

空间高频交变磁场对超导块材悬浮力影响研究^{*}

任晓晨¹, 刘伟^{1†}, 庞鹏¹, 修仕全², 荆海莲¹, 陆勤龙³,
李庭筠¹, 张雨潇¹, 周星宇¹, 谭玄¹, 韩璐琦¹

1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610031

2. 北京美尔斯特科技发展股份有限公司, 北京 101500

3. 中国电子科技集团公司第十六研究所, 合肥 230043

收稿日期: 2019-04-25; 接收日期: 2019-09-17

【摘要】 高温超导磁悬浮装置, 如磁悬浮列车和磁悬浮轴承在高速运行时, 空间磁场交变及不均匀性扰动会引发超导块材内部损耗并影响性能, 传统均匀时变磁场实验研究及仿真模拟无法满足实际工程应用情况. 本文通过设计不同永磁阵列得到不同波形, 在高速系统驱动下得到不同交变频率下超导块材损耗特性, 发现全波型损耗较半波型损耗高, 并研究了不同磁场构型悬浮力衰减特性, 可为高速超导磁浮应用提供实验依据.

关键词: 高温超导, 磁悬浮, 交变磁场, 悬浮力, 损耗

PACS: 7400

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.05.005

Effect of Space High Frequency Alternating Magnetic Field on Levitation Force of Superconducting Bulk

REN Xiaochen¹, LIU Wei^{1†}, PANG Peng¹, JING Hailian¹, LI Tingyun¹,
ZHANG Yuxiao¹, ZHOU Xingyu¹, TAN Xuan¹, HAN Luqi¹

1. College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610031

2. Beijing Milestone Technology Development Co., Ltd., Beijing 101500

3. Electronic Technologies, CETC16, Hefei 230043

Received date: 2019-04-25; accepted date: 2019-09-17

【Abstract】 High temperature superconducting magnetic levitation devices, such as magnetic levitation trains and magnetic levitation bearings, can cause internal loss and affect the performance of superconducting blocks due to the alternation of space magnetic field and non-uniform disturbance. Traditional uniform time-varying magnetic field experimental research and simulation can not meet the actual engineering application. In this paper, different waveforms are obtained by designing different permanent magnet arrays, and the loss characteristics of superconducting bulk materials at different alternating frequencies are obtained under the drive of high-speed system. It is found that the full-wave loss is higher than the half-wave loss. The levitation force attenuation characteristics of different magnetic field configurations are studied, which can provide experimental basis for the application of high-speed superconducting magnetic levitation.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:51407015)、新型超导飞轮储能技术研究(批准号:61407210204)和成都理工大学中青年骨干教师培养计划(批准号:10912-2019JX08-00259)资助的课题.

[†] tonny-violet@163.com

Keywords: High temperature superconductivity, Maglev, Alternating magnetic field, Levitation force, Loss

PACS: 7400

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.05.005

Reference method: REN Xiaochen, LIU Wei, PANG Peng, JING Hailian, LI Tingyun, ZHANG Yuxiao, ZHOU Xingyu, TAN Xuan, HAN Luqi, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0355 (2019)

1 引言

高温超导无需主动控制即可实现稳定悬浮,其中第二类超导体的高临界电流与磁通钉扎效应,被较多的应用在磁悬浮列车、高速磁悬浮轴承等领域^[1-2].但是无论是磁悬浮列车还是轴承,由于现今永磁体与超导块材制备技术的限制,不能够制出较大的永磁单体,均需采用拼接结构,所以必然存在接缝与间隙,导致表面磁场不均匀产生波动性、周期性变化的类似于交流磁场,或存在拼接失误导致的永磁体极性颠倒产生的大梯度磁场,均会对超导磁悬浮列车或轴承产生影响^[3-5].超导块材在交变磁场下会产生较大的磁滞损耗^[6],此方面的研究大多集中于采用空心电磁线圈产生的时变电磁场的损耗及导向力研究,但是基于不同磁场构型的空间大波动磁场的悬浮力研究较少.针对工程应用中的磁悬浮系统,由于工况条件及铺设质量的不同,对磁悬浮系统的运行也存在较大影响,因此有必要对不同永磁排列的悬浮特性进行研究.通过铺设较长永磁轨道成本较高,利用专门的实验装置实现车轨的相对运动来研究高温超导磁悬浮系统的动态悬浮特性,用闭合曲线轨道运动模拟真实运行,这样在最大程度上减小研究成本的同时也取得可靠的实验数据^[7],如西南交通大学设计的 SCML-03 单峰对顶式实验装置.本文所设计的永磁阵列转盘可以将永磁体隔开,对单块永磁体极性设置以得到不同磁场构型,得到了场冷条件下不同构型及频率下的悬浮力曲线,分析了各构型悬浮特性.

2 实验装置及流程

本文的实验在自行研发的高速装置上进行,实物如图 1 所示,测试系统主要由高速电机、永磁阵列转盘、低温杜瓦、悬浮力测试模块、块材夹持及位置检测装置等组成,超导块材被固定在环氧块材夹持装置中,可在永磁阵列转盘上方 2~30 mm 任意位置调节高度.超导块材为德国 ATZ 公司生产的三籽晶 YBCO 块材,尺寸为 64×32×12 mm;永磁阵列如图 2(a)所示,由 10 块弧形 N52 永磁体组成,采用轴向充磁,可对永磁块任意设置极性以满足实验需要,本实验设置了三种典型磁场构型如图 2(b)、(c)、(d)所示,将其命名为 N-N-N、N-N-S、N-S-N,用高斯计测量永磁体中心位置处磁场垂直分量 B_z

的分布,在 4 mm 高度处的磁场分布如图 3 所示.

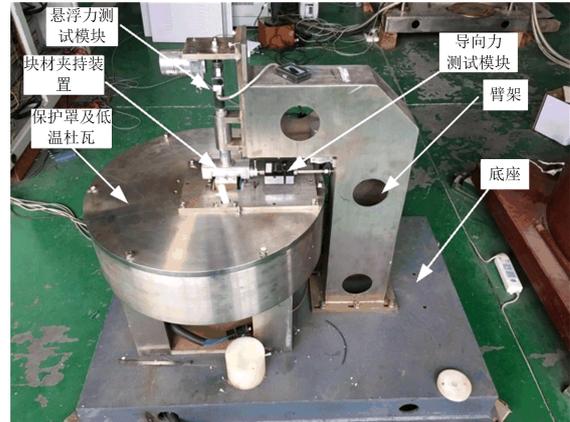


图 1 实验装置

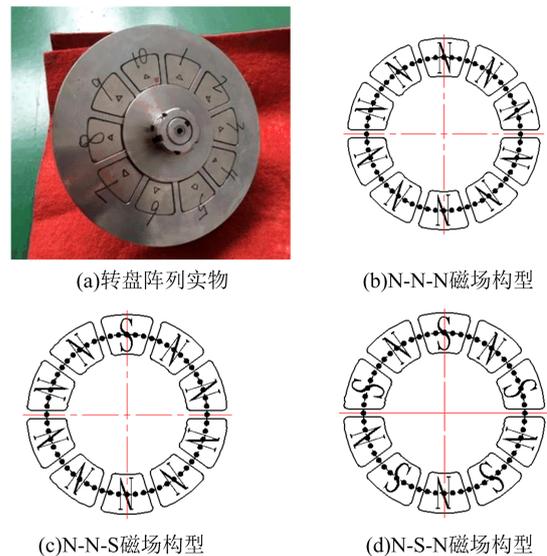


图 2 转盘实物及永磁阵列采样点

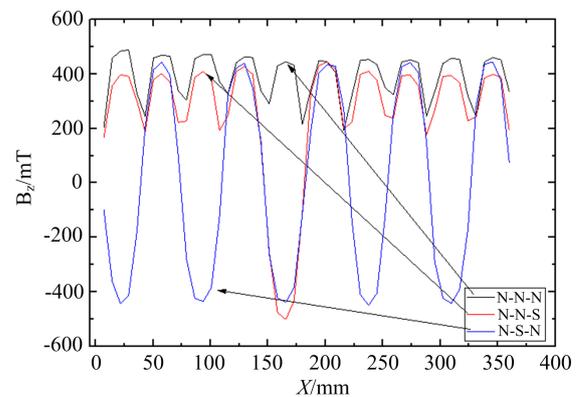


图 3 磁场垂直分量 B_z 扫描结果(测试高度 4 mm)

由磁场测量结果可知,N-S-N 磁场构型 B_z 值正负交替出现,磁力线为闭合特征,呈现明显的正弦特

性,本文中称为全波型磁场,N-N-N 磁场构型的 B_z 值全部为正,磁力线为发散特征,本文中称为半波型磁场,N-N-S 磁场构型兼具 N-N-N 与 N-S-N 模式的特征,本文中称为半波-全波复合型磁场.对于不同磁场构型,N-N-N 模式模拟永磁机构同向磁块拼接处较大缝隙,N-N-S 模式模拟同向磁块拼接其中一块缺失或断裂,N-S-N 模式模拟磁块 N、S 极性周期排列或该段内磁块大量断裂.

将超导块材在永磁体上方进行场冷却,场冷高度为 20 mm,冷却块材 15 分钟后下降块材至距永磁体 4 mm,经过 5 分钟弛豫,通过改变电机的转速以调节交变磁场的频率进行悬浮力测试,超导块材下降时始终与永磁体保持竖直状态.

3 实验结果与讨论

在 N-N-N 模式下,已有许多研究,如西南交通大学的刘敏贤研究了此模式的悬浮力特性^[5],计常伟研究了在此模式永磁轨道上方黏贴铁片时悬浮力的波动^[8].本文实验 N-N-N 模式悬浮力衰减如图 4 所示.

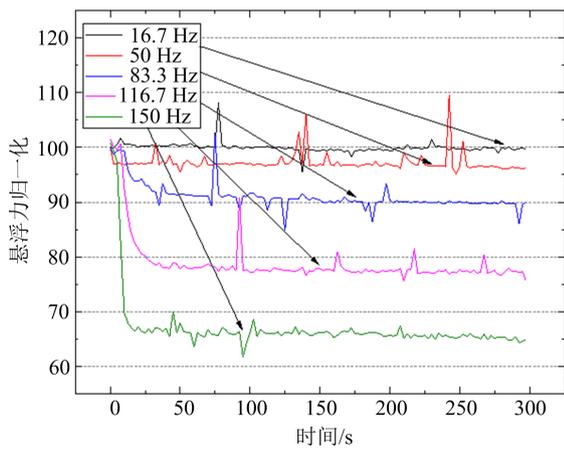


图 4 场冷高度 20 mm、测试高度 4 mm
N-N-N 模式悬浮力衰减

由图 4-6 可知,在不同模式下,交变磁场的频率增加悬浮力减小,这主要是磁通线穿入与穿出钉扎中心的次数增加,钉扎力产生的磁滞损耗增加,超导块材为不良导体,因损耗产生的热量无法及时释放在块材内部积聚,导致块材内部迅速升温,临界电流密度下降^[9-11],所以损耗集中在初始阶段,悬浮力表现为在转盘启动初期迅速减小,在块材内部热量与液氮热交换平衡时,块材温度不再上升,临界电流

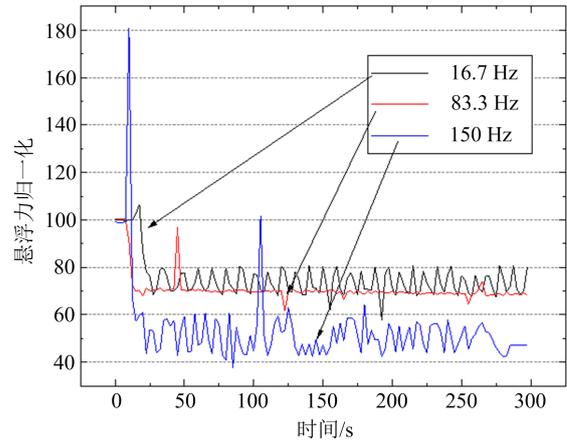


图 5 场冷高度 20 mm、测试高度 4 mm
N-N-S 模式悬浮力衰减

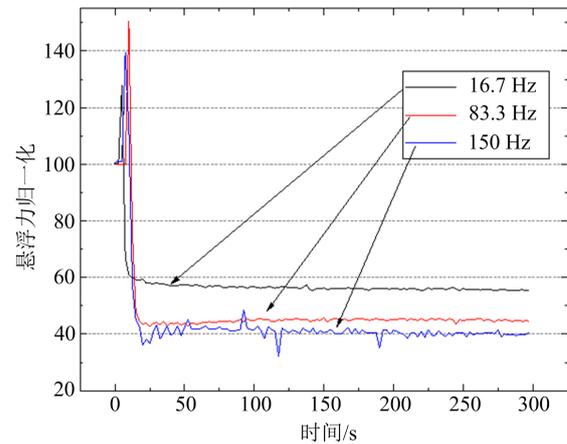


图 6 场冷高度 20 mm、测试高度 4 mm
N-S-N 模式悬浮力衰减

密度趋于稳定,悬浮力不再减小.

表 1 悬浮力稳定时间及衰减值

磁场构型	频率/Hz	稳定时间/s	悬浮力 衰减值/N
N-N-N	16.7	—	0.4
	83.3	200	10
	150	25	36
N-N-S	16.7	∞	20
	83.3	25	32
	150	∞	53
N-S-N	16.7	7.5	45
	83.3	10	55
	150	12.5	60

由表 1, N-N-N 模式在 16.7 Hz 交变磁场下悬浮力基本没有衰减, 大于 16.7 Hz 的悬浮力稳定时间随交变频率增加减小; N-N-S 模式比 N-N-N 模式悬浮力衰减更快, 均在 30 s 内完成衰减过程, 这是由于此构型的磁场前期引起了更大的损耗, 30 s 后低频与高频交变频率悬浮力呈现正弦波动, 可能是由于单一正弦全波闭合磁场引起; N-S-N 模式悬浮力均在 20 s 内趋于稳定, 即此模式的损耗为三种模式中最大, 这是由于块材在单位时间内经历的磁场梯度变化量比 N-N-S 模式多, 所以悬浮力衰减更快.

第二类超导体的交流损耗的理论模型为表面电流和体电流两者都存在的情况, 本实验所使用超导块材主要为体损耗. 根据 Bean-London 交流损耗模型^[12], 假设超导体内电流 J_c 流动均匀, 并假定该 J_c 与磁场无关, 对于平行于板状试样表面的情况, 简单的得到单位表面积的能量损耗 $P(W/m^2)$ 与 J_c 和频率 f 有如下关系:

$$P = \frac{2fB^3}{3\mu_0 J_c} \quad (1)$$

式中 B 为永磁铁表面磁感应强度峰值, f 为交变磁场频率, μ_0 为真空磁导率.

N-N-S 与 N-S-N 模式在转盘启动前期会出现悬浮力陡增与陡降, 例如 0~5 s 时有快速上升, 这是由于 N-N-N 模式转盘表面竖直磁场分量幅值在 200 mT~500 mT 且无全波型磁场构型, 而 N-N-S 与 N-S-N 模式均有全波型磁场构型, 即^[8]:

$$F = \int_v J_c \times B dV \quad (2)$$

F 为悬浮力, J_c 为临界电流密度, B 为磁通密度, V 为超导块内磁力线穿透体积. 公式两边先对体积进行求导, 再对时间进行求导可得超导体所受悬浮力密度:

$$\frac{df}{dt} = K \cdot J_c \times \frac{dB}{dt} \quad (3)$$

其中 K 为与临界电流密度有关的系数, 则 $\frac{df}{dt}$ 表示

悬浮力密度随时间变化率, $\frac{dB}{dt}$ 表示磁通密度随时

间变化率, $\frac{dB}{dt}$ 迅速变化, 悬浮力密度也迅速变化, 悬浮力在此处即表现为陡增陡降, 可以利用此原理设计脉冲式磁悬浮应用系统.

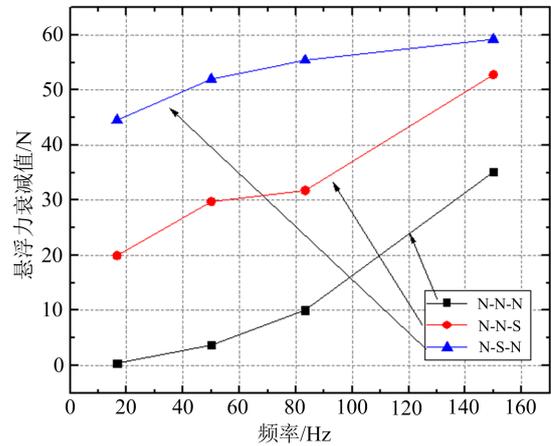


图 7 不同模式悬浮力衰减对比

由图 7 可知, N-N-N 模式悬浮力前期衰减较小, 幅度随频率增加衰减更大; N-S-N 模式悬浮力前期衰减较大, 但随着频率增加, 悬浮力衰减值增加缓慢; N-N-S 衰减幅度介于 N-N-N 与 N-S-N 模式之间. 三种模式在更高频率段 (>150 Hz) 悬浮力衰减值可能有交叉, 需要进一步实验研究才能验证.

4 结 论

本文通过设置不同磁场构型, 实验测试了交变磁场对超导块材悬浮力的影响, 实验结果表明, 悬浮力在不同磁场构型下, 悬浮力大幅衰减主要出现在实验初始阶段, 半波型磁场超导块材损耗较少, 悬浮力衰减较小, 衰减时间随频率增加减少, 可用作磁悬浮轨道的铺设; 全波型磁场能够引起较大的损耗, 悬浮力在低频段衰减显著, 中频阶段衰减即大于 50%, 半波全波复合型磁场部分频率在衰减完成后悬浮力不稳定, 导致磁悬浮系统出现振动, 即全波与全波半波复合磁场构型不利于磁悬浮系统的运行, 应避免磁力线闭合特征磁场构型出现在工程应用中.

参 考 文 献

- [1] F Hellman, E M Gyorgy, D W Johnson, H M Obryan, R C Sherwood, *Journal of Applied Physics*, **63**(1988),447.
- [2] J Wang, M M Yanoviak, R Raj, *J. Am. Ceram. Soc.*, **72** (1989),846.
- [3] Z Ren, J Wang, S Wang, J He, X Shen, *Physica C*, **378** (2002),873.
- [4] L Zhang, J Wang, Q He, J Zhang, S Wang, *Physica C*, **459** (2007),33.
- [5] 刘敏贤 2009 博士学位论文 (成都:西南交通大学)
- [6] A N Terentiev, H J Lee, C J Kim, G W Hong, *Physica C*, **290**(1997),291.
- [7] 邓自刚 2009 博士学位论文 (成都:西南交通大学)
- [8] 计常伟 2018 硕士学位论文 (成都:西南交通大学)
- [9] G A Shams, J W Cochrane, G J Russell, *Physica C*, **356** (2001),176.
- [10] D Buzon, L Porcar, P Tixador, D Isfort, R Tournier, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **13**(2003),2076.
- [11] C P Bean,*Rev. mod. phys.*, **36**(1964),886.
- [12] 金建勋 2015 高温超导技术与应用原理 (成都:电子科技大学出版社)第 115 页.