

# 基于双定子直线超声电机的移动平台设计

黄帅军<sup>1</sup>, 刘振<sup>2</sup>, 付前卫<sup>2</sup>, 姚志远<sup>2</sup>, 刘献伟<sup>1</sup>

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)

**摘要:**设计了一个新型的直线超声电机移动平台,该平台利用超声电机的并联技术,采用对称的双定子推动直线导轨滑动。定子采用矩形板结构和一端铰支的夹持方式,其工作模式选用矩形结构的一阶弯曲振动模式和一阶纵向振动模式。分析表明,与其他振动模式相比,矩形板结构的一阶振动模式具有较高的输出效率;双定子对称结构能减小定子与直线导轨间预压力对移动平台的影响,利于直线导轨运行稳定性的提高;定子一端铰支的夹持方式能增加定子夹持的切向刚度,可提高平台输出力。该文最后通过实验测试了双定子平台的输出特性。实验结果表明,双定子平台的负载达到 8.5 kg,最大空载速度为 305 mm/s,与单定子平台相比,其负载增加了 70%。

**关键词:**移动平台;结构设计;直线超声电机;双定子;夹持方式

**中图分类号:**TM 359.4;TB 559

**文献标识码:**A

## Design of a Mobile Platform Based on Linear Ultrasonic Motor With Double Stators

HUANG Shuaijun<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>2</sup>, FU Qianwei<sup>2</sup>, YAO Zhiyuan<sup>2</sup>, LIU Xianwei<sup>1</sup>

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China; 2. State Key Lab. of Mechanics and

Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In this paper, a new platform based on linear ultrasonic motor is designed. The parallel technology of ultrasonic motor is utilized in the design and the symmetrical double stators are used to drive the slider. The rectangular plate structure and clamping method of one end hinged support are adopted in the stator. The first order flexural vibration mode and the first order longitudinal vibration mode of the stator are chosen as the working modes. The analysis result shows that the first order vibration mode of the stator has higher output efficiency compared with the other vibration modes; the symmetrical double stators can reduce the influence of the pre-pressure between the stator and the slider on the mobile platform, which can improve the stability of the platform. One end hinged support of the clamping part can increase the tangential stiffness of stator, which can improve the output force of the platform. Finally, the output characteristics of the double stator platform are tested by experiments. The results show that the load of the proposed double stator platform is up to 8.5 kg which is increased by 70% compared with the single stator platform and the maximum no-load speed is 305 mm/s.

**Key words:** moving platform; structure design; linear ultrasonic motor; double stators; clamping method

### 0 引言

直线超声电机是全新原理的微特电机,它利用压电陶瓷逆压电效应激发结构振动,并通过定/动子间的摩擦作用驱动动子移动。由于其结构设计灵活、易小型化、推重比大、响应速度快、断电自锁、无电磁干扰、移动精度高、可适应低温和真空等极端环境等优点<sup>[1-2]</sup>,在航空航天、武器装备等领域有着重要应用价值。

目前,直线超声电机的研究主要围绕着定子结构的设计开展,其目的是提高结构的振动效率,增加电机的输出功率。1998年,日本学者 Kurosawa 等<sup>[3]</sup>提出利用两个兰杰文振子来设计 V 型驻波型直线超声电机,该电机结构紧凑简单,具有良好的输出性能,它的研究受到了关注。2008年,杨东等<sup>[4]</sup>利用连续变幅杆改进了 V 型直线超声电机的设计,进一步提高了电机的输出效率,它的最大推力为 21.4 N,最大速

**收稿日期:**2016-05-08

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51275229)

**作者简介:**黄帅军(1982-),男,河南洛阳人,高级工程师,硕士,主要从事结构设计及试验验证的研究。E-mail: hsj815@163.com。姚志远(1961-),男,江苏南京人,教授,博士,主要从事结构动力学建模和分析的研究。E-mail: zyyao@nuaa.edu.cn。

度为 300 mm/s。2015 年,简月等<sup>[5]</sup>通过改变定子夹持的方式和提高定子夹持系统切向刚度,增加电机的结构稳定性和输出效率。将 V 型直线超声电机的推力提高到 37 N,速度高达 1.4 m/s。

直线超声电机的驱动原理决定了它在微小结构时比电磁电机具有更高的输出效率,因此直线超声电机适合制作成小结构(定子结构的特征尺寸通常在 200 mm 以内)。由于单个直线超声电机的结构较小,即使单个电机的能量密度很大,电机的输出力仍较小<sup>[6-8]</sup>。目前,国内输出力大于 50 N 的直线超声电机报道较少。

直线超声电机并联技术是提高直线移动平台推力的一个重要途径,其研究备受关注。2011 年,王金鹏<sup>[9]</sup>研究了直线超声电机的并联技术,提出异步并联的驱动方案。实验表明,与相对同步并联相比,异步并联推力可提高 30%。2012 年,王佳男<sup>[10]</sup>采用并联技术研制了双 V 形振子并联压电直线电机。受其技术限制,该电机的最大推力小于 16 N。

直线超声电机通过摩擦驱动直线导轨运动,而直线超声电机并联时,由于一些技术上的问题,一个定子对直线导轨的摩擦力会影响到另一个定子对直线导轨的摩擦力,进而影响直线超声电机的输出性能(通常并联后的电机推力小于 2 个电机的推力之和)。本文以小结构、大推力移动平台为研究对象,通过定子的结构设计来提高结构的空间利用率和增加单个定子的推力,进而利用双定子并联结构增加平台的推力。该直线超声电机移动平台结构紧凑,单向最大推力达到 8.5 kg,最大速度为 305 mm/s。

## 1 平台的设计

### 1.1 平台的结构设计

双定子直线超声电机移动平台的设计方案如图 1 所示。该平台有定子 1、定子 2、直线导轨、固定件及底座组成。直线导轨位于底座的中部,定子分布在移动平台的两侧,呈现对称结构,定子通过夹持元件和固定件固定在底座上。定子采用矩形板结构,驱动足位于矩形板的一个边角上,如图 1 所示。

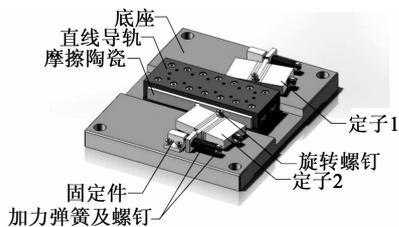


图 1 双定子直线超声电机移动平台的三维图

单个定子由弹性体、压电陶瓷、电极片、夹持元件和螺钉组成。这种螺钉连接的超声电机利用压电陶瓷的  $d_{33}$  效应,具有较强的机电耦合性,一定程度上提高了直线超声电机的输出特性。压电陶瓷带孔的 2 个面分正、负极,标有正极的平面中间有一块无银层的区域。图 2 为 4 片电极片和压电陶瓷的布置方式。其中 2 片电极片与 A 相电信号相连,另外 2 片电极片与 B 相电信号相连。为了方便描述电机定子的振动状态,本文又将单个定子分成 I、II 区域。在定子一阶弯振频率下,对 A、B 相施加 2 个相位差为  $180^\circ$  的正弦信号时,定子的 I 区会伸长或收缩,而 II 区会收缩或伸长(定子为一阶弯曲振动模式);同样,如果在一阶纵振频率下,对 A、B 相施加同相位的正弦信号时,定子的 I、II 区会同时伸长或收缩(定子为一阶纵向振动模式)

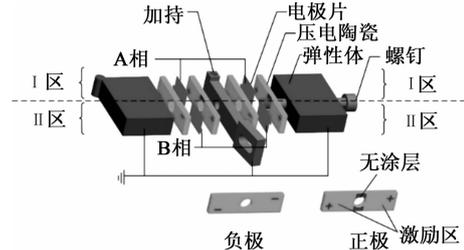


图 2 单个定子的结构示意图

### 1.2 平台的工作原理

如图 3、4 所示,在定子的一个运动周期内,定子与直线导轨的接触过程是间断的,这一过程可以分成两个阶段:接触阶段( $nT \sim nT + T/2$ )和分离阶段( $nT + T/2 \sim (n+1)T$ )( $T$  为定子振动周期, $t$  为时间)。当激发出定子的一阶弯振模式时,定子开始振动,这一过程定子 II 区伸张的同时 I 区收缩,此时定子推动直线导轨作加速直线运动;经过  $1/4$  周期后,定子 I 区开始伸张的同时 II 区开始收缩,此时定子推动直线导轨作减速直线运动;又经过  $1/4$  周期后,直线导轨静止并且定子与直线导轨开始分离,再过  $1/2$  周期后,定子驱动足重新与直线导轨接触,进入一个新的周期运动。而当激发出定子的一阶纵振模式时,两定子的 I、II 区同时伸张,此时定子推动直线导轨作加速直线运动(与一阶弯振模式下直线导轨的运动方向相反);经过  $1/4$  周期后,两定子的 I、II 区同时收缩,此时定子推动直线导轨作减速直线运动;又经过  $1/4$  周期后,直线导轨静止且定子与直线导轨开始分离,再过  $1/2$  周期后,定子驱动足重新与直线导轨接触,进入下一个周期运动。

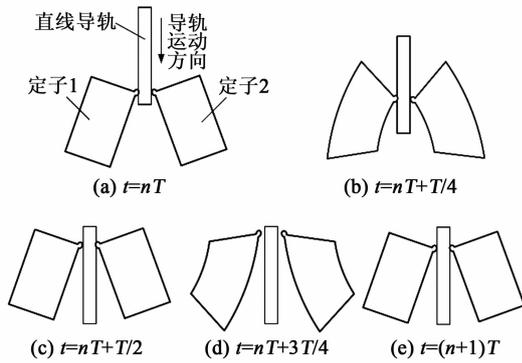


图3 双定子一阶弯振下的连续运动

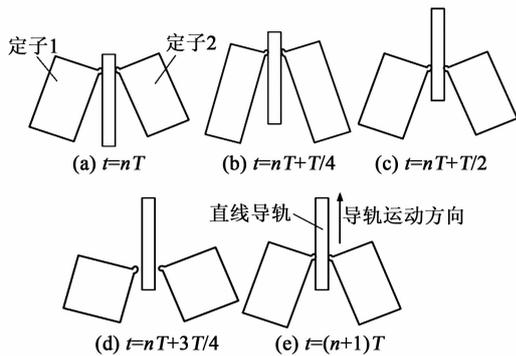


图4 双定子一阶纵振下的连续运动

### 1.3 平台的结构和输出特性分析

#### 1.3.1 定子的矩形结构对输出效率的影响

矩形板结构对输出效率的影响包含 2 个方面：

1) 设计采用矩形板的一阶弯振模态和一阶纵振模态，它们是结构的低阶模态，具有高的振动效率。

2) 并联技术的核心是在设计和加工 2 个方面确保两个定子的振动特性的一致性，矩形板结构为简单结构，在结构的一阶弯振模态和一阶纵振模态附近无干扰模态，它从设计上保证了 2 个定子的振动特性的一致性，降低了对机械加工精度的要求，提高了并联平台的输出效率。

#### 1.3.2 双定子并联对推力的影响

现有的直线超声电机最大推力在 40 N 内，为达到 80 N 的推力，采用了 2 个定子并联的结构。并联技术的成功实现，取决于工作中的 2 个定子的振动特性一致性。工作中定子的振动特性一致性取决于定子模态特性的稳定性及定子的夹持方式。一端铰支的夹持方式能保证电机结构及振动特性的稳定性。

#### 1.3.3 一端铰支夹持对推力的影响<sup>[11]</sup>

为实现 80 N 的推力，需进一步增加单个定子的

推力。在这项设计中，采用一端铰支的夹持方法。该夹持方式使每个定子只能绕夹持首端孔位作微幅旋转，它表现为定子的驱动足仅有法向（与动子运动垂直的方向）的移动趋势。因此，夹持结构的切向（与动子运动平行的方向）刚度充分大。夹持结构的切线刚度增大，提高了推力，使单个定子的推力达到 50 N。一端夹持的铰支仅一个自由度，在增加夹持结构切向刚度的同时，也提高结构的稳定性，保证其 50 nm 分辨率的实现。

## 2 实验研究

制作电机样机，搭建平台进行试验研究，平台的三维结构如图 5 所示。

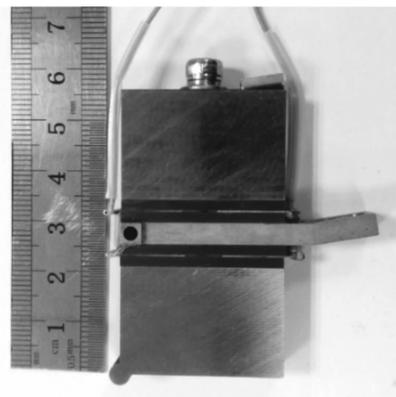


图5 单个定子的实物图

电机的 2 个定子通过旋转螺钉、固定件、加力弹簧及螺钉与底座相连接，保证了电机在平台上只有一个自由度（既只能绕着旋转螺钉旋转）。电机动子采用直线导轨，定子与动子的接触面粘贴有摩擦条。定子和动子间的预压力通过弹簧和预压螺钉进行施加。单个电机定子（见图 5）的定子质量为 102 g。

### 2.1 定子的模态特性

用 Polytec 公司 PSV-300F-B 型高频扫描激光测振系统做定子的频率响应实验。定子两侧的电极片同时接入互为反相的电压信号，改变信号的频率，在激光测振仪上测试定子的一阶弯振频率。当两侧的电极片同时接入同相电压信号，改变信号的频率，同样可测得定子的一阶纵振频率。由测试结果可得，定子 1 的一阶弯振与一阶纵振频率分别为 24.2 kHz、32 kHz，定子 2 的一阶弯振与一阶纵振频率分别为 23.8 kHz、31.7 kHz，两者的一阶弯振频率差和一阶纵振频率差均在 600 Hz 以内。根据扫频结果，对定子施加一定频率的两相正弦交流电

压,进行定频测试,其定子驱动足所在端面的位移响应结果如图 6 所示。图 6(a)是在一阶弯振频率下且相位相反的一组正弦电压信号(峰-峰值为 80 V)激励下的定子 1、2 驱动足端面纵向位移响应,其振幅分别为 1.1  $\mu\text{m}$  和 1.2  $\mu\text{m}$ ;图 6(b)是在一阶纵振频率下且相位相同的一组正弦电压信号(峰-峰值为 80 V)激励下的定子 1、2 驱动足端面纵向位移响应,其振幅分别为 1.7  $\mu\text{m}$  和 1.8  $\mu\text{m}$ 。

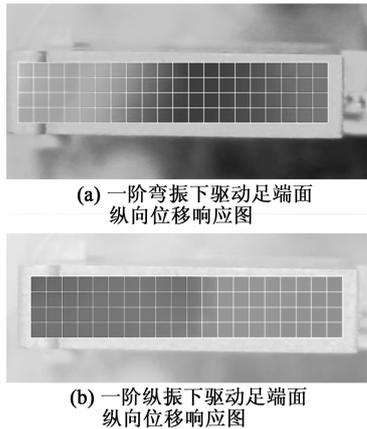


图 6 一阶弯振、纵振下驱动足端面纵向位移响应图

### 2.2 平台的机械输出特性

通过分析定子的模态特性可知,定子 1、2 在相同模态下的频率存在一定的差异,所以首先测试 2 个定子同时工作时的一阶弯振频率、一阶纵振频率与平台空载时输出速度间的关系。利用一台信号发生器与 2 台功率放大器为定子供电,激励电压峰-峰值为 750 V 时,利用激光测速仪测得电机激励频率与平台空载速度的关系曲线,如图 7、8 所示。由图可看出,双定子同时运动的一阶弯振频率范围为 22~25 kHz,最佳驱动频率为 23 kHz 时,电机运动速度最快为 305 mm/s;双定子同时运动的一阶纵振频率范围为 30~33 kHz,最佳驱动频率为 31.2 kHz 时,电机运动速度最快为 232 mm/s。

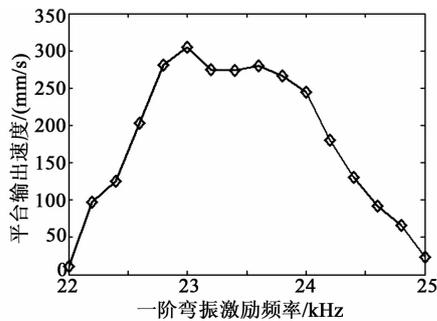


图 7 一阶弯振下双定子频率与速度的关系曲线

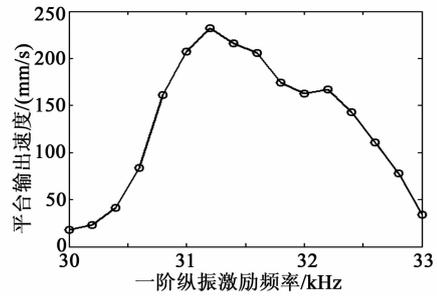


图 8 一阶纵振下双定子频率与速度的关系曲线

图 9 为平台的输出力与速度的关系曲线图。其中输出力是采用吊砝码方式为电机提供不同负载来测得。当一阶弯振激励频率为 23 kHz,电压的峰-峰值为 750 V,此时单个定子的最大输出力为 5 kg,双定子的最大输出力为 8.5 kg,双定子平台与单定子平台相比输出力提高了 70%。当一阶纵振激励频率为 31.2 kHz,电压的峰-峰值为 750 V 时,单个定子的最大输出力为 4.6 kg,双定子的最大输出力为 8 kg,双定子平台与单定子平台相比输出力提高了 74%。

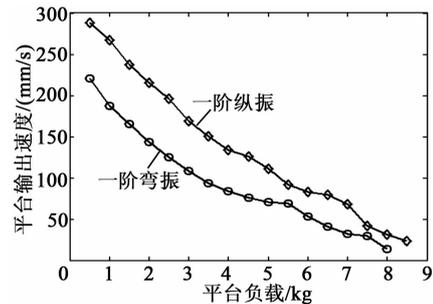


图 9 双定子平台负载与输出速度的关系曲线

### 3 结论

- 1) 提出了一款新型直线超声电机移动平台,该平台采用对称的双定子结构和一端铰支的夹持方式。它具有紧凑的结构和大的推力。
- 2) 定子为矩形板结构,采用板结构的一阶弯振和一阶纵振,具有更高的振动效率。
- 3) 一端夹持方式能提高定子夹持的切向刚度和平台的推力。
- 4) 定子为矩形板结构,采用板结构的一阶弯振和一阶纵振,使定子的振动模态更稳定;一端夹持方式提高了结构的稳定性。这些措施确保并联技术的实现。
- 5) 实验研究表明,双定子推力约增加 70%,平台推力达 8.5 kg,最大空载速度为 305 mm/s。

(下转第 206 页)