

DOI: 10.13382/j.jemi.B2103976

抗磁-气流混合悬浮理论及仿真分析*

巩 启 高 琳 苏宇锋

(郑州大学机械与动力工程学院 郑州 450001)

摘要:提出了一种抗磁-气流混合悬浮结构,利用提升磁铁和气流使悬浮转子稳定地悬浮于热解石墨板上方。通过理论分析和有限元数值分析方法对该抗磁悬浮结构的悬浮特性开展研究;利用压缩氮气作为气源进行实验测试研究。在标准温度和压力下,当气流量为2 198 sccm时,悬浮转子转速达到16 666 r/min,悬浮间隙为0.7 mm。通过调整喷嘴的垂直位置,悬浮转子可以在悬浮间隙为0.2~0.8 mm的任意高度上稳定悬浮旋转。当气流速度达到2 748 sccm时,悬浮转子的转速增加到22 300 r/min。采用混合悬浮结构的悬浮转子具有较大的悬浮间隙和较高的旋转速度。这种悬浮结构有望应用于气流驱动下的传感、能量采集和空气轴承。

关键词:抗磁悬浮;悬浮转子;气流悬浮;有限元分析;能量采集器

中图分类号: TN03;TK83 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.3030

Theory and simulation analysis of diamagnetic-airflow hybrid levitation

Gong Qi Gao Lin Su Yufeng

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In this paper, a diamagnetic-airflow hybrid levitation structure is reported, with a levitated rotor stably levitated above a diamagnetic disc just using a lifting magnet and airflow. The levitation characteristics were studied through theoretical analysis and finite element analysis (FEA) method. And driving experiment was carried out using compressed nitrogen as driving source. The rotation speed of the levitated rotor is 16 666 r/min, and the levitation gap is 0.7 mm when the airflow rate is 2 198 sccm under standard temperature and pressure. At the same time, the levitated rotor can be stably levitated and rotated at any height from 0.2 mm to 0.8 mm by adjusting the vertical position of the nozzles. When the airflow rate reaches 2 748 sccm, the speed of the levitated rotor is 22 300 r/min. With the hybrid levitation structure, the levitated rotor has a large levitation gap and a high rotation speed. This levitation structure is expected to be applied to sensing, energy harvesting and air bearing under actuation of airflow.

Keywords: diamagnetic levitation; levitated rotor; airflow levitation; finite element analysis; energy harvester

0 引言

近年来,磁悬浮^[1-2]、静电悬浮^[3-4]、超声悬浮^[5-6]、光学悬浮^[7-8]和气流悬浮^[9-10]等悬浮技术的应用引起了人们的广泛关注。

抗磁悬浮是唯一的一种不需要外部能量输入就能够实现稳定悬浮的技术。抗磁性在1778年首次被Brugmans发现,当时观测到铋被磁场排斥的现象。1842

年,英国物理学家Earnshaw提出了著名的应用于物体静力平衡的Earnshaw理论。根据Earnshaw理论,在永磁体之间或永磁体与铁磁材料之间不可能获得稳定的磁悬浮。1939年,Braunbek使用小片石墨和铋悬浮于非均匀强电磁场中验证了抗磁性^[11]。2010年诺贝尔物理学奖得主安德烈·海姆于1997年首次用16 T的磁场将一只青蛙悬浮起来。

由于低摩擦^[12-13]和低耗能^[14]等优势,抗磁稳定悬浮的研究得到了越来越多的关注。由于抗磁作用力的作用

收稿日期: 2021-02-08 Received Date: 2021-02-08

* 基金项目: 国家自然科学基金(U1904169)项目资助

距离较小,在抗磁悬浮结构中的悬浮体的运动范围受到限制。

气悬浮技术因其具有摩擦阻力小、结构简单、易于维护和散热性好等优点被认为适用于高精度、高转速情况下的理想非接触悬浮技术^[15]。在磁力和其他机制力的共同作用下,抗磁悬浮的缺点得到改善,可用于微纳旋转机械^[16],能量收集^[17-18],高灵敏度感测^[19-20]。

本文在课题组抗磁悬浮永磁体转子研究^[21]基础上提出了一种抗磁-气流混合悬浮结构,悬浮转子由两个中心对称喷嘴驱动并悬浮于热解石墨板上方,由于仅单侧具有抗磁体,相较于传统的抗磁悬浮结构具有更高悬浮间隙与线圈安置空间,且提高气流的流动性,使悬浮结构具有更高的旋转速度。

1 结构模型

混合悬浮结构的示意图如图 1 所示,主要由提升磁铁、悬浮转子、热解石墨板和喷嘴构成,主要部件的结构参数如表 1 所示。悬浮转子由自身的重力、提升磁铁施加的吸引力、热解石墨板施加的排斥力和气流施加的作用力保持悬浮状态。

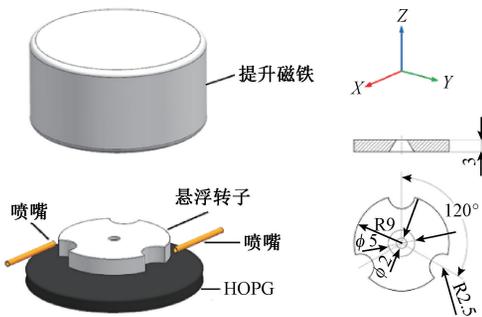


图 1 混合悬浮结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of diamagnetic-airflow hybrid levitation

表 1 气流能量采集器结构参数

Table 1 Structural parameters of airflow energy collector

| 组件 | 材料 | 参数/mm |
|-------|-------------|-----------|
| 提升磁铁 | NdFeB (N52) | ∅25×10 |
| 悬浮转子 | NdFeB (N52) | ∅18×3 |
| 热解石墨板 | HOPG | ∅25×2 |
| 喷嘴 | PVC | ∅0.8 (内径) |

悬浮转子的重力由提升磁铁产生的磁力与部分抗磁力平衡,通过调节提升磁铁的位置使悬浮转子与热解石墨板之间的距离最大,悬浮转子受到的另一部分抗磁力由气流施加在悬浮转子在竖直方向的作用力平衡。两个

喷嘴围绕悬浮转子的旋转中心对称布置,两个喷嘴位于同一水平面,该水平面低于悬浮转子对称中心所在的水平面。两股气流作用于悬浮转子形成力偶,悬浮转子被驱动并在热解石墨板上方旋转,由于气流的作用平面低于悬浮转子的中心平面,气流在竖直方向产生作用力保持悬浮转子稳定悬浮。通过磁力,抗磁力和气流作用力共同作用实现抗磁气流混合悬浮。

2 理论分析

气流平面低于悬浮转子的中心平面,气流流经上部分的侧壁受到的阻力较大,气流流经下部分的侧壁受到的阻力较小,导致气流在悬浮转子上表面的流速小于流经下表面的流速。依据伯努利效应,当悬浮转子表面气流流速增加时,表面压力降低^[22]。气流在悬浮转子下表面的流速大于上表面的流速,导致悬浮转子上表面的压力大于下表面的压力,悬浮转子上、下表面的压力的合力方向向下的气流作用力可视为下降力。

气流不仅驱动悬浮转子旋转,而且在悬浮转子上施加下降力,使悬浮转子稳定悬浮旋转。施加在悬浮转子的合力在竖直方向上是平衡的,因此悬浮转子可以稳定地悬浮并在热解石墨板上方旋转。

2.1 静力学分析

混合悬浮结构的静态力学分析如图 2 所示。悬浮转子在竖直方向上所受合力 F 表达为:

$$F = F_L + F_D - F_n - G \quad (1)$$

式中: F_L 是来自提升磁铁的向上磁力; F_D 是来自热解石墨板的向上抗磁力; F_n 是气流施加在悬浮转子的下降力。

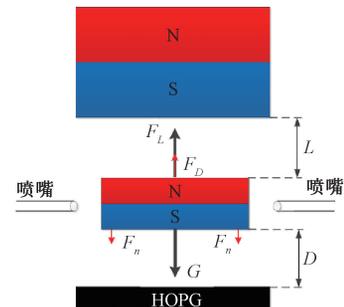


图 2 静态力学分析模型

Fig. 2 Static mechanical analysis model

该混合悬浮系统中,只有提升磁铁和悬浮转子之间存在磁力作用。两个磁铁之间的磁吸引力的计算通常可以将问题简化为一个磁铁处于一个磁场环境中求解^[23]。

$$F_L = \frac{\mu_0 M_1 M_2}{4\pi} \iint_{s_1, s_2} R ds_2 ds_1 \quad (2)$$

$$R = \frac{(z_1 - z_2) \cos \theta}{(R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2 \cos \theta + (z_1 - z_2)^2)^{3/2}} \quad (3)$$

式中： μ_0 为真空磁导率常数； M_1 为悬浮转子的磁化强度； M_2 为提升磁铁的磁化强度； z_1 为悬浮转子的高度； z_2 为提升磁铁的高度； R_1 为悬浮转子的半径； R_2 为提升磁铁的半径。

当抗磁性和磁场足够强时，抗磁性的作用比较明显。在磁场 H 中，抗磁力可以由如下公式计算：

$$F_D = \mu_0 \chi_m \int_V \nabla \vec{H} \cdot \vec{H} dV \quad (4)$$

式中： χ_m 为磁化率； V 为抗磁体的体积。

当流速增加时，悬浮转子和气体之间的界面上的压力将降低。由于伯努利效应，悬浮转子在垂直方向上受到力可通过如下公式计算：

$$p + 1/2\rho v^2 + \rho gh = constant \quad (5)$$

$$F_n = pA \quad (6)$$

式中： p 是压力； ρ 是流体密度； v 是流体速度； g 是重力加速度； h 是位置的高度； A 是悬浮转子的上、下表面积。

2.2 动力学分析

混合悬浮结构的动态力学分析如图 3 所示。悬浮转子的水平转动在单位体积的单位时间内可视为水平移动。当悬浮转子受到气流的驱动力矩 T 和空气阻力矩 M 相等时，悬浮转子匀速旋转。

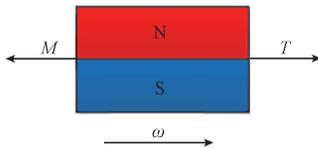


图 3 动态力学分析模型

Fig. 3 Dynamic mechanical analysis model

1) 驱动力矩分析

将气体流量 Q 转换为气体流速：

$$v_0 = \frac{Q}{\pi r_0^2} \quad (7)$$

式中： r_0 是喷嘴的半径； v_0 是气流的出口速度。

气流和圆弧转子叶片之间的接触处被视为控制体。如图 4 所示，气流通过控制体满足动量方程式。

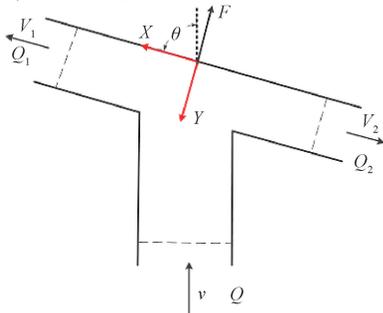


图 4 控制体示意图

Fig. 4 Control body of the flow analysis

基于动量方程，获得如下方程：

$$\begin{cases} - \oint_S p \cos(n, x) dS + \iiint_\tau \rho f_x d\tau - F_x = \\ \frac{\partial}{\partial t} \iiint_\tau \rho u d\tau + \oint_S (u \cdot n) \rho u dS \\ - \oint_S p \cos(n, y) dS + \iiint_\tau \rho f_y d\tau - F_y = \\ \frac{\partial}{\partial t} \iiint_\tau \rho v d\tau + \oint_S (v \cdot n) \rho v dS \\ - \oint_S p \cos(n, z) dS + \iiint_\tau \rho f_z d\tau - F_z = \\ \frac{\partial}{\partial t} \iiint_\tau \rho w d\tau + \oint_S (w \cdot n) \rho w dS \end{cases} \quad (8)$$

式中： S 是控制表面的面积； n 是外法线的单位矢量； τ 是控制体的体积； ρ 是流体的密度； F 是作用在控制体上的外力； f 是质量力； u, v, w 是流体在不同方向上的流速。

流体沿 Y 方向施加在控制体上的力按式(9)计算。

$$F = \iint_S (v \cdot n) \rho v dS \quad (9)$$

由两个中心对称喷嘴的气流产生的驱动力矩计算如下：

$$T = 2 \cdot FL = \int_{R_1}^R \frac{2\rho Q^2 r \sin \theta}{\pi r_0^2} dr = \frac{\rho \sin \theta}{\pi r_0^2} (R^2 - R_1^2) Q^2 \quad (10)$$

式中： L 是从喷嘴到旋转轴的垂直距离； θ 是气流和作用面的角度； R 是悬浮转子的最大半径； R_1 是从叶片根部到叶片中心的半径。

2) 空气阻力矩分析

悬浮转子旋转过程中空气阻力主要由粘滞阻力和迎风阻力组成，可以分两部分计算作用在悬浮转子上的空气阻力，如图 5 所示。

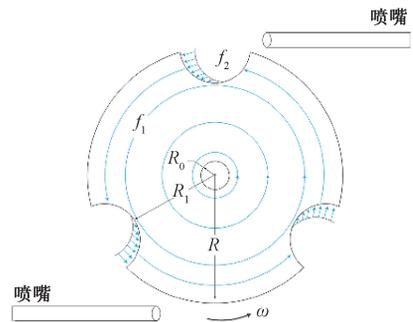


图 5 空气阻力分析模型

Fig. 5 The analysis model of air drag

由于热解石墨板的存在，下表面和热解石墨板的微小间距造成下表面的粘滞阻力远比上表面的粘滞阻力大得多，因此在计算中可以忽略上表面的粘滞阻力。可以

通过式(11)和(12)来计算下表面的粘滞阻力。

$$f_{1i} = -\mu A \frac{v}{2h} = -\mu A \frac{\omega r_i}{2h} \quad (11)$$

$$M_1 = -\frac{\mu A \omega}{3h} (R^3 - R_0^3) \quad (12)$$

式中: A 为上、下表面积; h 取决于悬浮间隙; R_0 是悬浮转子的最小半径。

悬浮转子侧壁的迎风阻力可通过式(13)和(14)计算。

$$f_{2i} = -bv = -b\omega r_i \quad (13)$$

$$M_2 = -b\omega (R^3 - R_1^3) \quad (14)$$

式中: b 取决于流体的性能。

当驱动力和阻力的大小相等时,悬浮转子处于平衡状态,可求得转速。

$$T + M = T + M_1 + M_2 = 0 \quad (15)$$

$$\omega = \frac{3phQ^2(R^2 - R_1^2) \sin\theta}{\pi r_0^2 [uA(R^3 - R_0^3) + 3hb(R^3 - R_1^3)]} \quad (16)$$

3 仿真分析

为了计算磁力和抗磁力,使用有限元软件 COMSOL Multiphysics 5.3 中的磁场模块建立 3-D 模型。为了清晰显示磁场线,沿着 Z 轴做一个截面,仿真结果如图 6 所示。

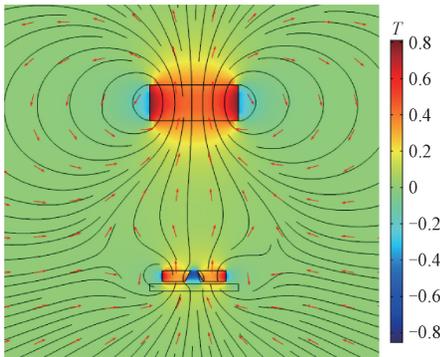


图 6 磁场线仿真

Fig. 6 Distribution of magnetic lines of force

由于磁场线径向对称,悬浮转子的轴线与提升磁铁的中心轴线对齐。因此,悬浮转子可以围绕提升磁铁的中心轴自由旋转。

磁力与距离 L 之间的关系如图 7 所示,从图 7 看出,磁力随着距离 L 的增加而减小。由于抗磁力十分微弱,当磁力等于悬浮转子的重力 47 740 μN 时确定静态悬浮间隙范围。

由于抗磁悬浮的悬浮间隙很小,因此在磁力和重力平衡点附近的 3 mm 范围内获取所需数据。类似地,获

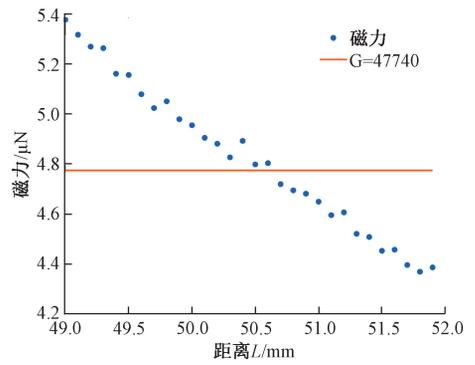


图 7 磁力随距离 L 的关系

Fig. 7 Relationship between magnetic force and L

取具有 3 mm 范围的抗磁力数据。提升磁铁和热解石墨板已固定。当悬浮转子沿垂直方向移动时,距离 L 随着距离 D 的增加而减小。在仿真过程中,确保 L 和 D 的总和恒定 ($L+D = 52$ mm)。

抗磁力相对于距离 D 的变化趋势如图 8 所示。可以看出,随着距离 D 减小,悬浮转子的抗磁力迅速增大。

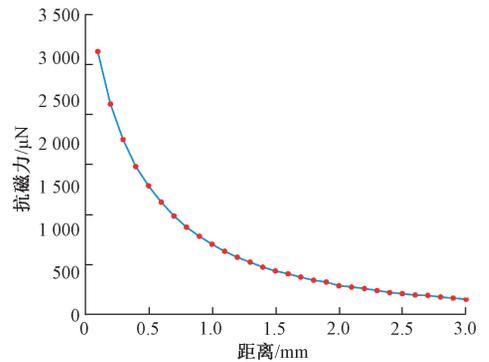


图 8 抗磁力随距离 D 的关系

Fig. 8 Relationship between diamagnetic force and D

通过 COMSOL Multiphysics 5.3 中的流场模块计算从作用在悬浮转子上的气流中获得垂直方向作用力。在分析中,将悬浮转子的对称平面设置为零平面,将向上方向选择为正,同时将入口流量设置为 2 198 sccm,分析结果如图 9 所示。

图 9 中,气流作用力是悬浮转子两侧压力之间的差值,偏移距离是喷嘴和零平面在垂直方向上的距离。可以看出,作用在悬浮转子上的垂直方向作用力与喷嘴的位置有关。当偏移距离小于零表现为下降力,当偏移距离大于零表现为上升力。当喷嘴的垂直位置约为 -0.7 mm 时,转子会受到最大作用力,下降力可达到 -857 μN 。

悬浮转子的合力 F 与距离 D 之间的关系如图 10 所示。从图 10 可以看出,当距离 D 的范围为 $0.11 \sim$

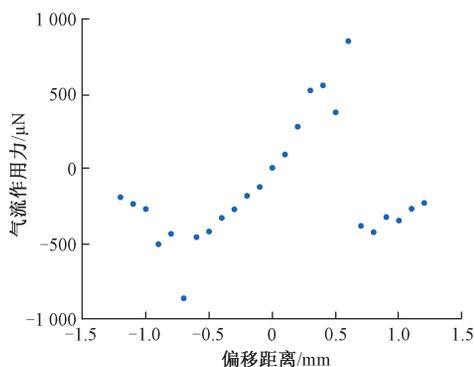


图 9 气流作用力与偏移距离关系

Fig. 9 Relationship between flow actuation and offset displacement

0.78 mm 时,悬浮转子的合力不大于 0,来自气流的最大下降力是使转子在垂直方向上保持稳定。当合力小于 0 N 时,气流产生的下降力不必达到最大值就能保持悬浮转子在竖直方向平衡。因此,通过调节垂直位置的喷嘴的偏移距离,悬浮转子的悬浮间隙范围为 0.11 ~ 0.79 mm。

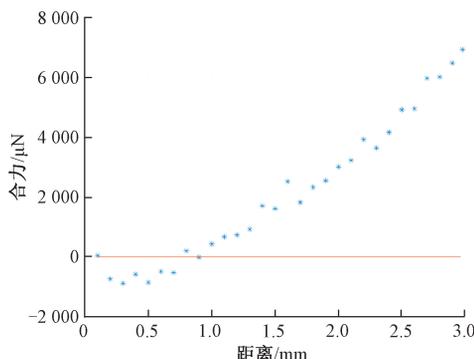


图 10 合力与距离 D 的关系

Fig. 10 Variation of the resultant force versus D

使用 COMSOL Multiphysics 5.3 对气流的流场进行了仿真和分析。气流的流线如图 11 所示。当气流作用在悬浮转子的叶片上时,气流主要分为两股。一股气流沿叶片作顺时针方向运动,另一股气流沿叶片作逆时针方向运动,这与力矩分析的物理模型一致。

气流量的参数扫描用于获得不同流量下悬浮转子的力矩。如图 12 所示,力矩 T 与气流量 Q 的关系为二次曲线,与式(16)一致。

4 实验与讨论

在实验中,氮气源通过两个中心对称喷嘴被引导到悬浮转子,该喷嘴位于悬浮转子附近并连接到质量流量

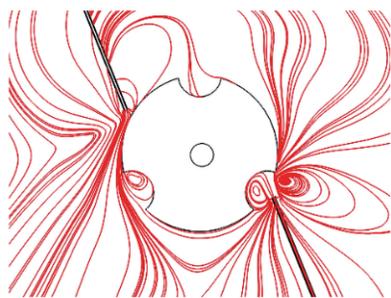


图 11 流线分析图

Fig. 11 Streamline diagram under the interaction between the airflow and the magnet rotor

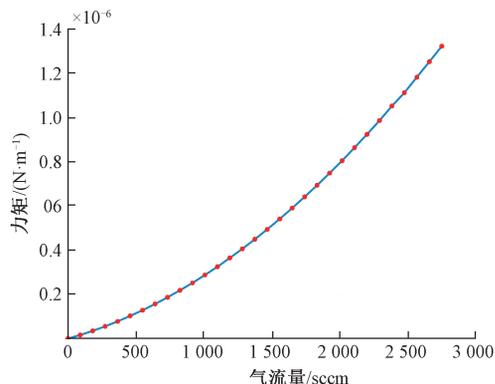


图 12 力矩与气流量关系

Fig. 12 Changes of driving moment versus flowrate

控制器。使用两个质量流量控制器 (AITOLY MFC300) 通过计算机软件调节氮气流量。示波器 (Tektronix TDS2012B) 通过测量光电传感器的电压信号频率 (KEYENCE LV-NH35, 响应时间为 80 μs) 得到悬浮转子的转速。

混合悬浮结构的实验装置如图 13 所示。首先,通过调节升降平台,可以使悬浮转子稳定地悬浮在上、下热解石墨板之间。接下来,使用质量流量控制器来控制气流的流量。悬浮转子在气流的驱动下旋转,当气流量达到 2 198 sccm 时,移除上热解石墨板,此时形成混合悬浮结构。用光电传感器测量悬浮转子在流量范围为 2 198 ~ 2 748 sccm 条件下的旋转速度,并用示波器记录下来。

混合悬浮结构中,热解石墨板和悬浮转子之间的间隙达到 0.7 mm。气流和大气压共同影响在悬浮转子周围形成气膜,该气膜充当空气轴承以维持悬浮转子的稳定悬浮。仅当两个喷嘴关于旋转轴对称地正确调整时,才有可能实现悬浮转子的稳定旋转悬浮。

悬浮转子的转速与气流量之间的关系如图 14 所示。不小于 2 198 sccm 的气流量是混合悬浮结构的必要条件。存在上热解石墨板时,悬浮转子的转速在 2 198 sccm 的条件下达到 9 914 r/min,当移除上热解石墨板时,悬浮转子的转速直接上升至 16 666 r/min,说明



图 13 混合悬浮结构实验平台

Fig. 13 Experiment setup of diamagnetic-airflow hybrid levitation. 混合悬浮结构对于提高悬浮转子的转速有十分显著作用。混合悬浮结构中的悬浮转子的转速在气流量范围为 2 198 ~ 2 748 sccm 的条件下旋转速度范围为 16 666 ~ 22 300 r/min, 最高转速可达 22 300 r/min。

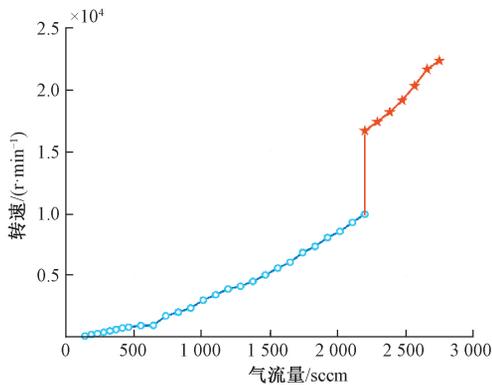


图 14 转速和气流量关系

Fig. 14 Measured rotation speed of the rotor versus flowrate

最后,研究混合悬浮结构中悬浮转子的悬浮间隙,以探索悬浮转子与热解石墨板间隙的变化范围。实验中喷嘴固定在精度为 0.001 的竖直滑台上,喷嘴的位置由滑台的旋钮数值刻度确定,通过旋转滑台的旋钮能够调节喷嘴的竖直位移。当悬浮转子在 2 198 sccm 的气流量条件下,此时悬浮转子的悬浮间隙为 0.7 mm。通过沿垂直方向调整喷嘴的偏移距离,悬浮转子可在 0.2 ~ 0.8 mm 的任意位置悬浮。实验结果如图 15 所示,这意味着可以通过调节喷嘴使转子悬浮在该范围内的任何高度。结果与仿真结果一致,其中悬浮间隙的范围在 0.11 ~ 0.79 mm。

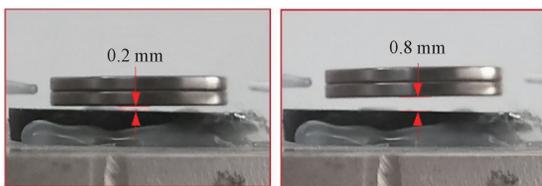


图 15 悬浮转子的悬浮范围

Fig. 15 Levitation range of the magnet rotor

5 结 论

提出了一种抗磁-气流混合悬浮结构。由于低摩擦特性,具有较高旋转速度和较大的悬浮间隙的优点,可达到 0.8 mm 的悬浮间隙和 22 300 r/min 的旋转速度,该悬浮结构可能在空气轴承中得到应用。由于其具有良好动态特性,也可用于传感器和能量采集器。将来,可以优化悬浮转子的外形尺寸,使悬浮转子的悬浮间隙和旋转速度达到最大值,并探讨悬浮转子的外形尺寸对悬浮间隙和旋转速度的影响。进一步,可通过在结构中引入感应线圈来研究输出特性,或者将下方热解石墨板放置于悬浮转子下方进行相应研究。

参考文献

- [1] KIDA M, ODA Y, SUZUKI T, et al. Effect of horizontal positioning control on levitation performance of magnetically levitated steel plate [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(3) :1011-1018.
- [2] MURAKAMI I, SHIMADA T, KOBAYASHI Y, et al. Stabilization of repulsive-type magnetic levitation system using superconducting magnetic bearing [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52(2-3) :1607-1613.
- [3] SUZUKI Y, MIKI D, EDAMOTO M, et al. A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(10) :104002.
- [4] MAURO N A, VOGT A J, DERENDORF K S, et al. Electrostatic levitation facility optimized for neutron diffraction studies of high temperature liquids at a spallation neutron source [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(1) :195504.
- [5] LIN F, DI P, ARAI F. High-precision motion of magnetic microrobot with ultrasonic levitation for 3-D rotation of single oocyte [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 35(12) :1445-1458.
- [6] ZANG D, LI J, CHEN Z, et al. Switchable opening and closing of a liquid marble via ultrasonic levitation [J]. Langmuir, 2015, 31(42) :11502-11507.
- [7] MONTEIRO F, GHOSH S, FINE A G, et al. Optical levitation of 10-ng spheres with nano-g acceleration sensitivity [J]. PHYSICAL REVIEW A, 2017, 96(6) :063841.
- [8] GALAN D, ISAKSSON O, ENGER J, et al. Safe

- experimentation in optical levitation of charged droplets using remote labs [J]. *Journal of Visualized Experiments: Jove*, 2019, 143: e58699.
- [9] JESUS C, JACOBO S, LUIS T, et al. Design of a low-cost air levitation system for teaching control engineering[J]. *Sensors*, 2017, 17(10):2321.
- [10] ESPI J M, CASTELLO J, GARCIA-GIL R. Air flow levitation system for in class and remote learning of control systems[J]. *International Journal of Engineering Education*, 2017, 33(1):74-83.
- [11] GAO Q H, YAN H, ZOU H X, et al. Magnetic levitation using diamagnetism: Mechanism, applications and prospects [J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2021, 64(1):44-58.
- [12] TKACHENKO A, LU J Q. Directed self-assembly of mesoscopic electronic components into sparse arrays with controlled orientation using diamagnetic levitation [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, 385:286-291.
- [13] KOKORIAN J, ENGELEN J, VRIES J D, et al. Ultra-flat bismuth films for diamagnetic levitation by template-stripping [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 550(1):298-304.
- [14] LEE J, JEONG S, HAN Y H, et al. Concept of cold energy storage for superconducting flywheel energy storage system [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, 21(3):2221-2224.
- [15] 李文俊. 考虑表面因素的气体动压与挤压悬浮特性研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
LI W J. Research on the aerodynamic and squeeze gas levitation with the consideration of surface characteristics[D]. Changsha:Hunan University, 2018.
- [16] SU Y F, XIAO Z, YE Z T, et al. Micromachined graphite rotor based on diamagnetic levitation[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2015, 36(4):393-395.
- [17] GAO Q H, ZHANG W M, ZOU H X, et al. Design and analysis of a bistable vibration energy harvester using diamagnetic levitation mechanism[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(10):8700509.
- [18] PALAGUMMI S, YUAN F G. A bi-stable horizontal diamagnetic levitation based low frequency vibration energy harvester[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279:743-752.
- [19] ZHANG K, SU Y F, DING J Q, et al. Design and analysis of a gas flowmeter using diamagnetic levitation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 18(17):6978-6985.
- [20] ABADIE J, PIAT E, OSTER S, et al. Modeling and experimentation of a passive low frequency nanoforce sensor based on diamagnetic levitation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 173(1):227-237.
- [21] 巩启,苏宇锋,张自军,等. 抗磁悬浮永磁体转子的理论分析与实验[J]. *电子测量与仪器学报*,2019,33(8):63-68.
GONG Q, SU Y F, ZHANG Z J, et al. Theoretical analyses and experiments of permanent magnets rotor based on diamagnetic levitation [J], *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(8):63-68.
- [22] XIN L, KAGAWA T. Theoretical and experimental study of factors affecting the suction force of a bernoulli gripper[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 140(9):04014066.
- [23] 张坤. 基于抗磁稳定悬浮的电磁式振动能量收集器研究[D]. 郑州:郑州大学,2019.
ZHANG K. Study on the electromagnetic vibration energy harvester based on diamagnetically stabilized levitation[D]. Zhengzhou :Zhengzhou University, 2019.

作者简介



巩启,2017年于太原理工大学获得学士学位,2020年于郑州大学获得硕士学位,现为中铁工程装备集团有限公司工程师,主要研究方向为能量采集器。

E-mail: 839503252@qq.com

Gong Qi received his B. Sc. degree in 2017 from Taiyuan University of Technology, M. Sc. degree from Zhengzhou University in 2020. Now he is an engineer in China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd. His main research interests include energy harvester and structure design.



高琳,2000年于西北农林科技大学获得学士学位,2011年于郑州大学获得硕士学位,现为郑州大学讲师,主要研究方向为图像处理与机构设计。

E-mail: mingminglin@163.com

Gao Lin received her B. Sc. degree from Northwest Agriculture & Forestry University in 2000, M. Sc. degree from Zhengzhou University in 2011. Now she is a lecturer at Zhengzhou University. Her main research interests include image processing and mechanism design.



苏宇锋(通信作者),2006年于上海交通大学获得博士学位,现为郑州大学教授,主要研究方向为能量采集器和微机电系统。

E-mail: yufengsu@zzu.edu.cn

Su Yufeng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2006. Now he is a professor at Zhengzhou University. His main research interests include energy harvester and MEMS devices.