

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.020

衔铁组件自动化装配的对准误差分析与补偿

韩宇, 刘文凯, 马诚, 娄志峰

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为实现衔铁组件的自动化装配,并保证组件装配质量,针对组件装配要求研制一套精密自动化装配系统。装配前,使用具有上下视野的视觉测量装置对组件位姿进行测量,其测量准确度将直接影响后续组件装配质量。针对影响视觉对准精度的相机安装系统误差和导轨运动误差进行分析,并进行补偿。通过实验验证:上述误差经过补偿后能够显著提高衔铁组件的轴孔对准精度,满足装配要求。

关键词:自动化装配设备;过盈联接;导轨运动误差;视觉标定

中图分类号:TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0103-07

Alignment Error Analysis and Compensation in Automatic Assembly of Armature Components

Han Yu, Liu Wenkai, Ma Cheng, Lou Zhifeng

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to realize automatic assembly of armature components and ensure assembly quality, a precision automatic assembly system is developed according to the assembly requirements. Before assembly, a visual measurement device with both upper and lower fields of view is used to measure the pose of the components, and its measurement accuracy will directly affect the subsequent assembly quality. The camera installation system error and guide rail motion error, which affect the vision alignment accuracy, are analyzed and compensated. The Experimental verification show that the shaft-hole alignment accuracy of the armature components is significantly improved after the error is compensated, meeting the assembly requirements.

Keywords: automatic assembly equipment; interference fit; guide rail motion error; visual calibration

0 引言

小型轴孔类过盈联接组件具有定心精度高,承载能力强、连接强度可靠等优点,目前被广泛应用于航空航天设备领域^[1-2]。

组件尺寸过小的局限性严重影响组件装配。基于机械压入法^[3-5]采用自动化装配,其具有效率高、一致性好、对操作者要求低等优点,成为该类型组件装配的主要研究方向^[6-9]。魏维君^[10]基于机器视觉与被动柔顺机构研制了一套装配系统,在零件接触前通过视觉系统检测对准,在零件接触时通过被动柔顺机构补偿零件位姿偏差从而实现精密装配。

为了实现小型轴孔类过盈联接组件的自动化装配,充分发挥自动化装配对准精度高的优势,国内外学者对待装配零件位置和姿态检测的关键问题进行了大量研究。例如, Ye 等^[11]搭建了基于共焦图像原理的微装配系统,使得对准分辨率可达 $0.5\ \mu\text{m}$ 。原天宇等^[12]搭建了一套棱镜分光式

单目立体视觉系统,分析棱镜镜组位姿对系统成像与视场产生的影响进而进行补偿。

本文从视觉测量装置的相机标定到零件对准过程,综合考虑其中由相机安装系统误差和导轨运动所产生的运动误差,进行详细分析与补偿,最终显著提高了视觉测量装置的对准精度。

1 衔铁组件装配要求及自动化设备

1.1 组件装配要求

本文以飞控伺服系统中的衔铁过盈联接组件为研究对象,组件由衔铁、弹簧管和反馈杆组成,组件的整体结构小巧(如图1所示)。

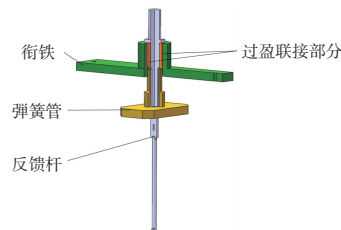


图1 衔铁组件

第一作者简介:韩宇(1999—),男,辽宁辽阳人,硕士研究生,研究方向为精密微小组件装配,yu_han0809@163.com。

零件间均采用过盈配合,配合接触长度仅有 6 mm,过盈量为 6~15 μm 。因此装配前需要保证零件的孔轴对准精度,同时零件间还应保证一定的姿态角度关系。

1.2 精密自动化装配设备

基于街铁过盈联接组件的装配要求,研制了一台精密自动化装配设备,如图 2 所示。采用螺

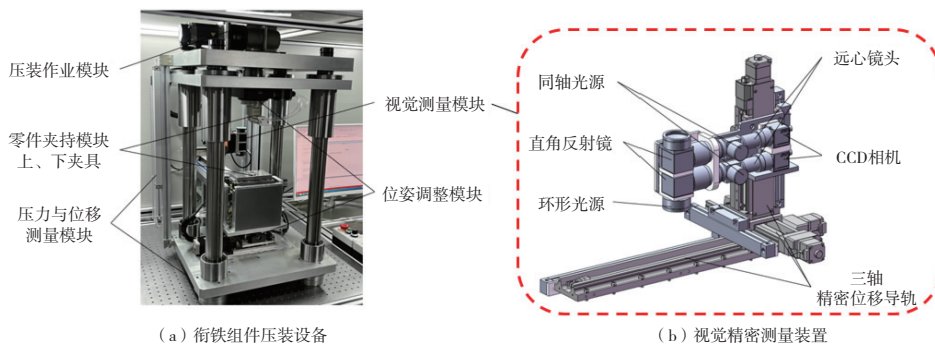


图 2 精密自动化装配设备及视觉测量装置

视觉测量模块由一组 xyz 三轴精密位移导轨搭载了高分辨率 CCD 相机、远心镜头、同轴光源、环形光源等视觉测量元器件。通过上下相机拍摄零件的外圆与内孔,经由计算机进行特征提取其圆心坐标,以完成零件间相对位置的测量。

2 组件压装过程误差源分析及建模

2.1 坐标系建立

以视觉导轨 x 轴为绝对坐标系 x 轴,视觉导轨 x 轴光栅尺原点为坐标原点,建立与下夹具平面平行的 xOy 平面,以笛卡儿坐标系建立如图 3 所示的绝对坐标系。由压装作业模块、导向轴、直线轴承等构成了压装轴。

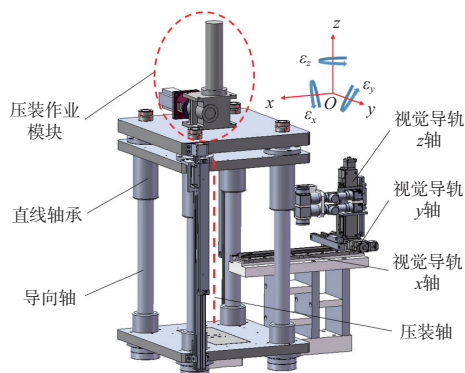


图 3 建立坐标系

2.2 误差源分析

根据组件装配过程,可将系统误差源分为 3 部

分:相机安装存在的系统误差; x 线性轴、 y 线性轴、 z 线性轴运动模块误差;导向轴压装过程的运动误差。

1) 相机安装存在的系统误差

在零件位姿测量过程中,上相机、下相机通过拍摄获取零件位姿信息,通过构建相对关系计算偏差以进行调整。但由于上相机、下相机在安装时存在偏差,将导致两坐标系存在位置偏差和角度偏差,因此在计算相对偏差时应予以修正补偿。

2) x 线性轴、 y 线性轴、 z 线性轴运动模块误差

在导轨运动过程中,由于导轨制造误差的存在,使得滑台的实际运动位姿与理想运动位姿存在偏差。单根导轨具有 6 项自由度几何误差,如图 4 所示。由 δ_x 轴向定位误差、 δ_y 水平直线度误差、 δ_z 竖直直线度误差 3 项位置误差、 ϵ_x 滚动角误差、 ϵ_y 俯仰角误差和 ϵ_z 偏摆角误差 3 项角度误差组成。多根导轨的误差则可以看成多组两两垂直的导轨间垂直度误差和单根导轨误差之和。

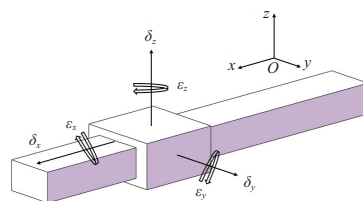


图 4 直线运动轴运动误差

3) 导向轴压装过程的运动误差

在零件在压装时,由于导向轴运动误差的存在,会导致对准后的零件在经过导向轴移动后再

导轨的实际运动位置将产生 E_x 、 E_y 的位置误差和绕 z 轴旋转角度误差 $\Delta\epsilon_z$,需要在导轨运动的理论位置基础上进行误差补偿。

相机从位置1运动到位置2时,在相机坐标系中实际位移为

$$\begin{bmatrix} L'_x \\ L'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{0_d} & \sin\theta_{0_d} \\ -\sin\theta_{0_d} & \cos\theta_{0_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 θ_{0_d} 为绝对坐标系相对于下相机坐标系的角度。

下相机在两位置所拍摄图像中坐标在下相机坐标系中的相对位置关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_x \\ L'_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\Delta\epsilon_z & \sin\Delta\epsilon_z \\ -\sin\Delta\epsilon_z & \cos\Delta\epsilon_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{d2} \\ y'_{d2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x'_{d1} \\ y'_{d1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

下相机和上相机在经过导轨运动前后按此顺序拍摄,图像中坐标在下相机坐标系中的相对位置关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_x \\ L'_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\Delta\epsilon_z & \sin\Delta\epsilon_z \\ -\sin\Delta\epsilon_z & \cos\Delta\epsilon_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_u \\ y'_u \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x'_d \\ y'_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

若上相机拍摄在前,下相机在后,则图像中坐标在下相机坐标系中的相对位置关系为

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_x \\ L'_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\Delta\epsilon_z & \sin\Delta\epsilon_z \\ -\sin\Delta\epsilon_z & \cos\Delta\epsilon_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_d \\ y'_d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x'_u \\ y'_u \end{bmatrix} \quad (10)$$

3) 导向轴压装过程导致的空间误差

当自动化装配设备的压装方向与绝对坐标系中的 z 方向平行时,在经过视觉测量装置对准调整后的零件位置在上相机、下相机中的相对位置关系($\Delta x, \Delta y$)本应该趋近于0。实际上由于导向轴安装误差的存在,压装轴(p 轴)运动时将产生运动误差,如图7所示。

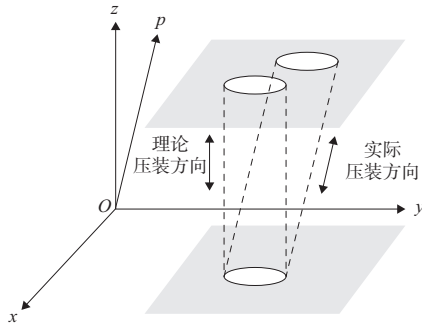


图7 经过运动的相机坐标系相对位置关系示意图

零件的实际对准位置与理论对准位置存在偏差

$$\begin{cases} E_x(p) = \delta_{xb}(p) + \epsilon_y(p) \cdot L_{zb}(p) - \epsilon_z(p) \cdot L_{yb}(p) - \alpha_{xp} \cdot P \\ E_y(p) = \delta_{yb}(p) - \epsilon_x(p) \cdot L_{zb}(p) + \epsilon_z(p) \cdot L_{xb}(p) - \alpha_{yp} \cdot P \\ E_z(p) = \delta_{za}(p) + \epsilon_x(p) \cdot L_{ya}(p) - \epsilon_y(p) \cdot L_{xa}(p) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\delta_{za}(p)$ 为由压装轴(p 轴)定位误差; $\delta_{xb}(p)$ 、 $\delta_{yb}(p)$ 分别为压装轴 x 轴、 y 轴向直线度误差; $\epsilon_x(p)$ 、 $\epsilon_y(p)$ 、 $\epsilon_z(p)$ 分别为压装轴的俯仰角误差、偏摆角误差和滚动角误差; $L_{xa}(p)$ 、 $L_{ya}(p)$ 、 $L_{xb}(p)$ 、 $L_{yb}(p)$ 、 $L_{zb}(p)$ 分别为压装轴上的阿贝偏位和布莱恩恩偏位; α_{xp} 和 α_{yp} 分别为压装轴的垂直度误差。

应在视觉测量对准时根据压装轴的运动误差对零件间相对位置做出相应的调整

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{aim} \\ \Delta y_{aim} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{0_d} & \sin\theta_{0_d} \\ -\sin\theta_{0_d} & \cos\theta_{0_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(p) \\ E_y(p) \end{bmatrix} \quad (12)$$

3 误差参数标定

3.1 x 线性轴、 y 线性轴、 z 线性轴及压装轴的垂直度误差测量

首先将000级方箱放置在下夹具平面上,夹持有千分表的磁性表座如图8所示安装固定在视觉导轨 x 轴上,表头与方箱 xOz 平面接触并记录千分表初始值,沿视觉导轨 x 轴正方向移动40 mm,每间隔5 mm记录千分表示值,由此求得方箱坐标系 x 轴相对于视觉导轨 x 轴角度。同理测量方箱坐标系 y 轴相对于视觉导轨 y 轴角度。

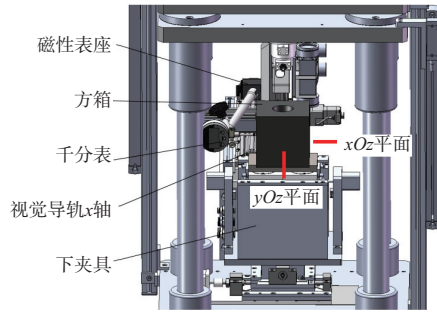


图8 视觉导轨 x 轴与方箱角度测量实验

经计算方箱坐标系 x 轴相对于视觉导轨 x 轴夹角 $\theta_x = -2.262^\circ$,方箱坐标系 y 轴相对于视觉导轨 y 轴夹角 $\theta_y = -2.319^\circ$ 。由式(13)

$$\alpha_{xy} = \theta_x - \theta_y \quad (13)$$

计算得出 $\alpha_{xy} = 0.0574^\circ$ 。

将夹持有千分表的磁性表座固定在视觉导轨 z 轴上,表头与方箱 xOz 平面接触并记录千分表初始值,沿视觉导轨 z 轴负方向移动40 mm,每间隔5 mm记录千分表示值。同理将测头与方箱 yOz

平面接触,移动导轨并记录数据。经计算得出视觉导轨 z 轴在方箱坐标系中的 xOz 和 yOz 平面中的投影与视觉导轨 z 轴的夹角 $\alpha'_{xz} = -0.040^\circ$ 、 $\alpha'_{yz} = 0.023^\circ$ 。

经过坐标转换可计算得视觉导轨 z 轴在绝对坐标系中的 xOz 和 yOz 平面中的投影与视觉导轨 z 轴的夹角 α_{xz} 和 α_{yz} ,由式(14)计算得到

$$\begin{cases} \alpha_{xz} = \tan^{-1}(\cos\theta_x \cdot \tan\alpha'_{xz} - \sin\theta_x \cdot \tan\alpha'_{yz}) = -0.039^\circ \\ \alpha_{yz} = \tan^{-1}(\sin\theta_x \cdot \tan\alpha'_{xz} + \cos\theta_x \cdot \tan\alpha'_{yz}) = 0.025^\circ \end{cases} \quad (14)$$

同理可以测量计算得出压装方向在绝对坐标系中的 xOz 和 yOz 平面中的投影与 z 轴的夹角 $\alpha_{xp} = -0.090^\circ$ 和 $\alpha_{yp} = -0.155^\circ$ 。

3.2 x 线性轴、 y 线性轴、 z 线性轴及压装轴的运动误差测量

以视觉导轨 x 轴的运动误差测量为例。视觉

导轨 x 轴的定位误差经由安装在导轨旁的光栅尺与读数头测量,功能点相对于读数头的距离即为阿贝偏位。视觉导轨 x 轴的直线度误差由位置敏感探测器基于激光准直原理测量,测量精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。功能点相对于位置敏感探测器安装位置的距离即为布莱恩偏位。视觉导轨 x 轴的俯仰角和偏摆角误差由四象限探测器基于激光自准直原理测量,测量精度为 $\pm 1''$ 。视觉导轨 x 轴的滚动角误差由水平仪(青岛前哨 WLL11 型,分辨率 $0.2''$)测量。

视觉导轨 y 轴导轨运动误差测量过程与视觉导轨 x 轴测量过程完全相同。视觉导轨 z 轴和压装轴除滚动角误差使用电感测头和大理石方尺相配合的方式测量外,其他误差测量过程也与视觉导轨 x 轴相同。测量结果如图 9 所示。

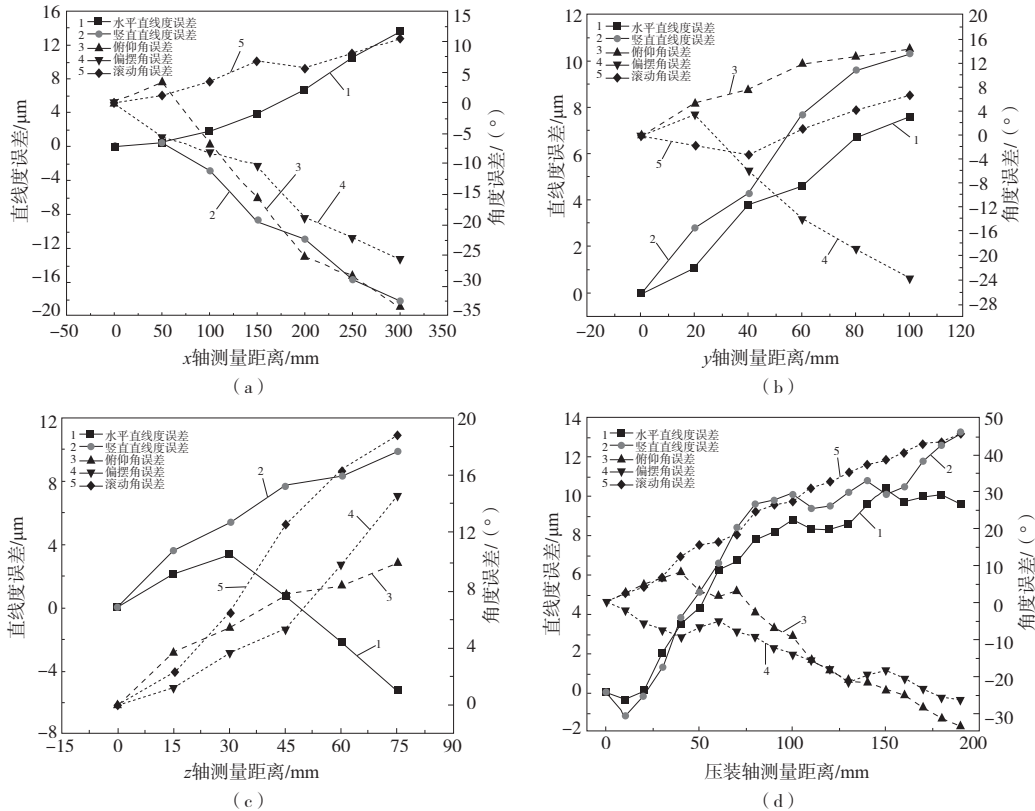


图 9 视觉导轨 x 轴、 y 轴、 z 轴及压装轴导轨运动误差曲线

3.3 上相机、下相机参数标定

上相机、下相机参数标定之前,需要明确相机坐标系和绝对坐标系之间的关系。标定原理如图 10 所示。将平尺固定在下夹具上,夹持有千分表的磁性表座固定在视觉导轨 x 轴上,表头与平尺表面接触并记录千分表初始值,移动视觉导轨 x 轴 40 mm,每间隔 5 mm 记录千分表示值。经计算

得出平尺平面与视觉导轨 x 轴夹角 $\theta_x = -0.407^\circ$ 。

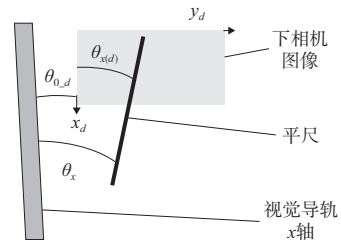


图 10 下相机坐标系与绝对坐标系角度标定原理

使用下相机拍摄平尺,经过图像处理得出平尺与下相机 x 轴的夹角为 $\theta_x(d) = 0.165^\circ$ 。下相机坐标系 x 轴与视觉导轨 x 轴的夹角

$$\theta_{0,d} = \theta_x(d) - \theta_x \quad (15)$$

经过计算得出 $\theta_{0,d} = 0.572^\circ$

1) 上相机、下相机像素尺寸标定

使用定制的标定板对上相机、下相机进行标定,得到相机单个像素的物理尺寸,标定结果如表 2 所示。

表 2 相机像素物理尺寸 单位: $\mu\text{m} \cdot \text{px}^{-1}$

参数	S_x	S_y
上相机	1.850	1.850
下相机	1.853	1.852

2) 上相机、下相机安装夹角的标定

将标定板固定在移动横梁上,通过移动横梁和相机上下移动,分别用上相机、下相机拍摄标定板上用于相机角度标定的特征,过程如图 11 所示。

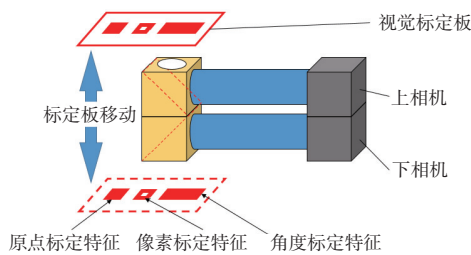


图 11 相机标定过程

对拍摄图像进行特征提取分别得出特征角度为 θ_u, θ_d 。由于视觉导轨 z 轴和移动横梁的移动,相机拍摄到的图像会受到导轨滚动角 $\Delta\epsilon_z(z)$ 和 $\Delta\epsilon_z(p)$ 的影响。因此上相机坐标系相对下相机的角度为

$$\theta_{u,d} = \theta_u - \theta_d + \Delta\epsilon_z(z) + \Delta\epsilon_z(p) \quad (16)$$

经计算得出 $\theta_{u,d} = 0.97^\circ$

3) 上相机、下相机原点相对位置标定

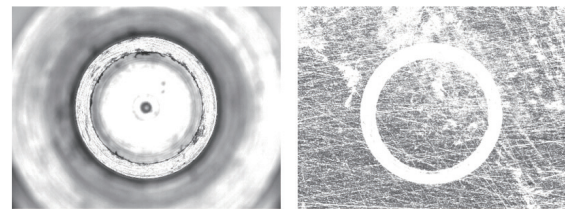
通过移动横梁和相机上下移动,分别用上相

机、下相机拍摄标定板上用于相机原点相对位置标定的特征。对拍摄图像进行特征提取得出特征点在上相机、下相机图像中的坐标分别为 $(x_u, y_u) = (1\,478.5, 1\,994.4)$ 和 $(x_d, y_d) = (1\,586.3, 1\,974.4)$ 。根据式(1)、式(2)、式(7)、式(10)可计算得出 $(D_x, D_y) = (-312.1, 263.2)$ 。

4 补偿验证实验

4.1 对准精度验证

将对第 3 节所测量的误差参数代入到第 2 节误差模型中补偿,零件对准精度的验证首先采用压印法进行。将经过研磨膏研磨后的光滑标定铝板固定在下夹具上,利用上夹具夹持环形压头,压头在直线推杆的作用下向下运动,使其与标定铝板缓慢接触,压头在 200 kg 压力下在标定板上留下环形印记。向上移动压头 160 mm,分别用上相机、下相机拍摄环形压头和标定板上的环形印记。如图 12 所示,经过特征提取得出两图像中的环形特征的圆心位置。继续使压头向上 20 mm,每间隔 5 mm,使用上相机移动相应的高度再次进行拍摄,得出相应的圆心位置。



(a) 环形压头图像

(b) 标定板压印图像

图 12 压印实验图像

相机拍摄的压头与压印图像中圆心相对位置,即为对准时的实际相对位置。该相对位置是由压装轴的运动误差造成,应同时满足式(12)。将通过相机所求得的相对位置与压装轴的运动误差作比较,对比结果如表 3 所示。结果表明,经过补偿后零件的对准精度可达 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

表 3 相机采集相对位置对比结果

环形印记 圆心坐标/px	环形压头 移动距离/mm	环形压头 圆心坐标/px	经相机求得的 相对位置/ μm	压装轴 运动误差/ μm	误差/ μm
(1 618.2, 1 996.6)	160	(1 531.8, 2 001.3)	(-414.5, 219.0)	(-412.2, 222.4)	(2.3, 3.4)
	165	(1 529.1, 2 003.4)	(-419.4, 223.0)	(-418.6, 226.8)	(0.8, 3.8)
	170	(1 525.6, 2 005.5)	(-425.8, 227.0)	(-424.3, 230.9)	(1.5, 3.9)
	175	(1 522.3, 2 007.1)	(-431.9, 230.0)	(-429.9, 234.6)	(2.0, 4.6)
	180	(1 519.7, 2 009.3)	(-436.6, 234.2)	(-434.3, 237.2)	(2.3, 3.0)

4.2 压装实验验证

随机抽取 5 组衔铁组件对其进行压装,通过分析压力-位移曲线和装配后组件的形位偏差验证视觉测量装置的对准精度。

衔铁与弹簧管、反馈杆与弹簧管的压力-位移曲线如图 13 所示,曲线相对平滑,与经仿真分析的理论压力-位移曲线相比,压装力均处于理论范围。对装配后的组件使用三坐标测量仪进行检测,组件形位偏差均满足装配要求。结果表明:组件装配质量较好,进一步验证了视觉测量装置精度。

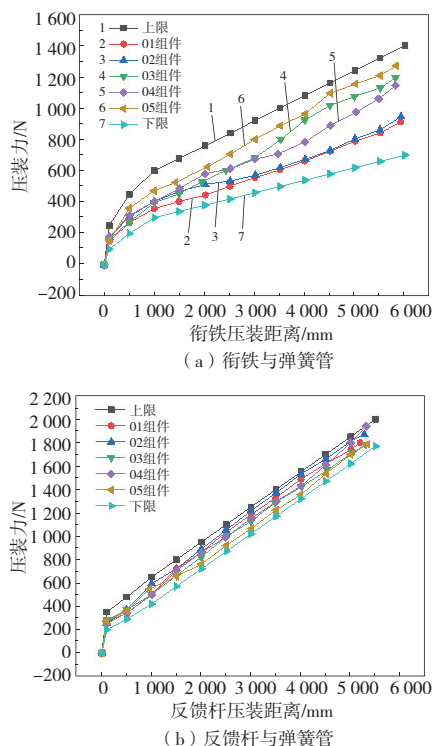


图 13 衔铁组件装配时压力与位移曲线

5 结语

为提高衔铁组件在自动化装配过程中的质量,研制了一套精密自动化装配系统。本文以系

统中的视觉位姿测量模块为研究对象,分析相机在测量移动过程中所产生的运动误差对于相机安装的系统误差的标定和零件位置对准的影响,提出了相应的标定与补偿方法。经过实验验证:经过补偿后小型轴孔过盈组件对准精度可提升至 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] 郭进勇,张群兴,李全俊,等. 固体火箭发动机喷管组件过盈装配强度分析[J]. 兵工自动化,2021,40(2): 93-96.
- [2] 王军政,赵江波,汪首坤. 电液伺服技术的发展与展望[J]. 液压与气动,2014,38(5):1-12.
- [3] 李凯. 过盈配合组装方法的研究[J]. 价值工程,2017,36(35):135-136.
- [4] 郑军棋,姬生圆,刘莎莎,等. 电磁阀过盈装配工艺技术优化研究[J]. 新技术新工艺,2023(4):10-13.
- [5] 张厚祖. 连杆衬套过盈装配可靠性研究及优化[D]. 太原:中北大学,2020.
- [6] 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.
- [7] Lou Z F, Wang X Y, Wang Y, et al. Precision assembly method of a kind of small interference fitting parts[J]. Sādhanā,2019,44(6):144.
- [8] 李伟. 微小惯性组件精密装配设备控制与系统标定[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [9] 武文斌. 伺服阀喷嘴自动压装设备研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [10] 魏维君. 基于机器视觉与被动柔顺机构的孔轴精密装配研究[J]. 机械工程师,2015(6):138-141.
- [11] Ye X, Wu F F, Zhang Z J, et al. Laser scanning confocal image alignment assists sub-micron accuracy micro-assembly[J]. Procedia CIRP,2018,76:53-58.
- [12] 原天宇,代祥俊,杨福俊. 单目立体视觉中的系统误差与棱镜位姿对视场的影响评估[J]. 光学学报,2024,44(8):0812004.
- [13] 宋治崑. 导轨运动误差测量方法及装备空间误差分析[D]. 大连:大连理工大学,2022.

收稿日期:2024-03-14