

应用于高速轮轨交通的高温超导同步直线电机研究*

刘康¹ 赵正伟¹ 王志涛^{1,2} 龚天勇^{1,2} 王超^{1,2} 刘坤¹ 马光同^{1†}

¹牵引动力国家重点实验室(西南交通大学),四川省成都市 610031;

²西南交通大学电气工程学院,四川省成都市 610031

收稿日期:2017-12-11;接收日期:2018-01-09

【摘要】 为实现高速铁路列车突破 600 km/h 的速度极限,本文提出了一种与现有轮轨交通兼容的高温超导同步直线电机方案,并通过有限元方法建立了高温超导同步直线电机的仿真模型.设计并制作了小型实验样机,其定子由三相铜绕组与硅钢材质的铁轭构成,使用二代高温超导材料 YBCO 带材绕制车载磁体.通过实验方法验证了模型的有效性,并用该模型研究了高温超导线圈回路电流、线圈匝数和气隙对电机推进力和法向力等电磁力特性的影响规律.本文的研究结果为高温超导同步直线电机在轮轨交通领域中的应用提供了可行性依据.

关键词: 高温超导磁体;同步直线电机;轮轨交通;电磁力

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

1 引言

目前世界高速铁路发展迅速,已有约 6 个国家和地区建成并实现商业运营.速度是衡量高速铁路技术水平的重要指标,世界各国在挑战列车速度极限方面做出了许多努力并取得了很大成就.具有代表性的如法国的 TGV,德国的 ICE350E,西班牙的 Talgo350,日本的 Fastech360.

从动力学角度出发,高速铁路系统包含轮轨关系和弓网关系两大动态作用体系^[1].研究表明,这两大作用关系是影响和制约列车速度极限的重要因素^[2].轮轨间的作用非常复杂,高速条件下会出现轮轨黏着失效,将直接导致车轮在轨道上的空转、打滑,破坏高速列车运行稳定性,影响列车安全运行^[3].另一方面,随着列车速度的提升,弓网关系在列车速度上的制约作用逐渐凸显.在高速条件下纵向的风载荷会抬升受电弓,加大弓网间的垂向作用力及其波动范围,结果将导致受电弓滑板和接触网的机械和电气磨损更加严重,而且还会导致受电弓

的流致振动效应^[4],这对于列车的稳定受流和减阻降噪都极为不利.由此可见,轮轨关系和弓网关系对车辆运行速度的限制作用尤为突出.除了上述影响列车运行速度的主要因素外,车载牵引变压器、变流器,旋转电机,复杂的中间传动装置都会增加车辆重量,既增大了列车轴重,又增加了牵引系统的负载.因此,为了使列车实现更高速度运行,解决上述问题非常重要.

上海高速磁悬浮和日本低温超导磁悬浮车的成功运行为高速铁路发展提出了新的方案,但是由于高速磁浮交通与现有铁路不兼容,需要修建全新线路,因此其发展受到一定制约.磁浮交通使用的直线电机牵引系统,可将电能直接转变为车辆动能而不需要中间传动装置,因此摆脱了对轮轨黏着力依赖,在高速铁路领域有着较好的应用前景.将直线电机与轮轨交通相结合,对其发展和应用有较好的促进作用.

国内外以直线电机作为列车牵引驱动系统的实用轮轨铁路案例并不少见,如我国的北京地铁首都机场线和广州地铁 4、5、6 号线,均使用了直线感应

* 四川省杰出青年基金(批准号:2016JQ0003)资助的课题.

† gtma@swjtu.edu.cn

电机进行车辆牵引.直线感应电机驱动系统将三相绕组安装在车体下方,利用铺设在轨道中间的感应板产生的涡流与车载绕组间的作用力驱动列车前进^[6].但直线感应电机属于异步电机,运行速度较低,不适用于高速运行条件.

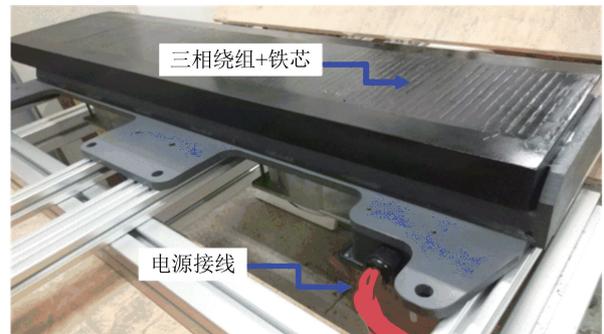
上海磁悬浮列车专线使用了运行速度更高的常导同步直线电机,其结构与前者不同,需要将三相绕组安装在轨道上,车载部分为电磁体,运行时速可达 430 km/h.同步直线电机不仅更适用于高速运行,而且摆脱了车辆集电设备对列车速度的制约.除此之外,日本的低温超导磁悬浮列车使用低温超导材料替换车载线圈的常规导线,能够使直线电机在大气隙条件下稳定运行的同时仍能够保持较大的功率密度和效率.但低温同步直线电机需要液氮对超导体进行冷却降温,成本很高.随着高温超导材料的不断发展,使得超导磁体的工作温度成功突破了液氮温区 77 K 的关口.且液氮的价格相对低廉,高温超导驱动系统的造价和维护成本较低.因此,使用高温超导同步直线电机驱动轮轨列车的相关研究具有显著的应用价值.

2 高温超导直线同步电机设计与测试

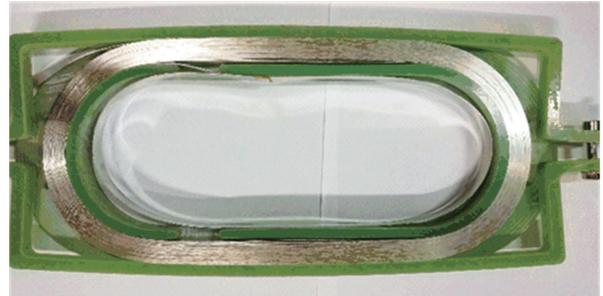
2.1 高温超导电机定子设计

高温超导直线同步电机由车下三相绕组以及车载高温超导体构成.将三相绕组密铺在轨道中央,经各分区变电所对各自区间内的初级绕组进行控制,产生平行于轨道方向移动的三相行波磁场.该可控磁场作用于车载高温超导磁体,直接在地面完成车辆的牵引驱动、制动等功能,因此无需车顶的受流设备以及相关变压、整流装置.高温超导磁体由 YBCO 二代高温超导带材绕制的线圈组成,需要浸泡在液氮中进行冷却以实现超导态^{[4][5]},本文使用极距 15 cm 的高温超导直线电机展开研究.

高温超导同步直线电机需要在轨道上铺设三相绕组,因此绕组成本占地面系统的主要部分.降低绕组成本是直线电机设计的关键任务.传统直线电机定子绕组方式多样,根据实际运用情况不同采用形式不同的绕线形式.决定绕组排布的关键因素有输出功率,磁场分布要求等.由于双层同心式绕组有利于优化每个磁极的中心磁场,适用于极距较大的直线电机,而且能够在很大程度上节约铜绕组的用量,



(a) 高温超导同步直线电机定子结构



(b) 无绝缘高温超导磁体

图 1 本文使用定子和超导磁体

因此选用双层同心式绕组更具有实用价值.本论文所使用的定子外观结构如图 1(a) 所示.定子由传统铜制线圈绕制,通以可控三相交流电,铁芯为硅钢片堆叠而成.

2.2 高温超导电机超导线圈设计

作为高温超导直线电机的另一核心部分,车载磁体的设计和绕制对电机性能的影响尤为突出.一般同步直线电机的次级主要有永磁型和电磁型两大类.永磁型电机无法主动退磁,容易造成杂质吸附等问题,对于电机的后期维修造成较大影响.电磁型车载磁体使用了传统材料导线绕制线圈,由于常规导体载流能力有限,磁场大小随着距离的增加迅速衰减,直接影响电机的输出能力.因此常导同步直线电机需要严格控制电机气隙,导致车辆控制难度较大,对轨道不平顺敏感等问题.

相比由永磁体或传统导体绕制的电磁线圈构成的电机次级,高温超导材料具有强大的载流能力,能够产生更强的磁场.二代高温超导材料 YBCO 超导带材可以在液氮温区下表现出良好的超导电性,是理想的线圈绕制材料.且 YBCO 带材的机械性能较好,能够适用于较大规模超导磁体的绕制,对于增大超导电机力学性能具有较好的应用价值.下表为上海超导公司生产的高温超导带材的基本性能参数,

本论文使用宽度 12 mm 型号的带材, 77 K 自场条件下的临界电流值约 420 A.

表 1 上海超导 YBCO 高温超导带材参数

带材宽度/mm	4	6	12
平均厚度/ μm	80 ~ 250		
最小弯曲半径(77 K)	40 mm		
临界拉应力强度(77 K)	> 290 MPa		
临界电流范围(77 K, 自场)	90~140 A	140~210 A	280~420 A

线圈的绕制过程也是影响磁体性能的关键因素, 常见的绕线方式有湿式绕制和干式绕制两种. 前者使用环氧浸渍的方式对绕组进行处理, 即绕制过程中在线圈层间浇注环氧树脂或石蜡等固化剂. 一方面固化剂起到了层间的绝缘作用, 另一方面凝固后的结构可以将绕组封装成一个整体, 避免层间的相对移动. 干式绕制是指将带材直接绕制在骨架上, 不使用其他材料进行填充. 在超导状态下, 带材内的电流仅从超导层通过, 因此带材间的无绝缘层处理并不会引起匝间的短路. 同时, 当线圈发生局部失超时, 带材表面的金属保护层可以起到引流的作用, 避免超导层的损坏, 干式绕法还有带材可重复利用等优势. 本文中所使用的超导线圈使用干式绕法完成绕制, 在绕制结束后使用环氧树脂制作的外圈骨架对带材进行机械固定, 以确保线圈在自场及外界动态磁场共同作用下仍能够保持较高的磁热稳定性, 绕制结果如图 1(b) 所示.

2.3 高温超导同步直线电机有限元模型

为便于后期对高温超导直线电机进行优化, 本文建立了电机的有限元模型. 如图 2 为电机的结构示意图, 使用该模型首先对电机定子的磁场分布特性进行了研究, 图 3 所示为电机定子磁场的仿真结果.

考虑超导带材的非线性 $E-J$ 关系(1), 从而在有限元模型中设定超导线圈的电导率等参数. 式中, E_c 为临界电场强度, J_c 为临界电流密度, n 为描述超导带材各向异性程度的参量. 从而可以得到超导带材的电导率满足(2)式.

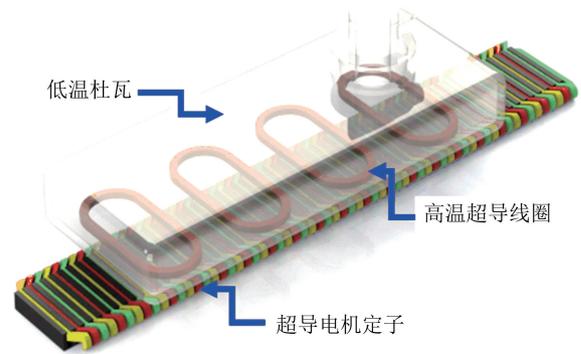


图 2 高温超导同步直线电机示意图

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(B)} \right)^n \quad (1)$$

$$\sigma = J_c E_c^{\frac{1}{n}} |E|^{\frac{1}{n}-1} \quad (2)$$

根据洛伦兹方程, 可以求得高温超导磁体在行波磁场中的作用力.

$$F = \int J \times B dv \quad (3)$$

2.4 高温超导直线电机三维测试平台

为实现高温超导直线电机的相关测试工作, 在完成高温超导电机的设计制作工作后, 首先对电机的磁场分布特性进行了重点研究.

为了准确测定各研究参量, 本小组自主设计制造了应用于电机性能研究的三维测试系统. 该系统使用伺服电机对待测工件进行定位, 可通过安装在主轴上的霍尔探头对电机的电磁特性进行测试, 测试系统如图 4 所示. 使用该实验平台对电机定子表面的法向磁场大小进行测量, 并将实验测试结果与仿真模型计算结果相互对比, 得到图 5 所示结果. 根据对比结果可以有效验证所建立有限元模型的正确性, 从而利用该有限元模型可对高温超导直线电机的相关特性继续展开研究.

3 超导直线电机力学性能研究

为研究高温超导同步直线电机的牵引能力, 通过有限元方法对电机的电磁力特性进行计算. 电机的推进力和法向力对高速轮轨列车的稳定运行起到至关重要的作用. 在增加推进力的同时减小电机法向力是电机优化的主要目的. 根据现有条件, 分别研究在电机各结构尺寸确定的情况下超导线圈内电流对电机电磁力的影响, 并探讨超导线圈匝数和电机气隙大小对电机推进力和法向力的影响.

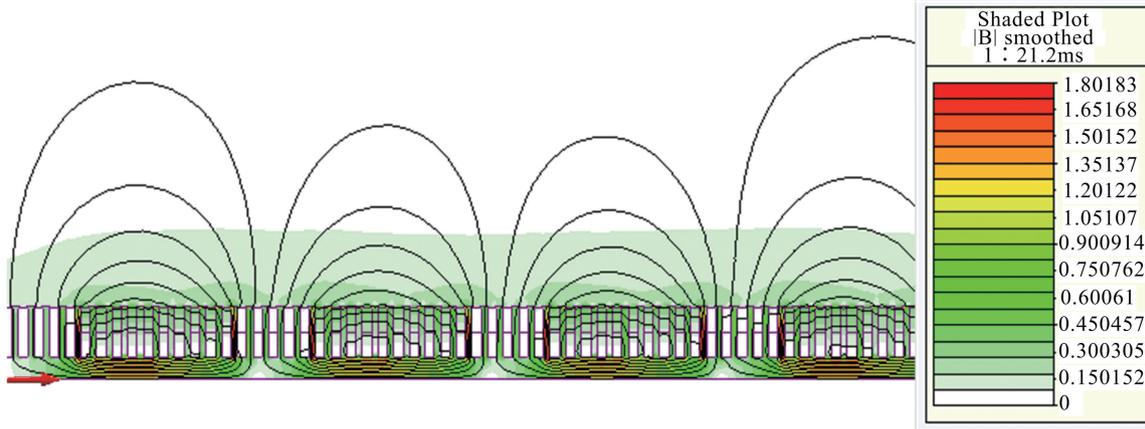


图 3 高温超导同步直线电机定子磁场

3.1 超导线圈电流大小对电磁力影响

首先计算超导同步直线电机在堵转工况下,不同超导电流条件下的电磁推力和法向力情况.

80 N 升高至 260 N,说明增大动子磁体的载流能力对电机性能有显著的提升作用.



图 4 高温超导直线电机三维测试系统

规定电机气隙为 10 mm,定子线圈内的三相正弦交流电频率为 30 Hz,定子总电流大小为 40 A.根据实际测试结果,无绝缘超导磁体的临界电流为 260 A,为保证后期超导磁体的稳定运行,使用理想电源向超导线圈回路内分别通入 40 A、60 A、80 A 和 120 A 的电流,计算结果如图 6 和图 7 所示.由计算结果可知,电机堵转时推进力为时间的正弦函数,并且随动子电流增大而逐渐增大.推进力峰值从

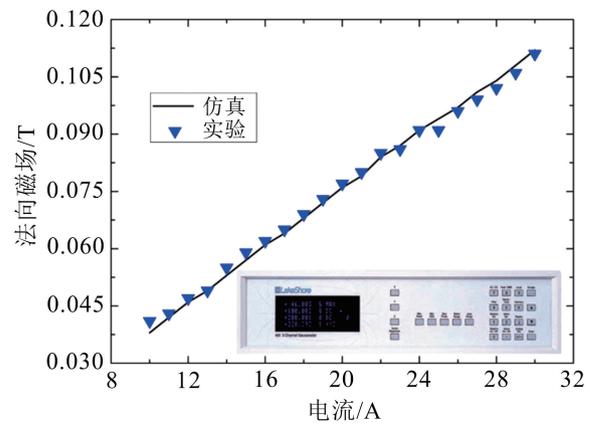


图 5 定子表面磁场实验与仿真对比

作为评定电机工作性能的另一个重要参数,电机法向力直接影响电机的稳定性^[5].计算结果显示,随着超导线圈电流的不断增大,法向吸引力大小也呈逐渐增大趋势.排斥力大小峰值大小为 70 N,吸引力峰值为 390 N 左右.

由于超导直线电机定子使用了有铁芯的结构,因此动子与定子间的法向作用力表现为吸引作用.对于轮轨交通中使用超导同步直线电机,由于转向架悬挂的作用,能够抵消部分的电机法向力波动.但是过大的法向吸引力会造成轮轨磨耗的加剧,造成车辆运行稳定性下降,维修费用增加.因此减小法相吸引力是电机设计过程的关键之一,下面分别从改变超导线圈匝数和调整电机气隙两方面探讨电机性能的优化方案.

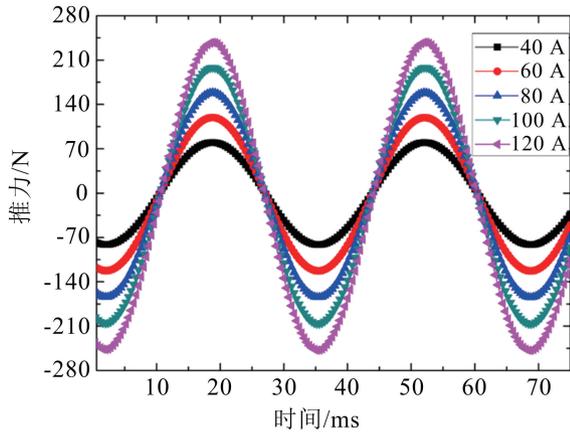


图6 不同超导回路电流下电机的推力

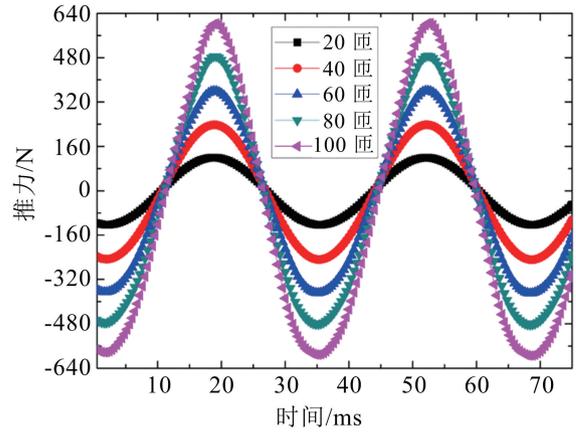


图8 不同线圈匝数下电机的推力

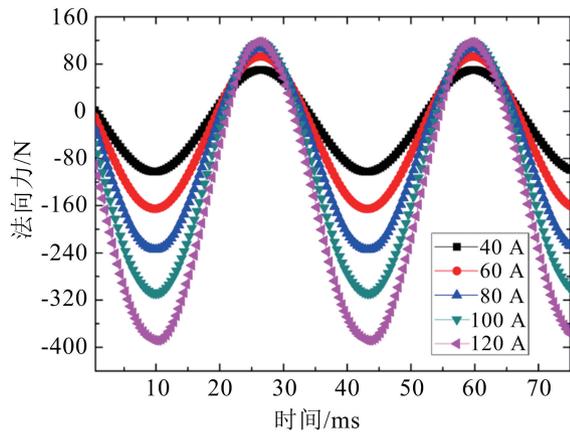


图7 不同超导回路电流下电机的法向力

大.当匝数为 80 和 100 时,法向力基本上呈现出完全的吸引力.对比推进力的数值大小,法向力的最大值几乎是推进力的两倍.稍后将对比各结构参数条件下的推力/法向力的变化情况.

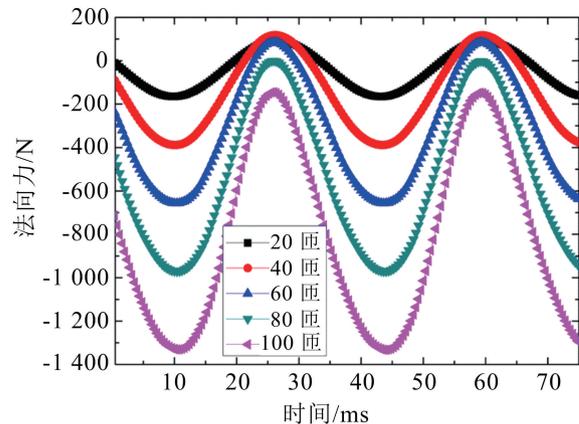


图9 不同线圈匝数下电机的法向力

3.2 超导线圈匝数变化对电磁力特性的影响

高温超导直线电机使用二代高温超导带材绕制车载线圈,而 YBCO 带材的价格比传统导线的价格要高出数倍,因此带材用量也是高温超导同步直线电机造价的关键之一.因此合理的电机结构优化在保证电机牵引能力的基础上减小系统造价,是电机能够进行实际运用的前提之一.

在以上研究的基础上,使用所建立的有限元模型计算了超导线圈匝数对电机电磁力的影响,计算结果见图 8 和图 9.通过结果对现有条件下电磁推力与法向力的比值与匝数变化间的关系进行研究.

由图可知,当线圈匝数从 20 匝变化为 100 匝时,电机静态推力从 120 N 变化为 620 N.因此超导电机的电磁推力随着线圈匝数的增加呈增大趋势.在匝数增量保持不变的情况下,电机推进力的增量逐渐放缓.图 9 为电机法向力的变化情况,计算结果表明电机的法向吸引力随线圈匝数增加也逐渐增

3.3 电机气隙变化对电磁力特性的影响

传统直线同步电机由于车载磁体的载流能力有限,且动子磁场强度会随着气隙的增大而迅速衰减.因此常导直线同步电机的工作气隙非常小,在高速运行时控制难度较大.而超导材料绕制的磁体能够在较小的尺寸条件下产生强大的外磁场,使得超导同步直线电机能够在大气隙条件下保持较高的推进性能.为分析超导直线电机的牵引能力随气隙的变化关系,对匝数为 40 N,单匝电流为 120 A 的情况进行计算.

计算结果表明电机堵转条件下电磁推力会随气隙的增加而减弱,当气隙从 20 mm 变化至 30 mm 时,衰减最为显著.但是在 20 mm 左右时仍能够保持较大的推进力输出能力.图 11 所示为电机法向力

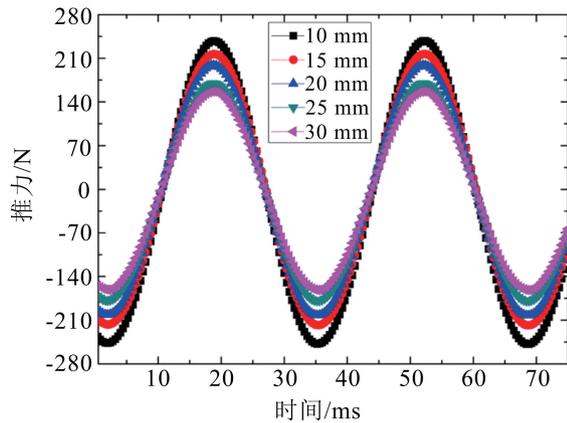


图 10 不同电机气隙下电机推力

的变化情况,电机法向力随气隙增大的变化更加明显,如气隙从 10 mm 增加至 15 mm 时,法向力衰减了近 20 %。在气隙增大至 20 mm 以上时,电机法向力衰减幅度逐渐降低。最后,计算不同超导线圈匝数和气隙条件下电机推进力和法向力最大值的比值的

变化情况,结果见表 2。

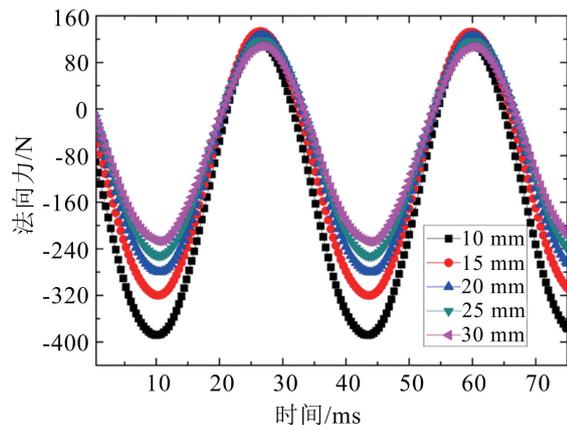


图 11 不同电机气隙下电机法向力

由计算结果可知,从增大推力与法向力比值的角度考虑,超导线圈匝数应尽量减小,其次,在该电机尺寸结构条件下,超导电机的理想气隙大约为 20 mm,对设计制作更大规模或实用高温超导同步直线电机具有一定的对比和参考价值。

表 2 不同超导线圈匝数及不同气隙下推力与法向力比值

线圈匝数/N	20	40	60	80	100
推力/法向力	0.73	0.63	0.55	0.51	0.44
电机气隙/mm	10	15	20	25	30
推力/法向力	0.62	0.68	0.73	0.68	0.69

4 结论

本文通过有限元方法建立了高温超导同步直线电机模型,并通过实验验证了模型的有效性,使用了更有利于降低高温超导同步直线电机造价的同心式绕组分布方式,研究了超导线圈干式绕组对提高电机磁热稳定性的优势。通过有限元方法分别研究了超导线圈电流、线圈匝数和电机气隙等重要参数对电机电磁力特性的影响,对比研究了改变电机结构参数对增大电机推进力且减小法向力的作用效果,为电机的后期优化工作提供设计依据。本研究为高温超导直线同步电机在轮轨交通领域的实际应用提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 翟婉明.铁道车辆,**42**(2004),1.
- [2] 钱立新.中国铁路,**02**(2004),11.
- [3] 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等,力学进展,**45**(2015),201507.
- [4] 张静,刘志刚,鲁小兵,宋洋.铁道学报,**01**(2015),7.
- [5] G.T.Ma, T.Y.GONG, H.Zhang, et.al., *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **04**(2017),5201805.
- [6] 龚天勇,张涵,马光同,等,低温物理学报,**04**(2016),05.
- [7] 李婧,王素玉,低温物理学报,**03**(2014),007.
- [8] 许媛媛,马光同,邓自刚,等,低温物理学报,**01**(2013),35.
- [9] 张涵,马光同,李兴田,龚天勇,低温与超导,**04**(2016),010.
- [10] 李兴田,张涵,龚天勇,等,低温物理学报,**03**(2016),010.
- [11] C.Y.Lee, J.H.Lee, J.M.Jo, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **03**(2014),3600304.
- [12] G.T.Ma, J.S.Wang, S.Y.Wang, et.al., *Physica C-Superconductivity and its applications*, **01**(2007),7.
- [13] D.Li, W.Li, X.Zhang, et.al., *IEEE Transactions on Magnetics*, **51**(2015),1.
- [14] Z.H.Wu, J.X.Jin, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **24**(2014),1.
- [15] J.Li, Y.Fei, S.Zheng, et.al., *Journal of Low Temperature Physics*, **174**(2014),87.
- [16] Z.Hong, A.M.Campbell, T.A.Coombs, *Superconductor Science and Technology*, **19**(2006),1246.
- [17] J.Li, J.Tang, Y.Zhang, *International Journal of Modern Physics B*, **29**(2015),1542045.
- [18] 马光同,王家素,王素玉,微电机,**41**(2008),54.
- [19] J.X.Jin, L.H.Zheng, W.Xu, Y.G.Guo, J.G.Zhu, *Appl. Phys.*, **109**(2011),11391.

The Studies of a High Temperature Superconducting Linear Synchronous Motor for High Speed Railway

LIU Kang¹ ZHAO Zhengwei¹ WANG Zhitao^{1,2} GONG Tianyong^{1,2}
WANG Chao^{1,2} LIU Kun¹ MA Guangtong^{1†}

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

² School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China

Received date: 2017-12-11; accepted date: 2018-01-09

【Abstract】 A high temperature superconducting (HTS) linear synchronous motor (LSM) that could be used in the traction system of high speed railway was demonstrated in our laboratory in order to break through the speed of 600 km/h. The stator was made of three-phase copper windings with a silicon steel yoke, and the mover was constructed by YBCO-coated conductor. Based on a finite-element model which was validated by experiments, we investigated the dependence of the thrust and normal force on the loop current magnetizing the superconducting coil, the number of turns of the superconducting coils and also the gap between the mover and the stator. This work indicates the potential of using the HTS LSM in the traction system of high speed railway.

Keywords: high temperature superconducting (HTS) magnet; linear synchronous motor (LSM); railway transportation; electromagnetic force

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