

热超声键合换能系统动力学特性的非线性检验^{*}

宋爱军[†] 韩 雷

(中南大学机电工程学院,长沙 410083)

(2006 年 8 月 25 日收到,2006 年 12 月 10 日收到修改稿)

根据实际超声换能系统的振动测试,提出了热超声键合换能系统动力学特性的非线性检验方法,利用基于相空间重构的替代数据法,通过对换能杆末端的实测数据进行正确替代,并用非线性动力学的理论来检验其是否具有非线性.通过实验对超声换能杆末端轴向、俯仰、横向的振动时间序列的关联维数进行了准确的计算,从而清晰地描述了上述三个方向的动力学特性.所提出的方法有利于更好地认识超声键合换能系统,为建立更加合理的非线性动力学模型奠定良好的理论基础,有很好的应用价值.

关键词:超声键合,时间序列,相位随机化,替代数据

PACC: 0545, 4380

1. 引 言

在微电子封装领域,超声波金属键合技术主要用于微电子器件中固态电路内部互连接线的连接,即芯片(表面电极,金属化层材料主要为 Al)与引线框架之间的连接.随着超大规模集成电路的发展,微电子器件内引线的数目也随之增加,这对封装工艺提出了更高的技术要求.热超声倒装键合技术以其工艺过程简单、效率高、无污染等优点,在一级芯片封装领域中占有越来越重要的地位^[1].热超声倒装芯片键合中,芯片倒置在劈刀下方,通过超声能量的输入,辅以温度、压力的作用,使得芯片凸点与基板键合在一起.超声能量是由于电致伸缩效应,通过压电陶瓷将输入的电功率转换为振动功率而产生,超声振动再经换能杆及与其末端相连的劈刀传输到芯片封装界面.

换能杆末端振动直接影响到封装界面互连的可靠性.换能杆在实际工作时,其末端的振动非常复杂,包括有轴向振动、垂直方向的俯仰运动、水平方向的横向振动、扭转振动以及各种模式耦合造成的寄生振动等.文献^[2]对超声波振动器建立了数学模型;文献^[3]用有限单元法对换能杆做了模态分析;赵莉等^[4]分析了超声变幅杆的动力学特性等.然而

已有的分析均假定换能系统是线性稳态的,这与实际情况不相符.当超声键合速度节距要求越来越高,时变非线性振动将对细微键合点微互连的形成过程及其质量产生重要影响,已引起微电子封装研究者的关注.

严格上说,一切实际振动都是非线性的.近年来,随着近代实验技术、测试设备及计算机的发展,实验研究在非线性振动研究中起着越来越重要的作用,非线性振动理论也得到了迅速发展.超声换能系统实质上是一个复杂的非线性系统,在能量转换和传递过程中,换能杆与换能器之间的机械连接,换能杆材料的非均匀性以及外界噪声的干扰等都会使得系统具有明显的非线性特征^[5].文献^[6]在非线性的压电方程的基础上,建立了一个换能器的数学模型,用以描述换能系统中电压或电流的谐波的产生,讨论了对称换能器在工作频率附近时,换能系统中能量传播的机理.文献^[7]利用无损检测方法(non destructive testing),从频率滞后的角度分析了超声换能杆的非线性特性.对换能系统的非线性振动分析是为了建立正确的动力学模型,只有可靠的模型才有助于键合机理的分析和对键合过程的监控.本文对实际换能系统的振动进行了高精密度测试,采用基于相空间重构的替代数据法^[8,9],对换能杆末端振动速度有限样本的时间序列实测数据计算,首先引进

^{*} 国家自然科学基金(批准号:50575230,50390064,50675227),国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2003CB716202)资助的课题.

[†] E-mail: gdutsaj005@tom.com

非线性动力学的理论对其是否具有非线性特征进行判定,这对整个换能系统的非线性模型建立有重要的指导意义。

2. 替代数据法

热超声倒装键合用的频率为 62—63 kHz,该频率段的超声波经过换能器以机械振动的形式传到封装界面,实验获得该振动时间序列,通过研究时间序列,来分析换能系统的动力学特性。目前,时间序列的研究方法主要有两种^[10-12]:一种是以概率统计学为基础,用随机过程理论建立其线性关系模型,如回归模型,ARMA 模型等;另一种则是利用非线性动力学方法,其中研究较多的是低自由度的非线性动力系统。在用非线性动力学的方法去研究一组时间序列之前,科学的做法是首先判定该时间序列是否有非线性成分。目前判定一个给定时间序列含有非线性成分的方法有不少^[10,13,14]:在物理机理比较清楚的工程系统,可以建立动力学模型情况下,通常采用的是直接观测法,功率谱法,频闪采样法和 Poincare 截面法;但对物理机理不清楚的工程系统,无法得到系统的机理模型,可以采用关联维数法, Lyapunov 指数法和替代数据法等。其中关联维数、Lyapunov 指数等特征量的计算容易受算法和其他条件的限制。为此,Theiler 等人在 1992 年提出了替代数据法检验时间序列中是否存在非线性成分的方法^[15,16]。利用替代数据法再与其他特征量(关联维数, Lyapunov 指数,预测误差等)可以判定混沌时间序列。与其他方法相比,替代数据法虽然不能确定引起非线性的内在机理,但当它与其他方法结合使用时,可以充分发挥出两者的潜力,而且在数值计算上更加严格。其基本思想是假定原始时间序列是线性的,即称零假设(null hypothesis),再以适当的方式把该时间序列随机化,产生一组新的数据,即称替代数据(surrogate data)随机化过程均匀。如果零假设成立,即原始时间序列是线性的,由于随机化是均匀的,所以原始数据和替代数据服从相同的分布,两者具有相同的统计特性,从统计的角度来看,两者的特征量应该接近;反之,如果零假设不成立,即原始时间序列为非线性的,那么原始数据要服从确定性的非线性规律,而被均匀随机化后的替代数据则不具有这一性质,两者的特征量取值应该差别很大。因此,要检验原始数据是否含有非线性成分,只需检验替代数据和原

始数据的特征量的差别即可。超声键合是一个复合能场作用的综合实现过程,其物理机理至今尚不明确,基于上述替代数据法的优势,本文采用该方法对换能系统进行非线性检验。

2.1. 替代数据的产生

产生正确的替代数据是替代数据法中关键的一步。为了获得与原始数据有相同均值、方差和自相关函数的替代数据,Theiler 和 Prichard 提出了相位随机化的算法^[16,17]。该算法保留了原始数据的功率谱幅值,但随机产生替代数据的功率谱相位值,其基本步骤如下:

1)对原始时间序列 $x(t)$ 做快速傅里叶变换(FFT)得到

$$X(f) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-2\pi i \frac{k-1}{N} n-1} = A e^{i\phi(f)}. \quad (1)$$

2)相位随机化。将 $X(f)$ 的相位随机地旋转一个相位角 $\phi(f)$, 得到 $X'(f)$, 即

$$\phi(f) = \phi(f) + \phi(f), \quad (2)$$

$$X'(f) = A(f) e^{i[\phi(f) + \phi(f)]} = A(f) e^{i\phi(f)}. \quad (3)$$

3)对 $X'(f)$ 进行傅里叶反变换,即可得到原始时间序列的替代数据 $x'(t)$ 。从生成过程看,替代数据保留了原始时间序列的线性自相关函数,而非线性自相关性被相位随机化去除了。需要注意的是得到的替代数据必须为实数,但在实际生成过程中,替代数据并不是无偏的,受傅里叶变换算法本身的限制,原始序列经过傅里叶变换后,经相位随机化,再由傅里叶反变换得到的数据虚部可能不为零,原始数据的部分信息则丢失在虚部中,造成替代数据的不理想。对此,文献[18]提出:为了减小这种信息丢失,尽量使得替代数据的虚部为零,在相位随机化时,应保证

$$\phi(l) = \phi\left(\frac{N}{2} + 1\right) = 0,$$

$$\phi(k) = -\phi(N + 2 - k), k = 2, 3, \dots, N/2. \quad (4)$$

2.2. 基于关联维数的检验判据

在产生了替代数据后,需要确定一个合适的指标来比较原始数据和替代数据之间的异同,即检验判据的确定。关联维数, Lyapunov 指数,预测误差等统计量都可以作为检验判据。这里采用较常用的关联维数作为检验判据。从时间序列中计算关联维数的方法是由 Grassberger-Proeaeia 提出^[19]:

设 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ 一组时间序列,该序列也

可以看作是吸引子上各个点的位置. 令

$$V_n(m, \tau) = [x_n, x_{n-\tau}, \dots, x_{n-(m-1)\tau}],$$

$$n = 1, 2, \dots, N_m; \bar{V}_n \in R^m, \quad (5)$$

其中 τ 为时间延迟, $\tau = k\Delta t$, Δt 为两次相邻采样的间隔, k 为正整数,

$$N_m = N - (m - 1)\tau.$$

关联积分函数计算公式如下:

$$C_m(r, W) = \frac{2}{N^2} \sum_{j=W}^N \sum_{i=1}^{N-1} H[r - |V_{i+j} - V_i|] \quad (6)$$

式中 H 是 Heaviside 函数,

$$H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases}$$

其中, W 应满足 $W \geq \tau \left[\frac{2}{N} \right]^{2/m}$. 对充分小的 r , 关联积分逼近下式:

$$\ln C_m(r) = \ln C + D(m) \ln r, \quad (7)$$

故, R^m 中的子集 $K(m)$ 的关联维数是

$$D(m) = \lim_{r \rightarrow 0} (\partial \ln C_m(r) / \partial \ln r), \quad (8)$$

当 $D(m)$ 不随相空间维数 m 升高而改变时

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} D(m), \quad (9)$$

这就是动力系统吸引子的关联维数 D . 其中, 嵌入维数 m 的取值范围为

$$d \leq m \leq 2d + 1.$$

通过如上算法可以得到原始时间序列和替代时间序列的关联维数, 根据 S 判据^[20]:

$$S = |D_{\text{orig}} - D_{\text{surr}}| / \sigma_{\text{surr}}, \quad (10)$$

其中, D_{orig} 为原始序列的关联维数; D_{SURR} 为替代数据的关联维数, 通常产生多组替代数据, 取平均值; σ_{surr} 为替代数据的标准差. 文献 [12] 指出, 若取显著水平 $\alpha = 0.05$, 则当 $S \geq 1.96$ 时, 表明原始数据与替代数据有明显差别, 若随着嵌入维数 m 的增加, 原始时间序列的关联维数也趋于某一饱和值, 原始数据以 95% 的置信水平为非线性混沌时间序列; 当 $S < 1.96$ 时, 则原始数据以 95% 的置信水平为随机序列.

2.3. 仿真验证

用数值仿真的方法分别产生一组随机的和非线性的数组(如图 1), 用上述替代数据法来判别, 从而对算法的可靠性加以验证:

1) 取 $[0, 1]$ 内的高斯随机数, 对所产生的随机数组进行傅里叶变换, 将其相位均匀随机化, 得到一组新的频率域内的数组, 再由傅里叶逆变换得到替代数据, 此过程中, 按照(4)式产生均匀分布的随机相

位, 应尽可能使逆傅里叶逆变换后产生的替代数据虚部为零, 从而减少替代数据信息损失. 并按照文献 [18-21] 选择合适的延迟时间和嵌入维数. 原始序列及其替代数据的关联积分曲线如图 2.

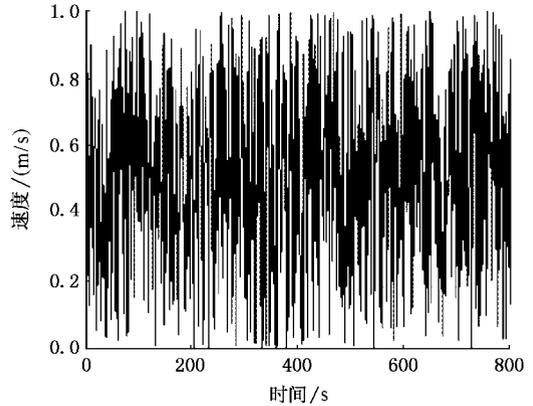


图 1 随机数组时间序列图

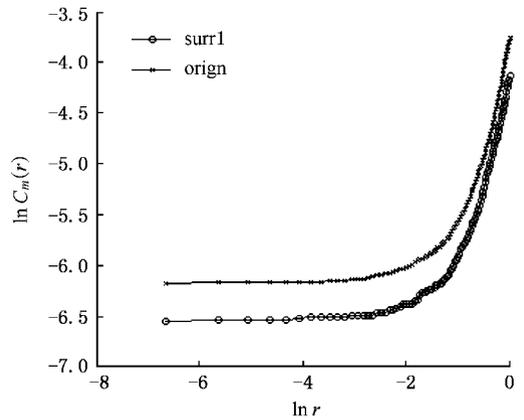


图 2 随机数据关联积分曲线

图 2 中, $surr1$ 代表替代数据关联积分曲线, $orign$ 代表原始数据关联积分曲线. 从上述关联积分曲线可以看出, 对于随机数据, 其替代数据和原始数据最小二乘法计算得到的关联维数值非常相近, 其判据 $S = 0.764$, 表明原始时间序列在经过相位随机化之后并没有发生较大的变化, 原始时间序中不含非线性混沌动力学特性.

2) 取如下 Duffing 振子为例^[22]:

$$\ddot{x} + 0.3\dot{x} - x + x^3 = 0.32\cos 1.2t$$

该方程的数值解及其相图如图 3 和图 4.

文献 [22] 已经分析了上述 Duffing 振子的非线性特性. 本文利用上述替代数据对该振子进行非线性混沌特性进行判定: 方法与 2.1 节 1) 步相同, 首先对仿真数据进行傅里叶正变换, 然后加上一组均

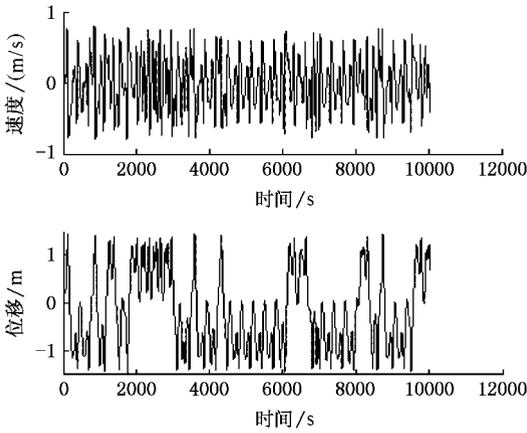


图 3 Duffing 振子时间序列图

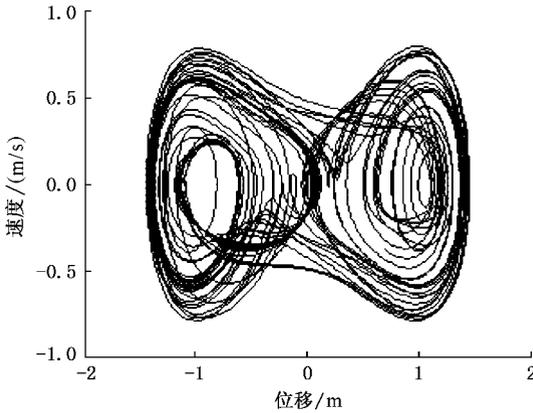


图 4 Duffing 振子相图

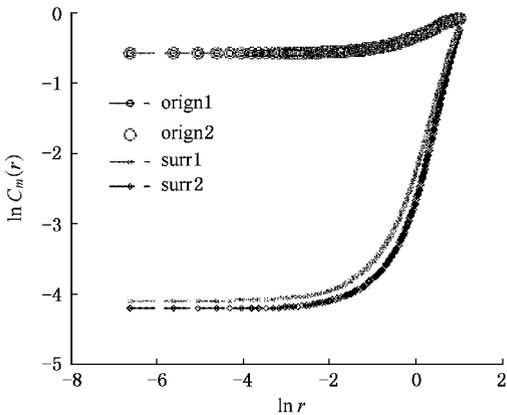


图 5 Duffing 振子关联积分曲线

匀分布的随机相位,再进行傅里叶逆变换.类似 2.3 节 1)的方法计算该 Duffing 振子的关联积分曲线如下.

分别取该 Duffing 方程的 2 组仿真数值进行分析.图 5 中,orign1 和 orign2 是原始数据的关联积分曲线,surr1 和 surr2 分别是相对应的替代数据的关联积分曲线.由曲线可以看出,经过相位随机化之后的数据的关联积分曲线变化比较明显,原始数据和相位随机化后的数据关联积分曲线在平稳段的斜率发生了较明显的变化,由此,该 Duffing 振子具有明显的非线性特性,该算法验证了 Duffing 方程的非线性特性,仿真结果与理论分析结果相符合,算法具有较高的可靠性.

3. 实验数据采集与处理

3.1. 实验装置及数据采集参数设定

实测时间序列均来自于 wetel 公司的 U3000 键合机超声换能系统,测试设备采用 PSV400M2 高频型激光多普勒测振仪,采样频率为 512 kHz;采样时间长度 32 ms;为得到稳态阶段的振动信号,触发延时采样时间设置为 9.6 ms.实验装置如图 6 所示.通过平面镜将探测激光束导入图中 B 点,获得俯仰振速.激光头与测试点的距离约 1 m.为了尽可能地减少测量过程中外界干扰的影响,所有的测试工作均在隔振台上完成.

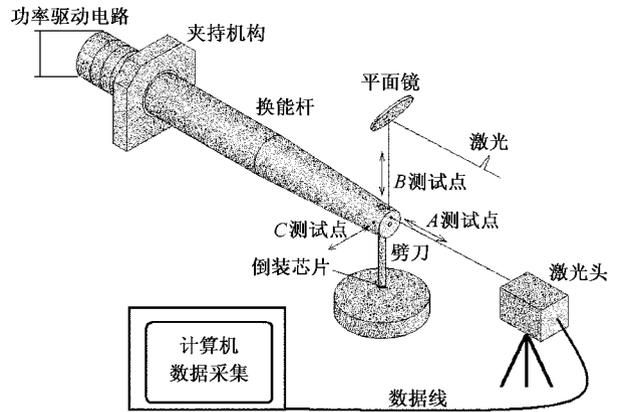


图 6 实验原理图

3.2. 换能杆末端振动速度信号非线性识别

按照前文所述的方法,在 matlab 中编写程序计算时间序列的关联维数值.在计算过程中,需要用低维的时间序列重构系统的高维相空间,相空间的维数和延迟时间的选择对重构相空间的质量影响重大.按照文献 [18] 提供的方法,计算本文所采集得到

的换能杆末端振动时间序列得到 :当时间延迟 t 取 5 相空间嵌入维数 m 取 24. 分别对换能杆轴向、俯仰方向、水平横向振动时间序列进行计算 ,为了排除在产生随机相位替代数据时因随机过程而引起替代数据的偶然性误差 ,分别对每个方向振动时间序列产生 3 组随机相位替代数据 ,取平均值 ,并绘制其关联积分曲线与原始关联积分曲线如图 7—9.

在上述的关联积分曲线中 ,利用最小二乘法对关联积分曲线近似直线段进行直线拟合^[7,23] ,求取拟合直线的斜率 ,即可得到关联维数值 $D^{[24]}$;分别计算各组数据的平均值及标准差 ,计算结果如表 1—3.

表 1 轴向振动时间序列统计量的比较

统计量	原始序列	替代数据 surr1	替代数据 surr2	替代数据 surr3
均值 \bar{x}	0.1980	0.1957	0.1860	0.1895
标准差 σ	0.974	0.960	0.908	0.936
原始 D_{origin}	1.4286			
替代 D_{surr}		1.2267	1.3358	1.3247

表 2 俯仰振动时间序列统计量的比较

统计量	原始序列	替代数据 surr1	替代数据 surr2	替代数据 surr3
均值 \bar{x}	0.1560	0.0571	0.1563	0.1569
标准差 σ	0.1746	0.1115	0.1085	0.1223
原始 D_{origin}	4.7692			
替代 D_{surr}		3.8923	4.2826	4.5180

表 3 横向振动时间序列统计量的比较

统计量	原始序列	替代数据 surr1	替代数据 surr2	替代数据 surr3
均值 \bar{x}	0.0271	0.0238	0.0255	0.0251
标准差 σ	0.0199	0.0206	0.0213	0.0215
原始 D_{origin}	3.5172			
替代 D_{surr}		3.5333	3.7643	3.6175

根据上述统计量的比较 ,可以计算 3 个方向的 S 判据 :

轴向 :

$$S = |D_{\text{orig}} - D_{\text{surr}}| / \sigma_{\text{surr}} = |1.4286 - 1.2957| / 0.935 = 1.52791 ,$$

俯仰 :

$$S = |D_{\text{orig}} - D_{\text{surr}}| / \sigma_{\text{surr}} = |4.7692 - 4.2310| / 0.1141 = 4.71721 ,$$

横向 :

$$S = |D_{\text{orig}} - D_{\text{surr}}| / \sigma_{\text{surr}} = |3.5172 - 3.6384| / 0.02113 = 5.73592$$

4. 结 论

本文通过对超声换能杆末端振动时间序列的精

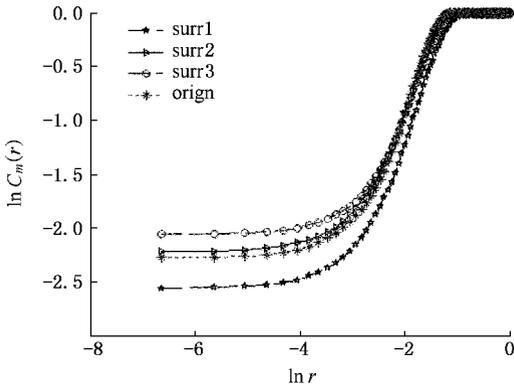


图 7 轴向振动关联积分曲线

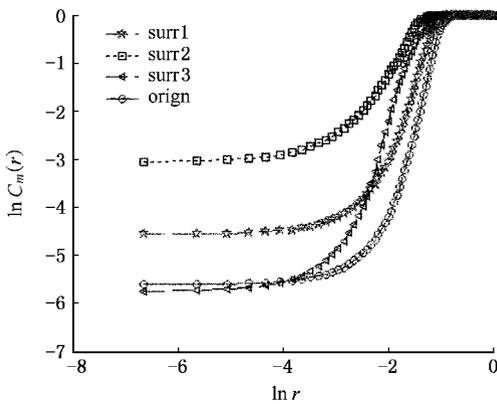


图 8 俯仰振动关联积分曲线

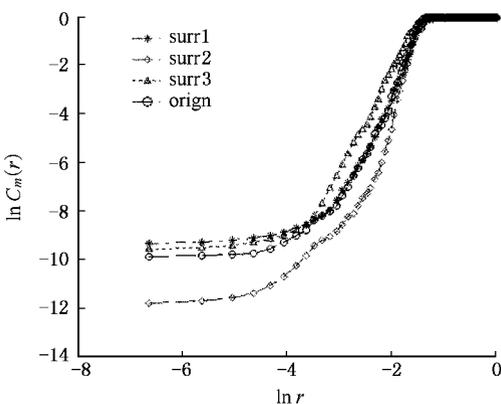


图 9 横向振动关联积分曲线

确测试,阐述了基于相空间重构的替代数据法原理,并采用仿真的方法对该原理的正确性进行了验证;结合实验对超声换能杆末端轴向、俯仰、横向 3 个方向的振动时间序列的关联维数进行了准确的计算.计算结果表明,俯仰和横向的判据 S 均大于 1.96,而轴向判据小于 1.96,这说明在超声换能杆工作时,其末端俯仰和横向振动速度信号中具有明显的非线性混沌特性,而轴向振动则不含有此特性.这有

利于我们更好的认识超声键合换能系统,并对它建立合理的非线性动力学模型;此外,引进非线性动力学理论分析复合能场下超声键合系统实测数据是本文主要创新之处,对进一步分析复合能场下的超声键合形成机理的研究有着重要的指导意义;同时也可以科学的解释在实际分析中遇到的超声键合换能系统动力学参数发生的漂移现象;对超声键合时可能产生的故障进行诊断和预测.

- [1] Long Z L , Han L , Wu Y X , Zhou H Q , Zhong J 2005 *Transactions of The China Welding Institution* **8** 23 (in Chinese) [隆志力、韩雷、吴运新、周宏权、钟 掘 2005 焊接学报 **8** 23]
- [2] Huang D Z 2005 *Journal of Vibration and Shock* **24** 126 (in Chinese) [黄德中 2005 振动与冲击 **24** 126]
- [3] Wan D A , Liu C J 2004 *Machinery & Electronics* **14** 10 (in Chinese) [万德安、刘春节 2004 机械与电子 **14** 10]
- [4] Zhao L , Wang S Y , Zha G 2005 *Electromachining & Mould* **2** 36 (in Chinese) [赵 莉、王时英、轧 刚 2005 电加工与模具 **2** 36]
- [5] Han L , Zhong J 2006 *Chinese Journal of Semiconductors* **27** 2056 (in Chinese) [韩 雷、钟 掘 2006 半导体学报 **27** 2056]
- [6] Aurelle N , Guyomar D , Richard C , Gonnard P , Eyraud L 1996 *Ultrasonics* **34** 187
- [7] Casalsc J A , Albareda A , Perez , Kayombo J H , Minguella E , de Espinosa , Montero F 2000 *Applied Physics* **11** 15
- [8] Lei M , Meng G , Feng Z J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1059 (in Chinese) [雷 敏、孟 光、冯正进 2005 物理学报 **54** 1059]
- [9] Liu Y Z , Wen X S , Hu N Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 633 (in Chinese) [刘耀宗、温熙森、胡芑庆 2001 物理学报 **50** 633]
- [10] Ma J H 2005 *Reconstruction Theory of Complex Nonlinear System* (Tianjin : Tianjin University Press) p13—15
- [11] Xie Y , Xu J X , Yang H J , Hu S J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 205 (in Chinese) [谢 勇、徐健学、杨红军、胡三觉 2002 物理学报 **51** 205]
- [12] Hou P K , Gong Y F , Shi X Z 2001 *Acta Acustica* **26** 135 (in Chinese) [侯平魁、龚云帆、史习智 2001 声学学报 **26** 135]
- [13] Wang A L , Yang C X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2719 (in Chinese) [王安良、杨春信 2002 物理学报 **51** 2719]
- [14] Romboutss Keunen R 1995 *Phys. Lett. A* **202** 352
- [15] Engbert R 2002 *Chaos , Solitons and Fractals* **13** 79
- [16] Theiler J , Ebank S , Longtin A et al 1992 *Physica D* **58** 77
- [17] Prichard D 1994 *Phys. Lett. A* **191** 245
- [18] Liu Y M , Song K O , Liu D X 2004 *Journal of Harbin Engineering University* **25** 217 (in Chinese) [刘咏梅、宋克欧、刘大昕 2004 哈尔滨工程大学学报 **25** 217]
- [19] Grassberger P , Procaccia I 1983 *Phys. Rev. Lett.* **31** 189
- [20] Xiu C B , Liu X D , Zhang Y H 2003 *Journal of Beijing Institute of Technology* **23** 219 (in Chinese) [修春波、刘向东、张宇河 2003 北京理工大学学报 **23** 219]
- [21] Yang Z A , Chen S G 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 172
- [22] Jiang W L , Zhang S Q , Wang Y Q 2000 *Chinese Journal of Mechanical Engineering* **36** 13 (in Chinese) [姜万录、张淑清、王益群 2000 机械工程学报 **36** 13]
- [23] Li Z , Feng L , Gao S H 2006 *Journal of Shandong Jiaotong University* **14** (2) 45 (in Chinese) [李 志、冯 立、臬树生 2006 山东交通学院学报 **14** (2) 45]
- [24] Liu H F , Dai Z H , Chen F , Gong X , Yu Z H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1186 (in Chinese) [刘海峰、代正华、陈 峰、龚 欣、于遵宏 2002 物理学报 **51** 1186]

Study of nonlinear identification of time series of vibration on transducer in ultrasonic bonding system^{*}

Song Ai-Jun[†] Han Lei

(*College of Mechanical and Electrical Engineering ,Central South University ,Changsha 410083 ,China*)

(Received 25 August 2006 ; revised manuscript received 10 December 2006)

Abstract

Using high temperatures and ultrasonic , ultrasonic bonding is one of the main methods in the wire bonding technology of the MEMS. The vibrations of transducer were tested. Based on the phase reconstruction theory , identification of the nonlinear characteristics was developed. In comparison with the time series along the axial direction , pitching direction and the horizontal direction , the correlated dimensions have been calculated , clearly describing the nonlinear dynamic characteristics of the transducer. It is helpful for understanding of transducer and can be used as a guide for modeling of this complicated structure .

Keywords : ultrasonic bonding , time series , phase-randomized , surrogate data

PACC : 0545 , 4380

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50575230 ,50390064 ,50675227) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2003CB716202).

[†] E-mail : gdutsaj005@tom.com