

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413400

晶圆校准器吸盘动力学建模与残余振动优化

刘瞰东¹, 唐之晨¹, 王若宇¹, 陈锺琰¹, 刘长胜²

(1. 厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院 厦门 361102; 2. 厦门烟草工业有限责任公司 厦门 361022)

摘要:晶圆校准器是确保晶圆在加工过程实现精准定位的重要设备,其定位精度易受晶圆校准器吸盘高速旋转启停时加速度突变产生的残余振动影响。为解决这一问题,首先分析了晶圆校准器吸盘表面的接触特性,建立晶圆校准器吸盘动力学数学模型,通过仿真求解运动过程中晶圆与晶圆校准器吸盘的接触状态和形变情况。在此基础上,引入系统真空度与最大旋转速度、最大旋转加速度,获得在不同加加速度作用下晶圆的振幅与模式,求解加速度约束方程,进而利用三阶 Bezier 曲线构造对称的晶圆校准器速度曲线。同时,针对晶圆校准器电机在加速阶段与减速阶段的特性差异,基于 Pareto 多目标遗传算法优化对称速度曲线参数,构造非对称速度曲线,进一步抑制晶圆校准器吸盘的残余振动,提高晶圆校准器的定位精度和工作效率。最后,通过仿真实验验证了非对称速度曲线在工作效率上的改进;同时搭建了晶圆校准器实物装置,设计实物实验验证其相对于传统的速度曲线在定位精度和工作效率上的提升。实验结果表明:本文设计的非对称速度曲线充分考虑晶圆校准器吸盘动力学特性,与传统的速度曲线相比,可以有效减小吸盘残余振动,将校准器的定位精度提高至 0.008 mm,缩短工作时间 0.14 s,验证本文所提方法有效。

关键词: 晶圆校准器;动力学建模;残余振动优化

中图分类号: TH162 TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.30 510.80

Dynamic modeling and residual vibration optimization of wafer alignment chuck

Liu Tundong¹, Tang Zhichen¹, Wang Ruoyu¹, Chen Zengyan¹, Liu Changsheng²

(1. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China;
2. Xiamen Tobacco Industrial Co., Ltd, Xiamen 361022, China)

Abstract: Wafer alignment is a critical process in ensuring precise positioning of wafers during manufacturing. However, its positioning accuracy is often compromised by residual vibrations caused by sudden changes in acceleration during the high-speed start and stop phases of the chuck. To address this challenge, this study first analyzes the contact characteristics of the chuck surface, develops a mathematical dynamic model for the wafer alignment chuck, and simulates the contact interactions and deformation between the wafer and chuck during motion. Based on this analysis, the relationship between the system's vacuum level, maximum rotational speed, and maximum rotational acceleration is explored to determine the wafer's amplitude and mode under various acceleration conditions. An acceleration constraint equation is derived, and a symmetric velocity curve for the wafer alignment is constructed using a third-order Bezier curve. Additionally, accounting for motor characteristic variations during acceleration and deceleration phases, the parameters of the symmetric velocity curve are optimized using a Pareto multi-objective genetic algorithm to create an asymmetric velocity curve. This approach helps to further suppress residual vibrations of the chuck, thereby enhancing positioning accuracy and operational efficiency. Simulation experiments confirm the improvement in operational efficiency with the proposed asymmetric velocity curve. A physical wafer alignment device is also built, and physical experiments demonstrate enhanced positioning accuracy and operational efficiency compared to traditional velocity curves. The experimental results show that the asymmetric velocity curve, which accounts for the dynamic characteristics of the chuck, effectively reduces residual vibrations, improving alignment accuracy to 0.008 mm and reducing operation time by 0.14 s. These findings validate the effectiveness of the proposed method in improving wafer alignment performance.

Keywords: wafer alignment; dynamic modeling; residual vibration optimization

0 引言

晶圆校准器是晶圆检测设备的关键核心部件,其功能是对晶圆的中心位置及缺口方位进行精确定位^[1-3]。晶圆校准器吸盘的旋转运动稳定性是精准定位的重要保障。在高速旋转启停时吸盘的加速度突变会致使其产生残余振动,影响晶圆校准器的定位精度^[4]。因此,有效抑制吸盘的残余振动,对于提升晶圆校准器的定位精度至关重要。

现有抑制残余振动的方法可分为输入整形技术与速度曲线规划^[5-8]。其中,输入整形技术适用于确定性系统,通过精确获取系统模态参数,并设计整形器对输入信号进行调整,实现对振动的有效抑制^[9]。然而,晶圆校准器吸盘需适配不同尺寸晶圆,具有不确定性,故模态参数难以精确获取,因此输入整形技术在晶圆校准器上应用受限。速度曲线规划方法通过精细控制运动过程中的加速度变化,更适合校准器吸盘的残余振动抑制。目前,速度曲线规划的研究聚焦于对称S型速度曲线及其相关研究,以提升残余振动优化效果。Meckl等^[10]通过分析强制函数输入来优化对称S形速度曲线参数;Biagiotti等^[11]通过3个滤波器对阶跃信号输入进行卷积以获取对称S型速度曲线。应当指出的是,利用合适的对称S型速度曲线可有效抑制残余振动,但这类方法通常会导致整体运动时间的增加。

为解决抑制残余振动与提高工作效率之间的平衡,近年来研究者们积极探索非对称速度曲线设计,以解决对称S型速度曲线中存在的加速度冗余问题。Rew等^[12]提出了一种新颖的非对称S型速度曲线设计策略,通过调整各阶段加速度比例,满足所有运动距离上的优化。Ha等^[13-15]在Rew的基础上,面向弱阻尼柔性伺服系统构建非对称S型速度曲线,运用拉普拉斯域方法将抑制效果提升至零振动。此外, Lee等^[16]从多项式函数着手,设计了一种考虑移动距离与制动器能力的速度曲线,最大限度减少残余振动。然而,上述研究通过非对称设计有效提升了运行速度,但其优化过程仅仅依赖划分速度区间的差异性,尚未充分考虑运动过程中的动力学变化。因此,这些方法在提升速度方面仍具备进一步优化的潜力。

综上,针对晶圆校准器的旋转定位运动开展研究,充分考虑晶圆与吸盘间接触特性受真空吸附力与加速度变化影响,建立吸盘动力学模型,并求解运动过程中的加速度约束方程。同时利用晶圆校准器吸盘在加速及减速阶段的特性差异,设计基于Bezier曲线的对称速度曲线,减小吸盘高速旋转启停时产生的残余振动,并最小化运动时间。此外,利用Pareto多目标遗传算法优化速度曲线

参数,构建非对称速度曲线,平衡定位精度与效率两个目标,进一步减小吸盘振动。最后,通过实验验证所设计的速度曲线在提升晶圆校准器定位精度和运行速度方面的有效性。

1 晶圆校准器吸盘动力学建模

晶圆校准器的工作流程可概括为两个主要阶段:初始阶段,吸盘吸附并旋转晶圆片,利用激光传感器检测晶圆的边缘数据;校准阶段,根据收集到的检测数据重新定位晶圆缺口和中心点至指定位置,完成校准。在整个过程中,旋转动作占据了大部分的校准时间,而全程只有吸盘与晶圆保持直接接触。因此对于晶圆校准器的动力学分析主要集中于吸盘的动力学建模。

1.1 吸盘表面接触特性分析

吸盘与晶圆摩擦接触特性对于精确评估界面摩擦作用及其对晶圆变形的动力学影响至关重要。在工作状态中,晶圆与吸盘之间的接触除了受到接触力的作用外,还受到真空吸附力的影响。因此,本节结合真空吸附力,通过经典的弹性接触理论,分析吸盘与晶圆之间的表面接触特性。

在吸附区域施加较大的真空吸附力会产生应力集中。根据Hertz接触理论,若在吸盘与晶圆之间产生应力集中,应力集中区域可等效为各向同性的圆柱体和各向同性的平面接触^[17],可以计算出接触面上的压力分布公式为:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{I} \sqrt[3]{\frac{48F}{R_k^2}} \\ I = 2\pi k^{\frac{2}{3}}, k = \frac{1-v_k^2}{E_s} + \frac{1-v^2}{E} \end{cases} \quad (1)$$

其中, F 为真空吸附力, R_k 为有效接触半径, E_s 、 v_k 为吸盘材料的弹性模量和泊松比, E 、 v 为晶圆材料的弹性模量和泊松比。

根据式(1)可以看出,为避免应力集中,应尽量增大接触面积。在一定吸附力作用下,真空吸附区域晶圆受力均匀,不会发生应力集中。同时在同样的真空度的情况下,真空吸附力会随面积的增大而增大,要尽量避免较大的悬空缺口,避免造成集中应力。因此吸盘设计如图1所示。

采取多道较细的真空槽,避免面积过大导致真空吸附力过大造成应力集中。同时在槽边缘设置倒角,增大接触面积。

1.2 吸盘动力学数学模型

吸盘在带动晶圆运动过程中高速旋转,可以视为转子模型。转子动力学的建模现一般采用有限元模型,将



图 1 晶圆吸盘模型
Fig. 1 Wafer chuck model

转子分成很小的微元,根据功能原理,推导得到微元的质量、阻尼和刚度矩阵,然后将所有微元的矩阵组装,得到整个转子的质量矩阵 M 、阻尼矩阵 C 、刚度矩阵 K 和力矩矩阵 F ,按照一般动力学方程(式(2)),采用 Newmark- β 法求解动力学方程,即可得到转子的固有频率、临界转速、静态变形和动态响应等。

$$M\ddot{\delta}(t) + C\dot{\delta}(t) + K\delta(t) = F(t) \quad (2)$$

动力学方程求解的难点是数学模型的建立,即质量矩阵 M 、阻尼矩阵 C 、刚度矩阵 K 和力矩矩阵 F 参数的计算。在吸盘与晶圆系统中,假设两者之间在运动过程中在真空吸附力的作用下,不会发生滑动,则将晶圆视为圆盘部分,做刚体处理,吸盘及其下与电机转子连接的部分视为轴段,应用连续梁理论推导其运动微分方程。

采用 Timoshenko 梁理论,将轴段离散为多个单元^[18]。每个单元都有两个结点,每个结点有两个平移自由度和两个旋转自由度,每个单元的位移向量表示为:

$$\vec{q}_e = (x_i, y_i, \psi_i, \theta_i, x_{i+1}, y_{i+1}, \psi_{i+1}, \theta_{i+1}) \quad (3)$$

则轴段的运动方程可以表示成:

$$(M_{Te} + M_{Re})\ddot{\delta}(t) + (C_e - \Omega G_e)\dot{\delta}(t) + K_e\delta(t) = F_d(t) \quad (4)$$

其中, M_{Te} 和 M_{Re} 分别代表轴单元的平动质量矩阵和转动质量矩阵, K_e 、 C_e 和 G_e 分别代表轴单元的刚度、阻尼和矩阵。

而对于晶圆的有限元模型,由于其厚度可以忽略不计,可假设其为均匀刚体,刚性的晶圆动力学方程为:

$$M_d\ddot{\delta}(t) - G_d\delta(t) = F_d(t) \quad (5)$$

其中, M_d 和 G_d 分别表示质量矩阵和陀螺矩阵。

因此对于具有 n 个单元的转子系统,将各单元组合后可得系统的运动学方程:

$$M\ddot{\delta}(t) + C\dot{\delta}(t) + \Omega G\delta(t) + K\delta(t) = F(t) \quad (6)$$

其中, M 、 C 、 G 、 K 分别代表系统的质量矩阵、阻尼矩阵、陀螺矩阵和刚度矩阵。

1.3 吸盘动力学仿真

建立吸盘与晶圆动力学模型,考虑到晶圆与吸盘的细节结构与接触情况,在网格划分前对晶圆表面进行区域划分,保证后续真空吸附力的施加。

同时考虑到晶圆的各向异性与模型的可靠性,在网格划分过程主要考虑网格的雅可比系数。如图 2 中所示,网格划分呈圆周均匀分布,同时各向雅可比系数均接近 1,单元模拟可靠。

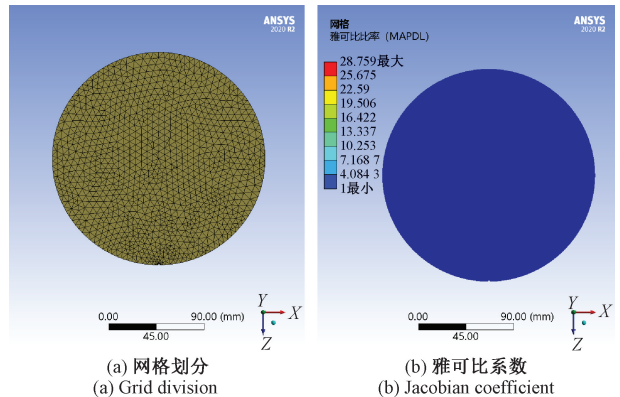


图 2 动力学模型网格划分与雅可比系数

Fig. 2 Grid discretization and Jacobian coefficients of the dynamic model

在网格划分的基础上,对上一节中求解的吸盘与晶圆静态接触情况进行分析与验证。选取 8 英寸晶圆片作为分析对象,控制真空度从 0~-100 kpa 变化。分析晶圆上的等效应力与变形情况,如图 3 所示。

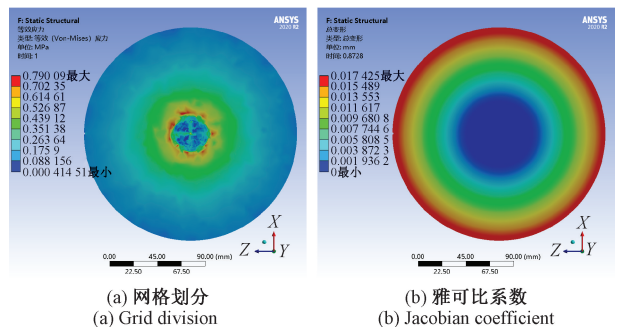


图 3 晶圆片等效应力与变形

Fig. 3 Equivalent stress and deformation of wafer

从图 3 中可以看出:如式(1)计算得到的结果,应力主要集中在中心最大的气孔处,不会使晶圆片产生较大的变形。主要变形由重力产生,集中在晶圆片的边缘位置,最大为 0.018 mm,在校准的过程中不会对校准精度产生较大影响。等效应力分析结果与上一节中理论推导结果一致,验证模型可靠性。

在运动过程中,受到加速度影响,吸盘上同样存在一定的应变。如图4所示,在运动过程中,吸盘与晶圆接触面受到静摩擦力影响,表面产生应变。

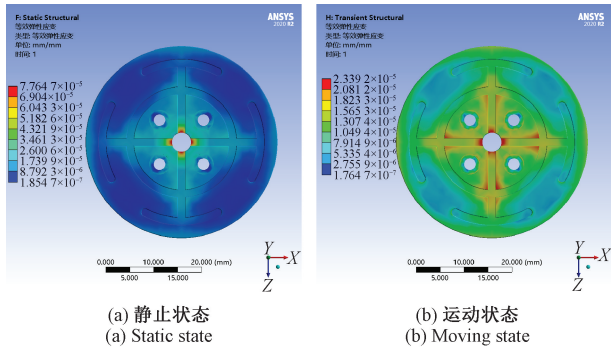


图4 吸盘静止、运动状态等效应变

Fig. 4 Equivalent strain of chuck in static and moving states

基于转子动力学理论,吸盘在旋转过程中会出现一定的形变,在施加加速度时,吸盘表面与晶圆之间在微观层面上产生形变。在加速度变化后,由加速度产生的形变受到材料弹性的影响,同样会对整个系统的振动情况产生影响。因此在对吸盘运动振动分析时,以摩擦滑动状态求解吸盘与晶圆之间的接触表面。

2 非对称速度曲线的残余振动优化

2.1 吸盘加速度变化与残余振动

对吸盘与晶圆之间接触时的受力进行分析,设吸盘与晶圆之间的静摩擦系数为 μ ,系统相对大气压的真空度为 p ,有效真空吸附面积为 $s=380\text{ mm}^2$,晶圆自身重力为 G ,因此根据库伦摩擦定律有:

$$F_f = 3.27 \times 10^{-4} \times \mu p + \mu G \quad (7)$$

在校准过程中,允许的最大偏心距离为10 mm,晶圆可以等效为一个质量分布均匀的圆柱体,根据 SEMI 标准,8英寸单晶硅晶圆质量为0.05 kg,吸盘与晶圆之间摩擦系数取0.3,额定真空度为-60 kPa,计算可得:

$$F_f = 3.80 \times 10^{-4} \times \mu p + \mu G = 5.98\text{ N} \quad (8)$$

根据离心力公式:

$$F = m\omega_f^2 r = 0.05 \times \omega_f^2 \times 0.01 = F_f \quad (9)$$

代入最大偏心距离10 mm 计算,可得最快旋转速度为109 rad/s。

由于校准旋转过程行程较短,因此远远超出工作过程中的最快旋转速度,假设以全程保持最大加速度所能达到的速度作为最大速度,以旋转电机最大加速度 100 rad/s^2 、最大行程 $4\pi\text{ rad}$ 、启停速度 0 rad/s 计算:

$$\omega_{\max} \times \left(\frac{\omega_{\max}}{\alpha_{\max}} \times 2 \right) \div 2 = S = 4\pi \quad (10)$$

求得最大速度为 35.45 rad/s ,远小于最快旋转速度。同时以最大加速度加速过程中,摩擦力同样满足旋转受力需求,晶圆片不会发生滑移。因此,在正常工作真空度下,无需考虑旋转过程出现的滑移情况,仅仅需要分析在加速度突变时产生的过程冲击与停止时的残余振动。

加速度的跃变会产生剧烈的冲击与残余振动,过去的很多方法中都已经考虑到了这个问题^[19-20],并对其进行优化。本文主要分析连续变化加速度产生的振动影响,对于精度的主要影响是振动幅度,因此利用振动幅度评估振动的强弱。通过 ANSYS 求解不同加加速度(加速度的导数)状态下的振幅,如表1所示。

表1 不同加加速度下的振幅

Table 1 Amplitude under different accelerations

加加速度/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-3})$	振幅/mm
10	0.001
50	0.003
100	0.005
150	0.008
200	0.012
300	0.016
400	0.021
500	0.026

从表1中可以看出,吸盘与晶圆的振动幅度与加加速度值呈线性关系,对表中函数进行拟合求解可以得到在该系统中,加加速度 j 与振幅 A 的约束方程为:

$$A = 1 \times 10^{-3} \times (0.052j + 0.49) \quad (11)$$

因为校准器的重复精度为 $\pm 0.025\text{ mm}$,在检测过程中同样会存在一定的误差,因此应将运动过程中产生的过冲与残余振动约束在0.01 mm内。

2.2 吸盘对称速度曲线构建

相比于目前常见的通过简单的加速度限制的方法构建的速度曲线,使用5次Bezier曲线构建的速度曲线更加平滑^[21]。在构建非对称速度曲线前,先通过3次Bezier曲线构建对称的速度曲线。

Bezier曲线是一种基于控制点构造的曲线,其 n 次Bezier曲线公式如式(12)所示。

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i, t \in [0,1] \quad (12)$$

其中, P_i 是曲线的控制点, t 为将曲线参数化分解为从0到1的连续点。

以Bezier曲线作为加速阶段速度曲线与减速阶段速度曲线,为了使整体速度曲线平滑,减少残余振动,因此

要求曲线是连续的,且加速度连续。对于对称速度曲线,三次 Bezier 曲线即可满足构造需求。

假设吸盘的运动从完全静止开始,并在完全静止停止。曲线需要满足起点和终点的速度、加速度为 0,且在直线段连接处加速度为 0。同时,以工作时间与晶圆残余振动作为目标函数,优化速度曲线参数。

目前式(12)考虑 3 个优化设计变量。第 1 个变量 x_1 是加速时间,第 2 个变量 x_2 是最大速度,第 3 个 x_3 是控制点比率。三次 Bezier 曲线由 4 个控制点组成。约束点 P_1 、 P_2 、 P_3 和 P_4 , x_1 对应于 P_4 的 x 坐标, x_2 对应于 P_4 的 y 坐标。因此, x_3 是 P_1 的 x 坐标与 P_4 的 x 坐标之比。

第 1 个优化目标为最小化残余振动。残余振动受到速度曲线的加加速度的影响,因此,速度曲线的加加速度应尽量小。通过对称速度曲线特性可知,为确保时间最短,根据式(12),最大加加速度位于 $t=0.5$ 处,以此处划分加加速度的增减。因此通过使用链式法则对速度曲线方程进行微分计算加加速度导数,最大加加速度为:

$$f_1 = \frac{50\sqrt{5}x_2x_3\sqrt{(1-3x_3)(x_3-1)}}{81x_1^2(1-3x_3)(x_3-1)^3} \quad (13)$$

第 2 个优化目标为最小化工作时间。由于对称 Bezier 轮廓面积的计算与计算梯形轮廓的面积相同,因此式(14)通过将速度轮廓面积除以最大速度值来获得工作时间,工作时间为:

$$f_2 = x_1 + \frac{S}{x_2} \quad (14)$$

其中, S 是吸盘的运动行程,为了准确规定 S ,需对速度曲线的面积进行约束,根据 Bezier 曲线面积公式:

$$x_1x_2 - S \leq 0 \quad (15)$$

当吸盘达到最大速度时,设计变量 x_1 的上界应大于时间参数 t_c ,因此 x_2 的上界应为曲线的最大速度。考虑吸盘的最大转速及式(14)有实数解,求得变量范围为:

$$\begin{cases} t_c \leq x_1 \leq 2.5t_c \\ \frac{S}{2 \times 2.5t_c} \leq x_2 \leq v_{\max} \\ \frac{3}{8} \leq x_3 \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

因此完整的速度曲线可以表示为两段三次 Bezier 曲线与一段直线段拼接成的线段,可表示为:

$$p_i(t) = [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.3 基于 Pareto 多目标遗传算法的残余振动优化

为了最大限度减小残余振动和工作时间多目标权衡优化,本文提出了基于 Pareto 多目标遗传算法的优化策略。伪代码如算法 1 所示。

算法 1: Pareto 多目标遗传算法

输入 目标函数集合 f_1, f_2 , 解空间 S 。

输出 Pareto 最优解集合 P 。

初始化空的 Pareto 前沿集合 P ;

While($s_1 \in S$)

 设置 s_1 被支配标志为 false;

While($s_2 \in S$)

If ($s_2 \in S$, 且 $s_1 \neq s_2, s_2$ 支配 s_1)

 将 s_1 的被支配标志设为 true;

 跳出子循环;

End

If(s_1 的被支配标志为 false)

 将 s_1 添加到 Pareto 最优解集合 P ;

End

返回 Pareto 最优解集合 P

基于 2.1 节中结论,以残余振动作为优化目标转化为以最小加加速度作为优化目标,同时以工作时间作为第 2 个优化目标。

在电机运动的加速阶段和减速阶段,由于步进电机的特性,在减速过程由于转子惯性的存在,相比与加速阶段,更容易出现精度损失。同时在减速阶段停止时,加速度变化也更易发生残余振动,因此减速阶段的加加速度应小于加速阶段。基于这个特性,应考虑在加速过程中尽快将速度加速到最大速度,减少整体工作时间,同时降低减速阶段的及速度变化,减小残余振动。

优化策略通过限制设计变量的范围以避免计算出不可行解来实现的。由于三次 Bezier 曲线是凸曲线,优化可以相对直观地实现。在 Pareto 最优解集合中,由于目标函数之间的权衡关系,不可能找到同时满足所有目标的最优单一解,每个 Pareto 最优解集合中的最优点都是等水平解。求单点最常用的方法是在 Pareto 最优解的极值点 p_1 和 p_2 上画 $L(p_1, p_2)$ 的边界线,帕累托最优点(p_c)是与这条直线距离最大的点^[22]。

根据 1.3 节中的动力学模型分析,减速阶段受到摩擦力方向与电机特性的影响, $jerk_{\max-m} = 182.11 \text{ rad/s}^3$, 通过动力学分析,可以得到在不同的速度影响下,相同振幅情况下加加速度与速度呈反相关。由于加速阶段与减速阶段的电机运动差异,放大加速阶段的加加速度为减速阶段的 1.1 倍,即 $jerk_{\max-a} = 200.32 \text{ rad/s}^3$ 。

以2.2节中求解得到的2个目标函数作为算法的目标函数,以变量约束空间作为解空间 S ,求解得到 Pareto 最优解集合 P 。选取距离边界线最远的点 P_0 为最优解,构建速度曲线如图5所示。

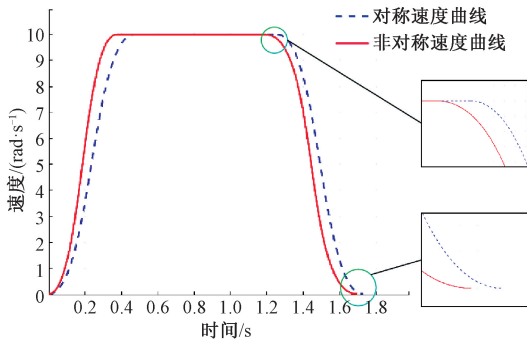


图5 优化前后的速度曲线对比

Fig. 5 Comparison of speed curves before and after optimization

图5中实线线段为优化后的速度曲线,双划线条段为优化前的速度曲线。优化后的速度曲线更早开始减速阶段,从而使得其在停止时更加平稳,残余振动更小。优化前后各阶段时间对比如表2所示。

表2 优化前后各阶段时间对比

Table 2 Comparison of time between each stage before and after optimization

	总时间/ s	加速时间/ s	减速时间/ s	最大加加速度/ (rad·s ⁻²)
优化前	1.72	0.47	0.47	182
优化后	1.69	0.37	0.6	200

从表2中可以看出,优化后的速度曲线允许在加速阶段超过最大加速度限制,缩短加速时间。同时优化前后总时间几乎不变,而优化后的减速时间增加到0.6 s,增长0.23 s,最大化抑制减速阶段的残余振动。通过上述非对称速度曲线,可以将晶圆吸盘的残余振动限制在0.01 mm内,同时工作时间保持不变。

3 实验验证

3.1 速度曲线仿真

为了验证所提出的非对称速度曲线在时间上的优越性,本文使用常用的基于 Sigmoid 函数的 S 型速度曲线与提出的非对称速度曲线对不同行程进行仿真分析。通过规定总行程与各项参数,计算规划生成的速度曲线,对比用时。

Sigmoid 函数曲线基础方程为:

$$V(t) = \frac{1}{1 + e^{-t}} \quad (18)$$

其加速度方程为:

$$A(t) = \frac{e^{-t}}{(1 + e^{-t})^2} \quad (19)$$

带入最大速度 10 rad/s,最大加速度 100 rad/s² 最大加加速度 $jerk_{max} = 182.11 \text{ rad/s}^3$,根据晶圆校准器的工作特性,从 $0.2\pi \text{ rad}$ 到 $4\pi \text{ rad}$ 的行程区间,以 $0.2\pi \text{ rad}$ 为间隔计算求解不同行程下不同速度曲线所消耗的时间,如表3所示。

表3 速度曲线用时对比

Table 3 Comparison of speed curve time

行程/rad	基于 Sigmoid 函数的 S 型 速度曲线消耗时间/s	非对称速度曲线 消耗时间/s
0.2π	0.551	0.548
0.4π	0.695	0.661
0.6π	0.795	0.728
0.8π	0.875	0.799
π	0.943	0.857
1.2π	1.002	0.908
1.4π	1.055	0.941
1.6π	1.103	0.982
1.8π	1.147	1.013
2π	1.206	1.062
2.2π	1.269	1.130
2.4π	1.331	1.192
2.6π	1.394	1.253
2.8π	1.457	1.316
3π	1.520	1.379
3.2π	1.583	1.443
3.4π	1.646	1.506
3.6π	1.708	1.567
3.8π	1.771	1.630
4π	1.834	1.694

从表3中可以看出,两种曲线在行程较短的时候,时间差距不大,随着行程增长,本文提出的非对称速度曲线与基于 Sigmoid 函数的 S 型速度曲线用时差逐渐增大,且这个差值在行程达到 $2\pi \text{ rad}$ 时达到峰值,而后保持在 0.14 s 不变。这是由于限制了最大速度为 10 rad/s,在行程达到 $2\pi \text{ rad}$ 后两条速度曲线均有一段匀速工作的阶段,主要的用时差在加速阶段和减速阶段,因此用时差距没有变化。

从上述分析可以看出,随着最大速度的提高,本文设计的非对称速度曲线相比传统的速度曲线有着显著优势,可以很好的减少工作时间,提高工作效率。

3.2 残余振动优化实验

在效率分析的基础上,为了验证所提出的非对称速度曲线的有效性,本文采用高精度光学传感器采样晶圆片边缘信息,控制晶圆缺口位置旋转至传感器检测范围内。实验中使用的晶圆校准器装置如图 6 所示。

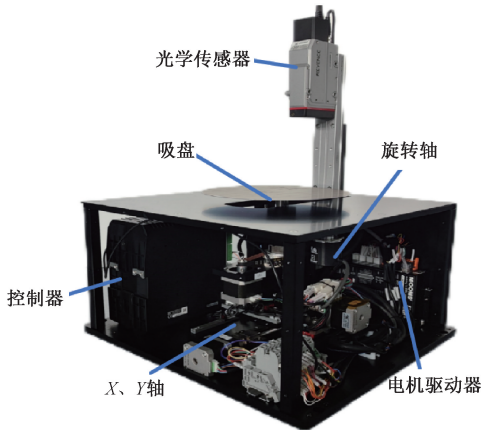


图 6 晶圆校准器装置
Fig. 6 Wafer calibrator device

图 6 中,每次测试旋转 2 周,通过前后缺口位置差作为运动定位精度数据。

为了便于对比,同时测试梯形速度曲线、基于 Sigmoid 函数的 S 型速度曲线两种曲线的定位精度,进行 30 次重复试验并对运动定位精度结果进行统计分析。

校准器工作原理如图 7 所示。采用标准 8 英寸晶圆片进行测试,缺口宽度为 0.5 mm。在工作过程中,吸盘带动晶圆片旋转,边缘会遮挡检测区域光路,实现边缘信息的检测。光学传感器光路宽度为 4 mm,检测精度为 2 μm,满足实验需要。

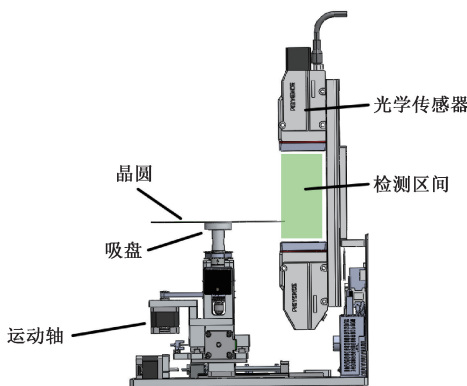


图 7 校准器工作原理
Fig. 7 Working principle of calibrator

实验分为以下 3 个步骤:

- 1) 调整晶圆缺口在传感器中心,记录当前位置;
- 2) 旋转轴按指定速度曲线方式运动 2 周,记录结束后的位置;
- 3) 重复检测每种速度曲线 30 次,平均每次开始位置与结束位置的差值,得到速度曲线的定位精度。

3.3 实验结果分析

为保证晶圆不会产生滑移,选择额定真空度 -60 kPa,由上文中计算结果,取旋转电机最大加速度为 100 rad/s²,由于在实际应用中旋转距离较小,因此取最大速度为 10 rad/s。带入总行程 2 周计算,得到 3 种速度曲线如图 8 所示。

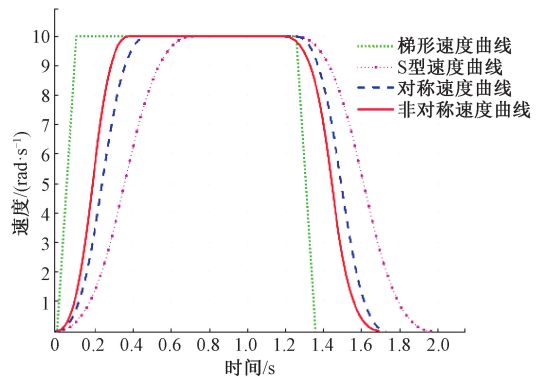


图 8 4 种速度曲线示意
Fig. 8 Schematic diagram of four speed curves

图 8 中,虚线为梯形速度曲线,点划线为基于 Sigmoid 函数的 S 型速度曲线,双划线为本文提出的基于动力学分析的对称速度曲线,实线为优化后的非对称速度曲线。

将 4 种速度曲线转化为电机脉冲型号,通过晶圆校准器装置进行重复试验,如表 4 所示。

表 4 4 种速度曲线重复试验定位精度
Table 4 Four types of speed curve repeated test positioning accuracy

	工作时间/s	平均偏差/mm	最大偏差/mm
梯形速度曲线	1.36	0.095	0.117
S 型速度曲线	1.83	0.008	0.010
对称速度曲线	1.72	0.019	0.023
非对称速度曲线	1.69	0.008	0.011

从表 4 结果中可知,梯形速度曲线虽然是最快的,但停止时的残余振动会造成较大的偏差,严重影响定位精度。基于 Sigmoid 函数的 S 型速度曲线平均偏差值最小,但用时较长,行程越短相对时间消耗的越多。本文提出

的基于动力学分析的对称速度曲线在时间上相较于S型速度曲线提高了0.11 s,平均偏差与S型速度曲线接近。通过遗传算法优化后构建的非对称速度曲线在减速阶段曲线接近S型速度曲线,偏差控制在0.01 mm以下,十分接近S型速度曲线的偏差结果。

综上所述,本文研究的速度曲线很好地改进了传统S型速度曲线存在的工最快旋转速度作时间长的问题,同时有效地抑制了校准器残余振动。同时,通过多次重复试验证明了该速度曲线的鲁棒性。

4 结 论

针对晶圆校准器高速旋转启停时产生的残余振动问题,本文提出一种基于动力学分析的非对称速度曲线。通过动力学仿真分析求解晶圆被校准器吸盘吸附运动过程中受加速度变化影响的振幅,得到加速度与加加速度的约束方程,进而构造对称的速度曲线。接着基于电机特性,调整速度曲线加速阶段与减速阶段的约束方程,通过pareto遗传算法,筛选得到最优的目标速度曲线。通过速度曲线效率分析,得到本文提出的速度曲线随着最大速度的提高,在时间方面较传统速度曲线有较大优势。最后,通过定位精度试验,测试了本文提出的速度曲线在性能上接近传统的S型速度曲线,在工作时间上有一定提升,同时具有较好的鲁棒性。因此本文提出非对称速度曲线可以有效优化晶圆校准器运动的残余振动,缩短工作时间,具有较好的实用性。

参考文献

[1] 刘瞰东,黄智斌,高凤强,等. LCD面板C/FOG工艺制造虚拟计量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2024,45(1):16-25.
LIU T D, HUANG ZH B, GAO F Q, et al. Research on virtual metrology method for LCD panel C/FOG process manufacturing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(1):16-25.

[2] 鲁沛昕,杨开明,鲁森,等. 用于晶圆键合的对准标记定位算法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(11):220-229.
LU P X, YANG K M, LU S, et al. A high-precision positioning algorithm of alignment mark for wafer bonding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42(11):220-229.

[3] 李阳,蒋三新. 基于改进生成对抗网络的无监督晶圆缺陷检测[J]. 电子测量技术,2023,46(6):91-99.
LI Y, JIANG S X. Unsupervised wafer defect detection based on improved generative adversarial network[J]. Electronic Measurement Technology, 2023,46(6):91-99.

[4] 刘瞰东,陈程琰,王若宇,等. 晶圆校准器误差补偿与拟合算法的研究[J]. 计量学报,2024,45(8):1115-1124.
LIU T D, CHEN Z Y, WANG R Y, et al. Research on error compensation and fitting algorithms of wafer alignment calibrator[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024,45(8):1115-1124.

[5] 王龙达,王兴成,刘罡,等. 城市轨道交通列车速度曲线预测函数控制改进算法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(2):273-283.
WANG L D, WANG X CH, LIU G, et al. An improved predictive function control algorithm for velocity curve of urban rail vehicle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(2):273-283.

[6] XU J Y, HU H, LEI Y L, et al. A wafer prealignment algorithm based on fourier transform and least square regression[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017,14(4):1771-1777.

[7] SHI M M, RONG B, LIANG J, et al. Dynamics analysis and vibration suppression of a spatial rigid-flexible link manipulator based on transfer matrix method of multibody system[J]. Nonlinear Dynamics, 2023,111(2):1139-1159.

[8] 黄云志,翟丽文,吴晨,等. 面向强周期振动干扰的涡街流量计系统研制[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(8):105-112.
HUANG Y ZH, ZHAI L W, WU CH, et al. Development of vortex flowmeter system for strong periodic vibration interference[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(8):105-112.

[9] HUANG J S, HU P F, WU K Y, et al. Optimal time-jerk trajectory planning for industrial robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018,121:530-544.

[10] MECKL P H, ARESTIDES P B. Optimized s-curve motion profiles for minimum residual vibration[C]. Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 1998:2627-2631.

[11] BIAGIOTTI L, MELCHIORRI C, MORIELLO L. Damped harmonic smoother for trajectory planning and vibration suppression[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018,28(2):626-634.

[12] REW K H, KIM K S. A closed-form solution to asymmetric motion profile allowing acceleration manipulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009,57(7):2499-2506.

[13] HA CH W, REW K H, KIM K S. Robust zero placement for motion control of lightly damped systems[J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(9): 3857-3864.
- [14] HA CH W, LEE D. Analysis of embedded prefilters in motion profiles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(2):1481-1489.
- [15] HA C W, LEE D. Optimal placement of inherent zeros in polynomial-based motion profiles for minimizing residual vibration and travel time under system uncertainties[J]. ISA Transactions, 2024, 152:467-476.
- [16] LEE D, HA CH W. Optimization process for polynomial motion profiles to achieve fast movement with low vibration[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(5):1892-1901.
- [17] 崔江. 含不确定参数多体系统的动力学分析方法及应用[D]. 北京:清华大学,2021.
CUI J. The dynamical analysis method and its application for the multibody system with uncertain parameters[D]. Beijing:Tsinghua University, 2021.
- [18] YU ZH T, ZHANG L, KIM J. The performance analysis of PSO-ResNet for the fault diagnosis of vibration signals based on the pipeline robot[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4289.
- [19] HAMEURY C, FERRARI G, BUABDULLA A, et al. Multiple-input multiple-output active vibration control of a composite sandwich beam by fractional order positive position feedback[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 200:110633.
- [20] 余东生,于震,田江平. 基于空耦超声激励的微结构模态频率温度特性研究[J]. 国外电子测量技术,2024, 43(6):127-133.
SHE D SH, YU ZH, TIAN J P. Study on temperature dependence of modal frequencies for microstructures based on air-coupled ultrasonic excitation[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024,43(6):127-133.
- [21] GONZÁLEZ D, MILANÉS V, PÉREZ J, et al. Speed profile generation based on quintic Bézier curves for enhanced passenger comfort[C]. Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2016:814-819.
- [22] YUAN Y, ONG Y S, GUPTA A, et al. Objective reduction in many-objective optimization: Evolutionary multiobjective approaches and comprehensive analysis[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2017, 22(2):189-210.

作者简介



刘瞰东,2003年于中国科学技术大学获得博士学位,现为厦门大学教授、博士生导师,主要研究方向为工业机器人及机器视觉技术。

E-mail:ltd@xmu.edu.cn

Liu Tundong received his Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2003. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Xiamen University. His main research interests include industrial robots control, machine vision and so on.



刘长胜(通信作者),2009年于吉林大学获得学士学位,2012年于吉林大学获得硕士学位,现为厦门烟草工业有限责任公司工程师,主要研究方向为精密机械设计。

E-mail:357769522@qq.com

Liu Changsheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University in 2009, and M. Sc. degree from from Jilin University in 2012. He is currently an engineer at Xiamen Tobacco Industrial Co., Ltd. His main research direction is precision mechanical design.