

基于小波变换的视觉信号特征提取方法¹

张新荣 左建中* 张 钢 李晓红

(天津大学电子信息学院 天津 300072)

*(天津大学机械学院 天津 300072)

摘 要 该文提出了一种用于视觉信号特征提取的新方法——将 CCD 获取的图像投影后的信号波形进行小波变换。当小波的尺度选择恰当时,小波变换结果的零交叉点可用于确定图像的中心。实验结果表明,该方法相对于其他方法对随机误差的干扰具有更强的鲁棒性。

关键词 图像投影,小波变换,零交叉点,特征提取

中图分类号 TP391, O177.6

1 引 言

现代电子设备的生产,大多采用流水线自动化生产模式,芯片的安装由机械手自动完成,这就对芯片的引脚位置提出了严格的要求。因此,对芯片引脚进行位置偏差检测是集成电路芯片生产的一个必不可少的重要环节^[1]。

工厂对芯片引脚位置偏差检测的要求是:同时检测引脚中心线在纵向偏离正常标准垂直中心线的距离及横向(即向内或向外)偏离其余引脚形成的平面的距离都应小于引脚宽度的一半。因为双列直插式集成电路芯片在生产过程中,同列引脚形成的平面和垂直方向的夹角允许在 $0 \sim 15^\circ$ 范围内,这个大范围的允差,给横向偏差的检测带来了许多难题。为了同时获得引脚两个方向偏差的清晰图像,我们精心设计了光学和摄像系统,采用镜像和实像相结合的方法,镜像主要用于检测引脚的纵向偏差,而横向偏差的检测直接由引脚的脚尖像得到。

引脚的脚尖像信息量比较小,如何能够准确地得到脚尖的的位置是提高检测精度的关键。采用重心方法求取脚尖的的位置可以获得亚像素级精度,但对图像分割的质量要求比较高。为此,我们又设计了采用小波变换求取中心的方法,并根据脚尖像的特点,将 Haar 小波进行改进,得到一种新的小波函数。采用新的小波函数来检测脚尖像投影的一维信号的尖峰就是脚尖的的位置。实验结果证明,该方法相对于重心方法对随机误差的干扰具有更强的鲁棒性。

2 脚尖像的光强分布

当光源发出的光照射到引脚的脚尖上时,经脚尖点反射后进入到 CCD 中。在理想光学系统下,各个脚尖在 CCD 靶面上所成的像应该呈现阶跃边缘。然而在实际成像过程中,由于光学系统存在着像差,并且光在传播过程中存在衍射现象,因此造成了像边缘处的灰度变化不是理想的跃变状态,而是一个逐步变化的过程。根据光学理论可得出它的灰度分布状况。

$$I(x, y) = I_0(x, y) |h(x, y)|^2 \quad (1)$$

其中 $I_0(x, y)$ 是脚尖成像的理想光强函数, $|h(x, y)|^2$ 为非相干光照明时透镜的点扩展函数 PSF。

3 小波函数的选择

根据实际光强分布函数,将尖点区域中的信息沿 X 方向投影以后,所成的一维信号波形应该在脚尖中心的 X 坐标处具有最高峰值。这时寻找脚尖的的位置相当于用某种小波来检测信号的尖峰。

3.1 小波变换定义^[2] 小波函数的容许性条件为

$$C_\varphi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\varphi}(\omega)|^2 d\omega < \infty \quad (2)$$

¹ 2001-10-10 收到, 2002-07-05 改回

对任意函数 $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$, 其对应的小波变换为

$$(W_\varphi f)(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3)$$

由 $\varphi(x)$ 伸缩平移产生 $\varphi_{a,b}(x)$:

$$\varphi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \varphi[(x-b)/a] \quad (4)$$

3.2 小波函数的选择 根据脚尖像的实际光强分布情况, 其波峰宽度有时只有一个像素宽度, 因此, 在选择小波函数时, 我们将 Haar 小波变形, 得到一种新的小波函数。

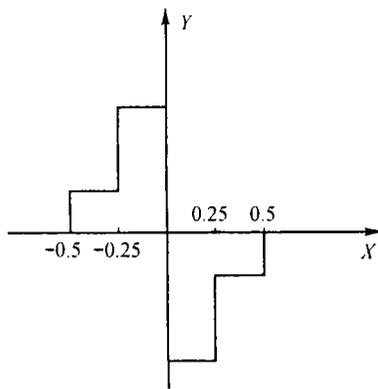


图 1 小波函数

$$h(x) = \begin{cases} 0.5, & -1/2 < x \leq -1/4 \\ 1.5, & -1/4 < x \leq 0 \\ -1.5, & 0 < x \leq 1/4 \\ -0.5, & 1/4 < x \leq 1/2 \end{cases}$$

函数 $h(x)$ 满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} h(x) dx = 0$, 因此可以作为一个小波函数。 $h(x)$ 函数还具有如下特点: $h(x)$ 是紧支撑的, $h_2^j(x)$ 的支撑区间是 $[2^{j-1}, 2^{j+1}]$; $h(x)$ 是反对称的, 即 $h(-x) = -h(x)$ 。

$h(x)$ 能够保持 Haar 小波在信号平缓处的线性移不变性, 而且相对于 Haar 小波来说, 更有利于抑制背景的干扰。

4 小波变换求脚尖的中心

在理想情况下, 脚尖像的一维信号 $f(x)$ 应是一个矩形脉冲函数。设理想矩形脉冲信号的宽度为 D , 根据 (3) 式用函数 $h(x)$ 对它作连续小波变换, 结果如图 2 所示。

从图中可以看出, 不论在何种尺度下, 当小波函数的中心通过矩形脉冲时, 由于小波函数的形状和信号函数的形状都是规则的, 所以在 $[-0.5D, 0.5D]$ 这段信号区间内, 小波变换的结果呈线性上升趋势, 且在信号的中心处通过 X 轴。用不同尺度的小波函数对信号进行变换, 变换结果在信号区间内的斜率是不同的。但在尺度增大到一定程度时, 斜率就不再增加了。因此, 在选用小波函数尺度时, 应尽可能地选取大的尺度, 使得最大值和最小值尽可能地达到最大和最小, 以利于中心点的寻找。一般以峰值宽度的 2~4 倍来作为小波的尺度。

根据以上讨论, 我们用某尺度的小波函数对原信号进行变换以后, 找到最小值和最大值之间的零交叉点位置, 就是脚尖的中心位置。设在变换结果序列中, x_i 和 x_{i+1} 是最小值和最大值区间内的两个点, 它们的函数值分别为 $y[i]$ 和 $y[i+1]$, 符号分别为负和正, 则零交叉点位于它们之间。由于 x_i , x_{i+1} 和零交叉点的函数值应位于同一直线上, 因此零交叉点的位置可由这两个值求出, 算式如下:

$$x_p = x_i + (-y[i]/(y[i+1] - y[i])) \quad (5)$$

在实际进行小波变换时, 由于信号的采样位置都是位于整数位置, 因此小波函数的取值也只能在整数位置。上述小波函数当尺度为 4 时在各整数位置取值为 $[-1: 0.25, 0: 0.75, 1: -0.75, 2:$

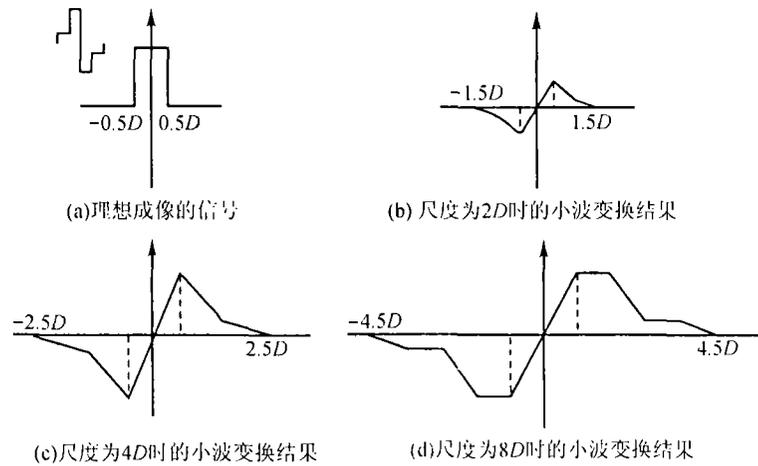


图 2 理想脚尖像的连续小波变换

$-0.25]$, 此时小波的中心变为 $x = 0.5$, 而不是 $x = 0$ 了。所以, 当用离散后的小波函数与信号进行离散小波变换时, 会使变换结果的零交叉点向左偏移 0.5 , 因此在最终求出零交叉点后再加上 0.5 才是信号的中心位置:

$$x_p = x_i + (-y[i]/(y[i+1] - y[i])) + 0.5 \quad (6)$$

上述情况是在理想成像的基础上得到的结果, 由于实际成像情况与理想情况稍有不同, 则上述结论能否继续使用? 如果脚尖像投影的峰值宽度能够多于一个像素, 则用小波变换得到的结果会在一定区域内呈线性趋势, 按照 (5) 式就可以求出真正的脚尖中心位置。但在本系统中, 信号的峰值宽度几乎只有一个像素, 边缘像素为 $1 \sim 2$ 个, 因此需要考察一下能否继续使用 (5) 式来求脚尖中心。这时小波变换的结果大致如图 3 所示。

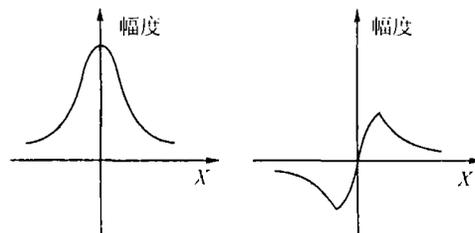


图 3 实际信号和小波变换结果

为了能够根据小波变换结果找出实际信号曲线的中心位置, 我们需要探讨一下信号曲线中心位置附近的小波变换情况。在上小节中, 我们从光学方面讨论了脚尖的光强分布函数。然而该光强分布函数过于复杂, 不利于我们对小波变换性质的讨论。根据脚尖的实际光强分布情况, Gauss 函数和其有着相似的形状。因此, 我们先用 Gauss 函数作为实际光强分布函数来讨论位于曲线中心位置附近的小波变换情况。

Gauss 函数:

$$f(x) = A \exp[-x^2/(2\sigma^2)] \quad (7)$$

当尺度为 4 时, 对应的小波变换结果为

$$\begin{aligned} W_f(b) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x)h_{2^2}(x-b)dx = A \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right] \frac{1}{2}h\left[\frac{x-b}{4}\right] dx \\ &= A \int_{-2}^2 \exp\left[\frac{-(x+b)^2}{2\sigma^2}\right] \frac{1}{2}h\left[\frac{x}{4}\right] dx \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W'_f(b) &= \frac{-A}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} (x+b) \exp\left[\frac{-(x+b)^2}{2\sigma^2}\right] \frac{1}{2}h\left[\frac{x}{4}\right] dx \\ &= \frac{-A}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} x \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right] \frac{1}{2}h\left[\frac{x-b}{4}\right] dx \\ &= \frac{-0.25A}{\sigma^2} \int_{b-2}^{b-1} x \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right] dx + \frac{-0.75A}{\sigma^2} \int_{b-1}^b x \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right] dx \\ &\quad + \frac{0.75A}{\sigma^2} \int_b^{b+1} x \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right] dx + \frac{0.25A}{\sigma^2} \int_{b+1}^{b+2} x \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right] dx \end{aligned} \quad (9)$$

从 (8) 式可以看出, 当 $b=0$ 时, $W_f(0)=0$ 。在 (9) 式中, 当 $b=0$ 时, 右端各项均为正, 因此变换结果在中心位置的斜率为正。为了画出 $W_f(b)$ 和 $W'_f(b)$ 的图形, 我们设 $\sigma=1.6$, 这能够保证函数值在区间 $[-2.5, +2.5]$ 之外能够迅速下降为峰值的 0.3 倍, 符合实际函数情形。此时 $W_f(b)$ 和 $W'_f(b)$ 的图形大致如图 4 所示。

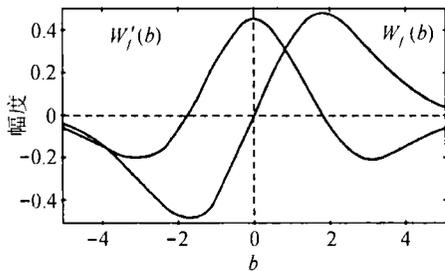


图 4 变换结果在中心附近的斜率

在图 4 中, $W'_f(b)$ 约在 ± 1.8 处等于 0, 也就是 $W_f(b)$ 达到了极值点。而在 $[-1.0, 1.0]$ 这个区间内, 其斜率从 0.26A 变化到 0.45A, 再到 0.26A。

根据上述波形, 我们仍可以把 x_i 和 x_{i+1} 之间的这一段曲线近似看成线性函数, 并利用 (5) 式来求得零交叉点。虽然这与实际的零交叉点有一定的偏差, 但对此偏差我们进行了实际验证。偏差不超过 0.02 像素, 非常小。

图 5 给出了某脚尖图像投影后的信号曲线。图 6 给出了在尺度为 4 时相应的小波变换结果。尺度选为 4, 既有利于小波函数离散化时不产生太大的误差; 又不会引入背景的影响。从图中可以看出, 实际变换结果基本符合我们的讨论。

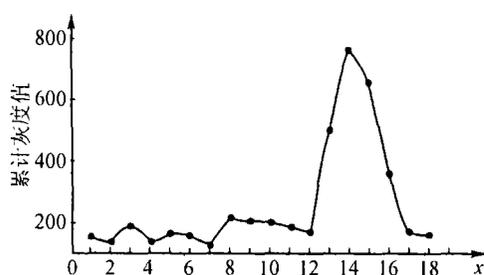


图 5 某脚尖像投影后的信号曲线

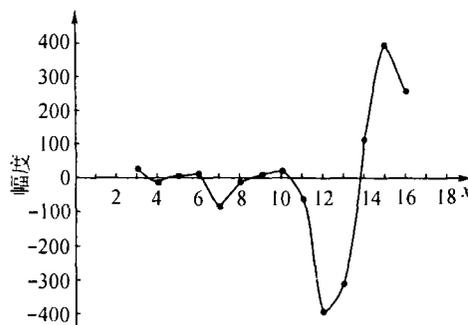


图 6 相应的小波变换结果曲线

5 结 论

集成电路芯片引脚位置偏差检测是集成电路芯片生产的一个重要环节, 而确定引脚位置的关键是能够准确地提取引脚的中心。本文采用一种新的小波函数对集成电路引脚的脚尖像的投影波形进行小波变换, 小波变换的零交叉点位置即为脚尖的中心位置。通过对实际芯片的动态检测, 采用重心方法计算脚尖中心的标准差小于 0.15 像素, 而采用小波变换计算中心的标准差小于 0.09 像素, 小波变换计算方法的随机误差小。因此, 用这种方法求取的中心位置准确, 对随机误差的干扰能力强, 提高了系统的检测精度。

参 考 文 献

- [1] 左建中等, 集成电路管脚尺寸自动检测系统的研究与实现, 制造业自动化, 2000, 22(9), 28-29.
- [2] 程正兴, 小波分析算法与应用, 西安, 西安交通大学出版社, 1998, 20-52.

THE FEATURE EXTRACTION METHOD OF VISUAL SIGNAL BASED ON WAVELET TRANSFORMING

Zhang Xinrong Zuo Jianzhong Zhang Gang Li Xiaohong

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A new method of feature extraction for visual signal is presented in this paper. The signal of the image projection, which is acquired by CCD, is transformed with wavelet. And the zero cross point of transform is located at the center of the image when the scale of wavelet is suitable. The experiment shows that the method possesses stronger robustness for stochastic error disturbance than other methods do.

Key words Image projection, Wavelet transform, Zero cross point, Feature extraction

- 张新荣: 女, 1946 年生, 教授, 主要研究方向: 图像处理 and 模式识别, 多媒体技术应用。
 左建中: 男, 1946 年生, 副教授, 主要研究方向: 计算机辅助设计, 机器视觉自动检测。
 张 钢: 男, 1960 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向: 软件工程, 多媒体技术。
 李晓红: 女, 1965 年生, 讲师, 主要研究方向: 多媒体技术应用等。