

# 面向微电子超声键合的精密气浮定位平台特性分析

梁存满, 王福军, 杨庆国, 张大卫\*

(天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 基于有限元方法, 详细考察了两自由度气浮支撑定位平台的静动态特性。建立了定位平台的有限元模型, 分别对其进行了静态、模态和瞬态分析。通过静态分析, 考察了系统在静力载荷作用下的响应特性; 经模态分析, 获取了定位平台的固有频率以及模态振型; 通过施加脉冲力激励, 探讨了系统的脉冲响应, 通过方波力信号模拟定位平台的实际工作状态, 得到了定位平台的瞬态响应特性。结果表明, 该定位平台具有良好的静动态特性, 为该类气浮支撑定位平台的结构优化设计与控制提供了重要信息。

**关键词:** 气浮支撑; 定位平台; 特性分析; 有限元方法; 超声键合

中图分类号: TH 138 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2014)06-0077-04

## 0 序言

超声键合是微电子封装制造的重要互连技术之一, 在微电子集成电路制造过程起着至关重要的作用, 其实质是通过金属细丝将微电子器件的焊区与其外围电路的焊区连接起来的焊接工艺。近年来, 随着半导体行业的迅速发展, 集成电路芯片的集成度也越来愈高, 这就对其封装技术提出了更高的要求。引线键合也向高速、高精度和高可靠性方向发展<sup>[1-4]</sup>。两自由度精密定位平台作为引线键合设备的核心组成部件, 其性能直接决定相关操作的质量。该类定位平台具有短行程、高加速度和高精度的运动特点, 通常其运动最大行程可达几十毫米, 定位精度为微米级或亚微米级<sup>[5]</sup>。

音圈电机是一种新型直驱电机形式, 具有响应快和力特性平稳等优点, 能够实现宏观短行程运动的高速精密定位<sup>[6-7]</sup>。基于此, 文中提出一种基于直线音圈电机直接驱动的两自由度气浮支撑定位平台结构, 基于有限元方法, 详细考察其静动态特性, 以为平台的结构优化和控制提供参考信息。

## 1 气浮定位平台的结构

图1为气浮定位平台结构, 该平台主要由底座、

直线音圈电机、上平台、中间平台、导轨、气浮滑块、气浮解耦机构、直线光栅尺等部件组成。 $x$ 向与 $y$ 向直线音圈电机直接固定在底座上; $x$ 向导轨通过导轨支座固定在支座上, 利用气体润滑的气浮滑块安装在导轨上; 四个滑块上安装有中间平台, 中间平台的一端通过连杆与 $x$ 向电机输出轴连接; 在中间平台上, 通过导轨支座安装 $y$ 向导轨, 导轨上安装四个气浮滑块; 上平台安装在气浮滑块上, 上平台的另一端底面安装解耦滑块, 穿过解耦滑块安装解耦导轨, 解耦导轨通过连杆与 $y$ 向电机输出轴连接。

气浮滑块要由滑块外套、滑块内套、节流器、含油轴承等组成。气浮导轨的工作方式是通过将气浮滑块的内孔套在气浮导轨上, 在导轨与气浮滑块间通入高压气体以构成润滑间隙。节流器采用双排周向均布八个节流孔的布置方式, 从而使得气浮滑块具有较好的承载能力和刚度。工作时, 高压气体通过进气孔进入周向气腔中, 然后经过节流孔, 最后沿着导轨与气浮滑块之间的间隙排入大气。

由于该平台采用直线音圈电机直驱, 省去了中间传动环节, 在 $y$ 轴方向电机与上平台之间采用气浮解耦机构, 从而将电机直接安装在底座上, 降低了运动部件的质量, 使定位平台实现高加速度、高精度运动成为可能。

## 2 定位平台有限元建模

利用有限元分析软件 ANSYS, 对定位平台系统进行建模, 通过材料属性定义和网格划分, 最终得到其有限元模型。

收稿日期: 2013-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205279); 天津市应用基础与前沿技术青年项目(13JCQNJC04100); 天津大学北洋学者青年骨干教师项目(60301014)

\* 参加此项研究工作的还有赵兴玉, 田延岭

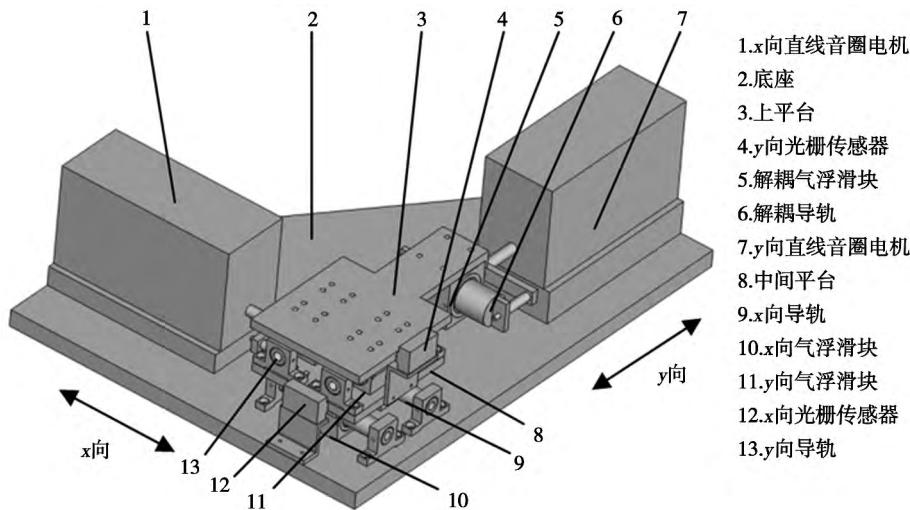
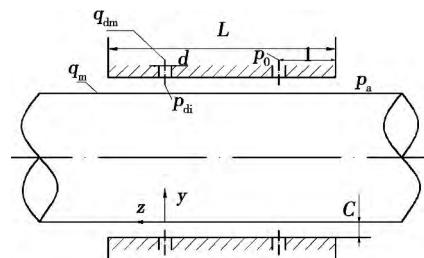


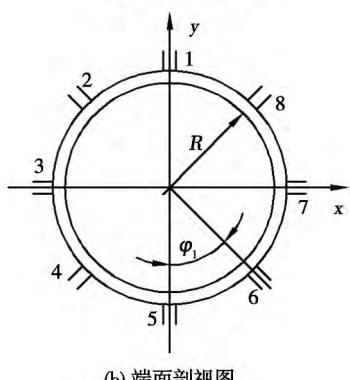
图1 两自由度气浮定位平台的三维造型图

Fig. 1 Diagram of 2-DOF air-supported positioning table

对于上平台与中间平台、中间平台与底板、解耦机构处的气浮滑块导轨,采用弹簧阻尼单元 Combin14 来等效模拟气浮导轨与滑块间的接触,在滑块内圆柱面与导轨外圆柱面上相对应的节点间建立弹簧阻尼单元,每个滑块与导轨间建立双排周向均布的八个弹簧阻尼单元。滑块和导轨采用扫掠划分形式进行网格划分,通过网格尺寸的控制,确保相对应的节点对之间连线与导轨圆柱面相垂直。与气浮轴承不同,气浮滑块只滑动不转动,气浮滑块的结构简图如图 2 所示,根据相关资料可知滑块承载能力  $F$  的表达式为<sup>[8]</sup>



(a) 侧面剖视图



(b) 端面剖视图

图2 气浮滑块的结构简图

Fig. 2 Sketch map of air bearing

$$F = 2R \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \sum_{i=1}^n P_{di} \left( l_1 + \frac{4}{3} l \frac{1 - \left(\frac{\sigma}{\beta_i}\right)^3}{1 - \left(\frac{\sigma}{\beta_i}\right)^2} \right) \cos\phi_i \quad (1)$$

式中:  $l_1 = L - 2l$ , 为双排节流孔间距;  $\sigma = P_a/p_0$ , 为环境压力与供气压力之比;  $\beta_i = P_{di}/p_0$ , 为节流孔后压力与供气压力之比;  $n$  为节流孔个数;  $L$  为滑块长度;  $l$  为节流孔到滑块端面距离;  $p_0$  为供气气压;  $\phi_i$  为第  $i$  个节流孔的角坐标;  $R$  为导杆半径。气浮导轨的静态刚度是承载能力  $F$  变化量与偏心距  $e$  变化量的比值为

$$K_F = \frac{\Delta F}{\Delta e} \quad (2)$$

所设计气浮导轨的基本参数为:  $p_0 = 0.5 \text{ MPa}$ ,  $L/D = 1$ ,  $d = 0.15 \text{ mm}$ ,  $D = 20 \text{ mm}$ ,  $C = 0.015 \text{ mm}$ 。由此可确定  $K$  值, 文中在有限元建模中取  $K = 8 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。

### 3 静态特性分析

定位平台的静态特性分析, 主要考察其在静力作用下的变形和应力情况, 进而为结构优化设计与误差补偿提供指导。

在工作平台上表面施加 20 N 的工作载荷, 进行静态特性计算。结果表明, 定位平台的最大变形发生在工作平面上, 其数值为 0.027 μm,  $x$  轴方向的最大变形为 0.0034 μm, 最大变形发生在  $y$  轴方向读数头上侧,  $y$  轴方向最大变形为 0.0054 μm, 最大变形发生在中间平台与底座之间的右侧气浮滑块下。

部  $z$  轴方向最大变形为  $0.027 \mu\text{m}$ 。中间平台与底板之间的气浮导轨与导轨支座接触部位应力最大,在  $20 \text{ N}$  的工作载荷作用下,最大应力为  $31363 \text{ Pa}$ ,远小于材料的许用应力极限值。

定位平台在  $20 \text{ N}$  工作载荷的作用下,定位平台工作平面  $x$  轴方向的最大位移的绝对值为  $0.3816 \text{ nm}$ , $y$  轴方向最大位移的绝对值为  $0.1787 \text{ nm}$ , $z$  轴方向最大位移的绝对值为  $24.317 \text{ nm}$ ,工作平面整体最大位移为  $24.328 \text{ nm}$ 。可见,工作载荷对工作表面的变形影响主要体现在对工作表面在  $z$  轴方向的位置误差上。对  $x$  轴方向和  $y$  轴方向的位置误差影响较小。因此可知工作载荷引起的定位平台工作平面的位移较小,对该类定位平台的精度影响不大。

## 4 模态分析

利用 ANSYS 软件的模态分析模块的 Block

Lanczos 方法进行模态求解,得到气浮定位平台的前六阶固有频率和模态振型。图 3 所示为前三阶振型。第一阶振动形式表现为气浮解耦机构连同上平台伸出端沿  $z$  轴方向上下振动,振动主要发生在气浮解耦机构处; 定位平台的第二阶振动形式为解耦机构连同上平台以及中间平台沿  $x$  轴方向振动; 定位平台的第三阶振动形式为解耦机构连同上平台以及中间平台沿  $y$  轴方向振动; 定位平台的第四阶振动形式为解耦机构连同上平台以及中间平台绕  $y$  轴方向转动; 定位平台的第五阶振动形式为解耦机构连同上平台以及中间平台绕  $z$  轴方向摆动; 定位平台的第六阶振动形式为解耦机构绕  $x$  轴方向摆动,上平台、中间平台以及气浮导轨和滑块沿  $y$  轴振动。由于气浮解耦机构位于  $y$  轴向驱动电机与  $y$  轴向定位平台之间,使得系统主要振动发生在气浮解耦机构处。定位平台在超声键合过程中的工作频率低于  $20 \text{ Hz}$ ,远远小于定位平台的一阶固有频率。

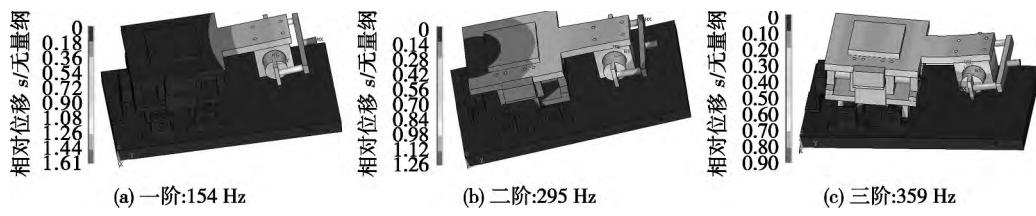


图 3 模态分析结果  
Fig. 3 Results of modal analysis

## 5 瞬态分析

在芯片超声键合过程中,气浮定位平台工作在极端状况,在短行程高速运动过程中,其瞬态特性至关重要。文中采用完全法对定位平台进行瞬态分析,首先考察了定位平台的脉冲响应特性,分别对定位平台的  $x$  轴与  $y$  轴方向施加幅值为  $200 \text{ N}$  的脉冲力激励,分别提取平台  $x$ , $y$ , $z$  三个方向的位移响应特性,平台在  $x$  轴方向与  $y$  轴方向的响应分别如图 4,图 5 所示。

芯片超声键合过程中,定位平台处于高加速频繁启停状态,因此利用幅值为  $200 \text{ N}$  的方波力信号激励定位平台,模拟其实际工作状况,考察其方波响应特性。

瞬态分析结果表明,在  $x$  轴方波驱动力作用下, $x$  轴振动的最大振幅为  $2 \times 10^{-7} \text{ m}$ , $z$  轴的最大振幅为  $4 \times 10^{-8} \text{ m}$ ; 在  $y$  轴方波驱动力下, $y$  轴的最大振幅为  $6 \times 10^{-7} \text{ m}$ , $z$  轴的最大振幅为  $3.4 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。在  $x$  轴脉冲驱动力下, $x$  轴的最大振幅为  $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}$ ,

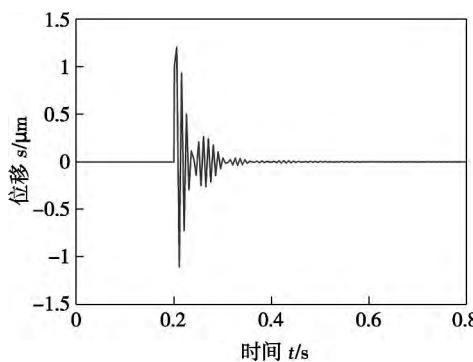


图 4  $x$  向激励下定位平台的脉冲响应  
Fig. 4 Impulse response of positioning table under impulse excitation in  $x$  axis

$z$  轴的最大振幅为  $2 \times 10^{-7} \text{ m}$ ; 在  $y$  轴脉冲驱动力下, $x$  轴的最大振幅为  $6.4 \times 10^{-6} \text{ m}$ , $z$  轴的最大振幅为  $9.8 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。在  $x$  轴驱动力作用下,定位平台在  $40 \text{ ms}$  内趋于稳定; 在  $y$  轴驱动力作用下,定位平台在  $80 \text{ ms}$  内趋于稳定状态。定位平台在受到随时间变化载荷的作用下,工作平面能够快速达到稳定状态。

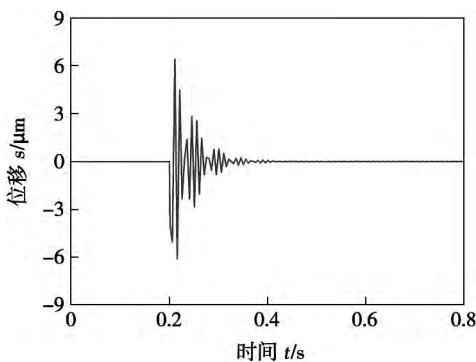


图5 y向激励下定位平台的脉冲响应

Fig. 5 Impulse response of positioning table under impulse excitation in y axis

## 6 结 论

(1) 由静态分析可知定位平台在20 N工作载荷的作用下,定位平台的变形很小,工作平面的位移主要在z轴方向,并且数值很小,不会对工作平面的定位精度产生很大影响,其最大应力也远远小于材料的许用应力。

(2) 通过模态分析,得到了气浮支撑定位平台的前六阶固有频率和模态振型,定位平台的一阶固有频率为154 Hz,远高于平台工作频率;确定了定位平台的振动薄弱环节,为定位平台的结构优化提供了重要参考信息。

(3) 瞬态分析结果表明,气浮定位平台x轴方向和y轴方向在脉冲和方波力的作用下,工作平面的振动会在较短时间内稳定下来,并且动态振动位移幅值很小。

(4) 文中的特性分析结果为该气浮定位平台的后续研究提供了重要参考信息。后续将在此基础上进行样机搭建以及系统控制等方面的研究工作。

## 参考文献:

[1] 邹贵生, 闫剑锋, 母凤文, 等. 微连接和纳连接的研究新进展

- [J]. 焊接学报, 2011, 32(4): 107–112.
- Zou Guisheng, Yan Jianfeng, Mu Fengwen, et al. Recent progress in micro joining and nanojoining [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(4): 107–112.
- [2] Li J H, Liu L G, Ma B K, et al. Dynamics features of Cu-wire bonding during overhang bonding process [J]. Electron Device Letters, IEEE, 2011, 32(12): 1731–1733.
- [3] 王福军, 赵兴玉, 张大卫, 等. 热超声键合压电换能器的动力学特性 [J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 69–72.  
Wang Fujun, Zhao Xingyu, Zhang Dawei, et al. Dynamic characteristics study of piezoelectric transducer for thermosonic bonding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 69–72.
- [4] Li J H, Han L, Duan J A, et al. Microstructural characteristics of Au/Al bonded interfaces [J]. Materials Characterization, 2007, 58(2): 103–107.
- [5] Liu Y J, Li T, Sun L N. Design of a control system for a macro-micro dual-drive high acceleration high precision positioning stage for IC packaging [J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2009, 52(7): 1858–1865.
- [6] 冯晓梅, 张大卫, 赵兴玉, 等. 面向IC封装的两自由度高速精密定位系统 [J]. 焊接学报, 2006, 27(7): 13–17.  
Feng Xiaomei, Zhang Dawei, Zhao Xingyu, et al. 2-DOF high-speed and high-precision positioning system for IC packaging [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(7): 13–17.
- [7] Oboe R, Antonello R, Capretta P. Realization of an adaptive voltage driver for voice coil motor [J]. Microsystem Technology, 2005, 11(8/10): 663–675.
- [8] 张大卫, 张胜泉, 赵兴玉, 等. 面向IC封装的两自由度精密气浮定位平台设计 [J]. 天津大学学报(自然科学版), 2007, 40(11): 1351–1356.  
Zhang Dawei, Zhang Shengquan, Zhao Xingyu, et al. Design of 2D precision positioning table with air bearings for IC packaging [J]. Journal of Tianjin University Science and Technology, 2007, 40(11): 1351–1356.

**作者简介:** 梁存满,男,1988年出生,硕士研究生。主要从事半导体封装设备与工艺、高速高精度定位技术方面的研究。Email: tjulecm@163.com

**通讯作者:** 王福军,男,讲师。Email: wangfu2000@gmail.com

strength was obtained in a joint welded with beam deflection of 0.5 mm to steel side. The joint strength was weakened by the intermetallic compound layer. The fractured surface showed a brittle cleavage fracture mode.

**Key words:** pure alminum; Q235 steel; electron beam welding; beam deflection; microstructure

**A three-dimensional reconstruction methodology for aero-engine blade welding repair** ZHAO Na, LI Liangyu, LIU Jie, YAO Fulin (Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Laboratory, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China). pp 73 – 76

**Abstract:** The NURBS theory was used in the point cloud processing and surface reconstruction of blade. Since the surface of blade is designed through optimization of structural mechanics, aerodynamics and strength analysis, the shape of blade is a kind of complex free surface. The least square method was used to denoise the outliers in fitting the local surface process and segment according to curvature threshold. The bi-cubic interpolation Coons surface in form of B-spline was taken as the basal plane, and the scattered point cloud was approached to the non-constraint surface. According to optimization theory, the control points of the Bézier surface were determined by the iteration theory. Finally, the 3D model of worn blade was recovered by splitting and trimming surfaces based on NURBS, which provided an ideal model for subsequent welding repair.

**Key words:** welding maintenance; reverse engineering; point cloud denoising; surface reconstruction

**Characteristic of a 2-DOF air-supported precision positioning table for microelectronic ultrasonic bonding** LIANG Cunman, WANG Fujun, YANG Qingguo, ZHANG Dawei, ZHAO Xingyu, TIAN Yanling (Tianjin Key Laboratory of Equipment Design and Manufacturing Technology, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). pp 77 – 80

**Abstract:** Based on finite element analysis, the static and dynamic characteristics of a 2-DOF air-supported positioning table were studied in details. The finite element model of the positioning table was established, and the static, modal and transient analyses were discussed, respectively. The static characteristics of the table under static load were investigated through static analysis. The natural frequencies and modal shapes of the positioning table were achieved by modal analysis. By applying the pulse force, the impulse response of the system was investigated. The transient response characteristics of the table were obtained by using the square wave force to simulate the actual working state of the positioning table. The results show that the positioning table exhibited good performance, and it provides important information for the structure optimization design and control of such air-supported positioning tables.

**Key words:** air-supported; positioning table; character-

istic analysis; finite element method; ultrasonic bonding

**Influence of Cerium on microstructure and performance of high-aluminum bronze coating by supersonic plasma spraying** LU Yang, SHI Xiaoyu, YANG Xiaotian, GUO Wenjun, DENG Gang, YANG Xiaowei (State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). pp 81 – 84

**Abstract:** A high-aluminum bronze coating was prepared on 45 steel substrate by highly efficient supersonic plasma spraying technology. The coating layers with different Ce content were investigated by XRD, SEM, EDS, EPMA, OM and Microhardness tester. The results show that the coating became denser, and hard K phase dispersively distributed with the increase of Cerium content. Ce played a crucial role in transition procedure of  $\text{AlFe}_3$  and  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  into  $\text{AlFe}$ ,  $\text{AlFe}_3$  and  $\text{AlFe}_3$  in K phase, and the composition of K phase was  $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$  when Ce content was more than 0.4%. Al segregated with the addition of Ce, and Ce contributed to transition of Al from big flake particle to platelet particle. The hardness of coating first decreased and then increased with the increment of Ce. When Ce content was more than 0.4%, the hardness and stability of coating was better than that without Ce.

**Key words:** high-aluminum bronze coating; supersonic plasma spraying; hardness; stability

**Multiple exposure for weld structured light based on reliability evaluation** SUN Dawei, CAI Yan, ZHU Junjie, WU Yixiong (Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). pp 85 – 89

**Abstract:** During weld structured light inspection, the image quality deteriorates because of the complex characterizations of the weld surface. In order to improve the image quality of structured light, a multiple exposure method based on reliability evaluation was proposed. The reliability of structured light was treated as the image quality parameter to obtain the exposure parameter and to determine the end of image shooting. The experimental results show that the multiple exposure method based on reliability evaluation was accurate and reliable for fillet weld shape inspection. The proposed method can effectively avoid measurement error and data loss caused by local image degradation.

**Key words:** structured light; reliability evaluation; multiple exposure; weld

**Research and development of Ni-based filler wire for key components of nuclear power plant** MO Wenlin, LU Shaping, LI Dianzhong, LI Yiyi (Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China). pp 90 – 94

**Abstract:** The effect of filler wire composition on the me-