

利用压电换能器电信号检测引线键合质量

冯武卫, 孟庆丰, 谢友柏

(西安交通大学润滑理论及轴承研究所, 710049, 西安)

摘要: 以引线键合系统超声波发生器电信号作为检测键合质量的信息载体,研究了超声电信号的特征提取方法以及在键合质量检测方面的应用. 针对超声电信号的瞬态特性,提出一种基于包络分段的特征提取方法,该方法以瞬态键合过程的发生、发展和完成为分段依据,将超声电信号包络分成信号上升、稳定和衰减3个阶段,并提取每个阶段能够反映键合质量的波形特征来表征键合过程. 为了消除特征中的冗余信息并实现特征降维,采用主分量分析技术进行特征选择,通过实验数据的分析,有效地识别出了正常键合、无引线键合和根部脱落键合的状态,为引线键合质量的检测提供了一条新途径.

关键词: 引线键合; 超声电信号; 特征提取; 主分量分析; 键合质量

中图分类号: TN605 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)09-0064-05

Quality Detection of Wire Bonding Using Ultrasonic Electrical Signal of Piezoelectric Transducer

FENG Wuwei, MENG Qingfeng, XIE Youbo

(Theory of Lubrication and Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Using the electrical signal from the ultrasonic generator as the information carrier for detecting the bonding quality, the feature extraction method of ultrasonic electrical signal in bonding quality detection is investigated. A new feature extraction method based on the segmentation envelope is proposed for characterizing the transient ultrasonic electrical signal. According to the happening, developing and completing stages of a bonding process, the envelope of ultrasonic electrical signal is separated into three phases, namely envelope rising phase, stable phase, and damping phase. The waveform features are extracted from each phase of the envelope for further bonding quality detection. To remove the irrelevant information and reduce the dimension of original feature variables, the principal component analysis method is adopted for the feature selection, thus the data acquired from several different bonding conditions such as normal bonding, wire break bonding and peeled-off bonding are identified, and the result demonstrates the effectiveness.

Keywords: wire bonding; ultrasonic electrical signal; feature extraction; principal component analysis; bonding quality

键合质量是指键合完成后键合点与基板的连接状态及其互连强度,由于任何一个键合点的缺陷都可能导致整个集成电路的失效,因此深入研究键合质量的检测技术,对确保集成电路安全运行具有十

分重要的意义.

现有的键合质量检测技术可分为离线和在线检测两大类,离线检测技术是在键合完成后,通过图像获取和处理技术识别键合点的形状、位置情况等,来

评估键合质量^[1-2]. 近年来,键合质量在线检测技术发展迅速,主要是检测与键合质量相关的键合过程信息,如键合接触区域摩擦应力、键合工具振动、聚能器变形和换能器振动等,通过相应的信号处理与模式识别技术对键合过程信息进行识别,进而评估键合质量^[3-10]. 由于检测过程中严格的传感器安装要求,以及传感器与键合系统之间的相互影响制约了上述技术在工厂的实际应用,因此在键合信号处理方面,现有的技术主要是运用传统的方法,如傅里叶变换^[4] (FFT)、联合时-频分布^[6] 和包络能量^[8] 等. 由于键合信号的瞬态性,现有的方法在刻画键合信号局部变化方面存在着不足,因此不利于对复杂键合变化的准确识别.

本文采用检测键合过程中超声波发生器的电信号来识别键合点的质量,该技术直接以超声电信号作为检测质量的信息载体,无需专用传感器,从而避免了传感器的安装困难以及传感器与键合系统的相互影响. 针对键合过程中超声电信号的瞬态特性,本文提出了一种分段包络特征提取方法,能够更准确地提取超声电信号各阶段的细微变化特征,并通过缺陷数据分析,验证了本文方法的有效性.

1 检测方法原理

如图 1 所示,PPL 超声波发生器产生的超声波经压电换能器转换成高频机械振动,通过聚能器传送到键合工具的尖端. 当键合工具、引线及键合表面接触时,发生摩擦,破坏、清除表面氧化膜,致使 2 个纯净的金属面紧密接触,形成牢固的机械连接^[11].

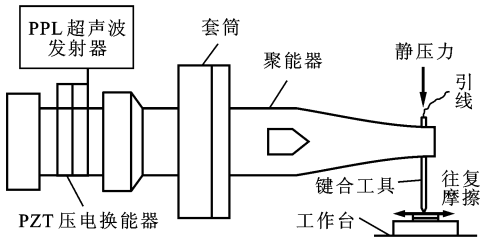


图 1 引线键合机的超声-键合系统

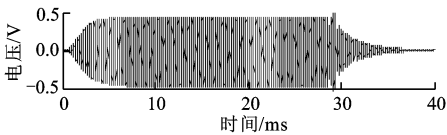
压电换能器是引线键合系统的关键设备,由于其核心构件压电晶体的双向压电效应,使得换能器既是一个执行器,也具有传感器的功能. 基于压电晶体的反向压电效应,压电换能器作为一个执行器来完成超声波电能到机械能(机械振动)的转换. 基于压电晶体的正向压电效应,压电换能器同时也具有传感器功能,在键合过程中,随着键合界面机械、材

料属性的变化,键合工具尖端的振动状况持续发生细微变化,经由键合工具和聚能器的传递,被感应到压电晶体,并直接影响到超声波发生器的电信号. 因此,通过检测超声波发生器的电信号,能够提取键合工具尖端细微的振动变化,进而评估键合质量.

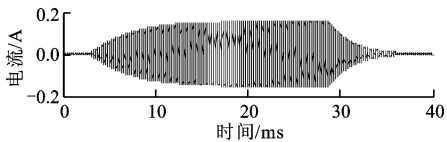
键合过程中质量的检测原理是在信号采集系统的前端安装专用测量电路,通过信号采集系统捕获键合过程的瞬态电压和电流信号,最终利用现代信号分析处理方法对超声电压和电流信号进行特征提取、模式识别和质量检测.

2 超声电信号的特征提取方法

图 2 是键合过程中采集的一组超声电压和电流信号,可以看出这些信号都是典型的瞬态信号,持续时间极短,因此采用传统的频谱分析方法无法将键合过程中各个阶段的时变信息反映出来. 采用联合时频分析方法虽然能够同时提供信号的时域和频域信息,但由于受其固有的时频分辨率的制约,因此难以将瞬态的微弱故障特征精确地刻画出来.



(a) 电压信号



(b) 电流信号

图 2 典型的超声电压和电流信号

Michael 在早期的研究中,从冶金学角度将键合过程^[10] 分为去除氧化膜、塑性变形和应力扩散,揭示了键合点形成的 3 个物理过程,对应到超声电信号包络上,则分别体现在信号的上升、稳定和衰减阶段,由于每个阶段对键合质量的贡献以及作用机理不同,因此其波形特征也必然不同. 在包络上升阶段,信号表现为持续上升,键合接触面氧化膜被逐渐破坏. 对于不同的键合样本,由于其接触面质量和氧化程度不同,因此超声信号上升的速率也会不同. 在包络稳定阶段,信号表现为小范围波动,键合点主要以塑性变形为主,键合接触面生成合金层,并形成连接强度. 在包络衰减阶段,信号表现为持续衰减,键合接触面内应力逐渐减小,键合点基本形成,其衰减

速度同样能够反映出键合点的接触摩擦状况。

2.1 超声电信号包络计算

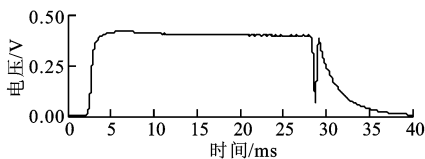
针对超声键合信号,设 $y(t)$ 是超声电压/电流信号,它的 Hilbert 变换可表示为

$$h(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

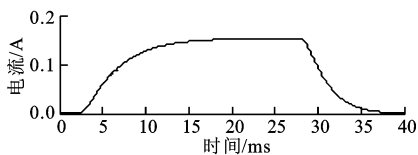
式中: t 代表时间; τ 表示延迟时间. 由此得到信号的包络

$$\alpha(t) = (y^2(t) + h^2(t))^{1/2} \quad (2)$$

由图 3 可以看出, Hilbert 变换在计算超声电信号包络上的有效性.



(a) 电压包络

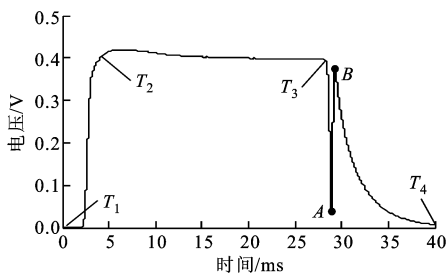


(b) 电流包络

图 3 超声电压和电流信号包络

2.2 信号包络分段特征提取

本文以超声电压信号包络为例进行特征提取, 超声电压信号包络被分成 3 个阶段, 如图 4 所示.



T_1 : 键合过程起始点; T_2 : 包络上升阶段的极大值点;

T_3 : 包络开始衰减时的点; T_4 : 键合过程结束点;

A: 衰减阶段最小值; B: 衰减阶段的波动峰值

图 4 超声电压包络分段的原理

2.2.1 包络上升阶段的特征提取 在键合过程初始阶段 ($T_1 \sim T_2$), 超声电压包络表现为持续上升, 上升的速率和幅度能够反映出此阶段键合接触区域的接触摩擦状况. 在上升阶段, 从包络信号中提取 3 个特征量来反映包络信号的变化, 即上升时间 t_s 、 T_2

的幅值 a 和上升斜率 k_s , 计算方法如下

$$t_s = t_2 - t_1; \quad k_s = a/t_s \quad (3)$$

式中: t_1 、 t_2 为包络在 T_1 和 T_2 的运行时刻.

2.2.2 包络稳定阶段的特征提取 在信号包络的稳定阶段 ($T_2 \sim T_3$), 键合点主要以塑性变形为主, 信号的包络表现为在一定范围内持续波动. 为了获取这些细微的变化, 提取了 11 个统计量来表征包络的波动程度, 即均值 v_m 、方差 d 、根值 r_e 、均方根 r_s 、峰值 p 、偏斜度 s 、峭度 k_u , 以及 4 个比例因素 $b_1 \sim b_4$. 计算方法如下

$$v_m = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x(t); \quad d = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - v_m)^2 \quad (4)$$

$$r_e = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (|x(t)|)^{1/2} \right)^2; \quad r_s = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x(t)^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$p = \max(|x(t)|); \quad s = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - v_m)^3 \right) / d_5^{3/2} \quad (6)$$

$$k_u = \left(\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - v_m)^4 \right) / d_5^2; \quad b_1 = r_e / v_m \quad (7)$$

$$b_2 = p / v_m; \quad b_3 = p / r_e; \quad b_4 = p / r_s \quad (8)$$

2.2.3 包络衰减阶段的特征提取 在包络的衰减阶段 ($T_3 \sim T_4$), 超声能量持续减小, 信号的衰减程度反映了键合完成阶段的接触情况, 因此提取 5 个特征来描述此阶段的特性, 即 A、B、 T_3 点的幅值 v_a 、 v_b 、 v_c 和衰减系数 g 和 z , 并由下式来拟合

$$f(t) = \alpha_c e^{(-g^z)t^z} \quad (9)$$

式中: α_c 为包络的起始值.

对于超声电流信号, 特征提取方法与电压包络相似, 利用本文的方法, 从超声电压和电流包络上共提取了 35 个特征量.

2.3 超声电信号的特征选择

为了消除特征间的相关性并实现特征降维, 通常需要进行特征选择. 目前, 主要有 2 种特征选择方式: ①按照某种优化标准直接从原始特征变量中进行筛选; ②采用主分量分析技术, 即通过线性变换求解一组相互独立的变量来代表原始特征变量. 从实用性方面考虑, 本文选择②进行特征选择.

2.3.1 特征向量归一化 设 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n]$ 是归一化特征矩阵, 其中 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 可以表示为

$$\left. \begin{aligned} y_i &= (x_i - \bar{x}_i) / \sigma_i^{1/2} \\ \bar{x}_i &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ij}; \quad \sigma_i = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

2.3.2 主分量计算 设 $\xi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i, \dots, \xi_n)$ 是 $\mathbf{Y}$ 的线性组合,可得

$$\xi_i = \sum_{i=1}^n c_{ij} y_i \tag{11}$$

式中: c_{ij} 为系数矩阵. 为了计算 ξ , 应先获得 $\mathbf{Y}$ 的协方差矩阵

$$\mathbf{r}_{ij} = E[y_i y_j], \quad i, j = 1, 2, \dots, n \tag{12}$$

式中: $E[\cdot]$ 代表数学期望. 若 $|R - \lambda I| = 0$, 计算 R 的特征值 $\lambda_i (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \lambda_n \geq 0)$ 和特征向量 $c_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 即

$$(R - \lambda_i I) c_i = 0 \tag{13}$$

可以证明, 正交化矩阵 $\mathbf{C} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ 能够满足主分量分析的要求, 即

$$\xi_i = \mathbf{C} y_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{14}$$

2.3.3 主分量选择 为了评估主分量的有效性和实现特征降维, 引入特征分量贡献率 $\kappa_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和累积贡献率 $\delta_k (k = 1, 2, \dots, n)$, 即

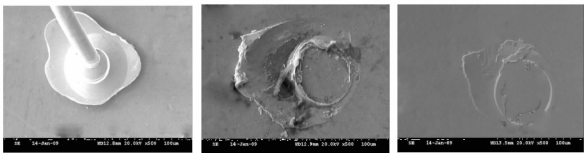
$$\kappa_i = \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \tag{15}$$

$$\delta_k = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i \tag{16}$$

如果 δ_k 达到 90%, 就可以利用前 k 个主分量代替原始特征变量, 从而实现特征降维的目的.

3 应用实例

为了验证本文的特征提取方法, 通过实验获取了 3 种键合状态实验样本, 这 3 种键合状态分别是正常、无引线和根部脱落键合. 从图 5 电镜扫描图片中可以看出, 正常键合点连接状态良好, 对于无引线状态, 在键合工具的顶端, 键合工具与基板直接接触, 根部脱落键合点在键合完成后从根部脱离, 而产生根部脱落键合点的原因主要是基板表面受到了污染.

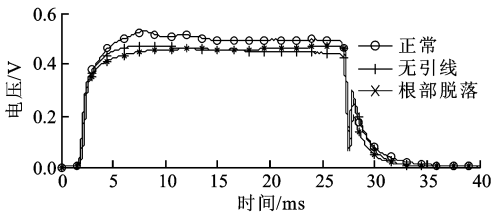


(a)正常键合 (b)根部脱落键合 (c)无引线键合

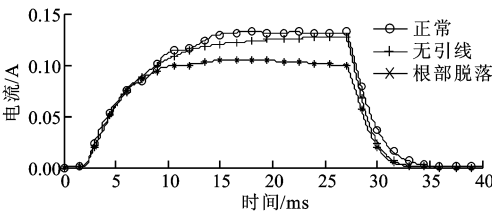
图 5 3 种键合状态的电镜图片 500×

利用本文的特征提取方法, 对电信号进行处理, 图 6 给出了一组不同状态下的超声电压和电流包络, 从直观上看, 这 3 种键合状态之间的区别非常细微. 通过本文方法对包络信号进行分段处理, 从图 7 中可以看出, 它们之间的变化特征非常明显. 表 1 给

出了几个区分 3 种键合状态变化相对敏感的特征, 定量地体现了本文特征提取方法的有效性.

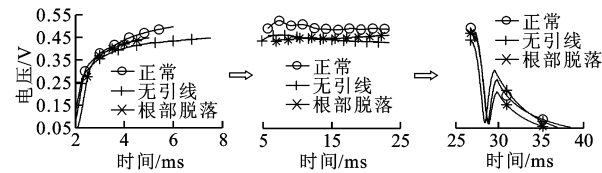


(a)电压包络

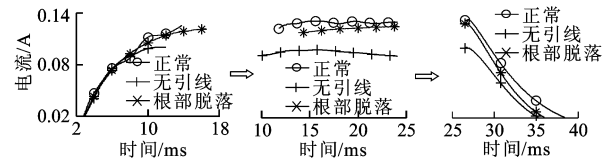


(b)电流包络

图 6 3 种不同键合状态的信号包络



(a)电压上升阶段 (b)电压稳定阶段 (c)电压衰减阶段



(d)电流上升阶段 (e)电流稳定阶段 (f)电流衰减阶段

图 7 3 种不同键合状态信号包络的分段分析

表 1 3 种键合状态的敏感特征区分

键合状态	正常	无引线	根部脱落
t_s/ms	6.1	5.2	7.8
t_{si}/ms	13.7	16.9	12.5
v_m/V	0.495	0.449	0.457
i_m/A	0.136	0.131	0.109
d	0.815	0.774	1.121

注: t_{si} 、 i_m 分别表示电流包络的上升时间和电流包络稳定阶段的均值.

本文一共获得了 180 个实验键合样本, 其中包括 90 个正常键合样本、50 个无引线样本和 40 个根部脱落键合样本. 利用本文的特征提取方法及其主分量分析技术对实验数据进行处理, 前 5 个主分量

($P_1 \sim P_5$)的贡献率见表2,可以看出,前5个主分量的累计贡献率达到了99.42%.

表2 主分量的贡献率

主分量	$\kappa/\%$	$\delta/\%$
P_1	61.35	61.35
P_2	33.76	95.11
P_3	3.67	98.78
P_4	0.49	99.17
P_5	0.25	99.42

利用 $P_1 \sim P_2$ ($\delta=95.11\%$)对3种键合状态进行分类,从图8中可以看出这3种状态被完全分开. 尽管从超声电信号中一共提取了35个特征量,但采用主分量分析方法进行处理后,就不需运用复杂的模式识别技术,仅用 $P_1 \sim P_2$ 就可以将3种键合状态进行分类,从而验证了本文方法的有效性.

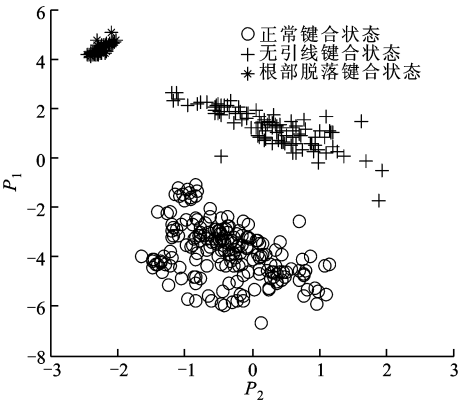


图8 3种键合状态的分类结果

4 结 论

- (1)本文完成了键合系统PZT驱动器电信号的获取,分析了驱动器电信号与键合质量的关系.
- (2)提出了一种基于分段包络的超声瞬态信号特征提取方法,提取了超声电信号各阶段的局部细微变化特征,并在表征键合过程中,运用主分量分析进行特征选择.
- (3)通过实例,验证了本文特征提取方法在检测键合质量方面的有效性.
- (4)通过计算机编程,使相关的特征提取方法和特征选择程序易于实现,因此能够达到在线检测

目的.

参考文献:

[1] KHOTANZAD A, BANERJEE H, SRINATH M D. A vision system for inspection of ball bonds and 2-D profile of bonding wires in integrated circuits [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1994,7(4):413-422.

[2] LEE H K, YOO S I. A method for inspection of ball bonds in integrated circuits[C]// IEEE SMC'99 Conference Proceedings. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999:975-980.

[3] SCHWALLER P, GRONING P, SCHNEUWLY A, et al. Surface and friction characterization by thermoelectric measurements during ultrasonic friction processes [J]. Ultrasonics, 2000,38(1/8):212-214.

[4] OR S W, CHAN H L W, Lo V C. Ultrasonic wire-bond quality monitoring using piezoelectric sensor [J]. Sensor Actuators: A, 1998,65(1):69-75.

[5] ZHANG Dong. Study of mechanism of ultrasonic wire bonding process [D]. Singapore: Nanyang Technology University, :2002.

[6] ZHANG Dong, LING S F. Monitoring wire bonding via time-frequency analysis of horn vibration [J]. IEEE Transactions on Electronic Package Manufacturing, 2003,26(3):216-220.

[7] PAUL W C, LI H L. Smart ultrasonic transducer for wire bonding applications [J]. Materials Chemistry and Physics, 2002,75(1/3):95-100.

[8] MICHEAL B, JORG W, HANS H. Bond process monitoring via self-sensing piezoelectric transducers [C]// IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference. Piscataway, NJ,USA: IEEE, 2004:125-129.

[9] PUFALL R. Automatic process control of wire bonding [C]// Proceedings of Electronic Component Technology. Piscataway, NJ,USA: IEEE, 1993:159-162.

[10] MCBREARTY M, KIM L H, BILGUTAY M. Analysis of impedance loading in ultrasonic transducer systems [C]// Proceedings of 2006 Ultrasonic Symposium. Piscataway, NJ,USA: IEEE, 2006:497-502.

[11] HARMAN G G. Wire bonding in microelectronics [M]. 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill Press, 1997:9-10.

(编辑 管咏梅)