

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104650

径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应分析*

艾立旺¹ 苗 森¹ 许孝卓¹ 封海潮¹ 李 娜²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000; 2. 国网焦作供电公司 焦作 454000)

摘 要:针对径向高温超导磁悬浮轴承轴向尺寸有限引起的端部效应会影响其轴向悬浮特性,提出一种基于 H 公式的二维有限元建模方法,对径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应进行分析。首先,通过实验测试验证提出的有限元建模方法;然后,分别建立具有不同尺寸定、转子的径向高温超导磁悬浮轴承有限元模型;最后,得到不同尺寸的超导定子与不同极数的永磁转子下轴向悬浮力与位移的关系。结果表明,由于端部效应,随着超导定子分块数量的增加,轴向悬浮特性不断恶化;随着永磁转子极数的增加,轴向悬浮力最大值先提高后降低,最终趋于永磁转子无限长时的轴向悬浮力最大值。

关键词: 径向高温超导磁悬浮轴承; 悬浮力; 端部效应; 有限元

中图分类号: TM153.3; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Analysis on end-effect of radial HTS magnetic levitation bearing

Ai Liwang¹ Miao Sen¹ Xu Xiaozhuo¹ Feng Haichao¹ Li Na²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. State Grid Jiaozuo Electric Power Supply Company, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The end-effect of which is caused by the limited axial size of radial HTS magnetic bearing will affect axial levitation behavior of radial HTS magnetic bearing. A 2-D finite element modeling method based on H-formulation is proposed to analyze the end-effect of radial HTS magnetic bearing. Firstly, the proposed finite element modeling method is verified by experimental tests. Then, the finite element models of radial HTS magnetic bearings with different sizes of stator and rotor are established respectively. Finally, it is obtained that the relationship between axial levitation force and displacement of superconducting stator of different size and permanent magnet rotor with different number of poles. The results show that due to the end effect, the axial levitation behavior deteriorates with the increase of the number of superconducting stator bulks. Moreover, with the increase of the number of permanent magnet rotor poles, the maximum axial levitation force shows a trend from rise to decline and it eventually approaches the maximum axial levitation force of permanent magnet rotor for infinite length.

Keywords: radial HTS magnetic levitation bearing; levitation force; end-effect; FEM

0 引 言

高温超导磁悬浮轴承因其自稳定悬浮、低摩擦损失、真空兼容运行等优点,广泛应用于飞轮储能系统、低温液体泵^[1]等领域中。衡量高温超导磁悬浮轴承的首要性能参数是悬浮力特性。由于径向高温超导磁悬浮轴承轴向

长度有限且结构类似于圆筒直线电机,类比圆筒直线电机的端部效应对推力的影响^[2-5]。径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应对悬浮力特性的影响规律同样值得研究。

为简化超导磁悬浮系统的建模与仿真计算,通常会采用理想化的假设,认为超导体和永磁轨道无限长而忽略端部效应,研究系统结构参数对导向力特性的影响^[6]。

收稿日期: 2021-08-17 Received Date: 2021-08-17

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52177039)、河南省科技攻关项目、河南省高校基本科研业务费专项项目(NSFRF210316)、河南理工大学博士基金(B2020-20)项目资助

在对高温超导-永磁磁悬浮列车悬浮力和磁场分布进行解析计算时,通常忽略永磁轨道的端部效应^[7]。但超导-永磁悬浮系统的端部效应对悬浮力特性有较大影响,在采用二维仿真代替三维仿真直线超导磁悬浮轴承时,需考虑端部效应适当减小超导块轴向长度使得悬浮力的二维仿真同三维仿真结果保持一致^[8]。在研究径向高温超导磁悬浮轴承径向刚度的测量和计算方法时,理论上超导块间相互作用可以忽略,所有块材的径向刚度之和等于整个轴承的径向刚度。但是有时需要考虑永磁体两个端部磁场弱于中间磁场,即两个端部的刚度要低于中间部分刚度,因此整个径向高温超导磁悬浮轴承的刚度需要考虑端部效应并做相应的修正^[9]。此外,在分析由若干小尺寸块材代替大尺寸超导块材对悬浮力和导向力的影响时,其中包含着超导体分块带来的电流密度不连续性,即端部效应影响^[10]。在转子磁体或超导体非无限长时,二者相互作用受到边缘和几何效应的强烈影响,但并未针对该影响开展深入的探讨^[11]。类似的,径向高温超导磁悬浮轴承应当存在端部效应,但径向高温超导磁悬浮轴承的端部效应对悬浮力特性的影响规律并未得到详细分析。

为探索高温超导磁悬浮轴承的端部效应对悬浮力特性的影响规律,本文首先对超导-永磁系统的端部效应进行介绍。然后,基于磁场强度 H 公式,利用耦合边界法在 COMSOL 中建立径向高温超导磁悬浮轴承悬浮力计算的 2-D 轴对称模型。通过实验验证 2-D 有限元模型得到分析高温超导磁悬浮轴承悬浮力特性的理论工具。进而建立具有不同定、转子结构的径向高温超导磁悬浮轴承有限元模型,仿真分析超导定子分块引起的端部效应对超导体内电流密度分布和径向高温超导磁悬浮轴承轴向悬浮特性的影响;以及永磁转子长度(极数)有限引起的端部效应对气隙磁场分布及径向高温超导磁悬浮轴承轴向悬浮特性的影响。

1 超导-永磁系统的端部效应

在一个超导块多面作用的悬浮系统中,利用径向高温超导磁悬浮轴承超导定子的 3 个表面,即内表面、上表面和下表面,分别与永磁体作用可获得更大的悬浮力^[12]。实际上,只有内侧的永磁体作用时,超导体上、下两个表面也会与外场作用而产生感应电流分布,这种电流分布于上下两个端面一定的透入深度层内,如图 1(a) 所示。超导体轴向无限长时感应电流主要分布于内表面一定透入深度层内,如图 1(b) 所示。将轴向几何尺寸有限的超导体引起的超导体电流密度分布和电磁力等物理量的变化,称之为端部效应。

图 2 所示为超导体二维轴对称模型端部效应示意

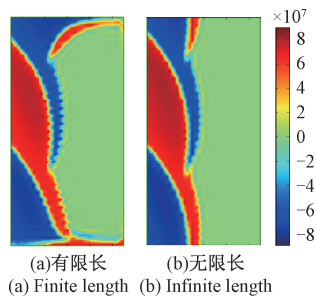


图 1 2-D 超导块相同区域内电流密度分布

Fig. 1 Current density distribution in the same area of 2-D superconducting bulk

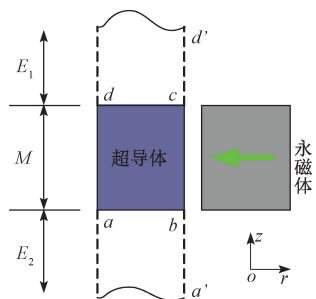


图 2 超导体 2-D 轴对称模型端部效应示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the end-effect of the superconductor 2-D axisymmetric model

图。根据上述超导体轴向长度有限长会引起端部效应,当只有内侧永磁体作用时,由于超导体对外磁场的屏蔽作用,使得表面 da 处于近零磁场区域且无感应电流分布。另外 3 个表面 ab 、 bc 、 cd 均受外场作用而产生感应电流分布,并产生端部效应影响下的悬浮力 F ,该悬浮力为中心区域作用力(主要为 bc 面)和端部区域作用力(主要为 ab 和 cd)之和:

$$F = F_m + F_e \quad (1)$$

式中: F_m 为中心区域作用力; F_e 为端部区域作用力。

当超导体轴向无限长时,可认为磁场作用区域和电流分布区域主要为表面 $a'd'$,即表面 $a'b$ 、 bc 、 cd' 。超导体无限长时的表面 $a'b$ 和 cd' 处的磁场与轴向有限长时端面 ab 和 cd 处的磁场不同,所以轴向两个端部区域产生的悬浮力 F_e' 与 F_e 大小应不同。故超导体轴向无限长即无端部效应时悬浮力 F' :

$$F' = F_m + F_e' \neq F \quad (2)$$

因此,超导体尺寸有限长引起的端部效应会使悬浮特性发生变化。类似于超导体轴向长度有限引起的端部效应,轴向长度(极数)有限的永磁体会引起径向高温超导磁悬浮轴承气隙磁场分布及轴向悬浮特性的变化,也可称为端部效应。

鉴于径向高温超导磁悬浮轴承呈二维轴对称结构,

在圆周方向为闭合回路结构而无端部。所以,径向高温超导磁悬浮轴承的永磁转子与超导定子轴向有限长引起的端部效应应当予以考虑。

2 基于 H 公式的建模与验证

2.1 径向高温超导磁悬浮轴承结构

径向型高温超导磁悬浮轴承主要包括超导定子与永磁转子两部分,如图 3 所示。超导定子由两个超导环轴向同轴叠加而成。由于超导材料制备工艺限制,该超导环由若干瓦片状 YBCO 超导块拼接而成。永磁转子由 3 块轴向磁化的环形 NdFeB 永磁体和 4 片具有高导磁性能的聚磁铁环构成。永磁环与聚磁铁环一一交叠排列放置,且永磁环同极性相对。表 1 为径向型超导磁悬浮轴承的主要设计参数。

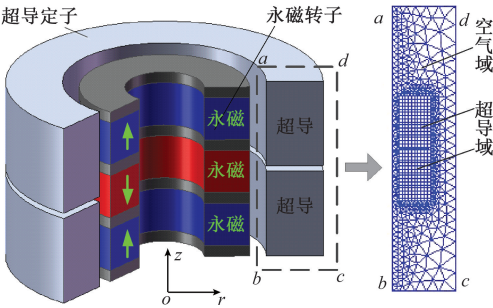


图 3 超导磁悬浮轴承的有限元模型

Fig. 3 The finite element model of superconducting magnetic bearing

表 1 径向型超导磁悬浮轴承的主要设计参数

Table 1 The main design parameters of radial superconducting magnetic bearings

项目/单位	数值
永磁转子/mm	36×20×8
超导定子/mm	64×42×16
定转子间隙/mm	3
聚磁铁环厚度/mm	2
永磁体剩磁密度/T	1.2
超导块轴向间隙/mm	1
超导体临界电流密度/(A·m ⁻²)	9.0×10 ⁷

2.2 磁场强度 H 公式建模

磁场强度 H 法已经广泛用于高温超导体电磁现象的模拟^[13-17]。采用磁场强度 H 法并利用 COMSOL 软件的移动网格接口建立的模型能够解决超导体与永磁体相对运动问题^[18-20]。但该方法涉及复杂运动体的移动网格剖分且仿真设置较为复杂。相比之下,基于磁场强度 H 法建模的耦合边界法能够避免复杂的移动网格设置且运

行速度较快^[15,21]。本文在数值仿真软件 COMSOL 的偏微分方程接口下,采用磁场强度 H 法建立如图 3 所示圆柱坐标系下超导定子的二维轴对称有限元模型,仅对矩形边界 abcd 内部区域进行求解,即超导体区域和附近的空气域进行网格剖分和数值求解。

根据 Maxwell 方程组的安培环路定理、法拉第电磁感应定律和电磁本构关系,可以得到矩形求解域 abcd 的约束方程:

$$\mu \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \times (\rho \nabla \times H) = 0 \tag{3}$$

式中:ρ 为电阻率,取空气的电阻率为 1 Ω/m;μ 为磁导率,认为求解域中磁导率均为真空磁导率,即 μ=4π×10⁻⁷ H/m。

忽略超导体临界电流密度的各向异性,认为超导体电阻率采用 Power-Law E-J 关系表示:

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} \tag{4}$$

其中 E_c=0.000 1 V/m,n=21,并由 Kim 模型(B₀=1 T,J_{c0}=9.0×10⁷ A/m²)考虑磁通密度 B 对临界电流密度 J_c 的影响:

$$J_c = \frac{J_{c0} \times B_0}{B + B_0} \tag{5}$$

指定气隙中的边界 $\overline{ab}$ 为谐波级数形式的磁场函数,来表征轴向移动的永磁转子产生的励磁磁场,避免超导定子与永磁转子间相对运动的复杂建模^[21]。因边界 $\overline{bc}$ 、 $\overline{cd}$ 和 $\overline{da}$ 距离永磁转子较远而几乎不受励磁磁场的影响,可近似认为狄利克雷磁绝缘边界条件。初始冷却磁场条件(场冷与零场冷)可通过设置偏微分方程接口的不同初始值实现。每个超导块材需要采用电流和为 0 的积分约束^[22]。根据洛伦兹公式实现径向超导磁悬浮轴承轴向悬浮力 F_z 的快速仿真计算:

$$F_z = 2\pi\mu_0 \int_s J_{sc} \cdot H_r \cdot r dS \tag{6}$$

式中:H_r 为超导域内合成磁场的径向分量;J_{sc} 为超导定子内的感应超导电流密度。通过软件 COMSOL Multiphysics 的积分组件耦合可以方便的实现对两个超导域的积分运算操作。

2.3 轴向悬浮力特性验证

场冷情况下,永磁转子初始位置对应超导定子中心,然后以 1 mm/s 的速度沿着轴向方向向上移动 10 mm,再返回初始位置。图 4 所示为不同时刻超导定子内电流密度分布情况。可以观察到场冷情况下,移动永磁转子时超导体内电流密度的分布情况与文献[23]在永磁轨道作用下超导体横向运动时,采用磁能最小化方法计算出的超导体内电流密度的分布情况基本一致,定性的表明

2.1 节建模方法的可行性。零场冷情况下,永磁转子初始位置位于超导定子中心下方 50 mm 处,然后以 1 mm/s 的速度沿着轴向方向向上移动 50 mm,再返回初始位置。图 5 所示为永磁转子运动时不同时刻的电流密度分布情况。可以观察到超导体产生的屏蔽电流主要分布在靠近永磁转子一侧,表现出一定的磁场屏蔽作用。

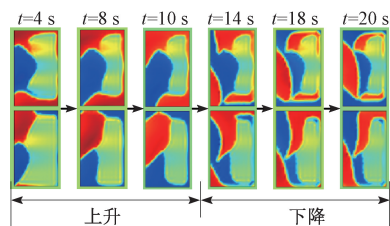


图 4 场冷情况下时刻 $t=4, 8, 10, 14, 18, 20$ s 时超导体感应电流密度分布

Fig. 4 Distribution of induced current density of superconductor at $t=4, 8, 10, 14, 18, 20$ s under cold field conditions

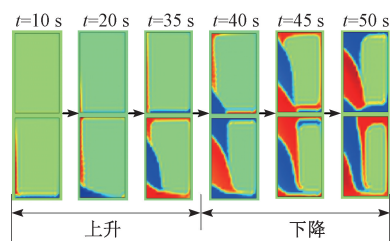


图 5 零场冷情况下 $t=10, 20, 35, 40, 45, 50$ s 时超导体感应电流密度分布

Fig. 5 Distribution of induced current density of superconductor at $t=10, 20, 35, 40, 45, 50$ s at zero field cold

图 6、7 所示分别为场冷与零场冷情况下轴向悬浮力-位移的关系,可以发现轴向悬浮力的理论计算与实验测量结果在场冷情况下较大位移(8~10 mm)处和零场冷情况下较小位移(-20~-10 mm)处存在一定误差。原因是轴向悬浮力计算有限元模型对边界条件的简化处理、超导块材临界电流密度的各向异性、永磁体磁化不均匀性及特性恶化等。但轴向悬浮力的理论计算结果与实验测量结果在变化趋势和数值大小方面吻合度较高,表明所述建模方法可以作为径向超导磁悬浮轴承轴向悬浮力的理论计算工具。

3 径向高温超导磁悬浮轴承端部效应分析

3.1 超导定子端部效应分析

为分析超导体有限长引起的端部效应对悬浮力的影响。假设永磁转子具有如图 3 所示的相同结构,分别建立 4 种具有不同超导定子结构的径向高温超导磁悬浮轴

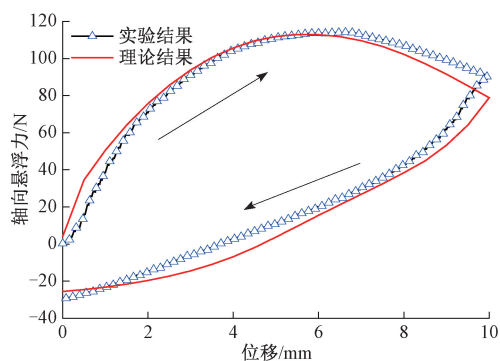


图 6 场冷情况下悬浮力-位移关系理论计算与实验测量对比

Fig. 6 Comparison of theoretical calculation and experimental measurement of levitation force-displacement relationship under cold field conditions

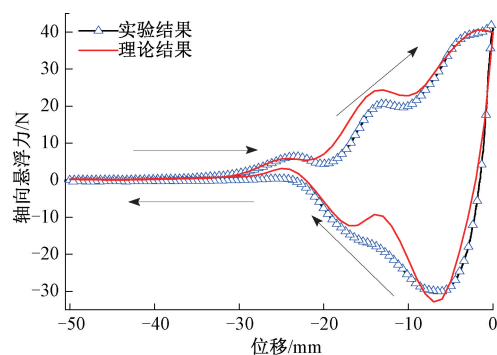


图 7 零场冷情况悬浮力-位移关系理论计算与实验测量对比

Fig. 7 Theoretical calculation and experimental measurement of levitation force-displacement relationship under the condition of zero field cold

承的有限元模型: CASE 1 为轴向无限长的超导定子、CASE 2 为单个超导环构成的超导定子、CASE 3 为两个超导环同轴叠加构成的超导定子、CASE 4 为 3 个超导环同轴叠加构成的超导定子。所有模型的超导环具有相同的径向宽度且 CASE 2、3、4 保持超导环的轴向长度之和相等。仿真分析轴向长度有限的超导定子引起的端部效应对超导定子电流密度分布和径向高温超导磁悬浮轴承轴向悬浮力特性的影响。

场冷情况下,径向高温超导磁悬浮轴承永磁转子从初始位置轴向移动 10 mm,再返回到初始位置时,4 种具有不同结构超导定子的感应电流密度分布情况如图 8 所示。可见,对于 CASE 1 无限长超导体内部,除了与永磁转子相对应的轴向范围内存在感应超导电流,在该轴向范围两端向外延伸一定距离范围内也存在感应超导电流。对 CASE 2、CASE 3 和 CASE 4,超导定子与永磁转子相等的轴向有限长度以及轴向分块,都因为存在端部开断而导致感应电流密度分布不连续。

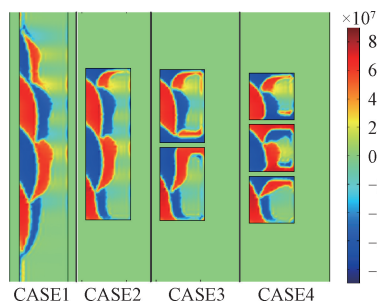


图 8 场冷情况下 4 种不同超导定子的感应电流密度分布

Fig. 8 Induced current density distribution of four different superconducting stators at under cold field conditions

场冷情况下,永磁转子从初始位置轴向移动 10 mm,再返回到初始位置时,4 种具有不同结构超导定子的径向高温超导磁悬浮轴承的轴向悬浮力-位移关系如图 9 所示。通过 CASE 1 和 CASE 2 的对比,发现无限长超导体对应的轴向悬浮力最大值为 124.8 N,而覆盖永磁转子长度的单块超导体悬浮力最大值较小,约为 116.6 N。表明超导体有限长引起的端部效应会减小轴承的悬浮力。通过 CASE 2、3 和 4 的对比,构成超导定子的超导体分块数量从单块、2 块到 3 块,轴承所达到的最大悬浮力值分别为 116.6、110、107.1 N,呈逐渐下降趋势。说明超导定子的轴向超导分块数量会直接影响悬浮力的产生,分块数量越多,存在的端部个数增加,其端部效应引起的悬浮力下降程度就越大。验证了文献[10]所述结论:单块超导体覆盖整个永磁转子能获得较大的悬浮力,若采用若干小块取代整块超导体,系统所获悬浮力会下降。

由于目前难以制备较大尺寸的 YBCO 超导块材,多数超导磁悬浮系统的超导体(包括超导磁悬浮轴承和超导磁悬浮车等)必须采用若干小尺寸超导块材拼接而成,这就限制了系统悬浮能力的提高。因此,可以考虑采用由足够数量超导带材构成的大尺寸堆叠来替代超导块材用于磁悬浮系统,如此可获得较大的超导感应电流环及悬浮力。

3.2 永磁转子端部效应分析

径向高温超导磁悬浮轴承的轴向悬浮力大小和变化规律与磁通密度的轴向变化梯度和幅值大小密切相关^[24]。因此,分析永磁转子轴向长度(极数)有限引起的端部效应对气隙磁场分布的影响至关重要。分别建立 4 个具有相同结构尺寸超导定子(图 3 中超导定子由两层超导环同轴叠加)、不同长度(极数)永磁转子的径向高温超导磁悬浮轴承二维轴对称有限元模型,4 种不同长度(极数)的永磁转子包括 CASE 1 为 3 层永磁环、CASE 2 为 5 层永磁环、CASE 3 为 7 层永磁环、CASE 4 为轴向无限长的永磁转子(以远大于超导定子轴向尺寸的 13 层永磁环来模拟),仿真分析永磁转子端部效应对径向高温

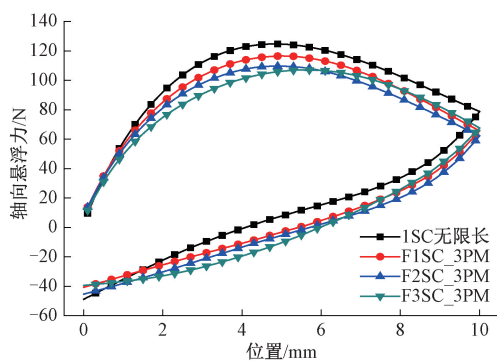


图 9 4 种不同超导定子情况下的轴向悬浮力-位移关系

Fig. 9 The axial levitation force-displacement relationship of four different superconducting stators

超导磁悬浮轴承气隙磁场分布和轴向悬浮力的影响。

图 10 所示为 4 种轴向长度(极数)不同的永磁转子产生的磁通密度径向分量 B_r 分布。可见在与超导定子相对应的中间区域,4 种不同极数的永磁转子产生的磁通密度径向分量 B_r 基本保持一致。然而,在两个端部区域,4 种不同极数永磁转子产生的 B_r 则有明显区别。图 11(a)、(b)所示为 4 种不同极数永磁转子在左、右两个端部区域的磁场径向分量。对比发现左右两个端部区域的 B_r 幅值由大到小分别对应为 5 层永磁转子、无限长永磁转子、7 层永磁转子和 3 层永磁转子。表明随着永磁转子极数的增加,其端部区域磁通密度径向分量先增大后减小,且最终趋近于无限长永磁转子的周期性分布。因此,适当调整永磁转子轴向极数大于超导定子,永磁转子端部区域的磁通密度径向分量幅值会有所增加。

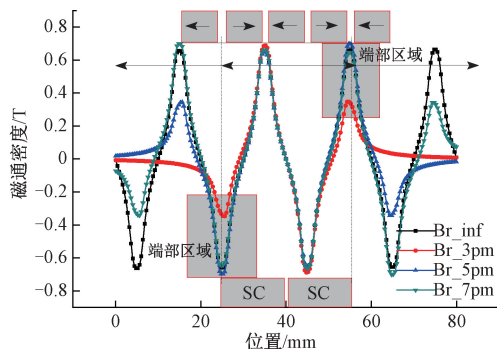
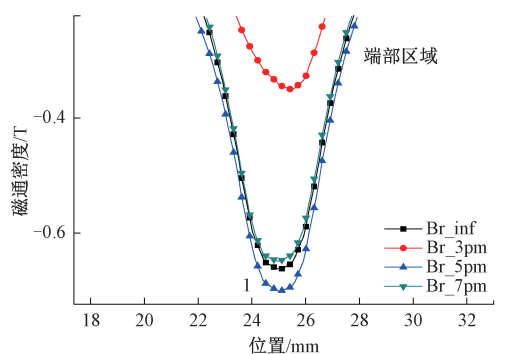


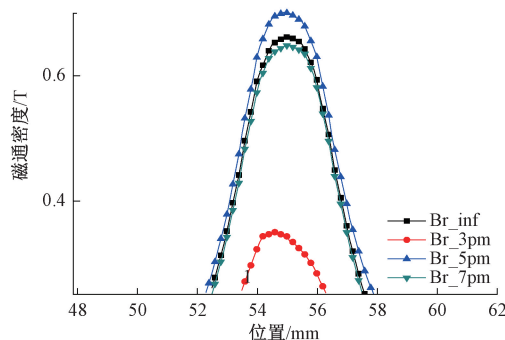
图 10 4 种不同长度(极数)永磁转子的磁场径向分量

Fig. 10 The radial magnetic field components of four permanent magnet rotors with different lengths (poles)

图 12 所示为场冷条件下,4 种不同长度(极数)永磁转子情况下超导磁悬浮轴承的轴向悬浮力-位移关系。尽管 4 种情况下轴向悬浮力随位移的变化规律基本一致,但获得的最大悬浮力值有所不同,由大到小分别为 5 层永磁转子(140.8 N)、无限长永磁转子(132.1 N)、7 层



(a) 左端磁场径向分量
(a) Radial component of the magnetic field in the left end region



(b) 右端磁场径向分量
(b) Radial component of the magnetic field in right end region

图 11 不同长度(极数)永磁转子的端部区域磁场径向分量

Fig. 11 Radial components of the magnetic field in the end region of permanent magnet rotors with different lengths (poles)

永磁转子(130.8 N)和3层永磁转子(110 N)。这是由于永磁转子相对超导定子运动时,除超导定子与永磁转子磁场耦合对应的中间区会产生大部分悬浮力之外,两个端部区域的磁场作用于超导定子也会对悬浮力产生影响,而4种不同极数永磁体转子端部区域的磁场不同结果导致所产生轴向悬浮力大小的不同。

结果表明随着永磁转子极数的增加,轴向悬浮力最大值有先增大后减小的趋势,且最终趋近于永磁转子无限长时的轴向悬浮力最大值。轴向悬浮力最大值大小与端部区域磁通密度径向分量幅值呈正相关规律。

由图 12 可见,永磁转子长度(极数)有限引起的端部效应对悬浮力最大值的影响较大,5层永磁转子(140.8 N)比3层永磁转子(110 N)的悬浮力最大值提高超过 20%。在空间和成本允许的情况下,实际应用中超导磁悬浮轴承的永磁转子长度(极数)不仅要考虑到与超导定子耦合轴向长度,还应该适当的增加永磁转子长度(极数),以通过端部效应增加端部区域磁通密度径向分量,进一步提高悬浮力的大小。

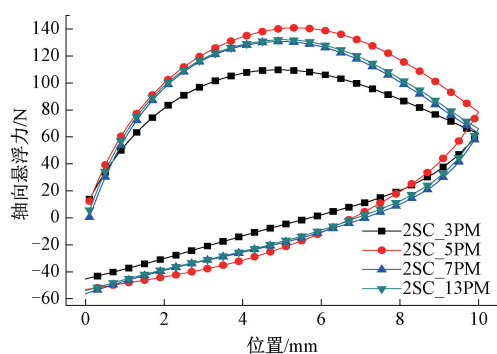


图 12 场冷条件下 4 种不同永磁转子的轴向悬浮力-位移关系(初始位置 $z=6$ mm)

Fig. 12 The axial levitation force-displacement relationship of 4 different permanent magnet rotors under field cooling conditions (initial position $z=6$ mm)

4 结 论

本文针对径向高温超导磁悬浮轴承的超导定子与永磁转子轴向长度有限引起的端部效应会影响其轴向悬浮特性。提出一种基于 H 公式的二维有限元建模方法,作为分析端部效应对径向高温超导磁悬浮轴向悬浮特性影响的理论工具。仿真分析了超导定子无限长与分块对超导定子电流密度分布情况与径向高温超导磁悬浮轴承轴向悬浮特性的影响;及永磁转子极数不同对气隙磁场分布与轴向悬浮特性的影响。得到以下结论,超导定子轴向有限长度以及轴向分块引起的端部效应,不仅使得超导定子内电流密度分布不连续,而且会使得径向高温超导磁悬浮轴承悬浮特性随着分块数量的增加不断恶化。永磁转子极数有限使得端部区域的磁通密度分布发生较大变化。随着永磁转子极数的增加,其端部区域磁通密度径向分量先增大后减小,且最终趋近于无限长永磁转子的周期性分布。永磁转子极数有限引起的端部效应对轴向悬浮力最大值的影响较大。随着永磁转子极数的增加,轴向悬浮力最大值先增加后降低且最终趋近于永磁转子无限长时的悬浮力最大值。此外,轴向悬浮力最大值大小与端部区域磁通密度径向分量幅值呈正相关规律。

参考文献

- [1] 艾立旺,张国民,靖立伟,等. 超导体在低温液体泵中的应用研究与发展现状[J]. 低温与超导, 2021, 49(2): 32-43.
AI L W, ZHANG G M, JING L W, et al. Application research and development status of superconductors in cryogenic liquid pumps [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2021, 49(2): 32-43.
- [2] 齐晓东,高锋阳,李晓峰,等. 表贴式永磁同步电机新

- 型偏心磁极优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 93-100.
- QI X D, GAO F Y, LI X F, et al. Optimal design of a new eccentric magnetic pole of surface-mounted permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 93-100.
- [3] 赵国新,王超,刘华. 圆筒永磁直线电机设计及推力波动研究[J]. 微电机, 2017, 50(11): 6-9.
- ZHAO G X, WANG CH, LIU H. Design of cylindrical permanent magnet linear motor and Research on thrust fluctuation [J]. Micromotors, 2017, 50(11): 6-9.
- [4] 巫春玲,程琰清,刘智轩,等. 一种永磁同步电机系统效率优化控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(10): 36-41.
- WU CH L, CHENG X Q, LIU ZH X, et al. Research on an efficiency optimization control strategy of permanent magnet synchronous motor system [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(10): 36-41.
- [5] 周达,张博,牟明川. 非奇异终端滑模控制永磁直线同步电机[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 84-87.
- ZHOU D, ZHANG B, MOU M CH. Non-singular terminal sliding mode control permanent magnet linear synchronous motor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(10): 84-87.
- [6] DIAS D H N, SOTELO G G, DE ANDRADE R. Study of the lateral force behavior in a field cooled superconducting linear bearing [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1533-1537.
- [7] BOUGHRARA K, IBTIOUEN R. Magnetic field distribution and levitation force calculation in HTSC-PMG maglev vehicles [J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2013, 55: 63-86.
- [8] QUÉVAL L, SOTELO G G, KHARMIZ Y, et al. Optimization of the superconducting linear magnetic bearing of a maglev vehicle [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3): 1-5.
- [9] LIN Q X, WANG W J, DENG Z G, et al. Measurement and calculation method of the radial stiffness of radial high-temperature superconducting bearings [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, 28(6): 1681-1685.
- [10] DEL-VALLE N, SANCHEZ A, NAVAU C. Towards an optimized magnet-superconductor configuration in actual maglev devices [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1469-1472.
- [11] WERFEL F N, FLOEGEL-DELOR U, RIEDEL T, et al. Large-scale HTS bulks for magnetic application [J]. Physica C Superconductivity, 2013, 484(1): 6-11.
- [12] SIVRIOGLU S, BASARAN S, YILDIZ A S. Multisurface HTS-PM levitation for a flywheel system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(8): 3603206.
- [13] ARSENAULT A, SIROIS F, GRILLI F. Implementation of the H-phi formulation in COMSOL multiphysics for simulating the magnetization of bulk superconductors and comparison with the H-formulation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(2): 1-11.
- [14] GUAN X, ZOU Y C, SHANG J, et al. Numerical study on the model of HTS bearing by coupling the magnetic scalar potential and magnetic field intensity [J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2020, 578: 1353752.
- [15] 杨文姣,刘坤,马光同. 基于磁场强度的高温超导磁悬浮轴承数值仿真方法[J]. 低温物理学报, 2017, 39(5): 26-32.
- YANG W J, LIU K, MA G T. Numerical simulation method of HTS magnetic bearing based on magnetic field strength [J]. Journal of Cryogenic Physics, 2017, 39(5): 26-32.
- [16] 杨文姣,马光同,LOIC Q,等. 基于三维多物理场强耦合模型的超导磁悬浮振动特性[J]. 科学通报, 2019, 64(31): 3255-3266.
- YANG W J, MA G T, LOIC Q, et al. Vibration characteristics of superconducting magnetic levitation based on 3-D multi-physics strong coupling model [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(31): 3255-3266.
- [17] ZHENG J, HUANG H, ZHANG S, et al. A general method to simulate the electromagnetic characteristics of HTS maglev systems by finite element software[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(5): 1-8.
- [18] GUAN X, ZOU Y C, SHANG J, et al. Calculation of radial force of radial HTS magnetic bearing [J]. Cryogenics, 2021, 116: 103284.
- [19] FRANCESCO G, ANTONIO M, FEDERICA D S, et al. Dynamic modeling of levitation of a superconducting bulk by coupled H-magnetic field and arbitrary Lagrangian-Eulerian formulations [J]. Superconductor science & technology, 2018, 31(12): 125003.
- [20] YILDIZ A S, SIVRIOGLU S. Superconducting levitation analysis of a flywheel system using H-formulation [J].

Physica C: Superconductivity and its Applications, 2019, 561: 64-70.

- [21] AI L W, ZHANG G M, JING L W, et al. Dynamic levitation behavior of a radial-type SMB under axial load condition [J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2020, 575: 1353671.
- [22] 陈楠, 陈洋, 孙睿雪, 等. 高温超导-永磁混合悬浮车基本系统的理论模型与实验[J]. 科学通报, 2020, 65(9): 847-855.
- CHEN N, CHEN Y, SUN R X, et al. Theoretical model and experiment of the basic system of HTS-permanent magnet hybrid levitation vehicle [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(9): 847-855.
- [23] NAVAU C, DEL-VALLE N, SANCHEZ A. Macroscopic modeling of magnetization and levitation of hard type-II superconductors: The critical-state model [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(1): 8201023.
- [24] JIANG J, GONG Y M, WANG G, et al. Levitation forces of a bulk YBCO superconductor in gradient varying magnetic fields [J]. International Journal of Modern Physics B, 2015, 29(25): 1542047.

作者简介



艾立旺, 2019 年于中国科学院大学获博士学位, 现为河南理工大学电气工程与自动化学院讲师, 主要研究方向为直线电机理论及应用、超导磁悬浮、新型电磁直驱装备技术。

E-mail: ailiwang1009@163.com

Ai Liwang received Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2019. Now he is a lecturer in Henan Polytechnic University. His main research interests include linear motor theory and application, superconducting magnetic levitation and new electromagnetic direct drive equipment technology.



苗森, 2020 年于许昌学院获得学士学位, 现为河南理工大学硕士研究生, 主要研究方向为超导磁悬浮与新型电磁直驱装备技术。

E-mail: hpumiaosen@163.com

Miao Sen received B. Sc. degree from Xuchang University in 2020. Now he is a M. Sc. candidate at Henan Polytechnic University. His main research interests include superconducting magnetic levitation and new electromagnetic direct drive equipment technology.