[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.004

晶圆传输机器人末端执行器的结构设计

高 强,宋 芳

(上海工程技术大学 工程实训中心,上海 201620)

摘 要:为了实现晶圆片快速稳定传输,课题组设计了3种不同机械结构的末端执行器。首先,利用三维UG软件建立4凸点接触式有结构孔且有过渡结构的末端执行器、3凸点接触式类三角形末端执行器和4凸点接触式仅有结构孔的末端执行器这3种模型;采用ANSYS软件对所设计的3种模型进行静力学仿真,通过对仿真结果进行分析,得出最优的机械结构;最后采用ANSYS动力学模态仿真,验证了此机械结构具有合理性。研究结果表明有结构孔且有过渡结构的末端执行器能够满足晶圆片高速稳定的传输,为最优的机械结构。

关 键 词:晶圆传输机器人;末端执行器;UG软件;ANSYS仿真

中图分类号:TP241.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2895(2018)06-0015-05

Structure Design and Optimization of End-Effector for Wafer Transfer Robot

GAO Qiang, SONG Fang

(Engineering Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to realize the fast and stable transmission of wafers, three end-effectors with different mechanical structures were designed by the research group. Firstly, three-dimensional UG software was used to establish four models of four-point contact structured end-effector with transition structure, three-point contact type triangular end effector and four-bump contact end-effector with only structural hole. Then the designed three models were statically simulated by ANSYS software. Through the analysis of the simulation results, the optimal mechanical structure was obtained, finally the dynamics modal simulation of ANSYS was used. Modal simulation validated the rationality of this mechanical structure. The results show that the end effector with structural holes and transitional structure can meet the high-speed and stable transmission of wafers, which is the optimal mechanical structure. The designed end effector provides experimental basis for the control method research of the subsequent wafer transmission platform.

Keywords: wafer transfer robot; end effector; UG; ANSYS simulation

随着工业机器人的快速发展,全球进入了信息化和智能化的时代[1],而晶圆传输机器人也位列其中,对推动国民经济和信息化的发展有着重要的作用[2-3]。但是工业机器人的发展道路还是布满荆棘,就集成电路而言它的制造过程相当复杂,加工工序涉及到不同的制造工艺和设备,一条完整的晶圆生产线需要将晶圆在不同的工艺设备之间来回传递,考虑到晶圆对加工环境的特殊要求同时为了避免人工错误的操作所带来的隐患,急需一种自动化的晶圆传输设备,在这种情况下晶圆传输机械手应运而生[4-5]。为了实现IC技术的快速发展和满足晶圆片的制造工艺和设备的条件,各国对晶圆片的制造过程和生产设备的发展非常的重视[6-7]。目前中国的半导体生产正在向300 mm规格迅速发展和变更。

晶圆传输机器人末端执行器的工作速度、定位精度及可靠性直接影响晶圆片的生产效率和质量,因此

收稿日期:2018-06-26;**修回日期**:2018-08-19

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目:基于微结构阵列的高摩擦低粘附晶圆高效传输机理与主动控制方法研究(51505273)。

第一作者简介:高强(1991),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为晶圆传输机器人的控制。E-mail:1158527463@qq.com

末端执行器结构在集成电路的产业链中扮演着重要的角色[8]。为了实现末端执行器高速平稳运行,课题组设计了晶圆传输机器人末端执行器,并对末端执行器进行结构优化。研究对晶圆高效稳定的传输有一定意义,同时为后续研究晶圆传输机器人的控制方法的研究提供了参考。

1 晶圆传输机器人实验平台

晶圆传输机器人的实验平台模型如图 1 所示。课题组根据日常生产的需求,搭建了水平的直线导轨,在导轨上加入了电机支架等装备,通过 2 个不同的伺服电机对末端执行器进行直线和旋转运动的同步控制,把加工好的晶圆片通过机械手送入晶圆盒[9]。文中主要研究末端执行器的机械结构的设计和优化,为实现晶圆高速度、高效率、高稳定性的传输,设计了 3 种末端执行器结构模型。

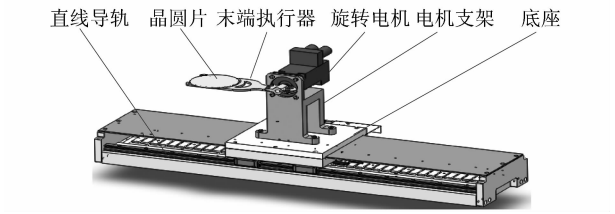


图 1 晶圆传输平台

Figure 1 Wafer transmission platform

2 末端执行器结构设计要求

基于晶圆传输机器人的高效传输及稳定性要求,末端执行器结构设计应遵循以下原则[10]:

1)尺寸优化

由于所传输的晶圆片是从待加工的晶圆盒中取出来,最后再放回到晶圆盒中,因此末端执行器的基本尺寸应该满足晶圆盒的尺寸规格,在确定了末端执行器的基本尺寸之后,对末端机械结构进行相应改进,使其有利于晶圆稳定的传输。

2)减少运动惯量

晶圆传输机器人末端执行器是一种悬臂梁结构,是基于加速度调节的晶圆传输机械手末端执行器。在晶圆传输的过程中其运动状态是根据加速度变化发生着相应的变化,因此减少运动惯量成为末端结构设计的一个重要的指标。

3)增加结构刚度

由于末端执行器与晶圆片之间间接发生接触,并且承担着晶圆片高效率运输的责任,为了消除在运输过程中发生的振动等不可控的因素对晶圆片造成损害,需提高末端结构的刚度。

4)工艺性要求

晶圆传输末端执行器是一种自动化传输设备,对其控制精度要求较高,所以工艺性要求对末端执行器的结构设计也很重要。末端执行器作为晶圆传输机械手的主要运动部件,其材料选择超硬铝(LC4)[11],在末端执行器的凸点位置加入了 4 点接触式的圆柱体微结构阵列,以此增加与晶圆片之间的摩擦力。

3 末端执行器结构设计

为了满足晶圆片高速度、高效率的稳定传输,晶圆传输末端结构在传输过程起到了重要的作用,其运输性能在很大程度上是由末端执行器的结构所决定。目前末端执行器与晶圆接触的方式主要有边缘接触、圆环接触和凸点接触[12]这 3 种方式。

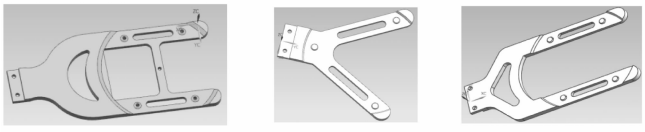
1)边缘接触方式,可以很好的保证晶圆片在控制传输过程中的运动,但是其滑移效果比较明显,而且放置在末端执行器上面的晶圆的中间部分应力变形较大,晶圆片本身是属于易碎品,这种接触方式不是很理想。

2)圆环接触方式,是通过增加末端执行器与晶圆之间的接触面积,来保证晶圆片稳定的传输,但是一旦发生滑移的时候,就很有可能造成晶圆片大面积的损伤。

3)凸点接触方式,就是在末端执行器上面增加几个对称性的凸点,来减少与晶圆片接触的面积,防止晶圆片被划伤。

通过比较以上几种接触方式,课题组将凸点结构和边缘接触结合在一起,既保证了晶圆片稳定的运动,又考虑到了结构设计的工艺性要求,在凸点结构上增加了 4 点接触式的圆柱体微结构阵列,增加了末端执行器与晶圆片之间的摩擦力,使得晶圆片能够在高速的条件下稳定传输。

根据课题组的具体实验所设计的末端执行器的基本尺寸为:末端执行器的总体长度为 400 mm,总体宽度为 230 mm,总体厚度为 5 mm。通过三维软件 UGNX10.0 绘制了图 2 所示的 3 种机械结构。其中,结构Ⅰ为有结构孔且有过渡结构,结构Ⅱ为类三角结构,结构Ⅲ为有结构孔结构。



(a)结构Ⅰ (b)结构Ⅱ (c)结构Ⅲ

图 2 末端执行器的机械结构

Figure 2 Mechanical structure of end effector

4　机械结构的静力学分析

基于末端执行器结构的设计要求,利用 ANSYS Workbench 对初步设计的 3 种结构进行应力、应变分析,从而验证和比较结构设计的合理性。通过 UGNX 10.0 建立晶圆传输末端执行器的实体模型,利用 UGNX10.0 与 ANSYS 之间的接口,将模型导入 ANSYS 进行有限元分析。

在静力学分析之前,添加材料库,材料参数设置选择超硬铝材料,弹性模量为 $E=68$ GPa,摩擦因数 $\mu=0.3$,密度 $\rho=2.7\times10^3$ kg/m^3。

对末端执行器进行网格划分。对于三维几何体来说,网格划分基本有 3 种方法:Automatic(自动网格划分)、Tetrahedrons(四面体网格划分)和 Hex Dominant(六面体主导网格划分),文中选择了 Hex Dominant 划分网格,设置的参数为 100。将末端执行器与机械手臂连接的一端固定,凸点结构对晶圆片施加力为 1.28 N,同时考虑重力加速度对末端执行器结构特性的影响,对末端执行器的总变形及应力进行求解。3 种机械结构的静力学分析如图 3 所示。

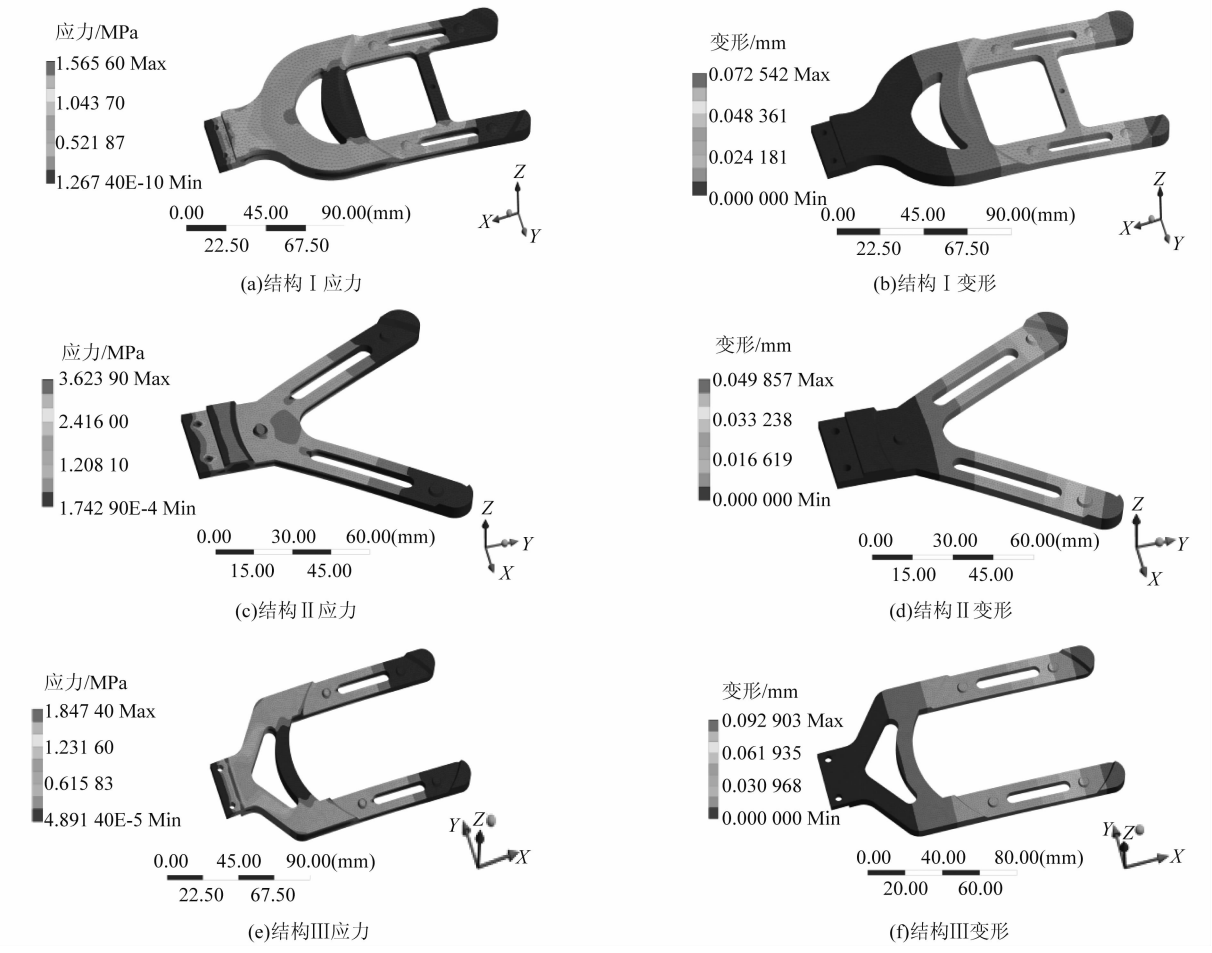


图 3　ANSYS 静力学分析的应力和应变结果

Figure 3　Stress and strain results of ANSYS static analysis of three structures

由图 3 可以得到 3 种机械结构末端执行器的最大应力和应变如表 1 所示。

表 1　末端执行器的最大应力与应变

Table 1　Maximum stress and strain of end effector

结构类型	最大应力/MPa	最大应变/mm
结构Ⅰ	1.565 6	0.072 542
结构Ⅱ	3.623 9	0.049 857
结构Ⅲ	1.847 4	0.092 903

由图 3 和表 1 可知,结构Ⅰ最大应力发生在末端执行器与电机固定处附近,最大应力为1.565 6 MPa,远小于超硬铝的屈服强度 680 MPa,最大变形发生末端执行器的最右端,最大变形为0.072 542 mm,遵循了刚度优化和最小运动惯量的原则。对比各项数据,可知结构Ⅰ为最佳设计。

高速运行条件下末端执行器的稳定性是晶圆传输

的关键,若在传输过程中发生剧烈振动,有可能会造成晶圆片的脱落、损伤,所以末端执行器的动态稳定性具有重要意义。而末端执行器的动力来源于伺服电机的驱动,为了避免末端执行器发生共振,需要对末端执行器进行动力学分析,以验证其机械结构是否合理。

5 机械结构的动力学模态分析

模态分析是一种研究结构动力特性的近代方法,是系统识别法在机械振动领域中的应用。为了避免发生机械结构的共振,课题组对末端执行器进行了模态分析[13-14]。

参照机械结构的静力学分析结果设置参数,由于振型的阶数很多,文中选取末端执行器前 6 阶固有频率振型来验证机械设计结果的合理性,图 4 所示为末端执行器的各阶模态振型图。

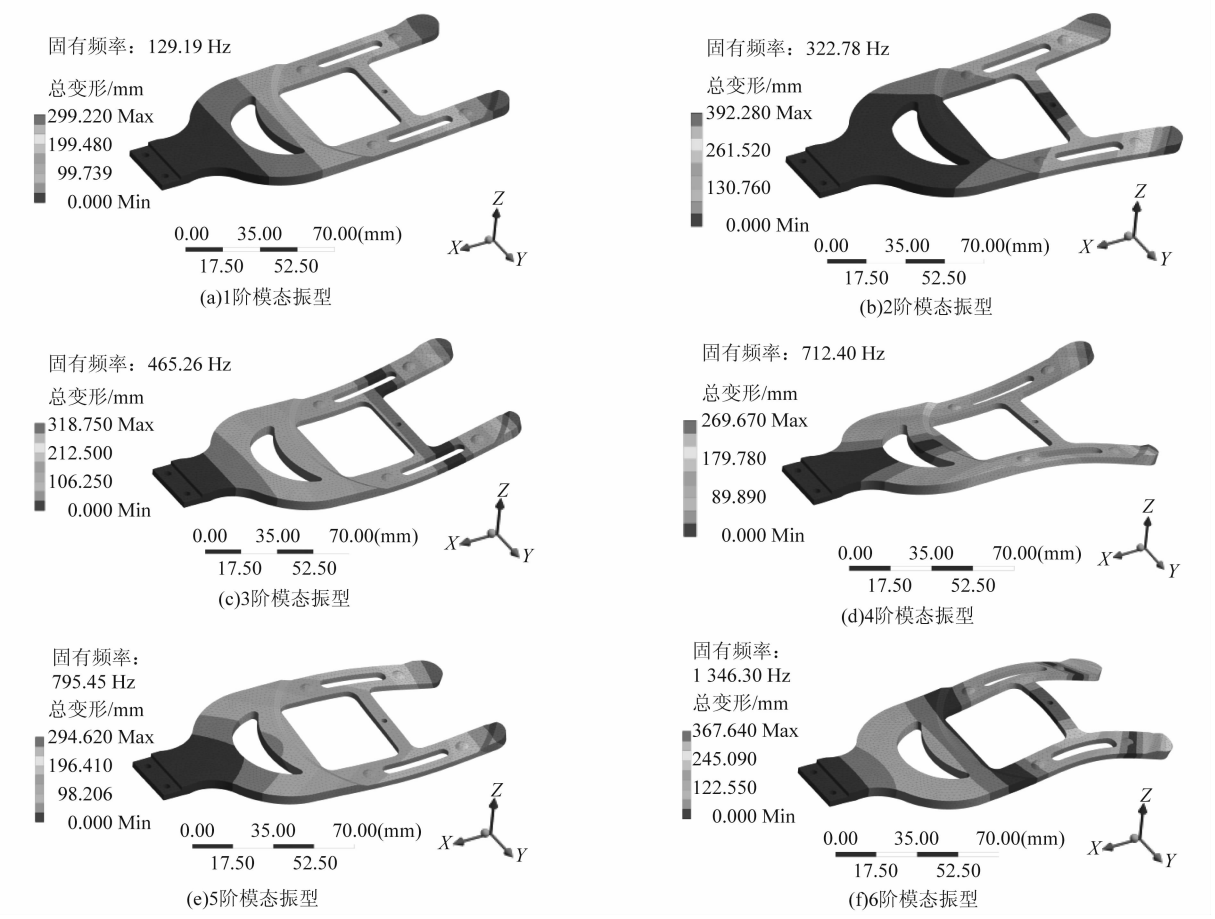


图 4 1 ~6 阶模态振型

Figure 4 Modal shape of 1 ~6 orders

通过对末端执行器结构进行模态分析,可以得到末端执行器前 6 阶固有频率及振型情况如表 2 所示。

表 2 末端执行器的模态参数及仿真情况

Table 2 Modal parameters and simulation of end effector

阶数	固有频率/Hz	仿真结果
1	129.19	末端结构向 Z 轴方向移动
2	322.78	末端结构向 Z 轴方向移动
3	465.26	末端结构向 Z 轴方向移动
4	712.40	末端结构呈二次反对称弯曲变形
5	795.46	末端结构呈二次反对称弯曲变形
6	1 346.30	末端结构向 Z 轴方向移动

由表 2 可知,末端执行器在前 3 阶固有频率作用下基本只会在 Z 轴方向振动,并不会发生其他方向的振动,而目前市场中大部分机器人的末端振动频率都低于 30 Hz,1 阶振动固有频率为 129.19 Hz,远大于晶圆传输机械手的振动频率,故末端结构并不会发生共振现象。通过仿真结果分析得知末端执行器机械结构能够避免发生共振现象,满足动态性能要求,故此末端执行器的结构设计是满足条件的。

6 结语

课题组基于晶圆传输平台从整体上介绍了晶圆传输机械手末端执行器的设计要求,在满足高速、稳定传

输晶圆的条件下,结合晶圆盒的尺寸规格,确定了末端执行器的结构设计方案。在加工方面选取了超硬铝材料,同时在机械结构的末端添加 4 点接触式的圆柱体微结构阵列,可以在很大程度上增加末端执行器与晶圆片之间的摩擦力并且保证晶圆片不会大面积划伤。从静力学角度来考虑,通过对不同机械结构的应力和变形的数据对比,可以得出有结构孔且有过渡结构的机械结构为最佳。通过模态分析验证了此机械结构的合理性,所以有结构孔且有过渡结构的末端执行器是满足晶圆片高速度、高效率稳定传输的。研究为下一步晶圆传输机器人的控制方法研究提供了参考。

参考文献:

[1] 王田苗,陶永.我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J].机械工程学报,2014,50(9):1-2.

[2] 朱贻玮.展望未来5年中国IC产业[J].电子工业专用设备,2006(3):8-9.

[3] 朱邵歆.提升国产硅片供应能力支撑集成电路产业发展[N].中国电子报,2017-12-19(008).

[4] 吕磊,胡晓霞,王洪宇.应用于硅片传输系统的机械手设计[J].电子工业专用设备,2012,41(3):36-40.

[5] 吴静.五自由度洁净晶圆传输机器人的动力学建模与分析[D].上海:上海交通大学,2013:1-3.

[6] 周旗钢.300 mm硅片技术发展现状与趋势[J].电子工业专用设备,2005(10):1-6.

[7] CHOI Y K, PARK J H, KIM H S. Optimal trajectory planning and sliding mode control for robots using evolution strategy[J]. Robotic, 2000,18(4):423-428.

[8] ZUBEREK W M. Cluster tools with chamber revisiting-modeling and analysis using time petri nets[J]. IEEE transactions on semiconductor manufacturing,2014,17(3):333-334.

[9] 丛明,于旭,徐晓飞.硅片传输机器人的发展及研究现状[J].机器人技术与应用,2007(4):18-23.

[10] 王建,刘浩,田威,等.面向飞机自动化装配的制孔末端执行器的设计[J].南京航空航天大学学报,2012,44(增刊1):19-22.

[11] 张维.TC21和粗晶LC4合金的超塑性及微观组织演化[D].西安:西北工业大学,2005:10-12.

[12] 李康.晶圆传输机器人末端运动及晶圆接触状态检测系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:17-20.

[13] 刘延杰,吴明月,王刚,等.硅片传输机器人手臂结构优化设计方法[J].机械工程学报,2015:51(1):1-9.

[14] 李莹,周永杰,郭冬梅,等.列车预装配柔性实验平台机械手设计研究[J].机电工程,2016,33(6):704-708.

(上接第 11 页)

在 105~132 ℃。考虑热成像仪对焦需要的时间以及拍摄的角度会存在一定偏差,温度的载荷设置是合理的。

5　结语

课题组应用 ANSYS 软件对车灯面罩热板焊接温度场进行仿真分析,在焊接工艺分析与材料相变描述的基础上建立合理的热板焊接温度场仿真模型,运用瞬态热分析求解焊接温度场分布,借助红外热成像仪对焊接过程的几个关键工步中的面罩加热面的温度进行检测,对比仿真模拟结果,从而验证了温度载荷以及边界条件设置的合理性,对消除焊接件残余应力具有参考意义。

参考文献:

[1] 益小苏.塑料热板焊的过程分析研究[J].现代塑料加工应用,1989,9(1):13-20.

[2] 益小苏,史方.塑料管材焊接性能的研究与比较[J].工程塑料应用,1993,21(1):10-13.

[3] 赵高明,益小苏.塑料热板焊接的温度场分析[J].焊接学报,1991,12(4):252-256.

[4] 谷侃锋,霍立兴,张玉凤,等.塑料热板焊接传热的解析模型[J].中国塑料,2003,17(6):68-71.

[5] POTENTE H, SCHNIEDERS J, BOMEMANN M. Theoretical model for the one-dimensional temperature and stress calculation of simple hot plate welded geometries [J]. Macromolecular material and engineering,2002,287(11):843-853.

[6] NIEH J N, LEE L J. Hot plate welding of polypropylene part I: crystallization kinetics [J]. Polymer engineering and science,1998, 38(7):1121-1132.

[7] NIEH J Y, NI J, LEE L J. Hot plate welding of polypropylene part II: process simulation [J]. Polymer engineering and science, 1998, 38(7):1133-1141.

[8] RUDTSCH S, HAMMERSCHMIDT U. Intercomparison of measurements of the thermophysical properties of polymethy methacrylate [J]. International journal of thermophysics, 2004, 25(5):1475-1482.

[9] 塔德莫尔 Z,戈戈斯 C G.聚合物加工原理[M].北京:化学工业出版社,1990:112-261.