

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.007

# 四立柱压电换能器装配机研制\*

张云电,姚晓峰

(杭州电子科技大学 机械工程学院,浙江 杭州 310018)

**摘要:**针对传统压电换能器装配方法中存在的压电换能器电声转换效率低、易发热、陶瓷片易破碎、压电换能器易松开、压电换能器和超声波发生器难以匹配等问题,为实现压电换能器的自动装配,提高装配精度,对压电换能器装配方式进行了研究。通过采用有限元的方法,设计了一种四立柱压电换能器的装配机。论述了该装配机的基本组成部分,并对机械结构进行了力学分析,介绍了电机的控制方法和控制系统的流程。利用该装配机进行了装配,并对新装配压电换能器进行了每天测量。研究表明,使用压电换能器的装配机装配效率得到了极大的提升,压电换能器的质量、稳定性和可靠性得到了提高。新装配的压电换能器在装配完后性能仍有一定的提升,在 7 天之后趋于稳定。

**关键词:**换能器装配;应力分析;压电换能器

中图分类号:TH122;TB552

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)07-0925-04

## Developing of four pillars piezoelectric transducer assembly machine

ZHANG Yun-dian, YAO Xiao-feng

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

**Abstract:** Aiming at piezoelectric transducer electrically low acoustic conversion efficiency, liable to cause heat, damage, piezoelectric transducer and the ultrasonic generator was difficult to match in traditional assembly method and in order to realize the automatic assembling of piezoelectric transducer and improve assembly precision, study on the assembly method, four pillar of piezoelectric transducer assembly machine was developed. The basic parts of the assembly machine was discussed. The mechanical structure of mechanical was investigated through simulation analysis, the motor's control method and process of control system was introduced. New piezoelectric transducer was assembled, and the performance parameters of the piezoelectric transducer was measured. The research results indicate that it is high efficiency, and this assembly method can improve the quality, stability and reliability of piezoelectric transducer. The quality of piezoelectric transducers is increase, and it tends to be stable after 7 days.

**Key words:** transducer assembly; stress analysis; piezoelectric transducer

## 0 引 言

压电换能器是将超声频电振荡信号转换为超声频机械振动的部件。由螺母、反射罩、压电陶瓷片、铜片、绝缘套、螺栓、声头组成。具有压电效应和逆压电效应,是所有功率超声的核心部件<sup>[1]</sup>。压电换能器装配时,压电陶瓷与金属块接触良好与否,预紧力的大小,对谐振频率和阻抗的影响很大<sup>[2-3]</sup>。传统的装配方法是通过扳手或者扭矩扳手进行装配,这种装配方法导致压电换能器电声转换效率低、易发热、陶瓷片易破

碎、压电换能器易松开、压电换能器和超声波发生器难以匹配等问题<sup>[4-6]</sup>。而且,传统的装配方式存在装配精度低、速度慢、人工劳动强度大等缺点。

因此,为了解决传统装配方式中存在的问题,提高压电换能器的质量、稳定性和可靠性,提高压电换能器装配效率,本研究设计一种压电换能器装配机,通过 Solidworks 软件对压电换能器装配机进行三维建模,并对装配 15 kHz 和 20 kHz 压电换能器两种工况进行有限元分析,得到了两种工况下压电换能器装配机整体结构的应力值和受力云图,并使用装配机装配压电换

收稿日期:2015-01-21

基金项目:国防基础科研计划资助项目(A3920133001)

作者简介:张云电(1956-),男,安徽淮南人,教授,博士生导师,主要从事光机电一体化技术方面的研究。E-mail:zyydd@hdu.edu.cn

能器。由于新装配的压电换能器性能不稳定,本研究每天使用阻抗分析仪和万用表对新装配好的压电换能器进行测量,以此得到压电换能器性能参数变化曲线。

## 1 装配机结构和工作原理

### 1.1 压电换能器装配机工作原理

由于压电换能器的压电效应,压电换能器在拧紧过程主要是利用电压传感器采集压电换能器两端铜片上的电压值,测得电压值后就可以准确判断压电换能器的性能,对电压传感器采集压电换能器铜片两端由于压电效应产生的电压的大小,来确定拧紧时需要扭矩的大小。其中,电压与扭矩关系的表达式为:

$$Q = \frac{5Td_{33}}{dC} \quad (1)$$

式中: $Q$ —陶瓷片产生的电荷量, $T$ —拧紧扭矩, $d_{33}$ —压电常数, $d$ —螺纹公称直径, $C$ —电容值。

最后,利用 PLC 控制器对电压值进行对比,当电压值达到设定值时,PLC 控制电机停止转动,完成对压电换能器的装配。

控制系统流程如图 1 所示。

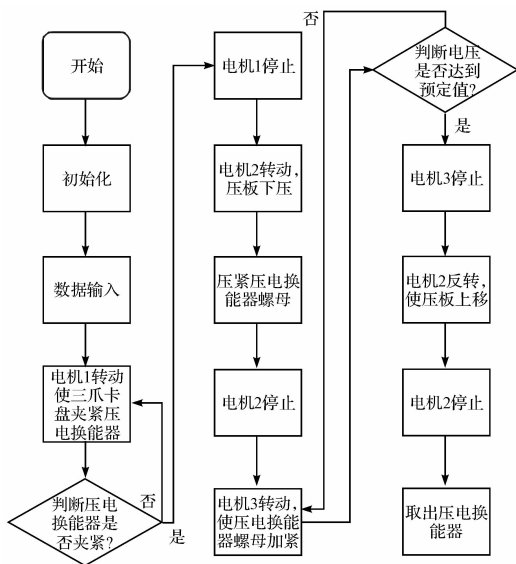


图 1 PLC 控制流程

### 1.2 压电换能器装配机结构

压电换能器装配机由电机、三爪卡盘、套筒扳手、机械传动结构、数字信号采集处理系统、控制器等部分组成。装配机工作主要由夹紧、传动、拧紧三个步骤组成。首先,三爪卡盘夹紧压电换能器,电机带动丝杠,使压板向下压紧压电换能器。最后,另一电机通过减速机,带动套筒扳手对压电换能器拧紧。装配机结构如图 2、图 3 所示。

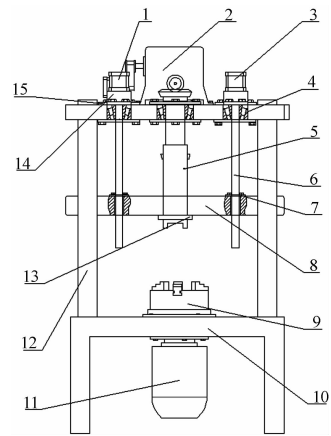


图 2 四立柱压电换能器装配机主视图

1—步进电机;2—减速机;3—步进电机;4—轴承;5—套筒扳手;6—丝杠;7—丝杠副;8—压板;9—三爪卡盘;10—机座;11—电机;12—立柱;13—定位压板;14—电机座;15—轴承端盖

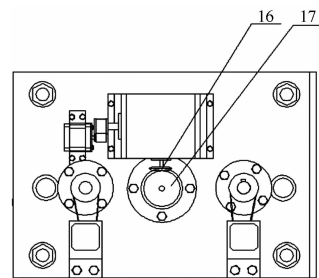


图 3 四立柱压电换能器装配机俯视图

16—小齿轮;17—大齿轮

## 2 压电换能器装配机有限元模型

### 2.1 有限元模型建立

装配机的整体力学性能对装配质量、疲劳寿命、工作频次及工作能耗等有决定性的影响<sup>[7]</sup>。本研究对装配机整体进行分析。

压电换能器装配机主要钢结构是采用 45 钢<sup>[8]</sup>,其主要参数性能如表 1 所示<sup>[9]</sup>。

表 1 45 钢主要材料性能参数

材料名称	45 钢
杨氏模量/MPa	210
泊松比/MPa	0.31
弯曲强度/MPa	355
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	7.85

根据简化原则,本研究忽略小特征、小尺寸的孔和受力影响较小的零件,结合表 1 参数建立了压电换能器装配机有限元模型。

### 2.2 压电换能器装配机受力分析

压电换能器装配机在拧紧压电换能器的过程中,电机转动,套筒扳手受到拧紧力矩  $T$  的作用。螺纹连接的拧紧力矩  $T$  等于克服螺纹相对转动的阻力矩  $T_1$  和螺纹支撑面上的摩擦阻力矩  $T_2$  之和,即:

$$T = T_1 + T_2 = \frac{F_a d_2}{2} \tan(\varphi + p') + f_c F_a r_f \quad (2)$$

式中: $F_a$ —轴向力,对于不承受轴向工作载荷的螺纹; $F_a$ —预应力; $d_2$ —螺纹中径; $f_c$ —螺纹与被连接件支承面之间的摩擦系数。本研究中取0.15, $F'$ 取0.15, $F_c$ 取0.15<sup>[10]</sup>。

$$r_f \approx \frac{d_w + d_0}{4} \quad (3)$$

式中: $r_f$ —支撑面摩擦半径, $d_w$ —螺母支承面的外径, $d_0$ —螺栓孔直径。因此,式(2)可化简为:

$$T \approx 0.2 F_a d \quad (4)$$

式中: $d$ —螺纹公称直径。

此外,压电陶瓷片的预应力为 $3\,000\text{ N/cm}^2 \sim 3\,500\text{ N/cm}^2$ 。装配20 kHz的压电换能器时,由于压电换能器使用M16螺栓,取压电陶瓷片预应力为 $3\,500\text{ N/cm}^2$ ,得:

$$F_{a1} \approx 60\,000\text{ N}, T_1 \approx 190\text{ N} \cdot \text{m}$$

装配15 kHz的压电换能器时,由于压电换能器使用M22的螺栓,取压电陶瓷片预应力为 $3\,500\text{ N/cm}^2$ ,得:

$$F_{a2} \approx 88\,000\text{ N}, T_1 \approx 385\text{ N} \cdot \text{m}$$

同时,在拧紧过程中,压电换能器使套筒扳手产生的扭矩分别为: $T_3 = -190\text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $T_4 = -385\text{ N} \cdot \text{m}$ 。

此外,由于压电效应,压电换能器反作用于套筒扳手垂直向上的力分别为: $F_{a3} = 60\,000\text{ N}$ 和 $F_{a4} = 88\,000\text{ N}$ 。

## 2.3 网格划分

首先,应进行有限元的前处理工作,即网格划分。网格划分对后期的计算过程将产生较大的影响。本研究对装配机进行单元网格划分后,得到节点数10 415,单元数5 324。

## 2.4 结果读取

在装配15 kHz和20 kHz压电换能器两种工况下,装配机整体结构的应力云如图4所示。

## 2.5 装配机有限元计算结果分析

查阅材料参数手册<sup>[11]</sup>,可知45钢的屈服应力值为355 MPa。根据屈服应力规定的安全因素,通常 $1.5 \leq n_s \leq 2.2$ ,取 $n_s = 1.8$ ,通过计算得到许用应力 $\delta = \delta_s / n_s = 197.2\text{ MPa}$ 。

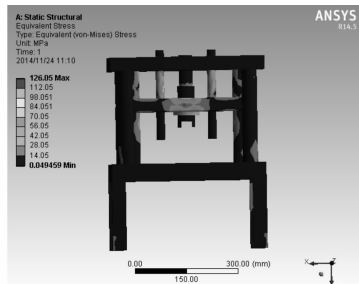
从上面两种工作状态下的应力云图可以看出,最大应力分别为126.05 MPa和184.87 MPa,均小于45钢的许用应力,满足压电换能器装配机强度设计的要求。

# 3 实验及结果分析

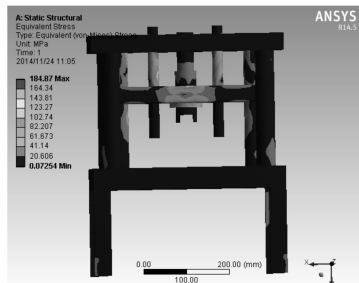
## 3.1 实验准备

本研究自行加工压电陶瓷片、前后金属盖板、预应力螺栓、金属电极片以及预应力螺栓绝缘套管等材料,零件图如图5所示。

本研究将压电换能器预装配后,通过压电换能器



(a) 装配20 kHz压电换能器时,装配机应力云图



(b) 装配15 kHz压电换能器时,装配机应力云图

图4 两种工况下装配机整体结构应力云图



图5 压电换能器零件图

装配机装配压电换能器,装配好的压电换能器如图6所示。



图6 新装配的压电换能器

实际装配试验结果表明,使用压电换能器装配机装配一个压电换能器的时间为1'30",与传统的压电换能器装配方法相比,装配效率得到了极大的提升,装配时间仅仅是传统装配方法的1/10。

## 3.2 实验测量及分析

压电换能器的谐振频率、阻抗、静态电容是衡量压电换能器性能的主要参数,但实验发现,新装配的压电换能器在装配完成后一段时间内谐振频率、阻抗、静态电容不断地变化。因此,本研究在用压电换能器装配机装

配压电换能器之后,再使用 TH2818 阻抗分析仪测量压电换能器谐振频率和阻抗,用万用表测量静态电容,获得的压电换能器的谐振频率、阻抗和静态电容如表 2 所示。

表 2 新装配的压电换能器参数性能

压电换能器	谐振频率 $f/\text{kHz}$	阻抗 $R/\Omega$	电容 $C/\text{nF}$
换能器 1	19.57	9.54	11.63
换能器 2	19.43	12.99	10.85

装配结果表明,新装配的压电换能器频率、阻抗和静态电容满足压电换能器性能要求。

本研究将新装配好的压电换能器使用阻抗分析仪和万用表每天定时测量,得到谐振频率、阻抗和电容随时间变化的曲线如图 7 所示。

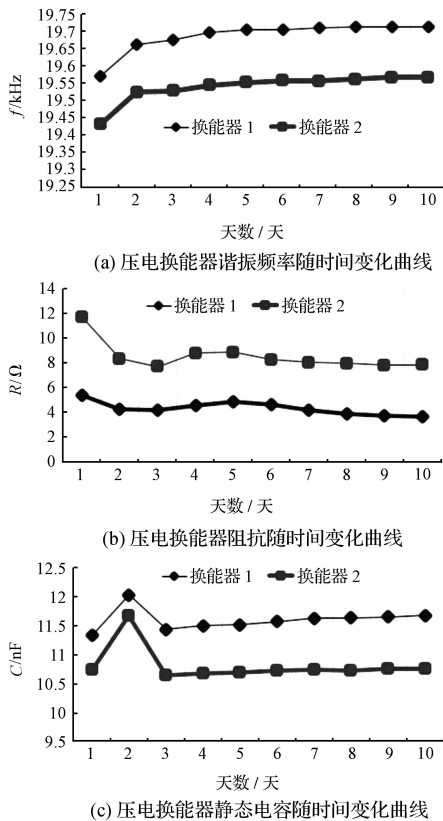


图 7 新装配压电换能器性能变化曲线

由图 7 可以看出,随着时间的推移,两个新装配的压电换能器谐振频率不断地升高,阻抗总体呈下降趋势,静态电容在在装配好的第 2 天突然升高和第 3 天下降后,也逐步升高。最后,压电换能器谐振频率、阻抗和静态电容在第 7 天之后趋于稳定。因此,可以得出新装配的压电换能器在装配完后的一周内性能仍有一定的提升。

## 4 结束语

(1) 装配机应力云图能够客观反映装配机的受力情况,并且应力控制在合理的范围内,满足了设计工作的需要。本研究通过 PLC 控制扭矩的大小,实现了换能器的装配自动化。

(2) 与传统的压电换能器装配方法相比,使用本装配机装配效率得到了极大的提升,使用装配机装配,装配时间仅仅是传统装配方法的 1/10。同时,装配质量也有很大的提升。

(3) 新装配好的压电换能器随着时间的推移,谐振频率不断升高,阻抗不断下降,静态电容除第 2 天和第 3 天变化明显外,逐步上升,但上升幅度不大。并且,谐振频率、阻抗和静态电容都在 7 天之后趋于稳定,第 10 天时,谐振频率已经从 19.57 kHz 和 19.43 kHz 分别升至 19.711 kHz 和 19.567 kHz。阻抗从 5.413 Ω 和 11.713 Ω 分别下降至 3.671 Ω 和 7.835 Ω。静态电容从 11.34 nF 和 10.75 nF 分别上升至 11.69 nF 和 10.77 nF。新装配的压电换能器性能得到了提升。

### 参考文献 (References):

- [1] 张云电. 夹心式压电换能器及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] ARNOLD F J, MUHLEN S S. The resonance frequencies on mechanically pre-stressed ultrasonic piezotransducers [J]. *Ultrasonics*, 2001, 39(1): 1-5.
- [3] ARNOLD F J, MUHLEN S S. The mechanical pre-stressing in ultrasonic piezotransducers [J]. *Ultrasonics*, 2001, 39(1): 7-11.
- [4] 张云电, 付群利. 夹心式压电换能器装配质量判别方法与实现 [J]. *机电工程*, 2009, 26(1): 32-34.
- [5] 张云电, 付群利. 压电换能器装配机自动控制系统的研究 [J]. *杭州电子科技大学学报*, 2008, 37(10): 28-30.
- [6] 王毅, 陆明, 丁士轩. 基于压电式压力传感器的冲击波载荷测试系统设计 [J]. *机械*, 2014(12): 68-72.
- [7] 施劲宇. 基于接触有限元的预紧组合机架力能分析 [J]. *机电工程*, 2014, 31(3): 354-357.
- [8] 郑景润. 基于包装机械的超声焊接技术研究及应用 [J]. *包装与食品机械*, 2014(5): 53-57.
- [9] 杨可桢, 程光蕴, 李仲生. *机械设计基础* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 吴宗泽, 罗圣国. *机械设计课程设计手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] 朱龙根. *简明机械零件设计手册* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

[编辑: 李 辉]

### 本文引用格式:

张云电, 姚晓峰. 四立柱压电换能器装配机研制 [J]. *机电工程*, 2015, 32(7): 925-928.

ZHANG Yun-dian, YAO Xiao-feng. Developing of four pillars piezoelectric transducer assembly machine [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(7): 925-928.