

# 空芯大气隙高温超导直线电机电磁力实验研究<sup>\*</sup>

谢蓬阳<sup>1,2</sup>, 顾霄航<sup>3</sup>, 王潇飞<sup>2</sup>, 董博文<sup>3</sup>, 刘康<sup>1†</sup>

1. 牵引动力国家重点实验室(西南交通大学), 四川成都 610031;

2. 西南交通大学力学与工程学院, 四川成都 610031;

3. 西南交通大学电气工程学院, 四川成都 610031

收稿日期: 2019-04-02; 接收日期: 2019-10-08

**【摘要】** 直线电机是一种无需中间传动装置而直接将电磁力转换为线性运动的特种电机, 在交通运输领域具有广泛的应用前景. 将高温超导技术与电机理论相结合, 能够有效利用超导材料的强载流能力与高场特性提高直线电机的输出能力. 本文提出了一种应用于超导磁悬浮列车牵引的空芯高温超导直线电机, 首先建立空芯高温超导直线电机的二维有限元模型对电机结构参数进行初步探索, 并完成了超导直线电机样机的设计与制作. 通过搭建实验测试平台完成了空芯高温超导直线电机定子磁场和电磁力的实验测试. 有限元计算结果与实验数据有较好的一致性, 验证了模型的有效性, 并利用该模型研究了定子电流, 超导线圈电流以及电机气隙对电机推进力输出的影响. 本文的相关成果将促进超高速磁浮交通领域关键驱动技术的研究与发展.

**关键词:** 直线电机; 高温超导; 电磁力; 空芯; 轨道交通

**PACS:** 74. 20. -z, 74. 25. -q, 74. 25. Nf, 74. 90. +n

**DOI:** 10. 13380/j. ltpl. 2019. 04. 006

## Experimental Study on Electromagnetic Force of Air-cored High Temperature Superconducting Linear Motor with Large Air Gaps

XIE Pengyang<sup>1,2</sup>, GU Xiaohang<sup>3</sup>, WANG Xiaofei<sup>2</sup>, DONG Bowen<sup>3</sup>, LIU Kang<sup>1†</sup>

1. State Key Laboratory of Traction Power (Southwest Jiaotong University), Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

2. School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China

Received date: 2019-04-02; accepted date: 2019-10-08

**【Abstract】** Linear motor could convert the electromagnetic force directly into linear movement without any transmission devices that it has wide application in the field of transportation. The nice current-carrying capacity and ideal characteristic in high field of the material would improve the output capability of the linear motor through combining the high temperature superconducting technology with motor theory. A kind of air-cored HTS linear synchronous motor, which is potentially used in HTS maglev system was put forward in this paper. A two-dimensional finite element model of the linear motor was established when designing the structure parameters of it, a prototype was manufactured. The magnetic field and electromagnetic force was measured through the experimental test platform constructed in this work. Finite element calculation result has good agreement with the experimental data that verified the validity of the model. The influence of the air gap and the current in the stator

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目, 非接触电磁耦合(51722706)资助的课题.

<sup>†</sup> kangliujd@163.com

and the superconducting coil on the output of motor was investigated by simulation. The results of this article will promote the research and development of key driving technologies in the field of ultra-high-speed maglev transportation.

**Keywords:** Linear motor, HTS; electromagnetic force, air-cored, rail transportation

**PACS:** 74.20.-z, 74.25.-q, 74.25.Nf, 74.90.+n

**DOI:** 10.13380/j.ltpl.2019.04.006

**Reference method:** XIE Pengyang, GU Xiaohang, WANG Xiaofei, DONG Bowen, LIU Kang, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0284 (2019)

## 1 引言

直线电机是一种不需要中间转换设备就可以把电能转变成直线运动机械能的传动装置,具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>.其机械结构简单,具有高速、高效率、工作安全可靠等特点.超导直线电机的相关研究是高速磁浮交通的核心,其设计与制造技术也是直线驱动领域的研究热点.

由于超导绕组能够负载远大于常规铜线的电流密度,因此超导直线电机的功率因数和推力密度相比与传统的直线电机有很大的应用优势.本文立足于高速磁浮交通发展的大背景,将高温超导技术与电机理论相结合,基于超导材料的强载流能力与高场特性,将传统直线电机的动子部分替换为高温超导线圈.同时定子采用了无铁芯结构,能够有效提升电机的电磁力输出特性,避免由于高次谐波干扰,齿槽效应以及铁芯饱和导致的推力波动等问题.高温超导磁体的强载流能力也将有效提升超导直线电机的工作气隙,可以实现牵引系统在大气隙条件下仍能保持较高的功率因数和效率.同时高温超导带材理想的机械与力学特性也能够保障和提升系统的运行稳定性.

## 2 空芯高温超导直线电机的设计与制作

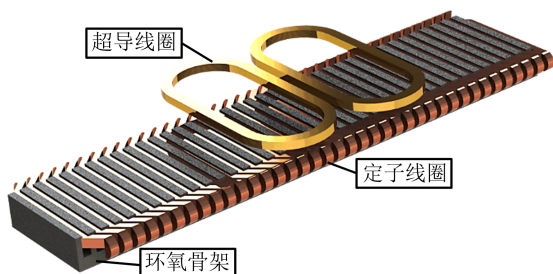


图1 电机结构

### 2.1 空芯高温超导直线电机结构设计

空芯高温超导直线电机的实际结构主要包括初级定子和次级动子两部分,如图1所示.其中电机的定子部分用环氧骨架支撑,将有效避免传统硅钢材质的铁芯结构造成的法向吸引力过大,铁芯饱和,电磁力脉动等问题,铜绕组以双层叠绕的形式嵌入骨架的齿槽中.电机的次级是由YBCO涂层带材绕制的跑道形高温超导线圈磁体.超导磁体励磁后产生的磁场称为励磁磁场,定子绕组产生的磁场称为行

波磁场,两者相互作用产生电机的推力.在相同体积下,超导直线电机可以通过远大于常规铜制绕组电机的电流,从而明显地提升绕组磁通和电机推力.

### 2.2 直线电机有限元模型

为了开展对空芯超导直线电机的输出能力进行初期研究,本文首先利用Magnet有限元软件建立了空芯高温超导直线电机二维的有限元模型,如图2所示.在空芯超导直线电机小型样机制作完成前,搭建了应用于测量电机定子表面磁场的测试装置,并利用该装置对不同的电流大小以及不同气隙条件下的空芯定子磁场进行了测量.该测试装置如图3所示,通过调节测量支架的具体位置可以在不同气隙条件下定子表面磁场变化情况的测试.

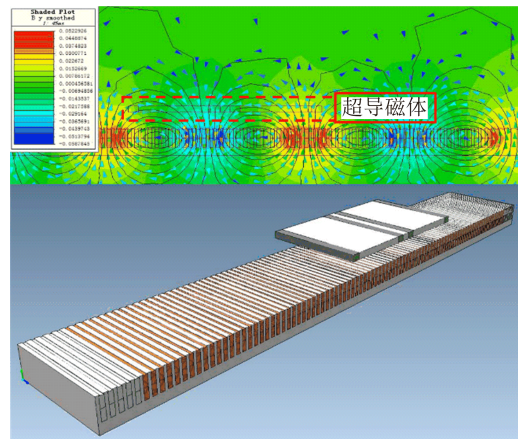


图2 空芯超导直线电机有限元模型

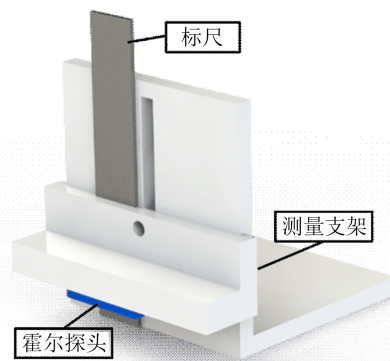


图3 空芯电机定子磁场测试装置

为了验证所建立有限元模型的准确性,分别计算了不同定子电流条件下电机表面2 mm处的法向磁场大小.同时,对10 mm和25 mm气隙处定子绕组产生的行波磁场的大小进行了计算.仿真计算与实验测试结果如图4所示.一方面,计算与仿真结果

的一致性验证了空芯定子模型的准确性. 同时, 图中的结果表明随着电流的逐渐增大, 电机定子绕组产生的磁场大小也逐渐升高. 磁场的大小在 2 mm 气隙时最大, 而当气隙升高至 25 mm 时磁场大小大约降低了 30%. 因此随着气隙的增大, 定子磁场将迅速衰减, 并且距离定子表面越进, 电机磁场的衰减越明显.

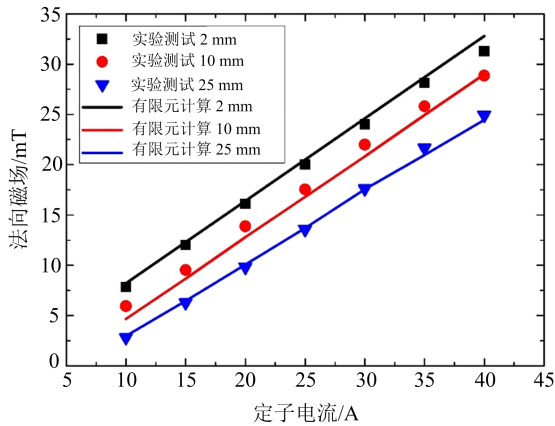


图 4 不同气隙条件下定子磁场大小

### 3 电磁力实验测试与分析

为了实现无铁芯超导直线电机电磁力的实际测量, 首先搭建了直线电机的测试平台, 如图 5 所示. 将空芯直线电机的定子与测试平台底座进行固定, 并在绕组中通入大小和频率均可控的三相交流电. 将超导线圈次级通过环氧骨架固定在三轴力传感器上, 并浸于液氮中进行冷却. 为了保证超导线圈在实验过程中不会由于电流过大导致局部失超而烧毁, 超导线圈中通入的励磁电流仅为 120 A. 实验过程中, 测试平台的支杆可以通过伺服电机实现工作气隙的调整. 由于低温容器底部的厚度为 10 mm, 因此实际测量过程中的电磁气隙设定为 25 mm.

定子绕组中的电流为 15 A, 频率 30 Hz 时的直线电机推力测试结果如图 6 所示. 可知电机的堵转推力与相角度数呈正弦分布, 且最大推力为 80 N. 将其与仿真结果相比较, 可以看出电机推力的仿真结果与测试数据有较好的一致性. 在不改变定子电流频率和气隙的情况下, 将定子电流的幅值增大到 30 A, 测试与仿真结果如图 7 所示. 可知电机的推力最大值约升至 160 N, 为定子电流为 15 A 时的两

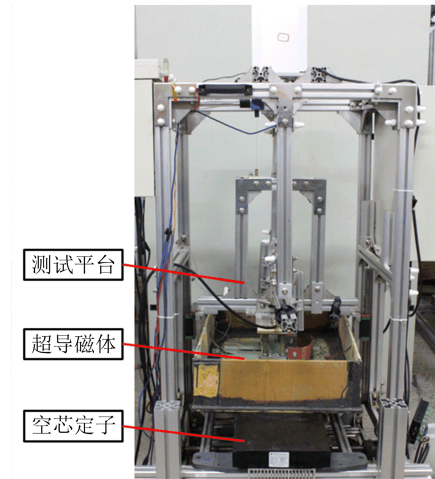


图 5 电磁力测试平台

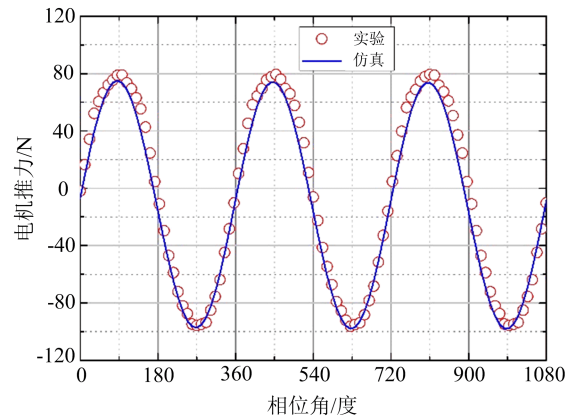


图 6 定子电流频率为 30 Hz 幅值为 15 A 时直线电机推力的测试与仿真结果

倍, 由此可知超导直线电机的推力与定子电流的幅值成正比. 与此同时, 测试数据与仿真计算结果也表现出较好的一致性, 从而证明了有限元模型的正确性.

为了研究超导直线电机其他电气参数对电机推力的影响与作用方式, 同时避免由于实际电机的承载能力和系统几何结构对实验测试的限制. 本文利用所建立的有限元模型对空芯超导直线电机的励磁电流及电机气隙对推力的影响开展进一步研究.

从计算结果可知, 将超导线圈中的励磁电流由 120 A 增大至 180 A 时电机的推力也由 160 N 升至约 240 N. 当线圈电流达到 360 A 是, 电机推力的最大值约为 450 N, 因此在定子电流不变的情况下, 直线电机的推力也随着超导线圈电流的升高继续增大. 这一研究成果表面, 随着高温超导涂



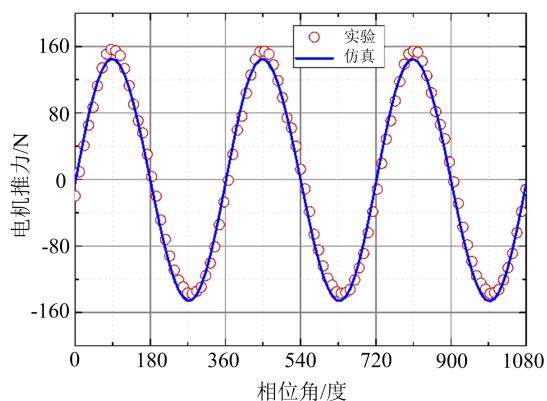


图7 定子电流频率为 30 Hz 幅值为 30 A 时  
直线电机推力的测试与仿真结果

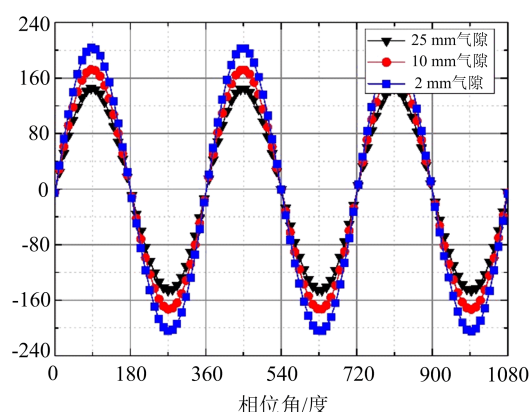


图9 定子电流频率为 30 Hz 幅值为 30 A 时,  
不同的超导励磁电流对电机推力的变化

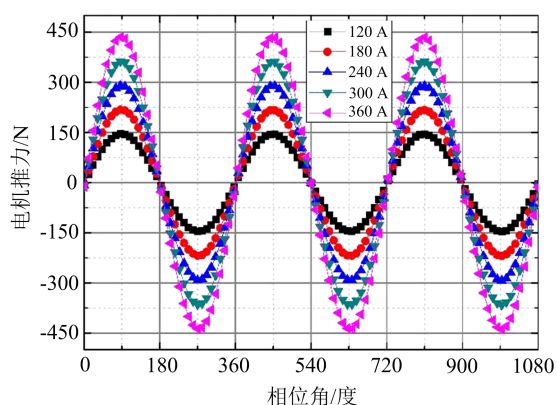


图8 定子电流频率为 30 Hz 幅值为 30 A 时,  
不同的超导励磁电流对电机推力的变化

层带材生产制备工艺的进步,将伴随着带材的载流能力将进一步提升,因此超导直线电机的推力密度将进一步提高.由于在实验过程中,低温容器的底层壁厚约为 10 mm,因此无法实现在更小气隙条件下对电机推力的测试,而应用有限元模型可以解决这一问题.

图9所示为直线电机定子电流为 30 A,频率为 30 Hz,超导线圈励磁电流为 120 A 时,将工作气隙降低至 2 mm 和 10 mm,电机推力的变化情况.从计算结果可知,随着气隙的减小,电机推力也逐渐增大.同时电机的堵转推力仍然保持了较好的正弦特性,所以在实际运行过程中将保持较好的推力稳定性,避免了推力波动及机械振动等问题,一定程度上提高了高温超导直线电机的运行稳定性.

## 4 结 论

空芯高温超导直线电机将超导带材的强载流能力与良好的高场特性相结合,并采用空芯结构的电机定子,不仅避免了磁通饱和等问题,同时实现了直线电机在大气隙条件下的高推力密度,对超导磁悬浮交通向更高速度的发展提供了有力保障.超导带材的载流能力不断提升也有望在有限的集合空间内提升电机的输出功率,对直线电机及超高速磁悬浮交通领域的相关研究及应用有一定的参考意义.

## 参 考 文 献

- [1] 陆可,吴梦颖,何一鸿,杨旭,低温物理学报, **04**(2018),41.
- [2] 龚天勇,张涵,马光同,等,低温物理学报, **04**(2016),25.
- [3] 李婧,王素玉,低温物理学报, **03**(2014),196.
- [4] 杜焯鑫,黄磊,安徽电力, **03**(2015),03.
- [5] 许媛媛,马光同,邓自刚,等,低温物理学报, **01**(2013),45.
- [6] 马光同,王家素,王素玉,微电机, **41**(2008),54.
- [7] 张涵,马光同,李兴田,龚天勇,低温与超导, **04**(2016),46.
- [8] 李兴田,张涵,龚天勇,等,低温物理学报, **03**(2016),57.
- [9] G. T. Ma, J. S. Wang, S. Y. Wang, et al., *Physica C-Superconductivity and its applications*, **01**(2007), 7.
- [10] D. Li, W. Li, X. Zhang, et al., *IEEE Transactions on Magnetics*, **51**(2015),1.
- [11] Z. H. Wu, J. X. Jin, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **24**(2014),1.
- [12] J. Li, Y. Fei, S. Zheng, et al., *Journal of Low Temperature Physics*, **174**(2014),87.

- [13] Z. Hong, A. M. Campbell, T. A. Coombs, *Superconductor Science and Technology*, **19**(2006),1246.
- [14] J. Li, J. Tang, Y. Zhang, *International Journal of Modern Physics B*, **29**(2015),1542045.
- [15] C. Y. Lee, J. H. Lee, J. M. Jo, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **03**(2014), 3600304.
- [16] J. X. Jin, L. H. Zheng, W. Xu, Y. G. Guo, J. G. Zhu, *Appl. Phys.*, **109**(2011), p11391.
- [17] G. T. Ma, T. Y. GONG, H. Zhang, et. al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **04**(2017),5201805.
- [18] Katsutoshi Mizuno, Motohiko Sugino, et. al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **04** (2017), 3600205.
- [19] Chan-Bae Park. *IEEE Transactions on Magnetics*, **11** (2017), 8204106
- [20] Chang Young Lee, Member, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **03**( 2014), 3600304.
- [21] Beomyong Eoma, Changhyeong Leea, et. al., 27th International Symposium on Superconductivity, ISS 2014. *Physics Procedia* **65** ( 2015) 261.