

伯努利晶圆传输机械手指的结构优化与吸附力研究^{*}

余少强^{1,2} 周海波^{1,2} 徐云浪^{1,2†} 李嘉俊^{1,2}

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

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

摘要 晶圆传输机器人是晶圆传输过程中的重要设备, 主要承担晶圆的高精度、高速、稳定传输任务. 而作为直接接触晶圆的传输机械手指, 很大程度上会决定着晶圆传输的可靠性. 针对晶圆搬运过程中的无损高刚度要求和轻量化设计目标, 本文提出了一种基于伯努利排气负压原理的超薄机械手指结构. 该机械手指整体厚度 5 mm, 装有 6 个吸盘, 供给气体从吸盘圆筒侧面喷嘴高速喷出, 在筒内形成旋转气流致负压, 吸附晶圆, 随后经机械手指与晶圆间隙释放至外界. 此气流在吸盘与晶圆之间形成稳定层流, 造成晶圆上下压力差, 最终实现晶圆向上吸附力. 仿真结果表明, 晶圆吸附力与吸盘供气压力呈近似线性关系, 与吸盘和晶圆的间隙遵循指数函数关系. 当间隙为 0.6 mm 时, 吸附力效果达到最优.

关键词 伯努利原理, 晶圆机器人, 机械手指, 超薄晶圆

中图分类号: TP241.2

文献标志码: A

Research on Structure Optimization and Adsorption Force of Bernoulli Wafer Transfer Manipulator^{*}

Yu Shaoqiang^{1,2} Zhou Haibo^{1,2} Xu Yunlang^{1,2†} Li Jiajun^{1,2}

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

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

Abstract Wafer transmission robot is an important equipment in the process of wafer transmission, which mainly undertakes the task of high-precision, high-speed and stable wafer transmission. As a direct contact with the wafer transmission mechanical finger, to a large extent, will determine the reliability of wafer transmission. In order to meet the requirement of high stiffness and light weight in wafer handling, an ultra-thin manipulator structure based on Bernoulli's principle of exhaust negative pressure is proposed in this paper. The overall thickness of the manipulator finger is 5 mm, and is equipped with 6 suction cups. The supply gas is ejected from the side nozzle of the suction cup cylinder at high speed, forming a rotary air flow in the cylinder to cause negative pressure, adsorbing the wafer, and then releasing to the outside world through the gap between the manipulator finger and the wafer. The airflow forms a stable laminar flow between the suction cup and the wafer, causing the pressure difference between the wafer and the upper and lower, and finally realizing the upward adsorption force of the wafer. The results show that the relationship between wafer sorption and suction pressure is approximately linear, and the relationship between wafer sorption and suction gap is exponential function. When the gap is 0.6 mm, the effect of adsorption force is optimal.

2024-09-28 收到第 1 稿, 2024-10-19 收到修改稿.

^{*} 湖南省科技创新计划项目 (2021JC0005), Hunan Science and Technology Innovation Program (2021JC0005).

[†] 通信作者 E-mail: xuyunlang@csu.edu.cn

Key words Bernoulli principle, wafer robot, mechanical finger, ultra-thin wafer

引言

随着工业机器人的技术飞跃,全球已大步迈入信息化与智能化交织的新时代^[1],而晶圆传输机器人作为半导体加工的重要设备,对于促进国民经济的繁荣和信息化的发展发挥着关键作用^[2,3].然而工业机器人的发展路径充满挑战,特别是在集成电路制造领域,其复杂性尤为显著.整个制造流程涵盖了多种工艺和设备,要求晶圆在多种工艺设备间精确传递.考虑到晶圆对加工环境的高度敏感性及人工操作可能引入的风险,自动化晶圆传输设备的市场需求变得越来越迫切.在此背景下,晶圆机器人应运而生,成为解决这一难题的关键技术^[4,5].为了加速集成电路技术的发展,改进晶圆硅片制造工艺与设备条件,很多国家均对晶圆硅片的制造流程及其生产设备的创新与发展给予了高度重视^[6].随着晶圆直径的增加和制造工艺的提高,传统晶圆传输设备已经不能满足大尺寸超薄晶圆搬运过程的需求^[7],需要研制出一种功能更强大适应范围更广的晶圆传输机器人,而机械手指作为晶圆传输机器人的末端执行器,一般针对特定直径尺寸的晶圆进行设计.为了有效推动晶圆加工技术的发展,自主研发高效可靠传输超薄晶圆的机械手指成为晶圆机器人研制的关键技术之一^[8].

晶圆因其材料特性,具有高度的敏感性和脆弱性,易遭受物理形变、破损及尘埃污染的威胁.当晶圆与机械手指相互作用时,这种接触特性非常影响晶圆的搬运过程.一方面,接触力度与方式会直接导致晶圆受力状态的改变,加剧其形变风险,极端情况下更可能引发晶圆结构的损坏;另一方面,接触界面的摩擦特性显著影响着机械系统的动力学表现,具体表现为机械手操作时的加速度调整需求增加.这一调整不仅限制了机械手动作的灵活性,还会降低晶圆传输的效率,特别是在高速、高精度要求下,更有可能引发晶圆的 unstable 滑落或损坏.此外,在晶圆制造与加工过程中,传输方式的选择至关重要,其中,摩擦传输与真空吸附式是两种主流的晶圆传输机制^[9].

摩擦传输式机械手,常见于结合真空传输技术的系统中,其运作原理主要依赖于晶圆自身重力产

生的摩擦力来实现晶圆的稳定传输.然而,这一方式存在一个显著局限,即传输速度受限于晶圆的质量与重力效应,限制了传输效率的提升.为了克服上述限制,美国 Brooks Automation 公司成功推出了针对 300 mm 直径晶圆设计的 SCARA 型真空传输机械手^[10].不过值得注意的是,尽管 Brooks 公司公开了真空传输机械手的结构设计,但对于如何在真空环境下实现晶圆的高效、精确传输,特别是其核心技术——已经申请专利保护的时间最优轨迹规划(Time-Optimal Trajectory Planning)方法^[11]的具体实现细节,则采取了严格的保密措施.

而关于真空吸附式机械手,除了加速传输过程外,减小晶圆在吸附力下的形变也成为关键挑战.当前,国际学术界对真空吸附式机械手指的研究已取得一定进展,新加坡的 Chee Wee Tang 团队便是其中的佼佼者,他们成功研发并申请了相关发明专利的真空吸附式机械手指^[12].该设计在晶圆夹持、传输及精准定位方面展现出显著优势,然而,其在实际应用中对晶圆造成的较大变形风险不容忽视,且其设计特性限制了其在真空环境下的适用性.

为克服以上两种晶圆机器人机械手指存在的缺陷,满足晶圆搬运过程中的无损高刚度要求,本文确定了一种基于伯努利排气负压原理的超薄机械手指结构.针对晶圆自动取放机器人系统的轻量化设计目标,机械手指整体厚度不大于 5 mm,内设细小气路管道,伯努利吸附形式避免了传统机械手的抓手形式,可实现对晶圆的安全、可靠的吸附.

1 晶圆机器人机械手指设计

1.1 晶圆机器人实验平台

图 1 展示了晶圆机器人实验平台的结构模型.为了满足实际生产需求,本文设计并构建了一个包含竖直升降组件的晶圆机器人实验平台.该平台的核心在于其升降组件与底座结构的巧妙结合,通过精密布局,实现了系统的稳定性与灵活性.在控制层面,采用了四台独立伺服电机,实现了对末端执行器直线与旋转运动的同步、精确控制.这一设计确保了晶圆片在加工完成后,能够由晶圆机器人机

械手指稳定、准确地送入晶圆盒中,从而提升整体作业效率与自动化水平。

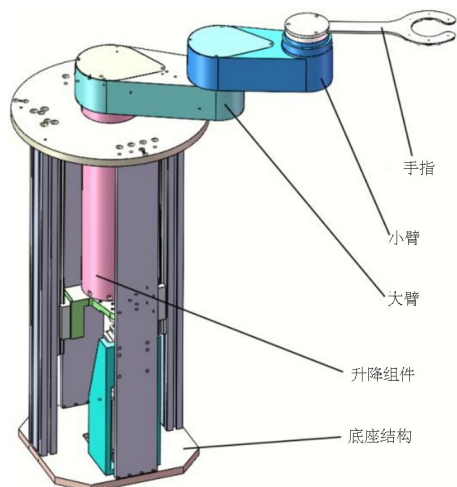


图 1 晶圆机器人实验平台

Fig. 1 Wafer robot experimental platform

1.2 伯努利原理的机械手指结构

结构如图 2 所示,晶圆机器人机械手指由一个手指盖板、一个手指底座、一个手指主体和六个吸盘组成,利用伯努利原理的气流压力差吸附晶圆。

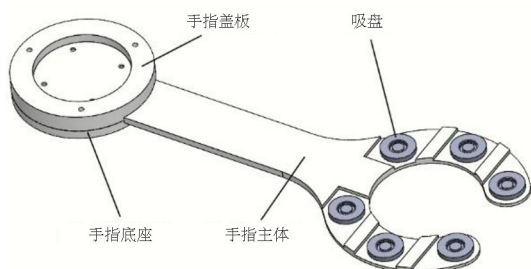


图 2 伯努利原理机械手指

Fig. 2 Bernoulli's mechanical finger

相对于真空吸附方式的晶圆机器人机械手指,伯努利原理机械手指的吸附力会分散到整个晶圆表面,更适合用于减薄晶圆的传输。

2 晶圆吸附理论与方法

2.1 弹性接触理论

较早时期,Hertz 理论^[13]便对任意两物体间的弹性接触展开了深入研究,指出:当两个弹性球体,其半径分别为 R_1 和 R_2 ,相互接触时,在外力 F 的作用下,两者的接触面会产生一个圆形区域,该区域的尺寸特征可以通过当量半径 r 来表示

$$r^3 = FR/K \quad (1)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right), \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2)$$

式中, K 为有效弹性模量, E_1, E_2 分别为两个物体的弹性模量, ν_1, ν_2 则分别是两个物体的泊松比,弹性体压缩量为 $\delta = r^2/R$,而且 Hertz 理论要想成立还需要满足两个条件:材料是质地均匀的,各向同性的,而且完全弹性的;表面是理想光滑的,接触表面的摩擦力忽略不计。

然而 Hertz 理论忽略了两球体间还存在表面力的潜在影响^[14],为弥补这一不足,DMT (Derjaguin-Muller-Toporov)理论应运而生,DMT 理论认为,要想将两个理想球体完全分离,所需施加的力至少应达到一个特定阈值

$$F_{c(DMT)} = -2\pi\omega R \quad (3)$$

且接触圆的半径有

$$a_{DMT}^3 = \frac{R}{K} (F + 2\pi R\omega), \omega = 2\gamma_1 \gamma_2 \quad (4)$$

式中, γ_1, γ_2 分别为两球体的表面自由能。除此之外,JKR 理论也修正了 Hertz 理论,它考虑的是接触界面能量的耗散与储存^[15]。通过 JKR 理论,接触圆的半径满足

$$r_{JKR}^3 = \frac{R}{K} \{ F + 3\pi\omega R + \sqrt{[6\pi\omega RF + (3\pi\omega R)^2]} \} \quad (5)$$

假定两个理想球体在接触时的相对位移为 δ ,黏附力是 F_s ,则

$$F_s = \frac{Kr^3}{R} - \sqrt{6\pi\omega Kr^3}, \delta = \frac{r^2}{R} - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{6\pi\omega r}{K}} \quad (6)$$

当这两个球体将要分离时,它们的黏附力达到最大,为

$$F_s = -1.5\pi\omega R \quad (7)$$

此时 $r_s = 0.63r_0, \delta_s = -0.21r_0^2/R$ 。由于 DMT 与 JKR 理论存在明显差异,故引入塔波尔数^[16]以调和两者。塔波尔数小于 0.1,表征材料坚硬且具有较小的表面能,此时适合采用 DMT 理论;反之,若塔波尔数大于 5,则材料质地柔软且表面能较高,这时则 JKR 理论更为适用。考虑到晶圆容易发生变形和破损,所以通常采用柔性接触,故本文中使用 JKR 理论对吸盘吸取晶圆过程进行分析。

2.2 伯努利负压理论

在流体力学的框架内,流体的运动遵循一个基

本原则,即能量在流动过程中保持恒定,这一原理即为能量守恒定律的体现.而伯努利方程,作为这一定律在流体动力学领域的具体展现,为我们提供了一个定量描述流体能量变化的有效工具^[17].

$$\frac{p}{\rho} + zg + \frac{v^2}{2} = C \quad (8)$$

式中: p 为流体通过某一截面处的压力; ρ 表示流体密度; z 为该截面与水平基准面的距离; g 为重力加速度; v 为流体通过该截面时的速度.从方程(8)可知,在保持其他所有条件恒定不变的前提下,当流速增大时,截面附近的压力就会减小,从而产生压力差,形成向上的托举力.

图3详尽展示了伯努利吸盘的具体工作机制.该机制利用高压气泵促使气体经由吸盘顶端的进气口注入,随后这些气体在吸盘内部的圆筒形侧壁上开设的喷嘴处被高速喷射而出.由于注入的是高压气体,因此在圆筒区域形成高速的气流.依据伯努利效应,这些气流会产生旋转负压气场,进而在晶圆上方形成了与大气压之间的显著压力差,使得晶圆受到向上的吸附力.与此同时,从喷嘴高速喷出的气流部分直接冲击晶圆的上表面,对晶圆施加了一个向下的推力.在伯努利效应产生的向上吸附力、晶圆自身的重力作用,以及气流推力的综合影响下,晶圆被稳定地向上抬起.这一过程使得晶圆机器人能够在狭小的晶圆盒内部实现对晶圆的精确抓取与稳定操作.最终,这些气流在通过机械手指吸附面与晶圆表面之间的微小间隙后,被有效地释放到外部环境之中.

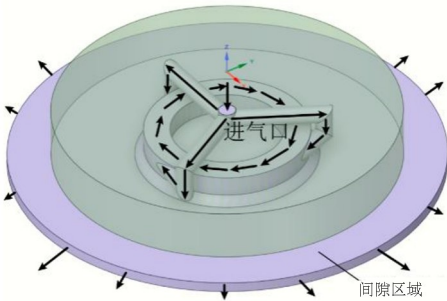


图3 吸盘工作原理图
Fig. 3 Working principle of suction cup

2.3 晶圆吸附过程力学分析

由流体力学可知,晶圆在吸附过程中不仅受到来自吸盘吸附力 F_t 和自身重力 G 的作用,还需要考虑空气阻力 F_c .这一重要因素.因此,当晶圆与吸盘的间隙减小至一定程度时,可以构建出一个精确

描述晶圆吸附过程的动力学模型,如图4所示.

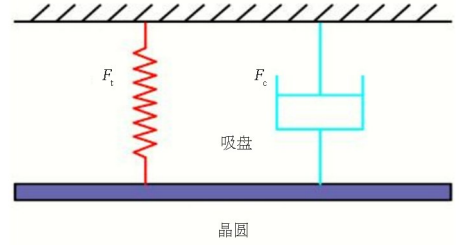


图4 晶圆吸附过程动力学模型
Fig. 4 Kinetic model of wafer adsorption process

在构建晶圆位移模型的过程中,首要步骤是确立晶圆所受吸附力与吸盘晶圆间隙之间的数学关系.这一关系与某一特定的指数形式相吻合,如公式(9)所描述的,此时晶圆吸附力与间隙之间的数据拟合效果达到了最优状态^[18].

$$F_t = A \cdot \exp(B \cdot \delta) + C \cdot \exp(D \cdot \delta) \quad (9)$$

在此模型中, A 、 B 、 C 、 D 均设定为常数, δ 为晶圆与吸盘的间隙距离.在晶圆吸附过程中,间隙 δ 的变化会引发空气阻尼力的显著作用,该现象称为挤压流效应.图5详细描述了该过程的空气阻尼理论几何模型,以吸盘底部中心为坐标原点,建立坐标系 (r, z) ,设 p_0 为吸盘底部中心压力,吸盘外的环境气压定义为 p_a ,接下来是具体理论分析过程.

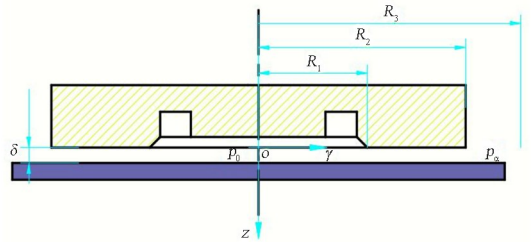


图5 空气阻尼几何模型
Fig. 5 Air damping geometric model

首先建立如下假设:

- (1)吸盘与晶圆间隙 δ 远小于吸盘半径 R_2 .
- (2)间隙区域的气流状态为层流.
- (3)间隙区域只存在粘性流动.
- (4)气体流速只有 u_r, u_z 两个速度分量.
- (5) z 和 a 方向上的压力变化小到可忽略.
- (6)该挤压流效应为恒温过程.

其次,由以上假设,气流的连续性方程可简化为:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} = 0 \quad (10)$$

通过量纲分析的方法,可知方程中的非定常项与对流项均属于高阶微小量,据此,这些项在近似处理时可以忽略不计,从而简化为:

$$\frac{dp}{dr} = \mu \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 \mu}{\partial z^2} = 0 \quad (12)$$

式(12)中 μ 为空气的动力黏度。

已知流速与压力的边界条件是:

$$\begin{cases} u_r(r, \alpha, 0) = u_r(r, \alpha, \delta) = u_z(r, \alpha, 0) = 0 \\ u_z(r, \alpha, \delta) = d\delta/dt \\ p(a) = p_a \end{cases} \quad (13)$$

求解式(11)、式(12)可得到:

$$u_r = -\frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} z(\delta - z) \quad (14)$$

$$u_z = \frac{z}{\delta} \frac{d\delta}{dt} \quad (15)$$

假设晶圆向上移动, $u_z = d\delta/dt > 0$, 那么压力梯度 $dp/dr < 0$, 径向流速 $u_r > 0$ 。为确定压力梯度大小, 可以根据质量守恒定律:

$$\pi r^2 \frac{d\delta}{dt} = \int_0^\delta 2\pi r u_r dz \quad (16)$$

代入式(14)后得到:

$$\frac{dp}{dr} = -6\mu \frac{d\delta}{dt} \frac{r}{\delta^3} \quad (17)$$

积分后得到吸盘气旋室压力最高为:

$$p_0 = p_a + \frac{3}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} (R_2^2 - R_1^2) \mu \quad (18)$$

晶圆的上表面边缘处为外界大气压 p_a , 将其代入式(14)可得径向流速:

$$u_r = \frac{3}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} r z (\delta - z) \quad (19)$$

由式(19)可以得到, 径向流速与 r 成正比, 在 z 轴上呈抛物线分布, 在晶圆的上表面为 0, 且在 $z = \delta/2$ 的对称面时达到最大。将式(19)代入连续性方程, 同时结合边界条件可得轴向流速为

$$u_z = -\frac{d\delta/dt}{\delta^3} z^2 (3\delta - 2z) \quad (20)$$

由式(20)可知, 轴向流速与 z 相关, 为三次多项式。继续计算切应力:

$$\sigma_{zr} = \mu \frac{\partial u_r}{\partial z} = \frac{3U}{\delta^3} \mu r (2z - \delta) \quad (21)$$

在 r 相同时, 切应力呈现向两侧均匀增加, 到晶圆上表面时达到最大值; 而在 z 相同时, 则切应力与 r 成正比, 在晶圆边缘处达到最大。因此, 吸附过程中晶圆所受空气阻力力为:

$$F_c = p_0 \pi R_1^2 + \int_{R_2}^{R_3} (p - p_a) 2\pi r dr \quad (22)$$

所以, 晶圆吸附过程的数学模型为:

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = Mg - F_t - F_c \quad (23)$$

3 仿真与分析

3.1 建立吸盘数值仿真模型

3.1.1 简化假设

考虑到吸盘与晶圆之间的细微间隙特性, 当高压气体自吸盘喷嘴迅速释放并穿越此间隙区域时, 其流动状态发生显著变化, 由初始的高速射流逐渐变为稳定的层流。针对间隙区域的流体动力学特性及晶圆表面的交互作用, 提出以下合理性假设^[19]:

(1) 考虑到间隙尺寸的限制以及气体流动的黏性效应, 可以认为间隙区域的气流为层流。

(2) 不考虑空气惯性, 即忽略空气的重力影响。

(3) 在气体穿越间隙区域的过程中, 无显著热量交换发生, 即流体的温度保持恒定。

3.1.2 求解策略

在吸盘内部, 高速旋转流动作为可压缩流动, 受旋转力影响形成复杂的耦合流动。因此采用耦合隐式求解器处理多场耦合, 利用三阶精度的 QUICK 差分算法精确求解湍动能分量和湍流耗散率。针对非结构化网格, 运用 SIMPLE 算法迭代求解连续方程与动量方程的耦合, 采用二阶精度的二阶迎风插值格式离散流动方程, 以确保求解的准确性和稳定性。

3.1.3 网格划分

考虑到吸盘内部流体区域具有高度的几何复杂性, 为确保数值模拟的精确度, 采用 polyhedra 网格划分策略对该区域进行划分。为实现吸盘内腔与间隙区域在接触界面网格的平滑过渡与精准对接, 间隙区域同样被赋予了 polyhedra 网格划分方案。此划分策略最终生成了总数为 88 864 个节点和 20 630 个网格单元, 网格质量的平均水平高达 0.92, 如图 6 所示。

3.1.4 边界条件

由于从间隙区域进入外界大气的气体流动复杂性, 精确界定压力出口的位置比较困难, 因此将吸盘的计算域扩展到一个略大于吸盘面积的圆形区域。这一扩展让计算域能够充分覆盖流体流动的

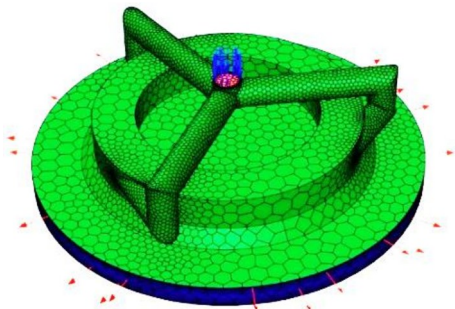


图6 吸盘流体区域网格模型
Fig. 6 Regional grid model for suction cup fluid

关键区域,从而更准确地模拟流体行为,另外在计算域的边界上,设置压力出口边界条件,通过仿真验证,可以确保计算结果的收敛性。

在伯努利吸盘的应用中,压缩空气从既定入口流入,随后穿越吸盘与晶圆的微小间隙区域逸出. 对于此类流动,采用压力入口作为边界条件,该条件基于入口处流体压力已知,但具体流量或流速未明确的情形设计,其适用性广泛,不受流体可压缩性限制. 而压力出口边界条件主要用于模拟亚音速流动环境,当间隙区域中的局部流速接近或超过音速时,传统压力出口条件将不再适用,此时需依据内部流动的详细计算结果来动态调整出口条件,以确保计算模型的准确性和可靠性. 基于上述因素的考虑,最终选定压力入口与压力出口作为边界条件设置方案.

(1) 入口边界条件

吸盘进气口设为压力入口(Pressure Inlet),入口压力 $p_{\text{total}} = 0.2 \text{ MPa}$,入口总压(p_{total})与静压(P_{static})的关系为:

$$p_{\text{total}} = p_{\text{static}} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right)^{\kappa / (\kappa - 1)} \tag{24}$$

式中, M 为马赫数(流体速度与当地声速之比), κ 表示比热比(对于空气,大约为 1.4).

(2) 出口边界条件

吸盘间隙区域边界设为压力出口(Pressure Outlet),即外界大气压 $p_a = 0$,温度 $T = 300 \text{ K}$.

(3) 周期性边界条件

将绕吸盘轴心旋转的接触面界定为周期性边界,其形式设定为转动(Rotational),确保流体在穿越此边界时保持压力恒定,即无压降现象发生.

3.1.5 吸盘流速场仿真分析

通过分析伯努利吸盘内发生的旋转气体流场,可知切向流速占据主导地位,其数值显著高于径向

与轴向流速^[20]. 这一高速流动所形成的涡流,是吸盘产生强大吸力的根本原因. 因此,关键在于研究切向流速的分布特性,特别是间隙区域中间层的切向流速分布,如图 7 所示.

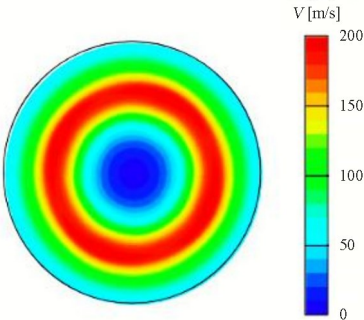


图7 间隙区域中间层切向流速分布
Fig. 7 Distribution of tangential velocity in middle layer in gap region

通过对图示数据的分析,可以观察到切向流速的一个显著特征:在接近中心轴线的位置,流速降至最低点,随后,在从吸盘轴心向外延伸的过程中,随着半径的增大,切向流速也呈现出递增趋势,直至在旋转流场的中间位置达到其峰值. 此后,随着半径的继续增加,切向流速则开始逐渐减小. 这一流速分布规律与典型的涡流特性高度吻合,体现了流体动力学中的复杂旋转效应. 此外,通过 Fluent 软件仿真模拟,还得到了不同间隙条件下旋转流场的角速度数据,详见表 1.

表 1 旋转流场角速度					
Table 1 Angular velocity of rotating flow field					
间隙 δ/mm	0.2	0.4	0.6	0.8	1
角速度 $\omega/(10^3 \text{ rpm})$	8.63	10.20	10.25	9.48	7.39

从表中可以看出,吸盘的供气流量恒定时,随着间隙的变化,间隙区域的流场角速度分布也随之变化:在间隙 $\delta = 0.6 \text{ mm}$ 时,角速度达到峰值,当间隙变大或者变小时,角速度开始减小.

3.2 机械手指联合气路仿真分析

在已成功构建单个吸盘数值仿真模型的基础之上,借助 Fluent 软件对机械手指的联合气路进行更为深入的整体过程仿真分析. 在此过程中,机械手指的内部气路布局细节如图 8 所示.

从图中可以看出,高压气体从机械手指的进气口流入,然后一分为二并通过串联的方式依次流经 6 个吸盘. 在网格划分过程中,部分参数的详细信

息如表 2 所示。

具体求解策略和边界条件等可参考前文,在此不再赘述,机械手指的流体区域模型如图 9 所示。

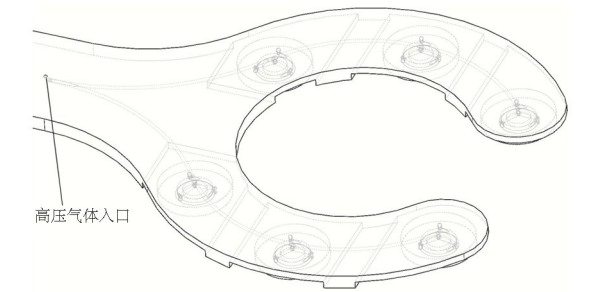


图 8 机械手指内部气路布局
Fig. 8 Mechanical finger internal air path layout

表 2 机械手指网格模型部分参数
Table 2 Partial parameters of mechanical finger mesh model

网格类型	节点个数	网格单元	网格质量
polyhedra	1 561 238	550 587	0.93

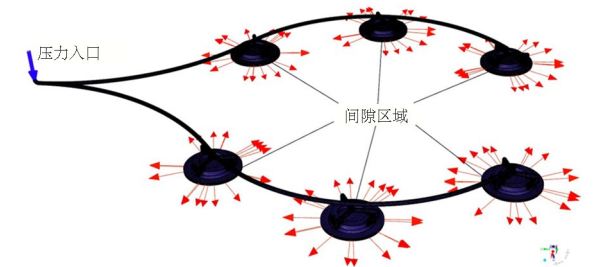


图 9 机械手指内部气路布局
Fig. 9 Mechanical finger internal air path layout

3.2.1 吸附力 F 与供气压力 p 的关系

通过 Fluent 软件仿真模拟,可以得到不同间隙条件下晶圆吸附力 F 与机械手指供气压力 p 的关系,结果如图 10 所示。可以看出:当间隙 δ 保持不变的情况下,晶圆吸附力 F 与机械手指供气压力 p 存在显著的线性关系,这一结果与理论预期相

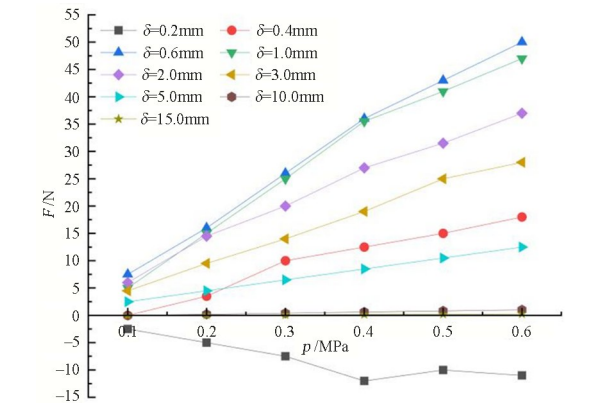


图 10 吸附力与供气压力的关系
Fig. 10 The relationship between adsorption force and gas supply pressure

符;当间隙 δ 大于或等于 0.4 mm 时,吸附力 F 数值为正,即产生吸附效果;而当间隙 δ 缩小至 0.2 mm 时,吸附力 F 则转变为负值,表现出排斥力。

3.2.2 吸附力 F 与间隙 δ 的关系

图 11 展示了在恒定供气压力 p 下,吸附力 F 与间隙 δ 之间的变化趋势,其关系满足指数分布规律,与文献[21]中的理论相符合。当间隙 $\delta \leq 0.2$ mm 时,吸附力 F 数值为负,呈现为斥力。当间隙 δ 逐渐增大,吸附力 F 也很快转变为正值。当间隙达到 0.6 mm 时,吸附力 F 达到最大,此后随间隙继续增大,吸附力则迅速减小,并逐渐趋近于零。

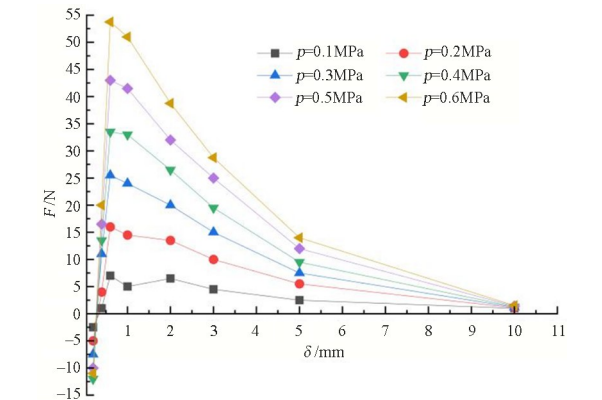


图 11 吸附力与间隙的关系
Fig. 11 The relationship between adsorption force and gap

4 结论

本文提出了一种基于伯努利排气负压原理的超薄机械手指结构,经 Fluent 软件仿真结果得到:晶圆吸附力 F 与供气压力 p 成正比、与晶圆吸盘间隙 δ 满足指数分布规律;通过对晶圆吸附过程进行数值模拟分析,当间隙 $\delta=0.6$ mm 时,可以得到最优吸附力与供气压力的映射关系。这为后续研究晶圆吸附力自适应调节方法,使机械手指在晶圆搬运过程中实现晶圆的无损搬运提供了理论基础。

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):1-13.
WANG T M,TAO Y. Research status and industrialization development strategy of Chinese industrial robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1-13. (in Chinese)

[2] 朱贻玮.展望未来 5 年中国 IC 产业[J].电子工业专用设备,2006,36(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 (8).
- [4] 吕磊, 胡晓霞, 王洪宇. 立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.
LV L, HU X X, WANG H Y. Robot design in wafer transfer system [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2012, 41(3): 36—40. (in Chinese)
- [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.
WU J. Dynamic modeling and analysis of 5-DOF clean room wafer handling robot [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013. (in Chinese)
- [6] 周旗钢. 300mm 硅片技术发展现状与趋势[J]. 电子工业专用设备, 2005, 34(10): 1—6.
- [7] 甘文彩. 硅片传输机器人关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
GAN W C. Research on kernel technology of a parallel wafer robot [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [8] 丛明, 杜宇, 沈宝宏, 等. 面向 IC 制造的硅片机器人传输系统综述[J]. 机器人, 2007, 29(3): 261—266.
CONG M, DU Y, SHEN B H, et al. Robotic wafer handling systems for integrated circuit manufacturing: a review [J]. Robot, 2007, 29(3): 261—266. (in Chinese)
- [9] 曹玉梅. 大尺寸晶圆传输机器人末端执行器接触特性分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
CAO Y M. Contact properties analysis and design of end effector for large-size wafer transfer robot [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] KANETOMO M, KASHIMA H, SUZUKI T. Wafer-transfer robot for use in ultrahigh vacuum [J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1997, 15(3): 1385—1388.
- [11] SLOTINE J J E, YANG H S. Improving the efficiency of time-optimal path-following algorithms [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1989, 5(1): 118—124.
- [12] ZUBEREK W M. Cluster tools with chamber revisiting-modeling and analysis using timed Petri nets [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2004, 17(3): 333—344.
- [13] BRUN X F, MELKOTE S N. Modeling and experimental verification of partial slip for multiple frictional contact problems [J]. Wear, 2008, 265(1/2): 34—41.
- [14] 吴桂香, 吴超, 彭小兰. 建筑玻璃表面粉尘的粘附与清洁机理探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(5): 26—30.
WU G X, WU C, PENG X L. Mechanism of adhesion and cleaning between the surface of structural glass and dust [J]. Journal of Safety Science And Technology, 2005, 1(5): 26—30. (in Chinese)
- [15] DERJAGUIN B V, MULLER V M, TOPOROV Y P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1975, 53(2): 314—326.
- [16] GREENWOOD J A. Adhesion of elastic spheres [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1997, 453(1961): 1277—1297.
- [17] 许福玲, 陈尧明. 液压与气压传动[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2007: 18—19.
XU F L, CHEN Y M. Hydraulic and pneumatic transmission [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2007: 18—19. (in Chinese)
- [18] VANDAELE V, LAMBERT P, DELCHAMBRE A. Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation [J]. Precision Engineering, 2005, 29(4): 491—505.
- [19] LI X, KAGAWA T. Theoretical and experimental study of factors affecting the suction force of a Bernoulli gripper [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2014, 140(9): 04014066.
- [20] 叶骞, 吴琼. 基于 CFD 的旋流非接触吸盘仿真与优化[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(9): 1256—1262.
YE Q, WU Q. Research on non-contact swirl sucker based on CFD and orthogonal test [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2011, 45(9): 1256—1262. (in Chinese)
- [21] SHI K G, LI X. Experimental and theoretical study of dynamic characteristics of Bernoulli gripper [J]. Precision Engineering, 2018, 52: 323—331.