

# 探讨数字相关滤波在精密位置检测与控制系统中的应用

张建明

(中国航空精密机械研究所,北京 100076)

**摘要** 数字相关滤波精密检测是随着现代光电子技术,计算机技术的进步而发展起来的一门新兴技术,在现代科技与制造业,尤其是在超大规模集成电路制造等领域中非接触高精度测量方面具有重要的实用价值。本文通过实例,介绍了问题的提出,数字相关滤波的理论,探讨了在非接触式精密位置检测与控制系统中的应用原理及实现方法。文末,还就相关滤波的其它有关应用作了简介。

**关键词:**数字相关滤波,精密位置检测

## 1 前 言

随着现代科技的发展,在某些场合,尤其在一些要求进行非接触式高精度空间位置检测的情况下,由于被测点周围空间环境或测量时工作状态的限制,传统的精密位置测量仪器,如电感式或电容式测微仪,激光干涉测量仪等已不能适应检测的要求。例如,在超大规模集成电路制造中,亚微米线宽步进光刻机的物镜由于采用了大的数值孔径,其焦深仅为亚微米数量级。在进行硅片光刻时,要求曝光硅面控制在焦深中间,其定位精度为  $0.1 \mu\text{m}$  或更高。此外,还要求在步进光刻的进程中,随着硅片局部厚度及平度的变化,对其进行测量跟踪,调焦调平,在进行光刻膜片与硅片上或工作台上的标记对准时,要求对准精度亦为  $0.1 \mu\text{m}$  或更高。在上述应用情况下,传统的精密测量仪器与方法已不能满足使用要求,必须寻求一种新的有效的检测工具与方法。

随着现代光电子器件,计算机及信号处理技术的进步,一种能满足上述要求的新的检测技术与方法—数字相关滤波检测发展起来了。

## 2 数字相关滤波

在数字信号处理中,相关滤波有着重要的应用。所谓相关是指两个信号的相互关系。应用相关函数对信号进行处理是获得最佳数字滤波和检测的一种途径。

## 2.1 相关函数

从考察两个离散信号  $x(n)$  和  $y(n)$  的相似性, 两个信号的互相关函数定义为

$$\gamma_{xy}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-\tau) \quad (1)$$

在实际应用中, 这两个信号在往往都是由同一个原因引起的。根据实际情况  $\tau$  可代表两个信号在时间域上的延迟差, 或空间域上的位置差。

从形式上, 相关与卷积函数很相似, 如离散卷积公式为

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) \quad (2)$$

式中  $h(k)$  为线性非移变系统的单位脉冲响应函数。式(2)表明两序列的卷积次序是可交换的, 即它们符合交换律特性。

应注意的是, 相关与卷积求解步骤相似, 但相关过程只包括有平移, 相乘与求和三个步骤, 没有卷褶这一步序。相关函数不满足交换律。

### 2.1.1 自相关函数

当信号  $x(n)$  与自身相关时, 称  $\gamma_{xx}(\tau)$  为  $x(n)$  的自相关函数

$$\gamma_{xx}(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n-\tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n+\tau) \quad (3)$$

自相关函数的图形如图 1 所示。

当离散信号  $x(n)$  的能量为有限时(实际情况如此), 它的自相关函数具有以下性质:

1)  $|\gamma_{xx}(\tau)|$  在  $\tau=0$  时达到最大值, 即:  $|\gamma_{xx}(\tau)| \leq |\gamma_{xx}(0)|$

从相似性的角度考虑, 当  $\tau=0$  时, 信号  $x(n)$  与其  $x(n-\tau)=x(n)$  重合, 这时相似程度最大, 因此  $\gamma_{xx}(0)$  达到最大值。

从数学上看, 由许瓦兹不等式可得

$$\left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)x(n-\tau) \right| \leq \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2(n-\tau) \right]^{1/2} \leq \gamma_{xx}(0) \quad (4)$$

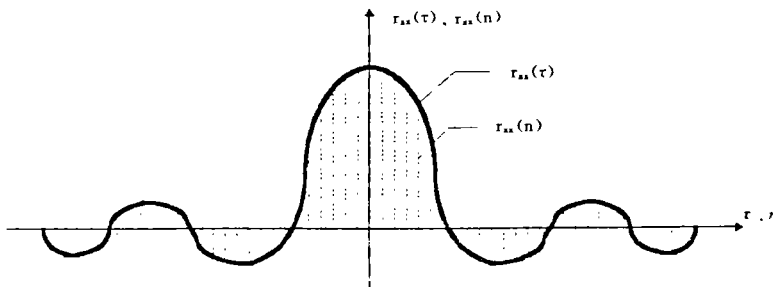


图 1 自相关函数  $\gamma_{xx}(\tau)$

Fig. 1 Auto correlative function  $\gamma_{xx}(\tau)$

2) 当  $\tau \rightarrow \infty, \gamma_{xx}(\tau) \rightarrow 0$ 。

直观上看, 当两个相同的信号相对偏移量  $\tau$  逐渐增大时, 两个波形逐渐失去了相似性。因此, 反应相似性的  $\gamma_{xx}(\tau)$  就接近于零。在实际系统中处理的波形总是有限长度的, 当两个波形相对移开时, 因无重叠的相乘积。其自相关函数趋于零。

3)自相关函数  $\gamma_{xx}(\tau)$ 是  $\tau$  的偶函数,即

$$\gamma_{xx}(\tau) = \gamma_{xx}(-\tau) \tag{5}$$

故图 1 中自相关函数对  $\tau=0$  呈偶对称形状。对离散自相关函数  $\gamma_{xx}(n)$ 是一个偶对称的实序列。

4)自相关函数  $\gamma_{xx}(n)$ 的波形仅与信号  $x(n)$ 所包含的频率振幅谱有关,与相位谱无关。

### 2.1.2 互相关函数

与自相关函数相同,当  $n \rightarrow \infty$ 时,互相关函数  $\gamma_{xy}(-n) \rightarrow 0$ 。

互相关函数与自相关函数不相同的地方:

1)在  $n=0$  时,  $\gamma_{xy}(n)$ 不一定具有最大值,一般它是在某一个  $n_{max}$ 时才达到最大值,因此  $\gamma_{xy}(n)$ 不是  $n$  的偶函数,即

$$\gamma_{xy}(n) \neq \gamma_{xy}(-n) \tag{6}$$

2)互相关函数只包含有信号  $x(n)$ 和  $y(n)$ 所共有的频率分量,即  $\gamma_{xy}(n)$ 的频谱为

$$R_{xy}(e^{j\omega t}) = X(e^{j\omega t})Y^*(e^{j\omega t}) \tag{7}$$

## 2.2 相关滤波在测量中的应用

根据相关函数的性质,采用相关滤波技术可实现:

1)进行两信号之间相对偏差量的测量

通过对两个外形相同,但在时间域或空间域位置不同的信号进行相关处理,可求出两信号的偏差量,从而实现与信号对应的某种物理量的测量。

2)滤除噪声

由于相关处理只保留两信号之间共有的频率分量,所以可大大降低实际系统中电气,光学等随机噪声和背景源的影响,从而显著地提高系统的信噪比。

3)提高测量精度

在对两同形信号进行自相关滤波处理求其偏差时,往往受滤波输出信号的灵敏度的限制,影响到系统测量精度。此时,可在自相关滤波的基础上,进一步用特定的信号进行互相关处理,从而大大提高系统的灵敏度与精度。

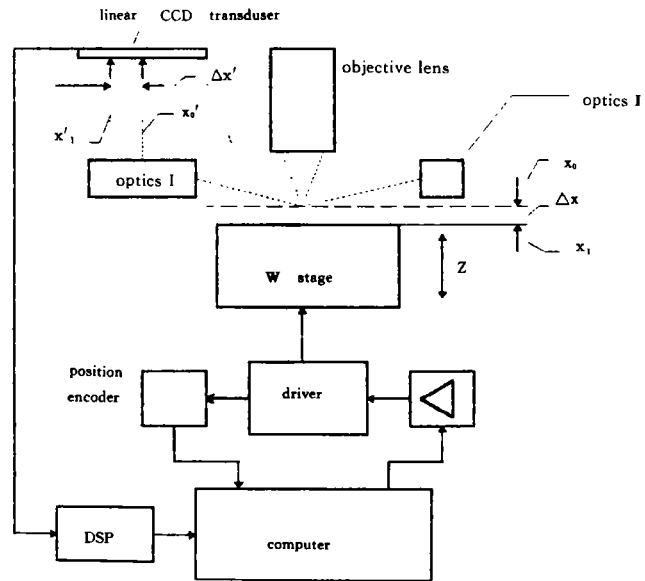


图 2 离焦检测与控制系统示意简图  
Fig.2 Focus detection and control

## 3 物体空间位置状态测量

### 3.1 调焦检测与控制

图 2 为一集成电路光刻机定焦检测与控制系统部分示意简图

图中,  $W$  为装载硅片的工作台, 工作台可作  $X, Y, Z$  三维运动。这是仅讨论  $Z$  向运动时的情况。  $x_0$  为曝光物镜的理论焦面, 光刻机工作时必须保证工作台  $W$  上的曝光硅面与理论焦面精确重合。光学系统 I, II, 线阵 CCD 位移传感器, DSP 和计算机构成离焦检测系统, 电机、位置编码器与计算机构成工作台焦面调整驱动控制系统。

### 3.1.1 离焦检测原理

光学系统 I 发出一束经过遮光栅板图形调制的光, 经过硅片工作表面射至光学系统 II, 此光束从光学系统 II 反射回光学系统 I, 然后回射光束所载的调制图形信号投射到线阵 CCD 位移传感器上。此处, 利用光束的往复行程可以减小传感器对硅片工作表面形貌变化的敏感性。当硅片工作面处在理论焦面  $x_0$  时, CCD 上的信号处在 CCD 线阵的中央  $x'_0$  位置。当硅片工作面偏离理论焦面  $\Delta X$  时, 经过光学系统的检测, CCD 上的投影图形信号产生相应的  $\Delta x'$  的偏移, 即:  $x'_0 \rightarrow x'_1$ 。

为了精确测定  $\Delta x'$  反映的  $\Delta x$  离焦偏移量, 检测系统采用了数字相关滤波检测技术。

### 3.1.2 光调制掩膜图形信号的设计

投射在 CCD 上的掩膜图形信号载有硅片工作面的离焦位置信息, 为了便于精确地检测出离焦量, 需巧妙地设计信号调制图形布局。

考虑到信号处理时, 先采用自相关滤波达到滤除光电噪声, 初步确定信号图形在 CCD 上的位置, 因此要求信号波形的自相关函数具有较高、较窄的主瓣和较弱的侧瓣分布。一种可行的不等间距的栅条图形布局如图 3 所示



图 3 一种光调制栅条示意图形  
Fig. 3 A kind of light modulation grating figure

在对上述成象在 CCD 上的图形(虚线截线分布)信号进行自相关处理时, 除了  $\tau=0$  时, 11 条线全重合外, 其余状态重合的线条最多为 6 条。所以, 信号的自相关函数的侧瓣幅值最大为主瓣的  $6/11$ 。

### 3.1.3 CCD 信号计算机仿真相关滤波

#### 1. 自相关滤波

设在线阵 CCD 器件上的信号具有如图 4a 所示的理想波形, 则计算机处理的自相关滤波波形如图 4b。图 4b 上波形主瓣中心表征了 CCD 上信号的特征“位置”。

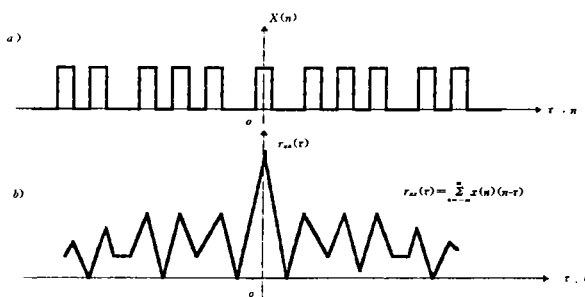


图 4 自相关滤波  
Fig. 4 Auto correlative filtering

实际信号的自相关滤波波形主瓣不像图 4b 那样尖锐, 而更接近图 1 形状, 在主瓣的中心  $\gamma_{xx}(0)$  变化率很小即

$$\left. \frac{d\gamma_{xx}(\tau)}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0 \quad (8)$$

也就是说, 从测量的角度来看, 由于信号主瓣中心的幅值变化率小, 不易通过测量幅值来精确地确定主瓣中心位置。此外, 由于信号在主瓣中心附近的一阶导数  $\gamma'_{xx}(\tau)$  呈非单调变化, 在某些场合也不宜用来作为线性控制信号。

#### 2. 互相关滤波

根据自相关函数的偶对称,  $\gamma_{xx}(0)$  幅值最大的特性, 可利用一特定信号  $y(n)$  对  $\gamma_{xx}(n)$  进行互相关处理, 以精确地确定  $\gamma_{xx}(n)$  的主瓣中心。需要说明的是, 此处我们关心的不是  $y(n)$  与  $\gamma_{xx}(n)$  的相关性, 而是利用相关滤波的方式来改善检测精度。

注意到  $\gamma_{xx}(n)$  在  $n=0$  时, 主瓣中心两侧的面积差  $(S^+(n) - S^-(n))$  对  $n$  的导数达到最大值。

$$\frac{d(S^+(n) - S^-(n))}{dn} \Big|_{n=0} = \text{MAX} \tag{9}$$

并且, 在主瓣中心附近的一定范围内, 该导数呈单调线性变化。利用一对幅度及脉宽相等的相邻正负脉冲信号  $y(n)$  对  $\gamma_{xx}(n)$  进行相关处理, 可得互相关滤波信号  $\gamma_{xy}(\tau)$

为了获得最佳  $\gamma_{xy}(\tau)$ , 在选择  $y(n)$  的脉宽  $W$  时, 可利用互相关函数的性质 2) (参看公式 (7)), 使  $y(n)$  的基频与  $\gamma_{xx}(n)$  或  $x(n)$  的基频一致, 从而,  $\gamma_{xy}(\tau)$  在  $\tau=0$  时, 具有最佳的灵敏度。图 5:  $W=10$ ,  $y(n)$  与  $x(n)$  基频一致。

在实际应用中,  $x(n), \gamma_{xx}(n), \gamma_{xy}(n)$  的自变量  $n$  代表的为一等间距物理量序列, 当我们要求得  $\gamma_{xx}(n)$  的主瓣中心  $\gamma_{xx}(n_0)$ , 即

$$\gamma_{xy}(n_0) = 0 \tag{10}$$

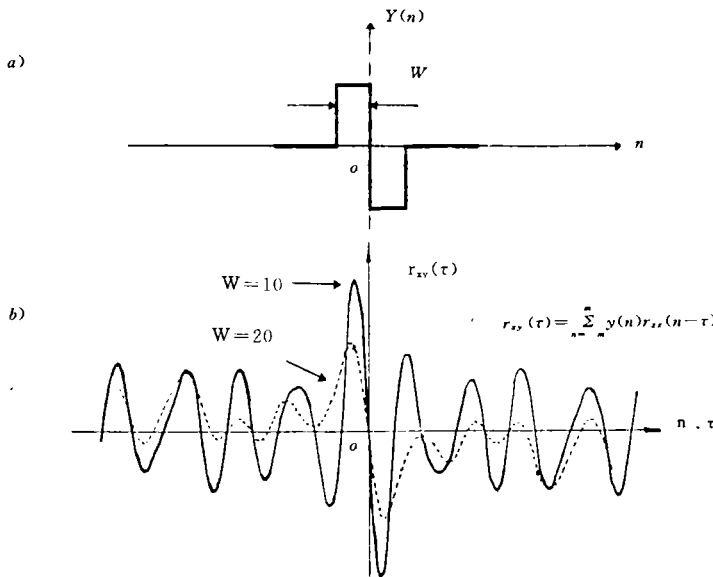


图 5 互相关滤波

Fig. 5 Cross correlative filtering

所对应的  $n_0$  时,  $n_0$  很可能不在采样序列中。此时, 可在  $n_0$  附近相邻采样点绝对值最小的正负  $\gamma_{xy}(n_0^+), \gamma_{xy}(n_0^-)$  两值之间进行插值, 求得  $n_0$ 。该方法可大大提高检测系统的分辨率和精度。

$$n_0 = \frac{\gamma_{xy}(n_0^+)n_0^+ - \gamma_{xy}(n_0^-)n_0^-}{\gamma_{xy}(n_0^+) - \gamma_{xy}(n_0^-)} \tag{11}$$

### 3.1.4 调焦检测与控制实现方法

图 2 中, 系统的一种可行方案: 线阵 CCD 位移传感器采用 1024 象素的器件, 投射在 CCD

上的遮光栅板栅条的象图形信号的宽度为 100 个 CCD 象素,通过检测系统的设计与调整,使两个相邻的元素对应于焦面位移  $2 \mu\text{m}$  左右的距离。CCD 扫描位移信号经过一定的信号处理后(电平转换,放大,ADC),送入计算机进行处理。当系统要求具有较高的实时性时,如 CCD 移位扫描频率为 1MHz,线扫描频率为 1 ms 时,由于相关滤波涉及到大量的实时运算,作为系统控制机的微机不能满足要求,此时,可采用 DSP 器件负责进行专门的相关处理。

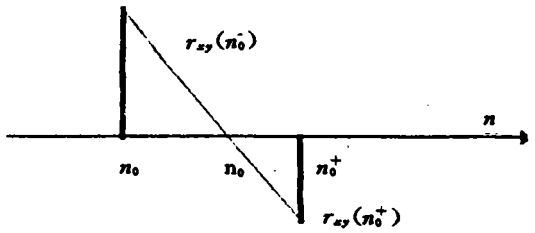


图 6  
Fig. 6

调焦检测与控制的具体步骤(参阅图 7):

- 1)调整工作台,使其工作面处于理论基准焦面  $x_0$ ,然后,调整光学系统使遮光栅板栅条的象尽可能地处于线阵 CCD 的中心即  $x_0$  处。
- 2)对 CCD 进行电子扫描,把 CCD 各象素上的电荷一位一位地串行移出。当对每位信号进行电平及 AD 转换后,存入一具有 1024 单元的存储器线阵 A。A 各单元与 CCD 各象素具有一一对应的关系。
- 3)\*对存入 A 中的  $x'_0(n)$ 进行自相关处理,得  $\gamma_{xx0}(n)$ ,并把  $\gamma_{xx0}(n)$ 存入另一存储器线阵 B。
- 4)\* $\gamma_{xx0}(n)$ 与  $y(n)$ 进行互相关处理求出  $\gamma_{xy}(n)$ 的中心位置  $n_0^0$ 。

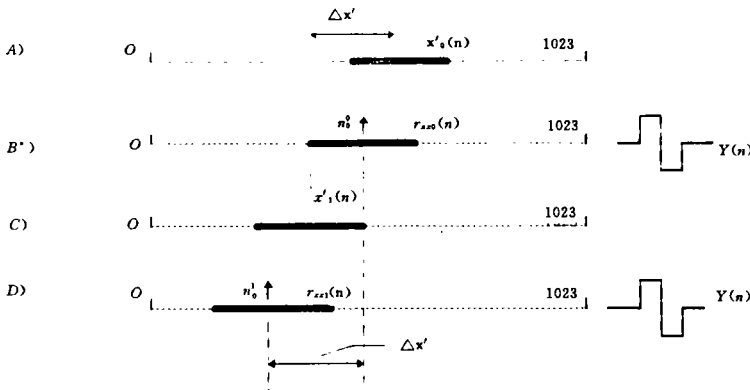


图 7  
Fig. 7

- 5)当工作台偏离焦面零位,从  $x_0 \rightarrow x_1$  时,CCD 上的图象从  $x'_0 \rightarrow x'_1$ 。对 CCD 进行电子扫描,把包含有  $x'_1$  的 CCD 信号移至存储器线阵 C。在实时检测中,除了首次基准信号  $x'_0$  送至 A 外,CCD 实时采样信号均送至 C。
- 6)用 A 中的  $x'_0(n)$ 对 C 中的  $x'_1(n)$ 进行相关处理,把结果  $\gamma_{xx1}(n)$ 送至存储器线阵 D。
- 7)用  $y(n)$ 对  $\gamma_{xx1}(n)$ 进行互相关处理,求出  $\gamma_{xy}(n)$ 的中心座标  $n_0^0$ 。
- 8)求出工作台离焦偏差: $\Delta x' = n_0^0 - n_0^0$ 。理论上  $n_0^0$  应为存储器线阵的中点。步序 3\*, 4\*, B\*

可省略。

9)根据偏差信号  $\Delta x'$ ，由计算机，电机及传动机构，位置编码器构成的焦面控制系统驱动工作台运动，使离焦偏差  $\Delta x' \rightarrow 0$ 。

采用上述检测与控制方法的系统，其定位精度可达  $0.1\mu\text{m}$ 。

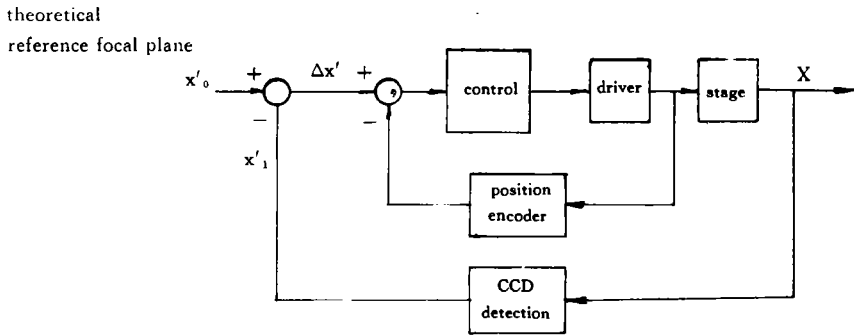


图 8 调焦控制系统框图

Fig. 8 Focusing system block diagram

### 3.2 调平检测与控制

在集成电路光刻中，不仅要  
对曝光硅面进行调焦控制，而且  
还要进行调平控制。调平检测，控  
制的方法与调焦系统类似，不同  
的是：调平检测采用光电自准直  
仪光学系统。当工作台倾角由水  
平基准位置角度  $x_0$  变为  $x_1 = x_0$   
 $\pm \Delta x$  时，线阵 CCD 上栅状图  
形信号位置由  $x'_0$  变至  $x'_1 = x'_0 \pm$   
 $\Delta x'$ 。调平控制在图 9 中为两轴  
线调平（结合调焦为二维控制量）。

### 3.3 调焦，调平检测与综合控制

在实际的光刻机调平，调焦  
系统中，调平检测与控制需在沿  
 $X, Y$  两轴旋转面上进行，因此需  
要配置两通道正交的调平检测与  
控制，加上一通道调焦检测与控  
制，系统至少应具有三维检测与  
控制向量。图 9 中的  $z_1, z_2, z_3$   
构成了调焦，调平三维驱动控制  
向量。

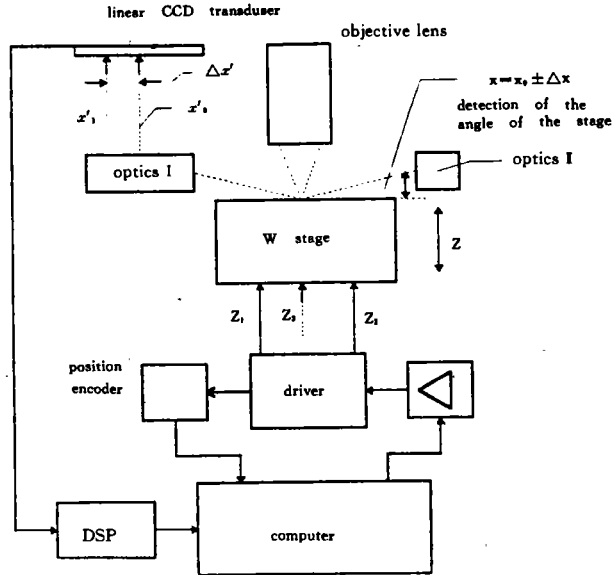


图 9 调平检测与控制系统示意简图

Fig. 9 Leveling detection and control

## 4 结 束 语

近年来,随着人们对相关滤波检测技术的深入研究与开发,其应用范围越来越广。如在对两物体进行非接触精确对准,定位方面,通过采用激光束和两物体上的特殊形状标记,进行衍射空间滤波,对相互之间的位置进行光强调制,光电模拟量相关滤波,计算机数字相关滤波,从而实现两物体相互位置的精确定位及对准。在确定一个有切边圆片的安装坐标位置时,可通过圆周边界上的一个光电传感器,在圆片回转的情况下,进行检测计算得出。若仅仅通过光电信号的幅值,按通常的算法,是难于精确测定的。这是因为在测量数值中,往往有效的信息分量太小。若对测量信号根据其特征进行数字相关滤波,滤除背景分量,突出与放大信息分量,并加以适当处理,可大大地提高检测的精度。

总之,相关滤波检测技术是一门应用前景广阔的高新技术,对其进行研究开发具有重要的技术,经济意义。

### 参 考 文 献

[1] 何振亚,数字信号处理的理论与应用. 北京:人民邮电出版社,1983

## Application of Digital Correlation Filtering in Precision Positioning System

Zhang Jianming

(China Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076)

### Abstract

The precision measuring with digital correlation filtering is a new technology developed with the achievements of modern photoelectric and computer technology. It has great application value in modern science, technology and manufacturing industries, especially in the manufacturing of SLSI. With examples, the article introduces the theory of digital correlation filtering and its application principle and method in the non-touch precision positioning system.

**Key words:** Digital correlation filtering, Precision positioning

**张建明** 1976年毕业于天津大学电机专业,1981年硕士研究生毕业于航空航天科学研究所,1993—1994年作为访问学者在美国威斯康辛大学计算机控制与测试实验室进修。曾负责承担和完成过多项国家“七五”,“八五”重点科技攻关项目。现在是中国航空精密机械研究所的高级工程师,还是国家机械工程学会生产工程分会测试技术专业委员会成员。主要专业研究领域包括超精密测试,控制,传感器等。