DOI: 10.13382/j.jemi.B2104354

# 基于复合磁性槽楔的 PMLSM 推力波动抑制*

许孝卓[1] 尚泽健[1] 杜宝玉[2] 封海潮[1] 刘株利[3]
(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000;2. 河南理工大学机械与动力工程学院 焦作 454000;
3. 中国铁塔股份有限公司平顶山市分公司 平顶山 467000)

**摘 要**:永磁直线同步电机(permanent magnet linear synchronous motor,PMLSM)存在齿槽力,影响电机的控制性能。本文提出一种基于软磁、硬磁材料混搭的新型复合磁性槽楔结构(composite magnetic slot wedge,CMSW),能有效抑制 PMLSM 推力波动。首先,分析了单一磁性槽楔的材料、尺寸和空间位置分布对 PMLSM 输出推力和推力波动的变化规律。然后,研究新型复合磁性槽楔的软磁、硬磁材料配比和位置分布,对电机输出推力、推力波动和齿槽力等电磁性能的影响。以最大推力和推力波动最小为优化目标,利用正交优化法对复合磁性槽楔的尺寸进行优化。研究表明,采用新型复合磁性槽楔可有效降低推力波动和损耗,推力波动降低 79.4%,而平均推力基本不变,为 PMLSM 推力波动抑制提供新的技术途径。

**关键词**: 永磁直线同步电机;复合磁性槽楔;推力波动抑制;正交优化
**中图分类号**: TM359.4;TM303.3 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.40

# Thrust ripple suppression of PMLSM based on composite magnetic slot wedge

Xu Xiaozhuo[1] Shang Zejian[1] Du Baoyu[2] Feng Haichao[1] Liu Zhuli[3]
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
3. China Tower Corporation Pingdingshan Branch, Pingdingshan 467000, China)

**Abstract**: The cogging force of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) affects the control performance of the motor. In this paper, a novel composite magnetic slot wedge (CMSW) based on soft magnetic and hard magnetic materials is proposed to effectively suppress the thrust fluctuation of PMLSM. Firstly, the influence of material, size and spatial position distribution of magnetic slot wedge on the output thrust and thrust fluctuation of PMLSM is analyzed. the effects of the material proportion and position distribution of soft and hard magnetic materials on the electromagnetic properties of output thrust, thrust fluctuation and cogging force are studied. Taking maximum thrust and minimum thrust fluctuation as optimization objective, the size of composite magnetic slot wedge was optimized by orthogonal optimization method. It is shown that the new composite magnetic slot wedge can effectively reduce loss and thrust fluctuations by 79.4%, while the average thrust is basically unchanged, which provides a new technology way for thrust ripple suppression of PMLSM.

**Keywords**: permanent magnet linear synchronous motor; composite magnetic slot wedge; thrust ripple suppression; orthogonal optimization

收稿日期: 2021-05-26 Received Date: 2021-05-26
*基金项目:国家自然科学基金(52177039)、河南省科技攻关项目(222102220016,202102210099,212102210145)资助

## 0 引 言

永磁直线同步电机(PMLSM)具有推力密度大、响应快、结构简单、定位精度高等优点[1-2],广泛应用于无绳垂直提升、交通、物流运输等领域[3-4]。然而,电机初级铁心开槽导致齿槽力和推力波动,产生振动和噪声,严重时甚至引起共振,影响电机控制性能。因此,有必要深入研究 PMLSM 推力波动的抑制方法。

目前,永磁电机的推力波动抑制,主要从控制策略和本体结构设计两方面入手。控制策略方面一般采用滑模变控制、谐波电流注入、迭代学习等控制补偿算法抑制推力波动[5-7]。而本体结构设计方面,诸如分数槽结构、斜极、斜槽、磁极偏移、磁极开槽、辅助槽等本体优化措施[8-11]已获得大量研究,这些方法单独使用或多种组合使用,虽能有效降低永磁电机的齿槽转矩,但进一步优化的空间较小。因此有学者提出了另一种技术途径,即在电机槽口安装磁性槽楔抑制推力波动[12-13]。1908 年德国颁发了第一个磁性槽楔专利,通过在电机转子槽口安装磁性槽楔,降低电机运行时槽口处的磁通变化幅度,进而降低电机附加损耗和推力波动。文献[14]分析了槽楔应用于半封闭槽异步电动机的可能性,实验结果表明磁性槽楔可减少电机损耗、提高电机效率。文献[15]进一步分析磁性槽楔结构参数对感应电机性能影响,研究结果表明磁性槽楔在合适的结构参数条件下可以降低感应电机转矩脉动和损耗。文献[16]研究了永磁电机中磁性槽楔相对磁导率变化对定转子各部分损耗的影响,计算结果表明增加定子槽楔相对磁导率,转子铁心涡流损耗减小,电机的起动转矩降低。文献[17]针对具有半封闭槽的永磁无刷直流发动机,基于场数值计算,研究了磁楔对电机气隙磁场分布的影响,该磁楔几乎可以消除由定子齿引起的气隙高频磁场振荡。文献[18]采用分段斜极和单一磁性槽楔两种措施综合抑制转矩脉动,且电磁转矩较仅考虑磁性槽楔时更加平滑。以上方法主要考虑单一磁性槽楔对旋转电机性能的影响,虽对转矩波动有一定抑制作用,但也同时降低了电磁转矩。

为了进一步提高电机性能,文献[19]利用一种软磁复合槽楔代替传统磁性槽楔,削弱了轴向磁通永磁电机的空载损耗和齿槽转矩。文献[20-21]提出一种新型槽楔,在普通磁性槽楔的基础上铣削沿楔形长度的直空心槽,在空心处填充非磁性导杆,降低齿槽转矩,增加电机鲁棒性。文献[22]提出一种磁性材料和非磁性材料交替叠加的双层或多层槽楔,主要适用于铁路牵引电机,能够有效降低齿槽转矩和推力波动。综上所述,单一磁性槽楔和多层磁性槽楔对电机转矩波动有一定的抑制效果,同时也不同程度上降低了电机的转矩输出,且这些措施均针对旋转电机,在直线电机上并无具体应用。

本文在研究不同材料、尺寸和空间位置分布的单一磁性槽楔对 PMLSM 输出推力和推力波动影响的基础上,提出一种由硬磁和软磁组成的新型复合磁性槽楔结构(CMSW)。对比软磁材料长度和高度在相同位置对电机输出推力和推力波动的影响,从而获得推力最大的复合方案;并以最大推力和最小推力波动为优化目标,基于正交优化法对软磁材料尺寸进行优化,进而对比复合磁性槽楔和单一磁性槽楔的输出推力、推力波动、气隙谐波含量和损耗。研究结果表明,CMSW 可在输出推力基本不变的前提下,有效降低推力波动和电机损耗。

## 1 复合磁性槽楔结构分析

### 1.1 复合磁性槽楔结构

复合磁楔由两种或多种材料组合而成,以加强磁性槽楔对推力波动的抑制效果,并改善单一磁性槽楔电磁性能。目前,旋转电机采用以聚酯纤维纸无碱玻璃布为基材,环氧聚酯酸酐为胶粘剂的 MDB 或铁基软磁 SMC 等复合材料的槽楔,以及磁性材料和非磁性材料组成的槽楔,提高电机的运行性能和鲁棒性,效果优于单一磁性槽楔,但同时也存在转矩降低的问题。

为了使集中绕组 PMLSM 获得较高槽满率,以便于规模化加工生产,初级铁心一般采用直齿结构嵌装成型线圈,并通过分数槽结构即初级槽数和次级永磁极数的非整数配合来降低电机齿槽力,若要进一步抑制推力波动,磁性槽楔技术是一个新的技术途径。因此,本文以分数槽集中绕组 PMLSM 为对象,针对磁性槽楔电机输出推力降低的问题,提出一种新型复合磁性槽楔结构,如图 1 所示。

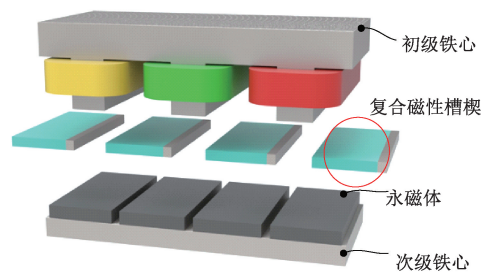



图 1 复合磁性槽楔示意图

Fig. 1 Diagram of composite magnetic slot wedge

新型复合磁性槽楔由软磁材料和硬磁材料左右复合而成,采用高强度树脂胶粘合,镶嵌在电机槽口,增强槽楔的机械强度。硬磁材料采用具有较大矫顽力、高频磁导率的铁氧体材料,可以削弱电机气隙磁密的高次谐波,优化波动正弦性[23-24];软磁材料选择低矫顽力、自身无磁

性、高电阻率的硅钢材料，可以减少电机涡流损耗，同时具有很好的弱磁性能[25]。

### 1.2　单一磁性槽楔结构特性

单一磁性槽楔在旋转电机领域应用广泛，大多使用全封闭槽口的磁性槽楔，使电机在槽口处具有闭口槽的特性[26]。故本文首先分析磁性槽楔的材料、尺寸和空间位置分布对 PMLSM 推力和推力波动的影响，磁性槽楔示意图如图 2 所示。

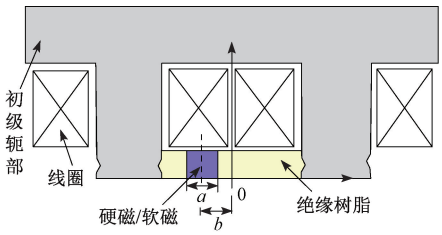
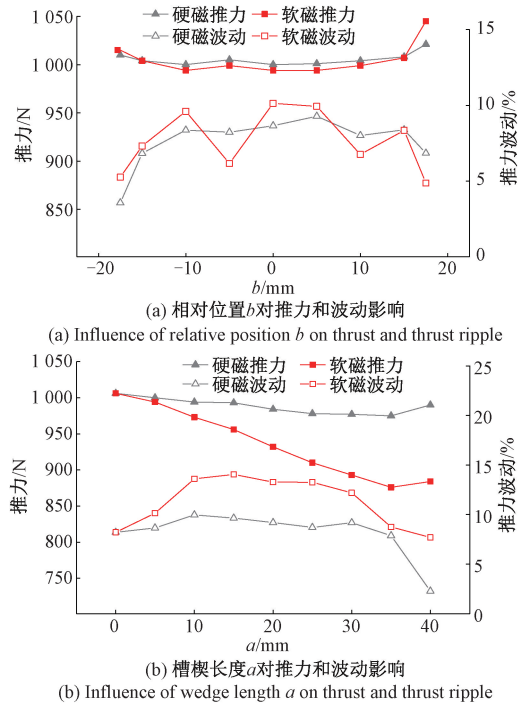



图 2　单一磁性槽楔示意图

Fig. 2　Diagram of single magnetic slot wedge

槽楔位置和尺寸对电机推力性能的影响如图 3 所示。由图 3(a)可知，硬磁和软磁在相同位置时，电机推力变化不明显，软磁在槽口端部位置时，推力大于硬磁，但推力波动无明显规律。从图 3(b)可知，磁性材料尺寸对推力性能的影响较大，且软磁材料的推力降低较大，波动也高于硬磁。可以看出，$a$ 最大时气隙磁密分布更均匀，且推力波动最小；随着 $a$ 长度降低，槽楔漏电抗小，且推力大于全槽楔状态。




(a) 相对位置$b$对推力和波动影响

(a) Influence of relative position $b$ on thrust and thrust ripple

(b) 槽楔长度$a$对推力和波动影响

(b) Influence of wedge length $a$ on thrust and thrust ripple

图 3　槽楔位置及尺寸对电机性能影响

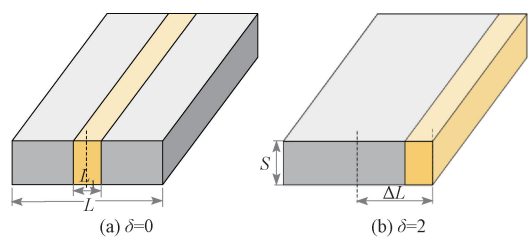
Fig. 3　The influence of position and size of slot wedge on motor performance

### 1.3　复合磁性槽楔结构的参数特性

由图 3 可知，磁性槽楔材料、尺寸和空间位置分布对电机的推力性能有不同程度的影响，以软磁材料在 CMSW 中的相对位置为研究对象，分析软磁材料在槽口右半侧时对电机推力性能的影响，利用式(1)得到相对位置值 $\delta=0,1,2$ 时的 3 种 CMSW 结构。$\delta=0$ 和 2 时的结构示意图如图 4 所示。$\Delta L$ 为槽轴和楔形轴之间的距离，$L$ 为槽楔宽度，$L_1$ 为软磁宽度，$S$ 为软磁槽楔高度。

$$\delta=\frac{2\Delta L}{L-L_1} \tag{1}$$

为了忽略 PMLSM 边端效应对齿槽力的影响，使用有限元法建立电机的周期性边界条件，分析得到了 3 种 CMSW 下推力、齿槽力随 $L_1$ 的变化趋势。图 5 所示为 $\delta=0$、不同 $L_1$ 下，电机的输出推力和推力波动变化。可以看出，推力波动在一定程度上得到了抑制，而电机的推力呈线性下降趋势；$L_1=5$ mm 时推力最大，但相较于无槽楔电机推力降低了 31 N，并非理想的复合结构。图 6 所示为 $\delta=1,2$ 时电机推力和齿槽力峰-峰值随 $L_1$ 变化的趋势图。可以看出，两种复合磁性槽楔齿槽力峰-峰值均增大，推力随着 $L_1$ 增大而下降，$\delta=2$ 时空载反电动势由




(a) $\delta$=0　　(b) $\delta$=2

图 4　复合磁性槽楔

Fig. 4　Composite magnetic slot wedges

304 V 增至 320 V，故 $\delta=1$ 时推力小于 $\delta=2$。

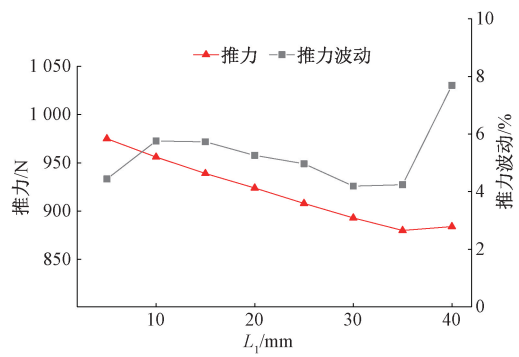



图 5　$\delta=0$ 时推力和波动随 $L_1$ 变化

Fig. 5　Thrust and ripple change with $L_1$ at $\delta=0$

图 7 所示为 $L_1=4$ mm 时，PMLSM 推力和推力波动

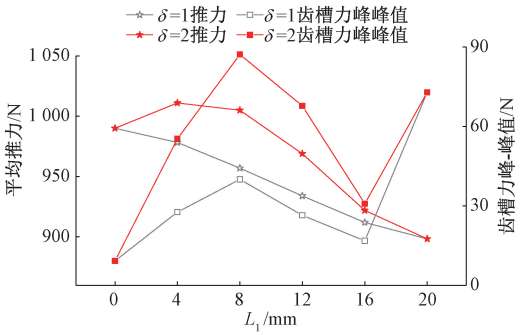



图 6 软磁宽度对推力和齿槽力峰-峰值影响

Fig. 6 Effect of soft magnetic width on peak value of thrust and cogging force

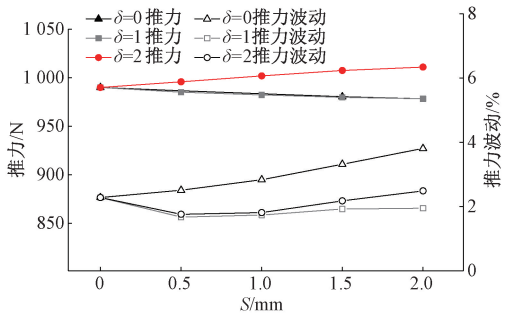



图 7 软磁高度对推力和波动的影响

Fig. 7 Effect of soft magnetic height on thrust and fluctuation

随高度 $S$ 的变化趋势。可以看出,软磁材料高度对电机推力和推力波动影响较大,3 种情况下电机的推力波动都随 $S$ 增大而增大,且 $\delta=0$ 波动最大,$\delta=1$ 最小。$\delta=0$ 和 1 时推力相近,都随 $S$ 增大而减小;而 $\delta=2$ 时推力呈上升趋势。

## 2 复合磁性槽楔的正交优化

由图 7 可知,$\delta=2$ 时电机推力更大,但软磁材料的具体参数无法确定,本节利用正交优化法对 $\delta=2$ 时软磁性槽楔的参数进行优化。以 PMLSM 的槽楔尺寸为设计对象,假设软磁材料的长度为 $T$,取值范围为 0~20 mm,高为 $S$,取值范围为 0~2 mm,截面示意图如图 8 所示。

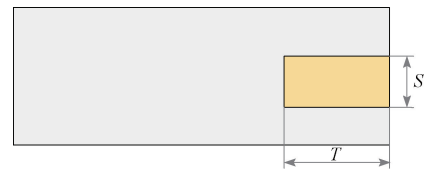



图 8 正交优化示意图

Fig. 8 Orthogonal optimization sketch

### 2.1 正交优化设计

正交优化可降低设计参数的计算量,提高优化过程效率[27]。正交优化思路如图 9 所示。

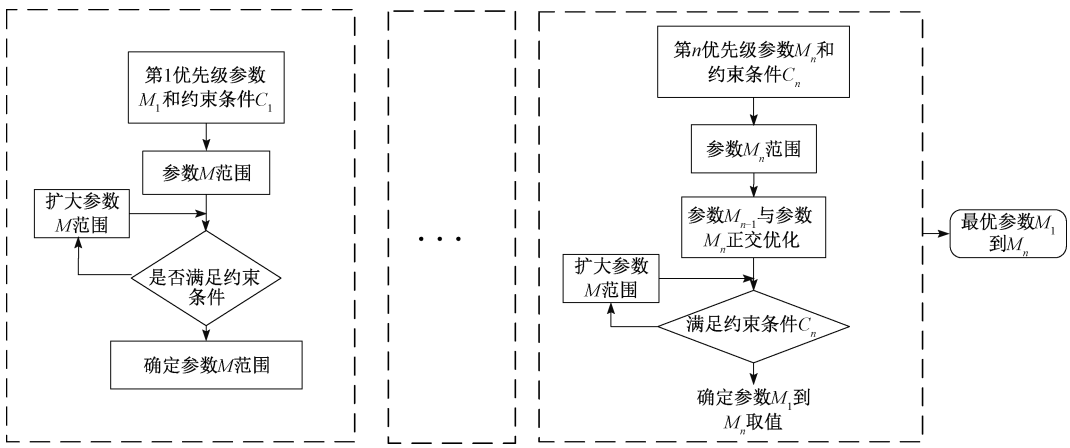



图 9 正交优化流程

Fig. 9 Orthogonal optimization flow char

本文以 PMLSM 的输出推力和推力波动为优化目标,利用正交优化对复合磁性槽楔中软磁材料进行参数优化得到最优结构参数,将 $S$、$T$ 为变量定义为第 1 优先级参数和第 2 优先级参数,详细地划分 $M$ 组和 $N$ 组,其具体的步骤如下。

1)确定第 1 优先级参数及范围。将第 1 优先级参数粗略划分为 $M/4$ 组,第 2 优先级参数取中间值,选择推力和波动最优的参数范围。

2)确定第 2 优先级参数及范围。将第 1 优先级参数详细划分为 $M/4$ 组,第 2 优先级参数粗略划分为 $N/4$ 组,进行正交优化,并选择推力和波动最优的参数范围。

3)确定第 1 优先级参数取值数据,将第 2 优先级参数详细划分为 $N/5$ 组,再次进行正交优化,依次循环,直到确定最优参数 $S$ 和 $T$ 的值。

表 1 为传统方法和多方法优化的复合磁性槽楔长高尺寸模型数量对比。

**表 1　不同优化方法的模型数量对比**

**Table 1　Number of models with different optimization methods**

| | | 模型数量 | $S$ 分段数 | $T$ 分段数 |
|---|---|---|---|---|
| 传统优化方法 | | $N_1=M\times N$ | $M$ | $N$ |
| 多方法组合优化 | 第 1 步 | $M/4$ | $M/4$ | 1 |
| | 第 2 步 | $M\times N/4$ | $M/4$ | $N/4$ |
| | 第 3 步 | $N/5$ | 1 | $N/5$ |
| | | $N_2=M/4+M\times N/4+N/5$ | | |

## 2.2　正交优化过程

表 2 为利用正交优化法得到不同软磁材料尺寸的有限元分析结果。可以看出，PMLSM 在软磁性槽楔参数 $S=2$ mm，$T=5$ mm 时推力更大。

**表 2　不同尺寸下电机推力和推力波动**

**Table 2　Thrust and ripple of motor in different sizes**

| | 推力/推力波动 | | | |
|---|---|---|---|---|
| $S/T$ | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 0.5 | 998/2.24 | 989/2.11 | 980/2.15 | 974/2.26 |
| 1 | 1 004/2.33 | 988/1.63 | 964/2.33 | 954/2.58 |
| 1.5 | 1 009/2.52 | 989/1.91 | 946/2.68 | 927/2.93 |
| 2 | 1 013/2.50 | 991/1.80 | 932/3.21 | 898/3.03 |

为了进一步确定 $T$ 的参数，分析 $S=2$ mm，$T=1\sim7$ mm 时电机推力、推力波动和齿槽力变化，图 10 和 11 所示为不同 $T$ 下齿槽力波形和推力变化曲线。可以看出，随着 $L_1$ 长度增大，齿槽力峰值增大由 13 N 增至 83 N，推力先增大后减小，在 $L_1=5$ mm 时推力最大，为 1 013 N，而推力波动在 $L_1=2$ mm 时最小。当 $L_1=2$ mm 时，推力为 1 004 N，相较于无槽楔时推力仅降低 2 N，并且推力波动减低 79.4%；相较于单一磁性槽楔时推力提高 14 N，推力波动降低 26.5%。

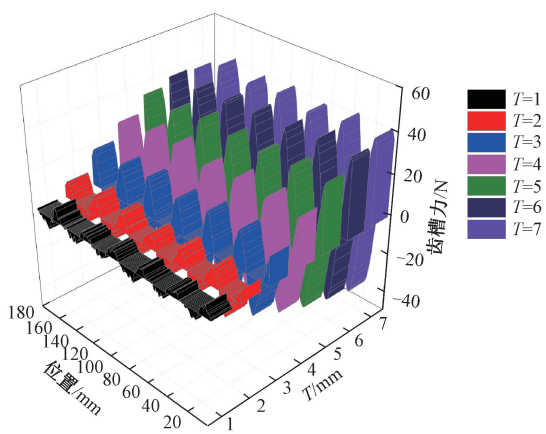



图 10　齿槽力波形

Fig. 10　Cogging force waveform

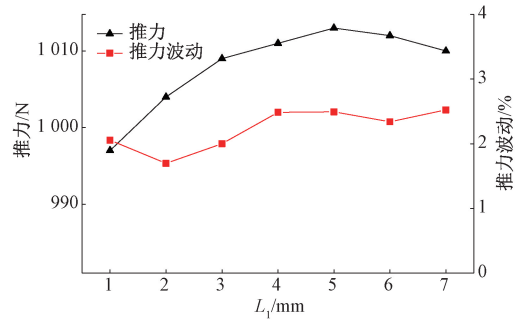



图 11　推力和推力波动随 $L_1$ 变化趋势

Fig. 11　The trend of thrust and fluctuation with $L_1$

# 3　电磁性能分析

## 3.1　气隙磁密和损耗

为了验证复合磁性槽楔的合理性，在电机参数保持不变的条件下对复合磁性槽楔 $L_1=2,5$ mm 和单一磁性槽楔电机的气隙磁密进行傅里叶分解，获得其谐波含量对比，如图 12 所示。可以看出，3 种情况的基波含量基本一致，而两种复合磁性槽楔降低了气隙磁密的谐波含量，尤其是 7、8、9 等高次谐波抑制效果显著。其中 $L_1=2$ mm 的复合磁性槽楔相较于单一磁性槽楔各次谐波含量均有不同程度的降低。图 13 所示为 3 种槽楔的永磁损耗和铁心损耗对比。可以看出，CMSW 有效降低了 PMLSM 永磁损耗，而铁耗基本不变。

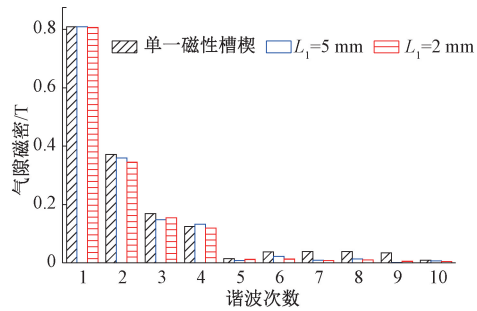



图 12　气隙磁密谐波含量对比

Fig. 12　Comparison of harmonic content of air gap magnetic density

## 3.2　推力分析

图 14 所示为电机在 7.07 A 电流，50 Hz 频率时，分别安装单一硬磁性槽楔和软磁性槽楔、以及 $L_1=5,2$ mm 复合磁性槽楔的推力波形。单一磁性槽楔电机的推力波动得到了一定程度的抑制，但导致推力的降低，其中软磁性槽楔推力降低了 122 N，推力波动小幅降低；硬磁槽楔推力降低了 16 N，推力波动明显降低。而电机采用复合磁性槽楔时，两种 CMSW 的推力波动得到大幅抑制，推力均大于单一磁性槽楔。

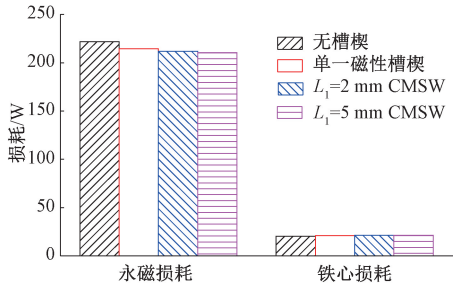



图 13 损耗对比

Fig. 13 Loss contrast

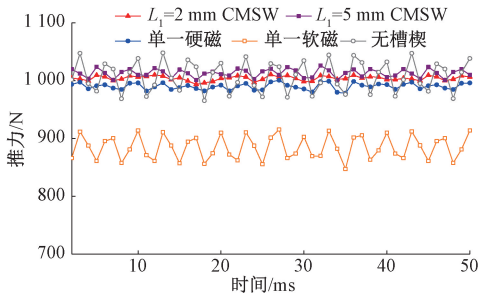



图 14 各种槽楔结构下推力对比

Fig. 14 Thrust contrast of various slot wedge structures

通过以上分析可知,单一磁性槽楔中硬磁抑制推力波动效果优于软磁;复合磁性槽楔 $L_1$=5 mm 时相较与硬磁性槽楔推力提高 23 N,波动仅差 0.22%;$L_1$=2 mm 时相较与硬磁性槽楔推力提高 14 N,波动降低 26%。可以看出,复合磁性槽楔改善了单一磁性槽楔降低推力的问题,且合适的配比尺寸下推力波动抑制效果优于单一磁性槽楔。

图 15 和 16 所示分别对比了 $L_1$=2,5 mm 和单一磁性槽楔在不同电流下推力和推力波动变化。当相电流小于 5 A 时,3 种槽楔推力相差不大;相电流为 5~13 A 时,推力相差明显。$L_1$=5 mm、相电流小于 13 A 时,推力处于三者最高,同时推力波动也最大;$L_1$=2 mm 推力适中,推力波动最小;单一磁性槽楔推力最小,推力波动适中。相电流大于 13 A 时,$L_1$=2 mm 推力最大,推力波动仍是最小,在 11 A 时达到最小,$L_1$=5 mm 推力波动小于单一磁性槽楔。因此电机无论处于未饱和状态还是过饱和状态都可以选择 $L_1$=2 mm,能同时保证输出推力和推力波动性能,电机处于未饱和状态且要求大推力的情况时可以选择 $L_1$=5 mm。与单一磁性槽楔相比,两种复合磁性槽楔都是可选择的高性价比方案。

## 4 结 论

本文将软磁性材料和硬磁性材料相结合,提出一种新型复合磁性槽楔,有效抑制了永磁直线电机的推力波动。对比分析了单一磁性槽楔的材料、尺寸和空间位置

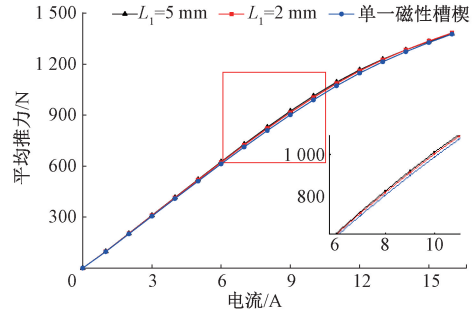



图 15 三种槽楔推力对比

Fig. 15 Thrust comparison between three slot wedge

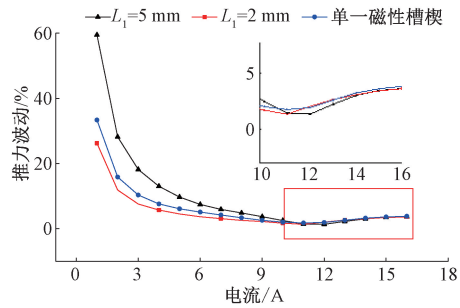



图 16 三种槽楔推力波动对比

Fig. 16 Thrust ripple comparison between three slot wedge

分布对电机性能的影响,提出新型复合磁性槽楔新结构。分析复合磁性槽楔的相对位置值 $\delta$ 不同时,软磁材料尺寸参数对输出推力和推力波动的影响,确定最佳复合结构。分别以推力最大和推力波动最小为目标,采用正交法对软磁性槽楔的尺寸进行优化,为不同的电机应用场合提供选择。

本文利用有限元法对比单一磁性槽楔的材料、尺寸和空间位置分布对输出推力和推力波动的影响,硬磁材料对推力波动有较好的抑制效果,软磁材料在槽口端部位置对推力影响较小。提出了新型复合磁性槽楔结构,分析了 3 种不同复合方案的电磁特性,随软磁材料长度的增大,输出推力呈下降趋势;随软磁材料高度的增加,输出推力呈现先降低而后上升的趋势。以最大输出推力和最小推力波动为优化目标,利用正交优化法对软磁材料的配合尺寸进行优化。可以看出,以输出推力最大为目标时,相比无槽楔结构,CMSW 的输出推力增大 7 N,推力波动降低 69.6%;相比单一磁性槽楔结构,CMSW 的输出推力增大 23 N,推力波动降低 0.22%;以推力波动最小为目标时,相较于无槽楔结构,CMSW 的输出推力仅降低 2 N,而推力波动降低 79.4%,齿槽力降低 47 N;相比单一磁性槽楔结构,CMSW 的输出推力提高 14 N,推力波动降低 26%。重点研究了新型复合磁性槽楔 PMLSM 的推力波动和损耗特性。后续有待进一步研究新型复合磁性槽楔 PMLSM 的温度场特性和槽楔应力特性等,为新

型槽楔的工艺改进和工程应用奠定基础。

## 参考文献


[1] 宋俊材,董菲,赵吉文,等. 基于重心领域算法的无铁心永磁同步直线电机优化设计研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3594-3601,3688.
SONG J C, DONG F, ZHAO J W, et al. Design optimization research of air-core permanent magnet synchronous linear motor based on gravity neighborhood center algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3594-3601,3688.

[2] 董家臣,高钦和,陈志翔,等. 考虑电流环动态响应的永磁直线同步电机新型线性自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):2436-2448,26.
DONG J CH, GAO Q H, CHENG ZH X, et al. New LADRC design for permanent magnet linear synchronous motor considering dynamic response of current loop[J]. Proceedings of the CSEE,2019, 39(8): 2436-2448,26.

[3] 陈自然,赵有祥,刘小康,等. 基于检测单元的永磁同步直线电机位置检测新技术[J]. 仪器仪表学报,2020,41(12):48-55.
CHENG Z R, ZHAO Y X, LIU X K, et al. A novel position detection technique for the permanent magnet synchronous linear motor using position detection units[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 48-55.

[4] 许孝卓,汪旭东,封海潮,等. 分数槽集中绕组永磁同步直线电机磁场解析计算[J]. 电工技术学报,2015,30(14): 122-129.
XU X ZH, WANG X D, FENG H CH, et al. Magnetic field calculation of the permanent magnet synchronous linear motor with fractional-slot concentrated windings [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 122-129.

[5] 李宏玉,丁善峰,佘超,等. 基于滑模变结构的永磁同步电机控制研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(9):112-116.
LI H Y, DING SH F, SHE CH, et al. Study on permanent magnet synchronous motor control based on sliding mode controller [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(9): 112-116.

[6] 曹兆锦. 基于 MRAS 的永磁同步电机无传感器滑模控制[J]. 电子测量技术,2019,42(12):37-41.
CAO ZH J. Sensorless sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on MRAS [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(12): 37-41.

[7] HUANG W, HUA W, ZHU X, et al. Comparison of cogging torque compensation methods for a flux-switching permanent magnet motor by harmonic current injection and iterative learning control [C]. 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020: 1971-1977.

[8] 黄金霖,张国政,周克良. 新型永磁调磁式磁齿轮的设计与优化[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(7): 187-195.
HUANG J L, ZHANG G ZH, ZHOU K L. Design and optimization of a novel coaxial magnetic gear for stationary permanent magnet ring [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 187-195.

[9] LIU C S, HWANG J C, CHENG C P. Design of permanent magnet synchronous motor with low cogging torque [C]. 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA, 2010:1083-1087.

[10] 郭有权,司纪凯,司高杰,等. 磁极偏移法抑制表面-内置式永磁转子同步电机齿槽转矩分析[J]. 煤炭学报,2017,42(8):2181-2189.
GUO Y Q, SI J K, SI G J, et al. Cogging torque suppression of surface-mounted and interior hybrid PMSM by magnet shifting method [J]. Journal of China Coal Society,2017,42(8):2181-2189.

[11] 黄克峰,李槐树,周羽. 利用辅助槽削弱齿槽力的方法研究[J]. 电机与控制学报,2014,18(3):54-59,66.
HUANG K F, LI H SH, ZHOU Y. Method research for reducing the cogging force by auxiliary slots[J]. Electric Machines and Control, 2014,18(3): 54-59,66.

[12] ABDI E,ABDI S, MCMAHON A, et al. Investigation of magnetic wedge effects in large-scale BDFMs [C]. Renewable Power Generation Conference (RPG 2013), 2013.

[13] 刘治鑫,王东,余中军,等. 基于磁性槽楔修正模型的感应电动机气隙磁场的分布磁路法[J]. 电工技术学报,2019,34(15):3112-3123.
LIU ZH X, WANG D, YU ZH J, et al. Distributed magnetic circuit method for calculating air-gap magnetic field of induction motor based on modified model considering the effect of magnetic slot wedges [J]. Transactions China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3112-3123.

[14] VERUCCHI C, RUSCHETTI C, GIRALDO E, et al. Efficiency optimization in small induction motors using magnetic slot wedges [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152:1-8.

[15] LI K, CHENG G Y, SUN X D, et al. Performance optimization design and analysis of bearingless induction motor with different magnetic slot wedges[J]. Results in

Physics, 2019, 12:349-356.
[16] 黄东洙,李伟力,王耀玉,等. 磁性槽楔对永磁电机转子损耗及温度场影响[J]. 电机与控制学报,2016,20(1):60-66.
HUANG D ZH, LI W L, WANG Y Y, et al. Influence of magnetic slot wedge on rotor losses and temperature field of PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(1): 60-66.
[17] AFANASYEV A A, EFIMOV V V, TOKMAKOV D A. The application of magnetic wedges in the slots of magnetoelectric valve engines[J]. Russian Electrical Engineering, 2018, 89(7):441-444.
[18] 张守首,郭思源. 考虑分段斜极和磁性槽楔的永磁同步电机磁场解析方法[J]. 电工技术学报,2019,34(1):11-22.
ZHANG SH SH, GUO S Y. analytical magnetic field method of permanent magnet synchronous machine considering step-skewed magnets and magnetic slot wedge[J]. Transactions China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 11-22.
[19] DONATO G D, CAPPONI F G, CARICCHI F. No-load performance of axial flux permanent magnet machines mounting magnetic wedges[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012,59(10): 3768-3779.
[20] TESSAROLO A, LUISE F, BORTOLOZZI M, et al. A new magnetic wedge design for enhancing the performance of open-slot electric machines[C]. Electrical Systems for Aircraft, Railway & Ship Propulsion. IEEE, Italy: Bologna, 2012.
[21] TESSAROLO A, LUISE F, MEZZAROBBAM, et al. Special magnetic wedge design optimization with genetic algorithms for cogging torque reduction in permanent magnet synchronous machines[C]. Electrical Systems for Aircraft, Railway & Ship Propulsion, IEEE, 2012.
[22] HUAI C L, SOOYOUNG C, HYUN S H, et al. Comparative analysis of magnetic slot wedges design for increasing performance of railway traction motor[J]. ElectrEng Technol, 2017, 12(6): 2411-2418.
[23] CURIAC R, LI H. Improvements in energy efficiency of induction motors by the use of magnetic wedges[C]. Petroleum & Chemical Industry Conference, IEEE, 2011.
[24] YANG X, LI B Z, JIN W, et al. Design and performance analysis of magnetic slot wedge application in double-fed asynchronous motor-generator by finite-element method[J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(7): 1040-1047.
[25] AUGUSTO D N, ONORATO H, EZIO S, et al. The use of soft magnetic materials for improving flux weakening capabilities of axial flux PM machines[C]. Industry Applications Conference. IEEE, 2000:202-207.
[26] MADESCU G, MOT M, GRECONICI M, et al. Performances analysis of an induction motor with stator slot magnetic wedges[C]. International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), IEEE, 2016.
[27] 李静. 双边错齿平板型永磁同步直线电机的优化设计研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
LI J. Optimization design of double-side permanent magnet synchronous double-side permanent magnet synchronous linear motor adopting staggering primaries structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautic and Astronautics,2018.

## 作者简介

**许孝卓**,2003 年于焦作工学院获得学士学位,2006 年、2016 年于河南理工大学分别获得硕士学位和博士学位,现为河南理工大学副教授,主要研究方向为直线电机理论及控制。
E-mail:xxz@ hpu. edu. cn

**Xu Xiaozhuo** received his B. Sc. degree from Jiaozuo Institute of Technology in 2003, M. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2006, and Ph. D. degree from Henan Polytechnic University in 2016, respectively. Now he is an associate professor in Henan Polytechnic University. His main research interests include linear motor theory and control.

**尚泽健**,2019 年于河南理工大学万方科技学院获得学士学位,现为河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为电机电器及其控制。
E-mail:867906002@ qq. com

**Shang Zejian** received his B. Sc. degree from Wan Fang College of Science & Technology Henan Polytechnic University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Henan Polytechnic University. His main research interests include motor and electric appliances and control.

**杜宝玉**(通信作者),2002 年于焦作工学院获得学士学位,2006 年于河南理工大学获得硕士学位,现为河南理工大学讲师,主要研究方向为智能装备直驱技术及其控制。
E-mail:dbyhpu@ 163. com

**Du Baoyu** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Jiaozuo Institute of Technology in 2002, M. Sc. degree from Henan Polytechnic University in 2006, respectively. Now she is a lecturer in Henan Polytechnic University. Her main research interests include intelligent equipment direct drive technology and its control.