

DOI: 10.3901/JME.2008.09.123

## 晶圆对心转台亚微米级径跳误差补偿方法\*

黄春霞 曹其新 付 庄 冷春涛

(上海交通大学振动冲击噪声国家重点实验室 上海 200240)

**摘要:** 为了消除转台径跳误差对晶圆预对准台重复性定位精度的影响, 提出径跳误差的在线检测与补偿方法。转台上方并与之一起旋转的心轴作为转台径跳的检测元件, 电涡流传感器测量心轴径向距离, 其测量值由固定误差和径跳误差组成, 借助集合平均法或者转台径跳特性, 离线求解固定误差, 据此在线工作时从电涡流传感器数据中分离出径跳误差。利用该误差对激光位移传感器检测的晶圆边缘数据进行径跳误差补偿, 分析误差特性, 据此简化补偿算法。试验证明, 径跳误差补偿方法的使用提高了系统的预对准精度, 并最终使系统达到了微米级的定位精度要求。

**关键词:** 晶圆预对准台 电涡流传感器 径向跳动误差 误差补偿

**中图分类号:** TG156

## Submicron Radial Runout Error Compensation Method for the Turntable in a Wafer Prealigner

HUANG Chunxia CAO Qixin FU Zhuang LENG Chuntao

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**Abstract:** In order to eliminate the influence of the radial runout error of the turntable on the prealignment precision of a wafer prealigner, an on-line detection and compensation method for the error is proposed. The mandrel above and rotating along with the turntable is taken as the detecting component of the radial runout, and the radial distance of the mandrel is detected by a vortex sensor. The sensor's measurement value consists of fixed error and radial runout error, the former is solved off-line by means of ensemble average method or radial runout features of the turntable, based on which the radial runout error is separated from the data of the vortex sensor when working on-line. The radial runout error is used to compensate the peripheral data of the wafer detected by a laser displacement sensor with the compensation method simplified according to the error features. The experimentation has proved that the use of the radial runout compensation method has improved the prealignment precision of the system and made it meet the requirement of micron positioning precision.

**Key words:** Wafer prealigner Vortex sensor Radial runout error Error compensation

### 0 前言

晶圆预对准台是晶圆进入光刻以前对其进行预对准的装置, 使其形心移动到指定位置、缺口转动到指定方向。当光刻机光刻芯片线宽达到纳米级时, 对晶圆预对准台提出了微米级的定位要求。预对准台工作时, 其转台带动晶圆旋转一周, 激光直线位移传感器检测得到晶圆边缘一周径向数据。该转台, 选用了国外做得较好的成形产品, 但是其仍存在至少  $3 \mu\text{m}$  的径向跳动和  $70 \mu\text{rad}$  的偏摆, 而晶圆形心重复性定位精度要求高达  $\pm 1.5 \mu\text{m}$ , 如果不消除转台

径跳误差, 势必无法满足该定位精度要求。

以往对转台径跳误差的检测常采用 OZONO 提出的频域三点法误差分离技术, 该方法先行分离出检测元件的形状误差, 再据此求得转台的径跳误差, 即后者是间接得到的<sup>[1-4]</sup>。但是在实际测量中, 检测元件存在安装偏心等其他误差, 它们会引起一次谐波信号, 用三点法是无法分离出来的, 因此会一并被误判归为径跳误差, 从而导致误差分离结果的失真<sup>[5]</sup>。另外三点法需要安装三个测试传感器, 需占用一定的空间。对高精度晶圆预对准台而言, 传统的频域三点法误差分离技术无论是从精度上还是从机械空间尺寸上都无法满足系统要求。

为了消除晶圆对心转台径跳误差对系统对准精度的影响, 本文提出了径跳误差的在线检测与补偿

\* 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划, 200X AA4C3000), 20070822 收到初稿, 20080512 收到修改稿

方法。采用一个电涡流传感器检测固定于转台上方并与之一起旋转的检测元件沿激光位移传感器光束平行方向的径向距离。借助集合平均法或者转台径跳特性,在线从电涡流传感器测量数据中分离出转台径跳误差。利用该误差对激光位移传感器的晶圆边缘数据进行径跳误差补偿,用补偿后的数据计算晶圆的形心,然后完成晶圆预对准。采用该径跳误差补偿方法,满足了系统精度和机械结构尺寸的要求,实现了用低成本的转台完成晶圆预对准台的高精度对准。

## 1 预对准机构与径跳误差补偿方法

自主研发的晶圆预对准台是 4 自由度的执行机构,图 1 为其机械结构简图。 $x$  台固定于底框架上, $y$  台安装于  $x$  台之上, $x$ 、 $y$  台分别实现机构的前后、左右直线运动;转台固定于  $y$  台之上,带动其上方机构旋转; $z$  轴固定于转台之上,可带动晶圆上下直线运动。在  $z$  轴上方安装一个圆度误差为  $1\ \mu\text{m}$  左右的心轴,其为转台径跳误差的检测元件。心轴上方固定一块聚氟乙烯,其下通真空管,作为吸盘,以吸附晶圆于其上端。图 2 是晶圆预对准台的实物照片。

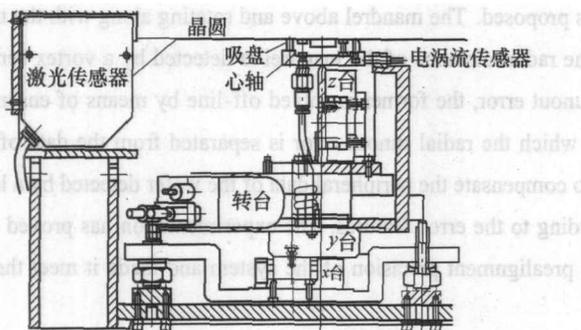


图 1 晶圆预对准台机械结构简图

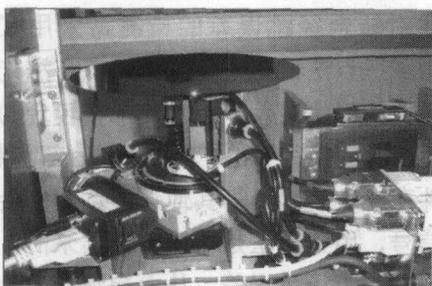


图 2 晶圆预对准台实物照片

当心轴随转台转动过程中,心轴的径跳和偏摆反映出转台的径跳和偏摆,其径向数据采用电涡流传感器来检测。传感器安装位置如图 1 所示,其局部实物照片如图 3 所示,其安装方向与激光位移传感器光束方向平行。当电涡流传感器的心轴测量面

与晶圆平面的高度差小于  $30\ \text{mm}$  时,偏摆误差可直接转化成径跳误差,因此转台的径向跳动和偏摆将统一表现为径跳。



图 3 电涡流传感器测量心轴径向跳动

图 4 是系统径跳误差补偿框图。工作前预先把电涡流传感器检测得到的可忽略径跳误差的心轴一周径向数据存入数据库中,工作时电涡流和激光位移传感器同步分别检测含转台径向跳动的心轴和晶圆的径向数据,接着从电涡流传感器检测值中分离出径跳误差,用该误差值去补偿激光位移传感器的检测值,从而得到晶圆形心计算所需的实际径向数据。

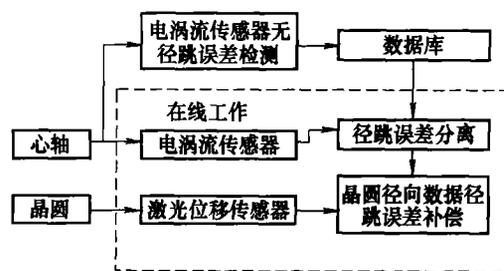


图 4 径跳误差补偿框图

## 2 误差分析与补偿算法

### 2.1 径跳误差的简化

转台径向跳动可沿系统坐标系的  $x$  和  $y$  轴方向进行分解。与激光位移传感器光束平行的方向定为  $x$  方向, $y$  方向与之垂直。激光测距值沿  $x$  方向的径跳误差补偿直接用其与对应误差值相加减即可;对于  $y$  方向的径跳,由于晶圆是一个圆,理论上来说它会对激光测距造成影响,但是影响会有多大呢?下面单独对  $y$  方向的径向跳动进行分析。

图 5 是  $y$  方向径向跳动对激光测距影响的分析示意图,图 5 中  $e$  表示  $y$  方向径向跳动, $R$  表示晶圆半径。则  $y$  方向径向跳动对激光传感器测距的影响是

$$\Delta x = R - \sqrt{R^2 - e^2} \quad (1)$$

$y$  方向径跳最大值为  $10\ \mu\text{m}$ ,晶圆半径为  $100\ \text{mm}$ ,把它们代入式(1)进行计算,得到

$\Delta x = 5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ , 该值远小于激光位移传感器的分辨率(为  $0.4 \mu\text{m}$ ), 因此  $y$  方向径跳对激光测距影响可以忽略不计。

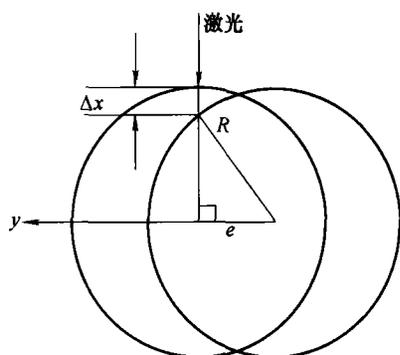


图5  $y$  方向径跳对激光测距影响示意图

因此系统实际上只需使用一个电涡流传感器, 对转台  $x$  方向径跳进行检测即可。

## 2.2 涡流传感器测量数据中固定误差与径跳误差的分离

电涡流传感器的测量值除了含转台径跳误差以外, 还包括心轴的圆度误差、心轴与转台中心安装偏心以及电涡流传感器安装偏心的影响。激光位移传感器检测值需要补偿的仅仅是转台径跳误差, 所以要设法把后者从前者中分离出来。

图6为转台径向跳动分析图, 图6中外圆代表转台, 中心为点  $O$ ; 内圆为心轴, 中心为点  $O_1$ ; 两者偏心为  $e$ , 工作时, 转台中心产生最大  $10 \mu\text{m}$  的随机径向跳动, 导致心轴单点运动曲线是一条随机曲线(图6)。电涡流传感器直接对心轴表面进行检测, 第  $k$  点检测值由以下几部分组成

$$V_k = C_{e_k} + e_k + \Delta x_k \quad (2)$$

式中  $V_k$  ——电涡流传感器的检测值

$C_{e_k}$  ——心轴的圆度误差

$e_k$  ——心轴与转台、电涡流传感器与心轴安装偏心造成的影响值

$\Delta x_k$  ——转台随机径跳误差

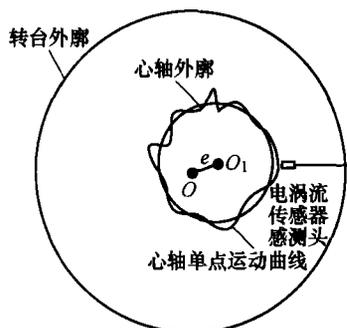


图6 转台径向跳动分析图

$O$  ——转台中心

$O_1$  ——心轴圆心

$\Delta x_k$  是实际需求量, 由式(2)可知, 只要把电涡流传感器检测值减去  $C_{e_k}$  和  $e_k$ , 就得到  $\Delta x_k$ 。然而想单独求解  $C_{e_k}$  和  $e_k$  是一件极为困难的事情, 通过下述分析可知, 实际上可回避该步。晶圆边缘数据采集时, 数据采集卡以转台编码作为外部时钟, 即转台每走一定的编码, 数采卡被触发采集一个点, 所以数据采集点在一周内是均匀分布的。又由于每次预对准过程转台都从零位开始旋转, 即数据采集起始点恒定, 因此工作过程中晶圆边缘一周的数据采集位置是恒定的。那么每次工作对同一个采集位置而言,  $C_{e_k}$  和  $e_k$  是相同的, 即都为固定误差。因此并没有必要费力求解  $C_{e_k}$  和  $e_k$  各自的值, 只需求同属于固定误差的两者之和  $(C_{e_k} + e_k)$ , 然后径跳误差  $\Delta x_k = V_k - (C_{e_k} + e_k)$ , 从而实现涡流传感器测量数据中固定误差与径跳误差的分离。

## 2.3 集合平均法求解固定误差

集合平均又称为同步平均, 就是对同一误差信号进行多次采样, 然后对采集的多幅误差信号按采样点进行平均<sup>[5]</sup>。转台的径向跳动属于随机噪声, 集合平均可抑制测量信号采集过程中混入的随机噪声。从上文分析可知, 信号采集过程具有严格相同的采集分度点, 这使集合平均法具有较好的平滑效果。

具体操作是模拟实际晶圆形心计算的数据采集工作过程, 一次采集得到一周的数据, 循环  $N$  次, 则每个采集位置将有  $N$  组数据, 对第  $k$  个采集位置的  $N$  组数据求和有

$$N(C_{e_k} + e_k) + \sum_{i=1}^N \Delta x_{ki} = \sum_{i=1}^N V_{ki} \quad (3)$$

$$(C_{e_k} + e_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{ki} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta x_{ki} \quad (4)$$

$$(C_{e_k} + e_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{ki} - E[x(k)] \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

假设转台径跳随机量是均值为  $0$ , 方差为  $\sigma^2$  的白噪声, 即  $E[x(k)] = 0$ , 那么对任意采集位置的固定误差  $(C_{e_k} + e_k)$  是

$$(C_{e_k} + e_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{ki} \quad (6)$$

根据统计学原理可知, 当集合平均的次数  $N$  增加时, 所求固定误差的方差减小, 并且愈接近真实值。该方法要求集合平均数越多越好, 导致测量一次需要花费大量的时间, 因此下文提出一种更为简便的方法。

## 2.4 利用转台径跳特性求解固定误差

试验研究表明, 晶圆对心转台的径跳量与转台

的转速有关。当转台高速转动时(即实际工作状态),径跳较大;低速时径跳较小。转台转动低速的极限即为停止状态,此时径跳达到最小值,且该值很小,在系统对准精度要求范围内可忽略不计。由于每个采样位置已知,可让转台缓慢走到每个采样位置,然后停下,测量该点电涡流传感器的数据。停止状态下的转台径跳可忽略,因此这样检测得到的每个采样位置的电涡流传感器数据可以看作不含径跳误差只含固定误差的数据,即求出了 $(C_{e_k} + e_k)$ 的值。该方法不要求知道径跳的随机变化规律,同时转台只需以采样分度为步长步进转动到一周,检测方便,效果佳。

图 7 是电涡流传感器在不同工作状态下采集的径向数据曲线比较图。静态曲线是当电涡流传感器在每个采样位置停下采集,获得一周数据后所画的曲线,它可当作不含转台径跳误差的电涡流传感器径向数据曲线;动态曲线是指转台以工作转速高速旋转时电涡流传感器采集心轴一周数据所画的曲线。从图 7 中比较可以看出,动态曲线在静态曲线上波动,这就是由于转台高速旋转时随机径跳引起的。

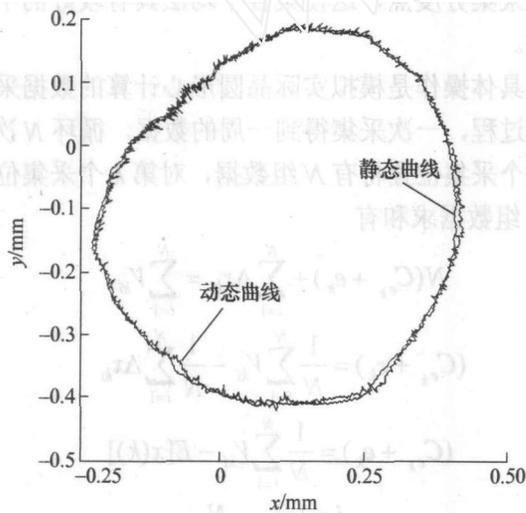


图 7 涡流径向数据比较图

### 2.5 径跳误差补偿算法

求出一周采集位置固定误差 $(C_{e_k} + e_k)$ 后,把它们写入数据库,保存起来。系统初始化过程中,从数据库中读出固定误差,调入内存,将来与在线检测得到的电涡流传感器数据进行比较,即 $\Delta x_k = V_k - (C_{e_k} + e_k)$ ,得到激光位移传感器晶圆边缘检测值所需补偿的转台径跳误差。由前述分析可知,y方向径跳影响可忽略不计,只需测量x方向的径跳。因为激光位移传感器的光束方向与x方向平行,所以它的径跳误差补偿直接把其检测值和求得的 $\Delta x_k$ 相加减即可。

## 3 径跳误差补偿试验结果

为了验证所提出的转台径跳误差补偿方法的有效性,下面进行径跳误差补偿和未补偿的晶圆预对准重复性精度对比试验。试验所需装置是晶圆预对准台、一片 200 mm 上带标记的晶圆、CCD 摄像头、图像采集卡。晶圆预对准台如图 2 所示; CCD 摄像头方向垂直于晶圆,抓取晶圆标记的放大图片。试验方法是,分别进行两次晶圆预对准重复性精度检测试验,一次添加转台径跳误差补偿算法,另一次不添加,然后比较两次试验的重复性精度。晶圆预对准重复性精度检测试验具体方法是,位置任意的同一块晶圆进行预对准操作,当预对准完成后,CCD 抓取一张晶圆标记图片(图 8),该过程重复 25 次,将会获得 25 张图片。这组图片运用图像分析软件进行分析,把其中任意一张作为模版,剩余的都和它进行匹配。结果将获得 25 组像素坐标,然后对 x, y 分别计算  $3\sigma$  值。下表是两次晶圆预对准重复测量精度检测试验比较结果,可以看出径跳误差补偿算法的添加,大大提高了晶圆预对准系统的对准精度,且计算得出的  $3\sigma$  值满足了系统微米级重复性定位精度要求,证明该补偿方法是有效的。

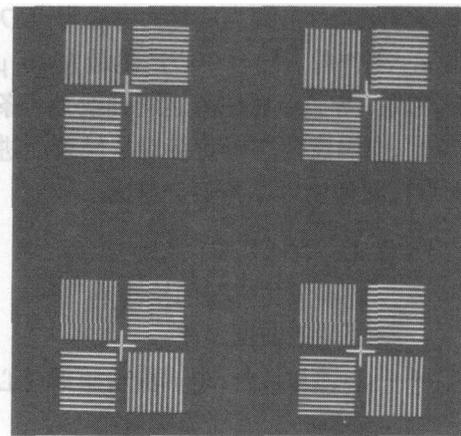


图 8 CCD 晶圆标记拍摄图片

表 两次晶圆预对准重复测量精度检测试验比较结果  $\mu\text{m}$

重复性定位精度	添加补偿算法	未添加补偿算法
$3\sigma(x)$	2.83	6.53
$3\sigma(y)$	1.80	4.78

## 4 结论

(1) 在晶圆预对准系统中,其带动晶圆旋转的转台存在超出系统精度要求的径向跳动误差,使得系统单单这一项就不满足精度要求。为了消除转台径跳误差的影响,采用了电涡流传感器检测反映转

台径跳的心轴, 借助集合平均法或者转台径跳特性(优先选用后者), 在线从电涡流传感器测量数据中分离出转台径跳误差。

(2) 用获得的转台径跳误差数据对激光位移传感器晶圆边缘检测数据进行误差补偿。用补偿后的晶圆边缘数据, 配以一定的形心算法, 来计算晶圆的形心, 然后完成晶圆预对准。

(3) 试验证明, 径跳误差补偿算法的添加提高了系统的预对准精度, 并最终使其达到了微米级的定位精度要求。

### 参 考 文 献

- [1] 李自军, 洪迈生, 魏元雷. 基于主轴回转运动误差在线检测的二次相移三点法[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 319-323.  
LI Zijun, HONG Maisheng, WEI Yuanlei. Quadratic phase shift three-point method for on-line measurement of spindle radial motion error[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(4): 319-323.
- [2] 苏恒, 洪迈生, 李自军, 等. 机床主转运动误差的在线高精度测量[J]. 制造技术与机床, 2003(3): 47-49.  
SU Heng, HONG Maisheng, LI Zijun, et al. On-line high-precision measurement for motion error in machine spindle[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2003(3): 47-49.
- [3] KFUNG E H, YANG S M. An error separation technique for measuring straightness motion error of a linear slide[J]. Measurement Science and Technology, 2000(11): 1 512-1 521.
- [4] 王江萍. 计算机辅助主轴回转误差测试与分析[J]. 西安石油学院学报, 2003, 18(4): 53-55.  
WANG Jiangping. Computer-assisted measurement and analysis of the rotating error of a machine tool main-shaft[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 2003, 18(4): 53-55.
- [5] 李济顺, 洪迈生. 提高圆度误差分离精度的措施[J]. 计量学报, 1999, 20(2): 92-95.  
LI Jishun, HONG Maisheng. Approaches to improve the accuracy of roundness error separation[J]. Acta Metrologica Sinica, 1999, 20(2): 92-95.

作者简介: 黄春霞, 女, 1981年出生, 博士研究生。主要研究方向晶圆预对准系统。

E-mail: hcx81314@sjtu.edu.cn