.1267(I_d^2 - I_u^2), \end{aligned} \quad (5)$$

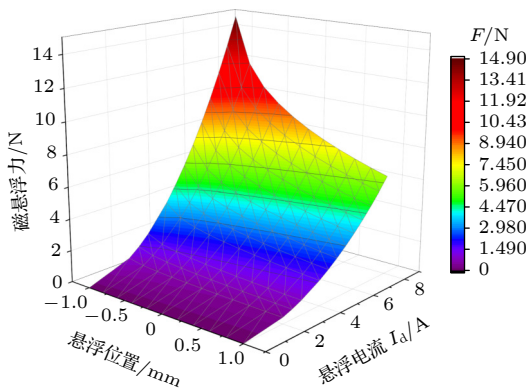


图 5 下线圈单独作用, 超导转子受力分布

Fig. 5. Magnetic levitation force to superconducting rotor with the lower coil energized.

式中, F_{total} 是超导转子在上、下线圈作用下的合力, I_d 为下悬浮线圈通电电流.

根据 (5) 式, 可得转子悬浮在球腔中心位置的悬浮电流对, 即 $F_{\text{total}} = mg$, $x = 0$:

$$I_d^2 - I_u^2 = \frac{mg}{0.1267} = 6.497. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式可得在悬浮电流对支承时, 超导转子在任意位置的磁支承力:

$$F_{\text{total}} = 0.2254x^2 - 0.0569x(I_d^2 + I_u^2) + mg. \quad (7)$$

其对应的支承刚度:

$$k = \frac{d(F_{\text{total}} - mg)}{dx} = 0.4508x - 0.0569(I_d^2 + I_u^2). \quad (8)$$

4.2 磁支承结构的承载能力

超导转子磁悬浮结构的承载能力是评估其支承特性的重要指标, 即由于壳体加速超导转子所能承受的最大悬浮力. 理论上支承刚度越大, 悬浮越稳定, 但超导转子的磁支承刚度受临界磁场限制. 整形铌块和转子采用的是纯度 99.5% 的高纯铌, 其下临界磁场为 0.14 T, 临界温度为 9.12 K^[13]; 悬浮线圈和定子是铌钛线绕制而成, 铌钛合金在 4.2 K 的临界磁场接近 11 T, 远远大于转子球的临界磁场, 所以主要考虑转子球表面的临界磁场对超导转子磁悬浮系统最大过载力的限制.

超导转子悬浮时, 超导转子和整形铌瓦之间的狭窄缝隙磁密最大, 所以要保证狭窄缝隙的最大磁场小于 0.14 T. 定子单独通电, 不同悬浮位置的超导转子表面最大磁场处的子午线磁场分布如图 6 所示, 子午线位置如图 7 所示, 即距离定子线圈最近的子午线. 结果表明通电定子线圈在超导转子和整形铌瓦之间狭窄缝隙处产生的磁场可忽略, 即转子在竖直方向的承载能力限制只需考虑悬浮线圈在转子和铌块缝隙产生的磁场. 上、下悬浮线圈在转子表面的磁场是解耦的, 所以可先分析单个悬浮线圈在转子表面的磁场分布规律, 悬浮线圈通电产生的磁路模型如图 8 所示.

由磁路定理可计算狭窄缝隙的磁通^[19,20]:

$$\Phi = \frac{NI}{R_m}, \quad (9)$$

$$dR_m = \frac{1}{\mu_0} \frac{dL}{S}, \quad (10)$$

式中, Φ 为磁路磁通, N 为线圈匝数, I 为悬浮线圈电流, R_m 为磁路磁阻, μ_0 为真空磁导率, S 为长度为 dL 的磁路微元的横截面积.

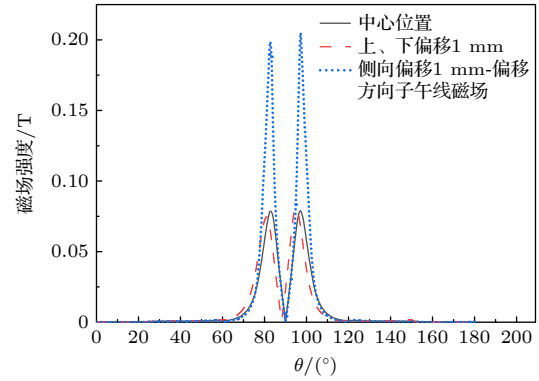


图 6 定子单独通电超导子午线磁场

Fig. 6. Superconducting radial magnetic field with stator coils energized.

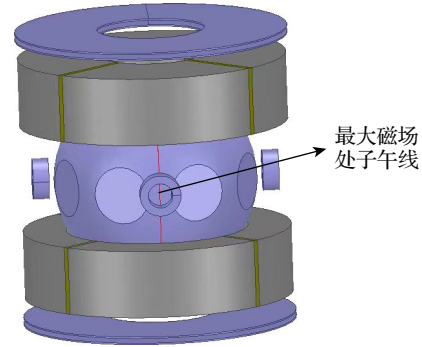


图 7 磁场最大侧向偏移子午线

Fig. 7. Maximum lateral offset of the magnetic field meridian.

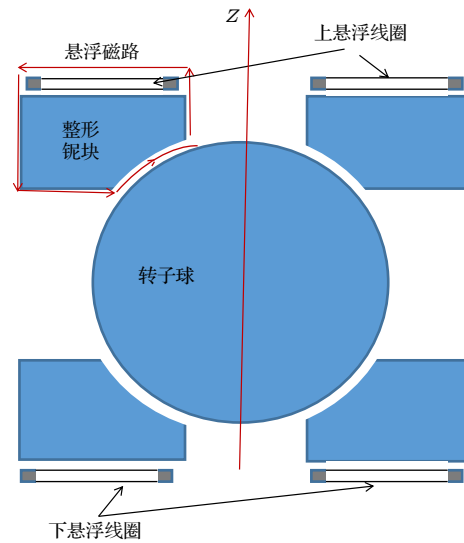


图 8 超导转子悬浮线圈磁路图

Fig. 8. Magnetic path diagram of superconducting rotor suspension coil.

当磁通 Φ 已知, 计算转子和铌块间缝隙的 θ 面面积 S_θ , 即可获得超导转子表面的平均磁密分布:

$$B = \Phi/S_\theta, \quad (11)$$

$$S_\theta = 2\pi \left(r_0 + \frac{|O'Q| - r_0}{2} \right) \sin\theta [|O'Q| - r_0], \quad (12)$$

式中, r_0 超导转子半径, $|O'Q|$ 是转子球心 O' 点与铌块内表面任一点 Q 的距离. 图 9 中 O 球腔中心, O' 转子球心, 面积 S_θ 是狭窄缝隙中与 O' 点连线成 θ 角的所有点组成的面.

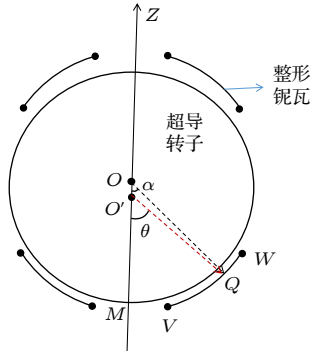


图 9 超导转子竖直方向偏移模型图

Fig. 9. Vertical direction offset model of superconducting rotor.

在装置中铌块内球面与超导球腔球心 O 点构成的角度范围 (28.22 度, 59.62 度), 根据 (11) 式和 (12) 式知当 $\theta = \angle MO'V$ 时, S_θ 最小, 平均磁密最大. 超导转子悬浮在超导球腔中, θ 面上的转子表面和整形铌块内表面的缝隙宽度相等. 因超导转子和整形铌块之间的缝隙很微小, 其磁通可认为均匀分布, 故可用缝隙的平均磁密代替转子表面磁密. 通过有限元计算转子在竖直方向不同位置磁阻 R_m , 并进行双指数函数拟合 [21], 如图 10 所示. (9) 式代入 (11) 式可得超导转子表面磁场与悬浮线圈电流的关系:

$$B = NI/(R_m S_\theta). \quad (13)$$

将 (12) 式和 R_m 的拟合式代入 (13) 式可计算, 下悬浮电流 I 和悬浮位置 x 确定的转子和整形铌块间狭窄缝隙任一点的磁场强度. 其中 $\theta = \angle MO'V$ 处的磁密对应狭窄缝隙内的磁场最大值, 下线圈单独通电, 狭缝内转子表面磁场最大值 B_{\max} 和悬浮电流 I 及悬浮位置 x 的关系, 如图 11 所示. 图 11 表明下悬浮电流一定, 转子越靠近悬浮线圈, 其表面最大磁场越大; 悬浮位置一定, 悬浮电流越大, 其表面最大磁场越大. 超导转子悬浮在球腔中心时,

下线圈通电 6 A, 其表面最大磁场达到 0.14 T (临界磁场). 根据图 11 的计算结果可得下悬浮电流一定时, 转子在竖直方向允许偏移的最大位置曲线 (最大表面磁场 0.14 T), 如图 12 所示. 当下悬浮电

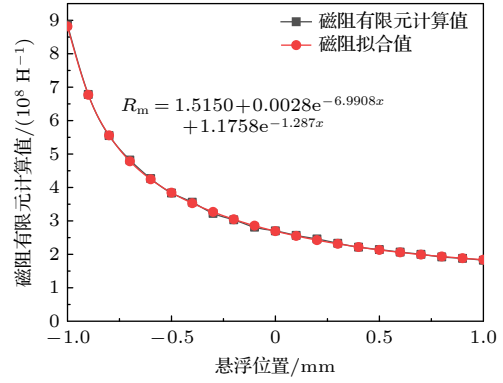


图 10 超导转子竖直偏移磁阻值

Fig. 10. Vertical offset magnetoresistance value of the superconducting rotor.

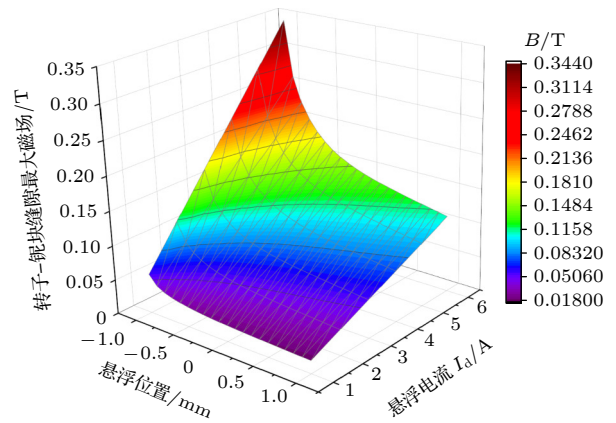


图 11 表面最大磁场与下电流和位置的关系

Fig. 11. The maximum magnetic field on the rotor surface with different suspension current and different suspension position.

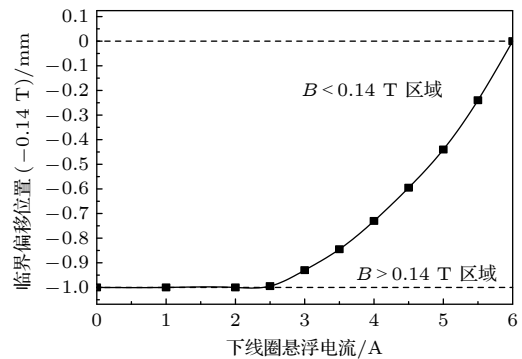


图 12 悬浮电流和临界磁场处偏移位置关系

Fig. 12. Offset position corresponding to the critical magnetic field with different suspension current in the bottom coil.

流小于 2.5 A, 超导转子允许偏移至球腔底部 (-1 mm); 当下悬浮电流大于 2.5 A, 下悬浮电流越大, 其允许位移越小. 下悬浮电流大于 2.5 A 时, 对图 12 的 I_d 和临界偏移位置 x 进行拟合得到

$$\begin{aligned} x_{\text{critical}} &= 0.058I_d^2 - 0.2126I_d - 0.8174, \\ R^2 &= 0.9993. \end{aligned} \quad (14)$$

上述讨论结果也适用上悬浮线圈产生磁路的特性. 上、下悬浮线圈按 (6) 式悬浮电流对通电, 用下

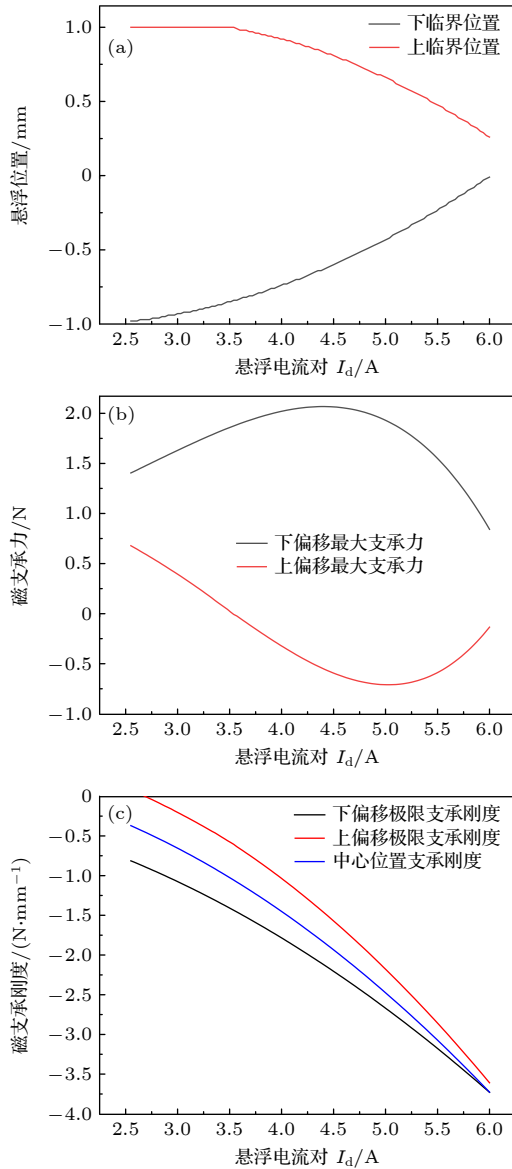


图 13 超导转子磁浮结构承载力及刚度 (a) 不同悬浮电流对允许的竖直偏移位置; (b) 不同悬浮电流对对应的最大承载力; (c) 不同电流对的支承刚度

Fig. 13. Bearing capacity and stiffness of superconducting rotor maglev structure: (a) Allowable vertical offset position of different suspension current pairs; (b) maximum bearing capacity of different suspension current pairs; (c) support stiffness of different current pairs.

悬浮电流 I_d 表示其悬浮电流对. 在不同悬浮电流对的作用下转子允许悬浮的临界位置如图 13(a) 所示, 红线和黑线之间表示其允许移动范围.

结合 (7) 式及图 13(a) 中计算的临界偏移位置, 可得到超导转子的极限磁支承力. 转子在不同悬浮电流对作用下的极限磁支承力如图 13(b) 所示. 图 13(c) 是超导转子在不同悬浮电流对作用下的球腔中心及最大偏移处的支承刚度. 随着悬浮电流对 I_d 及 I_u 的增大, 其支承刚度增大, 但其最大承载力先增大后减小. 图 13(b) 表明悬浮电流对并非越大越好, 而且电流对越大, 转子允许运动范围越小, 这对转子的悬浮稳定性提出了更高要求. 其向下偏移最大承载力对应电流对 $I_d = 4.41$ A ($I_u = 3.60$ A), 对应的最大磁支承力为 2.068 N (-0.554 N); 向上偏移最大承载力对应 $I_d = 5.04$ A ($I_u = 4.35$ A), 其最大磁支承力为 1.910 N (-0.710 N). 取其对应的电流对 I_d 的中点作为最优悬浮电流 $I_d = 4.73$ A ($I_u = 3.98$ A), 此时最大竖直方向的磁支承力 2.029 N (-0.671 N), 上、下临界位置磁支承刚度是 -2.41 N/mm 和 -1.84 N/mm. 此时超导转子可承受的最大过载加速度 24 m/s^2 .

4.3 磁支承结构承载能力的优化分析

超导转子在悬浮过程中上、下悬浮线圈对超导转子的作用力反向, 即磁支承力互相削弱. 基于 (3) 式和 (14) 式可计算出单线圈悬浮时超导转子在临界悬浮位置的承载能力, 如图 14 所示. 单线圈悬浮时磁支承结构对超导转子的最大承载力为 4.57 N, 对应的过载加速度为 54.4 m/s^2 , 远优于最优悬浮电流对 $I_d = 4.73$ A ($I_u = 3.98$ A) 对超导转子的最大承载力.

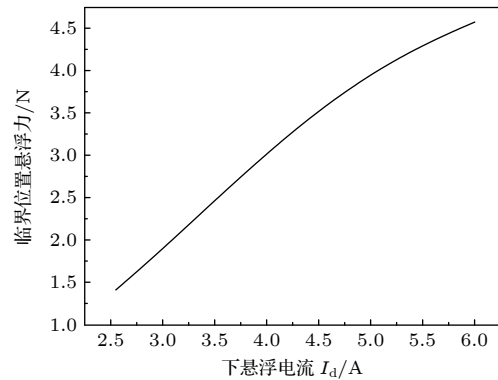


图 14 单线圈悬浮超导转子最大承载力

Fig. 14. The maximum bearing capacity of a single-coil suspension superconducting rotor.

基于此提出了一种通过壳体加速度对悬浮电流反馈控制的方法来优化磁支承结构对超导转子的过载能力. 当磁支承结构的壳体有竖直方向的加速度 a 时, 则超导转子具有的加速度:

$$a' = -g - a, \quad (15)$$

式中 a 是壳体加速度, 方向沿 z 轴正方向.

设原始支承电流对 I_d 和 I_u , 当壳体存在加速度 a 时, 支承电流对分别调整为 $I_d + I_a$, $I_u - I_a$, 此时超导转子在新电流对的支承下, 仍以球腔中心为平衡点, 则由 (6) 式和 (15) 式得

$$\frac{I_a}{a} = \frac{m}{0.12672(I_d + I_u)}. \quad (16)$$

最优悬浮电流对 $I_d = 4.73$ A ($I_u = 3.98$ A) 时, 超导转子在临界位置对应的最大承载加速度 24 m/s^2 (-7.99 m/s^2), 能承受的最大壳体加速度 $a = 14.2 \text{ m/s}^2$ (-17.79 m/s^2). 下面分析壳体加速度大于 14.2 m/s^2 (-17.79 m/s^2) 时, 上述反馈方法的支承效果. 设 $I_d = 4.73$ A ($I_u = 3.98$ A), 则超导磁支承结构的壳体加速度 a 与悬浮电流对 $I_{da} = I_d + I_a$ 和 $I_{ua} = I_u - I_a$ 的关系, 如图 15 所示.

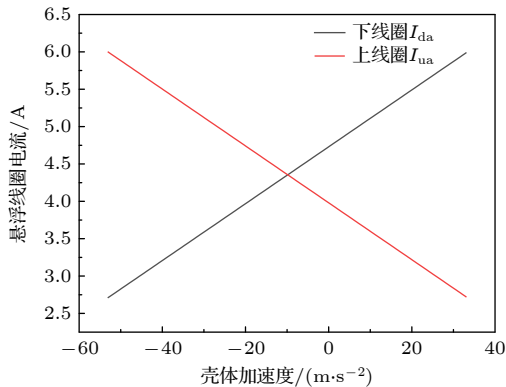


图 15 悬浮电流对随壳体加速度 a 的变化

Fig. 15. Change of suspension current pair with shell acceleration.

将图 15 中的加速度 a 对应的悬浮电流对代入 (14) 式得出其对应的临界悬浮位置, 如图 16(a) 所示. 再结合 (5) 式可得超导转子在所设悬浮电流对的临界承载能力, 如图 16(b) 所示, 壳体具有负方向加速度时, 超导转子的惯性加速度向上, 此时主要考虑超导转子上临界位置的承载能力; 同理壳体具有正方向加速度时, 超导转子的惯性加速度向下, 此时主要考虑超导转子下临界位置的承载能力. 磁支承结构检测到壳体加速度, 需要在上、下临界位置之间完成对悬浮电流对的改变. 计算结果

表明, 基于壳体加速度反馈控制悬浮电流的磁支承结构对超导转子的最大承载力为 3.629 N , 相对最优悬浮电流对所对应的 2.029 N 的最大承载力, 其最大承载能力提升了 79% , 由此可看出通过壳体加速度反馈控制悬浮电流方法的优越性.

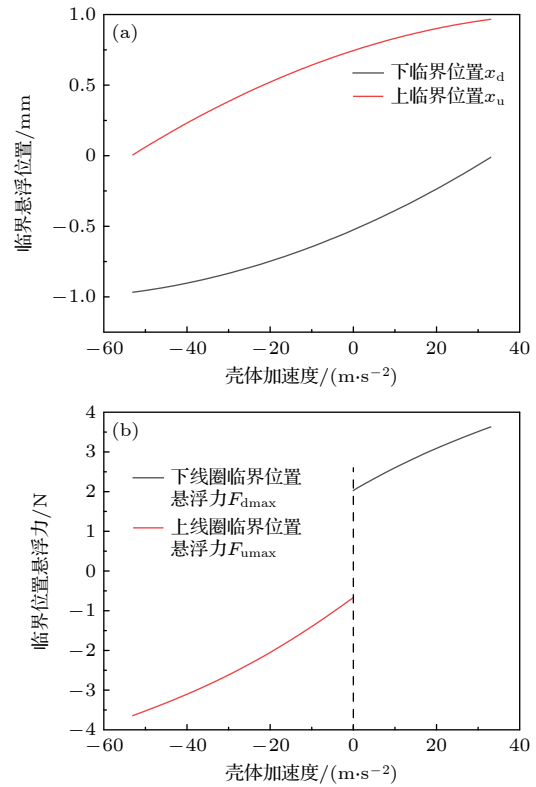


图 16 优化后超导转子的临界悬浮位置与对应的临界承载力 (a) 临界悬浮位置随壳体加速度的变化; (b) 临界承载力随壳体加速度的变化

Fig. 16. Critical suspension position and the corresponding critical bearing capacity of the optimized superconducting rotor: (a) The change of the critical suspension position with the shell acceleration; (b) the change of the critical bearing capacity with the shell acceleration.

5 结 论

本文介绍了一种超导转子磁悬浮结构, 并通过数值方法分析了悬浮线圈之间, 悬浮线圈和定子之间在超导转子表面产生磁场的耦合特性, 得出了上、下悬浮线圈反向通电, 超导转子在驱动过程中可稳定悬浮, 否则转子会产生强迫振动.

提出了一种基于磁路原理和有限元方法的超导转子承载能力分析方法, 对超导转子的磁路进行了建模, 分析了超导磁悬浮系统的最大承载能力及对应条件, 结果表明悬浮线圈电流并非越大其支

承能力就越强, 必须综合考虑其表面的临界磁场, 和转子的允许位移区间, 否则会造成磁支承系统的失超.

设计一种优化磁支承结构对超导转子承载能力的方案, 并进行理论分析. 根据超导转子磁支承结构的壳体加速度, 反馈控制磁支承结构的上、下悬浮电流对, 不仅可使磁支承结构的最大承载能力提高 78%, 而且可以使超导转子的平衡点始终在超导球腔的中心位置. 分析结果为超导转子磁悬浮结构的设计和优化, 及其承载能力的评估和优化提供一定的参考.

参考文献

- [1] Hu X N, Wang H S, Wang H, Wang Q L 2010 *Opt. Precis. Eng.* **18** 169 (in Chinese) [胡新宁, 王厚生, 王晖, 王秋良 2010 光学精密工程 **18** 169]
- [2] Jiang L, Zhong Z Y, Yi D Y, Zhang H W 2008 *Chin. J. Sci. Instru.* **29** 1115 (in Chinese) [江磊, 钟智勇, 仪德英, 张怀武 2008 仪器仪表学报 **29** 1115]
- [3] Cui C Y, Hu X N, Chen J S, Wang H, Wang Q L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 018403 (in Chinese) [崔春艳, 胡新宁, 程军胜, 王晖, 王秋良 2015 物理学报 **64** 018403]
- [4] Hu X N, Wang Q L, Cui C Y 2010 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20** 892
- [5] Wang H, Hu X N, Cui C Y, Wang L, Wang Q L 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 5207905
- [6] Schoch K F, Darrel B 1967 *Proceedings of the 1966 Cryogenic Engineering Conference Colorado, America, June 13-15, 1967* p657
- [7] Tang J Q 2005 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Engineering University) (in Chinese) [汤继强 2005 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学)]
- [8] Harding T H, Lawson D W 1968 *AIAA J.* **6** 305
- [9] Schoch K F, Darrel B 1967 *Adv. Cryog. Eng.* **12** 657
- [10] Hu X N, Zhao S W, Wang H S, Wang H, Wang Q L 2008 *Rare Metal Mater. Eng.* **37** 436 (in Chinese) [胡新宁, 赵尚武, 王厚生, 王晖, 王秋良 2008 稀有金属材料与工程 **37** 436]
- [11] Tang J Q, Zhao L, Luo J Y 2004 *J. Projectiles Rockets Missiles Guidance* **24** 136 (in Chinese) [汤继强, 赵琳, 罗俊燕 2004 弹箭与制导学报 **24** 136]
- [12] Tang J Q, Sun F, Zhao Y X, Guo Q F 2005 *J. Harbin Eng. Univ.* **26** 462 (in Chinese) [汤继强, 孙枫, 赵玉新, 郭秋芬 2005 哈尔滨工程大学学报 **26** 462]
- [13] Zhao S W, Hu X N, Cui C Y, Wang Q L 2008 *Rare Metal Mater. Eng.* **37** 217 (in Chinese) [赵尚武, 胡新宁, 崔春燕, 王秋良 2008 稀有金属材料与工程 **37** 217]
- [14] Wang H, Wang Q L, Hu X N, Cui C Y, Su H J, He Z M 2018 *Cryo. Supercond.* **46** 1 (in Chinese) [王浩, 王秋良, 胡新宁, 崔春燕, 苏华俊, 何忠名 2018 低温与超导 **46** 1]
- [15] Buchhold T A 1961 *Cryogenics* **1** 203
- [16] Zhang Y H 1997 *Superconducting Physics* (Hefei: University of Science and Technology of China Press) pp11, 12 (in Chinese) [张裕恒 1997 超导物理 (合肥: 中国科学技术大学出版社) 第11, 12页]
- [17] Cai S S, Zh G 1985 *Classical Electrodynamics* (Shanghai: Fudan University Press) pp229-254 (in Chinese) [蔡圣善, 朱耕 1985 经典电动力学 (上海: 复旦大学出版社) 第229—254页]
- [18] Guan W Y, Li H C, Cai J H, Wu H S 1981 *The Physical Basis of Superconductivity* (Beijing: Science Press) pp47-51 (in Chinese) [管惟炎, 李宏成, 蔡建华, 吴杭生 1981 超导电性物理基础 (北京: 科学出版社) 第47—51页]
- [19] Lin Q R, Zhao Y M 1987 *Magnetic Circuit Design Principle* (Beijing: Machinery Industry Press) pp87, 88 (in Chinese) [林其壬, 赵佑民 1987 磁路设计原理 (北京: 科学出版社) 第87, 88页]
- [20] Zou J B, Liu B T, Cui S H, Zhen P 1998 *Magnetic Circuit and Magnetic Field* (Harbin: Harbin Institute of Technology Press) pp43-47 (in Chinese) [邹继斌, 刘宝庭, 崔淑海, 郑萍 1998 磁路与磁场 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社) 第43—47页]
- [21] Liu J H, Wang Q L, Yan L G, Li X 2010 *Tran. China Electrotech. Soc.* **25** 1 (in Chinese) [刘建华, 王秋良, 严陆光, 李献 2010 电工技术学报 **25** 1]

Analysis on magnetic coupling characteristics and carrying capacity of superconducting rotor magnetic levitation structure^{*}

Zhang Yuan¹⁾²⁾ Hu Xin-Ning^{1)2)†} Cui Chun-Yan¹⁾ Cui Xu³⁾ Niu Fei-Fei¹⁾²⁾
 Huang Xing¹⁾²⁾ Wang Lu-Zhong¹⁾²⁾ Wang Qiu-Liang¹⁾²⁾

1) (*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Electronics, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Ganjiang Innovation Academy, Chinese Academy of Sciences, Ganzhou 341119, China*)

(Received 5 March 2023; revised manuscript received 28 March 2023)

Abstract

The high-speed rotating superconducting rotor can be used as a sensor to measure angular speed or angular position. Mass unbalance and oblateness of superconducting rotor are the main error sources to measure angular speed or angular position. General Electric company has developed an superconducting rotor magnetic suspension device with an accuracy of 0.005° per hour, but its rotor structure is very complex. So it is difficult to process and assemble with extremely small mass-unbalance and small oblateness, which limits the further improvement of its accuracy. According to this, in this paper we introduce a magnetic support structure with a simple superconducting rotor compared with rotor made by General Electric company. The rotor sphere is a closed structure with no theoretical mass eccentricity. Its electromagnetic structure is simpler than General Electric company's, and the stator coil is the torquer coil at the same time. The stator coil is used to accelerate the rotor, while the torquer is used to make the rotor erect. Based on the theory of superconducting electrodynamics and the finite element method, the characteristics of the magnetic suspension structure are analyzed. The magnetic field coupling effect of the stator and the suspension coils on the surface of the superconducting rotor are studied, and their influence on magnetic supporting force is also analyzed. The current direction of the two suspension coils should be opposite, otherwise the rotor will produce forced vibration, which will make it difficult to accelerate the superconducting rotor. Then the magnetic circuit theory and the finite element method are used to model the magnetic circuit of the magnetic levitation structure, and the critical carrying capacity of the magnetic suspension structure is calculated and the optimal suspension conditions are given. Finally, a method to optimize its carrying capacity is designed. Therefore, the currents of the suspension coils are controlled by the acceleration of superconducting cavity. Through this method, the maximum bearing capacity of the magnetic levitation structure can be increased by 78% compared with that of fixed optimal suspension current support. The analysis results provide a reference for the structural design and optimization of the superconducting rotor magnetic levitation system.

Keywords: superconducting magnetic levitation, superconducting rotor, magnetic field coupling, carrying capacity of magnetic levitation structure

PACS: 84.71.Ba, 85.70.Rp, 45.20.Da

DOI: 10.7498/aps.72.20230328

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51721005).

[†] Corresponding author. E-mail: xininghu@mail.iee.ac.cn

超导转子磁悬浮结构磁耦合特性及承载能力分析

张源 胡新宁 崔春艳 崔旭 牛飞飞 黄兴 王路忠 王秋良

Analysis on magnetic coupling characteristics and carrying capacity of superconducting rotor magnetic levitation structure

Zhang Yuan Hu Xin-Ning Cui Chun-Yan Cui Xu Niu Fei-Fei Huang Xing Wang Lu-Zhong Wang Qiu-Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 128401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230328

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230328>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

空心圆柱形永磁体内径对单畴GdBCO超导块材磁悬浮力的影响

Effect of inner diameter of hollow cylindrical permanent magnet on levitation force of single domain GdBCO bulk superconductor

物理学报. 2018, 67(7): 077401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172418>

抗磁悬浮振动能量采集器动力学响应的仿真分析

Simulation analysis of dynamic response of the energy harvester based on diamagnetic levitation

物理学报. 2018, 67(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171551>

超导薄膜磁场穿透深度的双线圈互感测量

Measurement of magnetic penetration depth in superconducting films by two-coil mutual inductance technique

物理学报. 2020, 69(4): 047401 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191758>

二次单畴化制备GdBCO超导块材的方法及其性能

Fabrication process and superconducting properties of recycling multi-domain GdBCO bulk superconductors using improved infiltration technique

物理学报. 2021, 70(15): 158101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202141>

一种铅铋合金薄膜低温相的结构及超导物性表征

Characterization of structure and superconducting properties of low-temperature phase of Pb-Bi alloy films

物理学报. 2021, 70(17): 170703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210482>

NiFe₂O₄纳米粒子掺杂对单畴YBCO超导块材性能的影响

Influence of NiFe₂O₄ nanoparticle doping on properties of single-domain YBCO bulk superconductors

物理学报. 2020, 69(23): 237402 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201116>