材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.012

IC基板传输机器人末端执行器结构拓扑优化设计

祝锡晶[1]，郭　宵[1]，林知微[2*]，陈祥玺[3]

（1. 中北大学 机械工程学院，太原 030051；2. 北京理工大学 自动化学院 智能系统协同创新研究中心，北京 100081；
3. 浙江轩业精密制造有限公司，浙江 台州 317500）

摘　要： 在半导体封装基板检测的传输过程中，末端执行器对其快速稳定高效率的传输起着关键作用。在满足设计强度、刚度的条件下，以末端执行器轻量化为目标，建立了末端执行器的三维模型，利用有限元分析软件ANSYS对基板传输机器人末端执行器进行静力学和模态分析，得到末端执行器在最大载荷情况下的应力、应变特性和对应的振型，并对其进行拓扑优化设计，根据拓扑优化结果建立新的末端执行器结构，对新的结构进行强度校核，验证设计方案的有效性。研究结果表明，优化后末端执行器的前四阶固有频率都大于伺服电动机的回转频率(50 Hz)，质量减少了26.7%，较好地实现了轻量化的目标，同时为后续的相关产品研制提供了一种新的技术方案。

关键词： 半导体基板；有限元分析；结构设计；拓扑优化；轻量化

中图分类号： TH692.9　**文章编号：** 1001－5868(2020)04－0513－04

Topology Optimization Design of End-actuator of IC Substrate Transmission Robot

ZHU Xijing[1], GUO Xiao[1], LIN Zhiwei[2], CHEN Xiangxi[3]

(1. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, CHN;
2. Intelligent System Collaborative Innovation Research Center, School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN; 3. Zhejiang Xuanye Precision Manufacturing Co. LTD., Taizhou 317500, CHN)

Abstract: End-actuator is very important for realizing fast, reliable and efficient transmission in substrate detection of semiconductor packaging. Under the condition of satisfying material strength and structure stiffness, a 3D model of the end-actuator was established with the goal to reduce the weight of the end-actuator. The static calculation and modal analysis of the end-actuator of the substrate transfer robot were performed with ANSYS software. Then the stress, strain characteristics and corresponding modes of the end-actuator under the maximum load were obtained. Based on the optimized topology, a new end-actuator structure was established. And the strength of the new structure was checked, verifying the validity of the design scheme. The results demonstrate that the first four order natural frequencies of the end-actuator are much higher than the gyro-frequency of the servomotor and the quality of the new structure is reduced by 26.7%. It achieves the goal of lightweight and provides a new technical solution for the subsequent development of related products.

Key words: semiconductor substrate; finite element analysis; structural design; topology optimization; light weight

0　引言

集成电路(IC)封装是将已经设计制造好的芯片通过微细加工技术在基板上进行封装，芯片引脚与基板正面引脚相接触，再通过基板背面的引脚与外部电路相连。IC封装的目的在于保护芯片不受或少受外界环境的影响，并为之提供一个良好的工作

收稿日期：2020－01－08.

* **通信作者：**林知微　**E-mail：**linzhiwei@bit.edu.cn

条件。在IC芯片封装的过程中要经过两次测试,分别是晶圆检测和成品测试。此外,芯片通过封装基板与外部电路相连,要对封装基板的电路进行测试。

半导体封装基板传输机器人是基板检测设备中的关键部件,其主要作用是实现基板在各个工位之间的快速传递与精确定位。基板的传输效率直接影响测试效率,为防止基板在搬运过程中抖动、脱落,应增强机器人手臂与末端执行器运行的稳定性。为了实现末端执行器的高速平稳运行,以机械振动为理论、机械设计为基础,对基板传输机器人末端执行器进行数字化建模、仿真计算、模态分析以及结构优化,寻找其最优结构[1]。这对于基板高效稳定的传输具有十分重要的意义,同时为后续基板传输过程提供了参考。

对结构进行优化设计有三种方法:形状优化、尺寸优化以及拓扑优化。其中形状优化和尺寸优化对于已经设计完成的结构优化效果并不明显,变形程度有限[1-2]。拓扑优化是一种基于有限元技术,在满足应力和刚度等约束条件下寻求最佳结构形式的优化方法。三维建模软件SolidWorks具有良好的建模环境,可以对末端执行器进行初步结构设计,本文利用有限元分析软件ANSYS对其结构进行静力学分析、模态分析,在此基础上进行拓扑结构优化,设计出一种新型的基板传输机器人末端执行器。

1 末端执行器静态特性分析

1.1 实体模型的建立

在三维建模软件SolidWorks中对基板传输机器人末端执行器进行初步的几何建模[3]。为了节省有限元软件计算资源,提高求解精度,在对末端执行器进行初步建模时,可以将一些不影响分析精度的特征,如螺纹孔、倒角等省略[4-5]。末端执行器实体模型如图1所示。

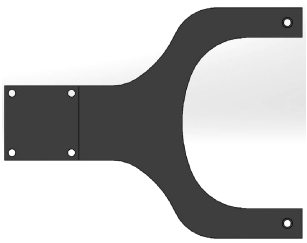


图1 末端执行器实体模型

1.2 静力学分析

将在SolidWorks中建好的末端执行器模型导入有限元软件ANSYS中进行分析、优化。通过静力学分析可以得出结构在受到特定的约束和载荷作用下的应力分布情况和位移云图,对其进行强度校核,在保证结构安全可靠的前提下对其进行优化设计[6]。

(1)材料选择:选择7075铝合金为末端执行器的材料。其材料的性能参数如表1所示。

表1 7075铝合金性能参数

性能参数	值
弹性模量/MPa	71 000
泊松比 ε	0.33
密度/(kg/m^3)	2 810
屈服强度 R/MPa	455

(2)网格划分:在对结构进行有限元分析时,对模型进行网格划分的质量高低将直接影响求解速度和结果的精度[7]。本文采用自动化划分网格的方法,网格大小设置为3 mm,共生成单元4 540个,节点9 536个,生成的有限元模型如图2所示。

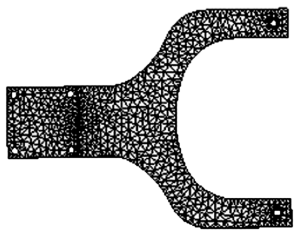
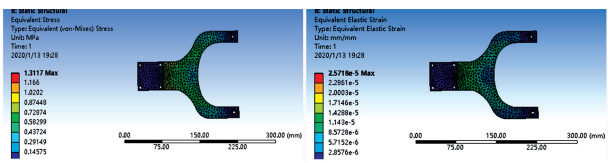


图2 末端执行器有限元模型

(3)施加载荷与求解:基板传输机器人末端执行器主要用于在各个工位之间传送基板。传送时基板被末端执行器上的吸附气孔吸紧,末端执行器另一端与机械臂固定。经计算,基板对末端执行器的压力最大为 $p=0.025\ 995$ MPa。对末端执行器进行静力学分析得到等效应力分布云图和等效应变云图,分别如图3(a),(b)所示。



(a) 等效应力云图 (b) 等效应变云图

图3 静力学分析结果

由图3静力学分析结果可知,末端执行器的应力主要集中于末端执行器与机械臂连接处,最大应力值为1.311 7 MPa,远小于末端执行器材料的屈服强度(455 MPa)。由此可知,即使在机械臂与末

端执行器固定处发生应力集中现象，由于其远小于材料的最大屈服强度，末端执行器的强度仍十分可靠。

1.3　模态分析

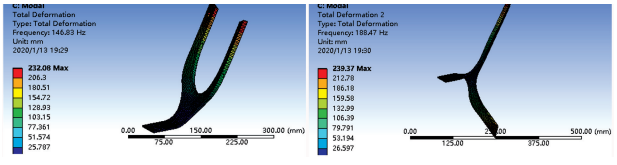
在基板传输过程中，为保证传送过程的平稳快速，应尽量避免末端执行器与机器人发生共振。利用有限元分析法对末端执行器进行模态分析，在设计初期了解其固有频率，避免设计缺陷，缩短设计周期，避免发生共振，提高传输效率[7]。

对结构进行模态分析时，只需求出结构的低阶频率而不必求出全部的固有频率和振型，一般只有前几阶固有频率才可能引起共振[6]。本文求出了末端执行器的前四阶固有频率和振型，如表 2 所示，前四阶末端执行器振型图如图 4 所示。

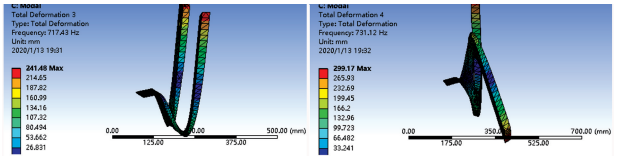
表 2　末端执行器的前四阶固有频率和振型

阶次	固有频率/Hz	振型特征	静态变形总量/mm
1	146.83	沿 z 方向摆动	0.057 83
2	188.47	在 z 方向上下摆动	
3	717.43	在 z 方向扭动	
4	731.13	在 x 和 z 方向上扭动	

由表 2 可知，末端执行器的低阶固有频率达到了很高的数值，而带动机械臂运动所使用的伺服电动机的额定转速为 3 kr/min，回转频率为 50 Hz。末端执行器的固有频率远离基板传输机器人的振动频率，展现出较好的刚度性能。对末端执行器进行模态分析，得出其低阶固有频率和振型，可以为进一步优化末端执行器结构提供依据[8]。



（a）　第一阶　　（b）　第二阶



（c）　第三阶　　（d）　第四阶

图 4　末端执行器前四阶模态振型

2　末端执行器优化设计

2.1　拓扑优化设计

拓扑优化因其不依赖原有结构和设计师的经验就可以获得新的结构，受到了研究人员的广泛关注。通俗地说，就是利用拓扑优化技术，在满足特定的约束条件和载荷的情况下使结构材料重新分布[7]。

基于有限元软件 ANSYS 的结构拓扑优化目标函数是在满足结构约束和载荷的条件下使整体的变形能最小，等效于整体的刚度最大[7]。约束函数是在给定载荷和最小柔度的情况下缩减结构一定百分比的体积或质量。拓扑结构优化的数学模型是[9]：

$$\begin{cases} \min F(\eta_i) \\ s.t. \quad f_\Omega \eta_i \mathrm{d}\Omega \leqslant \alpha V_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中，F 为结构的变形能，η_i 为第 i 单元的伪密度，α 为缩减体积的百分比，V_0 为结构的原体积。

由图 3 静力学分析结果得知，基板传输机器人末端执行器在受最大压力情况下结构强度仍有很大的余量，本文通过拓扑优化对其结构进行不断改进，在满足特定的约束和载荷的情况下，以末端执行器的材料体积作为目标函数，通过改变末端执行器的结构形状来节约材料并减轻重量[10-11]。

将末端执行器上施加载荷和约束的位置设定为不优化区域，剩余区域设定为优化区域，优化参数模型体积设定为 20%，迭代次数为 12 次。拓扑优化的结果如图 5 所示。

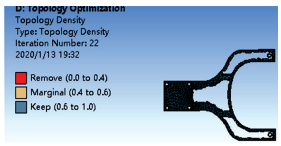
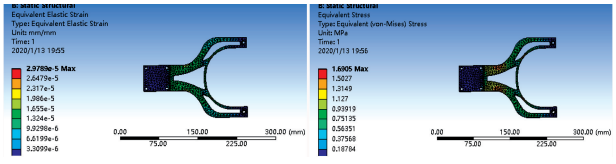


图 5　拓扑优化密度云图

2.2　优化模型校核

根据拓扑优化的结果重新对末端执行器进行设计，利用有限元分析软件 ANSYS 对新结构重新进行静力学和模态分析，由图 6 可知优化后的末端执行器最大应力为 1.704 MPa，出现在末端执行器的腰身处。优化后的末端执行器在满足特定的载荷和约束的情况下，提高了结构强度，实现了轻量化，达到了拓扑优化的目的，验证了实验方案的正确性。



（a）　等效应力云图　　（b）　等效应变云图

图 6　优化后的末端执行器应力、应变云图

由表 3 对优化结果分析可以得出以下结论：

末端执行器通过拓扑优化后，最大应力集中在

末端执行器的腰身处，最大应力值为 1.704 MPa，与优化前最大应力值 1.311 7 MPa 相比增加了 29.9%，但是其值远远小于 7075 铝合金的屈服强度(455 MPa)，优化后的结构整体满足设计要求，仍有设计空间。

表 3 末端执行器优化前后参数对比

参数名称	最大应力/MPa	最大应变/mm	质量/kg	一阶模态/Hz
优化前	1.311 7	$2.571\,8\times10^{-5}$	0.123 33	146.83
优化后	1.704	$2.978\,9\times10^{-5}$	0.090 399	138.08
变化率/%	29.9	15.8	−26.7	−5.95

优化后结构的最大位移出现在结构末端，最大应变为 $2.978\,9\times10^{-5}$ mm，与优化前相比仅增加 15.8%，满足基板传输的精度要求，且提高了传输效率。

优化后的结构在满足设计要求的前提下，重量减少了 26.7%，实现了轻量化的目标，一阶模态固有频率仅降低 5.95%，防共振效果明显。

3 结论

本文对基板传输机器人末端执行器进行了静力学分析和模态分析，对其结构进行了改进。基于拓扑优化的设计思想，设计了末端执行器新的结构形式，并对新结构进行了分析验证，结果表明：新的机构达到了减重优化，提高基板传输效率的目的，其低阶频率较高，远离基板传输机器人的振动频率，展现出较高的防共振能力。

参考文献：

[1] 刘劲松，朱杨冰，邱进军. 晶圆传输机器人大臂的模态分析及其结构优化[J]. 制造业自动化，2015(14)：15-19.
Liu Jinsong，Zhu Yangbing，Qiu Jinjun. Modal analysis and structure optimization of wafer transfer robot's big arm[J]. Manufacturing Automation，2015(14)：15-19.

[2] 谭立杰，王洪宇，王文举. 大直径探针台的晶圆自动传输系统[J]. 电子工业专用设备，2011，40(11)：40-44.
Tan Lijie，Wang Hongyu，Wang Wenju. Wafer auto-transfer system for large diameter prober[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing，2011，40(11)：40-44.

[3] 高 强，宋 芳. 晶圆传输机器人末端执行器的结构设计[J]. 轻工机械，2018，36(6)：15-19.
Gao Qiang，Song Fang. Structure design and optimization of end-effector for wafer transfer robot[J]. Light Industry Machinery，2018，36(6)：15-19.

[4] 李清伟. 焊接机器人大臂有限元分析及拓扑优化[J]. 组合机床与自动化加工技术，2014(11)：63-64.
Li Qingwei. The finite element analysis and topological optimization design for welding robot's arm[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique，2014(11)：63-64.

[5] 刘洪涛. 晶圆传输机器人末端执行器设计与关键技术研究[D]. 沈阳：东北大学，2012.
Liu Hongtao. Design of wafer handing robot end-effector and key technique research[D]. Shenyang：Northeastern University，2012.

[6] 单铭志，杨前明，邵长新. 棉桶更换机器人前臂有限元分析及拓扑优化[J]. 组合机床与自动化加工技术，2017(8)：25-28.
Shan Mingzhi，Yang Qianming，Shao Changxin. The finite element anslysis and topological optimization design for cotton barrel replacement robot's forearm[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique，2017(8)：25-28.

[7] 林丹益，李 芳. 基于 ANSYS 的结构拓扑优化[J]. 机电工程，2012，29(8)：898-901.
Lin Danyi，Li Fang. Topological optimization of continuum structure based on ANSYS[J]. J. of Mechanical and Electrical Engineering，2012，29(8)：898-901.

[8] 霍洪鹏，侯晓坤，姜军生. 基于 ANSYS 拓扑优化的机器人末端结构设计[J]. 山东工业技术，2018(5)：134-135.
Huo Hongpeng，Hou Xiaokun，Jiang Junsheng. Robot end structure design based on ANSYS topology optimization[J]. Shandong Industrial Technology，2018(5)：134-135.

[9] 陈 静，杨泽龙，安勇成. 基于 ANSYS 的立柱动态特性分析与拓扑优化[J]. 机械设计，2015(6)：75-79.
Chen Jing，Yang Zelong，An Yongcheng. Dynamic characteristics analysis and topology optimization for column based on ANSYS[J]. J. of Machine Design，2015(6)：75-79.

[10] 何凡普，于大泳. 硅片传输机器人手臂的拓扑优化[J]. 农业装备与车辆工程，2019，57(3)：78-81.
He Fanpu，Yu Dayong. Topology optimization of silicon transfer robot arm[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering，2019，57(3)：78-81.

[11] Wang Xiuye，Zhao Han，Zhang Zufang. Review of methods of mechanical digital design based on topology optimization[J]. Appl. Mechanics and Mater.，2013(2)：193-201.

作者简介：

祝锡晶(1969—)，男，山西人，博士，教授，博士研究生导师，研究方向为精密特种装备技术；

林知微(1969—)，女，江西人，博士，副教授，硕士研究生导师，北京理工大学自动化学院智能系统协同创新研究中心主任，研究方向为高精度控制系统。