

超导直线电机结构参数对性能影响^{*}

李睿, 方进[†], 聂利超

北京交通大学电气工程学院, 北京 100044

收稿日期: 2021-11-27; 接收日期: 2021-12-31

【摘要】 高温超导直线电机作为电磁弹射的动力核心, 需要具备稳态推力大和推力稳定性高的特点. 本文利用有限元仿真分析法, 分析了定子背铁厚度、气隙长度、极矩以及超导磁体内径等结构参数对电机稳态推力、推力波动、气隙磁场垂直分量和铁心损耗的影响. 由仿真数据得出: 增大定子背铁厚度, 铁心损耗有先增大后下降的变化趋势; 极矩逐渐增大时, 稳态推力先增大后减小, 但是极矩的增大会带来电机推力波动的增大; 增大超导磁体内径, 电机稳态推力平均值升高. 结果表明本次研究达到了增大推力以及提高推力稳定性的目的, 并对后续超导直线电机结构优化提供了可靠依据.

关键词: 超导直线电机, 性能, 超导磁体, 结构参数

PACS: 85.25.-j, 85.25.Am

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.05.004

The Influence of Superconducting Linear Motor Structure Parameters on Performance

LI Rui, FANG Jin[†], NIE Lichao

School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Received date: 2021-11-27; accepted date: 2021-12-31

【Abstract】 As the power core of electromagnetic ejection, the high-temperature superconducting linear motor needs to have the characteristics of large steady-state thrust and high thrust stability. In this paper, the finite element simulation analysis method is used to analyze the influence of structural parameters such as the thickness of the stator back iron, the length of the air gap, the pole moment and the width of the superconducting magnet on the steady-state thrust of the motor, the thrust fluctuation, the vertical component of the air gap magnetic field and the core loss. According to the simulation data: increasing the thickness of the stator back iron, the core loss has a tendency to increase first and then decrease; when the pole moment gradually increases, the steady-state thrust first increases and then decreases, but the increase in the pole moment will bring about the increase of the motor thrust fluctuation; increasing the inner diameter of the superconducting magnet, the average steady-state thrust of the motor increases, while the thrust fluctuation remains at a low level and basically unchanged. The results show that this research has achieved the purpose of increasing the thrust and improving the stability of the thrust, and provides a reliable basis for the subsequent structural optimization of the superconducting linear motor.

Keywords: High temperature superconducting linear motor, Performance, Superconducting magnet, The

^{*} * * * 用超导直线 * * * 关键技术研究(批准号:E20GY0800010)资助的课题.

[†] fangseer@sina.com

structural parameters

PACS: 85.25.-j, 85.25.Am

DOI: 10.13380/j.ltpl.2021.05.004

Reference method: LI Rui, FANG jin, NIE Lichao, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0275 (2021)

1 引言

目前无人机的起飞方式多样,包括滑跑起飞、电磁弹射、火箭助推等等^[1]. 电磁弹射有初速度快、推力大、时间短、能量效率高等优点^[2]. 直线电机是电磁弹射的动力系统,这就需要直线电机产生足够大的推力来满足弹射要求. 对直线电机的主要期望目标就是增大推力以及提高推力稳定性. 高温超导直线电机具备高功率密度、高效率、高推重比等优点,这正是应用了超导体高载流能力和强磁场的性质. 现如今超导电力技术逐渐成熟,运用范围也愈来愈广,未来在电磁弹射领域超导直线电机将会是最好的选择.

近些年国内外展开了许多对超导直线电机的设计和研究:2000年日本早稻田大学研究设计了一台高温超导块材直线传动装置,同年研究设计出一台双边直线同步电机^[3,4];2014年里斯本大学 P. J. Costa Branco 等人利用超导块材的迈斯纳效应继而提出了一种应用于电磁推进的高温超导直线电机^[5];2016年诺丁汉大学 Luca Bertola 等人^[6],比较了直线感应电机、直线同步电机以及超导直线同步电机的优缺点,发现超导直线电机拥有优秀的电磁性能,并且所需功率最小;国防科技大学李冠醇^[7]等人在2018年设计一台高速大推力的空心超导直线同步电机,同年西南交通大学马光同^[8]等人设计一台运用于磁悬浮系统的横向磁通高温超导直线电机等等.

本文研究的超导直线电机定子部分采用无齿槽结构,主要研究了定子背铁厚度、气隙长度、极矩大小和超导磁体结构参数变化对电机气隙磁场和稳态推力的影响.

2 电机分析理论及模型

2.1 电机分析理论

分析电机的方法主要分为两类——解析法和有限元仿真法. 其中解析法是以麦克斯韦方程组作为理论依据,结合电机的磁路结构计算出电磁场分布. 麦克斯韦方程组微分形式表达式如下:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \end{cases}$$

在时变电磁场求解时,为了简化求解过程,引入动态磁位函数 A 和动态电位函数 φ 来表示电场强度 E 和磁场强度 B ,他们之间的关系表达式如下:

$$B = \nabla \times A$$

$$E = -\nabla \varphi$$

引入的磁位函数 A 和电位函数 φ 可将求解过程简化. 同时,磁位函数 A 和电位函数 φ 又满足:

$$\nabla^2 A - \mu\epsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\mu J$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

将位函数 A 和 φ 求解出来之后,带入式(2)和式(3)就可以得到磁场强度 B 和电场强度 E . 但是由于存在许多的偏微分方程,所以解析计算过程十分困难,很难计算得到精确解.

另一种方法是有限元仿真法,其本质是一种数值分析法,将求解微分方程变为泛函极值的问题. 其原理是将求解区域离散成规则的小网格,这一过程称为网格化,然后对每个小网格完成边值问题求解,整合每个小网格的计算结果就可得到整个求解区域的解. 有限元仿真法广泛应用在电磁场求解问题中.

2.2 电机模型

超导直线电机可以分为单边型直线电机和双边型直线电机,其中单边型直线电机定子和动子之间存在一个法向的电磁吸引力,其数值可能达到推力的数倍. 而双边型直线电机的动子两侧均装有定子,或者是定子的两侧设有动子,法向的电磁吸引力可以相互平衡. 本文研究对象是高温超导双边型直线电机,采用无齿槽型定子结构,降低气隙磁场中谐波分量. 定子绕组材料为铜,采用三相集中式绕组. 超导动子由超导磁体和低温杜瓦容器组成,设计超导磁体时,本文选用上海超导的超导带材,所选带材参数如表2所示. 图1为高温超导双边型直线电机结构模型图.

其中,高温超导双边直线电机的部分结构参数如表1所示.

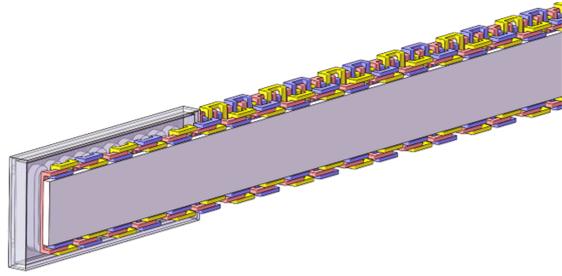


图1 高温超导双边直线电机结构模型图

表1 高温超导双边直线电机部分结构参数

结构参数	符号	数值	单位
定子背铁厚度	h_1	10	mm
定子背铁高度		85	mm
定子绕组宽度		8	mm
定子绕组高度		5	mm
极对数		5	
极距	τ	40	mm
超导磁体厚度	h	10	mm
超导磁体弯曲内径	R	12	mm
超导磁体宽度	D_2	28	mm
气隙	δ	10	mm

表2 超导带材参数

超导带宽度	I_c (77 K)	带材总厚度	最小转弯直径
10 mm	550 A	65 μm	11~15 mm

厚度增大而减小,同时定子背铁厚度越大,气隙磁场的正弦性变得越差。

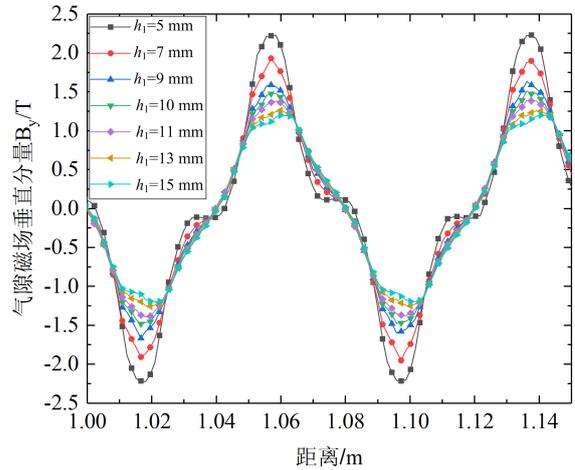


图2 不同定子背铁厚度 h_1 对电机气隙磁场垂直分量的影响

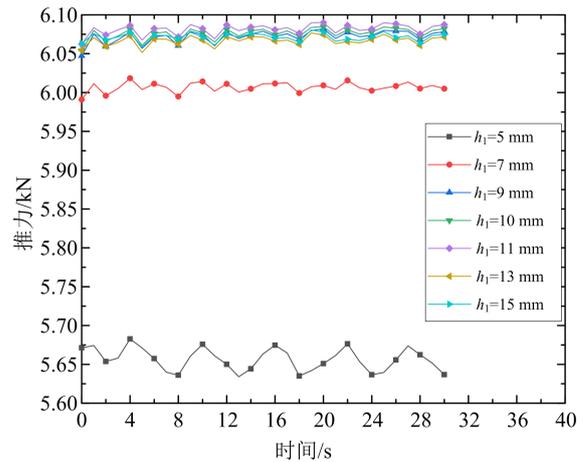


图3 不同定子背铁厚度 h_1 对电机推力的影响

3 结构参数对超导直线电机性能影响

3.1 定子背铁厚度对电机性能的影响

由于定子采用无齿结构,在这样的结构里定子背铁可以起到很好的聚磁效果.如果定子背铁厚度太小,聚磁效果差,于是电机稳态推力也会减小.如果定子背铁厚度超过一定的数值后,会使电机重量上升,提高成本.于是存在一个合适的定子背铁厚度,既可以让电磁推力处于一个较高数值,又不会增加电机制作成本.分析电机定子背铁厚度 h_1 范围为 5 mm 至 15 mm 的超导直线电机性能,随着定子背铁厚度增加,气隙磁场垂直分量变化曲线如图 2 所示.

电机气隙磁场垂直分量的基波幅值随定子背铁

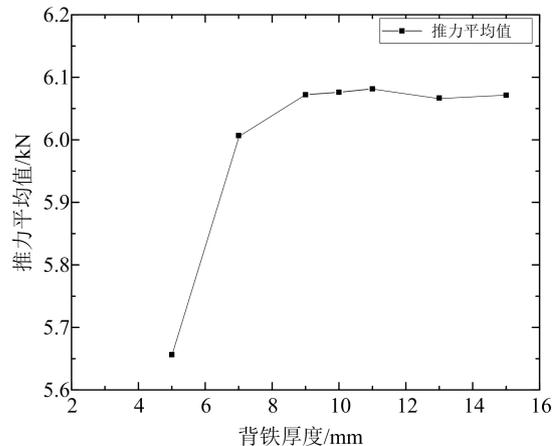


图4 电机稳态推力平均值随定子背铁厚度 h_1 的变化曲线

由图 3 和图 4 可知,当定子背铁太薄时,背铁的聚磁效果差,稳态推力也很小,定子背铁厚度为 5 mm 时,推力只有 5.66 kN. 当背铁厚度增至 7 mm 时,推力为 6 kN,有明显的增加,厚度继续增大到 9 mm 时,推力增大至 6.07 kN. 定子背铁厚度大于 9 mm 后,推力基本不会上升,这是因为高温超导磁体产生的磁场已经使定子背铁饱和,所以推力不会继续上升.

随着定子背铁厚度增加,定子铁心损耗变化情况如图 5 和图 6.

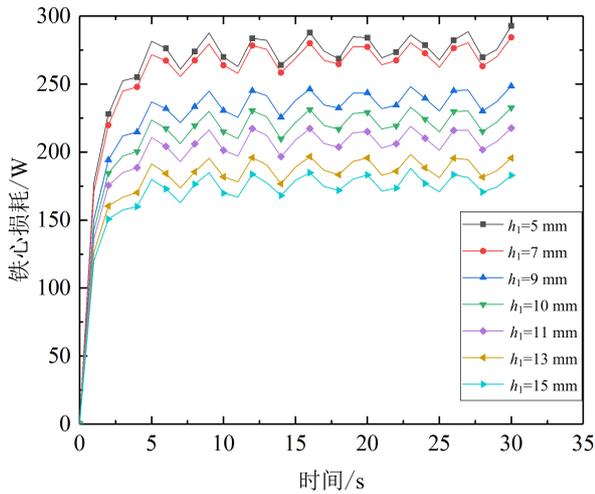


图 5 不同定子背铁厚度 h_1 下的铁心损耗随时间变化曲线

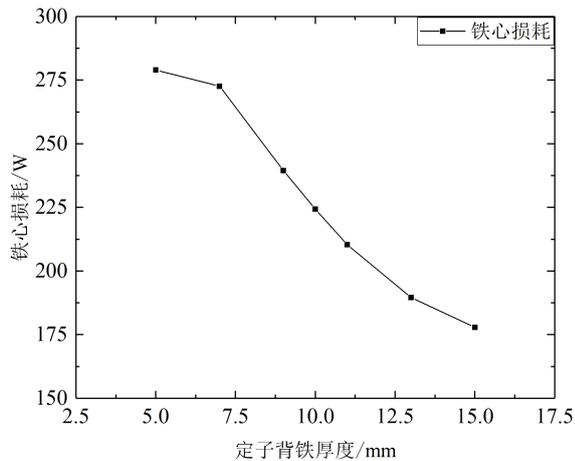


图 6 铁心损耗随定子背铁厚度 h_1 变化的曲线

根据曲线可分析得到,随着 h_1 变大,定子的铁心损耗呈现出下降趋势,其原因是定子背铁中的磁通量不再增加,此时定子背铁的厚度越厚,整个定子背铁的磁阻越小,所以定子铁心损耗随背铁厚度的

增大而减小.

3.2 气隙大小对电机性能的影响

保持定子励磁电流和定子电流不变,改变电机气隙长度,会直接影响气隙磁场,进一步影响电机稳态推力.

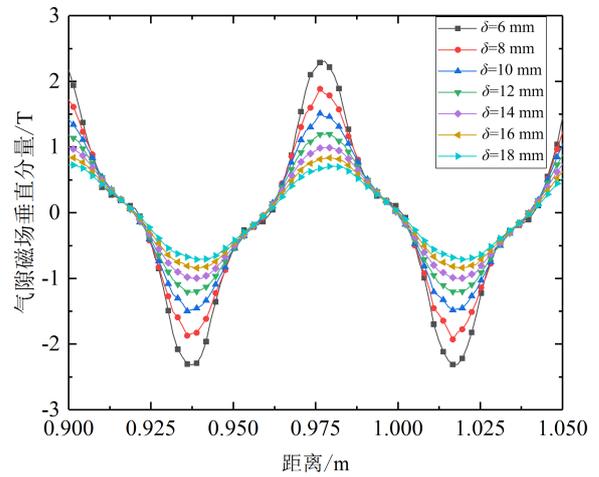


图 7 不同气隙长度 δ 对电机气隙磁场垂直分量的影响

如图 7 所示,当气隙长度为 6 mm 时,气隙磁场垂直分量的基波幅值可以达到 2.4 T,不同气隙长度下,气隙磁场正弦性变化并不明显,主要是因为本文采用无齿槽型定子,提高了气隙磁场正弦度.

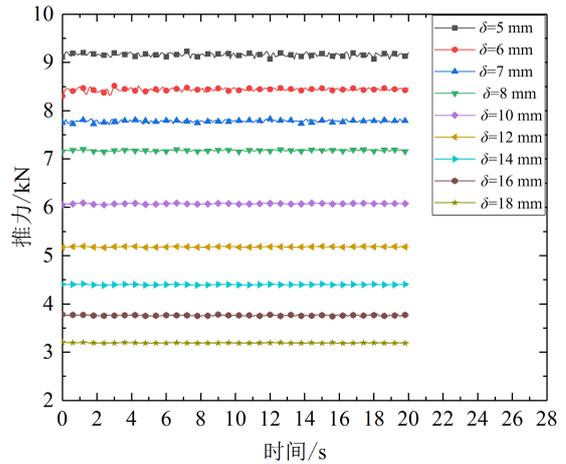


图 8 不同气隙长度 δ 对电机推力的影响

这是因为空气磁阻要远远大于定子背铁的磁阻,由图 8 可知,额定电流下,气隙长度越大,电机稳态推力越小,推力波动不明显.当气隙长度为 5 mm 时,电机稳态推力可以达到 9.2 kN.但实际上综合考虑超导定子低温杜瓦的制作工艺和安装可行性,气隙长度不能太小.

3.3 极矩对电机性能的影响

在高温超导直线电机中,不改变直线电机额定速度,改变电机极矩,定子电流频率随之改变.

$$v_s = 2\tau f \quad (6)$$

控制超导磁体结构不变,分析电机极矩从 30 mm 到 60 mm 的变化过程,每 5 mm 计算一次,图 9 和图 10 分别是不同极矩下的气隙磁场垂直分量和电机稳态推力的变化情况.

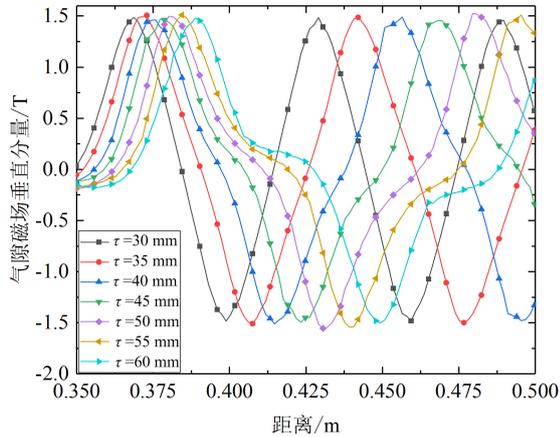


图 9 不同极矩 τ 下的气隙磁场垂直分量曲线

由图 9 可以明显看出,电机极矩增大的同时,电机气隙磁场的周期也变长,并且极矩增大气隙磁场的正弦性变差,这是由于电机极矩增大相当于极弧系数减小,从而导致气隙磁场谐波增加,正弦性下降.由图像可以看出,在极矩为 35 mm 时,气隙磁场有着较好的正弦性.

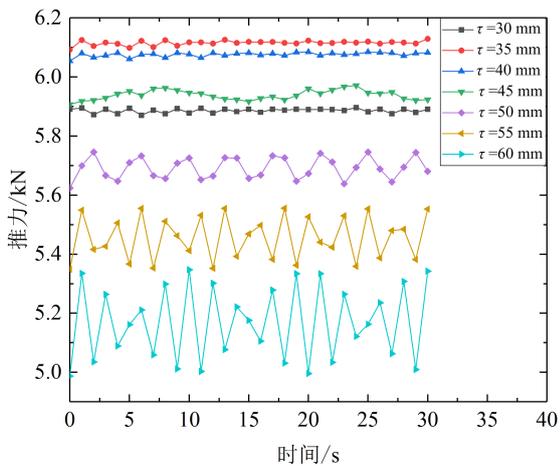


图 10 不同极矩 τ 下的电机稳态推力曲线

由图 10 分析出,极矩从 30 mm 开始增大,稳态推力平均值先增大后减小,电机极矩为 35 mm

时,此时稳定推力平均值最大,达到了 6.12 kN. 根据图像也能得出,极矩越大,推力波动越大.图 11 是不同极矩下电机推力波动情况.

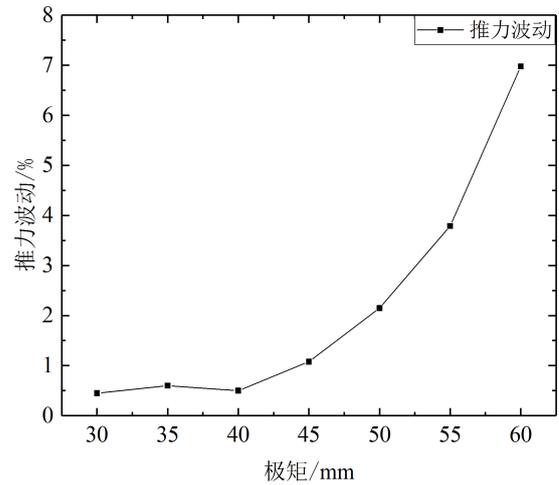


图 11 不同极矩 τ 下的电机推力波动情况

由此可见,一开始极矩增大,电机推力脉动较小,但后期极矩增大,推力波动较大.这是由于极矩增大引起气隙磁场的谐波含量增加,于是电机推力波动明显.

3.4 超导磁体结构对电机性能的影响

超导磁体采用跑道型线圈,其示意图如图 12 所示.

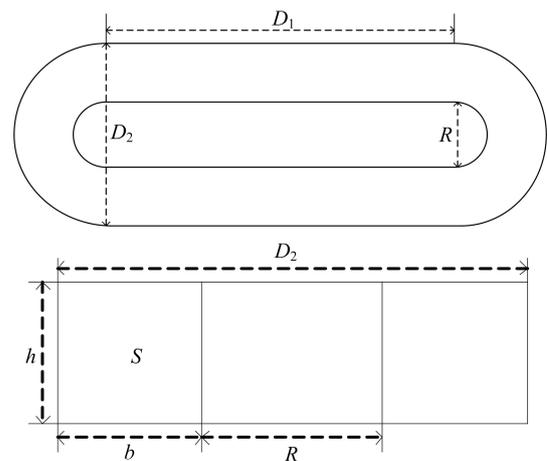


图 12 跑道型线圈结构示意图

其中 D_1 为线圈直线段长度, D_2 是直线段之间的宽度,也就是超导磁体宽度, R 为圆弧段内径,而高温超导带材机械性能弱,磁体内径 R 不能取值太小.在超导磁体线圈的截面面积 S 不变和每个超导磁体匝数 N 以及励磁电流不变的情况下,分析改变

超导磁体内径 R 对电机性能带来的影响。

超导磁体线圈内径 R 需在合适的取值范围内进行研究,绕制超导磁体的超导带其最小弯曲直径为 11 mm. 仿真计算了 11 mm 到 20 mm 的变化过程中电机气隙磁场垂直分量和电机稳态推力的变化,分别如图 13 和图 14 所示。

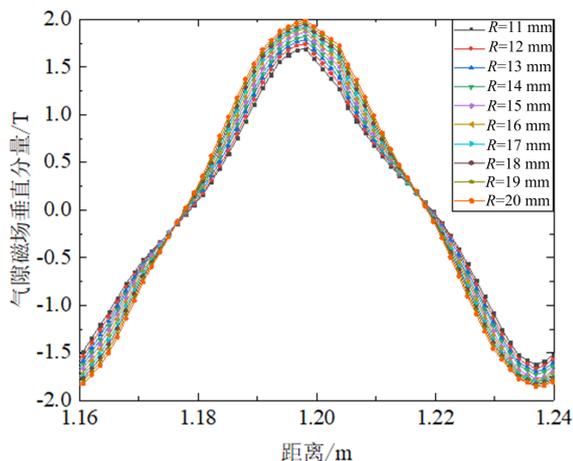


图 13 不同超导磁体内径 R 对电机气隙磁场垂直分量的影响

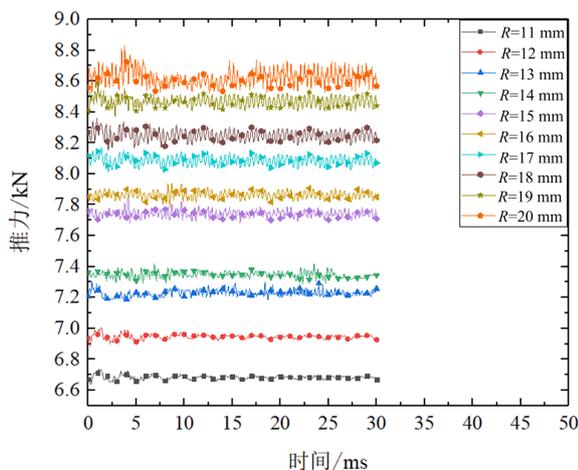


图 14 不同超导磁体内径 R 对电机推力的影响

由图 13 可知,超导磁体内径 R 增大气隙磁场垂直分量幅值也有所增加.这是因为超导磁体内径 R 增大,超导磁体线圈直线段长度 D_1 不变,但超导磁体线圈弯曲部分略有增长,从而纵向气隙磁场基波幅值略有增大。

由图 14 可见超导磁体内径 R 增大的过程中,电机稳态推力也逐渐增大,线圈内径为 20 mm 时,电机稳态推力达到 8.6 kN.

4 结 论

定子背铁厚度的变化对铁心损耗的影响是非线性的,在超导直线电机设计阶段,既要考虑到背铁太厚会增加超导直线电机的总重量,降低气隙磁密正弦度,背铁太薄会降低直线电机的机械强度和稳定性.背铁厚度增大并不会使电机稳态推力持续增加,而是先增大之后稳定在一定的推力值。

气隙长度增大引起超导直线电机漏磁通增加,气隙磁场垂直分量的基波幅值减小,同时超导直线电机稳态推力明显下降。

极矩的变化对于电机稳态推力的影响也是非线性的,当极矩逐渐增大时,稳态推力先增大后减小,但是极矩的增大会带来电机推力波动增大.气隙磁场周期也会随之增大,并且正弦性变差。

超导磁体内径增大,电机稳态推力增大并且变化十分明显,气隙磁场垂直分量幅值也随着超导磁体内径增大有微小变化。

参 考 文 献

[1] 李俊,吴峻,微特电机, 47(2019), 61.
 [2] 王子昂,中国新通信, 21(2019), 47.
 [3] R. Muramatsu, S. Sadakata, M. Tsuda, and A. Ishiyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 11(2002), 1976.
 [4] A. Takahashi, H. Ueda, and A. Ishiyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 13(2003), 2251.
 [5] P. J. Costa Branco, R. Almeida, and J. A. Dente, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 61(2014), 5894.
 [6] L. Bertola, T. Cox, P. Wheeler, and S. Garvey, 2016 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* Milwaukee, WI, USA, September 18-22, (2016), 1.
 [7] 李冠醇, 论文题目[D]. 国防科技大学, 2018.
 [8] G. -T. Ma, Z. -T. Wang, K. Liu, H. -Y. Qian, and C. Wang, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65(2018), 7548.