

文章编号 1004-924X(2024)09-1347-13

## 针刺巨量转移平台用高推力聚磁式直线电机

刘 强<sup>1,2</sup>, 马 宁<sup>1</sup>, 王 伟<sup>1\*</sup>, 韩邦成<sup>3</sup>, 牛萍娟<sup>2</sup>

(1. 北京石油化工学院 精密电磁装备与先进测量技术研究所, 北京 102617;

2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387;

3. 北京航空航天大学 惯性技术重点实验室, 北京 100191)

**摘要:**针对针刺式巨量转移平台用无铁芯直线电机推力小, 边缘效应明显导致转移速度慢的问题, 提出一种高推力聚磁式直线电机, 利用外层 V 字形结构抑制漏磁效应, 通过双层 Halbach 结构提高气隙磁密, 并采用有限元法对 3 种方案气隙磁密和漏磁磁通进行比较分析。V 形双层 Halbach 方案的气隙磁密和漏磁磁通分别为 0.6 T 和 0.05 T, 与单层梯形方案相比气隙磁密提高了 17.6%, 与双层 Halbach 方案相比漏磁磁通降低了 71.4%。利用等效磁化电流法对电机磁场进行区域分割, 采用分割补偿法建立矩形边界条件, 建立了直线电机磁路数学模型, 得到了影响电机推力线性度的关键结构参数, 并基于有限元法对形状及结构参数进行优化。结果表明, 优化后气隙的最大磁密和最小磁密分别 0.67 T 和 0.47 T,  $x$  向和  $y$  向磁密变化率分别为 25% 和 29.8%, 推力仿真计算结果为 278 N, 推力波动率为 2.1%, 空载加速度为  $10 \text{ m/s}^2$ , 理论芯片转移速度可达 50 颗/秒。根据优化结果研制了一台直线电机用于巨量转移平台, 测试结果与优化结果一致, 本研究对提高巨量转移平台转移效率具有重要意义。

**关键词:** 直线电机; 针刺式巨量转移; 聚磁; 有限元法; 空间应用

**中图分类号:** V488.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243209.1347

## High thrust focused magnetic linear motor for needling massive transfer platform

LIU Qiang<sup>1,2</sup>, MA Ning<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1\*</sup>, HAN Bangcheng<sup>3</sup>, NIU Pingjuan<sup>2</sup>

(1. Institute of Precision Electromagnetic Equipment and Advanced Measurement Technology,  
Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

3. Key Laboratory of Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: shaowang66@163.com

**Abstract:** A high thrust concentrated magnetic linear motor is proposed to address the problem of low thrust and obvious edge effects leading to slow transfer speed in needle punched massive transfer platforms. The outer V-shaped structure is used to suppress leakage magnetic effect, and the double-layer Halbach structure is used to improve air gap magnetic density. The finite element method is used to compare and analyse the air gap magnetic density and leakage magnetic flux of the three schemes. The air gap

收稿日期: 2023-11-07; 修订日期: 2023-12-12.

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No. 3212004); 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划资助项目 (No. BPHR20220110); 北京市属高校分类发展专项 (No. 11000023T000002199202)

magnetic flux and leakage magnetic flux of the V-shaped double-layer Halbach scheme are 0.6 T and 0.05 T, respectively. Compared with the single-layer trapezoidal scheme, the air gap magnetic flux is increased by 17.6%, and the leakage magnetic flux is reduced by 71.4%. The equivalent magnetization current method was used to segment the magnetic field of the motor, and a rectangular boundary condition was established using the segmentation compensation method. A mathematical model of the magnetic circuit of the linear motor was established, and the key structural parameters affecting the linearity of the motor thrust were obtained. The shape and structural parameters were optimized based on the finite element method. The results show that after optimization, the maximum and minimum magnetic densities of the air gap are 0.67 T and 0.47 T, respectively. The change rates of magnetic densities in the  $x$  and  $y$  directions are 25% and 29.8%, respectively. The thrust simulation calculation result is 278 N, the thrust fluctuation rate is 2.1%, the no-load acceleration is  $10 \text{ m/s}^2$ , and the theoretical chip transfer speed can reach 50 pieces/s. Based on the optimization results, a linear motor was developed for the massive transfer platform. The test results are consistent with the optimization results, which is of great significance for improving the transfer efficiency of the massive transfer platform.

**Key words:** linear motor; acupuncture type massive transfer; magnetism gathering; finite element method; space application

## 1 引言

显示技术让人类通过视觉获取的信息呈几何级数增长<sup>[1-3]</sup>,从电子显示器阴极射线管(Cathode Ray Tube, CRT)、液晶显示(Liquid Crystal Display, LCD)到有机发光二极管(Organic Light Emitting Diode, OLED),经过三代技术革命,其性能已经到达瓶颈。Mini/Micro LED 芯片单个可自发光,更节能,寿命长,可实现全色域和无缝拼接,是第四代革命性显示技术<sup>[4-5]</sup>。目前,Mini/Micro LED 显示屏量产化亟需突破芯片制备、巨量转移、检测与修复等技术。其中,巨量转移是通过运动定位平台将近亿颗微型显示芯片从源基板转移至目标基板的过程,其良率和精度直接影响显示屏市场化进程<sup>[6]</sup>。

巨量转移包括自组装<sup>[7]</sup>、滚轴转印<sup>[8]</sup>、激光辅助和精准拾取 4 类技术。自组装通过磁力或流体捕获悬浮在液体中的芯片转移到目标基板,因初期捕获并数量多转移效率较高,但后期随着捕获并数量的减少,转移速度会大幅降低。滚轴转印利用弹性印章的辊黏附阵列好的芯片,通过辊旋转将芯片印在目标衬底上实现巨量转移,当辊的旋转运动与芯片安装台的平移运动不同步时,坏点率较高,转移芯片良率较低。激光辅助技术包括激光照射面烧蚀分解(激光剥离)<sup>[9]</sup>和激光照

射面形成鼓包<sup>[10]</sup>,前者通过化学烧蚀改变界面间黏附力实现芯片分离,后者利用激光照射牺牲层发生化学反应产生空腔形成鼓包,因接触面积减小黏附力降低完成转移。上述过程通过衍射可形成激光阵列,极大提高了转移速度,但化学反应过程不可控,同样影响转移良率。精准拾取通过磁力<sup>[11]</sup>、范德华力<sup>[12]</sup>、静电力<sup>[13]</sup>或针刺<sup>[14]</sup>实现转移,其中,磁力、范德华力和静电力释放量级太小难以控制,坏点率较高;针刺式通过顶针与基板的轴向对准上下运动来实现 Mini LED 芯片的精准快速转移。与自组装相比,利用针刺代替流体,整个转移过程可控;与滚轴转印相比,通过针刺可进行选择性转移,极大地提高了转移良率;与激光辅助技术相比,利用针刺运动代替激光照射,降低了芯片因激光照射而损毁的概率,且针刺设备原理简单、维护方便,是目前唯一可量产化的巨量转移设备。综上所述,针刺式巨量转移为目前最可靠易行的巨量转移方案。

针刺式巨量转移设备通过针刺进行拾取释放芯片,采用视觉系统进行芯片位置识别和路径规划,利用运动定位平台负责移动焊盘(Printed Circuit Board, PCB)和蓝膜。其中,运动定位平台的精度和稳定性是决定芯片转移速度和良率的关键因素。直线电机作为运动定位平台的重要组成部分,其性能直接影响着转移效率。根据结构,现有的直线电机分为单边平板型、双边平板型和无铁

芯永磁同步电机3大类。单边平板型永磁直线电机通过将永磁体均匀贴在短次级背铁表面,利用电枢绕组与永磁磁场作用产生推力,因只有单侧存在磁场,产生的推力较小且无法平衡磁力致使转移速度较慢<sup>[15]</sup>。为消除单边磁拉力,增大推力提高转移速度,文献[16]提出一种双边型直线电机,通过两排定子次级互相抵消磁拉力,共同为动子提供更大的推力。但由于电枢绕组在直线电机内部散热困难,且纵向边缘效应和双倍齿槽效应加剧了推力波动,导致转移精度较低。文献[17]介绍了一种无铁芯永磁同步直线电机,通过将绕组直接固定在气隙间隙中直接抛弃传统的铁芯绕线法,极大地消除了齿槽力,降低了推力波动,但因去掉了铁芯,产生的推力较小。

为加强聚磁效应提高推力,文献[18]采用磁钢内置的隐式洛伦兹力方案,文献[19]采用Halbach磁钢阵列结构。上述方案都增强了气隙磁场强度,但磁钢位于磁极端部,磁路边缘效应仍然明显。为消除磁钢因拼接而引起的磁密波动,文献[20]提出了一种U型聚磁效应方案,将磁极端部的边缘发散磁通进行压缩,达到聚拢效果,提高整个绕组所在气隙位置磁密的均匀度,但该方案的主要作用是提高悬浮力,推力提高得较小。文献[21]设计一种V形直线电机定子,通过V形尖端激发定子的对称与反对称获得较大的驱动力,但提高有限。文献[22]提出了一种考虑端部效应的动子无源型Halbach磁悬浮永磁直线电机,精确分析了悬浮力和推力,但未考虑充磁角度对单侧磁场的影响,运动定位精度较低。文献[23]提出了一种梯形Halbach交替极无铁芯永磁同步直线电机,对Halbach阵列进行拓扑优化,平均推力提高了63.1%,且磁阻力大大降低,当动子运动到边端时,电机仍存在微量振动。文献[24]提出了一种双层Halbach磁极结构,单个永磁体为凸字形,但磁场谐波的抑制效果有限。

本文提出一种双层V字形Halbach聚磁高推力直线电机,利用V字形水平充磁磁钢加梯形竖直充磁磁钢组成的外层,减少了Halbach磁极阵列的漏磁,加强了其单侧磁屏蔽作用,降低了边缘漏磁;通过长短不一致的水平充磁的磁场加导磁材料构成内层,同时利用双层结构增强聚磁作用,借助V字形+梯形磁钢极大地减少了谐波脉

动,提高了转移精度和速度。

## 2 原 理

巨量转移设备的整体方案如图1所示,该设备主要由大理石平台、目标基板载台(安装目标基板)、蓝膜芯片载台(安装蓝膜)、上机械轨道(驱动蓝膜载台X方向运动)、工业相机(视觉系统)、磁浮轨道(驱动蓝膜Y方向运动)、下机械轨道(驱动目标基板载台)和针刺模组(转移芯片)组成。平台转移工作过程包括回零,针头、目标基板和蓝膜对位,以及转移。第一步和第二步通过驱动机械轨道的直线电机沿X方向完成对位并运送蓝膜到针头的正下方,再利用微调实现蓝膜上的芯片和驱动电路板上的焊点精确对位,通过针头上下垂直运动,实现芯片转移,工作流程如图2所示。

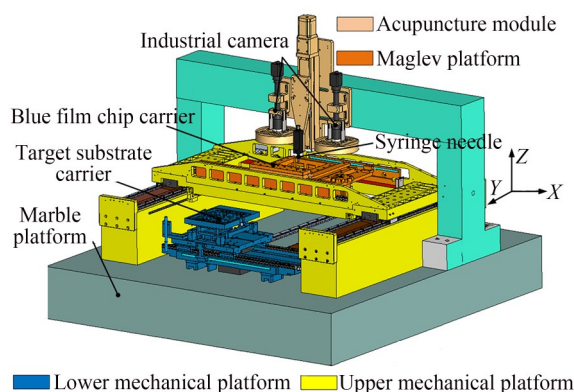


图1 针刺式巨量转移设备

Fig. 1 Needle mass transfer equipment

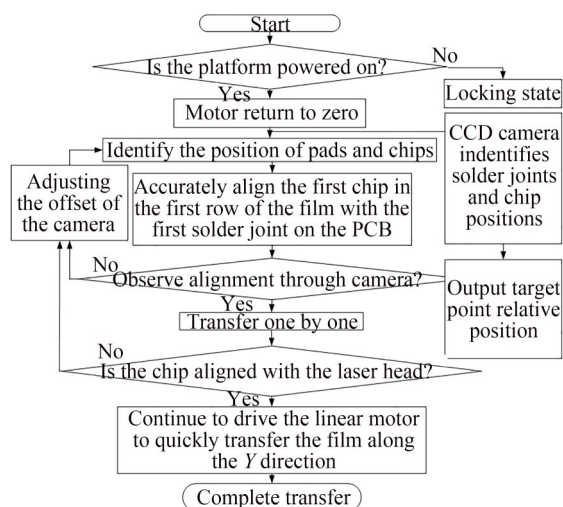


图2 巨量转移设备工作流程

Fig. 2 Workflow of massive transfer equipment



3 直线电机磁路方案

一颗芯片尺寸约为  $50\text{ }\mu\text{m}$ , 一块 15.6 寸的屏幕需要上百万颗芯片, 因此芯片转移需满足高精度、快速度和大加速度。有铁芯直线电机利用绕组加铁芯极大增加了气隙磁密强度, 具有磁场密度高、推力大的优点, 但存在较大的齿槽力, 会产生较大的推力波动, 无铁芯直线电机去除了传统的定子铁芯, 彻底消除了齿槽力, 更适用于高速精密运动。本文选择的直线电机如图 3 所示, 由磁钢、工字型绕组骨架、背铁和三相绕组组成。

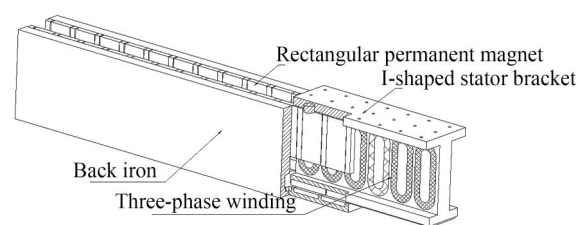


图 3 直线电机结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of linear motor structure

传统的磁钢排布方案利用径向充磁的永磁体交替分布, 加剧了磁间漏磁。文献[23]提出每对磁极由一个梯形 Halbach 永磁体与一个凸铁极构成, 永磁体与凸铁极极性相反, 不仅减少磁极交替排布的极间漏磁, 同时也减少了永磁体用量, 但聚磁效果较弱, 磁路分布如图 4(a) 所示。文献[24]采用双层 Halbach 磁极结构, 单个永磁体为“凸”字形, 增强了气隙磁场, 但磁场谐波抑制效果有限, 磁路分布如图 4(b) 所示。本文提出一种双层 Halbach “V” 字形结构, 利用双层 Halbach 结构增强气隙磁场, 通过上层 V 字形结构抑制漏磁效应, 磁路分布如图 4(c) 所示。

利用 Maxwell 对 3 种结构进行电磁仿真分析。其电机性能参数如表 1 所示, 方案 a 和方案 b 初次级耦合部分的永磁体体积比为方案 c 为 65.5%, 由推力体积比<sup>[25]</sup>的定义可知, 在永磁体用量相同的情况下, 方案 c 的推力体积比, 即永磁体利用率最高。如图 5 所示, 方案 b 的电机气隙中心磁密最大, 比方案 a 提高了 21.6%, 比方案 c 了提高 3.9%。如图 6 所示, 方案 c 的漏磁磁通最小, 比方案 a 降低 83.3%, 比方案 b 降低了 75%。如图 7 所示, 方案 c 在低阶抑制效果更佳, 方案 c

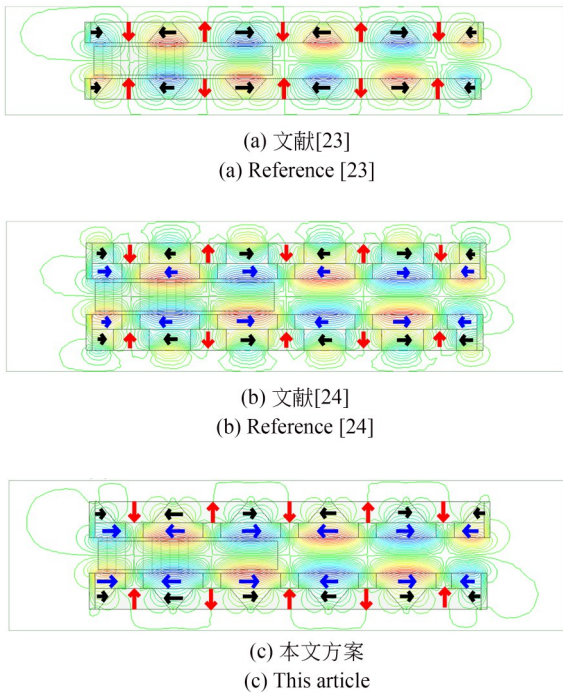


图 4 不同磁路方案对比

Fig. 4 Comparison of magnetic circuit schemes

表 1 各方案性能对比

Tab. 1 Performance comparison of various schemes

| 方案 | 磁通密度/T | 推力常数/<br>( $\text{N}\cdot\text{A}^{-1}$ ) | 反电<br>动势 V | 推力体积比/<br>( $\text{N}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|----|--------|---|------------|---|
| a  | 0.51   | 85  | 10.60      | 1.77  |
| b  | 0.62   | 105                                       | 35.5       | 2.62  |
| c  | 0.6    | 100                                       | 33.3       | 2.40  |

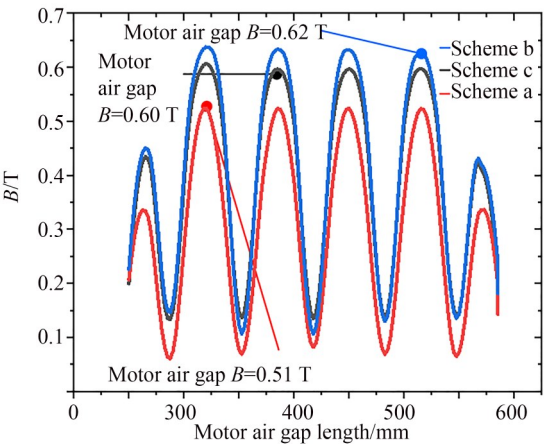


图 5 磁感应强度对比

Fig. 5 Comparison of magnetic induction intensity

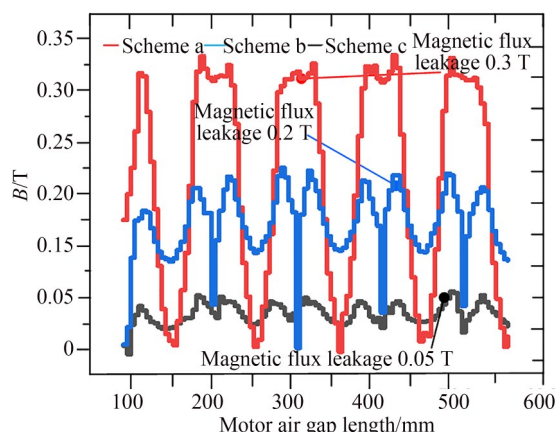


图6 漏磁磁通对比

Fig. 6 Comparison of magnetic flux leakage

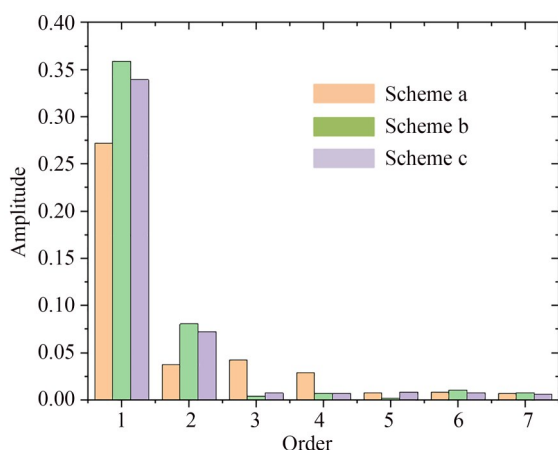


图7 磁密谐波对比

Fig. 7 Comparison of magnetic density

比方案b的一阶谐波降低了9%,二阶谐波比方案b降低了14.3%。因此,方案c相对方案a电磁推力提高了17.6%,相对方案b磁密谐波显著降低。

综上所述,与单层 Halbach 方案相比,双层 Halbach 方案提高了电机气隙磁密;与矩形磁钢排布方案相比,“V”形磁钢排布抑制漏磁和谐波的效果更好,因此,本文拟采用双层 Halbach+“V”形结构进行优化分析。

## 4 磁路数学模型

为建立合适的磁场分析模型,需做出以下假设:动定子轭铁部分各向同性,且磁导率无限大,其他部分电导率为零;齿和槽在水平运动方向和

垂直运动方向上有不同的磁导率;永磁体在水平运动方向和垂直运动方向上的磁导率相同且等于空气气隙磁导率;永磁体磁化均匀。等效磁化电流法是把永磁体等效为面电流,引入矢量磁位描述磁场,根据泊松比方程进行磁场求解,用等效磁化电流法分析电机模型,等效磁化电流法分布如图8所示。为了简化解析模型,将电机分成上层磁阻分割区域和下层磁阻分割区域,分别如图9(a)和9(b)所示。因V字形永磁体边界条件难以确定,采用分割补偿法进行拼接,组成矩形边界条件如图9(a)所示。最后,将上层和下层磁场叠加,得到双层 Halbach 模型的磁场强度。

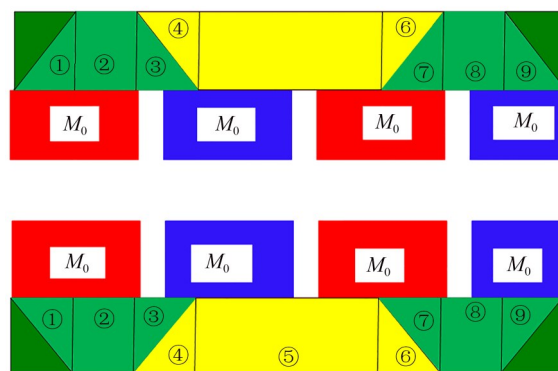


图8 磁阻分割区域

Fig. 8 Magnetoresistive segmentation region

图9中, $\tau$ 为极距、 $\tau_m$ 为永磁体宽度、 $h_m$ 为永磁体厚度、 $\delta$ 为电机厚度。由于电机呈对称结构,仅分析y轴正方向等效磁化电流,故分布函数 $M(x)$ 为:

$$M(x) = \sum_{k=1}^{\infty} M_k \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi}{\tau} x \right], \quad (1)$$

其中: $k=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ ,  $M_k$ 可以表示为:

$$M_k = (-1)^{k+1} \frac{4}{(2k-1)\pi} M_0 \sin \left[ \frac{(2k-1)\pi \tau_m}{2\tau} \right]. \quad (2)$$

均匀永磁体磁化强度 $M_0$ 和等效面电流密度 $J_m(x)$ 可表示如下:

$$\begin{cases} M_0 = \frac{B_r}{\mu_0} \\ J_m(x) = \frac{\partial M(x)}{\partial x} \end{cases} \quad (3)$$

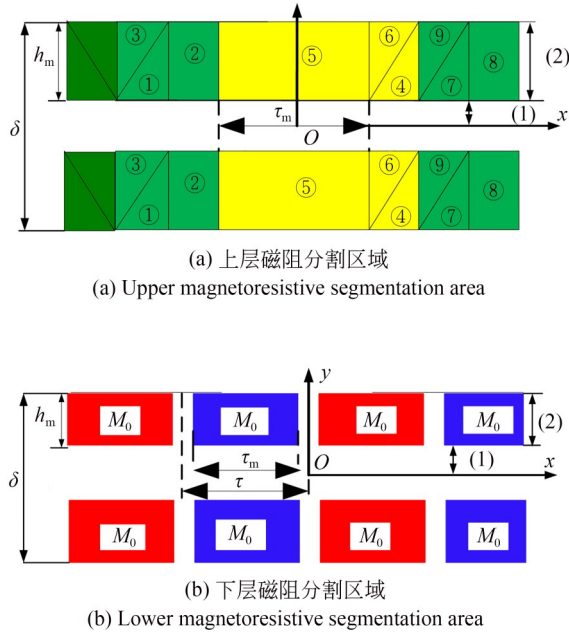


图9 分布方案磁阻计算

Fig. 9 Magnetoresistance calculation of distribution schemes

根据磁化体磁场关系式,对于均匀磁化的永磁体,得出:

$$B = \mu_0 (H + M_0), \quad (4)$$

式中:  $B$  为磁感应强度,  $H$  为永磁体的磁化强度,  $\mu_0$  为磁导率。应用拉普拉斯方程求解气隙区域①中矢量磁位  $A_{z1}(x, y)$ ; 应用泊松比方程求解磁极区域②中矢量磁位  $A_{z2}(x, y)$ , 得到:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_{z1}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{z1}}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 A_{z2}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{z2}}{\partial y^2} = -\mu_0 \frac{\partial M_z(x)}{\partial x} \end{cases} \quad (5)$$

由于矢量磁位函数关于  $x$  轴和  $y$  轴对称, 采取分离变量法获得  $A_{z1}(x, y)$  和  $A_{z2}(x, y)$  的矢量磁位通解为:

$$A_{z1}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k \operatorname{sh}(m_k h_m)}{m_k \operatorname{sh}\left(\frac{m_k \delta}{2}\right)} \cos(m_k x) \operatorname{ch}(m_k y), \quad (6)$$

$$A_{z2}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k}{m_k} \cos(m_k x) \left[ -\operatorname{sh}\left(m_k \left(h_m - \delta/2\right)\right) \operatorname{sh}(m_k y) + 1 \right] + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k}{m_k} \cos(m_k x) \left[ \operatorname{sh}\left(m_k \left(h_m - \delta/2\right)\right) \frac{\operatorname{ch}(m_k \delta/2)}{\operatorname{sh}(m_k \delta/2)} \right] \operatorname{ch}(m_k y), \quad (7)$$

其中  $m_k = (2k-1)\pi/\tau$ 。对上式求偏导, 可得各区 域磁通密度  $B_x, B_y$  的法相分量:

$$\begin{cases} B_{x1}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k \operatorname{sh}(m_k h_m)}{m_k \operatorname{sh}\left(\frac{m_k \delta}{2}\right)} \cos(m_k x) \operatorname{sh}(m_k y) \\ B_{x2}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k}{m_k} \cos(m_k x) \left[ -\operatorname{sh}\left(m_k \left(h_m - \delta/2\right)\right) \operatorname{ch}(m_k y) \right] + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k}{m_k} \cos(m_k x) \left[ \operatorname{sh}\left(m_k \left(h_m - \delta/2\right)\right) \frac{\operatorname{ch}(m_k \delta/2)}{\operatorname{sh}(m_k \delta/2)} \right] \operatorname{ch}(m_k y) \\ B_{y1}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k \operatorname{sh}(m_k h_m)}{m_k \operatorname{sh}\left(\frac{m_k \delta}{2}\right)} \sin(m_k x) \operatorname{ch}(m_k y) \\ B_{y2}(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k}{m_k} \sin(m_k x) \left[ -\operatorname{sh}\left(m_k \left(h_m - \delta/2\right)\right) \operatorname{sh}(m_k y) + 1 \right] + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_0 M_k}{m_k} \sin(m_k x) \left[ \operatorname{sh}\left(m_k \left(h_m - \delta/2\right)\right) \frac{\operatorname{ch}(m_k \delta/2)}{\operatorname{sh}(m_k \delta/2)} \right] \operatorname{ch}(m_k y) \end{cases} \quad (8)$$

三相绕组的单边电流密度可表示为:

$$\begin{cases} J_{A0} = \sqrt{2} NI \sin \theta_0 / h \tau_w \\ J_{B0} = \sqrt{2} NI \sin(\theta_0 - 2\pi/3) / h \tau_w, \\ J_{C0} = \sqrt{2} NI \sin(\theta_0 + 2\pi/3) / h \tau_w \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $J_A$  表示绕组线圈的 A 相电流密度;  $N$  表示线圈匝数,  $I$  表示电流有效值,  $\theta_0$  为电流初始角,  $h$  为单边线圈高度,  $\tau_w$  为单边线圈的有效宽度,  $\tau_c$  为线圈单边总宽度,  $\tau_{cd}$  为相邻绕组轴线间距,  $\tau_D$  为相邻线圈间距。推力计算模型如图 10 所示。A, B, C 三相绕组的电磁推力可表示为:

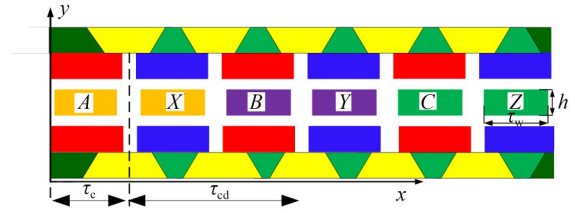


图 10 推力计算模型

Fig. 10 Thrust calculation model

$$\begin{cases} F_{xi} = \iint J_i(x) B_y(x, y) dx dy \\ i = A, B, C \end{cases} \quad (10)$$

经整理,三相绕组的推力为:

$$\begin{cases} F_{xA} = \sum_{k=1}^{\infty} -4 \frac{2\sqrt{2} l_w NI \mu_0 \text{sh}(m_k h) \sin\left(\frac{m_k h}{2}\right)}{m_k^2 h t \left(\frac{m_k \sigma}{2}\right)} \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin \theta \cos m_k(x_0 + \tau_c) \\ F_{xB} = \sum_{k=1}^{\infty} -4 \frac{2\sqrt{2} l_w NI \mu_0 \text{sh}(m_k h) \sin\left(\frac{m_k h}{2}\right)}{m_k^2 h t \left(\frac{m_k \sigma}{2}\right)} \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd}) \\ F_{xC} = \sum_{k=1}^{\infty} -4 \frac{2\sqrt{2} l_w NI \mu_0 \text{sh}(m_k h) \sin\left(\frac{m_k h}{2}\right)}{m_k^2 h t \left(\frac{m_k \sigma}{2}\right)} \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cos m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd}) \end{cases} \quad (11)$$

三相绕组总的电磁推力  $F_x$  为:

$$\begin{aligned} F_x = F_{xA} + F_{xB} + F_{xC} = \sum_{k=1}^{\infty} -2\eta \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \left[ \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3} + m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right) \times \right. \\ \left. \left(2\cos\left(m_k \tau_{cd} + \frac{\pi}{3} - 1\right)\right) + \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3} - m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right) \times \left(2\cos\left(m_k \tau_{cd} - \frac{\pi}{3} - 1\right)\right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

当  $k=3n, n=1, 2, 3 \dots$  时,  $3n$  次谐波磁场产生的谐波推力  $F_x(3n)$  为:

$$\begin{cases} F_{x(3n)} = \sum_{k=3n}^{\infty} 6\eta \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin\left[\theta + \frac{\pi}{3} + m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right] \\ \eta = \frac{2\sqrt{2} l_w NI \mu_0 M_k \text{sh} m_k h_m \sin\left(\frac{m_k}{2}\right)}{m_k^2 h t_w \text{sh}\left(\frac{m_k \sigma}{2}\right)} \end{cases} \quad (13)$$

当  $k=3n+1, n=1, 2, 3 \dots$  时,  $3n+1$  次谐波磁场产生的谐波推力为:

$$F_{x(3n+1)} = \sum_{k=3n+1}^{\infty} 6\eta \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \times \sin\left[\theta + \frac{\pi}{3} - m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right]. \quad (14)$$



综上所述,总推力为:

$$F_x = \sum_{k=3n}^{\infty} 6\eta \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin\left[\theta + \frac{\pi}{3} + m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right] + \sum_{k=3n+1}^{\infty} 6\eta \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin\left[\theta + \frac{\pi}{3} - m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right]. \quad (15)$$

当  $m_k = (2k-1) \pi/\tau$ ,  $t_{cd} = (6a \pm b) \tau/3 = 1, 2$  时,

$$\eta = \frac{8\sqrt{2} l_w N I \tau^2 B_r \sin\left(\frac{\pi \tau_m}{2\tau}\right) \operatorname{sh}\left(\frac{\pi h_m}{\tau}\right)}{\pi^3 h t_w \operatorname{sh}\left(\frac{\pi \delta}{2\tau}\right)} \operatorname{sh}\left(\frac{\pi h_m}{2\tau}\right). \quad (16)$$

因此,电机的推力线性度  $K_i$  为:

$$K_i = \frac{F_x}{I} = F_x = \sum_{k=3n}^{\infty} \frac{12\sqrt{2} l_w N \mu_0 M_k \operatorname{sh}\left(\frac{m_k}{2}\right)}{m_k^2 h t_w \operatorname{sh}\left(\frac{m_k \sigma}{2}\right)} \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin\left[\theta + \frac{\pi}{3} + m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right] + \sum_{k=3n+1}^{\infty} \frac{12\sqrt{2} l_w N \mu_0 M_k \operatorname{sh}\left(\frac{m_k}{2}\right)}{m_k^2 h t_w \operatorname{sh}\left(\frac{m_k \sigma}{2}\right)} \sin\left(\frac{m_k \tau_c}{2}\right) \sin\left(\frac{m_k \tau_w}{2}\right) \sin\left[\theta + \frac{\pi}{3} - m_k(x_0 + \tau_c + \tau_{cd})\right]. \quad (17)$$

为防止导磁材料磁密饱和,其内部磁通密度一般不超过饱和磁通密度的一半。此外,为保证系统稳定,且具有较大的稳定裕量,在磁场未饱和的情况下,推力线性度  $K_i$  越大越好。推力线性度的最大值为<sup>[26-27]</sup>:

$$k_{i\max} = 11 \frac{B_s^2 A}{\mu_0 g}, \quad (18)$$

其中:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 为真空磁导率,  $A$  为磁极面积,  $B_s$  为软磁材料的饱和磁通密度。

从式(17)可以看出,电机推力线性度与  $\tau_m/\tau$ ,  $h_m/\tau$ ,  $\delta/\tau$  的比值有关,极距  $\tau$  为定值,因此,只与电机厚度  $\delta$ 、永磁体宽度比  $\tau_m$  和永磁体高度  $h_m$  直接相关。为精确考虑电机水平方向的推力分布规律,引入电机横向波动率  $v_a$  的定义,即:

$$v_a = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_{\text{avg}})^2}{n-1} \times 100\%. \quad (19)$$

## 5 结构设计

### 5.1 电机厚度对电机推力的影响

由式(6)和式(12)可知,电机推力刚度随着电机厚度的增加而减少,这里电机厚度表征气隙

间距。受平台安装尺寸的限制,气隙间距不能无限扩大,因此,电机厚度每次增加 1 mm,共取 10 组。为保证实验唯一变量,背板和永磁体厚度、永磁体宽度保证一致,并采用电磁场数值法对其电磁性能进行计算得到电磁推力。

不同气隙间距对应的电磁推力  $F_x$  在磁轨宽度范围内沿轴向的分布曲线如图 11 所示,随着气隙间距的增加,电磁推力  $F_x$  逐渐减小。从最大推力 240 N 降到 43 N,其电磁推力趋势逐渐变缓,

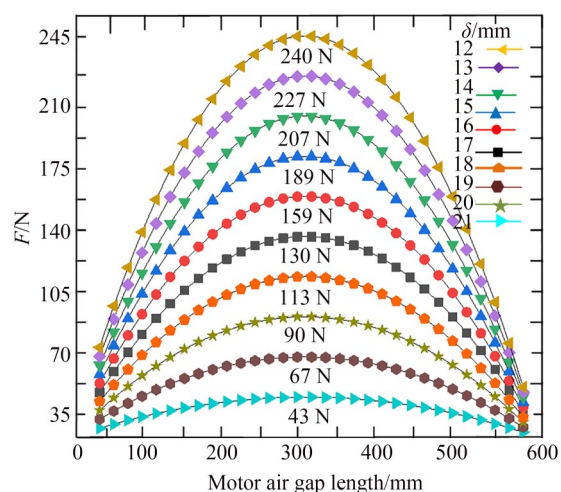


图 11 气隙变化与推力的关系

Fig. 11 Relationship between air gap changes and thrust



聚磁效应越来越弱,大部分磁力经电机纵向气隙形成漏磁通。当气隙间距逐渐增大时,电磁推力越来越小,且衰减越来越快,综合考虑加工工艺性、绕线工艺、推力及空间,为使电机推力达到最大,气隙间距选最小为12 mm。

### 5.2 永磁体宽度对推力的影响

永磁体宽度为辅助磁钢宽度加永磁体宽度,以永磁体宽度和辅助磁钢比值为整体,气隙间距选择12 mm,永磁体宽度/辅助磁钢宽度分别取8,9,10,11 mm,永磁体宽度和辅助磁钢宽度分别为16,2 mm;27,3 mm;40,4 mm;55,5 mm,并采用电磁场数值法进行仿真计算。

由式(16)可知,电磁推力和永磁体宽度成正比,不同永磁体宽度比对应的电磁推力 $F_x$ 的分布曲线,如图12所示。随着永磁体宽度比的增加,其推力幅值逐渐降低,且比值越大,永磁体数量越少。为了降低气隙推力谐波含量且确保电磁推力最大,永磁体宽度选取在20~30 mm之间,为了使永磁体的利用率最大化,选择永磁体宽度比为9,即永磁体和辅助磁钢宽度分别为27 mm和3 mm。

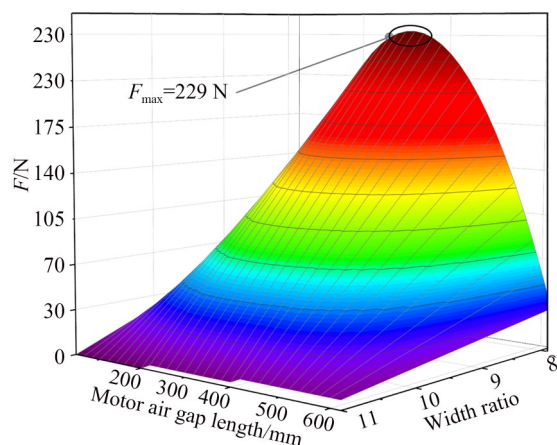


图12 永磁体宽度对推力的影响

Fig. 12 Influence of permanent magnet width on thrust force

### 5.3 永磁体高度对推力的影响

由式(16)和式(17)可知,随着永磁体高度 $h_m$ 的逐渐增加,其推力也逐渐增大。永磁体高度为“V”字形外层永磁体高度加内层永磁体高度,且内外层永磁体高度一致,将单层永磁体高度从2 mm增加到10 mm,间隔为2 mm,并

采用电磁场数值法对其电磁性能进行仿真计算。

不同永磁体高度 $h_m$ 对应的电磁推力的分布曲线如图13所示。当永磁体高度 $h_m$ 大于7 mm时,电磁推力增加缓慢,平动刚度增加不明显,是因为当永磁体气隙值和永磁体的长、宽一定时,其主要影响磁通产生的因素为永磁体面积,高度对永磁体产生磁力的影响有限。最后,综合考虑永磁体的加工工艺和电机的整体尺寸,永磁体高度选取为7 mm。

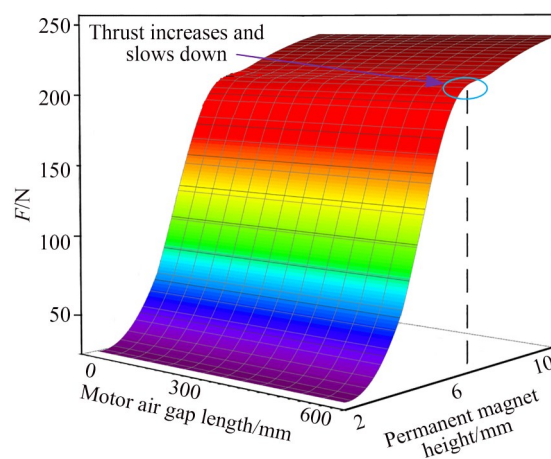


图13 永磁体高度与推力的关系

Fig. 13 Relationship between permanent magnet height and thrust

### 5.4 最终设计结果

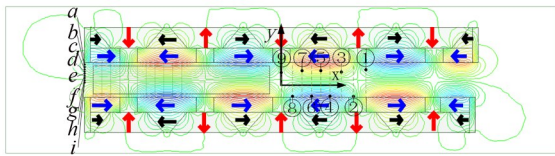
基于上文分析,最终设计结果如表2所示。永磁体采用N48,其饱和磁通密度为1.42 T,为防止材料区域磁密饱和,取最大磁通密度为1.0 T,磁极面积为0.000 08 m<sup>2</sup>,电机气隙场长度为0.6 m。综合考虑气隙纵向磁密和横向磁密,在绕组前端部分区域横向均匀取9条线段a,b,c,d,e,f,g,h,i;当动子运动到磁轨中心时,纵向均匀再取9条线①~⑨,磁路分布如图14(a)所示。由图14(b)可知,离磁钢越远,磁密越小,边缘气隙磁密最小为0.45 T,边缘气隙磁密最大为0.6 T,磁密波动率为25%。同样y向气隙磁密如图14(c)所示,气隙中心磁密最小,越靠近边缘磁密波动越大,边缘气隙最大磁密为0.67 T,最小磁密为0.47 T,磁密波动率为29.8%。如图15所示,优化后的推力提高了13.5%,推力波

动降低了 45%, 推力仿真计算结果为 278 N, 数值计算结果为 285 N, 误差为 2.4%, 在允许范围内, 如图 16 所示。

表 2 设计结果

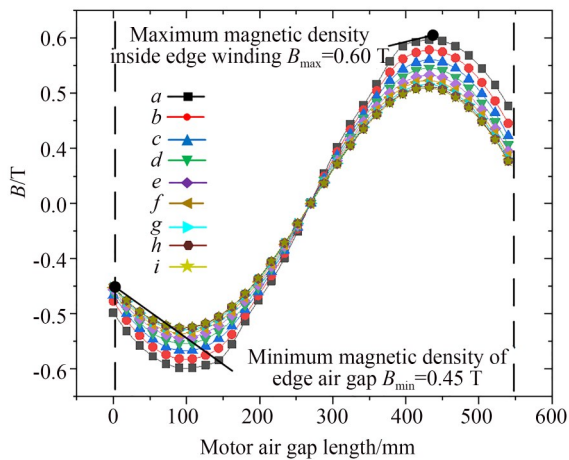
Tab. 2 Design results

| 参 数                   | 设计值    |
|-----------------------|--------|
| 气隙尺寸/mm               | 1      |
| 极距/mm                 | 60     |
| 极对数                   | 2      |
| 绕组内导线直径/mm            | 0.36   |
| 边缘最大磁密 $B_{\max}/T$   | 0.6    |
| 边缘最小气隙磁密 $B_a/T$      | 0.45   |
| 推力波动率( $v_a$ )        | 2.1%   |
| 永磁体宽度/mm              | 27     |
| 永磁体厚度 $h_m/mm$        | 7      |
| 永磁体长度 $l_p/mm$        | 50     |
| 绕组线圈匝数 $N$            | 200    |
| 气隙中心最小磁密 $B_{\min}/T$ | 0.47   |
| 气隙中心最大磁密 $B_{\max}/T$ | 0.67   |
| 推力线性度 $N/A$           | 11 671 |



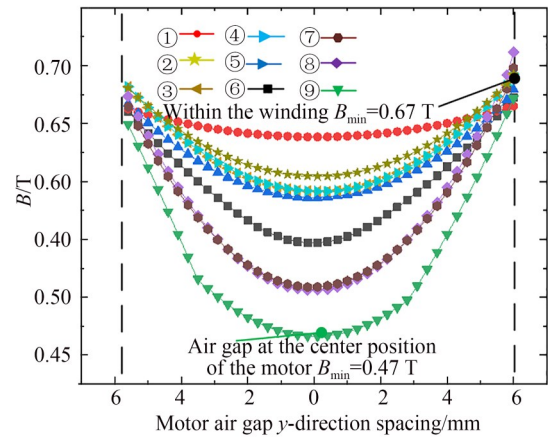
(a) 电机气隙磁密分析

(a) Analysis of motor air gap magnetic density



(b) 气隙x向磁密分布

(b) X-direction magnetic density distribution of air gap



(c) 气隙y向磁密分布

(c) Y-direction magnetic density distribution of air gap

图 14 电机气隙磁密分布

Fig. 14 Magnetic density distribution of motor air gap

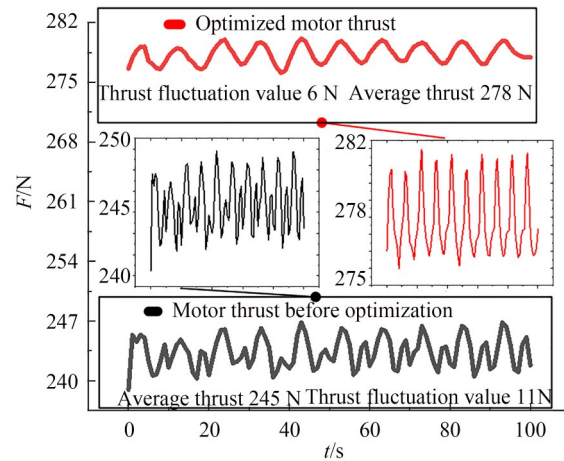


图 15 优化后推力

Fig. 15 Optimized motor thrust

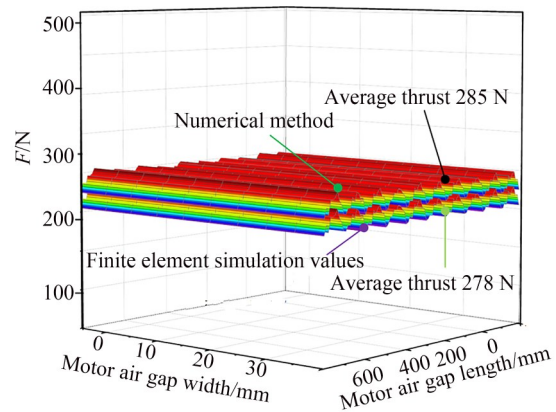
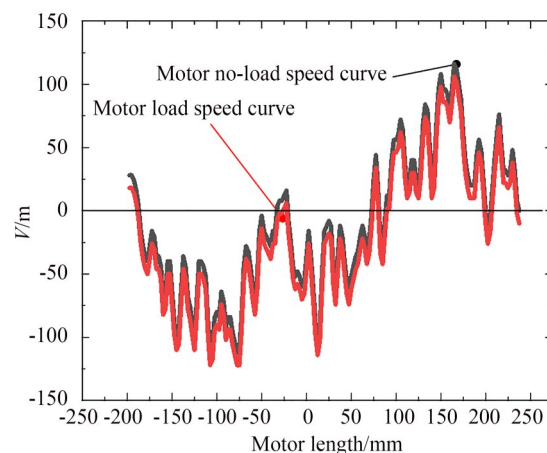


图 16 数值计算与有限元仿真结果对比

Fig. 16 Comparison between numerical calculation and finite element simulation results

## 6 实 验

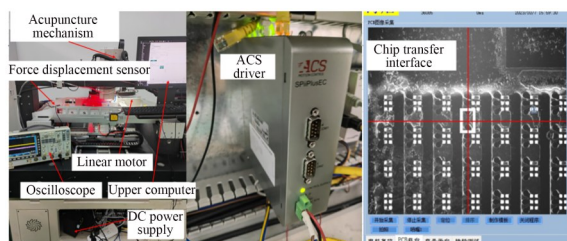
基于前文设计结果研制一台V形双层Halbach直线电机用在巨量转移设备上,进行转移实验,对电机推力和加速度进行测试,实验装置如图17(a)所示。电机推力测试时,将力位移传感器贴到载晶平台进行固定,通过上位机控制电机以 $x$ 轴某一固定方向1 mm/次的周期直线运动并记录数据, $y$ 轴方向保持位置稳定直至测量结束。推力波动曲线如图17(b)所示,从图中可以看出,平均推力为275 N,平均波动值为6 N,平均波动率为2.1%,误差为1.2%。加速度测试结果如图17(c)所示,空载加速度为 $10 \text{ m/s}^2$ ,负载加速度为 $8 \text{ m/s}^2$ ,理论转移速度可达50颗/秒,验证了双层永磁磁钢性能的合理性。



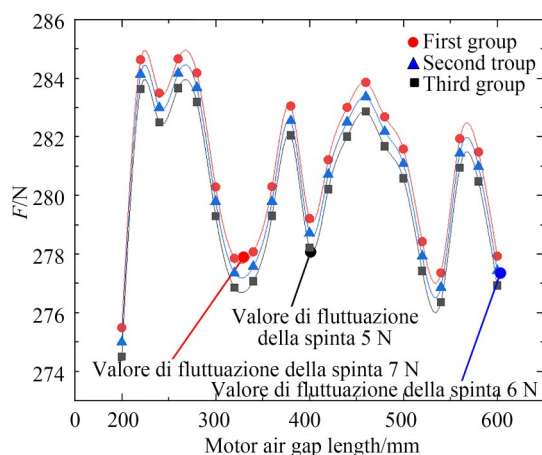
(c) 电机加速度实验结果  
(c) Motor acceleration experiment results

图17 平台转移实验

Fig. 17 Test transfer experiment



(a) 测试装置  
(a) Test equipment



(b) 电机推力测试结果  
(b) Test results of motor thrust

## 7 结 论

本文针对巨量转移用聚磁式直线电机梯形Halbach结构、双层Halbach和V形双层Halbach结构,比较分析了3种电机磁路方案的气隙磁密特性,得到了较优的V形双层Halbach方案。采用等效磁化电流法建立了V形双层Halbach直线电机的数学模型,得到其平动电流刚度的数学表达式,在此基础上,利用电磁场数值法对其电磁结构进行实例设计,基于设计结果研制了一台直线电机用于巨量转移平台,并利用力位移传感器进行测试。实验结果表明,该电机的推力最大为284 N,平均推力为275 N,推力波动值为6 N,推力波动率为2.1%,数值计算结果为285 N,误差为2.4%,在5%以内,与设计值相符,验证了理论分析和设计结果的正确性;电机的空载加速度为 $10 \text{ m/s}^2$ ,理论芯片的转移速度可达50颗/秒,对巨量转移设备性能提升具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 王伟,赵甜甜,刘强,等. Mini/Micro LED巨量转移技术研究与现状[J]. 光学精密工程,

2023, 31(2): 183-199.

WANG W, ZHAO T T, LIU Q, *et al.* Research and development status of Mini/Micro LED mass transfer technology [J]. *Opt. Precision Eng.*,



- 2023, 31(2): 183-199. (in Chinese)
- [2] 严子雯, 严群, 李典伦, 等. 高度集成的  $\mu$ LED 显示技术研究进展[J]. 发光学报, 2020, 41(10): 1309-1317.  
YAN Z W, YAN Q, LI D L, *et al.* Research progress of high integration density  $\mu$ LED display technology[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(10): 1309-1317. (in Chinese)
- [3] 张娟, 焦志强, 闫华杰, 等. 微腔效应对顶发射串联蓝光有机电致发光器件性能的影响[J]. 物理学报, 2020, 69(9): 229-243.  
ZHANG J, JIAO ZH Q, YAN H J, *et al.* Influence of microcavity effect on the performance of top emission tandem blue organic light emitting devices [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(9): 229-243. (in Chinese)
- [4] ZHANG J, JIAO Z Q, YAN H J, *et al.* Influence of microcavity effect on the performance of top emission tandem blue organic light emitting devices [J]. *Acta Phys*, 2020, 69(9): 229-243.
- [5] 潘祚坚, 陈志忠, 焦飞, 等. 面向显示应用的微米发光二极管外延和芯片关键技术综述[J]. 物理学报, 2020, 69(19): 70-93, 383.  
PAN Z J, CHEN ZH ZH, JIAO F, *et al.* A review of key technologies for epitaxy and chip process of micro light-emitting diodes in display application [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(19): 70-93, 383. (in Chinese)
- [6] ZHU G Q, LIU Y J, MING R, *et al.* Mass transfer, detection and repair technologies in micro-LED displays [J]. *Science China Materials*, 2022, 65(8): 2128-2153.
- [7] 孙宁宁, 杨彪, 陈福荣, 等. 激光辅助 MicroLED 巨量转移技术进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(4): 513-528.  
SUN N N, YANG B, CHEN F R, *et al.* Advances in laser-assisted mass transfer of MicroLED [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(4): 513-528. (in Chinese)
- [8] MASTRANGELI M, ABBASI S, VAREL C, *et al.* Self-assembly from milli- to nanoscales: methods and applications[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(8): 83001.
- [9] LI J Y, LUO B Q, LIU Z J. Micro-LED mass transfer technologies [C]. 2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). August 12-15, 2020. Guangzhou, China. IEEE, 2020: 1-3.
- [10] KELLY M K, AMBACHER O, DIMITROV R, *et al.* Optical process for liftoff of group III-nitride films [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 1997, 159(1): R3-R4.
- [11] BOHANDY J, KIM B F, ADRIAN F J. Metal deposition from a supported metal film using an excimer laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(4): 1538-1539.
- [12] WU M H, FANG Y H, CHAO C H. Electric-programmable magnetic module and picking-up and placement process for electronic devices: US9607907[P]. 2017-03-28.
- [13] MEITL M A, ZHU Z T, KUMAR V, *et al.* Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp [J]. *Nature Materials*, 2006, 5: 33-38.
- [14] BIBL A, HIGGINSON J A, LAW H F S, *et al.* Micro device transfer head heater assembly and method of transferring a micro device: US10121864[P]. 2018-11-06.
- [15] 邓应铨, 曾逸. 一种针刺式固晶机: CN113539935 A[P]. 2021-10-22.  
DENG Y CH, ZENG Y. A needle punched crystal solidification machine: CN113539935A [P]. 2021-10-22. (in Chinese)
- [16] JIN J X, ZHENG L H, XU W, *et al.* Experimental study on thrust and normal force of a permanent magnet linear synchronous motor [C]. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. August 20-23, 2011. Beijing, China. IEEE, 2011: 1-6.
- [17] HUANG X Z, LI J, ZHANG C M, *et al.* Electro-magnetic and thrust characteristics of double-sided permanent magnet linear synchronous motor adopting staggering primaries structure [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4826-4836.
- [18] 王荣坤, 于作超, 王杰. X-Y 直线电机精密运动平台的轮廓误差主动补偿 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1536-1543.  
WANG R K, YU Z CH, WANG J. Active compensation of contour error of X-Y linear motor precision motion platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(7): 1536-1543. (in Chinese)
- [19] 刘强, 赵勇, 代峰燕, 等. 磁悬浮陀螺飞轮用隐式洛伦兹力磁轴承 [J]. 光学精密工程, 2018, 26



- (2): 399-409.
- LIU Q, ZHAO Y, DAI F Y, *et al.* Novel internal Lorentz magnetic bearing for magnetic bearing gyrowheel[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 399-409. (in Chinese)
- [20] 许金, 杨归, 李明珂, 等. 永磁直线同步电机Halbach阵列电磁激振力建模[J]. 海军工程大学学报, 2023, 35(5): 46-51.
- XU J, YANG G, LIM K, *et al.* Modeling of electromagnetic excitation force in Halbach array of permanent magnet linear synchronous motors [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2023, 35(5): 46-51. (in Chinese)
- [21] 刘强, 赵勇, 王伟, 等. 一种U形聚磁效应的隐式洛伦兹力偏转磁轴承: CN106763187B[P]. 2018-11-02.
- LIU Q, ZHAO Y, WANG W, *et al.* Hidden Lorentz force deflection magnetic bearing with U-shaped magnetism gathering effect: CN106763187 B[P]. 2018-11-02. (in Chinese)
- [22] 黄卫清, 杨成龙, 沈兆琛, 等. 低压驱动V形直线超声电机的设计[J]. 光学精密工程, 2021, 29(1): 91-99.
- HUANG W Q, YANG CH L, SHEN ZH CH, *et al.* Design of V-shaped linear ultrasonic motor driven with low-voltage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(1): 91-99. (in Chinese)
- [23] 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, 1-9[2023-09-01].
- ZHANG Y X, YAN J H, CHI S, *et al.* Electromagnetic force analysis of passive mover Halbach maglev permanent magnet linear synchronous motor considering end effects [J]. *Electric Machines and Control*, 1-9[2023-09-01]. (in Chinese).
- [24] 缪仲翠, 苏乙, 张磊, 等. 梯形Halbach交替极无铁心永磁同步直线电机特性分析与优化设计[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1): 164-176.
- MIAO Z C, SU Y, ZHANG L, *et al.* Characteristic analysis and optimization design of air-core permanent magnet linear synchronous motor with trapezoidal Halbach array consequent-pole [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(1): 164-176. (in Chinese)
- [25] 张鲁, 寇宝泉, 赵斌超, 等. 新型Halbach次级结构永磁同步直线电机[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 39-45.
- ZHANG L, KOU B Q, ZHAO B CH, *et al.* A novel synchronous permanent magnet linear motor with halbach secondary structure [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(7): 39-45. (in Chinese)
- [26] 李立毅, 唐勇斌, 刘家曦, 等. 多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 69-77, 14.
- LI L Y, TANG Y B, LIU J X, *et al.* Application of the multiple population genetic algorithm in optimum design of air-core permanent magnet linear synchronous motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(15): 69-77, 14. (in Chinese)
- [27] 刘强, 赵明师, 韩邦成, 等. 永磁偏置径向磁轴承能量优化与实验[J]. 光学精密工程, 2019, 27(11): 2420-2428.
- LIU Q, ZHAO M SH, HAN B CH, *et al.* Energy optimization and experimental for a permanent magnet-biased radial magnetic bearing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(11): 2420-2428. (in Chinese)

## 作者简介:



刘 强(1983—),男,江西九江人,教授,博士生导师,2013年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事Mini/Micro LED巨量转移和磁悬浮轴承技术的研究。E-mail: liuqiangbuaa@163.com

## 通讯作者:



王 伟(1965—),女,吉林白城人,副教授,硕士生导师,1992年于中国科学院长春光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事测量与控制技术和磁悬浮支撑技术的研究。E-mail: shawang66@163.com