

张玉峰,张婷,付媛,等. 带式输送机用初级分段直线电机法向悬浮力的分析与优化[J]. 西安科技大学学报,2026,46(2): 387-396.

ZHANG Yufeng, ZHANG Ting, FU Yuan, et al. Analysis and optimization of normal suspension force for primary segmented linear motors used in belt conveyor[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2026, 46(2): 387-396.

## 带式输送机用初级分段直线电机 法向悬浮力的分析与优化

张玉峰,张婷,付媛,王晨亮,樊泽涛,马钰航  
(西安科技大学 电气与控制工程学院,陕西 西安 710054)

**摘要:**针对传统带式输送机阻力高、摩擦损耗大等技术难题,提出采用初级分段永磁直线电机辅助驱动带式输送机的方案,并重点研究典型永磁体阵列的法向悬浮力及其受参数影响规律:推导永磁体阵列平行充磁下法向悬浮力的解析表达式,借助有限元仿真分析平行永磁体、矩形 Halbach 及弧形 Halbach 3 种阵列对法向悬浮力及其波动的影响规律;进而研究 3 种永磁体阵列下极弧系数、初级绕组单元间距对法向悬浮力的影响规律;最后,制作优化设计的原理性验证样机并进行相关试验。结果表明:永磁体阵列、极弧系数及绕组单元间距对法向悬浮力及其波动有较大影响;相对而言,优化后的矩形 Halbach 阵列的法向悬浮力性能最佳;其平均法向悬浮力最大,幅值相较于平行永磁体阵列和弧形 Halbach 阵列分别提升了 154.62% 和 53.63%,法向悬浮力相对平行永磁体阵列降低 9%。矩形 Halbach 阵列的初级分段式永磁直线电机能够为带式输送机机械摩擦损耗大与皮带受力不均断裂问题提供新的解决方案。

**关键词:**电机与电器;永磁同步直线电机;有限元仿真;悬浮力;带式输送机

中图分类号:TM 359.4

文献标志码:A

文章编号:1672-9315(2026)02-0387-10

DOI:10.13800/j.cnki.xakjdx.2026.0214

## Analysis and optimization of normal suspension force for primary segmented linear motors used in belt conveyor

ZHANG Yufeng, ZHANG Ting, FU Yuan, WANG Chenliang, FAN Zetao, MA Yuhang

(College of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To address the issues of high resistance and significant frictional losses in conventional belt conveyors, a novel approach employing a primary segmented permanent magnet linear motor for auxiliary driving was proposed. This study focused on investigating the normal levitation force of typical permanent magnet arrays and the influence of key parameters. An analytical expression for the normal levitation force generated by parallel-magnetized permanent magnet arrays was derived, and the effects of three array configurations—parallel permanent magnet, rectangular Halbach, and arc-shaped Halbach—on the normal levitation force and its fluctuation were analyzed via finite element simulation. Furthermore, the impacts of the pole arc coefficient and the spacing between primary winding units on the normal levitation force under these three array configurations were examined. Finally, a prototype based on op-

收稿日期:2025-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52177056);陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-368)

通信作者:张玉峰,男,新疆伊宁人,博士,副教授,E-mail:xkdzhangyufeng@xust.edu.cn

timized design was fabricated and subjected to experimental validation. The results indicate that: The permanent magnet array type, pole arc coefficient, and winding unit spacing significantly affect the normal levitation force and its fluctuation. Relatively speaking, the optimized rectangular Halbach array exhibits superior normal levitation performance, yielding the highest average normal levitation force, with the amplitude increased by 154.62% and 53.63% relatively compared with that of the parallel permanent magnet and the arc-shaped Halbach arrays and the normal levitation force fluctuation reduced by 9% compared with that of the parallel permanent magnet array. The primary segmented permanent magnet linear motor with a rectangular Halbach array offers a promising solution to the problems of excessive mechanical friction losses and uneven belt stress-induced fractures in belt conveyor systems.

**Key words:** electric machines and electric apparatus; permanent magnet synchronous linear motor; finite element simulation; levitation force; belt conveyor

## 0 引言

带式输送机作为一种重要的散装物料运输设备,在煤炭、物流、生产等行业应用广泛<sup>[1-4]</sup>。传统带式输送机仅依靠驱动滚筒与皮带间的摩擦力来牵引输送带运动,在中间环节采用托辊支撑输送带与物料重量并减小皮带运动带来的摩擦阻力和磨损,但效果有限。传统研究表明,以托辊为支承的传统带式输送机中,托辊的能量消耗能达到整个输送机总能耗的70%<sup>[5-7]</sup>,存在阻力高、耗能大、动力分布不均等不足<sup>[8-9]</sup>。为此,近年来研究人员不断探索解决方案,胡坤、王仲勋等采用悬挂结构来减少系统的传动阻力,实现低阻力、低能耗运行,但输送带仍面临受力不均、输送带易断裂的问题<sup>[10-11]</sup>;ZHOU等采用多电机分布式直接驱动方式来调节区域驱动力的大小,避免驱动力集中导致速度和张力剧烈波动,但机械摩擦损耗没有减少,整体效率难以提升<sup>[12-13]</sup>。

磁悬浮技术利用磁场斥力克服重力,能实现无接触支撑,具有无摩擦、低能耗、运行高速等显著特点<sup>[14-15]</sup>。目前,基于磁悬浮机理的直线电机已广泛用于交通运输,美国 Lawrence Livermore National Laboratory 提出了应用永磁材料和不同拓扑结构来提升浮阻比的 Inductrack 磁悬浮方案<sup>[16]</sup>;邵佳丽等研究了高速度磁悬浮列车的线性电机磁场特性<sup>[17]</sup>;QIU等研究了永磁磁悬浮系统的悬浮机理和转向架的耦合运动规律<sup>[18]</sup>;GAO等研究了悬挂式永磁磁悬浮列车中线性电机产生的磁场<sup>[19]</sup>;此外,学者也在探索其他磁悬浮结构,如ZHOU等探讨了垂直环形 Halbach 永磁转子接近导电板时的电磁力<sup>[20]</sup>。

永磁同步直线电机通过初、次级间的磁场作用可实现磁悬浮,具有结构简单、推力密度大、运行平稳、噪声小等优势,已成为研究热点。学者对永磁同步直线电机进行了较为深入的研究,主要集中在机理分析、结构优化和控制策略等方面。TAN等针对永磁直线电机推导了法向力解析表达式、揭示了法向力的影响因素以及耦合作用下法向力脉动变化规律<sup>[21-22]</sup>;许孝卓等针对永磁同步直线电机的电磁力特性进行计算与对比<sup>[23]</sup>;王永刚探究了具体参数对永磁直线同步电机推力的影响<sup>[24]</sup>;SUN等提出了一种最小单元绕组分段的拓扑结构解决电枢反应磁场失真问题<sup>[25]</sup>;ZHANG等提出了一种用于两相绕组分段的永磁同步直线电动机空间矢量调制技术<sup>[26]</sup>;KWON等提出了永磁同步直线电机的电机参数识别方法和法向力纹波抑制方法<sup>[27]</sup>。目前永磁直线电机法向力的研究主要集中在法向相互吸引产生的悬浮力,对法向相互排斥产生的悬浮力关注较少,后续提到的法向悬浮力均指相互排斥产生的悬浮力。

综上所述,输送机摩擦损耗大的问题有待解决;法向悬浮力在平行充磁的永磁体阵列结构下的解析模型有待分析;现有直线电机法向悬浮力未综合考虑初级绕组单元间距、永磁体拓扑结构因素的影响。为此基于带式输送机的特点,以所提出的一种带式输送机辅助驱动用无铁心初级分段式永磁同步直线电机(Ironless Segmented Permanent Magnet Synchronous Linear Motor, IS-PMSLM)为对象,对法向悬浮力的影响因素及其规律进行探究,并对法向悬浮力及其波动进行优化。

## 1 IS-PMSLM 辅助驱动带式输送机架构

所提的 IS-PMSLM 辅助驱动带式输送机的架

构如图 1 所示。从图 1 可以看出,输送机两端为主驱动电机,为带式输送机的运行提供主要动力。起支撑和辅助驱动作用的 IS-PMSLM 由初级和次级构成,初级由支架支撑固定在输送带下方,电机每段初级绕组由若干绕组单元构成,可根据输送机长度调整,为简化计算每段初级绕组包含 2 个基本单元;次级为与输送带复合一体的永磁体阵列;防护托辊用于重载支撑和保护。初级和次级间的磁场作用产生托举输送带及物料的法向悬浮力以及辅助推动力。

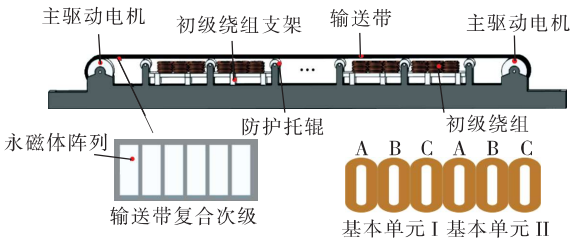


图 1 IS-PMSLM 辅助驱动带式输送机架构

Fig. 1 Structure of belt conveyor assisted by IS-PMSLM

## 2 IS-PMSLM 法向悬浮力解析

### 2.1 IS-PMSLM 基本单元模型

IS-PMSLM 由多个基本单元组成,为了简化分析,构建其基本单元的模型,如图 2 所示。

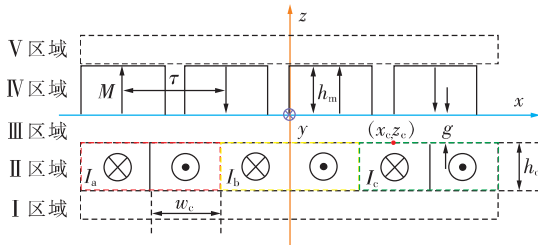


图 2 IS-PMSLM 平行永磁体磁场基本单元简化模型

Fig. 2 Simplified model of IS-PMSLM parallel permanent magnet field basic unit

模型可分为 5 个区域,区域 I 为输送带及上部空气域,区域 II 为永磁体阵列区,区域 III 为气隙,区域 IV 为初级绕组,区域 V 是支架与下部空气域。区域 I 和区域 V 为高磁阻区域。 $h_m$  为永磁体厚度; $g$  为气隙长度, $m$ ; $h_c$  为初级绕组沿  $Z$  轴方向的高度, $m$ ; $\tau$  为极距, $m$ ; $I_a, I_b, I_c$  分别为初级绕组三相电流, $A$ ;永磁体充磁方向为沿  $Z$  轴方向 NS 交替; $M$  为永磁体磁化强度, $A/m$ ; $w_c$  为初级单相绕组沿  $X$  轴方向的长度, $m$ ; $(x_c, z_c)$  为初级绕组相对于 NS 充磁阵列永磁体的参考点坐标。

### 2.2 IS-PMSLM 法向悬浮力分析

#### 2.2.1 永磁体法向磁感应强度分析

假设 IS-PMSLM 基本单元次级足够长,磁场周期为  $T$ ,则  $T = 2\tau$ <sup>[28]</sup>。此时, $M$  沿  $Z$  轴方向分量可表示为

$$M_z = \begin{cases} +\frac{B_r}{\mu_0}, & 0 \leq x < \tau \\ -\frac{B_r}{\mu_0}, & \tau \leq x < 2\tau \end{cases} \quad (1)$$

式中  $B_r$  为永磁体剩磁强度, $T$ ; $\mu_0$  为真空磁导率, $H/m$ 。

将  $M_z$  进行傅里叶变换后可得

$$M_z(x) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4B_r}{\mu_0 \pi n} \sin\left(\frac{\pi n x}{\tau}\right) \quad (2)$$

式中  $n$  为谐波的阶数。

设标量磁位  $\phi_m$ , $\nabla$  为拉普拉斯算子。满足  $\nabla^2 \phi_m = \nabla \cdot M$ ,由分离变量法可得

$$\phi_m(x, z) = -\frac{B_r \tau}{\mu_0 \pi^2} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} (1 - e^{-\frac{n\pi h_m}{\tau}}) e^{\frac{n\pi z}{\tau}} \sin\left(\frac{n\pi x}{\tau}\right) \quad (3)$$

永磁体阵列沿  $Z$  轴的磁感应强度可表示为

$$B_z(x, z) = -\mu_0 \frac{\partial \phi_m}{\partial z} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2B_r}{n\pi} (1 - e^{-\frac{n\pi h_m}{\tau}}) e^{-\frac{n\pi |z|}{\tau}} \sin\left(\frac{n\pi x}{\tau}\right) \quad (4)$$

#### 2.2.2 基本单元法向悬浮力分析

考虑到 IS-PMSLM 的法向悬浮力由永磁体阵列磁场和初级绕组励磁磁场相互作用产生,假设初级绕组中沿  $Y$  轴方向流入的电流为  $I_y$ ,永磁体相对于初级绕组沿  $X$  方向移动。IS-PMSLM 的法向悬浮力大小可由磁场梯度计算得到

$$F_z = I_y \int_{x_c - w_c/2}^{x_c + w_c/2} \int_{z_c - h_c}^{z_c} \frac{\partial B_z(x, z)}{\partial x} dx dz \quad (5)$$

其中被积分式可具体表示为

$$\frac{\partial B_z(x, z)}{\partial x} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{2B_r}{\tau} (1 - e^{-\frac{n\pi h_m}{\tau}}) e^{-\frac{n\pi |z|}{\tau}} \cos\left(\frac{n\pi x}{\tau}\right) \quad (6)$$

求解式(5)和(6)即可得到法向悬浮力的表达式为

$$F_z = I_y \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} K_n \quad (7)$$

其中, $K_n$  具体表达式为

$$\frac{4B_r \tau}{n^2 \pi^2} (1 - e^{-\frac{n\pi h_m}{\tau}}) \cos\left(\frac{n\pi x_c}{\tau}\right) \sin\left(\frac{n\pi w_c}{2\tau}\right) \left(e^{\frac{n\pi z_c}{\tau}} - e^{-\frac{n\pi(z_c - h_c)}{\tau}}\right) \quad (8)$$

由表达式(7)和表达式(8)可知,当充磁方向固定时,法向悬浮力受电流  $I_y$ 、初级绕组宽度  $w_c$ 、高度  $h_c$ 、永磁体厚度  $h_m$ 以及极距  $\tau$  的影响。

### 3 IS-PMSLM 结构参数对法向悬浮力的影响分析

#### 3.1 IS-PMSLM 有限元模型

基于物理模型,利用有限元计算分析可得到更详细的法向悬浮力分布规律。考虑到带式输送机辅助驱动用 IS-PMSLM 架构中次级与输送带复合

一体,构建具有 2 个基本单元的单段初级绕组的 IS-PMSLM 模型,如图 3 所示。

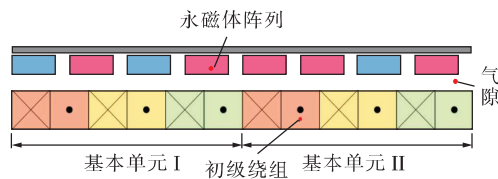


图 3 IS-PMSLM 有限元仿真模型

Fig. 3 IS-PMSLM finite element simulation model

IS-PMSLM 主要参数见表 1。

表 1 IS-PMSLM 主要参数

Table 1 Main parameters of IS-PMSLM

参数	初级长度 /mm	电机厚度 /mm	额定电流 /A	气隙长度 /mm	段间距离 /mm	永磁体长度 /mm	永磁体厚度 /mm	每槽导体数	并联支路数
数值	192	70	5	2	30	21.5	8	170	1

IS-PMSLM 的永磁体阵列产生恒定磁场,初级绕组通入三相交流电流后产生周期变化的磁场,2 个磁场在气隙中相互作用,可产生纵向的悬浮力与横向的推力。主要探究 IS-PMSLM 法向悬浮力及其受参数的影响规律,不对横向推力进行分析。

#### 3.2 永磁体结构对法向悬浮力的影响分析

永磁体阵列的充磁方式、永磁体形状等都会对法向悬浮力产生影响。选择 3 种常见的永磁体阵列(图 4)展开法向悬浮力影响因素分析。

图 4 中,(a)为矩形永磁体阵列,采用平行充磁方式,NS 极交替排列;(b)为矩形 Halbach 永磁体阵列,可实现单侧磁场的自屏蔽,以及另一侧的磁场叠加增强,提高磁场利用率<sup>[29]</sup>; (c)为弧形 Halbach 永磁体阵列,在增强磁场的同时,能够进一步改善永磁体磁密。

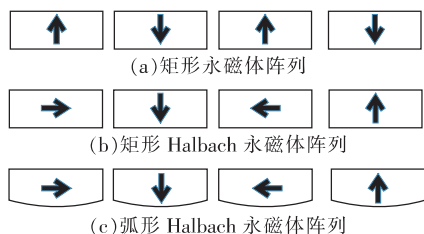


图 4 永磁体阵列拓扑图

Fig. 4 Permanent magnet array topology diagram

在仅有永磁体阵列磁场作用下,3 种永磁体阵列的磁密及磁力线云图有限元仿真结果如图 5 所示。

图 5(a)所示矩形永磁体阵列的磁力线集中分

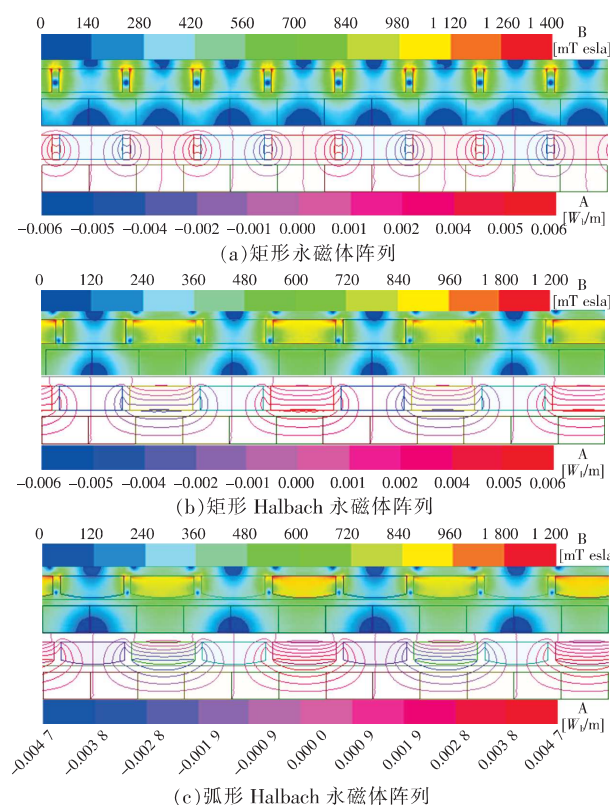


图 5 3 种典型永磁体阵列的磁场分布

Fig. 5 Magnetic field distribution diagrams of three typical permanent magnet arrays

布在相邻永磁体的端部,由永磁体边端向中心快速衰减。Halbach 阵列的磁力线主要集中在阵列中心,覆盖面积大,分布均匀,衰减缓慢。

3 种永磁体阵列下初级绕组的相反电动势及其谐波分析如图 6 所示。相较于平行充磁的矩形

永磁体阵列, Halbach 阵列的反电势幅值有所减小,同时也提高了反电势波形的正弦度。

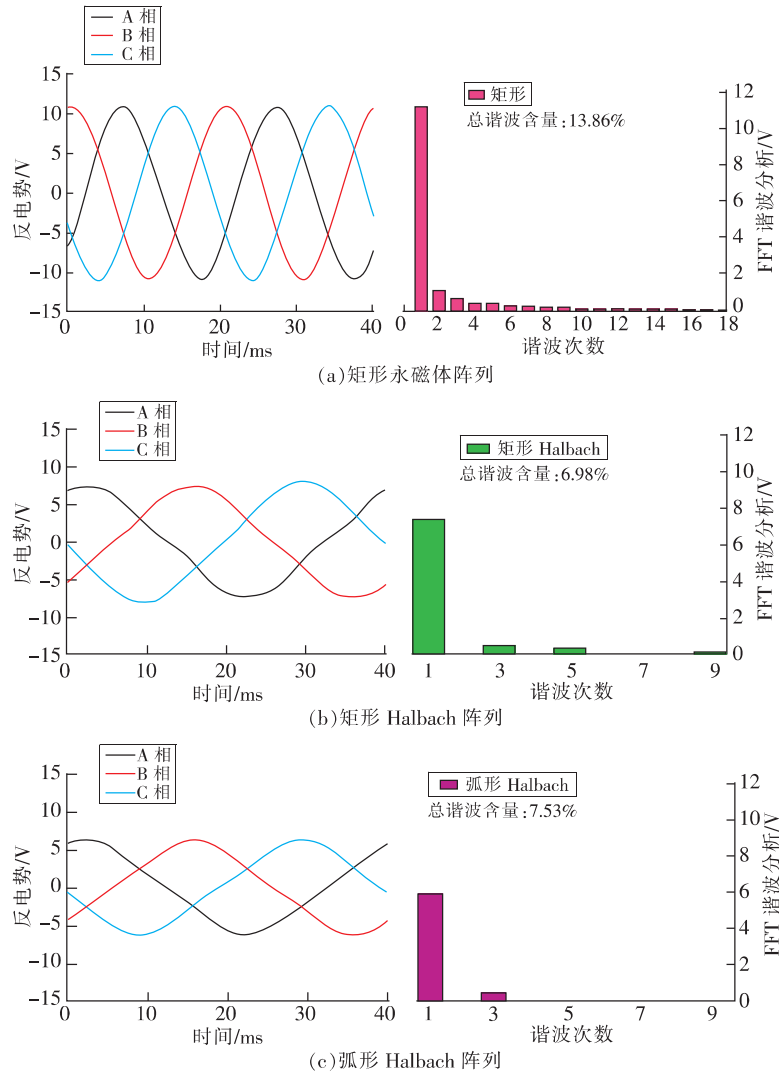


图 6 3 种典型永磁体阵列的初级绕组反电势波形及谐波分析

Fig. 6 Waveform and harmonic analysis diagrams of primary winding counter electromotive force of three typical permanent magnet array

将相反电势波形进行傅里叶变换后得到所含谐波分量。由于 IS-PMSLM 初级绕组采用三相星形接线,反电势中  $3n(n=1,2,3,\dots)$  次谐波相互抵消<sup>[30]</sup>,可得 Halbach 阵列能够显著减小谐波含量,弧形 Halbach 阵列仅含基波,谐波抑制情况最佳。Halbach 阵列反电势幅值之所以下降是因为反电势与磁通和频率的乘积成正比,此时频率对反电势的影响占主要因素。相同永磁体数量下,由于改变了充磁方向, Halbach 阵列的极对数为平行充磁永磁体阵列极对数的一半,导致在转速不变的情况下, Halbach 阵列的反电势幅值相对较小。

图 7 为 IS-PMSLM 初级绕组通入三相交流电流时,3 种永磁体阵列下次级所受的法向悬浮力波

形图。根据法向悬浮力表达式,在电机结构参数不变时,法向悬浮力与永磁体剩磁强度及极弧系数呈正相关关系。Halbach 阵列结构的极弧系数大于 NS 平行充磁阵列,且 Halbach 阵列形成的单侧强化磁场能够大幅提升气隙侧的永磁体剩磁强度,从而提升了法向悬浮力的幅值,弧形 Halbach 阵列抑制法向悬浮力波动的效果最佳。

### 3.3 极弧系数对法向悬浮力的影响规律

由 IS-PMSLM 基本单元简化模型所得的平行充磁永磁体阵列下的法向悬浮力解析式(7)和(8)可知,法向悬浮力与极弧系数有关。次级长度不变时,永磁体沿 X 轴方向的长度与极弧系数成正比关系。进一步研究永磁体的长度对法向悬浮

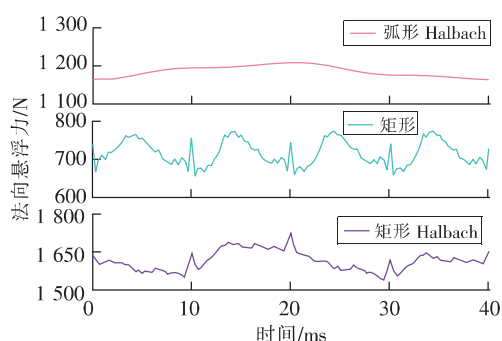


图7 3种永磁体阵列的法向悬浮力波形图  
Fig.7 Waveform diagrams of normal suspension force of three types of permanent magnet arrays

力及其波动的影响规律。在不同永磁体阵列结构下,法向悬浮力幅值及其波动规律如图8所示。

从图8可以看出,3种永磁体阵列下,Halbach阵列中平均法向悬浮力幅值与永磁体极弧系数近似正相关关系,极弧系数越大,法向悬浮力幅值越大;法向悬浮力波动与极弧系数近似负相关关系,极弧系数越大,法向悬浮力波动越小。平行充磁NS阵列中,平均法向悬浮力幅值与极弧系数之间是非线性关系,且存在多处局部极值。

### 3.4 单元间距对法向悬浮力的影响规律

初级绕组单元间距对法向悬浮力的影响如图9所示。从图9可以看出,单元间距对平均法向悬浮力幅值无影响,法向悬浮力波动随单元间距的增加呈周期性变化。Halbach阵列的周期为 $T_{H1} = 4N\tau_H, N = 1, 2, 3, \dots$ ;平行充磁的永磁体阵列波动周期为 $T_{P1} = 2N\tau_P, N = 1, 2, 3, \dots$ ,其中, $T_{H1}$ 为Halbach阵列的波动周期,s; $\tau_H$ 为Halbach永磁体极距,阵列 $T_{P1}$ 为平行充磁阵列的波动周期,s; $\tau_P$ 为平行充磁阵列永磁体极距。

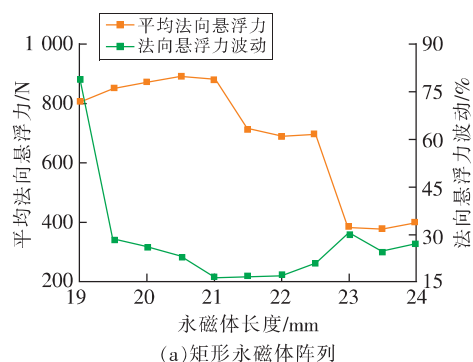
## 4 试验验证

### 4.1 样机参数优化

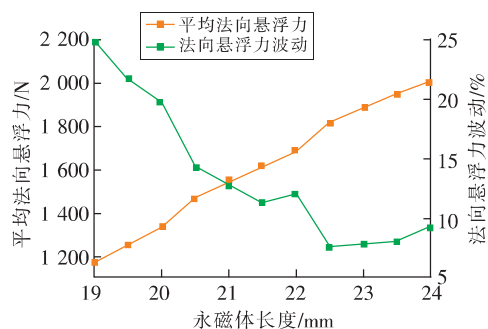
依据有限元分析结果可知,法向悬浮力主要受到永磁体阵列、永磁体极弧系数及初级绕组单元间距影响。依据前文对法向悬浮力及波动的影响规律进行样机参数优化。优化后法向悬浮力波形如图10所示。

优化前后的结构参数及法向悬浮力具体对比数据见表2。

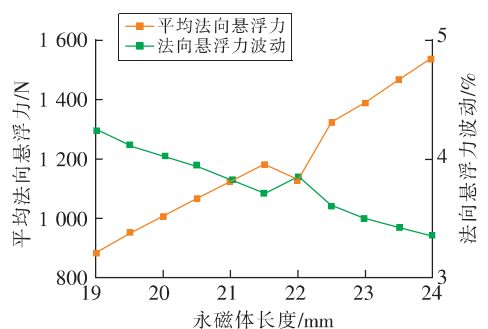
极弧系数与单元间距对3种永磁体阵列的影响程度不同,弧形Halbach阵列在优化后几乎不产



(a)矩形永磁体阵列



(b)矩形Halbach永磁体阵列



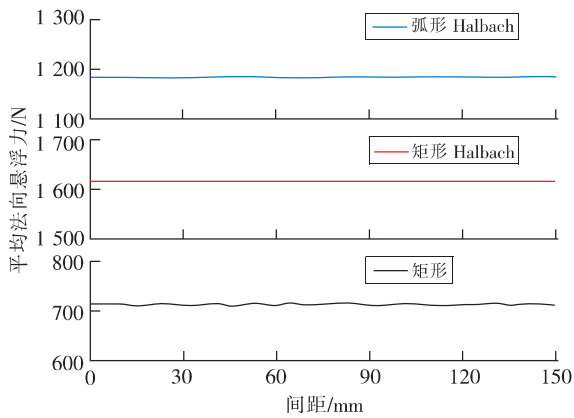
(c)弧形Halbach永磁体阵列

图8 永磁体长度对法向悬浮力的影响

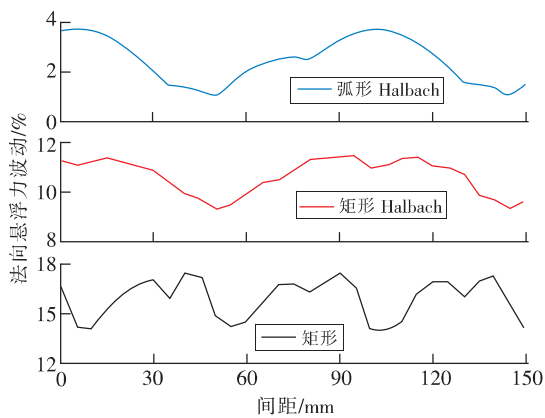
Fig.8 Influence of the length of the permanent magnet on the normal levitation force

生法向悬浮力波动,而矩形Halbach阵列能够保持较大的法向悬浮力幅值及应用要求范围内的法向悬浮力波动。

经综合优化后纵向对比:矩形Halbach永磁体阵列法向悬浮力均值增大了12.4%,法向悬浮力波动降低了5.58%;平行充磁的矩形和弧形Halbach永磁体阵列法向悬浮力幅值几乎不变,波动分别降低了1.76%、2.62%;横向对比:矩形Halbach永磁体阵列展现出最佳的综合法向力性能。其平均法向悬浮力最大,达到1819 N,相较于平行永磁体阵列714 N和弧形Halbach阵列1184 N,分别提升了154.62%和53.63%。同时,其法向悬浮力波动为5.8%,相较于平行永磁体阵列降低了9%。



(a)单元间距对平均法向悬浮力的影响



(b)单元间距对法向悬浮力波动的影响

图 9 单元间距对法向悬浮力的影响

Fig. 9 Influence of unit spacing on the normal levitation force

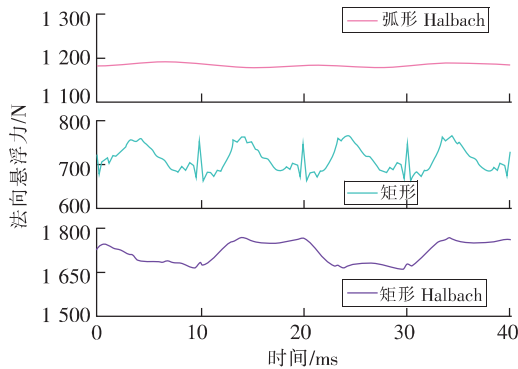


图 10 样机参数优化后法向悬浮力波形图

Fig. 10 Waveform diagrams of normal force for the optimized prototype parameters

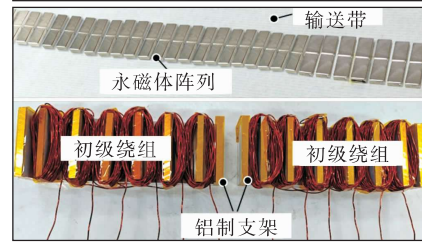
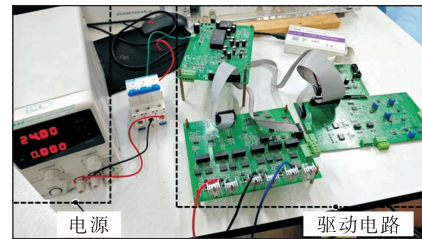
4.2 试验验证

为了验证上述研究结论,构建了矩形 Halbach 永磁体阵列复合的带式输送机用 IS-PMSLM 原理性验证样机进行了试验测试,测试工作平台如图 11 所示。

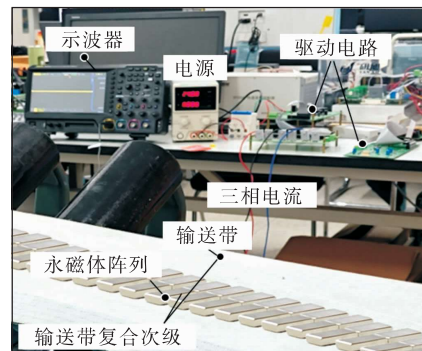
表 2 综合优化前后性能

Table 2 Performance before and after comprehensive optimization

	永磁体形状	矩形	矩形 Halbach	弧形 Halbach
优化前	永磁体长度/mm	21.5	21.5	21.5
	单元间距/mm	0	0	0
	法向悬浮力最大值/N	770.7	1 728.0	1 206.1
	法向悬浮力均值/N	714.4	1 618	1 184.0
	法向悬浮力波动/%	16.74	11.38	3.70
优化后	永磁体长度/mm	21.5	22.5	22.5
	单元间距/mm	50.0	50.0	50.0
	法向悬浮力最大值/N	767.7	1 870.7	1 190.7
	法向悬浮力均值/N	714.4	1 819.0	1 184.0
	法向悬浮力波动/%	14.80	5.80	1.10



(a)试验平台及直线电机组件



(b)测试平台

图 11 试验测试平台

Fig. 11 Test platform

将定子安装固定在初级支架上,驱动带式输送机两侧驱动滚筒,带动次级运动得到三相相反电势,将其与有限元仿真结果进行对比得到图 12。将 S 型拉压力传感器一端固定于初级,另一端连接输送带,为了方便测量法向悬浮力,水平方向上

的力不考虑,输送带静止时,初级通入三相交流电,此时拉压力传感器的拉力即直线电机法向上的悬浮力,将数据整理并绘制成波形图,如图13所示。从图12可以看出,反电动势试验值与有限元仿真值基本吻合只在峰值处存在较小误差,这是实际试验电路对信号有一定的衰减造成的,实际模型中永磁体的实际剩磁和矫顽力与仿真设定值存在细微偏差,未参与有效电磁能量转换的漏磁和材料误差,直接导致了反电势幅值的试验值略低于仿真值。从图13可以看出,法向悬浮力的试验值与仿真值基本吻合,但也存在较小的误差。这是因为实际存在的漏磁以及运行过程中气隙无法保持恒定造成试验值较小。此外,还对矩形Halbach和平行充磁体阵列下的法向悬浮力随单元间距变化规律进行试验验证,如图14所示。试验与有限元分析验证了所提悬浮式带式输送机结构的合理性,以及对法向悬浮力及其波动影响因素分析的正确性。

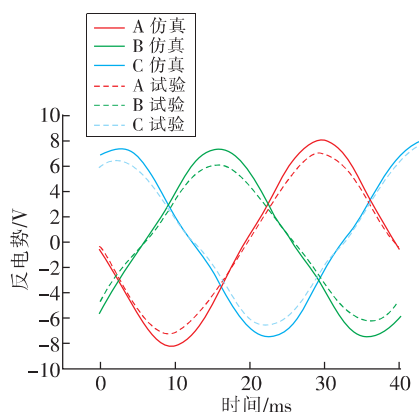


图12 试验测试反电势与有限元仿真对比

Fig. 12 Comparing chart of reverse electromotive force between experimental test and finite element simulation

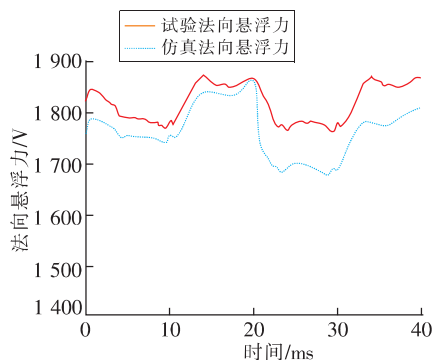


图13 试验测试优化后法向悬浮力与有限元仿真对比

Fig. 13 Comparison chart of the normal levitation force between optimized experimental test and finite element simulation

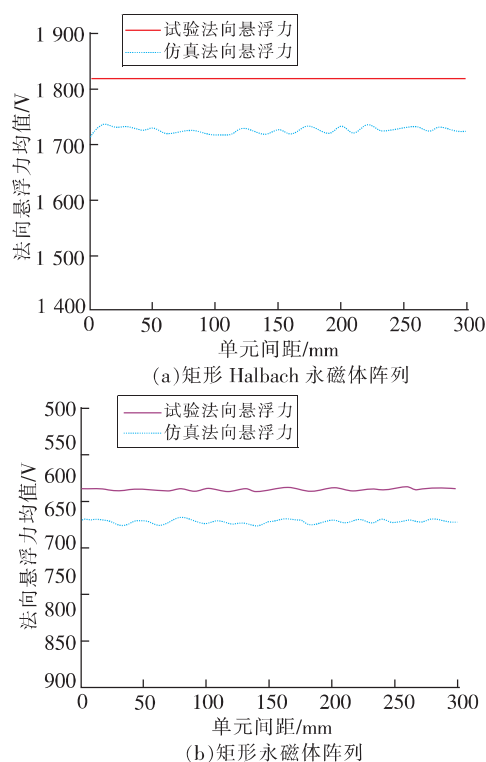


图14 2种永磁体结构下单元间距下法向悬浮力均值试验测试与有限元仿真对比

Fig. 14 Comparison chart of experimental test and finite element simulation on average normal levitation force under unit spacing with two permanent magnet structures

## 5 结论

1) 带式输送机辅助驱动用的 IS-PMSLM 悬浮力密度大,能够起较大的悬浮支撑作用,可用于替代传统带式输送机的托辊等承载结构,从而大幅减少运动摩擦损耗。

2) 永磁体阵列结构、极弧系数和单元间距均能影响法向悬浮力幅值及其波动。平均法向悬浮力幅值不受初级单元间距影响;平行充磁的永磁体阵列波动周期为  $2N$  倍的平行充磁永磁体极距;Halbach 永磁体阵列波动周期为  $4N$  倍的 Halbach 阵列永磁体极距。

3) 3种永磁体阵列中,矩形 Halbach 阵列通过优化,法向悬浮力提升 12.4% 至 1 819 N,波动降至 5.8%,综合性能远超其他方案。

## 参考文献 (References):

- [1] 王海军,王洪磊. 带式输送机智能化关键技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术,2022,50(12):225-239.  
WANG Haijun, WANG Honglei. Status and prospect of intelligent key technologies of belt conveyory[J]. Coal

- Science and Technology,2022,50(12):225-239.
- [2] 邢建旭,岑梁,卢峰,等.基于带式输送机的仓储转运系统优化调度研究[J].机电工程,2022,39(3):402-410.  
XING Jianxu, CEN Liang, LU Feng, et al. Optimal scheduling of storage and transfer system based on belt conveyor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2022,39(3):402-410.
- [3] 张春辉,徐阳生,秦亚璐,等.基于DEM物料转载装置优化设计与应用[J].机械设计,2020,37(12):112-117.  
ZHANG Chunhui, XU Yangsheng, QIN Yalu, et al. Optimization design and application of the material-transfer device based on DEM[J]. Journal of Machine Design, 2020,37(12):112-117.
- [4] 周坪,马国庆,周公博,等.智能化带式输送机健康监测技术研究综述[J].仪器仪表学报,2023,44(12):1-21.  
ZHOU Ping, MA Guoqing, ZHOU Gongbo, et al. Health monitoring technology for the intelligent belt conveyor: A review[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(12):1-21.
- [5] 闫旭,邬建雄.超长运距可伸缩带式输送机降阻技术分析[J].煤炭科学技术,2019,47(S2):113-117.  
YAN Xu, WU Jianxiong. Analysis on drag reduction technology based on retractable belt conveyor with super long conveying distance[J]. Coal Science and Technology, 2019,47(S2):113-117.
- [6] ROBINSON P W, WHEELER C A. The indentation rolling resistance of spherically profiled idler rolls[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 106: 363-371.
- [7] WHEELER C A. Rotating resistance of belt conveyor idler rolls[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2016, 138(4):041009.
- [8] 胡坤,蒋浩,季晨光,等.磁悬浮带式输送机电磁结构优化[J].工矿自动化,2021,47(2):52-57.  
HU Kun, JIANG Hao, JI Chenguang, et al. Optimization of electromagnetic structure of magnetic levitation belt conveyor[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(2):52-57.
- [9] 梁霄.长距离运输带式输送机跑偏原因分析及解决措施[J].能源与节能,2024(11):228-230,236.  
LIANG Xiao. Cause analysis and solutions of long-distance transport belt conveyor deviation[J]. Energy and Energy Conservation, 2024(11):228-230,236.
- [10] 胡坤,蒋浩,陈卓,等.基于自耦PID的磁电混合悬浮带式输送机支承系统交叉耦合协同控制[J].煤炭学报,2025,50(2):1409-1424.  
HU Kun, JIANG Hao, CHEN Zhuo, et al. Research on coordinated control of support system of magnetoelectric hybrid suspension belt conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2):1409-1424.
- [11] 王仲勋,郭永存,胡坤.永磁悬浮带式输送机侧向力与跑偏问题[J].科学技术与工程,2019,19(12):103-107.  
WANG Zhongxun, GUO Yongcun, HU Kun. Lateral force and deviation of permanent magnet suspension belt conveyor[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(12):103-107.
- [12] ZHOU Q, GONG H, DU G, et al. Distributed permanent magnet direct-drive belt conveyor system and its control strategy[J]. Energies, 2022, 15(22):8699.
- [13] ZHOU Q, SHI K, XU K, et al. Optimized multi-motor power control strategy for distributed permanent magnet direct drive belt conveyors[J]. Applied Sciences-Basel, 2024, 14(18):8343.
- [14] 熊嘉阳,沈志云,池茂儒,等.高速磁悬浮列车技术综述[J].交通运输工程学报,2025,25(2):1-23.  
XIONG Jiayang, SHEN Zhiyun, CHI Maoru, et al. Review on high-speed maglev train technology[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(2):1-23.
- [15] 赵川,孙凤,裴文哲,等.永磁悬浮技术的实现机理与发展现状[J].机械工程学报,2023,59(17):189-207.  
ZHAO Chuan, SUN Feng, PEI Wenzhe, et al. Realization mechanism and development of permanent magnetic levitation: A review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(17):189-207.
- [16] 吕刚.直线电机在轨道交通中的应用与关键技术综述[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5665-5675.  
LYU Gang. Review of the application and key technology in the linear motor for the rail transit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17):5665-5675.
- [17] 邵佳丽.高速磁悬浮列车磁场分析[D].北京:北京交通大学,2021.  
SHAO Jiali. Magnetic field analysis of linear motor for high-speed maglev train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [18] QIU X, SUN Q, SHAO Z, et al. Analysis of the magnetic levitation characteristics of the vertical Halbach array in a permanent magnet rotor[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(1):397-412.
- [19] GAO H, SHI T, GAO X, et al. Electromagnetic charac-

- teristic analysis and design of a linear motor used for ultra-high-speed EMS maglev train [J]. *Science China-Technological Sciences*, 2024, 67(6):1957-1973.
- [20] ZHOU F, YANG J, HU H, et al. Study of repulsive permanent magnetic levitation mechanism and its dynamic characteristics [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1):29859.
- [21] TAN Q, TIAN B, WANG X, et al. Primary component segmental design to suppress the normal force ripple for the permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Iet Electric Power Applications*, 2024, 18(7):801-812.
- [22] TAN Q, WANG X, LI J, et al. Analysis of the normal force ripple for the flat plate permanent magnet linear synchronous motor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [23] 许孝卓, 孙震, 汪旭东, 等. Halbach 交替极永磁同步直线电机特性分析 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(9):1825-1833.  
XU Xiaozhuo, SUN Zhen, WANG Xudong, et al. Characteristic of a novel permanent magnet linear synchronous motor with Halbach array consequent-pole [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(9):1825-1833.
- [24] 王永刚, 张丽, 杨君, 等. 磁浮列车空心 Halbach 永磁直线同步电机的力角特性分析 [J]. *铁道机车车辆*, 2021, 41(1):26-32.  
WANG Yonggang, ZHANG Li, YANG Jun, et al. Analysis of force angular characteristics of hollow Halbach permanent magnet linear synchronous motor in maglev train [J]. *Railway Locomotive & Car*, 2021, 41(1):26-32.
- [25] SUN Q, WANG M, LIU M, et al. Magnetic field distortion analysis and suppression for the minimum unit winding segmented moving-magnet linear motor [J]. *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(4):3452-3460.
- [26] ZHANG T, MEI X, DU X. SVM-Based optimizing control of two-phase winding segmented permanent magnet linear synchronous motor [J]. *Ieee Access*, 2022, 10:55176-55186.
- [27] KWON Y S, LEE S, YOON J Y. Identification and reduction method of normal-direction force ripple in permanent magnet linear synchronous motor [C]//2023 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Seattle, WA, USA, 2023:1102-1107.
- [28] 张予希, 颜建虎, 池松, 等. 考虑端部效应的动子无源型 Halbach 磁悬浮永磁直线电机电磁力分析 [J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(6):143-151.  
ZHANG Yuxi, YAN Jianhu, CHI Song, et al. Electromagnetic force analysis of passive mover Halbach maglev permanent magnet linear synchronous motor considering end effects [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(6):143-151.
- [29] 曹婷, 石洪富, 刘峻志, 等. 永磁电动悬浮多工况下的电磁力特性研究 [J]. *电工技术学报*, 2024, 39(17):5262-5277.  
CAO Ting, SHI Hongfu, LIU Junzhi, et al. Investigation of electromagnetic force characteristics of permanent magnet electrodynamic suspension under multi-operation conditions [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(17):5262-5277.
- [30] 赵斌超. Halbach 次级结构无铁心永磁直线同步电机的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
ZHAO Binchao. Research on ironless permanent magnet linear synchronous motor with Halbach secondary structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

(责任编辑:高佳)