

# SCARA 型晶圆传输机器人结构设计与减振优化\*

李嘉俊<sup>1,2</sup> 周海波<sup>1,2</sup> 徐云浪<sup>1,2†</sup> 余少强<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学 极端服役性能精准制造全国重点实验室, 长沙 410083)

(2. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

**摘要** 晶圆传输机器人是晶圆在搬运过程中实现高精度和高效率自动化的重要组成设备. 工作过程中其结构固有频率直接影响了晶圆传输中运动控制过程中的精度和稳定性, 基于平面 3 关节直驱旋转运动和垂直升降运动原理, 设计了一款 SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) 型四自由度晶圆传输机器人. 首先, 采用 Ansys Workbench 软件对 SCARA 型晶圆传输机器人的超薄机械手指进行了模态分析, 采用均匀轮形筋结构对手指进行了结构尺寸优化, 优化后的一阶模态提高了 42.79%; 然后, 采用 Ansys Workbench 对晶圆传输的整体结构进行了优化, 研究发现底座部分刚度较弱, 是造成机器人整体低阶模态频率较低的主要原因, 对此特别针对底座进行了结构优化, 优化后的一阶和二阶模态频率分别提高了 52.03% 和 30.55%. 通过结构优化, 提高了晶圆传输机器人的整体低阶模态频率, 改善了晶圆传输机器人的运动控制过程中的精度和稳定性, 避免了共振, 进而降低了振动的影响, 有效保证了晶圆传输机器人在实际工作中的稳定性和可靠性.

**关键词** 晶圆传输机器人, 模态分析, 共振, 结构优化

**中图分类号**: TP241.2

**文献标志码**: A

## Structural Design and Vibration Reduction Optimization of SCARA Wafer Transfer Robot Hand\*

Li Jiajun<sup>1,2</sup> Zhou Haibo<sup>1,2</sup> Xu Yunlang<sup>1,2†</sup> Yu Shaoqiang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Manufacturing for Extreme Service Performance, Central South University, Changsha 410083, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** Wafer transfer robot hand is an important component equipment to realize high precision and high efficiency automation in the process of wafer handling. The structural natural frequency directly affects the motion control performance of wafer transmission during operation. Based on the principle of planar 3-joint direct drive rotation motion and vertical lift motion, a SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) four-degree-of-freedom wafer transfer robot hand is designed. Firstly, the modal analysis of the ultra-thin mechanical finger of the SCARA wafer transfer robot hand is carried out by Ansys Workbench software. The structural size of the finger is optimized by using the uniform wheel rib structure, and the optimized first-order mode is increased by 42.79%. Then, Ansys Workbench is used to optimize the overall structure of wafer transmission. It is found that the stiffness of the base part is weak, which is the main reason for the low-order mode of the whole robot hand. For this, the structure

optimization is carried out for the base, and the optimized first-order and second-order modal frequencies are increased by 52.03 % and 30.55 % respectively. Through structural optimization, the overall low-order mode of the wafer transfer robot hand is improved, and the accuracy and stability of the motion control process of the wafer transfer robot hand are improved, thereby reducing the possibility of resonance and avoiding resonance, and effectively ensuring the stability and reliability of the wafer transfer robot hand in actual work.

**Key words** wafer transfer robot hand, modal analysis, resonance, structural optimization

## 引言

为了保证集成电路制造过程的清洁度和制造效率,集成电路制造装备通常表现出高度自动化<sup>[1]</sup>.晶圆传输是 IC 制造中的重要环节,而晶圆传输机器人作为集成电路制造业中不可缺少的设备,其广泛运用提高了晶圆传输的灵活性、稳定性,极大降低了生产成本、提高了生产效率<sup>[2]</sup>.在实际应用中,晶圆传输机器人的结构模态固有频率直接影响其精度和稳定性等运动控制性能.如何提高晶圆传输机器人的模态频率,从而进一步提升其稳定性和可靠性,成为当前研究的重要课题.

我国半导体制造业起步较晚,相比之下,国外在晶圆传输机器人领域发展时间长、规模大,技术更为成熟<sup>[3]</sup>.从国家层面来看,集成电路装备制造业具有深远的战略意义<sup>[4]</sup>,面对该领域发展的“卡脖子”问题和少数国家对我国半导体以及集成电路行业的技术封锁和打压<sup>[5]</sup>,为实现半导体装备制造业的发展,开展半导体研制过程中晶圆传输机器人领域工作尤为重要.

对于晶圆传输的特殊场景,考虑到其环境和工序的影响和限制,为实现在狭小的空间内完成晶圆传输,在生产线上的机器人必须满足高精度、体积小、工作范围大、操作灵活等诸多要求<sup>[6,7]</sup>.

如图 1 所示,现今主流的晶圆传输机器人有 SCARA 型和  $R-\theta$  型机器人<sup>[8]</sup>.其中 SCARA 型机器人有四个自由度,包括 3 个转动自由度和 1 个移动自由度;3 个转动关节保证了机器人的末端执行器在平面工作时具有较高的灵活性;1 个移动关节能够使机械臂在竖直方向上下移动. $R-\theta$  型机器人也叫作极坐标机器人,其在空间中有 3 个自由度,它的运动轨迹可以描述为半径  $R$  方向的径向运动,角度  $\theta$  的旋转变化,以及竖直方向上  $Z$  的升降运动<sup>[9]</sup>.

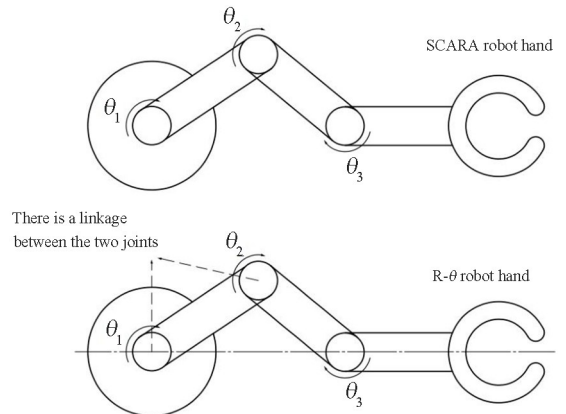


图 1 SCARA 型和  $R-\theta$  型机器人原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of SCARA and  $R-\theta$  robotic hand

相比于  $R-\theta$  型机器人,SCARA 型机器人设计相对简单,具有更高的可靠性和维护成本.在实际使用中,通常要求 SCARA 型晶圆传输机器人结构紧凑,因此轻量化设计是 SCARA 型晶圆传输机器人的基本设计原则.然而,过分的轻量化设计必然会造成机器人结构模态频率偏低,进而影响传输过程的控制性能.

目前国内对晶圆传输机器人及相关平台的研究中,高强等<sup>[10]</sup>设计了一种具有结构孔、过渡结构设计的 4 凸点接触式机械手指,并通过模态分析验证了其合理性;李康等<sup>[11]</sup>基于最大静刚度的拓扑优化函数对机器人手指进行拓扑优化;张再春等<sup>[12]</sup>基于机械手的模态振型表现对其进行了椭圆形的结构优化设计;韩笑等<sup>[13]</sup>通过对晶圆探针台进行模态分析得出其 1~6 阶模态频率集中在 0~50 Hz 范围内的结果.

综上所述,研究者们主要聚焦在基于模态频率增强来优化结构.因此,如何在轻量化的同时保证较高的结构模态频率,是 SCARA 型晶圆传输机器人设计的难点.为了解决这个问题,本文采用有限元仿真的方法进行模态分析,针对 SCARA 型晶圆传输机器人设置均匀轮形筋结构、修改底座材料、

加装肋板、加宽顶盖和底座壳体的方式进行结构优化,改善了 SCARA 型晶圆传输机器人低阶模态,提升了晶圆传输机器人的运动控制性能,确保了其在实际工作中的稳定性和可靠性。

## 1 机器人传动原理

如图 2 所示,晶圆传输机器人在工作过程中将未加工晶圆盒中的晶圆取出,经过光学校准后传输到指定的反应腔进行加工,加工完毕的晶圆放入已加工晶圆盒中,最后机械手指进行校准复位,从而实现各工序的高度自动化<sup>[14]</sup>。

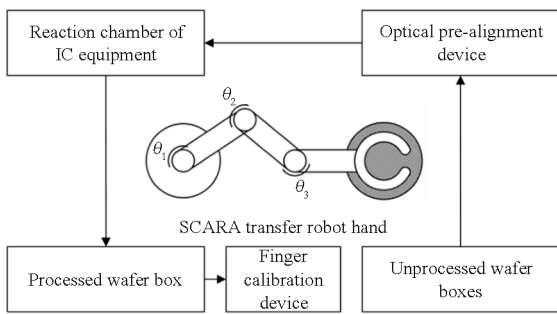


图 2 晶圆传输过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wafer transfer process

机器人传动原理如图 3 所示,平面运动机构由三个手臂和直驱电机组成,其中小臂、大臂、末端执行器(机械吸盘手指)的回转运动关节均通过直驱电机直接驱动.直驱电机结构扁平、传动结构简单,相比于传统的伺服电机,更容易实现高端集成化和小型轻量化的要求,其在保证了轻载晶圆传输过程中运动的稳定性、准确性的同时,也极大地提高了传输效率<sup>[15]</sup>。

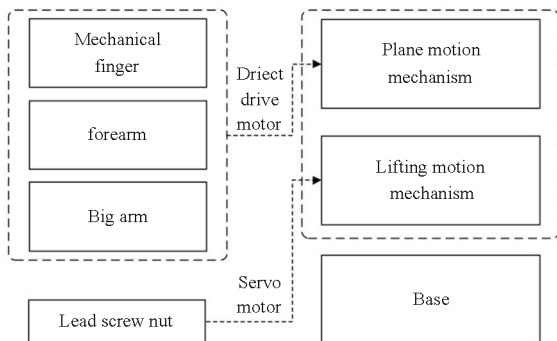


图 3 晶圆传输机器人传动原理图

Fig. 3 Transmission schematic diagram of wafer transfer robot hand

升降运动机构的结构原理是通过安装在底座的伺服电机驱动滚珠丝杠,将旋转运动转化为直线运动,使得机械臂能够平稳地上下移动.机械臂的

套筒部分安装在螺母基座上,实现机械臂和螺母的连接,从而使得机械臂通过丝杠螺母副实现上下运动.底座部分用于承载、定位和安装机械臂,保证工作的稳定性。

## 2 晶圆传输机器人结构设计

本文设计的晶圆传输机器人如图 4 所示,机器人总体结构包括平面运动机构、升降运动机构和底座.其中平面运动机构由机械手指、小臂、大臂、直驱电机组成;升降机构由升降套筒、丝杠螺母以及导轨组成;底座部分安装有伺服电机.机器人总体传动包括平面传动和升降传动:平面传动由直驱电机驱动三个旋转关节,升降传动由伺服电机驱动丝杠螺母实现。

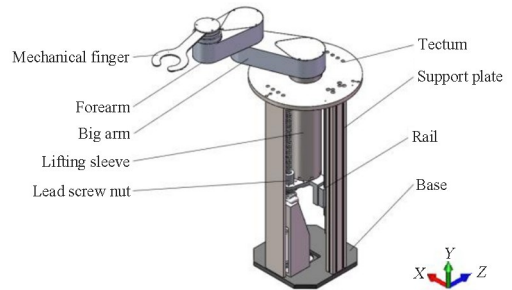


图 4 晶圆传输机器人总体结构

Fig. 4 Overall structure of wafer transfer robot hand

### 2.1 平面运动机构

如图 5 所示,本文设计的机器人平面运动机构,该机构能够将晶圆在 XZ 平面中取放。

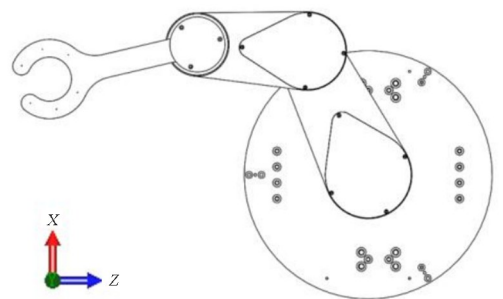


图 5 平面运动机构俯视图

Fig. 5 Top view of plane motion mechanism

平面运动机械结构如图 6 所示,机械手部三个臂长均采用铝合金材料,其设计尺寸分别为:大臂长  $L_1 = 200 \text{ mm}$ ,小臂长  $L_2 = 160 \text{ mm}$ ,机械手指臂长  $L_3 = 221.56 \text{ mm}$ .在晶圆传输过程中,三款直驱电机各自独立直接驱动三个旋转关节,实现手臂在平面完成目标的复杂运动,以满足高精度、高速度、高稳定性的工作场景要求。

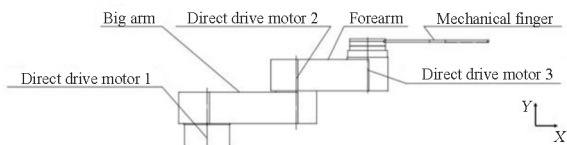


图 6 平面运动机构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of planar motion mechanism

为保证机械手的轻量化、足够的强度和稳定性,超薄机械手指主体的材料采用铝合金进行制造,其整体厚度不大于 5 mm. 如图 7 所示,本文初设计机械手指厚度为 4 mm,手指末端底部设置有均匀分布的六个吸盘,基于伯努利排气负压原理均匀施加吸附力,通过吸盘处吸附力的变化,在晶圆传输过程中能够在拾取和释放晶圆时产生稳定的负压,从而实现无损操作,确保晶圆在传输过程中的完好无损<sup>[16]</sup>.

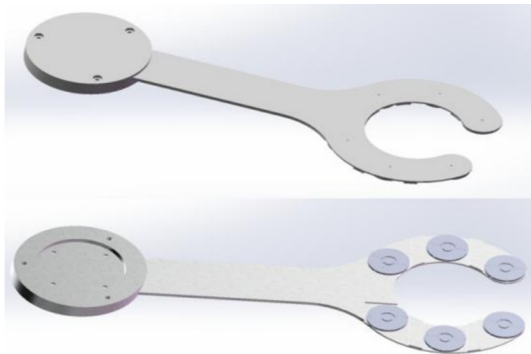


图 7 机械手指

Fig. 7 Mechanical fingers

## 2.2 升降运动机构

晶圆传输机器手在工作过程中要实现晶圆的取放,除了平面运动机构之外,还需要升降运动机构,以完成晶圆取放过程中竖直方向上的上下移动. 如图 8 所示,通过设计由伺服电机驱动的滚珠丝杠升降运动机构,以实现机械臂的升降运动.



图 8 滚珠丝杠

Fig. 8 Ball Screw

升降机构如图 9 所示,为增强机构运行时的刚度和稳定性,在机构的底板和顶盖两侧设计了滑块

导轨,另外两侧设置铝合金板以提供支撑. 螺母部分与升降套筒相连接,为保证轻量化以及便于后续电路设计与线缆安装,套筒设计为内中空,其上段预留位置与平面移动机构直驱电机相连接.

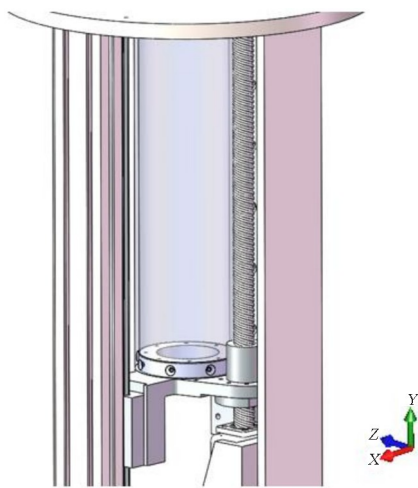


图 9 升降机构

Fig. 9 Lifting mechanism

## 2.3 底座

机器手底座部分用于机器手的支撑,保证工作时机器手运动的稳定性. 如图 10 所示,底座部分主要零件为底板,导轨、支撑板电机座通过螺栓连接到底板上.



图 10 底座

Fig. 10 Base

## 3 超薄机械手指模态分析及结构优化

在总体结构初步设计的基础上,机械结构的模态特性也是衡量机器手整体综合性能的指标之一,机械臂轻量化的同时也需要保证模态频率满足工作要求. 机器手在运动过程中,对低频振动具有超高的灵敏度,而电机作为主要振动源,其工作频率较低. 故机器手工作时与振动源易产生低频共振现象,即当末端执行器振动,导致末端机械手指也振动使得晶片在运动中发生滑移而造成精度误差. 对此,有必要对其进行模态分析,并在模态分析结果

的基础上进行结构优化<sup>[17-19]</sup>. 在晶圆传输场景中, 本文设计的超薄机械手指通过吸盘气压吸附, 与晶圆直接贴合, 对此本文基于 Ansys Workbench 有限元分析软件对机械手指进行模态分析.

### 3.1 超薄机械手指模态分析

有限元分析之前, 需要对模型进行适当的简化, 以便减少后续计算分析的时间<sup>[20]</sup>. 如图 11 所示, 在保证对结构的影响较小可忽略不计的前提下, 本文针对模型中的小孔、倒角、气路等微小结构进行了简化.



图 11 机械手指模型简化

Fig. 11 Mechanical finger model simplification

将机械手指三维模型导入到 Ansys Workbench 中, 为满足轻量化设计要求, 如表 1 所示, 模型主要材料设置为铝合金.

表 1 铝合金材料属性

Table 1 Material properties of aluminium alloys

| Materials       | Density/(kg/m <sup>3</sup> ) | Young's modulus/GPa | Poisson's ratio |
|-----------------|------------------------------|---------------------|-----------------|
| Aluminium alloy | 2770                         | 71                  | 0.33            |

在机械手指的接触设置中, 由于其结构主要是通过螺栓连接固定在一起, 在运动的过程中各零部件也没有相对运动情况, 故其接触方式默认为 Bonded 模式.

表 2 机械手指前六阶模态固有频率

Table 2 First six orders of modal intrinsic frequency of mechanical finger

| Mode | Natural frequency /Hz |
|------|-----------------------|
| 1    | 50.129                |
| 2    | 164.52                |
| 3    | 317.34                |
| 4    | 385.14                |
| 5    | 433.97                |
| 6    | 794.93                |

其后对模型进行网格划分, 单元尺寸设置为 2 mm, 共划分 60 212 个节点, 31 046 个单元. 在手指与小臂连接处添加固定约束后, 对其 1~6 阶模态进行求解, 最终得到前六阶模态固有频率如表 2 所示, 模态振型如图 12 所示.

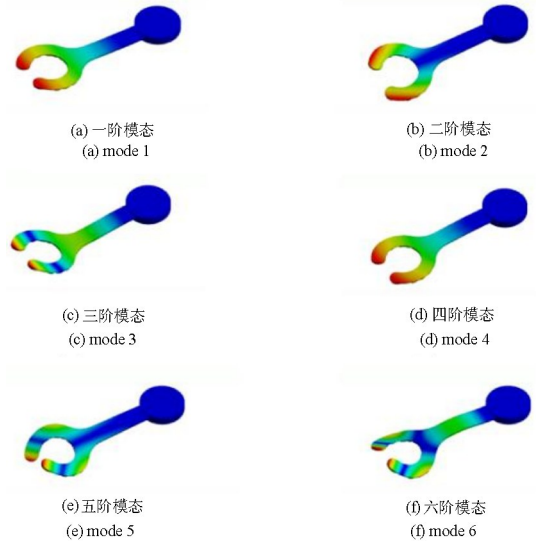


图 12 机械手指 1~6 阶振型

Fig. 12 1~6 modal shapes of mechanical fingers

### 3.2 机械手指结构优化

通过观察机械手指一阶模态频率及振型可知, 手指一阶模态频率较低仅为 50.129 Hz, 与执行器振动源频率接近. 对此, 为避免共振现象产生, 在保证手指工作可靠性的基础上, 有必要对其进行结构优化以提高其一阶模态固有频率<sup>[21]</sup>. 本文通过加强筋和加宽优化方案的方式, 增加在振型方向上的厚度, 对结构进行优化. 考虑到在机械手指的上端面增加厚度的同时, 也会提高机械手指的质量, 为了满足轻量化的要求, 如图 13 所示, 通过均匀轮形筋结构设计, 降低质量的增幅的同时保证刚度的提升.



图 13 均匀轮形筋结构优化设计

Fig. 13 Optimised design of uniform wheel stiffener

机械手指优化后, 对其进行模态分析, 前六阶模态固有频率结果如表 3 所示.

通过设计均匀轮形筋结构, 在振型方向增加厚度以及宽度, 优化后机械手指的一阶模态频率由

50.129 Hz 提高至 71.578 Hz,提高 42.79%,有效提高了手指在一阶模态方向的刚度。

表 3 优化后机械手指前六阶模态固有频率  
Table 3 Natural frequencies of the first six modes of the optimized mechanical finger

| Mode | Natural frequency/Hz |
|------|----------------------|
| 1    | 71.578               |
| 2    | 225.35               |
| 3    | 405.00               |
| 4    | 408.74               |
| 5    | 564.77               |
| 6    | 973.74               |

### 4 晶圆传输机器人整体模态分析及结构优化

机器人整体的模态固有频率是其系统结构的固有属性,这一参数会影响其运动过程中的稳定性.固有频率越高,其整体的刚度和稳定性也越高<sup>[22]</sup>.基于此,在对机械手指结构优化后,有必要对机械手整体进行模态分析。

#### 4.1 晶圆传输机器人模态分析

为了提高有限元计算效率,本文在对整体结构及运动特性的影响可忽略不计的前提下,将机器人的电机、螺栓、轴承以及细小工艺孔等零部件结构进行了简化处理<sup>[23]</sup>,并将简化后的晶圆传输机器人导入到 Ansys Workbench 中进行分析。

机器人的主要材料机械臂、底板、支撑板设置为铝合金,连接关系定义默认为 bonded,网格尺寸设置为 3 mm,其中节点数为 1 547 272,单元数为 769 801,模态分析设置求解阶数为 6 阶.之后对模型进行支撑约束,如图 14 所示,分别在底板底端、丝杠与电机连接支撑件下端设置固定约束,丝杠联轴器轴段设置圆柱面约束。



图 14 支撑约束  
Fig. 14 Support constraints

对模型进行求解分析,得到机器人前 6 阶模态频率如表 4 所示,前六阶振型如图 15 所示。

表 4 机器人前六阶模态频率  
Table 4 Frequency of the first six modes of the robot hand

| Mode | Natural frequency /Hz |
|------|-----------------------|
| 1    | 51.139                |
| 2    | 61.89                 |
| 3    | 76.49                 |
| 4    | 87.41                 |
| 5    | 104.38                |
| 6    | 139.72                |

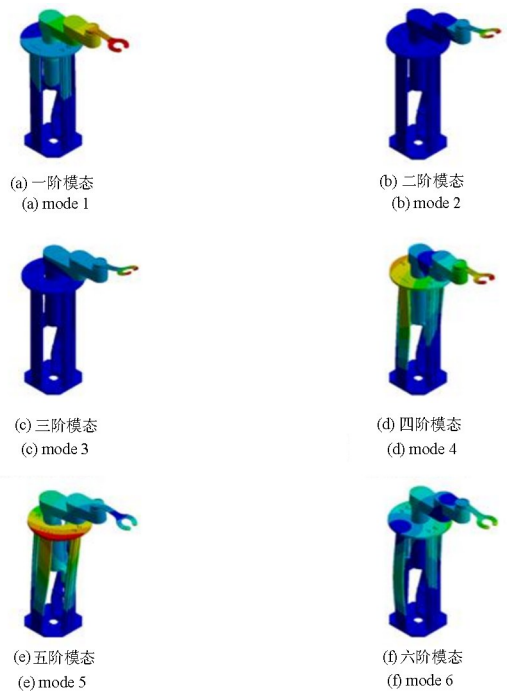


图 15 晶圆传输机器人前六阶振型  
Fig. 15 The first six modes of wafer transfer robot hand

观察振型可知,其一阶模态较低,振型为沿 X 方向的摆动,考虑可能是 Z 方向的底座部分刚度较弱;二阶模态振型方向沿 Y 方向,与机械手指的一阶模态振型方向一致,表明对于机器人的二阶模态有效变形质量包含了机械手指的一阶模态变形质量,考虑到机器人底座部分刚度较弱的原因,因此机器人二阶模态比机械手指的一阶模态要小。

#### 4.2 晶圆传输机器人结构优化

考虑到机器人底座部分刚度较弱,引起一阶模态频率偏低以及二阶模态频率相较于机械手指的一阶模态频率偏低,对此有必要进行升降机构及底座结构优化以提高其刚度,进而提高整体的模态固有频率.为实现减振降噪的目的,可以考虑通过加

强筋、增加薄弱部分厚度等方式改变结构的尺寸、改变材料或设计壳体提高整体结构固有频率避免共振<sup>[24]</sup>。

考虑到机器人底座不参与运动,相比于铝合金,由表5可知结构钢具有较高的强度.对此本文将底座部分材料更换为杨氏模量更高的结构钢,以降低重心、提高承载能力和刚度。

表5 结构钢材料属性

Table 5 Material properties of structural steel

| Materials        | Density/(kg/m <sup>3</sup> ) | Young's modulus/GPa | Poisson's ratio |
|------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|
| Structural steel | 7850                         | 200                 | 0.3             |

圆筒及顶盖结构优化如图16所示,对升降圆筒和顶盖部分进行两侧肋板加强筋设计,对顶盖部分结构进行加宽加厚。

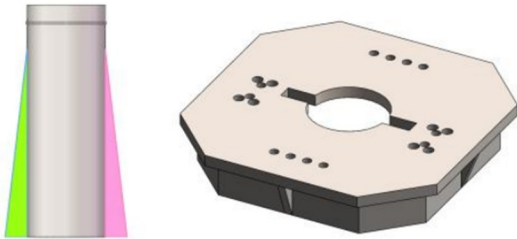
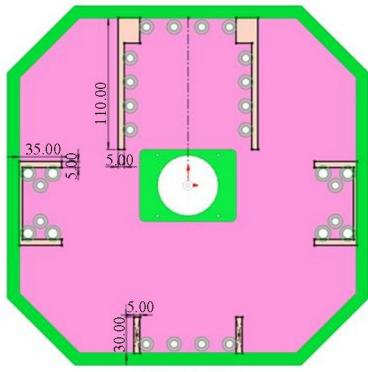


图16 圆筒及顶盖结构优化

Fig. 16 Optimisation of cylinder and top cover structure



(a) 壳体尺寸设计  
(a) Shell size optimization



(b) 壳体示意图  
(b) Shell diagram

图17 底座壳体优化

Fig. 17 Base shell optimization

由于整体的低阶模态频率主要是底座部分刚度较低引起,对此有必要进一步提高底座刚度,本文基

于底座构造和尺寸结构相关参数,进行底座部分的壳体优化设计,其尺寸和模型外观如图17所示。

将优化设计后的结构更新到原模型中,改进后的模型如图18所示,相比于最初的模型,优化后的模型增加了均匀轮形筋结构、修改了底座材料、加装肋板、加宽顶盖和设计底座壳体。

将其导出至Ansys Workbench中进行模态分析,前六阶模态固有频率结果如表6所示,前六阶振型如图19所示。

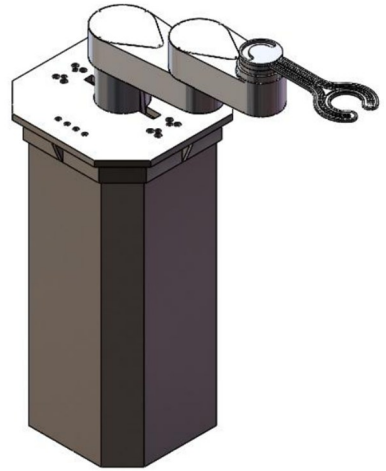


图18 机器人优化后结构

Fig. 18 Robot hand optimisation model

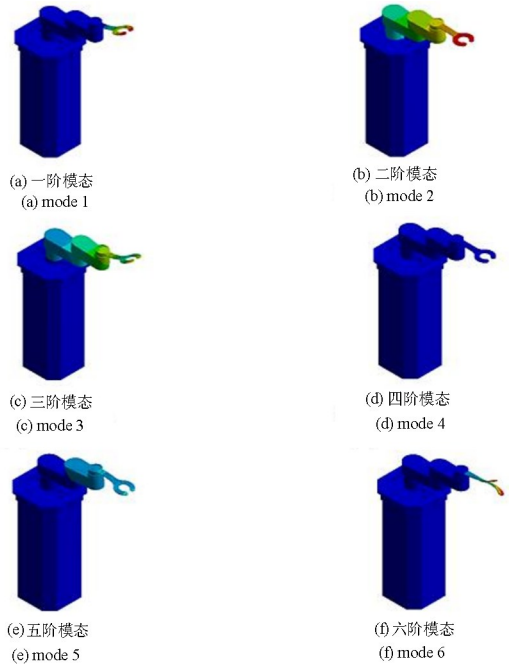


图19 优化后的机器人前六阶振型

Fig. 19 The first six modes of the optimized robot hand

如表7所示,优化后的一阶和二阶模态频率分别提高了54.49%和64.24%,提高了晶圆传输机器人的整体低阶模态,有效保障了其在实际工作中

的稳定性和可靠性。

表 6 优化后模型前六阶模态固有频率

Table 6 Natural frequencies of the first six modes of the optimized model

| Mode | Natural frequency/Hz |
|------|----------------------|
| 1    | 79.005               |
| 2    | 101.650              |
| 3    | 160.060              |
| 4    | 164.690              |
| 5    | 167.430              |
| 6    | 263.740              |

表 7 优化前后的一阶和二阶模态频率对比

Table 7 Comparison of first-order and second-order modal frequencies before and after optimization

| Mode | Primary frequency/Hz | Optimized frequency/Hz | Increment percent |
|------|----------------------|------------------------|-------------------|
| 1    | 51.139               | 79.005                 | 54.49%            |
| 2    | 61.890               | 101.650                | 64.24%            |

## 5 结论

本文以 SCARA 型晶圆传输机器人作为研究对象,在分析晶圆传输机器人传动原理的基础上,完成了平面运动机构、升降运动机构和底座的初步设计。基于 Ansys workbench 有限元分析软件对机械手指进行模态分析,通过设置均匀轮形筋结构的方式进行优化,实现手指部分一阶模态提高 42.79%;基于优化后的手指,针对机器人整体进行模态分析,并基于分析结果,通过修改底座材料、加装肋板、加宽顶盖和底座壳体,将机器人整体的一阶和二阶模态频率分别提高了 54.49% 和 64.24%。通过结构优化,提高了晶圆传输机器人的整体低阶模态,改善了晶圆传输机器人的运动控制性能,有效保证了晶圆传输机器人在实际工作中的稳定性和可靠性。

## 参考文献

[1] 丁浩. 硅片传输机械手控制策略的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

DING H. Research on control strategy of silicon transmission manipulator [D]. Guiyang: Guizhou University, 2015. (in Chinese)

[2] HE Y B, MAI X Q, CUI C Q, et al. Dynamic modeling, simulation, and experimental verification of a wafer handling SCARA robot with decoupling servo control [J]. IEEE Access, 2019, 7: 47143—47153.

[3] 赵川. 永磁传送系统的悬浮控制与稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.

ZHAO C. Research on levitation control and stability of permanent magnetic levitation transportation system [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022. (in Chinese)

[4] 傅翠晓, 全利平. 集成电路装备产业的全球竞争格局与我国竞争态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(6): 497—502.

FU C X, QUAN L P. Analysis on global competitive landscape and competitive situation of integrated circuit equipment industry in China [J]. World Sci—Tech R & D, 2017, 39(6): 497—502. (in Chinese)

[5] 王伟光, 关一伊. 战略性技术创新投入、竞争性技术创新投入与企业财务绩效[J]. 中国科技论坛, 2024, 5(8), 94—103.

WANG W G, GUAN Y Y. Strategic technological innovation investment, competitive technological innovation investment and corporate financial performance[J]. Forum on Science and Technology in China, 2024, 5(8), 94—103. (in Chinese)

[6] 吴天尧. 半导体设备中的晶圆搬运机械手应用综述[J]. 集成电路应用, 2024, 41(3): 66—67.

WU T Y. Overview of the application of wafer handling robots in semiconductor equipment [J]. Application of IC, 2024, 41(3): 66—67. (in Chinese)

[7] ZHANG C, ZHAO G, XIAO Y, et al. Decoupling robust control of three-link direct drive robot arm [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1510 (443/444): 258—266.

[8] 李想. 新型直驱式晶圆搬运机器人的关键技术研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.

LI X. Research on key technologies of a new direct-drive wafer handling robot [D]. Shanghai: Donghua University, 2022. (in Chinese)

[9] 荆雄. 晶圆搬运机器人的开发及控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

JING X. Development and control system design of a wafer-handling robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

- [10] 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 Q, SONG F. Structure design and optimization of end-effector for wafer transfer robot [J]. Light Industry Machinery, 2018, 36(6): 15—19. (in Chinese)
- [11] 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.  
LI K. Study of end-effector motion and wafer contact status detecting system for wafer transfer robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 张在春. 晶圆测试自动传输系统的结构与优化[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.  
ZHANG Z C. The structure design and optimization of wafer probe auto-transfer system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [13] 韩笑, 鲍军其, 张新, 等. 晶圆探针台结构振动模态分析研究[J]. 微纳电子与智能制造, 2022, 4(1): 88—93.  
HAN X, BAO J Q, ZHANG X, et al. Vibration mode analysis of wafer prober structure [J]. Micro/Nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2022, 4(1): 88—93. (in Chinese)
- [14] 吴天尧. 一种半导体设备晶圆搬运机械手的主动控制方法研究[J]. 中国机械, 2024, (23): 9—12.
- [15] 沈琪. 磁齿轮复合电机直驱式 SCARA 机器人研制[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.  
SHEN Q. Development of direct-drive SCARA robot driven by magnetic gear compound motor [D]. Suzhou: Soochow University, 2019. (in Chinese)
- [16] 杨清. 转运机械手设计与精度稳定性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.  
YANG Q. Research on design and precision stability of transfer manipulator [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [17] WU M Y, LIU Y J, CAI H G. Dynamic analysis and optimization for wafer handling robot [J]. Advanced Materials Research, 2014, 898: 657—662.
- [18] 王超. 公路隧道高空摄像头清洗机器人结构与轨迹规划研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.  
WANG C. Structure design and trajectory planning research of highway tunnel overhead camera cleaning robot [D]. Xi'an: Changan University, 2023. (in Chinese)
- [19] KOURITEM S A, ABOUHEAF M I, NAHAS N, et al. A multi-objective optimization design of industrial robot arms [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(12): 12847—12867.
- [20] 张希峰, 巩彬, 陈金利, 等. 末端执行器切割机构的有限元分析及优化设计[J]. 中原工学院学报, 2023, 34(1): 59—65.  
ZHANG X F, GONG B, CHEN J L, et al. Finite element analysis and optimization design of end-effector cutting mechanism [J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2023, 34(1): 59—65. (in Chinese)
- [21] 邵天宇. RV 减速器结构有限元分析[D]. 温州: 温州大学, 2019.  
SHAO T Y. Finite element analysis of RV reducer structure [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2019. (in Chinese)
- [22] 叶帆. 纤维曲线角度和铺层数量对复合材料层合板振动特性的影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.  
YE F. Study on the influence of fiber curve angle and number of layups on vibration characteristics of composite laminates [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022. (in Chinese)
- [23] 李龙晶. 净化机器人碰撞保护控制技术研究是实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
LI L J. Study and implementation of collision protection for clean robot [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [24] 王琦鑫. 轴向柱塞泵斜盘动态特性研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2023.  
WANG Q X. Study on dynamic characteristics of swash plate of axial piston pump [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)