

文章编号 1004-924X(2015)06-1605-07

## 精密微小组件压装技术及仪器

姜志峰<sup>1</sup>, 王晓东<sup>1,2</sup>, 由博<sup>2</sup>, 许阳<sup>2</sup>

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**根据一种过盈联接精密微小组件的装配要求,研制了一套精密微小组件自动压装仪器。通过分析压装过程中压装力与系统弹性变形的变化关系,对组件的压装位移进行了有效补偿。采用具有上下视野的机器视觉装置测量压装组件的相对位置,并采用 XY 位移平台对组件进行精确对准。提出了对具有上下视野的机器视觉装置的标定方法;分析了组件压装力与压装位移的关系,得出了压装力-位移曲线的预测值。对随机抽取的 5 套零件进行了装配实验,结果表明:对组件进行精密对准后,组件压装位移-压装力曲线符合预测值;组件装配后相对位置的距离偏差小于 $\pm 5 \mu\text{m}$ ,垂直度偏差小于 $10 \mu\text{m}$ 。实验表明组件装配精度达到了设计指标要求。

**关键词:**微小组件;过盈联接;压装仪器;零件对准

**中图分类号:**TH706 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1605

## Pressing-fitting technology and instrument for precision small parts

LOU Zhi-feng<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<sup>1,2</sup>, YOU Bo<sup>2</sup>, XU Yang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of the Ministry of Education,  
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province,  
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

\* Corresponding author, E-mail: louzf@dlut.edu.cn

**Abstract:** According to the assembling demands of precise small parts with interference fitting, a precision pressing-fitting instrument for assembling small parts was developed. Through analyzing the relation of pressing-fitting force and the instrument's elastic deformation in pressing-fitting process, the parts' pressing-fitting displacement was compensated to increase assembly accuracy. A kind of machine vision device with upper and lower vision fields was used to detect relative situation of parts, and a XY displacement platform was used to align the positions of the parts. A calibration method of the machine vision device was proposed. The relation between pressing-fitting force and pressing-fitting displacement was analyzed, and the predicted values of force and displacement were proposed to judge the assembly rationality. Five kinds of parts obtained randomly was assembled. The experimental results show that pressing displacement-pressing force curve is consistent with the predicted values. The parts' relative position deviation is less than  $\pm 5 \mu\text{m}$ , and vertical deviation is less than  $10 \mu\text{m}$ , which meets the requirements of the assembly accuracy index.

**Key words:** small part; interference fitting; pressing-fitting instrument; part alignment

收稿日期:2014-12-30;修订日期:2015-02-13.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2013ZX04001091)

## 1 引言

精密微小型器件具有体积小、重量轻等优点,被广泛应用于航空、航天、兵器等领域。该类零件的装配质量直接影响系统性能的可靠性和稳定性。对于一些结构复杂的零件组装,一般仍然以手工装配为主,对装配工人个人经验的依赖较强,使产品的可靠性和质量一致性较差。因此,精密微小型零件的装配技术已成为微小组件制造技术的瓶颈之一。

目前,微装配技术在微机电系统、纳米制造、精密光电子工程、生物工程、医学等领域<sup>[1]</sup>极受关注,国内外学者均进行了相关研究。吴文荣<sup>[2]</sup>综合了微夹持技术和显微在线检测技术,研制了核聚变所使用微靶的装配系统。张习文<sup>[3-4]</sup>针对跨尺度微小型零件的精密装配中显微视觉视场狭小与零件的特征尺寸跨度较大相矛盾的问题,研究了跨尺度零件的位姿检测技术,基于高、低倍显微视觉单元研制了自动装配系统。赵林惠<sup>[5]</sup>等采用多传感器、真空吸附式微夹钳、单摄像机等制作了某微小型平板类零件的自动装配系统。唐永龙<sup>[6-7]</sup>针对平板类零件微装配系统设计过程中面临的问题,提出采用正交光学对准机构,实现人机协同微装配系统对微小型平板类结构件的高精度装配,并计算了高精度对准机构模块产生的误差。Aditya N D<sup>[8]</sup>等针对结构复杂的微纳米系统的装配,研制了多尺度自动化装配系统;该系统基于模块化和可重构的设计思想,可根据任务的不同对装配系统进行重新组装。Zheng Xu<sup>[9]</sup>等在已研制的自动化微装配系统基础上,提出了 RP (Rotating-then-pushing) 和 PP (Picking-up-then-placing-down) 两种装配方法,使系统的运动精度达到  $1\ \mu\text{m}$ ,提高了装配速度、增加了系统中夹钳的可互换性。

一般情况下,微小零件装配操作需要的装配力较小,所以测量和控制的对象主要是定位精度或重复定位精度,装配过程相对较为容易。但对于孔轴类精密微小零件的过盈装配,不仅需对组件进行严格对准,而且需准确控制与测量压装力和压装位移。因此,如何保证压装过程中压装力和位移处在合理范围,且组件装配后精度符合技术要求,从而保证过盈联接精密微小零件的压装

质量是亟待解决的问题。

本文根据一种过盈联接精密微小零件的装配要求,研制了自动压装系统,基于机器视觉对准方法,采用相关控制策略,实现了对零件压装力-压装位移测量及精密压装。

## 2 微小组件精密压装仪器

### 2.1 微小组件结构

待压装的衔铁组件(如图 1)是电液伺服阀中的关键组件,由衔铁、弹簧管与反馈杆等组成。衔铁内孔与弹簧管外轴配合基本尺寸为  $9\ \text{mm}$ ,过盈量为  $12\sim 14\ \mu\text{m}$ ;反馈杆外轴与弹簧管内孔配合基本尺寸为  $5\ \text{mm}$ ,过盈量为  $5\sim 8\ \mu\text{m}$ 。按照装配工艺,首先将衔铁内孔压装套入弹簧管外壁,然后将反馈杆压入弹簧管内孔。组件压装完成后,要求衔铁两端面相对于弹簧管底面距离偏差小于  $7\ \mu\text{m}$ ,平行度偏差小于  $10\ \mu\text{m}$ 。另外,反馈杆挡板相对于弹簧管底边垂直度偏差小于  $10\ \mu\text{m}$ 。

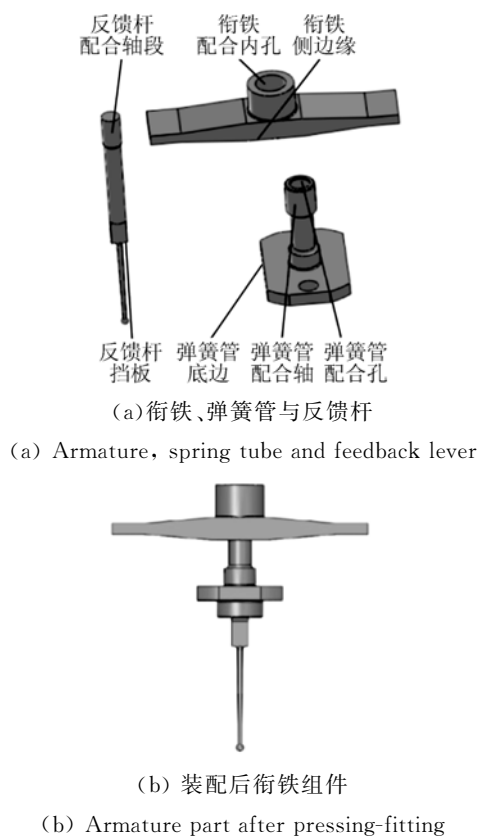


图 1 衔铁组件装配

Fig. 1 Armature part's assembly

### 2.2 精密压装仪器设计

针对衔铁组件装配要求,研制的微小组件压装仪器如图 2 所示,主体结构是由 4 根导向轴作为导向和支柱的框架,由固定于底部的力传感器和侧面的光栅尺测量压装过程中的压装力和位移。机器视觉装置安装在 3 自由度精密位移平台上,用于检测被压装零件的相对位置,XY 位移平台和回转平台用于调整压装零件相对位置。直线推杆用于推动移动横梁上下运动,在压装过程中施加压装力。压装夹具装置包括上、下两部分,实现被压装零件的夹持和定位。

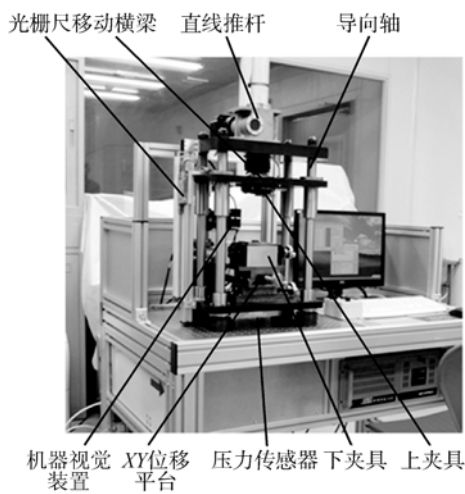


图 2 研制的压装设备

Fig. 2 Pressing-fitting instrument

衔铁和反馈杆的夹持与定位由上夹具完成。上夹具安装于移动横板下端面,如图 3 所示。该部分由回转平台、施力圆台与精密气爪组成。气爪安装在回转平台上,可以调整零件的角度位置。由于部分衔铁与弹簧管尺寸规格限制,仪器配备了二次压装圆柱,用于完成组件分步压装。

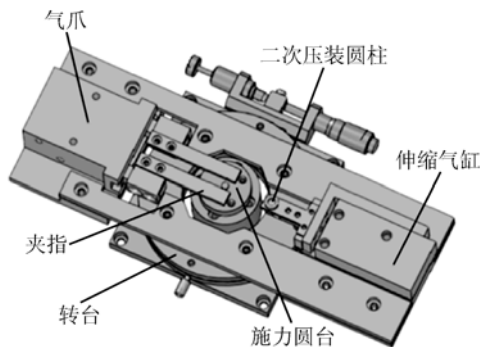


图 3 压装上夹具

Fig. 3 Upper fixture

弹簧管由下夹具夹持定位。下夹具主要由移动横板、定位半圆块及安装于内部的夹指组成。如图 4 所示,移动横板可在支架上自动分开与闭合;定位半圆块对弹簧管在压装过程中提供支撑作用;夹指夹持弹簧管底边,摆正零件位置<sup>[10]</sup>。

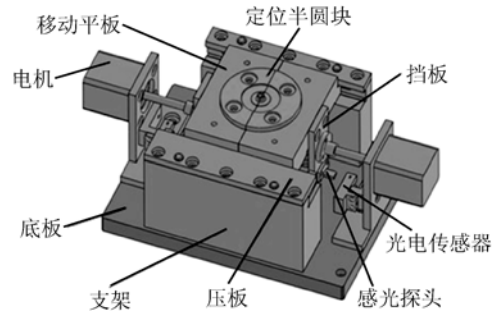


图 4 压装下夹具

Fig. 4 Lower fixture

在压装过程中,手动控制上夹具气爪将衔铁夹持,下夹具对弹簧管进行定位夹紧,通过机器视觉装置观察衔铁与弹簧管的相对位置,由回转圆台及 XY 位移平台调整二者相对位置。压装过程中,直线推杆推动移动横梁,对衔铁与弹簧管施加压力。反馈杆的压装过程与上述步骤相似。

### 3 压装仪器关键技术分析

#### 3.1 压装位移控制与补偿

在组件压装过程中,随着施加压装力的变化,压装仪器的部分部件会发生弹性变形。由于仪器采用光栅尺对移动横梁位移进行测量,进而测量组件压装位置,因而部件弹性变形会直接影响组件的压装位移精度。为保证压装位移精度,需精确测量不同压装力下系统的弹性变形量,并进行有效补偿。

采用移动横梁对下夹具定位半圆套施压,由于下夹具、XY 位移平台等组件存在弹性变形,随着施加的压力增大,移动横梁会产生微小移动,光栅尺读数会发生变化,该变化量即为在不同压装力作用下的部件弹性变形总量。

压装力与系统弹性变形关系如图 5 所示。对测量点进行拟合,压力与变形的关系为:

$$y=0.049 2x+25.86, \quad (1)$$

式中： $x$  为压装力(N)， $y$  为组件弹性变形量( $\mu\text{m}$ )。

对压装过程中的系统弹性变形进行补偿后，经压装实验验证，组件压装位置偏差可以控制在 0.005 mm，满足衔铁组件的压装精度要求。

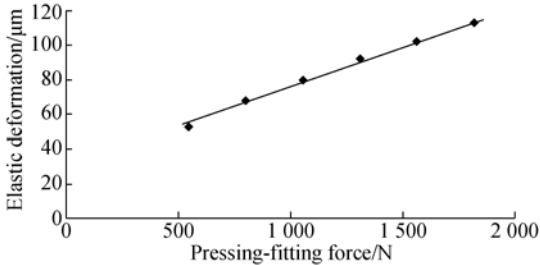


图 5 位移检测补偿原理

Fig. 5 Pressing-fitting displacement compensation

### 3.2 组件对准与调整策略

仪器采用机器视觉对准装置(图 6)检测夹持于上夹具的衔铁和与反馈杆相对、夹持于下夹具的弹簧管的相对位置。机器视觉装置安装在 3 自由度精密位移平台上，在检测时移动至压装仪器内部，压装时移出，如图 7 所示。装置由 2 套机器视觉系统构成，实现上下视野，机器视觉系统由工业 CCD 相机、高亮 LED 同轴光源、高精度低畸变远心光学镜头、直角反射镜等构成。

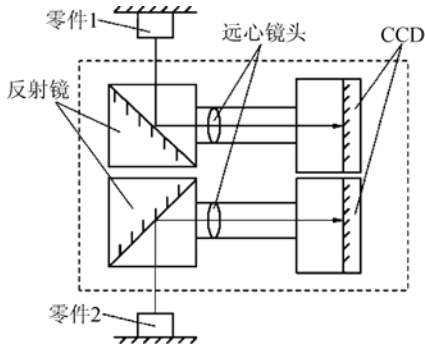


图 6 组件对准原理

Fig. 6 Part alignment's principle

$$\begin{bmatrix} S_{u1} & 0 & 0 \\ 0 & S_{v1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 600 - u_1 \\ & v_1 \\ & & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & D_x \\ 0 & 1 & D_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{u2} & 0 & 0 \\ 0 & S_{v2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ v_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中： $S_{u_i}$  和  $S_{v_i}$  ( $i=1, 2$ ) 为相机单个像素在世界坐标系中 X 和 Y 方向上的物理尺寸； $D_x$  和  $D_y$  为下相机原点上相机坐标系中的坐标值； $\gamma$  为两相机坐标轴

组件对准及调整策略如图 8 所示<sup>[11]</sup>。首先，通过特定的标定方法准确测量对准装置上下相机坐标系统的相对位置；由上下系统分别采集零件图像，顺序采用二值化等策略处理图像；统一上下零件在相机中的坐标；判断二者位置偏差并进行调整。

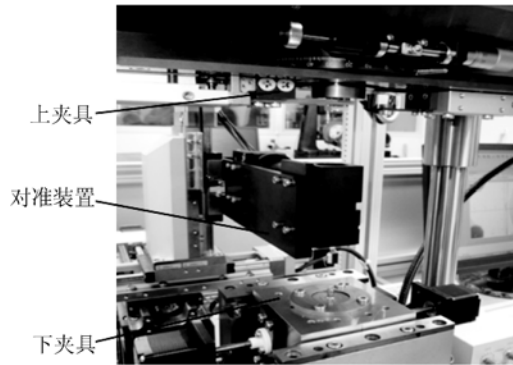


图 7 机器视觉对准装置

Fig. 7 Device of machine vision alignment

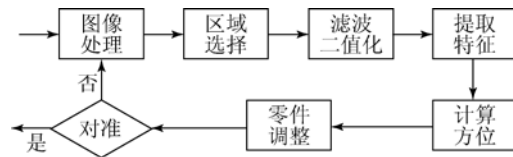


图 8 组件对准与调整策略

Fig. 8 Strategy of component alignment and adjustment

### 3.3 机器视觉对准装置标定

为实现组件准确对准，需确定机器视觉系统中上下两相机坐标系统的相对位置关系，即将相机坐标系统统一化。由于上下视野相机 X 轴方向相反，相机分辨率为 1 600 pixel×1 200 pixel，采集的图像平面坐标有如下关系：

偏转角度； $u_i$  与  $v_i$  为点在两相机系统中坐标值。

首先，采用光学标准尺对相机进行标定，进而确定  $S_{u_i}$  和  $S_{v_i}$  的值如表 1 所示。

表 1 上下视野相机长度标定

Tab. 1 Calibration of upper and lower CCD ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )

	$S_{ui}$	$S_{li}$
$i=1$	4.31	4.33
$i=2$	4.42	4.41

第二步,确定两相机图像坐标系的角度偏差。

将机器视觉对准装置中存在的 3 个坐标系分别定义为上下视野的 2 个相机图像平面坐标系  $U_iW_iV_i(i=1, 2)$ ,及固定视觉装置导轨组成的世界坐标系  $XOY$ 。导轨带动机器视觉装置在世界坐标系  $XOY$  中平面运动,通过分析每个相机坐标系相对于世界坐标系的角度偏差,进而确定相机坐标系统的偏转角度。

测量原理如图 9 所示。将标准尺放置于下夹具上方,调整标准尺与下相机  $V_2$  轴平行,并通过下相机采集图像,得出点 1 在  $U_2W_2V_2$  坐标系中的坐标值  $(u_{21}, v_{21})$ ;相机沿着  $Y$  轴方向移动一段距离  $(l_{12})$ ,即标尺点 1 与点 2 的距离)后,相机坐标系移动到  $U'_2W'_2V'_2$ ,判断此时标准尺上点 2 在相机坐标系的坐标值  $(u_{22}, v_{22})$ 。按照几何关系可推导出:

$$\tan \gamma_2 = \frac{S_{l2} \cdot (v_{22} - v_{21})}{l_{12}}, \quad (3)$$

式中:  $\gamma_2$  为下相机坐标系与世界坐标系转角。

同理,可以分析上相机坐标系与世界坐标系的偏转角度  $\gamma_1$ 。进而可判断上下相机坐标系角度偏转为:

$$\gamma = \gamma_1 - \gamma_2. \quad (4)$$

经过实验,得出上下视野相机坐标系相对于世界坐标系的转角偏差分别为  $0.30^\circ$  与  $-0.43^\circ$ 。

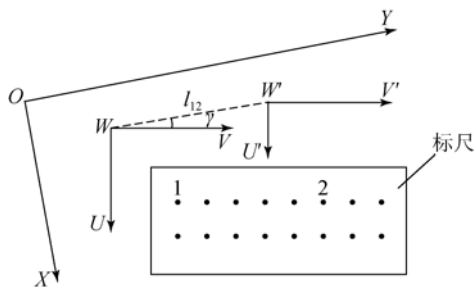


图 9 上下视野相机标定原理

Fig. 9 Position calibration of upper and lower CCDs

第三步,确定  $D_x$  与  $D_y$ 。

将表面经过研磨的铝块固定在下夹具上,如图 10 所示;驱动移动横梁下移,使施力圆台上的圆形凸台以一定压力压在铝块上,产生圆形印痕;移动横梁返回压装初始位置,圆形凸台与所压圆形印痕在实际压装过程中衔铁与反馈杆初始位置一致。通过视觉装置采集上下图像,如图 11 所示,经过图像处理得出上下图像圆心坐标分别为  $(807.7, 584.4)$  与  $(687.3, 511.6)$ ,将其带入式(2)即可求得  $D_x$  与  $D_y$ 。

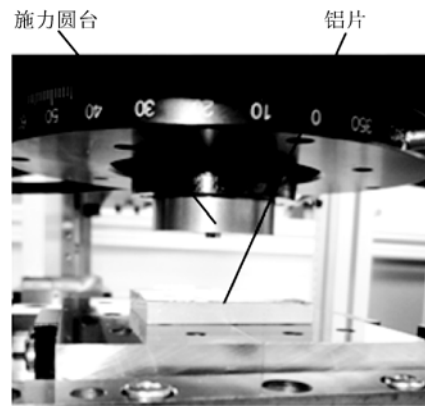


图 10  $D_x$  与  $D_y$  计算方法

Fig. 10 Computation method of  $D_x$  and  $D_y$

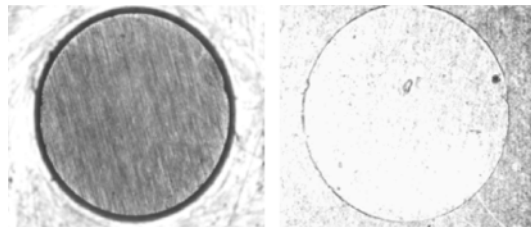


图 11 施力圆台与圆形印痕图像

Fig. 11 Image of circular boss and circular marks

经过计算,相机采集的 2 个图像中像素的图像平面坐标关系为:

$$\begin{cases} u_2 = -0.986 u_1 + 0.013 v_1 + 1\,477.240 \\ v_2 = 0.012\,5 u_1 + 0.986 v_1 - 75.009 \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $u_i, v_i(i=1, 2)$  分别为图像点在上下视野相机中的坐标值,单位为像素。

实际压装过程中可根据式(5),对采集得到的衔铁内孔与弹簧管外轴图像、弹簧管下端与反馈杆挡板及衔铁图像进行分析,采用 XY 位移平台与转台对零件相对位置进行调整,即可将两零件对准。

### 3.4 压装过程仿真研究

对于过盈联接组件,适当的工件预紧力是保证零件在工况下正常工作的前提,也是判断工件装配性能的关键。目前一般采用压装过程中的压装力判断零件压装后的预紧程度。文献[12]中,通过分析摩擦系数、过盈量、工件形状误差对压装曲线的影响,研究了衔铁-弹簧管过盈量在 12~14 μm,及反馈杆-弹簧管过盈量在 5~8 μm 时压装力-位移曲线的合理范围,该曲线可用于实际压装过程对压装力的分析。

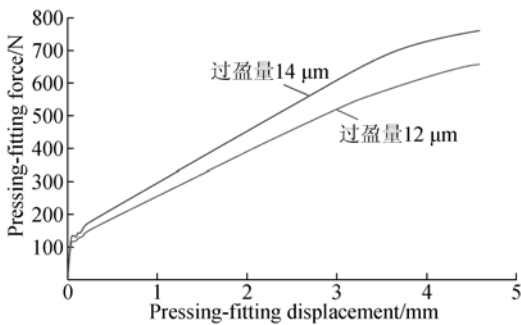


图 12 衔铁压装力-位移曲线的合理范围

Fig. 12 Analysis of reasonable force-displacement curves of armature assembly

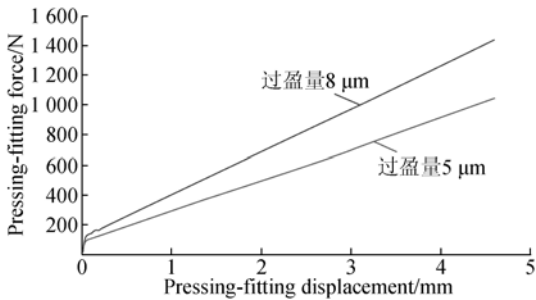


图 13 反馈杆压装力-位移曲线的合理范围

Fig. 13 Analysis of reasonable force-displacement curves of feedback lever assembly

## 4 压装与实验

对 5 组衔铁组件进行压装,通过分析压装力-位移曲线和装配后零件的形位偏差判断微小组件压装仪器的压装质量与效果。

图 14 所示为组件压装位移-压装力曲线,曲线总体比较平缓,且基本符合预期范围。

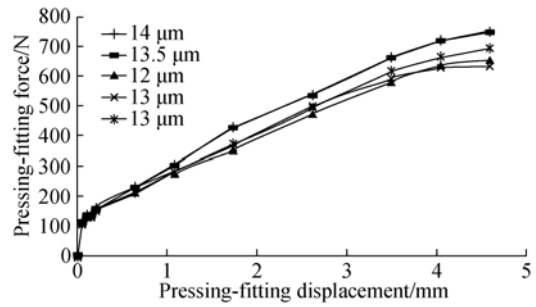


图 14 衔铁装配过程压装位移-压装力曲线

Fig. 14 Force-displacement curves of armature assembly

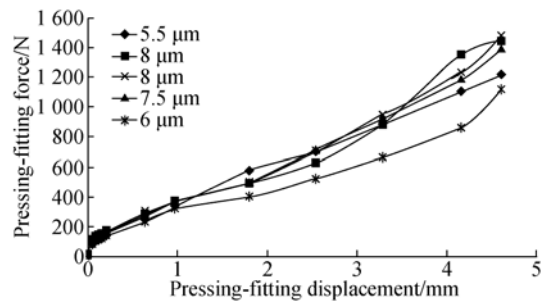


图 15 反馈杆装配压装位移-压装力曲线

Fig. 15 Force-displacement curves of feedback lever assembly

采用 3 坐标测量机对装配后的组件进行检测(如表 2),压装位置距离偏差小于 ±5 μm,平行度偏差小于 ±8 μm,反馈杆挡板相对于弹簧管底边垂直度偏差小于 10 μm。对照 2.1 节中装配精度指标可知,组件装配结果符合装配精度要求,装配过程稳定可靠且无需过多人工干预,仪器可满足微小组件压装要求。

表 2 装配后衔铁组件精度检测结果

Tab. 2 Assembly accuracy of armature parts

编号	衔铁压装	衔铁压装	反馈杆压装	反馈杆
	平行度/μm	位置/mm	位置/mm	垂直度/μm
1	8	11.535	23.514	8
2	6	11.525	23.515	6
3	8	11.527	23.505	10
4	8	11.533	23.508	4
5	4	11.533	23.512	9

注:表中衔铁压装理论位置为 11.530 mm,反馈杆压装理论位置为 23.510 mm。

## 5 结论

本文针对微小组件的压装装配要求,研制了组件精密压装系统。通过研究压装位移控制方法、组件压装对准与调整策略、机器视觉装置对准

精度标定方法等,使压装仪器满足了微小组件的压装精度要求。对随机抽取的5套零件进行了装配实验,结果表明压装位移-压装力曲线合理。测

量结果显示,压装后组件位置精度高于 $\pm 5 \mu\text{m}$ ,垂直度偏差小于 $10 \mu\text{m}$ 。零件装配精度满足装配工艺要求,可实现微小型零件的高精度压装装配。

#### 参考文献:

- [1] 沈飞,徐德,唐永建,等. 微操作/微装配中微力觉的测量与控制技术研究现状综述[J]. 自动化学报, 2014,40(5):785-797.  
SHEN F, XU D, TANG Y J, *et al.*. Review of measuring and control technology of microforce in micromanipulation and microassembly [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014,40(5):785-797. (in Chinese)
- [2] 余大海,吴文荣,沈飞,等. 点火靶半腔套装实验系统设计[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(2): 022018-1-6.  
YU D H, WU W R, SHEN F, *et al.*. Precision robotic system designed for hohlraum assembly [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(2): 022018-1-6. (in Chinese)
- [3] 张习文,王晓东,罗怡,等. 跨尺度微小型零件的测量与装配[J]. 纳米技术与精密工程, 2014, 10(4): 342-347.  
ZHANG X W, WANG X D, LUO Y, *et al.*. Measurement and assembly of trans-scale miniature parts [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2014, 10(4): 342-347. (in Chinese)
- [4] 张习文,王晓东,罗怡,等. 精密微小型零件自动装配系统显微机器视觉的照明自动优化[J]. 光电工程, 2012,39(4):14-20.  
ZHANG X W, WANG X D, LUO Y, *et al.*. Automatic illumination of microscopic machine vision optimization for precision miniature parts automatic assembly system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012,39(4):14-20. (in Chinese)
- [5] 赵林惠,王强,张建成,等. 面向某微小型平板类零件的微装配系统研究[J]. 现代制造工程, 2013, (3): 77-80.  
ZHAO L H, WANG Q, ZHANG J CH, *et al.*. Research on micro-assembly system for the micro-plate parts [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2013, (3): 77-80. (in Chinese)
- [6] 唐永龙,张之敬,张晓峰,等. 微装配正交精确对准系统的设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1542-1550.  
TANG Y L, ZHANG ZH J, ZHANG X F, *et al.*. Design of precise alignment orthogonal system used in micro-assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(7):1542-1550. (in Chinese)
- [7] 张之敬,杜芳,金鑫,等. 微小尺寸零件复杂边缘识别算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2):356-361.  
ZHANG ZH J, DU F, JIN X, *et al.*. Complex edge recognition algorithm of micro-accessory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2):356-361. (in Chinese)
- [8] DAS A N, POPA D O, STEPHANOU H E. Automated Microassembly using Precision based Hybrid Control [C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, Alaska, USA, 2010: 4106-4113.
- [9] XU Z, WANG J Y, WANG D J, *et al.*. Flexible microassembly methods for micro/nanofluidic chips with an inverted microscope [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012,97: 1-7.
- [10] 姜志峰,王晓东,由博,等. 一种微小零件夹持装置:中国,CN201310143556.1[P]. 2014-06-15.  
LOU ZH F, WANG X D, YOU B, *et al.*. A tiny part clamping device: China, CN201310143556.1 [P]. 2014-06-15. (in Chinese)
- [11] 徐征,王晓东,程新宇,等. 基于机器视觉的微装配控制策略及软件架构[J]. 光学精密工程, 2009, 17(4): 819-824.  
XU ZH, WANG X D, CHENG X Y, *et al.*. Control tactics and software architectures for micro-assembly based on machine vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 819-824. (in Chinese)
- [12] 胡菊云. 衔铁组件过盈装配技术研究[D]. 大连: 大连理工大学,2013.  
HU J Y. *Research on interference fit technology of armature modules* [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2013. (in Chinese)

#### 作者简介:



姜志峰(1978—),男,黑龙江肇东人,副教授,1999年、2008年于大连理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事几何量测量与微小组件装配等研究工作。E-mail: louzf@dlut.edu.cn



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授、博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究。E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)