

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.11.005

劈刀悬伸长度对超声声学系统振动特性的影响研究

张云电, 冯 刚

(杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对引线键合劈刀悬伸长度对声学系统谐振频率及劈刀刀尖振幅的影响等问题, 推导出了换能器与变幅杆整体频率方程, 建立了超声引线键合声学系统的有限元模型, 开展了有限元模态分析, 通过改变劈刀相对偏移量, 得到了不同相对偏移量下对应的声学系统振动模态图、谐振频率和劈刀刀尖振幅, 从而得到了相对偏移量与声学系统谐振频率及劈刀刀尖振幅的散点图及函数关系, 在 Agilent 阻抗分析仪上对有限元分析结果进行了评价, 进行了振动参数测试。研究结果表明, 仿真结果和测试结果比较吻合, 通过改变劈刀悬伸长度可以改变声学系统的谐振频率和刀尖振幅, 当劈刀的悬伸长度为 2 mm 左右时, 刀尖振幅达到最大, 同时 劈刀悬伸长度对于系统振动模态影响不大, 且主模态与相邻模态相差较远, 可有效避免系统频率混叠现象。

关键词:有限元; 超声引线键合; 劈刀; 振动特性

中图分类号: TB533; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)11-1418-05

Effects of capillary overhang length on the vibration characteristics of ultrasonic acoustic system

ZHANG Yun-dian, FENG Gang

(College of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of the effects of capillary overhang length on acoustic resonance frequency and capillary tip amplitude, the integral equation of transducer and amplitude transformer was pulled, and the finite element model of ultrasonic wire bonding acoustic system was built. The finite element modal analysis was investigated. The figure of system vibration mode, resonance frequency and capillary tip amplitude relative to different relative offset were obtained. Thus scatter charts of relative offset with resonance frequency of acoustic system and relative offset with capillary tip amplitude were gotten through changing the capillary relative offset. At the same time the function relationship was set up. The finite element analysis results were evaluated on the Agilent impedance analyzer, the vibration parameters were tested. The results indicate that the simulation results are in agreement with the test results. Through changing the capillary overhang length, the resonant frequency and the tip amplitude of acoustic system can be changed. When the capillary overhang length is about 2 mm, the amplitude reaches the maximum. And the capillary overhang length has little effects on vibration mode of the system. Besides the adjacent modes are far away from the main mode which can effectively avoid aliasing.

Key words: finite element; ultrasonic wire bonding; capillary; vibration characteristics

0 引 言

引线键合、倒装芯片键合以及硅片键合是半导体封装的一级互连的主要工艺方法。其中, 引线键合又是这 3 种工艺方法中应用最广泛、工艺最成熟的互连

方法, 而后两种方法则代表了键合工艺的主要发展方向。但是引线键合凭借其简单的工艺、低廉的成本以及适用的封装形式较广泛而在键合方法中占据主导地位, 无论是封装行业多年的事实还是权威的预测都表明, 引线键合在可预见的未来(目前到 2020 年)仍将

收稿日期: 2015-04-05

作者简介: 张云电(1956-), 男, 安徽淮南人, 教授、博士生导师, 主要从事精密制造与特种加工方面的研究. E-mail: zzydd@hdu.edu.cn

是半导体封装尤其是低端封装内部链接的主流方式^[1]。事实上,根据近十年的发展状况来看,引线键合依然占据半导体封装的主导地位。

引线键合又分为超声引线键合、热压键合以及热超声引线键合。而劈刀是超声引线键合中所使用的键合工具,也是直接参与键合的部分,因此对于劈刀的研究是提高键合质量的关键。Z. W. Zhong 等^[2]通过激光多普勒测振仪对负载条件下劈刀末端的振动特性进行实验研究,力图通过该项研究揭示键合工具的振动特性对键合质量的影响;林书玉等^[3]根据理论分析和实验总结出纵-弯复合振动系统的共振频率和纵向振动细棒及弯曲振动细棒的关系;此外国外学者对于引线键合相关技术的研究更加深入^[4-6]。目前,国内尚未开展对楔形劈刀的悬伸长度对系统振动特性影响的相关研究。

本研究将换能器、变幅杆以及楔形劈刀所组成的超声声学系统作为一个整体,通过有限元仿真分析,探讨楔形劈刀装配高度对超声声学系统振动特性的影响。

1 理论基础

1.1 超声引线键合声学系统的组成及其工艺原理

超声引线键合声学系统主要由换能器、变幅杆及楔形劈刀组成,超声引线键合工艺原理图如图 1 所示。

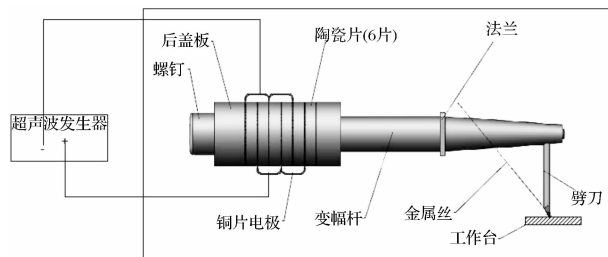


图 1 超声引线键合工艺原理图

目前普遍接受的超声引线键合的工艺原理是:通过超声波发生器输出高频电压到压电晶堆,基于压电晶堆的压电效应产生高频机械振动,再经过变幅杆的传递和放大作用把高频振动传递给键合工具,键合工具将金属丝压在芯片的焊盘上,在键合压力及超声能量的作用下使得金属丝发生流变,高频摩擦破坏了金属丝接触面的氧化层,裸露的金属原子在压力、超声能量及摩擦的综合作用下形成原子键合,从而完成芯片的互连。

1.2 数学基础

1.2.1 压电换能器与变幅杆整体的谐振频率方程

通过利用有限元软件进行模态分析,可以很方便地得到模型的模态和谐振频率等参数,但是不能得到

频率方程。相反,通过理论推导可以得到频率方程,但是推导过程往往比较复杂,而且没有有限元得到的模态图形直观。因此理论公式和有限元分析结果可以互相补充,并且可以通过使用理论推导的公式对有限元分析结果进行验证。

超声振动系统示意图如图 2 所示。对任何形状函数的变幅杆都可分割成若干个近似的直圆锥段来趋近,单个直圆锥段可以等效为一四端网络。

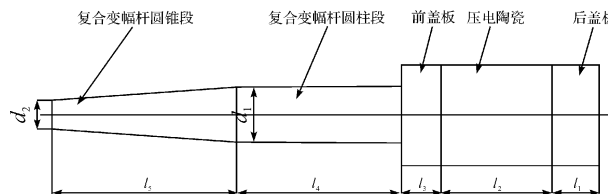


图 2 超声振动系统示意图

因此,任意形状函数组成的纵振型复合变幅杆最后都可以简化成一个等效网络,这种等效计算方法尤其适合复合级数比较多的复合型变幅杆^[7]。而如果是计算谐振频率等机械参数,压电陶瓷可以被视为无源材料,按照变幅杆的性能参数方法求解。因此,研究者可以将换能器和变幅杆整体看成机械串联,采用等效四端网络法求得其整体的频率方程。

任意形状函数的单级变幅杆都可等效成一机械四端网络,写成表达式为:

$$F_2 = a_{11}F_1 + a_{12}V_1, V_2 = a_{21}F_1 + a_{22}V_1$$

即:

$$\begin{bmatrix} F_2 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} F_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: F_1, F_2 —变幅杆两端的负载; V_1, V_2 —对应的振速; $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ —系数;不同形状参数的变幅杆,参数也不同。

如图 2 所示,本研究将换能器和变幅杆整体组成的组件分为 5 个部分,即后盖板,陶瓷晶堆,前盖板,变幅杆圆柱段和变幅杆圆锥段。根据四端网络法可将其等效为一个 5 级组件构成的超声振动系统,第 i 级可表示为一个四端网络:

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} \\ V_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^{i+1} & a_{12}^{i+1} \\ a_{21}^{i+1} & a_{22}^{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_i \\ V_i \end{bmatrix} = D_{i+1} \begin{bmatrix} F_i \\ V_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: D_i —第 i 级杆的四端网络系数。

按照组合顺序将各网络系数相乘,得到一个总的四端网络:

$$\begin{bmatrix} F_6 \\ V_6 \end{bmatrix} = D_5 D_4 D_3 D_2 D_1 = \begin{bmatrix} A_{11}^5 & A_{12}^5 \\ A_{21}^5 & A_{22}^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ V_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据自由边界条件 $F_0 = F_5 = 0$,可得到系统的频

率方程:

而常用几种单一形状组件的四端网络系数^[8]已经总结出来,分别把各系数代入 $D_1 \sim D_5$,可得:

$$A_{12}^5=0$$
$$A_{12}^5=\cos a_1\left\{\cos a_2\left[\cos a_3\left(Z_5 b \cos a_4+Z_4 c \sin a_4\right)+Z_3 c \sin a_3 \cos a_4-Z_4 Z_5 b \sin \frac{a_4}{Z_4}\right]\right\}+\\ Z_2 \sin a_2\left\{\cos a_3\left(c \cos a_4-Z_4 Z_5 b \sin \frac{a_4}{Z_4}\right)-Z_3 \sin \frac{a_3}{Z_3}\left[Z_5 \cos a_4\left(b+Z_4 c \sin a_4\right)\right]\right\}+\\ Z_1 \sin a_1\left\{\cos a_2\left[\cos a_3\left(c \cos a_4-Z_4 Z_5 b \sin \frac{a_4}{Z_4}\right)-Z_3 \sin \frac{a_3}{Z_3}\left(Z_5 b \cos a_4+Z_4 c \sin a_4\right)\right]-\\ Z_2 \sin \frac{a_2}{Z_2}\left[\cos a_3\left(Z_5 b \cos a_4+Z_4 c \sin a_4\right)+Z_3 \sin a_3\left(c \cos a_4-Z_4 Z_5 b \sin \frac{a_4}{Z_4}\right)\right]\right\}=0 \quad (4)$$

式中: $a_i=k_i l_i, i=1 \sim 5, k_i$ —后盖板,陶瓷晶堆,前盖板,变幅杆圆柱段和变幅杆圆锥段的波数; l_i —盖板,陶瓷晶堆,前盖板,变幅杆圆柱段和变幅杆圆锥段的波数的长度; Z_i —后盖板,陶瓷晶堆,前盖板,变幅杆圆柱段和变幅杆圆锥段的特性阻抗; $b=\sin a_5\left(1 / n+a^2 / a_5^2-a^2 \cos a_5 / a_5\right), n=d_1 / d_2, a=\left(d_2-d_1\right) / d_1 ; d_1$ —变幅杆圆锥段大端直径; d_2 —变幅杆圆锥段小端直径, $c=n \cos a_5+a \sin a_5 / a_5$ 。

1.2.2 劈刀的波动方程

根据 Timoshenko 梁理论,劈刀的横向弯曲波动方程^[9]如下:

$$E_d I(y) \frac{\partial^4 Z}{\partial y^4}+\rho_d S(y) \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}-\\ \rho_d I(y)\left(1+\frac{E_d}{K' G}\right) \frac{\partial^4 Z}{\partial y^2 \partial t^2}+\frac{\rho_d^2 I(y)}{K' G} \frac{\partial^4 Z}{\partial y^4}=0 \quad (5)$$

式中: $Z(y, t)$ —劈刀横向振动的位移函数; $I(y)$ —劈刀横截面的转动惯量; $S(y)$ —劈刀横截面的面积; ρ_d —劈刀材料密度; E_d —劈刀材料的弹性模量; G —劈刀材料的剪切模量; K' —劈刀横截面剪切力分布不均匀系数。

2 有限元建模

利用有限元软件 ANSYS14.5 建立的声学系统有

限元模型如图 3 所示。

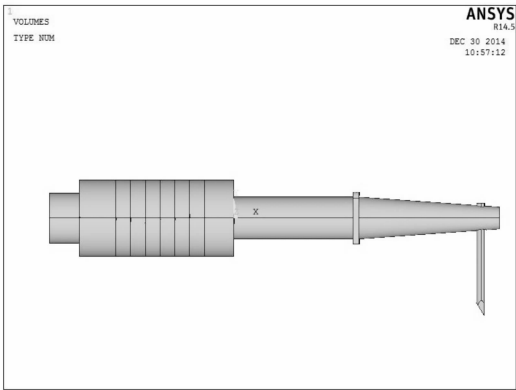


图 3 声学系统有限元模型

声学系统零部件的单元类型及材料参数如表 1 所示。本研究根据劈刀刀尖距离变幅杆中心线的垂直高度(下文简称劈刀悬伸长度)的不同,建立 13 个模型,模型中采用劈刀刀尖到变幅杆中心线垂直距离为 16.49 mm 时为标准,其余状态用劈刀相对此位置上下偏移的距离表示,其中向上偏移为正,向下偏移为负。本研究分别采用扫掠法进行网格划分,划分的单元数、节点数及模、分析结果及测量结果如表 2 所示。

表 1 各零部件相关参数

零件	材料	密度 $\rho /(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	单元类型
预紧螺钉					
前盖板后盖板	40 Gr	7 820	200	0.28	
变幅杆					Solid185
压电陶瓷片	PZT-8	7 500	76.5	0.32	
劈刀	钨钢	14 880	621	0.29	

表 2 模态分析结果

偏移距离/mm	单元数	节点数	模态数	振幅/ $\mu \mathrm{m}$	频率/kHz	测量频率/kHz
-1.5	193 939	35 655	8	0.355	62.891	63.025
-1.0	194 275	35 709	8	0.457	62.756	62.986
-0.5	188 479	34 745	8	0.508	62.742	62.954
0	188 737	34 778	8	0.493	62.799	62.992
0.5	18 816	34 784	8	0.645	62.700	62.893
1.0	188 402	34 717	9	0.671	62.830	63.037

(续表)

表 2 模态分析结果

偏移距离/mm	单元数	节点数	模态数	振幅/ μm	频率/kHz	测量频率/kHz
1.5	188 451	34 724	9	0.761	62.880	63.086
2.0	188 386	34 715	8	0.811	62.954	63.135
2.5	188 673	34 765	8	0.727	63.060	63.183
3.0	188 426	34 719	8	0.493	63.099	63.189
3.5	188 566	34 736	8	0.212	63.048	63.033
4.0	188 305	34 698	8	0.290	62.857	63.026
4.5	188 394	34 712	8	0.175	62.538	62.860

3 有限元分析

3.1 劈刀悬伸长度对声学系统谐振频率的影响

通过对声学系统有限元模态仿真分析得到,在频率范围为 50 kHz ~ 80 kHz 时,不同劈刀悬伸长度的声学系统具有 7 ~ 9 阶模态,其中谐振频率为 63 kHz 附近的振动模态为换能器与变幅杆纵向振,劈刀横向振动,比较符合理想的振动效果。使用 Matlab 2013b 分析的该模态下劈刀悬伸长度对声学系统振动频率的影响如图 4 所示。

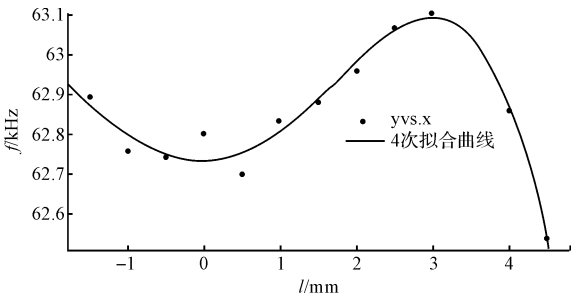


图 4 劈刀悬伸长度与声学系统谐振频率的关系

由图 4 可知,随着劈刀偏移距离从 -1.5 mm ~ 4.5 mm 变化,振动频率大致在 62.538 kHz ~ 63.099 kHz 之间变化,变化的趋势为先下降后升高最后再次下降。对比表 2 中阻抗分析仪的测量结果可知相同的劈刀偏移距离下仿真频率和测量频率结果吻合,频率大小略有区别,可能是由实际加工时的材料与零件尺寸等因素有关。本研究采用 Matlab2013b 作图工具, Curve Fitting Toll 作图并进行 Polynomial 拟合,考虑到公式的复杂程度与拟合效果,最终选择 Polynomial 4 次方程拟合,其拟合方程为:

$$f(x) = -0.004\,375x^4 + 0.000\,308\,5x^3 + 0.076\,59x^2 + 0.004\,267x + 62.73 \quad (6)$$

拟合参数为:SSE: 0.011 21, R-square: 0.962 8, Adjusted R-square: 0.944 2, RMSE: 0.037 43。

由该公式可以近似估计不同劈刀悬伸长度下,声学系统所对应的谐振频率,从而根据实际所需要的键合参数来反解劈刀应具有悬伸长度。

3.2 劈刀悬伸长度对劈刀刀尖振幅的影响

通过使用 Matlab2013b 分析的该模态下劈刀悬伸长度对劈刀刀尖振幅的影响如图 5 所示。由图 5 可知,随着劈刀偏移距离从 -1.5 mm ~ 4.5 mm 变化,劈刀尖端振幅在 0.175 μm ~ 0.811 μm 之间变化。在 -1.5 mm ~ -1 mm 之间劈刀尖端振幅快速上升,随后到 2 mm 处缓慢上升,从 2 mm 之后迅速下降。

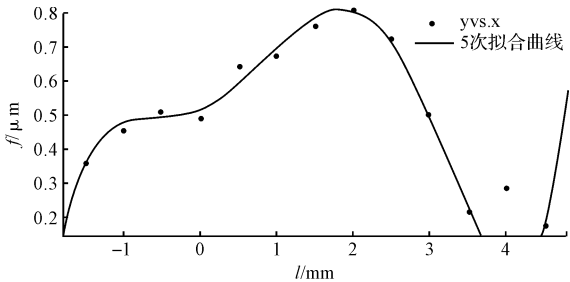


图 5 劈刀悬伸长度与劈刀尖端振幅的关系

本研究采用 Matlab2013b 作图工具, Curve Fitting Toll 作图并进行 Polynomial 拟合,考虑到公式的复杂程度与拟合效果,最终选择 Polynomial 5 次方程拟合,其拟合方程为:

$$f(x) = 0.006\,263x^5 - 0.037\,13x^4 + 0.008\,084x^3 + 0.106\,8x^2 + 0.095\,31x + 0.514\,7 \quad (7)$$

拟合参数为:SSE: 0.030 2, R-square: 0.942 1, Adjusted R-square: 0.900 7, RMSE: 0.065 68。

同样,可以根据实际所需要的键合参数来反解劈刀应具有悬伸长度。

同时对图 4、图 5 进行分析可知,当劈刀的悬伸长度为 2 mm 左右时,刀尖振幅达到最大,由于劈刀振幅是键合质量的关键影响因素之一,因此,实际操作中应选择悬伸长度为 2 mm 左右为宜。劈刀悬伸长度的变化使得声学系统的谐振频率产生波动,因此在刀尖振幅足够的情况下,可以调节劈刀悬伸长度,使得频率达到所需匹配值。因此,实际分析时可以针对不同要求选择最佳的参数,联立式(6,7)进行综合分析。

另外,由 ANSYS 有限元分析得出 63 kHz 附近的振动模态比较理想,因此笔者将该模态作为声学系统主模态。部分不同劈刀相对偏移距离下对应的主模态图如图 6 所示。

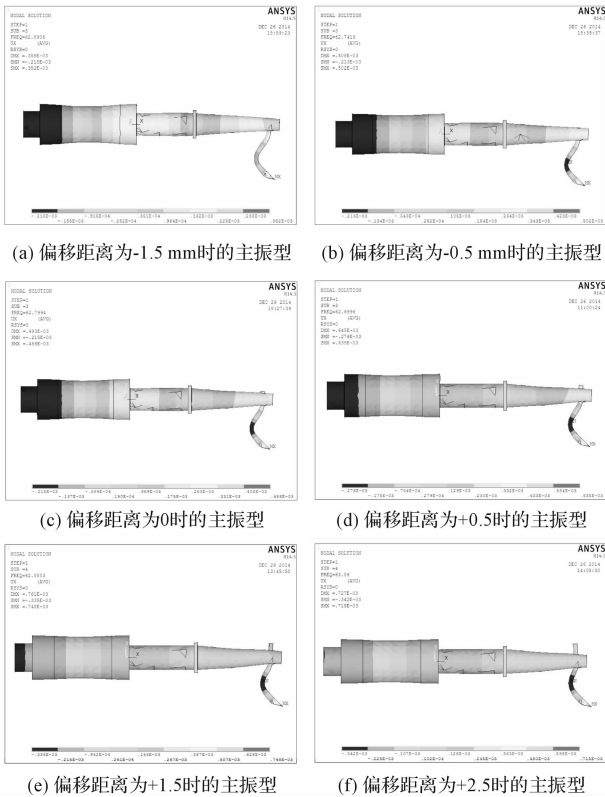


图6 部分不同劈刀相对偏移距离下对应的主模态图

由主模态图可以看出随着偏移距离的变化,主模态振型变化不大,均为换能器与变幅杆纵振,劈刀弯曲振动。通过对 ANSYS 分析结果中其他模态分析可知,其余模态为弯曲振动、扭转振动以及一些复合型振动,无法满足键合要求,且进一步分析可以得出,主振型附近有两种模态,分别为 54 kHz 与 65 kHz,与主模态频率相差几千赫兹,因此正常工作状态下不易被激发,能够很好地避免频率混叠现象造成的键合缺陷。

4 结束语

本研究通过四端网络法,推导出换能器和复合变幅杆的整体频率方程,对于换能器和复合变幅杆的整体理论设计提供依据,验证有限元分析的正确性。

随着劈刀偏移距离从 $-1.5\text{ mm} \sim 4.5\text{ mm}$ 变化,振动频率大致在 $62.538\text{ kHz} \sim 63.099\text{ kHz}$ 之间变化,趋势为先下降后升高最后再次下降。采用 Curve Fitting Toll 得到 Polynomial 5 次方程,可近似计算不同劈刀悬伸长度下的主模态频率。

随着劈刀偏移距离从 $-1.5\text{ mm} \sim 4.5\text{ mm}$ 变化,

劈刀尖端振幅在 $0.175\text{ }\mu\text{m} \sim 0.811\text{ }\mu\text{m}$ 之间变化。在 $-1.5\text{ mm} \sim -1\text{ mm}$ 之间劈刀尖端振幅快速上升,随后到 2 mm 处缓慢上升,从 2 mm 之后迅速下降。使用 Curve Fitting Toll 得到 Polynomial5 次拟合方程,可以近似计算不同劈刀悬伸长度下的劈刀刀尖振幅。

当劈刀的悬伸长度为 2 mm 左右时,刀尖振幅达到最大,因此,实际操作中应选择悬伸长度为 2 mm 左右为宜。在刀尖振幅足够的情况下,可以调节劈刀悬伸长度,使得频率达到所需匹配值。因此,实际分析时可以针对不同要求选择最佳的参数。

随着偏移距离的变化,主模态振型变化不大,均为换能器与变幅杆纵振,劈刀弯曲振动。主振型附近有两种模态,分别为 54 kHz 与 65 kHz ,与主模态频率相差几千赫兹,因此正常工作状态下不易被激发,能够很好地避免频率混叠现象造成的键合缺陷。

参考文献 (References):

- [1] 何 田. 引线键合技术的现状和发展趋势[J]. 电子工业专用设备, 2004(10):12-14, 77.
- [2] ZHONG Z W, GOH K S. Investigation of ultrasonic vibrations of wire-bonding capillaries [J]. *Microelectronics Journal*, 2006, 37(2):107-113.
- [3] 林书玉, 张明泽. 纵-弯复合系统的振动特性研究[J]. 声学技术, 1996, 15(2):85-90.
- [4] FULIANG W, C YUN, H LEI. Ultrasonic vibration at thermosonic flip-chip bonding interface [J]. *Components, Packaging and Manufacturing Technology*, IEEE Transactions on, 2011, 1(6):852-858.
- [5] KOIWA I. SiP fabricated by W-CSP using excimer laser via-hole formation and Cu electroplating [C]//Electronic Components and Technology Conference, 2009. ECTC 2009. 59th. 2009. San Diego, CA:[s. n.], 2009:15-17.
- [6] SHUREN Z. Study on abrasive flow ultra-precision polishing technology of small hole [C]//International Conference Mechatronics and Automation (LCMA), 2009. Changchun:[s. n.], 2009:37-39.
- [7] 汪彦军. 超声振动系统的设计与性能参数的计算[D]. 西安:陕西师范大学物理学与信息技术学院, 2007.
- [8] 赵福令. 超声变幅杆的四端网络法设计[J]. 声学学报, 2002(6):554-558.
- [9] 倪振华. 振动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1989.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

张云电,冯 刚. 劈刀悬伸长度对超声声学系统振动特性的影响研究[J]. 机电工程, 2015, 32(11):1418-1422.

ZHANG Yun-dian, FENG Gang. Effects of capillary overhang length on the vibration characteristics of ultrasonic acoustic system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(11):1418-1422.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>